



جداسازی اجزای فاکتور تشعشعات کلی مواد رنگزای فلورسنت

فاطمه خاکزار بفرولی^۱، هاله خلیلی^{۲*}، مهدی صفی^۳

۱- دانشجوی دکترا، دانشکده مهندسی نساجی، دانشگاه صنعتی اصفهان، اصفهان، ایران، صندوق پستی: ۸۴۱۵۶۸۳۱۱۱

۲- استادیار، دانشکده مهندسی نساجی، دانشگاه صنعتی اصفهان، اصفهان، ایران، صندوق پستی: ۸۴۱۵۶۸۳۱۱۱

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

تاریخ دریافت: ۹۳/۶/۸ تاریخ پذیرش: ۹۴/۶/۲۳ در دسترس به صورت الکترونیکی از: ۱۳۹۴/۱۲/۲۰

چکیده

اجسام فلورسنت پرتوهای فرابنفش یا مرئی تابیده شده در طول موج‌های کوتاه را جذب کرده و در طول موج‌های بلندتر انتشار می‌دهند. منحنی پرتوهای طیفی مواد فلورسنت شامل دو جزء انعکاس واقعی و فلورسنت است. مدل رنگی کیوبلکا-مانک معمول که انعکاس یک نمونه نیمه شفاف را تشریح می‌کند از فلورسنس صرف نظر کرده، از این رو باید بخش انعکاسی حقیقی منحنی پرتوهای طیفی مواد فلورسنت از بخش انتشار فلورسنتی جدا شود. استفاده از فیلتر برای کاهش فلورسنس، استفاده از طیف سنج در دو حالت چندرنگ- تک رنگ (و برعکس) و روش محاسباتی حذف و یا تضعیف فلورسنس از جمله روش‌هایی است که برای این منظور وجود دارند. در تحقیق حاضر برای جداسازی انعکاس واقعی از صدور فلورسنس، مقدار فاکتور تشعشعات کلی طیفی مواد رنگزای فلورسنت در سراسر طیف مرئی با مقدار انعکاس زمینه رنگ نشده مقایسه شد و محدوده تحریک، هم پوشانی و صدور رنگزای فلورسنت تعیین شد. با در نظر گرفتن نظریه کیوبلکا-مانک برای بخش انعکاس واقعی، به راحتی فاکتور تشعشعات طیفی به دو قسمت انعکاس واقعی و فلورسنس تفکیک می‌شود. این روش بسیار ساده بوده و به تجهیزات خاصی نیاز ندارد.

واژه‌های کلیدی: فلورسنس، فاکتور تشعشعات کلی، انعکاس واقعی، انعکاس فلورسنت، کیوبلکا-مانک.

Separation of the Total Radiance Factor of Fluorescent Dyes

F. Khakzar^{*1}, H. Khalili¹, M. Safi³

¹ Department of Textile Engineering, Isfahan University of Technology, P.O. Box: 8415683111, Isfahan, Iran.

² Department of Color Physics, Institute for Color Science and Technology, P.O. Box: 16765-654, Tehran, Iran.

Received: 30-08-2014

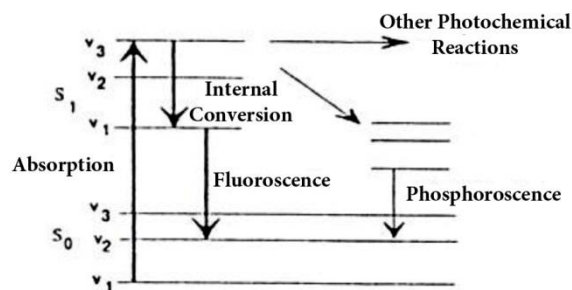
Accepted: 14-09-2015

Available online: 10-03-2016

Abstract

Ultraviolet and visible radiations are absorbed by fluorescent materials at short wavelengths and re-emitted at longer wavelengths. Spectral curve of fluorescent material consists of true and fluorescent reflection. The common Kubelka-Munk color model describes the reflectance of a translucent sample without considering fluorescence component; so, true spectral reflection of fluorescent materials should be separated from fluorescence emission. To this aim, there are some methods such as filter application to reduce fluorescence component, polychromatic and monochromatic spectrophotometers and computational methods to eliminate or decrease the fluorescence effect. At present study, to separate the true reflectance component from the fluorescence emission, the total spectral radiance factor of the fluorescent dyes was compared with the reflectance of the substrate through all visible wavelengths and exciting, crossover and emission region were determined. Accordingly, the total radiance factor curve can be separated into two parts of true and fluorescence reflection with considering of the Kubelka-Munk theory for the true reflectance part, simply and without any especial equipment. *J. Color Sci. Tech.* 9(2016), 351-361©. Institute for Color Science and Technology.

Keywords: Fluorescence, Total radiance factor, True reflection, Fluorescent reflection, Kubelka-Munk.



شکل ۲: دیاگرام سطوح انرژی جابلونسکی [۲].

هنگامی که یک مولکول در پایین ترین سطح انرژی یا در حالت پایه (S_0) یک فوتون نور جذب نماید، الکترون می تواند به برخی از سطوح ارتعاشی حالت پراانرژی S_1 (مثل V_n) ارتقا کند. مقیاس زمانی برای جذب، از مرتبه 10^{-15} ثانیه می باشد [۲].

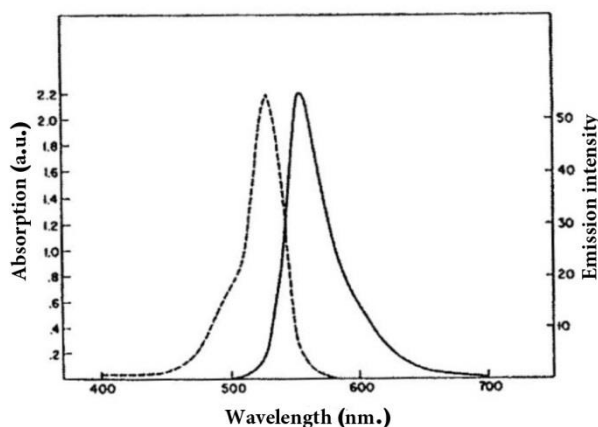
از آنجایی که رنگزاهای فلورسنت شیده های درخشانی دارند استفاده از آنها در صنایع مختلف از جمله نساجی بسیار متداول گشته است. این مواد معمولاً در فام های زرد، قرمز، صورتی و بنفش ته قرمز وجود داشته و به دلیل قابلیت دید بالایی که دارند در تولید لباس های ایمنی و حفاظتی به کار می روند. همچنین از این مواد رنگزا در منسوجات زنانه، لباس های پلیس و رفتگران، رنگ های پوشاننده سطوح^۵، اسباب بازی های درخشان، مداد رنگی، لباس ها و تابلوهای هشدار دهنده ایمنی و امور مربوط به راهنمایی و رانندگی، استفاده می شود. در منسوجات، ترکیب مواد رنگزای فلورسنت انتخابی با مواد رنگزای غیرفلورسنت جلوه های رنگی خاصی ایجاد می کند. اگرچه میزان فلورسنت حاصل شده در این حالت پایین می آید ولی این ترکیبات مورد استفاده قرار می گیرند. به دلیل درخشندگی و خواص نوری منحصر به فرد رنگزاهای فلورسنت، توجه طراحان مد به مواد رنگزای فلورسنت معطوف گردیده است. این نوع مواد بیشتر روی اکریلیک و پلی استر استفاده می شوند [۴، ۳].

منحنی پرتوهای طیفی مواد فلورسنت شامل دو جزء انعکاس واقعی و فلورسنت است. بنابراین به جای منحنی انعکاسی از فاکتور تشعشع کلی^۶ که مجموع فاکتور تشعشعات انعکاسی و پرتوهای فلورسنسی است، استفاده می گردد. اگر $S(\lambda)$ منحنی فاکتور تشعشعات کلی اندازه گیری شده باشد، $R(\lambda)$ انعکاس واقعی نمونه بدون در نظر گرفتن فلورسنت و $F(\lambda)$ توان فلورسنت منتشره از نمونه را نشان می دهد. $E(\lambda)$ نیز توان منبع نوری برخوردی به داخل نمونه می باشد (رابطه ۱).

۱- مقدمه

۱-۱- فلورسنس^۱

وقتی یک سیستم (مولکول یا اتم) فوتون جذب می کند، به حالت برانگیخته وارد می شود. یکی از راه های بازگشت سیستم به تعادل و از دست دادن انرژی، صدور فوتون دریافت شده می باشد^۲. زمانی که فوتون صادر شده انرژی کمتری نسبت به فوتون جذب شده داشته باشد این تفاوت انرژی، شیفت استوکس نام دارد. استوکس فلورسنس، صدور دوباره فوتون ها در طول موج بالاتر توسط مولکولی است که فوتون ها را در طول موج کوتاه تر جذب کرده است. جذب انرژی و صدور آن از خصوصیت منحصر به فرد یک ساختار مولکولی خاص است. در شکل ۱ شیفت استوکس (تفاوت بین پیک های جذب و صدور) برای رنگزای رودامین حدود ۲۵ نانومتر گزارش شده است. در مواد غیرفلورسنت، انرژی جذب شده به حرارت تبدیل می شود [۱].



شکل ۱: طیف جذبی (خط چین) و صدور (خط ممتد) رنگزای فلورسنت رودامین [۱].

در صورتی که انرژی صادر شده از ماده فلورسنت در حالت برانگیخته به دلیل برخورد با مولکول های دیگر، به صورت غیرتابشی آزاد شود، خاصیت فلورسنسی در ناحیه مرئی محو می گردد. این اثر، خاموش شونده گی^۳ فلورسنس نامیده شده و به دلیل وجود مولکول غیرفلورسنت در مخلوط و یا غلظت بالای ماده فلورسنت - که در این صورت اصطلاح خود خاموش شونده گی به کار می رود - رخ می دهد [۱]. نمودار جابلونسکی^۴ در شکل ۲ پدیده فلورسنس را نشان می دهد. در این دیاگرام سطوح مختلف انرژی الکترونیکی (S_0, S_1, S_2, \dots) و انرژی ارتعاشی (V_1, V_2, \dots) یک مولکول نشان داده شده است.

5- Paint

6- Total Radiance Factor

1- Fluorescence

۲- روش دیگر از دست دادن انرژی گرمایی است.

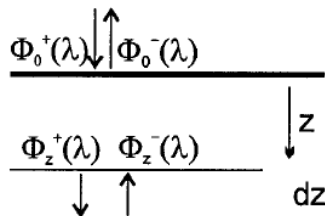
3- Self quenching

4- Jablonski diagram

$$\Phi_z^+(\lambda) = \Phi_0^+(\lambda) \exp(-Z\sqrt{K(\lambda)^2 + 2K(\lambda)S(\lambda)}) \quad (۶)$$

با مشتق‌گیری از رابطه ۶ و جایگذاری در رابطه ۳، $\Phi_z^-(\lambda)$ که مقدار پرتو انتشار یافته رو به بالا در فاصله Z از سطح است از رابطه ۷ به دست می‌آید.

$$\Phi_z^-(\lambda) = \Phi_0^+(\lambda) \left(1 + \frac{K(\lambda)}{S(\lambda)} - \sqrt{\left(\frac{K(\lambda)}{S(\lambda)} + 1\right)^2 - 1}\right) \exp(-Z\sqrt{K(\lambda)^2 + 2K(\lambda)S(\lambda)}) \quad (۷)$$



شکل ۳: پرتو نفوذی $\Phi_z^+(\lambda)$ و $\Phi_z^-(\lambda)$ درون یک لایه [۶، ۷].

با استفاده از این تئوری صرف‌نظر از فلورسنس، فاکتور تشعشعات انعکاسی به صورت نسبت پرتوهای منعکس شده از نمونه به پرتوهای برخوردی تحت شرایط طیفی و اندازه‌گیری یکسان مطابق رابطه ۸ بیان می‌شود.

$$R_\infty(\lambda) = \frac{\Phi_0^-(\lambda)}{\Phi_0^+(\lambda)} = 1 + \frac{K(\lambda)}{S(\lambda)} - \sqrt{\left(\frac{K(\lambda)}{S(\lambda)} + 1\right)^2 - 1} \quad (۸)$$

که $\Phi_0^-(\lambda)$ پرتو منعکس شده، $\Phi_0^+(\lambda)$ پرتو برخوردی، $K(\lambda)$ ضریب جذب و $S(\lambda)$ ضریب انتشار جسم است [۷].

در محدوده طول موج تحریک رنگ فلورسنت که به صورت $\varepsilon_1 < \varepsilon < \varepsilon_2$ بیان می‌شود انرژی ذخیره شده در نمونه، به صورت فلورسنت در محدوده طول موج صدور رنگ فلورسنت ($\lambda_1 < \lambda < \lambda_2$) منتشر می‌شود.

با استفاده از مدل دو پرتویی با در نظر گرفتن فلورسنس، محدوده طول موج تحریک رنگینه فلورسنت به صورت $\varepsilon_1 < \varepsilon < \varepsilon_2$ بوده و برای محدوده طول موج صدور رنگ فلورسنت ($\lambda_1 < \lambda < \lambda_2$) یک توسعه نیاز است. در محدوده طول موجی که رنگزا، فلورسنس صادر می‌کند هر دو پرتو نوری Φ_z^+ و Φ_z^- توسط فلورسنس رخ می‌دهد که با رابطه‌های ۹ و ۱۰ بیان می‌گردد. مقدار $f_z(\lambda)$ پرتو فلورسنت در یک لایه به عمق z را نشان می‌دهد.

$$\frac{d\Phi_z^+(\lambda)}{dz} = -[K(\lambda) + S(\lambda)]\Phi_z^+(\lambda) + S(\lambda)\Phi_z^-(\lambda) + \frac{f_z(\lambda)}{2} \quad (۹)$$

$$S(\lambda) = R(\lambda) + \frac{F(\lambda)}{E(\lambda)} \quad (۱)$$

به بیان دیگر مطابق رابطه ۲ فاکتور تشعشعات کلی مجموع فاکتور تشعشعات انعکاسی و صدور فلورسنسی است [۵].

$$\beta_T(\lambda) = \beta_L(\lambda) + \beta_S(\lambda) \quad (۲)$$

که در رابطه ۲، $\beta_T(\lambda)$: فاکتور تشعشعات کلی در طول موج λ ، $\beta_S(\lambda)$: فاکتور تشعشعات انعکاسی نمونه در طول موج λ ، $\beta_L(\lambda)$: صدور فلورسنسی نمونه در طول موج λ می‌باشد.

۱-۲- توسعه مدل کیوبلکا-مانک برای مواد فلورسنت

مدل رنگی کیوبلکا-مانک یک مدل ریاضی است که انعکاس یک نمونه نیمه‌شفاف را تشریح می‌کند. این مدل ضرایب جذب و انتشاری که در نمونه اتفاق می‌افتد را در نظر گرفته و رفتار انعکاسی جسم را در محدوده مرئی تخمین می‌زند. از آنجایی که تئوری کیوبلکا-مانک به دلیل صرف‌نظر کردن از پدیده فلورسنس نمی‌تواند برای فاکتور پرتوهای طیفی نمونه‌های فلورسنت استفاده شود، مدلی دو پرتویی برای فلورسنس توسط تارجا و جان شاکسپیر^۱ [۶] ارائه شد که این مدل فاکتورهای انتقال پرتویی مستقل از منبع نوری بر پایه رنگ روی لیف را پیشگویی می‌کند. لذا می‌تواند فاکتور پرتو کلی را زیر یک منبع نوری دلخواه محاسبه نماید. این روش به یک اسپکتروفلوریمتری^۲ (روش دو منوکروماتور) نیاز دارد.

تئوری دو پرتویی معمول-صرف‌نظر از فلورسنس-پرتو نور برخوردی به یک لایه که جذب و انتشار ایزوتروپیک دارد را تشریح می‌کند. مطابق شکل ۳ تغییرات پرتو انتشار یافته رو به پایین $\Phi_z^+(\lambda)$ و رو به بالا $\Phi_z^-(\lambda)$ به ترتیب با روابط ۳ و ۴ بیان می‌شوند:

$$\frac{d\Phi_z^+(\lambda)}{dz} = -[K(\lambda) + S(\lambda)]\Phi_z^+(\lambda) + S(\lambda)\Phi_z^-(\lambda) \quad (۳)$$

$$\frac{d\Phi_z^-(\lambda)}{dz} = [K(\lambda) + S(\lambda)]\Phi_z^-(\lambda) - S(\lambda)\Phi_z^+(\lambda) \quad (۴)$$

جهت محاسبه پرتو انتشار یافته رو به پایین $\Phi_z^+(\lambda)$ از رابطه ۳ مشتق‌گیری و با جایگذاری از رابطه‌های ۳ و ۴، رابطه ۵ به دست می‌آید:

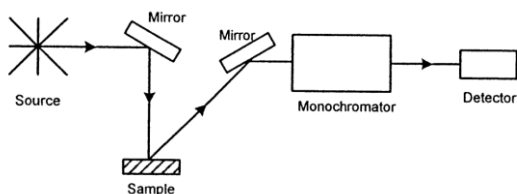
$$\frac{d^2\Phi_z^+(\lambda)}{dz^2} = [K(\lambda)^2 + 2K(\lambda)S(\lambda)]\Phi_z^+(\lambda) \quad (۵)$$

با حل دیفرانسیل رابطه ۵ مقدار پرتو انتشار یافته رو به پایین از رابطه ۶ به دست می‌آید.

1- Tarja and John Shakespeare
2- Spectrofluorimetric

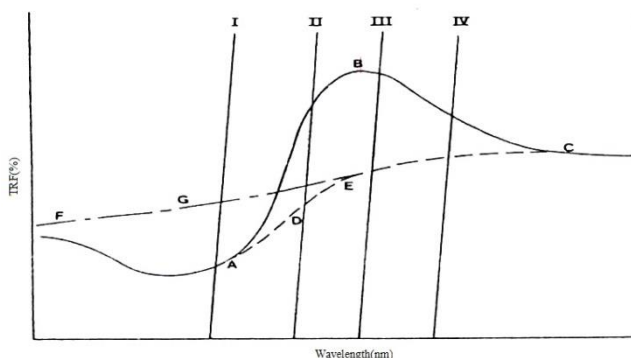
۳-۱- نحوه اندازه‌گیری نمونه‌های فلورسنت

جهت اندازه‌گیری نمونه‌های فلورسنت، باید سهم انعکاس و دوباره بازتاب فلورسنسی مشخص باشد. بدین منظور نمونه توسط پرتوهای چند رنگ روشن شده و تک طول موج کننده بین نمونه و گیرنده قرار می‌گیرند. نور منعکس شده از نمونه از تک طول موج کننده عبور کرده و توسط گیرنده ثبت می‌گردد. این نحوه اندازه‌گیری در شکل ۴ نشان داده شده است [۳].



شکل ۴: نمای شمایی از یک طیف‌سنج با تابش چندرنگ بر روی نمونه [۳].

شکل ۵ منحنی فاکتور پرتو طیفی یک نمونه فلورسنت را به صورت شمایی نشان می‌دهد که پیک صدور در B است. منحنی ADEC انعکاس واقعی نمونه رنگی را نشان می‌دهد و منحنی FGEC منحنی انعکاسی زمینه رنگ نشده است. مساحت محدوده ABCEDA بیانگر انرژی فلورسنت و مساحت FGEDA بیانگر انرژی جذب شده است. جذب در ناحیه FGEDA باعث ایجاد فلورسنت در ناحیه ABCEDA می‌شود [۴].



شکل ۵: شمای منحنی فاکتور پرتوهای طیفی نمونه (ABC)، همراه با منحنی انعکاس واقعی (ADEC) و منحنی انعکاس زمینه (FGEC) [۴].

$$\frac{d\phi_z^-(\lambda)}{dz} = [K(\lambda) + S(\lambda)]\phi_z^-(\lambda) - S(\lambda)\phi_z^+(\lambda) - \frac{f_z(\lambda)}{2} \quad (10)$$

فرض می‌شود صدور فلورسنس در جهت z ایزوتروپیک است و پرتو فلورسنت $f_z(\lambda)$ در یک لایه به عمق z از رابطه ۱۱ به دست می‌آید.

$$f_z(\lambda) = \int K_F(\epsilon)Q(\epsilon, \lambda)[\phi_z^+(\epsilon) + \phi_z^-(\epsilon)]d\epsilon \quad (11)$$

$K_F(\epsilon)$ ضریب جذب موثر نمونه رنگ شده از تفاوت ضریب جذب نمونه رنگ شده $K_C(\epsilon)$ و رنگ نشده $K_S(\epsilon)$ مطابق رابطه ۱۲ محاسبه می‌گردد.

$$K_F(\epsilon) = K_C(\epsilon) - K_S(\epsilon) \quad (12)$$

$Q(\epsilon, \lambda)$ بازده کوانتوم طیفی فلورسنس بر واحد طول موج صدور λ از طول موج تحریک ϵ بوده و اغلب وابسته به طول موج است. بازده کوانتوم طیفی $Q(\epsilon, \lambda)$ شامل اطلاعاتی درباره شکل طیف صدور ایجاد شده با طول موج تحریک و اطلاعاتی درباره کسر انرژی منتقل شده از طول موج تحریک به طول موج صدور مربوطه است [۶]. بونهم [۸] در سال ۱۹۸۶، رابطه‌های ۹ و ۱۰ را برای یک منبع روشنایی پلی کروماتیک حل کرد و یک رابطه ساده بین فاکتور تشعشعات کلی اندازه‌گیری شده $(\beta_T(\lambda|E))$ ، ضرایب جذب $K(\epsilon)$ و انتشار نمونه رنگ شده $S(\epsilon)$ و ضرایب جذب $K_S(\lambda)$ و انتشار نمونه رنگ نشده $S_S(\lambda)$ ، بازده کوانتوم رنگ فلورسنس $Q(\lambda)$ و پرتو برخوردی $E(\lambda)$ ارائه کرد که در رابطه ۱۳ بیان می‌شود.

$$\beta_T(\lambda|E) = \beta_R(\lambda) + \beta_L(\lambda|E) = \left[1 + \frac{K(\epsilon)}{S(\epsilon)} - \frac{M(\epsilon)}{S(\epsilon)} + \frac{K_S(\lambda)}{S_S(\lambda)} - \frac{M_S(\lambda)}{S_S(\lambda)} \right] + \left[2 + \frac{K_S(\lambda)}{S_S(\lambda)} - \frac{M_S(\lambda)}{S_S(\lambda)} \right] \times \frac{Q(\epsilon, \lambda)}{2E(\lambda)} \int \frac{K_F(\epsilon)E(\epsilon)}{M_S(\lambda) + M(\epsilon)} \times \left[2 + \frac{K(\epsilon)}{S(\epsilon)} - \frac{M(\epsilon)}{S(\epsilon)} \right] d\epsilon \quad (13)$$

اندیس s در این ضرایب بیانگر زمینه رنگ نشده است.

$M_S(\lambda)$ و $M(\epsilon)$ از رابطه‌های ۱۴ و ۱۵ به دست می‌آیند.

$$M(\epsilon) = \sqrt{K(\epsilon)^2 + 2K(\epsilon)S(\epsilon)} \quad (14)$$

$$M_S(\lambda) = \sqrt{K_S(\lambda)^2 + 2K_S(\lambda)S_S(\lambda)} \quad (15)$$

آلن نیز رابطه‌های ۹ و ۱۰ را برای یک منبع روشنایی منوکروماتیک برای یک فیلم پخش کننده با ضخامت نامحدود مطابق رابطه ۱۶ حل کرد [۹، ۱۰].

$$\frac{\phi_0^-(\lambda)}{\phi_0^+(\lambda)} = \frac{K_F(\epsilon)\epsilon(\epsilon/\lambda)}{2[K(\lambda) + K(\epsilon)]} \times [1 + R_\infty(\epsilon)] \times [1 + R_\infty(\lambda)] \quad (16)$$

ابتدا فاکتور پرتوهای طیفی کل رنگ فلورسنت تحت تابش مستقیم لامپ زنون با استفاده از طیفسنجی که قابلیت تابش نور چندرنگ بر نمونه را دارد، اندازه‌گیری می‌شود. به منظور حذف طول‌موج‌های تحریک فلورسنسی، فیلترهای خاموش‌کننده یکی پس از دیگری در مقابل تابش منبع نوری قرار می‌گیرند. ترتیب به کارگیری فیلترها به نحوی است که ابتدا از فیلترهایی با محدوده انتقال باریک (۷۰۰-۶۰۰ نانومتر) استفاده گردیده و به ترتیب فیلترهایی که محدوده انتقال آنان وسیع‌تر است به کار گرفته می‌شود. اگر ناحیه صدور و تحریک هم‌پوشانی نداشته باشند، فقط یک فیلتر خاموش‌کننده طول موج که دارای قابلیت حذف بالاترین طول موج لبه نوار تحریک است، نیاز است. چون برای اکثر نمونه‌های فلورسنت در این ناحیه هم‌پوشانی وجود دارد، لذا برای این ناحیه یک محدوده فیلترهای خاموش‌کننده مورد نیاز است. اغلب ۱۲ فیلتر انتخابی به کار گرفته می‌شود.

اختلاف بین منحنی‌ها برای نور فیلترشده و فیلترنشده بیانگر میزان صدور فلورسنسی، β_L در هر طول موج می‌باشد. با استفاده از این فیلترها که هر کدام بخشی از طول موج نور را حذف می‌کنند تحریک فلورسنس اتفاق نمی‌افتد بنابراین صدور فلورسنس نیز رخ نمی‌دهد. بنابراین میزان انعکاس اندازه‌گیری شده با استفاده از فیلتری که باعث حذف فلورسنس شود بیانگر فاکتور تشعشعات انعکاسی است. بسته به اینکه محدوده طول موج تحریک رنگزا چند باشد اختلاف بین منحنی‌ها برای نور فیلترشده (فیلتری که شامل طول موج محدوده تحریک نباشد) و فیلترنشده بیانگر میزان صدور فلورسنسی، β_L در هر طول موج می‌باشد.

۱-۳-۲- روش استفاده از طیفسنج در دو حالت چندرنگ- تک رنگ و برعکس

این روش که اصطلاحاً روش دو مد^۴ نامیده می‌شود، اولین بار توسط سیمون ارائه شد [۵]. در این روش از طیفسنجی استفاده می‌شود که قابلیت تابش چندرنگ و خواندن تک‌رنگ و برعکس را داشته باشد. فاکتور پرتو طیفی اندازه‌گیری شده با استفاده از شکل‌های (۶a) و (۶b) به ترتیب فاکتور پرتو طیفی رو به جلو^۵ و معکوس^۶ نامیده می‌شود. در مورد اولی، نور قبل از اینکه به نمونه برخورد کند از منوکروماتور عبور کرده و در دومی نور به نمونه برخورد کرده و سپس از منوکروماتور عبور می‌کند.

چندین شیوه برای اندازه‌گیری فاکتور تشعشعات انعکاسی یک نمونه فلورسنت وجود دارد. شاید بهترین راه استفاده از اسپکتروفلوریمتر که شامل دو تک طول موج‌کننده^۱ است، باشد. در اسپکتروفلوریمتر نمونه فلورسنت به طور تک طول موجی روشن شده و انرژی انعکاسی از نمونه نیز به طور تک طول موجی ثبت می‌شود. معمولاً به دلیل گران بودن بیش از حد دستگاه‌های دارای دو تک طول موج‌کننده به صورت تجاری در دسترس نیستند. روش‌های متعدد دیگری به منظور اندازه‌گیری فاکتور تشعشعات انعکاسی با استفاده از وسایل معمول که در آن جسم با پرتو چند رنگی روشن شود ارائه شده است که عبارتند از:

الف- استفاده از فیلتر برای کاهش فلورسنس [۱۱، ۳۰]

ب- روش استفاده از طیفسنج در دو حالت چندرنگ- تک رنگ و بر عکس [۵]

پ- روش محاسباتی حذف و یا تضعیف فلورسنس [۴]

۱-۳-۱- روش کاهش فلورسنس با استفاده از فیلتر

ایتل^۲ و گنز^۳ از این روش برای اندازه‌گیری قسمت انعکاسی فاکتور تشعشعات کلی نمونه‌های فلورسنت سفید استفاده کردند. در این روش پرتوهای فلورسنسی با قرار دادن فیلترهای خاموش‌کننده در جلوی منبع نوری و یا جلوی نمونه‌ها حذف شده و $\beta_L(\lambda)$ محاسبه می‌شود [۱۱، ۳۰]. به منظور به دست آوردن منحنی انعکاسی حقیقی غیرفلورسنت بایستی محدوده‌ای از فیلترهای خاموش‌کننده فلورسنس به کار رود تا صدور فلورسنسی به طور کامل حذف شود. فیلترهای متداولی که به این منظور استفاده می‌شوند در جدول ۱ نشان داده شده‌اند.

جدول ۱: محدوده طول موج عبور فیلترهای مختلف [۳].

فیلتر	محدوده طول موج (nm)
Chance OY10	۳۹۰-۷۰۰
Schott FG10	۴۲۰-۷۰۰
Chance OY18	۴۴۰-۷۰۰
Chance OY6	۵۰۰-۷۰۰
Schott GG495	۵۱۰-۷۰۰
Chance OY4	۵۲۰-۷۰۰
Chance OY3	۵۳۰-۷۰۰
Schott OG530	۵۴۰-۷۰۰
Schott OG550	۵۶۰-۷۰۰
Schott OY570	۵۹۰-۷۰۰
Chance OY1	۶۰۰-۷۰۰

4- Two-mode method

5- Forward spectral radiance factor

6- Reverse spectral radiance factor

1- Double monochromator

2- Eitle

3- Ganz

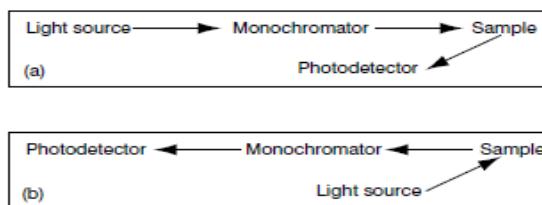
در محدوده طول موج A تا E جذب هم‌زمان انرژی تحریک و انرژی فلورسنت اتفاق می‌افتد. این محدوده از طیف منطقه هم‌پوشانی است. اگر فیلتری استفاده شود که طول موج‌های زیر نقطه E را حذف کند هیچ انرژی که باعث تهییج فلورسنت شود به نمونه نمی‌رسد. بنابراین میزان صدور فلورسنت در طول موج‌های بالاتر از E صفر شده و منحنی انعکاس به دست آمده همان انعکاس واقعی نمونه است. چنین فیلتری فیلتر حذف‌کننده فلورسنت است. خط III فیلتر حذف‌کننده مناسب را ارائه می‌کند. منحنی انعکاسی صحیح در طول موج‌های پایین‌تر از A نیز مستقیماً بدون استفاده از فیلتر به دست می‌آید چون هیچ فلورسنتی در این محدوده وجود ندارد. در محدوده هم‌پوشانی با انجام محاسبات ریاضی و از روی فاکتور تشعشعات کلی و فاکتور پرتوهای کاهش‌یافته که با به‌کارگیری فیلتر تضعیف‌کننده مناسب (خط I) حاصل می‌شود فاکتور تشعشعات انعکاسی به دست می‌آید. ثابت k از کوتاه‌ترین طول موج به دست آمده با فیلتر حذف‌کننده فلورسنت (طول موج w) از رابطه ۱۷ حاصل می‌شود که R(w) انعکاس واقعی به دست آمده در این طول موج است. فاکتور پرتو کلی به دست آمده در این طول موج در مورد اندازه‌گیری با منابع نوری ۱ و ۲ (بدون فیلتر حذف‌کننده فلورسنت) به ترتیب $S_1(w)$ و $S_2(w)$ است [۴].

$$k = \frac{T(w)[S_2(w) - R(w)]}{[S_1(w) - R(w)]} \quad (17)$$

$T(w)$ نسبت توزیع انرژی طیفی نسبی منبع نوری دوم (همان منبع نوری اول است که از فیلتر تضعیف‌کننده فلورسنت عبور کرده است) به منبع نوری اول است. سپس از رابطه ۱۸ برای طول موج‌های دیگر در محدوده هم‌پوشانی برای محاسبه R استفاده می‌شود.

$$R(\lambda) = \frac{[S_2(\lambda)T(\lambda) - S_1(\lambda)k]}{[T(\lambda) - k]} \quad (18)$$

کلیه روش‌های ذکر شده جهت جداسازی انعکاس واقعی از انعکاس فلورسنت، نیازمند تجهیزات، فیلترها و طیف‌سنج‌های خاصی است که اغلب در دسترس نیستند یا بسیار گران هستند. در مقاله حاضر با هدف یافتن یک روش ساده برای جداسازی انعکاس واقعی از فلورسنت، مقدار فاکتور پرتوهای طیفی مواد رنگزای فلورسنت در هر طول موج با مقدار انعکاس زمینه رنگ نشده مقایسه شده و محدوده تحریک، هم‌پوشانی و صدور رنگزای فلورسنت تعیین می‌شود. در محدوده تحریک و صدور به ترتیب فقط انعکاس واقعی و انعکاس فلورسنت داریم اما در محدوده هم‌پوشانی هم انعکاس واقعی داریم هم انعکاس فلورسنت. با در نظر گرفتن نظریه کیوبلکا-مانک برای بخش انعکاس واقعی، به راحتی فاکتور پرتوهای طیفی به دو قسمت انعکاس واقعی و فلورسنت تفکیک می‌شود.

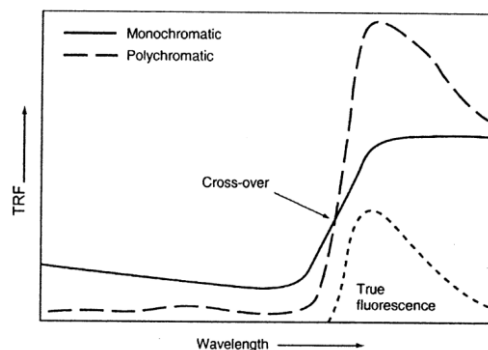


شکل ۶: شکل شمایی دو آرایش نوری متفاوت برای ابزارهای اندازه‌گیری رنگ [۶].

هنگام ارزیابی نمونه فلورسنت در حالت تابش چندرنگ، جزء انعکاس واقعی فاکتور تشعشعات کلی برای نواحی تحریک به نحو صحیحی تعیین می‌گردد. در حالت تابش تک‌رنگ، ارزیابی انعکاس واقعی برای نواحی صدور فلورسنت به شکل صحیح انجام می‌شود. با ترکیب نتایج دو حالت، جزء انعکاس واقعی فقط برای ناحیه‌ای که نوارهای صدور و تحریک هم‌پوشانی دارند، معلوم نیست. روش ارائه شده برای تعیین مقدار انعکاس در این ناحیه به این صورت است که مطابق شکل ۷ در منحنی انعکاسی به دست آمده با تابش چندرنگ (منحنی خط چین)، طول موج‌های در محدوده ابتدای طیف تا نقطه تقاطع (هم‌پوشانی) در نظر گرفته می‌شود. در منحنی انعکاسی به دست آمده با تابش تک‌رنگ (منحنی خط پر) نیز از طول موج نقطه تقاطع تا انتهای طیف در نظر گرفته می‌شود. با ترکیب این دو، منحنی انعکاسی واقعی در کل طول موج‌ها محاسبه می‌شود [۷، ۲۰].

۱-۳-۳- روش محاسباتی تضعیف یا حذف فلورسنت

در این روش که توسط آلن [۴] ارائه گردید از دو منبع نوری مختلف که نسبت تابش معلومی دارند استفاده می‌شود. منبع نوری دوم همان منبع نوری اول است که از فیلتر تضعیف‌کننده فلورسنت عبور کرده است. مطابق شکل ۵ خطوط I، II، III و IV خطوط انتقال فیلترهای خاموش‌کننده هستند و بیانگر طول موج عبوری از هر فیلتر است.



شکل ۷: منحنی انعکاسی طیفی یک نمونه فلورسنت قرمز تحت تابش تک رنگ و چند رنگ [۷].

۲- بخش تجربی

۲-۱- مواد

در این تحقیق از پارچه اکریلیک سفید تولید داخلی به عنوان زمینه رنگزای استفاده شد. همچنین از دو ماده رنگزای بازیگ فلورسنت ساخت شرکت دای استار^۱ استفاده شد. مشخصات مواد رنگزا در جدول ۲ گزارش شده است.

جدول ۲: مشخصات مواد رنگزای کاتیونی فلورسنت مورد استفاده.

Commercial Name	C.I. Number	Manufacturer
Astrazon flavin 10GFF	Basic yellow 40	Dystar
Astrazon Red Violet 3RN	Basic Violet 16	Dystar

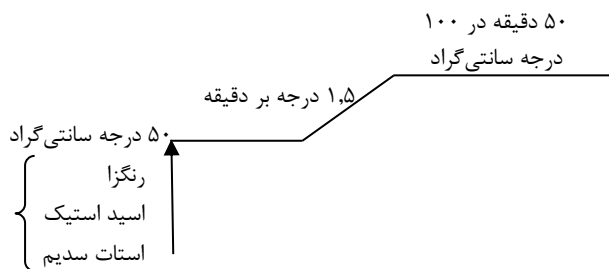
۲-۲- روش کار

برای به دست آوردن محلول یکدهم درصد، مطابق توصیه سازنده یکدهم گرم از رنگزا با ۰٫۰۶ میلی لیتر اسید استیک ۱۰۰٪ خمیر شد و سپس ۵۰ میلی لیتر آب جوش به آن اضافه گردید. آنگاه پس از هم زدن و سرد شدن محلول، آب سرد به منظور رساندن حجم محلول به ۱۰۰ میلی لیتر به آن اضافه شد. بعد از تهیه محلول های یکدهم درصد از آنها به منظور رنگزای پارچه های اکریلیکی با وزن ۲٫۵ گرم بدون هرگونه آماده سازی اولیه استفاده گردید. از محلول استات سدیم و اسید استیک به ترتیب به منظور ایجاد یکنواختی و حفظ pH حمام رنگزای در محدوده ۴ تا ۵ استفاده شد. پس از ساخت محلول رنگزای مطابق جدول ۳، پارچه های شسته شده به همراه محلول رنگزای در ۲۰ سل دستگاه رنگزای Polymat مدل Ahiba 1000 ساخت شرکت Datacolor قرار گرفت تا منحنی رنگزای مطابق شکل ۸ را طی نماید. پس از رنگزای پارچه ها آبکشی و خشک شدند.

جدول ۳: مواد مورد استفاده در حمام رنگزای کالاهای اکریلیکی.

درصد بر حسب وزن کالا	مواد
X%	رنگزا
۰٫۵٪	استات سدیم
۲٪	اسید استیک

1- Dystar

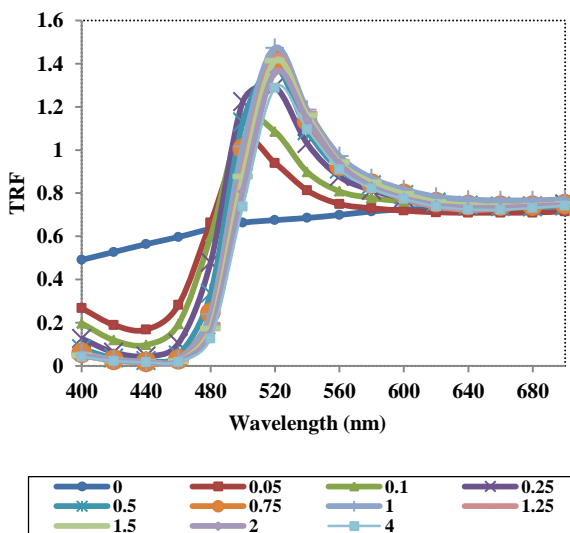


شکل ۸: نمودار رنگزای کالاهای اکریلیکی با مواد رنگزای کاتیونی فلورسنت.

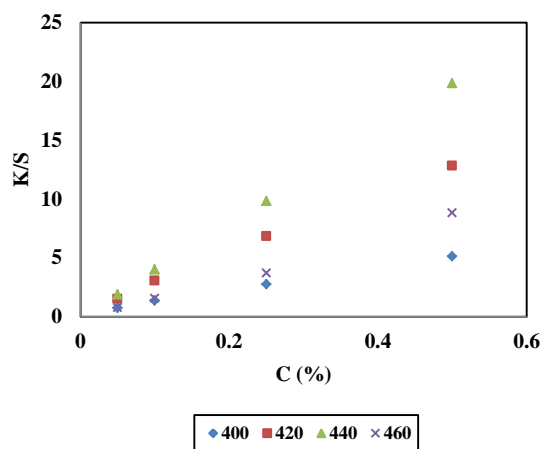
از هر اولیه فلورسنت به صورت جداگانه در درصدهای مختلف (۰٫۰۵، ۰٫۱، ۰٫۲۵، ۰٫۵، ۰٫۷۵، ۱، ۱٫۲۵، ۱٫۵، ۲ و ۴٪) حمام هایی آماده و رنگزای انجام پذیرفت. مقادیر فاکتور تشعشعات کلی نمونه های رنگزای شده توسط طیف سنج انعکاسی Tex Flash ساخت Datacolor آلمان با هندسه اندازه گیری d/0 (کره نور جمع کن) اندازه گیری شد.

۳- نتایج و بحث

نمودار فاکتور تشعشعات کلی (TRF) دو رنگزای فلورسنت Astrazon Red Violet 3RN و Flavin 10GFF در مقابل طول موج در غلظت های مختلف همراه با مقدار انعکاس زمینه (sub) در شکل های ۹ و ۱۰ رسم شده است.



شکل ۹: نمودار فاکتور تشعشعات کلی رنگزای فلورسنت Astrazon Flavin 10GFF (سیمبل ها بیانگر غلظت رنگزا است).



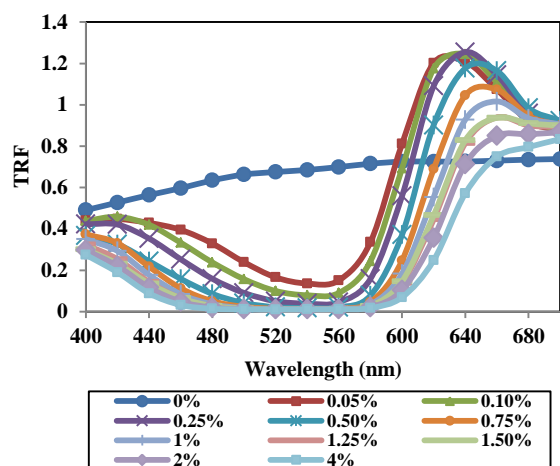
شکل ۱۱: منحنی K/S رنگزای فلورسنت Astrazon Flavin 10GFF در مقابل غلظت (سیمبل‌ها بیانگر طول موج هستند).

مواد رنگزای فلورسنت دو محدوده طول موجی مهم دارند: ۱- تحریک یا جذب ۲- صدور یا نشر. مقدار فاکتور پرتوهای اندازه گیری شده رنگزای فلورسنت در محدوده تحریک بیانگر میزان نور جذب شده توسط رنگزاست که در طول موج بالاتر صادر می‌شود. در مورد رنگزای Astrazon Flavin 10GFF نور در طول موج های ۴۰۰ تا ۴۶۰ نانومتر که طول موج تحریک فلورسنت است، توسط نمونه جذب می‌شود. این انرژی جذب شده انرژی تحریک نامیده می‌شود که در نمونه ذخیره شده و در طول موج های بالاتر به صورت انرژی فلورسنت صادر می‌شود. بنابراین در محدوده طول موج تحریک یا جذب ۴۰۰ تا ۴۶۰ نانومتر فقط انعکاس واقعی داریم و انعکاس فلورسنتی وجود ندارد.

در این طول موج‌ها مقدار فاکتور تشعشعات کلی نمونه رنگزای شده همیشه کوچک‌تر از انعکاس زمینه است. رنگزا در این طول موج‌ها رفتار فلورسنت ندارد و این محدوده، محدوده تحریک است. در این مورد انعکاس فلورسنت $\beta_L=0$ است و مقدار انعکاس واقعی برابر فاکتور تشعشعات کلی است. در مورد رنگزای فلورسنت Astrazon Red Violet 3RN نیز با رسم نمودار K/S در مقابل غلظت در طول موج ۴۰۰ تا ۵۸۰ نانومتر در شکل ۱۲ معلوم می‌شود که رنگزای فلورسنت مشابه رنگزای غیرفلورسنت رفتار می‌کند و مقدار انعکاس واقعی برابر فاکتور پرتوهای کلی است.

ناحیه صدور فلورسنت: جذب نور نداریم و فقط صدور فلورسنت وجود دارد.

با رسم نمودار K/S دو رنگزا در مقابل غلظت برای طول موج‌های دیگر مطابق شکل‌های ۱۳ و ۱۴ هیچ روند خاصی مشاهده نمی‌شود و نشان‌دهنده این است که تابع انعکاسی آن در مقابل غلظت از نظریه کیوبلکا-مانک پیروی نمی‌کند.



شکل ۱۰: نمودار فاکتور تشعشعات کلی رنگزای فلورسنت Astrazon Red Violet 3RN (سیمبل‌ها بیانگر غلظت رنگزا است).

همان‌گونه از شکل‌های ۹ و ۱۰ مشخص است میزان صدور فلورسنتی جسم با افزایش مقدار رنگزاهای Flavin و Red Violet به ترتیب تا غلظت ۰,۷۵ و ۰,۲۵٪ افزایش یافته و سپس با افزایش غلظت کاهش یافته است که بیانگر نقطه خاموش‌شوندگی این رنگزاهاست.

با بررسی داده‌های انعکاسی مشاهده می‌شود که مقادیر انعکاس بالاتر از ۱۰۰٪ نیز وجود دارد. برای مثال برای دو مقدار انعکاس مختلف (مثلاً انعکاس ۱۲۰٪ و ۸۳,۳۳٪) یک مقدار یکسانی K/S (۰,۰۱۶۶۷) به دست می‌آید، بنابراین در طول موج‌هایی که مقدار فاکتور پرتوهای طیفی رنگزاهای فلورسنت بالاتر از ۱۰۰٪ می‌باشد، رابطه ۱۹ صادق نیست.

$$\frac{K(\lambda)}{S(\lambda)} = \frac{[1-R_{\infty}(\lambda)]^2}{2R_{\infty}(\lambda)} \quad (19)$$

برای جداسازی انعکاس واقعی از انعکاس فلورسنت رفتار فاکتور تشعشعات کلی را در ۳ ناحیه به شرح زیر بررسی می‌کنیم:

ناحیه تحریک: فقط انعکاس واقعی داریم و صدور فلورسنت وجود ندارد.

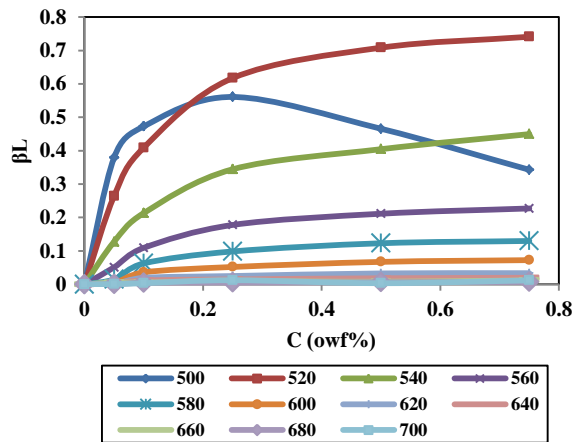
با رسم نمودار K/S در مقابل غلظت (شکل ۱۱) برای طول موج‌های مختلف مشاهده می‌شود که در طول موج‌هایی که فاکتور تشعشعات کلی نمونه رنگزای شده همیشه کوچک‌تر از انعکاس زمینه (فاقد جزء انعکاس فلورسنتی) است، رنگزای فلورسنت مشابه رنگزای غیرفلورسنت رفتار می‌کند و تابع انعکاسی آن در مقابل غلظت از نظریه کیوبلکا-مانک پیروی می‌کند. شکل ۱۱ نمودار K/S رنگزای فلورسنت Astrazon Flavin 10GFF در مقابل غلظت، از طول موج ۴۰۰ تا ۴۶۰ نانومتر که فاکتور تشعشعات کلی نمونه رنگزای شده همیشه کوچک‌تر از انعکاس زمینه است، نشان می‌دهد.

مطابق شکل ۵ از طول موج E تا C که فاکتور تشعشعات کلی نمونه رنگزای شده همیشه بزرگتر از انعکاس زمینه است فرض می‌شود رنگزا هیچ نوری جذب نکرده و فقط صدور فلورسنس داریم. بنابراین انعکاس حقیقی معادل با انعکاس زمینه است لذا اختلاف میان فاکتور تشعشعات کلی کالای رنگزای شده و انعکاس زمینه، صدور فلورسنس می‌باشد.

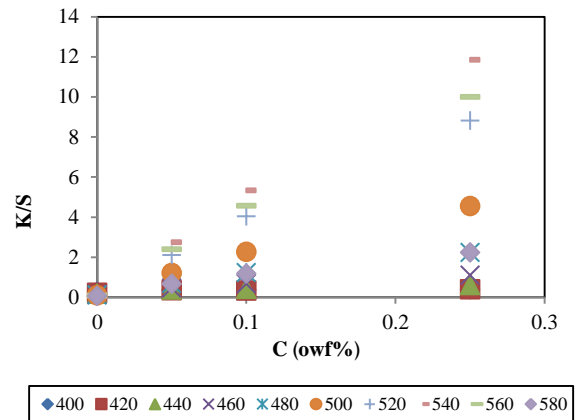
در مورد رنگزای فلورسنت Astrazon Flavin 10GFF در طول موج ۵۰۰ تا ۷۰۰ نانومتر رنگزا هیچ جذبی ندارد و فقط صدور فلورسنس داریم. بنابراین انعکاس واقعی معادل انعکاس زمینه است و مقدار فلورسنس از اختلاف فاکتور تشعشعات کلی کالای رنگ شده و انعکاس زمینه بدست می‌آید. در شکل ۱۵ منحنی انعکاس فلورسنس در طول موج‌های ۵۰۰ تا ۷۰۰ نانومتر رسم شده است.

در مورد رنگزای فلورسنت Astrazon Red Violet 3RN در طول موج ۶۶۰ تا ۷۰۰ نانومتر، مقدار فلورسنس از اختلاف فاکتور تشعشعات کلی کالای رنگ شده و انعکاس زمینه به دست می‌آید. در شکل ۱۶ منحنی انعکاس فلورسنس در طول موج‌های ۶۶۰ تا ۷۰۰ نانومتر رسم شده است.

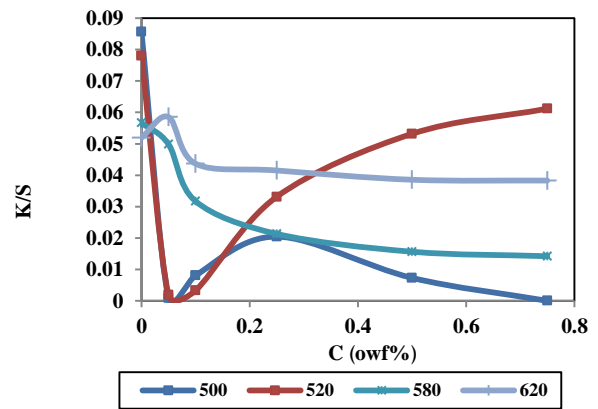
ناحیه هم‌پوشانی: جذب نور و صدور فلورسنس وجود دارد. مطابق شکل ۵ از طول موج A تا E فاکتور تشعشعات کلی نمونه رنگزای شده ابتدا با افزایش غلظت رنگزا افزایش یافته و سپس تا مقداری که ممکن است کمتر از انعکاس زمینه باشد، کاهش می‌یابد. در این طول موج‌ها ماده رنگزا همان‌گونه که فلورسنس را صادر می‌نماید نور را جذب می‌کند (محدوده هم‌پوشانی).



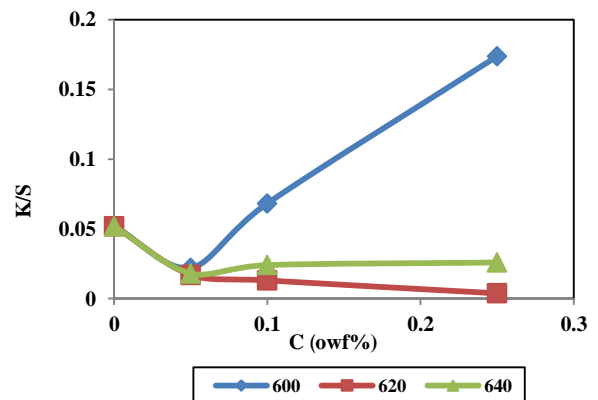
شکل ۱۵: منحنی انعکاس فلورسنت رنگزای فلورسنت Astrazon Flavin 10GFF در مقابل غلظت (سیمبل‌ها بیانگر طول موج هستند).



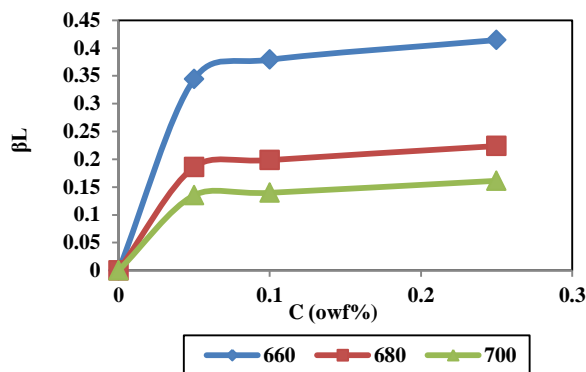
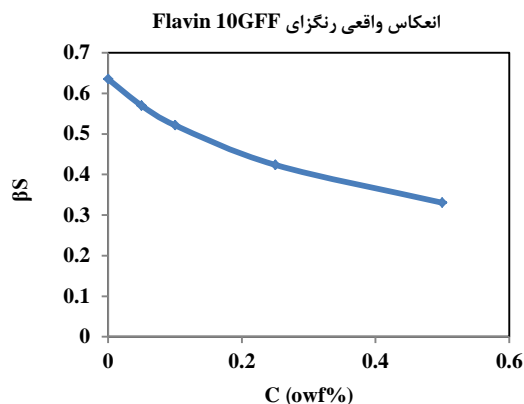
شکل ۱۲: منحنی K/S رنگزای فلورسنت Astrazon Red Violet در مقابل غلظت (سیمبل‌ها بیانگر طول موج هستند).



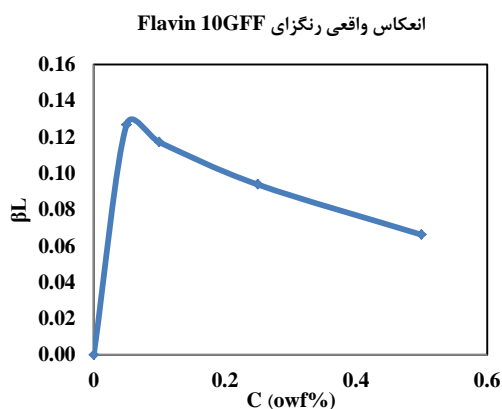
شکل ۱۳: منحنی K/S رنگزای فلورسنت Astrazon Flavin 10GFF در مقابل غلظت (سیمبل‌ها بیانگر طول موج هستند).



شکل ۱۴: منحنی K/S رنگزای فلورسنت Astrazon Red Violet 3RN در مقابل غلظت (سیمبل‌ها بیانگر طول موج هستند).



شکل ۱۶: منحنی انعکاس فلورسنت رنگزای فلورسنت Astrazon Red در مقابل غلظت (سیمبل‌ها بیانگر طول موج هستند).



شکل ۱۷: منحنی انعکاس واقعی و انعکاس فلورسنت رنگزای فلورسنت Astrazon Flavin 10GFF در مقابل غلظت در طول موج ۴۸۰ نانومتر.

به منظور به دست آوردن منحنی انعکاس حقیقی یعنی β_s در این طول موج‌ها فرض می‌گردد که در غلظت‌های بالاتر از غلظت خاموش شونده به دلیل بیش از حد بودن پدیده خاموش شونده میزان صدور فلورسنس به صفر می‌رسد. نقطه خاموش شونده دو رنگزا به ترتیب ۰٫۷۵ و ۰٫۲۵٪ است که با افزایش غلظت به بیش از این مقادیر، مقدار فاکتور تشعشعات کلی به میزان زیادی کاهش می‌یابد. بنابراین ضرایب جذب از طریق منحنی انعکاسی که با بکارگیری غلظت‌های بالای رنگزا به دست آمده است، محاسبه می‌شود و از آن در پیشگویی منحنی انعکاسی حقیقی برای رنگریزی استفاده می‌شود. جزء فلورسنسی β_L می‌تواند با کم کردن β_s از TRF محاسبه شود [۳].

در طول موج ۴۸۰ نانومتر رنگزای فلورسنت Astrazon Flavin 10GFF همان گونه که فلورسنس را صادر می‌نماید نور را جذب می‌کند. در این طول موج مقدار فاکتور تشعشعات کلی در بالاترین غلظت رنگزا معادل انعکاس واقعی است و با قرار دادن مقدار K/S آن و زمینه در رابطه ۲۰ ضریب جذب به دست می‌آید.

$$\left(\frac{K}{S}\right) = \left(\frac{K}{S}\right)_{\text{sub}} + A_F \quad (20)$$

با استفاده از رابطه ۲۰، K/S را برای دیگر غلظت‌ها محاسبه و انعکاس واقعی را از رابطه ۲۱ به دست می‌آوریم.

$$\beta_s = R = 1 + \frac{K}{S} - \left[\left(\frac{K}{S}\right)^2 + 2 \left(\frac{K}{S}\right) \right]^{0.5} \quad (21)$$

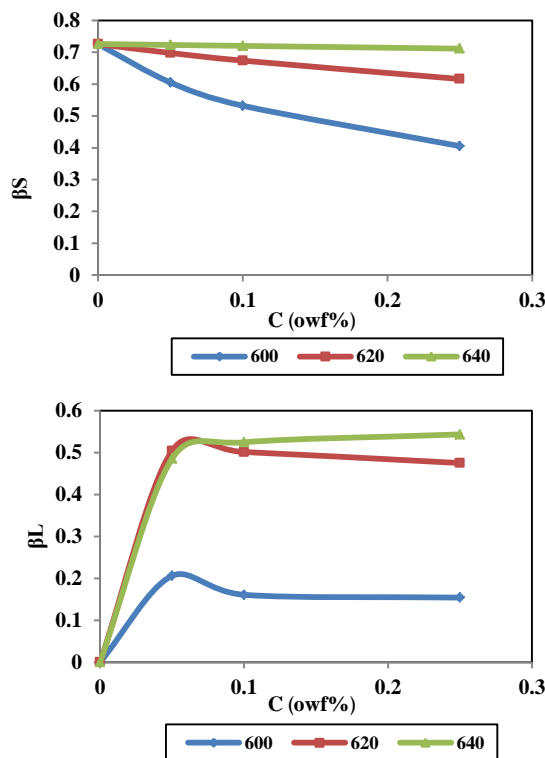
رابطه اصلی کیوبلکا-مانک رابطه ۲۱ است. با جابه جایی در معادله برحسب انعکاس رابطه ۲۰ به دست آمده است. مقدار فلورسنس از اختلاف فاکتور تشعشعات کلی کالای رنگ شده و انعکاس واقعی به دست می‌آید. در شکل ۱۷ منحنی انعکاس واقعی و انعکاس فلورسنس رنگزای فلورسنت Astrazon Flavin 10GFF در طول موج ۴۸۰ نانومتر رسم شده است.

در مورد رنگزای فلورسنت Astrazon Red Violet 3RN در طول موج‌های ۶۰۰، ۶۲۰ و ۶۴۰ نانومتر ماده رنگزا همان گونه که فلورسنس را صادر می‌نماید نور را جذب می‌کند. در این طول موج‌ها مشابه رنگزای Flavin 10GFF انعکاس واقعی و مقدار فلورسنس بدست می‌آید. در شکل ۱۸ منحنی انعکاس واقعی و انعکاس فلورسنس در طول موج‌های ۶۰۰، ۶۲۰ و ۶۴۰ نانومتر رسم شده است.

با تفکیک منحنی فاکتور تشعشعات کلی، در طول موج‌هایی که فاکتور تشعشعات کلی نمونه رنگریزی شده همیشه کوچک‌تر از انعکاس زمینه است رنگزای فلورسنت مشابه رنگزای غیر فلورسنت رفتار می‌کند و تابع انعکاسی آن در مقابل غلظت از نظریه کیوبلکا-مانک پیروی می‌کند. در محدوده طول موج‌های هم‌پوشانی با فرض صدور فلورسنس صفر در غلظت‌های بالاتر از نقطه خاموش شونده می‌توان به راحتی مقدار انعکاس واقعی و از اختلاف فاکتور تشعشعات کلی کالای رنگ شده و انعکاس واقعی مقدار فلورسنس را به دست آورد. در محدوده طول موج‌های صدور نیز می‌توان با در نظر گرفتن جذب صفر رنگزا، مقدار انعکاس واقعی را معادل انعکاس زمینه رنگ نشده در نظر گرفت و مقدار فلورسنس را از مقدار اختلاف فاکتور تشعشعات کلی کالای رنگ شده و انعکاس زمینه به دست آورد.

۴- نتیجه گیری

در این مطالعه اعتبار نظریه کیوبلکا-مانک بر روی مواد رنگزای فلورسنتی مورد بررسی قرار گرفت. فاکتور تشعشعات کلی مواد فلورسنت مجموع پرتو انعکاسی و پرتو فلورسنتی است. مدل رنگی کیوبلکا مانک یک مدل ریاضی است که انعکاس یک نمونه نیمه شفاف و جذب و پخشی که در نمونه اتفاق می افتد را در نظر می گیرد. در این تئوری برهم کنش نور با محیط فقط پخش و جذب است و از پلاریزاسیون و انتشار خودبخودی (فلورسنس) صرف نظر می شود. به همین منظور فاکتور تشعشعات کلی نمونه های فلورسنت را به انعکاس واقعی و انعکاس فلورسنس تفکیک می کنیم به طوری که انعکاس واقعی از تئوری کیوبلکا-مانک پیروی می کند. روش های متفاوتی برای این منظور وجود دارد. کاهش فلورسنس با استفاده از فیلتر، استفاده از طیف سنج در دو حالت چندرنگ- تک رنگ و بر عکس، حذف و یا تضعیف فلورسنس از جمله این روش هاست. این سه روش به تجهیزات و فیلترهای خاموش کننده خاصی احتیاج دارد اما با استفاده از روش ارائه شده در این مقاله با استفاده از محاسبه و به سادگی می توان با در نظر گرفتن رابطه کیوبلکا-مانک برای قسمت انعکاس واقعی رنگزای فلورسنت، مقدار فلورسنس را از مقدار انعکاس واقعی تفکیک نمود.



شکل ۱۸: منحنی انعکاس واقعی و انعکاس فلورسنت رنگزای فلورسنت Astrazon Red Violet 3RN در مقابل غلظت (سیمبل ها بیانگر طول موج - هستند).

۵- مراجع

1. S. H. Amirshahi, F. Agahian, Computational color physics, Capter 4, fluorescent dyes and fluorescent whitening agents, Iran, 2007.
2. D. M. Burns, N. L. Johnson, and L. A. Pavelka, Colorimetry of durable fluorescent materials. *Rev. Prog. Coloration*. 17(1987), 56-60.
3. E. Allen, Fluorescent and colorimetry of fluorescent materials. *Text. Chem. Colorist*. 19(1972), 33-37.
4. E. Allen, Separation of the radiance factor curve of the fluorescent substances into reflected and fluoresced components. *Appl. Opt.* 12(1973), 289-293.
5. F. T. Simon, The two-mode method for measurement and formulation of fluorescent colorants. *Col. Appear.* 1(1972), 5-11.
6. T. Shakespeare, J. Shakespeare, A fluorescent extension to the Kubelka-Munk model. *Color Res. Appl.* 28, 1(2003), 4-14.
7. R. A. McKinnon, Methods of the measuring the color of the opaque fluorescent materials. *Rev. Prog. Coloration*. 17(1987), 56-60.
8. J.S. Bonham, Fluorescence and Kubelka-Munk theory. *Color Res. Appl.* 11(1986), 223-230.
9. E. Allen, Fluorescent white dyes: calculation of fluorescence from reflectivity values. *Opt. Soc. Am.* 54, 4, 1964, 506-515.
10. E. Allen, Letter to the editor. *Color Res. Appl.* 13, 6(1988), 401.
11. R. McDonald, Recipe prediction for textiles, in *Colour Physics for Industry*, 2nd Ed., R. McDonald (Ed). The Society of Dyers and Colourists, Bradford, 1997.