

## بازیابی طیف انعکاسی از مقادیر رنگی CIEXYZ با استفاده از الگوریتم درونیابی در فضای سه بعدی

فرهاد مقاره عابد<sup>۱\*</sup>، سید حسین امیرشاهی<sup>۲</sup>، آزاده لعل<sup>۳</sup>

۱- گروه پژوهشی فیزیک رنگ، پژوهشگاه صنایع رنگ، تهران، ایران، صندوق پستی: ۱۶۷۶۵-۶۵۴

۲- دانشکده مهندسی نساجی، دانشگاه صنعتی امیرکبیر، تهران، ایران، صندوق پستی: ۱۵۸۷۴-۴۴۱۳

۳- دانشکده علوم پایه، دانشگاه سمنان، سمنان، ایران، صندوق پستی: ۳۵۱۹۵-۳۶۳

تاریخ دریافت: ۱۳۸۶/۵/۲ تاریخ پذیرش: ۱۳۸۶/۱۱/۲۰ در دسترس به صورت الکترونیکی از: ۱۳۸۷/۳/۲۸

### چکیده

در این تحقیق مقادیر رنگی نمونه رنگی مانسل در فضای CIEXYZ به منظور بازیابی طیف انعکاسی در یک جدول مقایسه‌ای با استفاده از الگوریتم درونیابی خطی مورد استفاده قرار گرفت. داده‌های طیفی و محرکه‌های رنگی ۱۲۶۹ نمونه رنگی مانسل از عنوان مجموعه اولیه برای ساخت یک جدول مقایسه‌ای استفاده شد. سپس مقادیر طیف انعکاسی نمونه‌های موجود در این جداول، برای تخمین طیف انعکاسی نمونه مجهول با استفاده از مقادیر محرکه‌های رنگی سه‌گانه مورد مطالعه قرار گرفت. مقادیر میانگین مجذور مربعات خطا بین نمودارهای بازسازی شده و واقعی به همراه مقادیر میانگین و حداکثر اندیس متامریزم زیر دو منبع نوری A و TL84 به همراه واریانس اندیس متامریزم به منظور ارزیابی روش، بررسی گردید. نتایج آزمایشات نشان دادند که مقادیر مجذور مربعات خطا کوچک و اندیس متامریزم پایین است و این روش از دقت و سرعت مناسبی در بازیابی طیف انعکاسی نمونه‌های رنگی مختلف برخوردار می‌باشد.

واژه‌های کلیدی: طیف انعکاسی، درونیابی، بازسازی، محرکه‌های رنگی.

## Reconstruction of Reflectance Curves from CIEXYZ Values Using Interpolation Method in Three Dimensional Space

F. M. Abed\*, S. H. Amirshahi, A. La'el

### Abstract

In this paper, the linear interpolation technique is applied to reconstruct the reflectance curves of the Munsell color chips from their tristimulus color coordinates. Interpolation method has been applied by using a look-up table (LUT) for transforming color values from the color space to the second multi-dimensional spectrophotometric domain. Tristimulus values of Munsell color chips have been used for creating the look-up table. Results of recovery are evaluated by the metamerism index under two different standard light sources and the root mean square (RMS) error. The results showed that the metamerism indices between the actual and the reconstructed curves were totally small. The negligible values of the RMS error also indicate the suitability of the proposed method. *J. Color Sci. Tech.* 2(2008), 1-7. © Institute for Colorants, Paint and Coatings.

**Keyword:** Reflectance curve, Interpolation, Reconstruction, Tristimulus value.

## ۱- مقدمه

به طور کلی توصیف رنگ هر جسم در دو سطح کاملاً متفاوت امکان پذیر می‌باشد. در سطح اول که پایین‌ترین سطح داده‌ها را فراهم می‌آورد و توصیف رنگی (کالریمتریکی) نامیده می‌شود، محرکه‌های رنگی جسم در یکی از فضا‌های رنگی سه‌بعدی استاندارد که معمول‌ترین آنان CIEXyY, CIELAB, RGB یا CMY هستند تعیین و بیان می‌شوند. در واقع فضای سه‌بعدی کوچک‌ترین فضا برای بیان ویژگی‌های رنگی اجسام است و در صورت استفاده از این فضای محدود شرایط مشاهده یعنی نوع منبع نوری و مشاهده کننده مورد استفاده باید مشخص باشد که نشانگر وابستگی رنگ جسم به شرایط خاصی از مشاهده است. تردیدی نیست که اجسام متعددی می‌توانند با برخورداری از رفتار طیفی مختلف مقادیر محرکه‌های رنگی یکسانی داشته باشند که تحت عنوان نمونه‌های متاثر شناخته می‌شوند. در روش دوم رنگ یک جسم با استفاده از اطلاعات با ارزش تری که مقادیر انعکاس طیفی جسم است توصیف می‌شود. طیف انعکاسی یک جسم میزان درصد شدت نور منعکس شده از جسم در محدوده طول موجهای مرئی می‌باشد. این داده‌ها بالاترین سطح اطلاعات را در خصوص رفتار رنگی جسم فراهم می‌آورند به طوری که در صورت دسترسی به این داده‌ها می‌توان رنگ اجسام را در شرایط متنوعی از شرایط مشاهده به دست آورد. علاوه بر این، آگاهی از داده‌های طیفی نمونه هدف حتی در هنگام رنگ‌همانندی کالریمتریکی در اغلب الگوریتم‌ها الزامی است. در هر حال دسترسی به اطلاعات طیفی به دلیل اندازه بزرگ این داده‌ها در مقایسه با داده‌های رنگی و یا استفاده از وسایل اندازه‌گیری ارزان‌تر مانند کالریمترها، دوربین‌های دیجیتال و یا پوششگرها به جای اسپکتروفوتومترهای گران قیمت همواره میسر نیست. علیرغم محاسبه آسان اطلاعات رنگی از روی داده‌های انعکاس طیفی، به دست آوردن اطلاعات طیفی از روی داده‌های رنگی یک مسأله بدوضع<sup>۱</sup> ریاضی تلقی می‌گردد که در آن لازم است یک دستگاه ۳ معادله و حداقل ۱۶ مجهولی حل گردد [۱]. روش‌های متعددی برای حل چنین دستگاه‌هایی ارائه شده است که متداول‌ترین آنان استفاده از روش تجزیه اجزاء اصلی<sup>۲</sup> است. به علاوه استفاده از روش‌های ابداعی مانند روش سیمپلکس<sup>۳</sup> که در آنها مقادیر داده‌های طیفی به گونه‌ای در یک روش تکرار، بهبود می‌یابند تا یک تابع خطا را حداقل نمایند مورد آزمون قرار گرفته‌اند [۴-۱]. در این مقاله حل مسأله بدوضع ذکر شده با استفاده از روش درونیابی در یک جدول مقایسه‌ای در بازسازی داده‌های طیفی مورد مطالعه قرار گرفت. این روش اگرچه در توصیف کالریمتریک دستگاه‌های مختلف نمایش و دوباره تولید رنگ، مانند پوششگرها و چاپگرها متداول است

ولی استفاده از آن در بازسازی داده‌های طیفی گزارش نشده است. در توصیف رنگی وسایل ذکر شده معمولاً مجموعه‌ای از نمونه‌های رنگی با مقادیر رنگی معلوم در شرایط استاندارد به همراه مقادیر اندازه‌گیری شده توسط وسیله مورد نظر در دسترس می‌باشند که سری جداولی را که اصطلاحاً جدول مقایسه‌ای نامیده می‌شوند فراهم می‌آورند [۵]. ایده مذکور به بازسازی داده‌های طیفی تعمیم داده شده است به نحوی که مقادیر طیف انعکاسی نمونه‌های موجود در این جداول برای تخمین طیف انعکاسی یک نمونه مجهول با استفاده از مقادیر محرکه‌های رنگی سه‌گانه مورد استفاده قرار گرفته است.

به طور کلی کاربرد یک تابع از ۲، ۳ یا چند متغیر مستقل که مقادیر مجهول را با استفاده از تعدادی مقادیر معلوم پراکنده در صفحه دوبعدی (یا فضای سه‌بعدی یا چندبعدی) محاسبه می‌کند، درونیابی نقاط پراکنده<sup>۴</sup> نامیده می‌شود [۶]. الگوریتم‌های مختلف درونیابی به عنوان یکی از روش‌های توصیف دستگاه‌های مختلف نمایش رنگ مانند پوششگرها و چاپگرها متداول است. برای این منظور از جداول رنگی استاندارد (مانند اطلس مانسل یا مجموعه رنگی پنتن<sup>۵</sup>) که دارای نمونه‌های رنگی با مقادیر رنگی استاندارد می‌باشند استفاده می‌شود. مؤلفه‌های رنگی نمونه‌های استاندارد به همراه سیگنال به دست آمده از دستگاه نمایش دهنده رنگ برای ساخت یک جدول مقایسه‌ای استفاده می‌شود. مجموعه‌های رنگی معمولاً چند صد نمونه رنگی استاندارد را در بر می‌گیرند که اطلاعات مربوط به هر نمونه می‌تواند اطلاعات کالریمتریک یا اسپکتروفوتومتریک باشد [۵]. با توجه به کارایی طیف انعکاسی یک جسم در توصیف خصوصیت رنگی، طیف انعکاسی می‌تواند با کاربرد اطلاعات نمونه‌های رنگی در یک جدول مقایسه‌ای و یک الگوریتم درونیابی با استفاده از محرکه‌های رنگی (مانند CIEXYZ) بازیابی شود. استفاده از الگوریتم درونیابی باعث می‌گردد تا طیف انعکاسی نقطه مجهول با استفاده از نقاط مجاور بازسازی شود که در این صورت علاوه بر دقت مناسب و عدم امکان ایجاد مقادیر غیرواقعی (مثلاً نمونه‌هایی که دارای مقادیر طیف انعکاسی منفی می‌باشند) از سرعت خوبی نیز برخوردار است.

روش‌های درونیابی خطی روش‌هایی هستند که با استفاده از نقاط همسایه خود مقادیر مورد نظر را تخمین زده و مقادیر مجهول در موقعیت مورد نظر با استفاده از اطلاعات موجود در نقاط همسایه نقطه محاسبه می‌کند.

اگر یکسری از نقاط پراکنده در فضای دوبعدی در نظر گرفته شود حالت‌های مختلفی از مثلث‌ها می‌تواند به منظور تقسیم‌بندی فضای دوبعدی مورد استفاده قرار گیرد [۶، ۷].

در این دسته از روش‌ها، درونیابی نقاط پراکنده در فضای n بعدی

- 1- Illposed
- 2- Principle component analysis (PCA)
- 3- Simplex

4- Scattered data interpolation  
5- Pantone

به طور کلی شامل دو مرحله می‌باشد:

الف - تقسیم‌بندی مجموعه داده‌های پراکنده شده در فضای رنگی مورد نظر (توسط مثلث‌ها، چهاروجهی‌ها یا  $n$ -سیمپلکس)

ب - اعمال الگوریتم درونیایی در درون سیمپلکس دربرگیرنده نقطه مجهول برای محاسبه مقادیر نقطه مجهول [۶].

در عمل تقسیم‌بندی نقاط در فضای سه‌بعدی توسط چهاروجهی به صورت‌های مختلف می‌تواند صورت گیرد. این تمایل وجود دارد که در میان چهاروجهی‌های قابل ایجاد از به وجود آمدن چهاروجهی بدو ضلع (مانند چهاروجهی‌های بسیار کشیده) جلوگیری گردد. دلالتی<sup>۱</sup> یکی از الگوریتم‌هایی است که برای تقسیم‌بندی فضای سه‌بعدی، نقاط همسایه را با استفاده از دیاگرام ورونی<sup>۲</sup> برای یک مجموعه از نقاط در فضای سه‌بعدی به هم متصل می‌کند. انتخاب چهاروجهی‌هایی که از لحاظ ساختاری به چهاروجهی منظم نزدیک‌تر باشد برای جلوگیری از ایجاد چهاروجهی‌های بدو ضلع در تقسیم‌بندی نقاط در فضا مناسب‌تر می‌باشد. در تقسیم‌بندی توسط روش دلانی برای تقسیم‌بندی نقاط در فضا، تشکیل بهترین حالت از چهاروجهی‌ها تضمین می‌گردد [۶]. سپس چهاروجهی در برگیرنده نقطه مجهول در بین چهاروجهی‌های ایجاد شده استخراج<sup>۳</sup> و برای درونیایی مورد استفاده قرار می‌گیرد.

یکی از الگوریتم‌هایی که در این خصوص می‌تواند مورد استفاده قرار گیرد الگوریتم ذیل می‌باشد که هدف آن استخراج چهاروجهی دربرگیرنده نقطه مجهول  $P$  می‌باشد:

الف - نقطه دلخواه  $G_i$  درون چهاروجهی  $T_i$  در نظر گرفته می‌شود

ب - نقطه  $P$  درون همان چهاروجهی خواهد بود اگر پاره‌خط  $PG_i$  هیچ یک از سطوح چهاروجهی  $T_i$  را قطع نکند

ج - در غیر اینصورت نقطه  $G_i$  خارج از چهاروجهی دربرگیرنده نقطه  $P$  قرار خواهد داشت. چهاروجهی مجاور چهاروجهی  $T_i$  که در صفحه قطع شده توسط پاره خط  $PG_i$  با چهاروجهی  $T_i$  مشترک است، به عنوان چهاروجهی جدید  $T_{i+1}$  و نقطه  $G_{i+1}$  درون چهاروجهی جدید انتخاب می‌گردد. الگوریتم تا هنگامی که چهاروجهی دربرگیرنده نقطه مجهول شناسایی گردد، تکرار می‌شود [۶].

اگر در فضای سه‌بعدی نمونه‌های رنگی درون یک جدول مقایسه‌ای  $(x_i, y_i, z_i)$  در نظر گرفته شود و چهاروجهی دربرگیرنده نقطه مجهول با بردارهای  $P_1P_2P_3P_4$  نشان داده شود و هر بردار به ترتیب دارای موقعیت‌های فضایی  $(x_1, y_1, z_1)$ ،  $(x_2, y_2, z_2)$ ،  $(x_3, y_3, z_3)$ ،  $(x_4, y_4, z_4)$  باشد هر بردار از چهاروجهی دارای مقادیر  $R_i$  خواهد بود. برای هر نقطه دلخواه  $P$  با موقعیت فضایی  $(x, y, z)$  درون چهاروجهی  $P_1P_2P_3P_4$

می‌توان معادله ۱ را نوشت.

$$P = aP_1 + bP_2 + cP_3 + dP_4 \quad (1)$$

در این معادله ضرائب  $a, b, c$  و  $d$  برای نقطه  $P$  قابل محاسبه است. اگر معادله ۱ بر حسب مختصات فضایی هر بردار بازنویسی گردد معادله ۲ حاصل می‌شود.

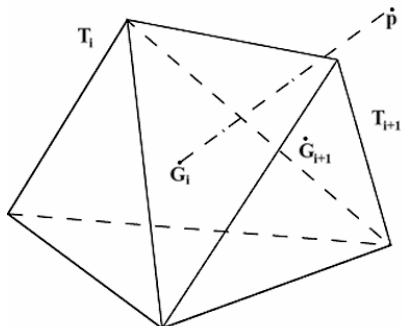
$$\begin{aligned} ax_1 + bx_2 + cx_3 + dx_4 &= x \\ ay_1 + by_2 + cy_3 + dy_4 &= y \\ az_1 + bz_2 + cz_3 + dz_4 &= z \end{aligned} \quad (2)$$

این معادله با فرض این که مجموع ضرائب  $a, b, c$  و  $d$  برابر یک باشد قابل حل است. ضرائب  $a, b, c$  و  $d$  در واقع همان ضرائب مورد نیاز برای محاسبه مقادیر طیف انعکاسی در هر طول موج برای نقطه  $P$  خواهد بود. بنابراین مقادیر طیف انعکاسی در طول موج  $\lambda$  با استفاده از مقادیر طیف انعکاسی نقاط مجاور که همان رئوس چهاروجهی در برگیرنده نقطه مجهول می‌باشد به صورت معادله ۳ محاسبه می‌شود.

$$R_\lambda = aR_{\lambda P_1} + bR_{\lambda P_2} + cR_{\lambda P_3} + dR_{\lambda P_4} \quad (3)$$

ضرائب  $a, b, c$  و  $d$  توسط روش‌های مختلف قابل محاسبه می‌باشند که همه آنها در حالت‌های مشابه در روش درونیایی خطی منجر به نتایج یکسان خواهند شد [۶].

در این تحقیق مقادیر رنگی اجسام در فضای CIEXYZ به منظور بازیابی طیف انعکاسی آن جسم در یک جدول مقایسه‌ای به کار رفته است. لازم به توضیح است که الگوریتم ارائه شده در این تحقیق به منظور محاسبه طیف انعکاسی با استفاده از مقادیر محرکه‌های رنگی به کار برده شد. تأثیر عواملی مانند میزان براق بودن یا انواع بافت‌های<sup>۴</sup> سطحی و غیره که در ظاهر رنگی یک جسم تأثیر می‌گذارد در صورت لزوم باید به طور مجزا مد نظر قرار گیرد.



شکل ۱: دو چهاروجهی مجاور  $T_i$  و  $T_{i+1}$  در فضای سه‌بعدی که نقاط  $G_i$  و  $G_{i+1}$  به ترتیب درون آنها واقع شده‌اند.

- 1- Delaunay
- 2- Voronoi
- 3 - Extraction

## ۲- بخش تجربی

### ۱-۲- وسایل

در این تحقیق از یک کامپیوتر پنتیوم ۴ (۲ و ۳ GHz) و نرم‌افزار MATLAB7 استفاده شده است.

### ۲-۲- روش کار

داده‌های طیفی ۱۲۶۹ نمونه رنگی مانسل به عنوان مجموعه اولیه برای ساخت یک جدول مقایسه‌ای مورد استفاده قرار گرفت. سپس مقادیر محرکه‌های CIEXYZ نمونه‌های رنگی در زیر استاندارد نوری D65 و مشاهده کننده ۱۹۶۴ با استفاده از مقادیر انعکاسی آنها محاسبه گردید. نحوه پراکندگی نمونه‌های رنگی مانسل در شکل ۲ در فضای CIEXYZ نشان داده شده است.

به منظور بازیابی بهینه طیف انعکاسی، عمل بخش‌بندی با استفاده از چهاروجهی‌ها با روش دلانی برای استخراج چهاروجهی‌های مناسب در فضای سه‌بعدی CIEXYZ استفاده شد. نحوه تقسیم‌بندی نقاط در فضای سه‌بعدی CIEXYZ توسط روش دلانی در شکل ۳ نشان داده شده است.

در نهایت با استفاده از چهاروجهی دربرگیرنده نقطه مجهول در فضای سه‌بعدی CIEXYZ عمل درونیابی خطی برای بازیابی طیف انعکاسی در ۱۶ طول موج صورت گرفت.

به منظور ارزیابی کارایی روش استفاده شده، اطلاعات رنگی نمونه‌ها برای تمامی ۱۲۶۹ نمونه به صورت مجزا ارزیابی گردید. برای هر یک از نمونه‌ها اندیس متاماریزم نمونه تخمین زده شد و نمونه اصلی محاسبه گردید (معادله ۴) [۸]. همچنین برای بررسی میزان اختلاف طیف‌های انعکاسی بین نمونه اصلی و تخمین زده شده، مقادیر مجذور مربعات خطا<sup>۱</sup> طبق معادله ۵ نیز مورد بررسی قرار گرفت.

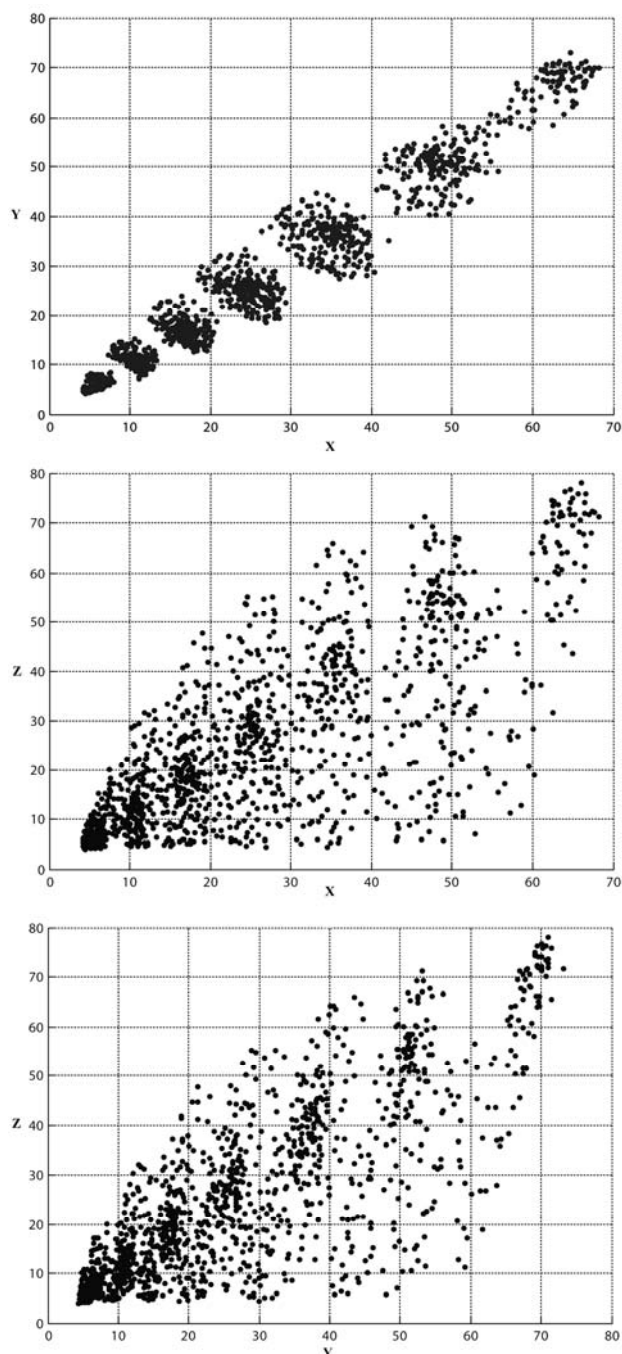
$$MI = \sqrt{(\Delta L_{n1}^* - \Delta L_{n2}^*)^2 + (\Delta a_{n1}^* - \Delta a_{n2}^*)^2 + (\Delta b_{n1}^* - \Delta b_{n2}^*)^2} \quad (4)$$

در این معادله  $n_1$  و  $n_2$  منابع نوری اول و دوم می‌باشند.

$$E_{RMS} = \sqrt{\frac{\sum_{\lambda=400}^{700} (R_{st,\lambda} - R_{es,\lambda})^2}{n}} \quad (5)$$

در این معادله  $\lambda$  طول موج و  $R_{st}$  و  $R_{es}$  به ترتیب طیف انعکاسی نمونه اصلی و طیف انعکاسی نمونه تخمین زده شده می‌باشند. در این معادله با توجه به این که مقادیر انعکاس در فواصل ۲۰ نانومتری اندازه‌گیری و انعکاس با ۱۶ عدد در محدوده طول موج‌های مرئی بیان شد، مقدار  $n$  برابر ۱۶ می‌باشد.

1- Root mean square (RMS)



شکل ۲: مقادیر محرکه‌های CIEXYZ برای ۱۲۶۹ نمونه رنگی مانسل در زیر استاندارد نوری D65 و مشاهده کننده ۱۹۶۴.

مقادیر میانگین مجذور مربعات خطا بین نمودارهای بازسازی شده و واقعی در جدول ۱ و مقادیر میانگین و حداکثر اندیس متاماریزم در زیر دو منبع نوری A و TL84 به همراه واریانس اندیس متاماریزم در جدول ۲ ارائه شده است.

جدول ۲: اندیس متامریزم در زیر دو منبع نوری A و TL84.

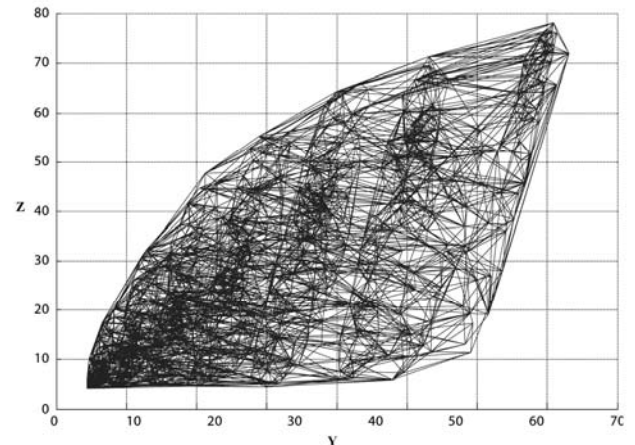
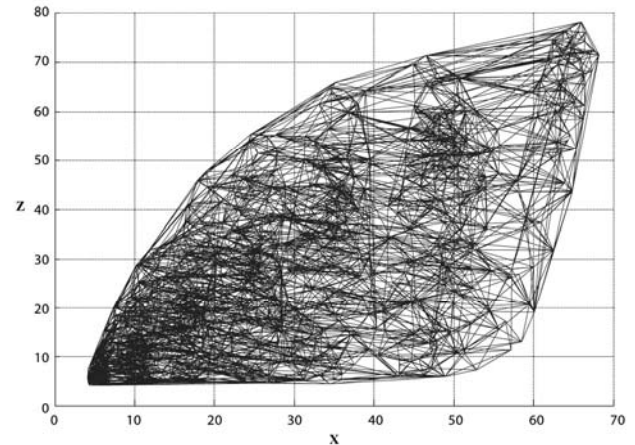
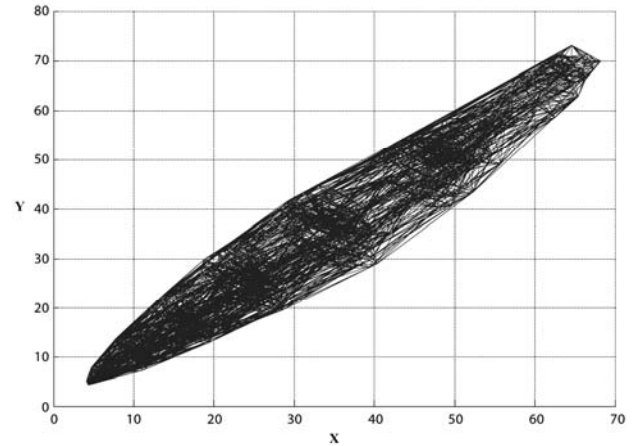
اندیس متامریزم					
میانگین		بیشینه		واریانس	
A	TL84	A	TL84	A	TL84
۰,۴۹۱۷	۰,۶۵۷۳	۵,۵۲۶۸	۶,۹۰۲۶	۰,۳۰۰۹	۰,۵۳۰۱

باید توجه داشت که در اغلب موارد، مقادیر رنگی در فضاهای رنگی متداول (مانند CIEXYZ یا CIELAB) با فواصل منظم اقلیدوسی منظم نمی‌باشد. بنابراین، مرحله استخراج چهاروجهی دربرگیرنده نقطه مجهول نسبت به حالت‌های منظم از پیچیدگی بیشتری برخوردار است. عمل شناسایی چهاروجهی دربرگیرنده نقطه مجهول مطابق الگوریتم توضیح داده شده در قسمت مقدمه صورت گرفته است.

### ۳- نتایج و بحث

مقادیر میانگین مجذور مربعات خطا کوچک و اندیس متامریزم پایین ارائه شده در جداول ۱ و ۲ نشان می‌دهد که روش ارائه شده در مجموع از دقت مناسبی در بازیابی طیف انعکاسی نمونه‌های مجهول برخوردار است. سرعت این روش نیز با توجه به اینکه عمل تقسیم‌بندی فضای رنگی توسط چهاروجهی برای هر جدول مقایسه‌ای یک بار صورت می‌پذیرد، بسیار مناسب می‌باشد.

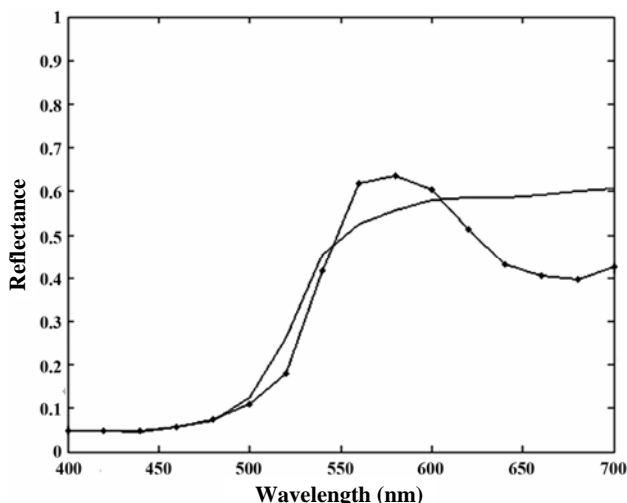
براساس معادله ۱ برای درونیابی در فضای سه‌بعدی CIEXYZ نیاز به چهار نقطه همسایه است که منجر به تولید یک چهاروجهی گردد. بنابراین، در درونیابی طیف انعکاسی نمونه مجهول، اطلاعات طیفی چهار نمونه همسایه به همراه وزن‌های محاسبه شده مورد استفاده قرار گرفت. شکل ۳ یک نمونه از سری نمونه‌های مانسل را که توسط اطلاعات طیفی چهار نقطه همسایه تخمین زده شده را نشان می‌دهد. در کل اختلاف بین نمودار بازسازی شده و نمودار اصلی بیشتر در نواحی انتهایی طول موج مرئی (نزدیک ۴۰۰ و ۷۰۰ نانومتر) است که به دلیل مقادیر کم توابع رنگ همانند در این نواحی می‌باشد. این مسأله در شکل ۴ ارائه شده است. با توجه به وزن کم این نقاط در محاسبه مقادیر رنگی CIEXYZ انطباق کامل این نواحی از طیف انعکاسی در محاسبه اندیس‌های متامریزم نیز از اهمیت کمتری برخوردار است. عدم همانندی این قسمت از طیف انعکاسی در اغلب روش‌ها مشهود است که باعث ایجاد طیف انعکاسی جفت متامر می‌گردد ولی در این روش به لحاظ استفاده از نقاط همسایه انتظار می‌رود که این روش نسبت به سایر روش‌ها منجر به بازیابی انعکاس نزدیک‌تر به نمونه هدف گردد.



شکل ۳: نحوه تقسیم‌بندی مقادیر CIEXYZ برای ۱۲۶۹ نمونه رنگی مانسل در فضای ۳ بعدی CIEXYZ توسط روش دلانی.

جدول ۱: مقادیر مجذور مربعات خطا (RMS) بین نمودارهای بازسازی شده و واقعی.

مجذور مربعات خطا		
میانگین	بیشینه	واریانس
۰,۰۰۴۶	۰,۱۶۳۱	$۱,۷۷ \times ۱۰^{-۴}$

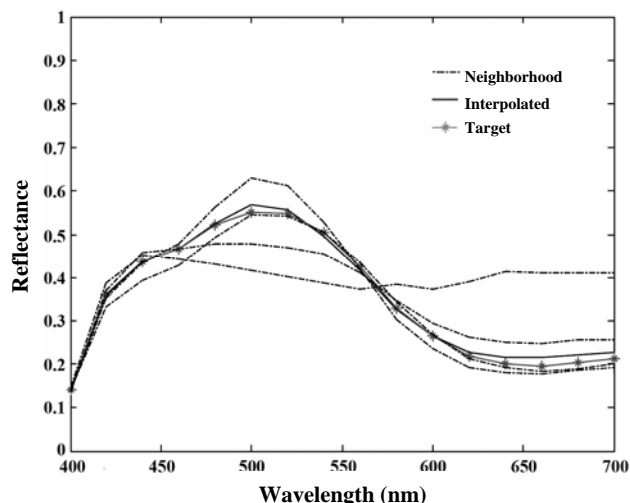


شکل ۵: طیف انعکاسی بازیابی شده برای نمونه‌ای با بیشترین مقدار خطای RMS (نمودار با دایره توپر طیف انعکاسی نمونه بازیابی و نمودار دیگر طیف انعکاسی اصلی نمونه).

از آنجا که عمل درون‌یابی در دو مرحله صورت می‌گیرد زمان لازم برای هر مرحله جداگانه نیز مورد بررسی قرار گرفته است. مرحله اول که جدول مقایسه‌ای در فضای اولیه بخش‌بندی می‌شود به علت این که تنها یک بار برای یک سری از داده‌ها (که در این حالت سری نمونه‌های مانسل می‌باشد) صورت می‌گیرد از اهمیت کمتری برخوردار است. بنابراین، مدت زمان مورد نیاز برای انجام درون‌یابی به عنوان معیار اصلی در نظر گرفته می‌شود. زمان لازم برای بخش‌بندی جدول مقایسه‌ای موجود برابر ۰,۴ ثانیه و زمان متوسط برای درون‌یابی هر نمونه به طور میانگین برابر ۰,۰۳ ثانیه اندازه‌گیری شده است که زمان نسبتاً قابل قبولی است.

#### ۴- نتیجه‌گیری

در این تحقیق با به کارگیری داده‌های رنگی در شرایط مختلف مشاهده برای یک سری از نمونه‌های استاندارد، طیف انعکاسی جسم با دقت و سرعت مناسب بازیابی شد. با توجه به کاربرد جداول رنگی استاندارد به منظور توصیف و تحلیل محدوده‌های رنگی، اطلاعات رنگی این نمونه‌ها معمولاً در دسترس می‌باشند. از این رو به خصوص در هنگام استفاده از تصاویر رنگی که تعداد نقاط رنگی بسیار زیاد هستند، با کاربرد جداول رنگی استاندارد موجود، این روش می‌تواند با سرعت و دقت مناسب مورد استفاده قرار گیرد.



شکل ۴: درون‌یابی طیف انعکاسی یکی از نمونه‌های مانسل با استفاده از اطلاعات طیفی نمونه‌های همسایه (نمودارهای خط‌چین طیف‌های انعکاسی نمونه‌های همسایه نمودار ساده طیف انعکاسی نمونه اصلی و نمودار مشخص شده با ستاره طیف انعکاسی حاصل از الگوریتم درون‌یابی).

به منظور ارائه مناسب‌تر نتایج بازیابی، طیف انعکاسی یک نمونه از نمودارهای بازسازی شده که منجر به کسب بیشترین مقدار خطا شده است (شکل ۵)، همان گونه که مشاهده می‌شود نمودار بازیابی شده علیرغم برخورداری از بیشترین مقدار مجذور مربعات خطا از خطای قابل قبولی نسبت به نمودار انعکاسی اصلی برخوردار است. باید توجه داشت که نقاط درون‌یابی شده به طور مستقیم از نقاط همسایه تأثیر می‌پذیرند لذا نحوه پراکندگی نقاط در فضا و همچنین شکل و وضعیت چهاروجهی دربرگیرنده نقطه مجهول در تخمین میزان انعکاس حائز اهمیت می‌باشد. این امر باعث می‌شود تا عمل درون‌یابی حتی در مواقعی که مجموعه کاملی از نقاط اولیه در دسترس نباشد در صورتی که نقطه مجهول درون محدوده قرار گیرد نیز با دقت مناسبی انجام پذیرد. عدم پراکندگی مناسب در مورد روش‌هایی نظیر روش PCA، روش رگرسیونی و غیره که از کلیه داده‌های درون جدول استفاده می‌کنند باعث افزایش خطای بازسازی می‌گردد. همچنین با توجه به تأثیرپذیری نقطه مجهول از نقاط همسایه می‌توان اطمینان حاصل کرد که طیف انعکاسی تخمین زده شده دارای خصوصیتی مانند وجود نقاط تیز<sup>۱</sup> و یا منفی در طیف انعکاسی نخواهد بود. وجود نقاط تیز یا مقادیر منفی در روش PCA در بازسازی طیف انعکاسی به عنوان یک نقطه ضعف تلقی می‌شود.

1- Spiky

## ۵- مراجع

1. D. Dupont, Study of the reconstruction of reflectance curves based on tristimulus values: Comparison of methods of optimization. *Col. Res. Appl. J.* 27(2002), 88-99.
2. K. Ansari, S. H. Amirshahi, S. Moradian, Recovery of reflectance spectra from CIE tristimulus values using a progressive database selection technique. *Color. Technol.* 122(2006), 128-134.
3. G. Wang, C. Li, M. R. Luo, Improving the hawkyard method for generating reflectance functions. *Col. Res. Appl.* 30(2005), 283-287.
4. F. H. Walters, L. R. Parker, Jr., S. L. Morgan, S. N. Deming, sequential simplex optimization. CRC Press, Inc., Boca Raton, Florida, (1991).
5. P. Green, L. MacDonald, Color engineering. Addison-Wesley, England, (2002).
6. I. Amidror, Scattered data interpolation methods for electronic imaging systems: A survey. *J. Electron. Imaging.* 11(2002), 157-176.
7. M. de Berg., M. van Krefeld, M. Overmars, O. Schwarzkopf, Computational geometry: Algorithms and applications 2<sup>nd</sup> edition, Berlin; New York: Springer, (2000).
8. Special metamerism index: change in illuminant. Supplement 1 to CIE publication no. 15: (E-1, 3.1), (1971), Colorimetry, Bureau central De CIE, Paris.