



تعداد بردارهای ویژه لازم برای ارائه طیف انعکاسی رنگزاهای طبیعی

سعیده گرجی کندی^{۱*}، امیر کیومرثی^۲، کمال الدین قرنجیگ^۲

۱- استادیار، گروه پژوهشی نمایش رنگ و پردازش تصویر، پژوهشگاه علوم و فناوری رنگ، تهران، ایران، صندوق پستی: ۱۶۷۶۵-۶۵۴

۲- استادیار، گروه پژوهشی مواد رنگزای آلی، پژوهشگاه علوم و فناوری رنگ، تهران، ایران، صندوق پستی: ۱۶۷۶۵-۶۵۴

تاریخ دریافت: ۸۸/۱۲/۱۶ تاریخ پذیرش: ۸۹/۸/۲ در دسترس به صورت الکترونیکی از: ۱۳۹۰/۳/۲۰

چکیده

داده‌های طیفی، که اطلاعات با ارزشی را در اختیار می‌گذارند معمولاً در تعداد ابعاد زیادی بسته به دقت دستگاه اندازه‌گیری گزارش می‌شوند. این در حالی است که در طی نیم قرن اخیر به کارگیری روش‌های ریاضی چون تحلیل اجزاء اصلی (PCA) نشان داده است که تعداد بردارهای ویژه داده‌های طیفی، بسیار محدود می‌باشد. در این پژوهش، با به کارگیری روش PCA برای یک مجموعه ۶۲۹ تایی از نمونه‌های پشمی رنگزایی شده با رنگزاهای طبیعی، تعداد بردار ویژه لازم برای بیان داده‌های انعکاس طیفی چنین رنگزاهایی مورد بررسی قرار گرفت. پارامترهای GFC ، $RMSE$ و همچنین میانگین اختلاف رنگ تحت دو منبع نوری به عنوان معیار ارزیابی، برای بررسی خطا به خدمت گرفته شد. نتایج حاکی از آن بود که داده‌های انعکاس طیفی نمونه‌های رنگزایی شده با رنگزاهای طبیعی به علت داشتن منحنی‌های مشابه و هموار می‌توانند با دقت بسیار بالایی ($GFC = 0.999$) با تقریباً ۵ بردار ویژه بازسازی شوند. همچنین به کارگیری بردارهای ویژه همسان (تهیه شده از مجموعه رنگزاهای طبیعی)، نتایج بهتری نسبت به مجموعه‌های دیگر نظیر پلی‌استر رنگزایی شده و همچنین مجموعه ۱۲۶۹ تایی مانسل داشته است.

واژه‌های کلیدی: رنگزاهای طبیعی، طیف انعکاسی، تحلیل اجزاء اصلی، بردارهای ویژه.

Appropriate Number of Principal Components for Spectral Reflectance Representation of Natural Dyes

S. Gorji^{1*}, A. Kiumarsi², K. Gharanjig²

¹ Department of Color Imaging and Color Image Processing, Institute for Color Science and Technology, P.O.Box: 16765-654, Tehran, Iran.

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

Abstract

Spectral data which give valuable information, are usually represented with a high dimension according to the accuracy of instrument. During the last decades, applying mathematical methods such as Principal Component Analysis (PCA) has shown that spectral data has limited number of principal vectors. In the present study, the appropriate numbers of PC vectors for representing the spectral reflectance of natural dyes were investigated applying a set of 629 wool samples dyed with natural dyes. GFC , $RMSE$ and color differences under two illuminants were considered to evaluate the magnitude of error. Experimental results showed that it is possible to represent the spectral data of natural dyes with almost 5 principal components with precious accuracy ($GFC=0.999$). In addition, the best results were obtained when the principal vectors are extracted from the same data set (natural dyes) in comparison to other sets such as dyed polyesters or 1269 Munsell set. *J. Color Sci. Tech.* 5(2011), 51-60 © Institute for Color Science and Technology.

Keywords: Natural dyes, Spectral reflectance, Principal Component Analysis, Principal vectors.

۱- مقدمه

داده‌های انعکاس با انتقال طیفی مهم‌ترین و در عین حال با ارزش‌ترین اطلاعات رنگی یک نمونه می‌باشد. با در اختیار داشتن انعکاس نمونه می‌توان رنگ آن را تحت شرایط مختلف مشاهده و منابع نوری متنوع محاسبه نمود. با توجه به ویژگی‌های دستگاه اسپکتروفوتومتر مورد استفاده، اگر مقادیر داده‌های طیفی در محدوده ۷۵۰-۳۸۰ nm و با فواصل ۵ nm یا ۱۰ nm اندازه‌گیری شوند، آنگاه تجزیه و تحلیل و محاسبات رنگی به ترتیب در ۶۱ یا ۳۱ طول موج بین محدوده ۷۰۰-۴۰۰ nm صورت می‌گیرد.

در طی سال‌های متمادی بحث‌های زیادی در مورد ابعاد واقعی داده‌های انعکاس طیفی مطرح شده است. تحقیقات و مطالعات در این زمینه نشان دهنده آن بوده است که به دلیل یکنواختی و پیوستگی داده‌های انعکاس طیفی، تعداد ابعاد مستقل کمتر از ۶۱، ۳۱ و حتی ۱۶ طول موج می‌باشد و می‌توان این داده‌ها را با خطای قابل قبول، با تعداد بعد پایین‌تر گزارش نمود. در همین ارتباط یکی از روش‌هایی که به طور گسترده مورد استفاده قرار گرفته است روش تحلیل اجزاء اصلی^۱ (PCA) می‌باشد.

PCA یک ابزار ریاضی قوی، جهت یافتن الگوها^۲ در داده‌های با تعداد بعد بالا است. به کارگیری PCA امکان بیان داده‌ها را در تعداد ابعاد کمتر و با اهمیت‌تر فراهم می‌آورد به نحوی که این داده‌ها از ترکیب خطی داده‌های اولیه حاصل می‌شوند و غیر همبسته^۳ می‌باشند. از دید هندسی در به کارگیری PCA، محورهای سیستم مختصات اولیه به محورهای متعامد^۴ جدیدی چرخانده می‌شوند به طوری که تغییرات (اختلافات) موجود در داده‌های اولیه تا حد امکان محفوظ بماند. از مهم‌ترین کاربردهای PCA، یافتن الگوهای اصلی در داده‌ها، برای بیان آنها در فضایی با تعداد بعد کمتر می‌باشد [۱، ۲]. با به کارگیری این روش می‌توان تعداد بردارهای ویژه لازم جهت بیان داده‌های انعکاس طیفی را با خطای قابل قبول مورد بررسی قرار داد. به عنوان یکی از اولین تحقیقات در این زمینه، کوهن^۵ در سال ۱۹۶۴، سه بردار اصلی ۱۵۰ نمونه مانسل را گزارش نمود [۳]. به دنبال کوهن، تحقیقات زیادی در این راستا بر روی مجموعه‌های مختلف از داده‌های طیفی صورت گرفت. مالونی^۶ (۱۹۸۶) در مورد ۴۶۲ داده‌های انعکاس طیفی از نمونه‌های مانسل و یک مجموعه از نمونه‌های طبیعی تحقیق نمود [۴]. نتایج تحقیق وی نشان داد که ۵ تا ۷ بردار ویژه اولیه از داده‌های مانسل، برای بازسازی این مجموعه و همچنین داده‌های دیگر نظیر

مجموعه نمونه‌های طبیعی، مناسب می‌باشد. البته گزارش شد که برای بیان نمونه‌های طبیعی با بردارهای مانسل، چنانچه رسیدن به دقت مشابه مد نظر باشد باید تعداد بردار ویژه بیشتری را به کار برد. پارکینن^۷ و همکارانش (۱۹۸۷) در مورد تعداد بردارهای ویژه لازم برای ارائه مجموعه ۱۲۵۷ تایی مانسل تحقیق نمودند [۵]. آنها گزارش کردند که برای رسیدن به جواب قابل قبول، ۸ بردار ویژه لازم می‌باشد که بیشتر از تعداد پیشنهادی کوهن و همچنین مالونی بود. دنمیلر^۸ و همکارانش (۱۹۹۲)، تعداد بردارهای اصلی لازم برای ارائه داده‌های انعکاس طیفی نمونه‌های موجود در طبیعت را بررسی نمودند [۶]. آنها بر روی ۳۳۷ نمونه طبیعی، روش PCA را به کار بردند و اعلام نمودند که ۳ بردار ویژه برای بازسازی منحنی انعکاسی این مجموعه می‌تواند کافی باشد. ورهل^۹ و همکارانش (۱۹۹۴) تحلیل اجزاء اصلی را برای ۳۵۴ نمونه انعکاسی شامل ۶۴ نمونه مانسل، ۱۲۰ نمونه رنگ شده دوپونت^{۱۰} و ۱۷۰ داده انعکاس طیفی از نمونه‌های طبیعی و مصنوعی به کار گرفتند [۷]. آنها خطای بازسازی بردارهای ویژه را با به کارگیری سه تا هفت بردار پایه گزارش نمودند. ام^{۱۱} و همکارانش (۱۹۹۴) برای بازسازی نمونه‌های مک بث از بردارهای ویژه ۱۵۶۵ نمونه مانسل استفاده نمودند و نشان دادند که با به کارگیری ۴ بردار ویژه اول می‌توان به بازسازی قابل قبولی دست یافت [۸]. جاسکلاین^{۱۲} و همکارانش (۱۹۹۰) بردارهای ویژه نمونه‌های مانسل پارکینن و همچنین ۲۱۸ نمونه انعکاسی از رنگ‌های موجود در طبیعت را استخراج نمودند و نشان دادند که بردارهای اصلی مانسل را می‌توان برای بازسازی نمونه‌های طبیعی به کار گرفت اگرچه تعداد بردار ویژه بیشتری برای رسیدن به دقت مشابه نیاز است [۹]. لنز^{۱۳} و همکارانش (۱۹۹۶) بردارهای ویژه سه دسته نمونه، شامل نمونه‌های مانسل پارکینن و همکارانش، ۱۲۶۹ نمونه مانسل و یک مجموعه ۱۵۱۳ تایی از نمونه‌های NCS را مورد بررسی قرار دادند [۱۰]. آنها نشان دادند که با توجه به نتایج PCA این سه مجموعه از نظر آماری بسیار مشابه می‌باشند و اولین بردارهای ویژه این سه مجموعه به هم وابسته است. گارسیا^{۱۴} و همکارانش (۱۹۹۸) روش PCA را برای ۵۵۷۴ نمونه رنگ‌های اکریلیکی اعمال شده بر روی برگه‌های کاغذی به کار گرفتند و نشان دادند که با به کارگیری هفت بردار ویژه می‌توان داده‌های انعکاس طیفی را با دقت قابل قبولی ارائه نمود [۱۱]. در ضمن آنها تأثیر فام مجموعه مرجع جهت افزایش کارایی PCA را روی نمونه‌ها مورد بررسی قرار دادند و نشان دادند، چنانچه نمونه‌ها بر

7- Parkkinen
8- Dannemiller
9- Vrhel
10- Du Pont
11- Eem
12- Jaaskelainen
13- Lenz
14- Garcia

1- Principal Component Analysis
2- Pattern
3- Uncorrelated
4- Orthogonal
5- Cohen
6- Maloney

میانگین مربعات خطا در بازسازی داده‌ها با تعداد محدود بردار ویژه می‌تواند از رابطه ۴ نیز تخمین زده شود. در این رابطه λ_i اندیس بردار ویژه استفاده نشده و λ_i مقدار ویژه مربوط به آن می‌باشد. بدین ترتیب اولین بردار ویژه که دارای بزرگ‌ترین مقدار ویژه است، مهم‌ترین بردار پایه می‌باشد که جهت بیشترین پراکندگی را در داده‌ها نشان می‌دهد و بالعکس.

$$\bar{\varepsilon}^2(m) = \sum_{i=m+1}^n \lambda_i \quad (4)$$

با توجه به اینکه مقدار مطلق λ_i می‌تواند برای مجموعه داده‌های مختلف متفاوت باشد، نسبت هر مقدار ویژه به مجموع مقادیر ویژه به عنوان یک شاخص مناسب جهت ارزیابی هر بردار ویژه به صورت رابطه ۵ پیشنهاد شده است. این رابطه بیانگر درصد میانگین مربعات خطای حاصل از حذف بردار ویژه λ_m می‌باشد و بعبارتی ارزش یک بردار ویژه را نشان می‌دهد. بدیهی است هر چه این درصد برای تعداد کمتری از بردارهای ویژه اولی، بالاتر باشد امکان بیان داده‌ها در فضای با بعد کمتر بیشتر می‌باشد [۲].

$$\mu_i = \frac{\lambda_i}{\sum_{j=1}^n \lambda_j} \times 100 \quad (5)$$

۲- بخش تجربی

در این تحقیق تعداد بردارهای ویژه لازم برای ارائه داده‌های انعکاسی طیفی نمونه‌های پشم رنگریزی شده با رنگزاهای طبیعی مورد بررسی قرار گرفت. برای این منظور الیاف پشمی رنگریزی شده با انواع مختلف رنگزاهای طبیعی مورد استفاده قرار گرفت. رنگزاهای به کار گرفته شده شامل رنگزاهای استخراج شده از انار، انگور، گردو، ارونه، روناس، گلرنگ، چغندر، سماق، اسپرک، زلیل (رنگدانه آهن)، و سسمه و یک مجموعه که از مخلوط رنگزاهای مختلف حاصل شده، می‌باشد. در رنگریزی‌ها از ۰ تا ۵٪ نسبت به وزن کالا (O.W.F.) از دندانه‌هایی نظیر آلومینیوم، قلع، مس، کرم و آهن استفاده گردید. جدول ۱ تعداد نمونه‌های رنگریزی شده در هر دسته را نشان می‌دهد. همچنین در جدول ۲ فام خالص‌ترین نمونه در هر دسته گزارش شده است. در ادامه مجموعه نمونه‌های پشمی رنگریزی شده با رنگزاهای طبیعی به اختصار مجموعه رنگزاهای طبیعی نامیده می‌شود.

مبنای فام دسته‌بندی شوند تعداد بردارهای ویژه لازم برای رسیدن به دقت مشابه قبل، ۱ تا ۲ بردار کاهش می‌یابد. همچنین در نزدیک‌ترین تحقیق یافت شده در این زمینه، بررسی تعداد ابعاد خامه قالی رنگ شده با رنگزاهای طبیعی با روش PCA توسط قانعان و همکارانش (۲۰۰۷) انجام شده است [۱۲]. این تحقیق بر روی ۲۸۶ نمونه رنگ شده با رنگزاهای طبیعی صورت گرفته و همچنین جهت مقایسه، نتایج حاصل از مجموعه مانسل نیز به کار گرفته شده است. عنوان شده که چنانچه ۶ تا ۸ بردار ویژه برای بیان داده‌های مانسل نیاز باشد، رنگزاهای طبیعی مورد استفاده حدود ۲ بردار ویژه کمتر، برای رسیدن به دقت مشابه نیاز دارند.

هدف از پژوهش حاضر، بررسی تعداد بردارهای ویژه لازم برای ارائه داده‌های انعکاس طیفی رنگزاهای طبیعی می‌باشد. از آنجا که رنگزاهای طبیعی فام‌های محدودی را پوشش داده و منحنی‌های طیفی مربوط به هر دسته رنگزا، دارای شباهت‌هایی می‌باشند به نظر می‌رسد تعداد بردارهای ویژه تاثیرگذار (دارای مقادیر ویژه قابل توجه) در آنها محدود باشد. این بررسی با به کارگیری روش PCA بر روی داده‌های انعکاس طیفی مجموعه ای شامل ۶۲۹ نمونه پشم رنگریزی شده با انواع متنوعی از رنگزاهای طبیعی، انجام شده است.

روش تحلیل اجزاء اصلی (PCA) [۱،۲]

چنانچه X یک مجموعه شامل P عدد داده طیفی در فضای n بعدی باشد، این مجموعه داده در فضای $m < n$ بعدی با استفاده از رابطه ۱ به دست می‌آید.

$$Y_{(m \times p)} = PC'_{(m \times n)} \cdot X_{(n \times p)} \quad (1)$$

در این رابطه PC' ماتریس بردارهای اصلی^۱ شامل m بردار ویژگی در فضای n بعدی است. داده‌های اولیه با استفاده از رابطه ۲ قابل بازسازی می‌باشند.

$$\hat{X}_{(n \times p)} = PC_{(n \times m)} \cdot Y_{(m \times p)} \quad (2)$$

میانگین مربعات خطا بین داده‌های اصلی و بازسازی شده از رابطه ۳ حاصل می‌شود.

$$\bar{\varepsilon}^2(m) = \text{mean} \left(\|X - \hat{X}\|^2 \right) \quad (3)$$

اثبات می‌شود بهترین بردارهای اصلی (PC) که میانگین مربعات خطای بازسازی را حداقل نمایند بردارهای ویژه ماتریس کوواریانس داده‌های اصلی است که به نام بردارهای پایه^۲ نیز شناخته می‌شوند. بدین ترتیب PCA قادر به انتقال خطای داده‌ها از فضایی با بعد بالا به فضایی با بعد پایین که دارای اجزاء غیر همبسته است، می‌باشد.

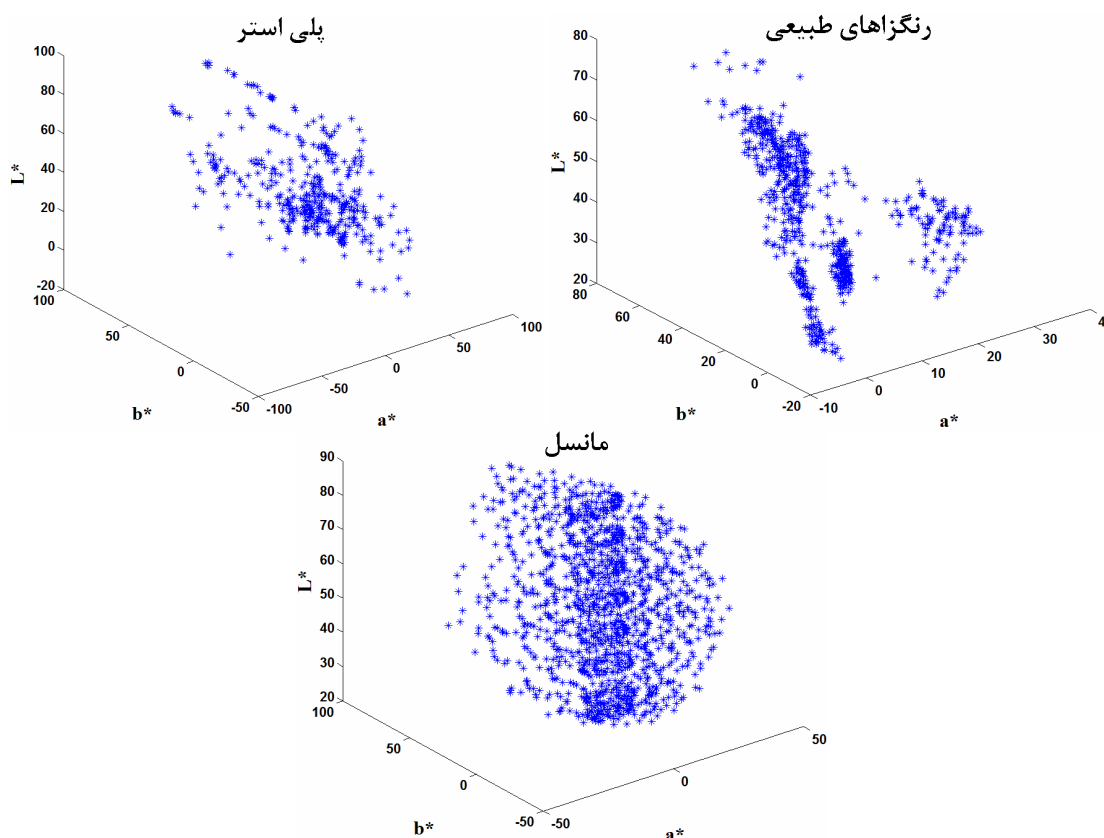
1- Principle vectors or principle components
2- Basis vectors

جدول ۱: تعداد نمونه‌های موجود در هر دسته رنگزای طبیعی.

کل	مخلوط	وسمه	زلیل	اسپرک	سماق	چغندر	گلرنگ	روناس	ارونه	گردو	انگور	انار	رنگزا
۶۲۹	۲۶	۴۰	۳۰	۴۰	۵۴	۲۶	۷۱	۹۵	۱۸	۱۱۷	۳۵	۷۷	تعداد

جدول ۲: زاویه فام نمونه با بالاترین خلوص در هر دسته رنگزای طبیعی.

مخلوط	وسمه	زلیل	اسپرک	سماق	چغندر	گلرنگ	روناس	ارونه	گردو	انگور	انار	رنگزا
۷۵	۲۵۴	۸۰	۷۶	۸۰	۶۲	۷۹	۳۳	۸۴	۶۰	۸۲	۷۸	h_{ab}^*



شکل ۱: موقعیت مجموعه رنگزاهای طبیعی، پلی استر رنگزای شده و همچنین مجموعه ۱۲۶۹ تایی مانسل در فضا رنگ CIELAB.

۳۹۴ تایی از نمونه پارچه‌های پلی استر رنگزای شده و مجموعه ۱۲۶۹ تایی نمونه‌های مات مانسل [۱۳] نیز مورد بررسی قرار گرفت. شکل ۱ موقعیت مجموعه نمونه‌های مورد بحث را در فضای CIELAB نشان می‌دهد.

مجموعه رنگزاهای طبیعی، معمولاً فام‌های قرمز تا زرد و آبی را شامل می‌شوند. در مورد مجموعه مورد استفاده نیز، چنانچه از شکل ۱ ملاحظه می‌شود تقریباً بجز نمونه‌های رنگزای شده با رنگزای وسمه که در محدوده فام‌های آبی قرار می‌گیرند و برخی از رنگ‌های دسته مخلوط، بقیه نمونه‌ها، فام‌های قرمز تا زرد را شامل می‌شوند. با توجه به این امر، یک بار نیز مجموعه تهیه شده از رنگزاهای طبیعی به غیر

طیف انعکاسی مجموعه مذکور با استفاده از اسپکتروفوتومتر Eye-One با هندسه اندازه‌گیری ۴۵،۰ و در محدوده ۳۸۰nm تا ۷۳۰nm با گام‌های ۱۰nm اندازه‌گیری شد. کلیه محاسبات و بررسی‌ها، با ۳۱ طول موج در محدوده ۴۰۰nm تا ۷۰۰nm انجام گرفت. محاسبه مقادیر مختصات رنگی نمونه‌ها، تحت منبع نوری D65 و مشاهده کننده استاندارد ۱۹۶۴ (۱۰°) انجام پذیرفته است.

جهت بررسی تعداد بردارهای ویژه لازم برای ارائه داده‌های انعکاسی طیفی رنگزاهای طبیعی، هر دسته با تعداد ۱۰ تا ۱ بردار ویژه به دست آمده از همان دسته با روش PCA، مورد بازسازی قرار گرفت. همچنین نتایج بازسازی هر دسته با ۵ بردار ویژه اول کل مجموعه، یک مجموعه

آمده برای GFC، RMSE و همچنین متوسط اختلاف رنگ، بازسازی طیف این نمونه‌ها با ۱۰، ۹، ۸ و حتی ۷ بردار ویژه به هیچ وجه ضروری نمی‌باشد و به طور متوسط ۵ و حتی ۴ بردار ویژه کفایت می‌کند. با توجه به مقادیر خطای گزارش شده برای ۳ بردار ویژه، ملاحظه می‌شود با قبول خطای متوسط ۱ تا ۲ واحد CIEDE2000 (1:1:1)، در مورد بسیاری از رنگزاهای بازسازی داده‌های انعکاس طیفی در سه بعد امکان پذیر است. البته در برخی موارد مانند روناس، تغییر از ۴ بردار ویژه به ۳ بردار خطای قابل توجهی را سبب می‌شود.

در بخش دیگر از این تحقیق، خطای بازسازی طیفی دسته رنگزاهای مختلف با ۵ بردار ویژه اول استخراج شده از کل مجموعه، کل مجموعه بجز نمونه‌های مربوط به رنگزای وسمه (فام آبی)، مجموعه مانسل و مجموعه نمونه‌های پلی استر رنگزای شده، محاسبه شده و برای مقایسه در کنار حالتی که بردارهای ویژه هر رنگزا از همان دسته استخراج شود، در جدول ۴ آورده شده است. ملاحظه می‌شود که در مقایسه بین به کارگیری بردارهای ویژه هر دسته برای خودش با بردارهای ویژه کل مجموعه، چنانچه انتظار می‌رفت تا اندازه‌ای خطا زیاد می‌شود هرچند مقدار آن قابل توجه نمی‌باشد. به عبارتی به کارگیری بردارهای ویژه کل رنگزاهای طبیعی، نتایج کاملاً قابل قبولی دارد. حذف نمونه‌های مربوط به رنگزای وسمه در مورد اکثر دسته رنگزاهای نتایج را تا اندازه بسیار اندکی بهبود می‌دهد اگرچه در مورد خود دسته وسمه مطابق انتظار، مقدار GFC کاهش و RMSE و اختلاف رنگ تحت منبع D65 افزایش یافته البته تا حدی مقادیر میانگین اختلاف رنگ تحت منبع نوری A کاهش یافته است.

- 1- Root of mean square error
- 2- Goodness-of- Fit Coefficient

از وسمه نیز جدا شده و نتایج ارائه هر دسته با بردارهای ویژه مجموعه مذکور، مورد بررسی قرار گرفت.

جهت بررسی خطای حاصل از بازسازی بعد از کاهش بعد، معیارهای (RMSE) λ ، (GFC) λ و اختلاف رنگ تحت دو منبع نوری D65 و A مورد بررسی قرار گرفت. برای محاسبه GFC از رابطه ۶ استفاده شد. در این رابطه، R و \hat{R} به ترتیب مقادیر طیف‌های انعکاسی اولیه و بازسازی شده، می‌باشند.

$$GFC = \frac{\left| \sum_{\lambda} R_{\lambda} \hat{R}_{\lambda} \right|}{\sqrt{\sum_{\lambda} R_{\lambda}^2} \sqrt{\sum_{\lambda} \hat{R}_{\lambda}^2}} \quad (6)$$

برای محاسبه میزان اختلاف رنگ، فرمول اختلاف رنگ CIEDE2000(1:1:1) با رابطه نشان داده شده در ۷، استفاده شد [۱۵]. در این رابطه، ΔL^* ، ΔC^* و ΔH^* به ترتیب بیانگر اختلافات روشنایی، خلوص و فام در فضای CIELAB 1976 می‌باشند؛ S_C ، S_L و S_H ، توابع وزن برای روشنایی، خلوص و فام هستند و ضریب‌های k_C ، k_H و وابسته به شرایط مشاهده می‌باشند.

$$CIEDE2000(k_L, k_C, k_H) = \sqrt{\left(\frac{\Delta L^*}{k_L S_L}\right)^2 + \left(\frac{\Delta C^*}{k_C S_C}\right)^2 + \left(\frac{\Delta H^*}{k_H S_H}\right)^2 + R_T \left[\left(\frac{\Delta C^*}{k_C S_C}\right) \left(\frac{\Delta H^*}{k_H S_H}\right) \right]} \quad (7)$$

۳- نتایج و بحث

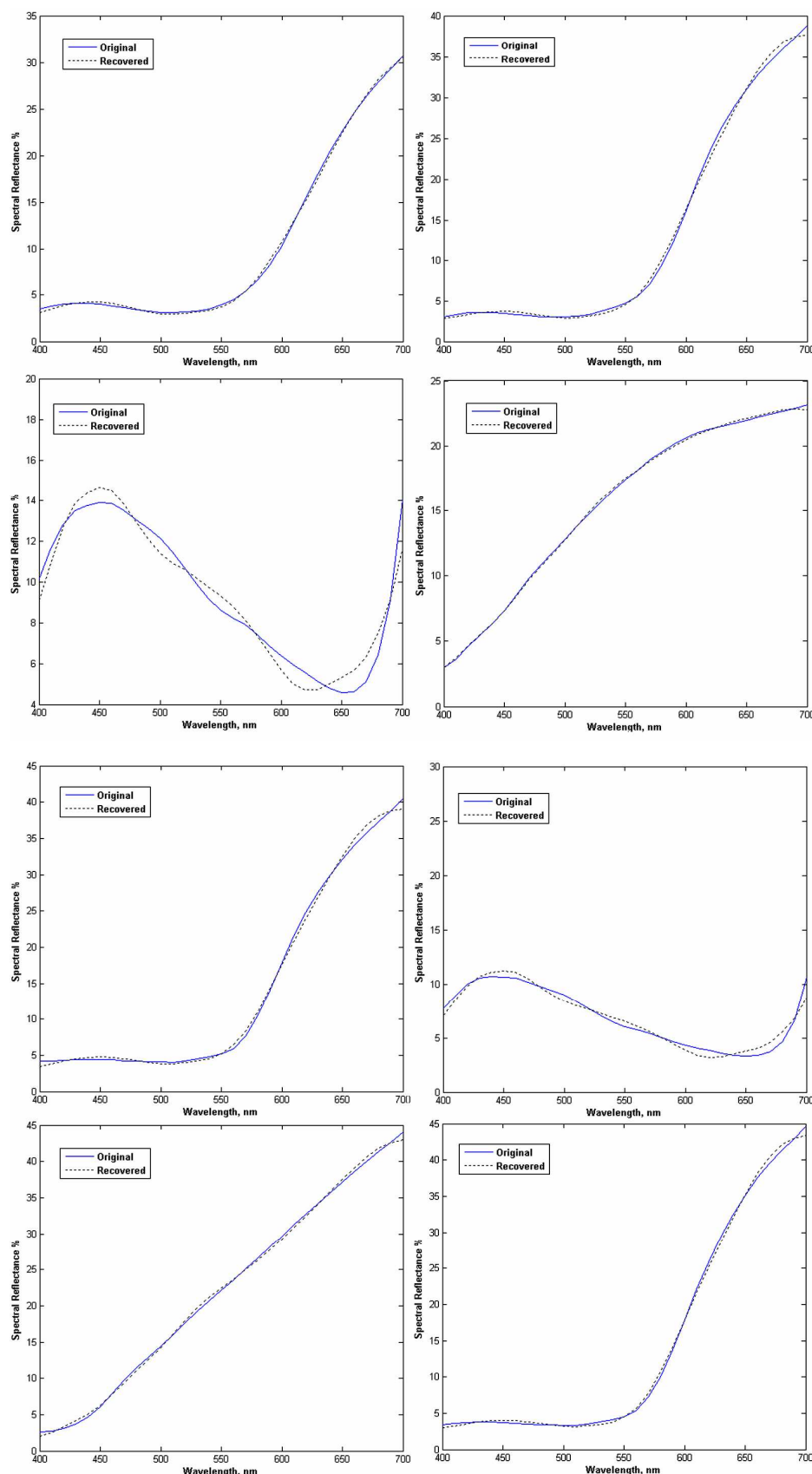
جدول ۳ نتایج بازسازی داده‌های انعکاس طیفی هر یک از دسته رنگزای طبیعی را با ۱۰ تا ۱ بردار ویژه به دست آمده از همان دسته نشان می‌دهد. چنانچه ملاحظه می‌شود با توجه به مقادیر به دست

جدول ۳: نتایج ارائه طیف انعکاسی دسته‌های مختلف از مجموعه رنگزاهای طبیعی با به کارگیری ۱۰ تا ۱ بردار ویژه استخراج شده از همان مجموعه. ستون اول کل نمونه‌ها را شامل می‌شود. مقادیر داخل پرانتز تعداد نمونه‌های دارای ۹۰٪ اختلاف رنگ حداکثر می‌باشد.

		مخلوط	وسمه	زلیل	اسپرک	سماق	چغندر	گلرنگ	روناس	ارونه	گردو	انگور	انار	کل
۱۰	GFC	۱,۰۰۰۰	۱,۰۰۰۰	۱,۰۰۰۰	۱,۰۰۰۰	۱,۰۰۰۰	۱,۰۰۰۰	۱,۰۰۰۰	۱,۰۰۰۰	۱,۰۰۰۰	۱,۰۰۰۰	۱,۰۰۰۰	۱,۰۰۰۰	۱,۰۰۰۰
	RMSE	۰,۰۰۰۴	۰,۰۰۰۳	۰,۰۰۰۲	۰,۰۰۱۱	۰,۰۰۰۵	۰,۰۰۱۱	۰,۰۰۰۳	۰,۰۰۱۰	۰,۰۰۰۴	۰,۰۰۰۲	۰,۰۰۰۷	۰,۰۰۰۲	۰,۰۰۰۶
	ΔE_{ab} (D65)	۰,۰۱۴	۰,۰۱۵	۰,۰۲۵	۰,۰۱۰	۰,۰۰۴	۰,۰۱۷	۰,۰۱۱	۰,۰۵۰	۰,۰۰۸	۰,۰۰۵	۰,۰۲۹	۰,۰۰۸	۰,۰۱۲
		(۲)	(۱)	(۱)	(۳)	(۱)	(۳)	(۱)	(۱)	(۲)	(۲)	(۱)	(۱)	(۳)
۹	ΔE_{ab} (A)	۰,۰۰۴	۰,۰۳۳	۰,۰۰۸	۰,۰۱۰	۰,۰۰۶	۰,۰۱۲	۰,۰۰۵	۰,۰۴۰	۰,۰۰۵	۰,۰۰۶	۰,۰۱۲	۰,۰۰۵	۰,۰۰۸
		(۱)	(۲)	(۱)	(۵)	(۳)	(۳)	(۱)	(۲)	(۲)	(۵)	(۱)	(۱)	(۴)
	GFC	۱,۰۰۰۰	۰,۹۹۹۹	۱,۰۰۰۰	۱,۰۰۰۰	۱,۰۰۰۰	۱,۰۰۰۰	۱,۰۰۰۰	۱,۰۰۰۰	۱,۰۰۰۰	۱,۰۰۰۰	۱,۰۰۰۰	۱,۰۰۰۰	۱,۰۰۰۰
	RMSE	۰,۰۰۰۶	۰,۰۰۰۹	۰,۰۰۰۲	۰,۰۰۱۲	۰,۰۰۰۵	۰,۰۰۱۲	۰,۰۰۰۵	۰,۰۰۱۳	۰,۰۰۰۴	۰,۰۰۰۲	۰,۰۰۰۷	۰,۰۰۰۲	۰,۰۰۰۸
۹	ΔE_{ab} (D65)	۰,۰۴۵	۰,۰۱۴	۰,۰۲۵	۰,۰۱۸	۰,۰۱۷	۰,۰۶۱	۰,۰۰۴	۰,۱۸۰	۰,۰۰۶	۰,۰۰۶	۰,۰۳۰	۰,۰۰۸	۰,۰۱۸
		(۱)	(۱)	(۱)	(۳)	(۲)	(۳)	(۱)	(۲)	(۲)	(۱)	(۱)	(۱)	(۳)
	ΔE_{ab} (A)	۰,۰۱۸	۰,۰۳۰	۰,۰۰۹	۰,۰۲۱	۰,۰۱۶	۰,۰۳۶	۰,۰۰۳	۰,۱۶۴	۰,۰۰۶	۰,۰۰۶	۰,۰۱۳	۰,۰۰۶	۰,۰۲۰
		(۱)	(۲)	(۱)	(۲)	(۲)	(۳)	(۲)	(۳)	(۱)	(۵)	(۱)	(۲)	(۳)

جدول ۳: ادامه

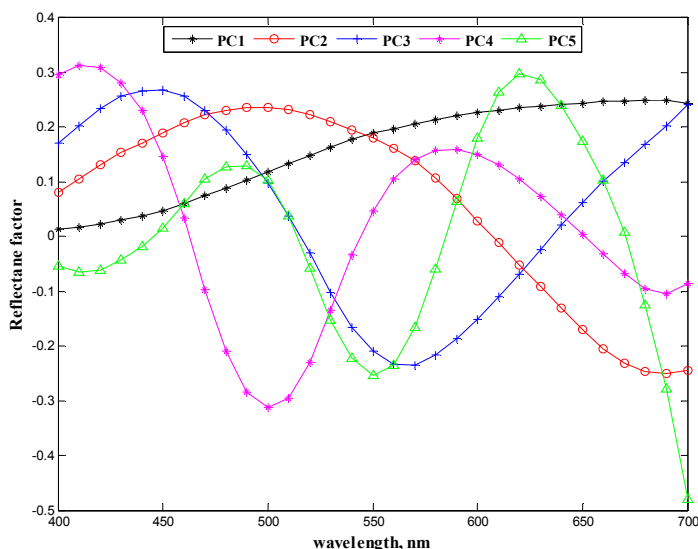
		کل	انار	انگور	گردو	ارونه	روناس	گلرنگ	چغندر	سماق	اسپرک	زلیل	وسمه	مخلوط
۸	GFC	۱,۰۰۰۰	۱,۰۰۰۰	۱,۰۰۰۰	۱,۰۰۰۰	۱,۰۰۰۰	۱,۰۰۰۰	۱,۰۰۰۰	۰,۹۹۹۹	۱,۰۰۰۰	۱,۰۰۰۰	۱,۰۰۰۰	۰,۹۹۹۹	۱,۰۰۰۰
	RMSE	۰,۰۰۱۱	۰,۰۰۰۳	۰,۰۰۱۰	۰,۰۰۰۳	۰,۰۰۰۴	۰,۰۰۱۴	۰,۰۰۰۷	۰,۰۰۲۷	۰,۰۰۰۸	۰,۰۰۱۶	۰,۰۰۰۲	۰,۰۰۱۱	۰,۰۰۰۸
	$\Delta E_{ab}(D65)$	۰,۰۵۱ (۲)	۰,۰۰۷ (۱)	۰,۰۲۶ (۱)	۰,۰۱۸ (۲)	۰,۰۰۸ (۲)	۰,۱۲۰ (۴)	۰,۰۱۳ (۱)	۰,۱۱۰ (۳)	۰,۰۴۷ (۲)	۰,۰۵۶ (۳)	۰,۰۳۰ (۲)	۰,۰۸۷ (۴)	۰,۱۳۴ (۱)
	$\Delta E_{ab}(A)$	۰,۰۲۴ (۲)	۰,۰۰۴ (۳)	۰,۰۲۷ (۴)	۰,۰۲۱ (۱)	۰,۰۰۶ (۲)	۰,۱۱۷ (۴)	۰,۰۰۷ (۲)	۰,۱۲۷ (۴)	۰,۰۴۸ (۲)	۰,۰۵۲ (۲)	۰,۰۱۳ (۳)	۰,۰۱۹ (۲)	۰,۰۸۰ (۱)
۷	GFC	۰,۹۹۹۹	۱,۰۰۰۰	۱,۰۰۰۰	۱,۰۰۰۰	۱,۰۰۰۰	۰,۹۹۹۳	۱,۰۰۰۰	۰,۹۹۹۹	۱,۰۰۰۰	۱,۰۰۰۰	۱,۰۰۰۰	۰,۹۹۹۸	۱,۰۰۰۰
	RMSE	۰,۰۰۱۶	۰,۰۰۰۶	۰,۰۰۱۴	۰,۰۰۰۴	۰,۰۰۰۸	۰,۰۰۸۴	۰,۰۰۰۸	۰,۰۰۲۸	۰,۰۰۱۱	۰,۰۰۱۹	۰,۰۰۰۳	۰,۰۰۱۳	۰,۰۰۱۰
	$\Delta E_{ab}(D65)$	۰,۰۷۷ (۱)	۰,۰۳۷ (۴)	۰,۰۸۰ (۵)	۰,۰۱۹ (۱)	۰,۰۴۴ (۵)	۳,۰۲۸ (۳)	۰,۰۱۶ (۱)	۰,۱۳۹ (۲)	۰,۰۴۴ (۲)	۰,۰۴۶ (۲)	۰,۰۴۱ (۲)	۰,۲۴۴ (۴)	۰,۱۴۹ (۱)
	$\Delta E_{ab}(A)$	۰,۰۴۵ (۱)	۰,۰۴۸ (۳)	۰,۰۶۰ (۲)	۰,۰۷۳ (۱)	۰,۰۲۵ (۴)	۲,۰۹۲ (۲)	۰,۰۱۰ (۲)	۰,۱۴۳ (۲)	۰,۰۴۲ (۱)	۰,۰۳۴ (۱)	۰,۰۲۷ (۳)	۰,۰۵۵ (۲)	۰,۰۹۴ (۱)
۶	GFC	۰,۹۹۹۷	۱,۰۰۰۰	۰,۹۹۹۹	۱,۰۰۰۰	۱,۰۰۰۰	۰,۹۹۹۰	۱,۰۰۰۰	۰,۹۹۹۹	۱,۰۰۰۰	۱,۰۰۰۰	۱,۰۰۰۰	۰,۹۹۹۸	۰,۹۹۹۹
	RMSE	۰,۰۰۲۱	۰,۰۰۰۸	۰,۰۰۲۲	۰,۰۰۰۵	۰,۰۰۰۹	۰,۰۰۹۸	۰,۰۰۱۱	۰,۰۰۲۸	۰,۰۰۱۳	۰,۰۰۲۶	۰,۰۰۰۴	۰,۰۰۱۳	۰,۰۰۱۴
	$\Delta E_{ab}(D65)$	۰,۲۵۱ (۱۳)	۰,۰۹۰ (۶)	۰,۱۱۷ (۴)	۰,۱۰۴ (۲)	۰,۰۹۲ (۱)	۲,۴۸۹ (۳)	۰,۰۵۵ (۱)	۰,۱۳۴ (۲)	۰,۰۶۹ (۲)	۰,۰۷۵ (۱)	۰,۰۴۳ (۱)	۰,۲۳۳ (۴)	۰,۱۷۱ (۱)
	$\Delta E_{ab}(A)$	۰,۲۵۹ (۱۲)	۰,۰۸۷ (۷)	۰,۰۸۰ (۱)	۰,۰۶۹ (۳)	۰,۰۴۰ (۱)	۱,۸۸۸ (۳)	۰,۰۴۲ (۱)	۰,۱۳۹ (۳)	۰,۰۷۳ (۱)	۰,۰۸۷ (۲)	۰,۰۳۷ (۱)	۰,۰۵۸ (۴)	۰,۱۳۴ (۱)
۵	GFC	۰,۹۹۹۶	۰,۹۹۹۹	۱,۰۰۰۰	۱,۰۰۰۰	۱,۰۰۰۰	۰,۹۹۸۶	۱,۰۰۰۰	۰,۹۹۹۹	۰,۹۹۹۹	۰,۹۹۹۹	۱,۰۰۰۰	۰,۹۹۹۶	۰,۹۹۹۸
	RMSE	۰,۰۰۲۹	۰,۰۰۱۷	۰,۰۰۰۷	۰,۰۰۰۷	۰,۰۰۱۷	۰,۰۱۱۳	۰,۰۰۱۸	۰,۰۰۳۱	۰,۰۰۲۵	۰,۰۰۲۹	۰,۰۰۰۵	۰,۰۰۲۰	۰,۰۰۳۱
	$\Delta E_{ab}(D65)$	۰,۵۱۱ (۱)	۰,۰۸۹ (۴)	۰,۲۴۷ (۴)	۰,۲۴۷ (۶)	۰,۰۹۰ (۱)	۳,۷۱۱ (۲)	۰,۱۱۰ (۱)	۰,۳۲۷ (۱)	۰,۴۳۴ (۲)	۰,۱۱۷ (۱)	۰,۳۳۱ (۴)	۰,۲۶۴ (۳)	۰,۵۱۸ (۱)
	$\Delta E_{ab}(A)$	۰,۴۳۷ (۱)	۰,۰۷۲ (۲)	۰,۱۸۳ (۱)	۰,۱۸۳ (۵)	۰,۰۸۰ (۱)	۲,۱۷۱ (۲)	۰,۰۶۴ (۱)	۰,۲۰۲ (۱)	۰,۴۲۲ (۲)	۰,۱۲۷ (۱)	۰,۲۱۸ (۳)	۰,۴۳۶ (۴)	۰,۴۸۰ (۱)
۴	GFC	۰,۹۹۸۵	۰,۹۹۹۵	۰,۹۹۹۲	۰,۹۹۹۹	۰,۹۹۹۹	۰,۹۹۶۹	۰,۹۹۹۹	۰,۹۹۹۷	۰,۹۹۹۹	۰,۹۹۹۵	۱,۰۰۰۰	۰,۹۹۸۸	۰,۹۹۸۸
	RMSE	۰,۰۰۶۹	۰,۰۰۴۶	۰,۰۰۶۸	۰,۰۰۱۲	۰,۰۰۳۱	۰,۰۱۷۱	۰,۰۰۳۲	۰,۰۰۶۲	۰,۰۰۳۶	۰,۰۰۹۱	۰,۰۰۰۶	۰,۰۰۳۶	۰,۰۰۶۴
	$\Delta E_{ab}(D65)$	۱,۴۳۳ (۳)	۰,۱۷۴ (۶)	۲,۱۵۸ (۲)	۰,۱۷۵ (۱)	۰,۳۹۴ (۱)	۲,۸۶۶ (۵)	۰,۴۰۵ (۲)	۰,۵۲۵ (۱)	۰,۳۷۰ (۲)	۰,۶۲۳ (۱)	۰,۳۱۲ (۳)	۱,۹۹۹ (۶)	۰,۶۱۴ (۱)
	$\Delta E_{ab}(A)$	۱,۴۱۱ (۳)	۰,۳۶۳ (۶)	۱,۲۴۵ (۲)	۰,۱۲۶ (۱)	۰,۴۸۷ (۱)	۲,۱۷۷ (۵)	۰,۴۸۶ (۱)	۰,۵۸۳ (۱)	۰,۳۷۵ (۲)	۰,۶۴۴ (۱)	۰,۱۹۰ (۱)	۲,۰۶۵ (۵)	۰,۹۷۷ (۱)
۳	GFC	۰,۹۹۷۸	۰,۹۹۹۴	۰,۹۹۹۱	۰,۹۹۹۸	۰,۹۹۹۷	۰,۹۹۵۷	۰,۹۹۹۴	۰,۹۹۷۶	۰,۹۹۲۷	۰,۹۹۶۷	۰,۹۹۹۱	۰,۹۹۶۷	۰,۹۹۸۴
	RMSE	۰,۰۰۸۸	۰,۰۰۵۰	۰,۰۰۷۱	۰,۰۰۲۰	۰,۰۰۶۱	۰,۰۲۰۲	۰,۰۰۸۶	۰,۰۱۷۱	۰,۰۲۷۵	۰,۰۷۱۱	۰,۰۰۳۰	۰,۰۰۶۰	۰,۰۰۷۷
	$\Delta E_{ab}(D65)$	۱,۴۹۱ (۱)	۰,۶۴۳ (۲)	۲,۲۲۴ (۳)	۱,۳۶۸ (۵)	۱,۲۸۶ (۲)	۷,۷۵۹ (۸)	۲,۳۸۳ (۵)	۲,۳۶۲ (۱)	۳,۳۹۷ (۲)	۳,۷۶۶ (۳)	۱,۲۷۰ (۳)	۱,۶۵۷ (۴)	۱,۵۰۷ (۲)
	$\Delta E_{ab}(A)$	۱,۲۱۹ (۳)	۱,۵۷۳ (۲)	۱,۳۲۹ (۱)	۰,۹۲۸ (۶)	۱,۰۵۲ (۴)	۶,۵۷۴ (۶)	۱,۶۵۶ (۴)	۱,۳۴۸ (۱)	۱,۷۱۳ (۲)	۴,۶۶۸ (۲)	۱,۲۰۲ (۳)	۱,۸۰۸ (۹)	۱,۰۸۲ (۱)
۲	GFC	۰,۹۷۸۱	۰,۹۹۹۳	۰,۹۹۶۹	۰,۹۹۹۶	۰,۹۹۸۹	۰,۹۶۱۶	۰,۹۹۴۴	۰,۹۹۴۹	۰,۹۸۷۸	۰,۹۶۹۳	۰,۹۹۷۸	۰,۹۹۶۶	۰,۹۸۵۸
	RMSE	۰,۰۲۷۵	۰,۰۰۵۹	۰,۰۱۲۸	۰,۰۰۲۷	۰,۰۱۲۱	۰,۰۵۹۸	۰,۰۲۷۳	۰,۰۲۴۸	۰,۰۳۵۷	۰,۰۷۱۸	۰,۰۰۴۶	۰,۰۰۶۰	۰,۰۲۳۴
	$\Delta E_{ab}(D65)$	۱۱,۰۱۲ (۷)	۱,۱۳۰ (۲)	۲,۱۱۳ (۴)	۱,۵۲۴ (۱)	۳,۶۲۰ (۱)	۱۰,۵۰۴ (۲)	۲,۹۶۶ (۱)	۸,۰۹۷ (۲)	۴,۰۵۶ (۱)	۵,۲۲۶ (۱)	۲,۱۰۵ (۴)	۱,۶۶۶ (۶)	۱۰,۲۹۱ (۲)
	$\Delta E_{ab}(A)$	۱۰,۰۱۴ (۱۷)	۱,۰۴۲ (۴)	۱,۷۵۴ (۱)	۱,۱۰۹ (۲)	۲,۸۸۷ (۱)	۱۰,۷۴۲ (۲)	۲,۷۱۷ (۱)	۶,۲۰۸ (۷)	۴,۳۵۸ (۴)	۵,۷۸۵ (۱)	۱,۹۵۲ (۵)	۱,۸۲۲ (۸)	۹,۵۷۵ (۲)
۱	GFC	۰,۹۵۱۸	۰,۹۹۷۴	-	۰,۹۹۱۷	۰,۹۸۸۵	۰,۹۵۶۹	۰,۹۶۱۲	۰,۸۶۹۱	۰,۹۸۲۷	۰,۹۵۹۹	۰,۹۹۶۶	۰,۹۹۲۰	۰,۹۷۰۴
	RMSE	۰,۰۴۰۲	۰,۰۱۰۶	۰,۰۱۹۹	۰,۰۱۲۱	۰,۰۳۹۳	۰,۰۶۳۵	۰,۰۷۵۳	۰,۱۲۱۱	۰,۰۴۳۹	۰,۰۸۴۱	۰,۰۰۵۷	۰,۰۰۸۹	۰,۰۳۴۰
	$\Delta E_{ab}(D65)$	۱۱,۲۸۲ (۲۷)	۲,۰۵۳ (۱)	۳,۶۷۱ (۲)	۴,۶۴۱ (۱۴)	۵,۳۰۶ (۱)	۸,۴۶۲ (۱۰)	۹,۰۱۹ (۱۴)	۱۸,۳۶۴ (۵)	۶,۵۳۴ (۲)	۶,۹۶۶ (۱)	۱,۷۲۳ (۲)	۴,۲۶۱ (۳)	۱۱,۲۹۴ (۳)
	$\Delta E_{ab}(A)$	۱۰,۰۸۵ (۲۶)	۱,۸۶۵ (۱)	۳,۴۱۰ (۲)	۳,۹۷۰ (۱۸)	۵,۸۱۵ (۱)	۸,۶۴۱ (۱۱)	۸,۶۹۸ (۱۴)	۱۹,۸۹۱ (۷)	۶,۹۶۴ (۱)	۷,۱۱۱ (۳)	۱,۵۷۹ (۴)	۴,۰۷۲ (۳)	۹,۹۱۸ (۲)



شکل ۲: منحنی‌های انعکاس طیفی ۸ نمونه پشم رنگریزی شده با رنگزاهای طبیعی به همراه منحنی بازسازی شده با ۵ بردار ویژه اول از کل مجموعه نمونه.

جدول ۴: نتایج ارائه طیف انعکاسی دسته‌های مختلف از مجموعه رنگزاهای طبیعی با بکارگیری ۵ بردار ویژه استخراج شده از همان دسته، مجموعه کل رنگزاهای طبیعی، مجموعه کل رنگزاهای طبیعی بجز وسمه، مجموعه پلی استر و مانسل.

		مخلوط	وسمه	زلیل	اسپرک	سماق	چغندر	گلرنگ	روناس	ارونه	گردو	انگور	انار	کل
همان دسته	GFC	۰,۹۹۹۸	۰,۹۹۹۶	۱,۰۰۰۰	۰,۹۹۹۹	۰,۹۹۹۹	۰,۹۹۹۹	۱,۰۰۰۰	۰,۹۹۸۶	۱,۰۰۰۰	۱,۰۰۰۰	۱,۰۰۰۰	۰,۹۹۹۹	۰,۹۹۹۶
	RMSE	۰,۰۰۳۱	۰,۰۰۲۰	۰,۰۰۰۵	۰,۰۰۲۹	۰,۰۰۲۵	۰,۰۰۳۱	۰,۰۰۱۸	۰,۰۰۱۱۳	۰,۰۰۱۷	۰,۰۰۰۷	۰,۰۰۰۷	۰,۰۰۱۷	۰,۰۰۳۹
	$\Delta E_{ab}(D65)$	۰,۵۱۸	۰,۲۶۴	۰,۳۳۱	۰,۱۱۷	۰,۴۳۴	۰,۳۲۷	۰,۱۱۰	۳,۷۱۱	۰,۰۹۰	۰,۲۴۷	۰,۲۴۷	۰,۰۸۹	۰,۵۱۱
	$\Delta E_{ab}(A)$	۰,۴۸۰	۰,۴۳۶	۰,۲۱۸	۰,۱۲۷	۰,۴۲۲	۰,۲۰۲	۰,۰۶۴	۲,۱۷۱	۰,۰۸۰	۰,۱۸۳	۰,۱۸۳	۰,۰۷۲	۰,۴۳۷
کل رنگزاهای طبیعی	GFC	۰,۹۹۹۸	۰,۹۹۹۸	۰,۹۹۹۶	۰,۹۹۹۸	۰,۹۹۹۸	۰,۹۹۹۷	۰,۹۹۹۸	۰,۹۹۹۷	۰,۹۹۹۹	۰,۹۹۹۷	۰,۹۹۹۹	۰,۹۹۹۹	۰,۹۹۹۶
	RMSE	۰,۰۰۳۳	۰,۰۰۶۰	۰,۰۰۲۱	۰,۰۰۶۵	۰,۰۰۴۲	۰,۰۰۲۲	۰,۰۰۵۳	۰,۰۰۴۱	۰,۰۰۴۴	۰,۰۰۲۲	۰,۰۰۲۸	۰,۰۰۳۳	۰,۰۰۳۹
	$\Delta E_{ab}(D65)$	۰,۴۴۰	۰,۶۵۰	۰,۶۶۵	۰,۷۶۵	۰,۴۷۶	۰,۳۴۰	۰,۵۷۰	۰,۵۶۸	۰,۵۸۶	۰,۳۴۰	۰,۳۶۷	۰,۳۹۹	۰,۵۱۱
	$\Delta E_{ab}(A)$	۰,۳۵۹	۱,۰۷۱	۰,۵۰۵	۰,۶۰۴	۰,۳۹۷	۰,۲۹۶	۰,۴۵۲	۰,۴۱۵	۰,۴۲۲	۰,۲۹۶	۰,۲۸۹	۰,۳۱۲	۰,۴۳۷
کل رنگزاهای طبیعی بجز وسمه	GFC	۰,۹۹۹۸	۰,۹۹۳۷	۰,۹۹۹۵	۰,۹۹۹۸	۰,۹۹۹۸	۰,۹۹۹۸	۰,۹۹۹۹	۰,۹۹۹۸	۰,۹۹۹۹	۰,۹۹۹۷	۰,۹۹۹۹	۰,۹۹۹۹	۰,۹۹۹۸
	RMSE	۰,۰۰۳۰	۰,۰۰۹۰	۰,۰۰۲۳	۰,۰۰۶۳	۰,۰۰۴۴	۰,۰۰۵۲	۰,۰۰۴۱	۰,۰۰۳۵	۰,۰۰۴۸	۰,۰۰۲۴	۰,۰۰۲۷	۰,۰۰۲۹	۰,۰۰۳۵
	$\Delta E_{ab}(D65)$	۰,۴۲۸	۰,۷۶۲	۰,۷۲۰	۰,۷۶۰	۰,۴۵۳	۰,۷۴۲	۰,۵۱۶	۰,۵۰۲	۰,۶۳۵	۰,۳۶۱	۰,۳۷۶	۰,۳۷۸	۰,۴۸۸
	$\Delta E_{ab}(A)$	۰,۳۴۴	۰,۹۹۳	۰,۵۵۷	۰,۶۱۴	۰,۳۶۴	۰,۵۶۳	۰,۴۱۸	۰,۳۶۵	۰,۴۶۷	۰,۳۰۶	۰,۲۸۴	۰,۲۸۵	۰,۳۸۲
پلی استر	GFC	۰,۹۹۸۴	۰,۹۹۰۴	۰,۹۹۸۴	۰,۹۹۷۳	۰,۹۹۵۸	۰,۹۹۹۰	۰,۹۹۸۵	۰,۹۹۸۹	۰,۹۹۷۷	۰,۹۹۸۷	۰,۹۹۷۵	۰,۹۹۷۸	۰,۹۹۷۶
	RMSE	۰,۰۰۹۸	۰,۰۱۰۴	۰,۰۰۴۲	۰,۰۰۲۳۱	۰,۰۰۲۲۷	۰,۰۰۱۱۸	۰,۰۰۱۵۷	۰,۰۰۰۸۳	۰,۰۰۱۹۷	۰,۰۰۰۵۲	۰,۰۰۱۴۳	۰,۰۰۱۳۹	۰,۰۰۱۲۲
	$\Delta E_{ab}(D65)$	۱,۲۹۵	۲,۵۹۰	۰,۹۰۳	۱,۷۴۶	۲,۴۳۴	۱,۱۳۴	۱,۴۲۴	۰,۷۶۶	۱,۸۶۸	۱,۱۰۶	۱,۷۶۵	۱,۷۰۵	۱,۴۷۱
	$\Delta E_{ab}(A)$	۱,۲۵۹	۲,۷۸۴	۰,۹۵۰	۱,۷۳۴	۲,۳۲۷	۱,۰۸۵	۱,۴۳۴	۰,۷۲۰	۱,۷۷۶	۱,۰۶۵	۱,۷۰۲	۱,۷۰۱	۱,۴۵۲
مانسل	GFC	۰,۹۹۸۱	۰,۹۸۷۶	۰,۹۹۷۹	۰,۹۹۸۲	۰,۹۹۷۴	۰,۹۹۹۳	۰,۹۹۸۸	۰,۹۹۵۴	۰,۹۹۹۰	۰,۹۹۶۸	۰,۹۹۸۳	۰,۹۹۷۸	۰,۹۹۶۸
	RMSE	۰,۰۰۹۴	۰,۰۰۱۱۸	۰,۰۰۴۷	۰,۰۰۱۸۴	۰,۰۰۱۷۲	۰,۰۰۰۸۹	۰,۰۰۱۳۶	۰,۰۰۱۶۶	۰,۰۰۱۲۶	۰,۰۰۰۷۹	۰,۰۰۱۱۴	۰,۰۰۱۳۸	۰,۰۰۱۲۶
	$\Delta E_{ab}(D65)$	۰,۷۲۰	۰,۴۸۰	۰,۲۹۷	۰,۹۴۰	۱,۳۹۶	۰,۵۰۶	۰,۶۳۷	۱,۰۰۰۸	۰,۷۸۲	۰,۵۶۷	۱,۰۰۰۱	۰,۹۸۳	۰,۸۰۳
	$\Delta E_{ab}(A)$	۰,۸۴۶	۰,۱۹۸	۰,۵۱۶	۱,۰۹۲	۱,۴۵۸	۰,۵۵۷	۰,۷۷۶	۱,۳۳۴	۰,۸۷۰	۰,۷۳۸	۱,۰۷۳	۱,۱۲۵	۰,۹۳۹



شکل ۳: ۵ بردار ویژه اول کل مجموعه رنگزاهای طبیعی.

کافی به نظر می‌رسد.

همچنین نشان داده شد که بهترین بردارهای ویژه برای بازسازی داده‌های انعکاس طیفی چنین رنگزاهایی، از مجموعه حاکم خودشان شامل رنگزاهای طبیعی بدست می‌آید. به نظر می‌رسد، چنانچه استفاده از مجموعه‌ای نظیر مانسل مد نظر باشد برای رسیدن به دقت مشابه به کارگیری تعداد بردارهای ویژه بیشتری لازم است. برای بررسی بیشتر این موضوع، نتایج بازسازی داده‌های انعکاس طیفی رنگزاهای طبیعی با ۶ و همچنین ۷ بردار ویژه اول مجموعه پلی استر و همچنین مانسل در جدول ۶ و ۷ آورده شده است. ملاحظه می‌شود که با به کارگیری ۷ بردار ویژه اول مانسل، تقریباً می‌توان به نتایج مشابه با ۵ بردار ویژه مجموعه رنگزای طبیعی دست یافت هرچند هنوز تا اندازه‌ای خطا بیشتر است. در مورد مجموعه پلی استر، چنین به نظر می‌رسد برای رسیدن به دقت مشابه، همچنان تعداد بردارهای ویژه بیشتری نیاز است.

البته چنانچه پیش از این نیز اشاره شد، با توجه به ماهیت رنگزاهای طبیعی که اکثراً دارای فام‌های قرمز تا زرد و در مواردی آبی، می‌باشند مجموعه نمونه‌های مورد استفاده در این تحقیق بیشتر ربع اول فضای CIELAB را به همراه بخشی از فام‌های آبی، پوشش می‌دهند. لذا برای داشتن تحلیل جامع تر، نیاز به تهیه مجموعه کامل تری از رنگزاهای ترکیبی است که برای تحقیقات بعدی مد نظر می‌باشد.

در به کارگیری مجموعه پلی استر رنگزای شده به عنوان مجموعه مرجع بردارهای PC، با وجود پوشش مناسب‌تر محدوده رنگی توسط این دسته نسبت به مجموعه رنگزاهای طبیعی، خطا تقریباً ۲ تا ۳ برابر می‌شود. همچنین با بررسی نتایج حاصل از مجموعه مانسل، ملاحظه می‌شود بردارهای ویژه حاصل از مانسل نسبت به مجموعه پلی استر خطای کمتر و نسبت به مجموعه رنگزاهای طبیعی خطای بیشتری را سبب می‌شوند.

شکل ۲ منحنی‌های طیف انعکاسی ۸ نمونه انتخابی به صورت تصادفی از مجموعه نمونه‌های پشم رنگزای شده با رنگزاهای طبیعی را به همراه نمونه‌های بازسازی شده با ۵ بردار ویژه اول استخراج شده از کل مجموعه، نشان می‌دهد. همچنین ۵ بردار ویژه اول مجموعه کامل رنگزاهای طبیعی در شکل ۳ آورده شده است.

در یک جمع‌بندی کلی چنین به نظر می‌رسد که رنگزاهای طبیعی با توجه به داشتن شیدهای خاص (قرمز تا زرد و آبی) و همچنین منحنی‌های انعکاسی بسیار هموار و مشابه، به راحتی و با خطای قابل قبولی در حد میانگین GFC برابر ۰.۹۹۹ و میانگین اختلاف رنگ حدود ۰.۵ واحد CIEDE2000(1:1:1)، با تعداد ۵ بردار ویژه قابل بازسازی می‌باشند. جدول ۵ مقادیر ضریب ثابت μ توضیح داده شده در رابطه ۵ را برای مجموعه کامل رنگزاهای طبیعی نشان می‌دهد. چنانچه از مقادیر گزارش شده در این جدول نیز ملاحظه می‌شود، به کارگیری حداکثر ۴ تا ۵ بردار ویژه اول برای بازسازی مجموعه

جدول ۵: مقادیر ضریب ثابت μ (رابطه ۵)، برای مجموعه کامل رنگزاهای طبیعی.

شماره بردار ویژه	۱	۲	۳	۴	۵	۶	۷	۸	۹	۱۰	۱۱	۱۲	۱۳	۱۴
μ	۸۶.۵۳۴	۹.۹۶۶	۲.۸۳۶	۰.۴۱۵	۰.۱۲۸	۰.۰۶۵	۰.۰۲۶	۰.۰۱۹	۰.۰۰۶	۰.۰۰۳	۰.۰۰۲	۰.۰۰۱	۰	۰

*از آنجا که مقادیر مربوط به بردار ویژه ۱۵ تا ۳۱ نیز صفر بوده، در جدول نشان داده نشده است.

جدول ۶: نتایج ارائه طیف انعکاسی دسته‌های مختلف از مجموعه رنگزاهای طبیعی با به کارگیری ۶ بردار ویژه استخراج شده از مجموعه پلی استر و مانسل.

	مخلوط	وسمه	زلیل	اسپرک	سماق	چغندر	گلرنگ	روناس	ارونه	گردو	انگور	انار	کل
پلی استر	GFC	۰.۹۹۱۰	۰.۹۹۸۵	۰.۹۹۷۴	۰.۹۹۵۹	۰.۹۹۹۰	۰.۹۹۸۶	۰.۹۹۹۰	۰.۹۹۷۸	۰.۹۹۸۷	۰.۹۹۷۹	۰.۹۹۷۹	۰.۹۹۷۷
	RMSE	۰.۰۱۰۱	۰.۰۰۴۱	۰.۰۲۲۸	۰.۰۲۲۶	۰.۰۱۱۸	۰.۰۱۵۵	۰.۰۰۸۱	۰.۰۱۹۶	۰.۰۰۵۱	۰.۰۱۴۲	۰.۰۱۳۷	۰.۰۱۲۰
	$\Delta E_{ab}(D65)$	۱.۲۹۱	۲.۲۷۰	۰.۹۲۷	۲.۴۲۳	۱.۱۳۱	۱.۴۵۲	۰.۷۸۸	۱.۸۵۸	۱.۱۱۷	۱.۷۴۳	۱.۷۳۵	۱.۴۵۸
	$\Delta E_{ab}(A)$	۱.۲۳۴	۲.۲۳۵	۰.۹۳۰	۲.۲۹۲	۱.۰۸۷	۱.۴۱۴	۰.۶۹۵	۱.۷۴۸	۱.۰۴۳	۱.۶۸۰	۱.۶۸۱	۱.۳۹۵
مانسل	GFC	۰.۹۹۹۲	۰.۹۹۹۱	۰.۹۹۸۹	۰.۹۹۸۲	۰.۹۹۹۷	۰.۹۹۹۴	۰.۹۹۹۰	۰.۹۹۹۳	۰.۹۹۹۰	۰.۹۹۸۹	۰.۹۹۸۸	۰.۹۹۸۵
	RMSE	۰.۰۰۶۳	۰.۰۱۰۱	۰.۰۱۴۴	۰.۰۱۴۸	۰.۰۰۶۵	۰.۰۰۹۷	۰.۰۰۸۰	۰.۰۱۱۰	۰.۰۰۴۳	۰.۰۰۹۲	۰.۰۱۰۴	۰.۰۰۸۷
	$\Delta E_{ab}(D65)$	۰.۹۲۳	۰.۸۹۰	۰.۴۰۱	۱.۵۴۸	۰.۶۳۲	۰.۸۰۰	۱.۵۰۶	۰.۸۶۶	۰.۸۵۵	۱.۱۴۳	۱.۱۷۳	۱.۰۵۲
	$\Delta E_{ab}(A)$	۰.۹۴۵	۰.۹۱۱	۰.۴۹۹	۱.۵۳۴	۰.۶۳۲	۰.۸۶۶	۱.۵۷۱	۰.۹۰۷	۰.۸۶۸	۱.۱۵۳	۱.۲۳۷	۱.۰۹۲

جدول ۷: نتایج ارائه طیف انعکاسی دسته‌های مختلف از مجموعه رنگزاهای طبیعی با بکارگیری ۷ بردار ویژه استخراج شده از مجموعه پلی استر و مانسل.

		کل	انار	انگور	گردو	ارونه	روناس	گلرنگ	چغندر	سماق	اسپرک	زلیل	وسمه	مخلوط
پلی استر	GFC	۰,۹۹۸۶	۰,۹۹۸۴	۰,۹۹۸۴	۰,۹۹۹۱	۰,۹۹۸۸	۰,۹۹۹۱	۰,۹۹۸۹	۰,۹۹۹۳	۰,۹۹۷۸	۰,۹۹۸۱	۰,۹۹۸۹	۰,۹۹۶۴	۰,۹۹۸۹
	RMSE	۰,۰۰۹۹	۰,۰۱۱۷	۰,۰۱۱۵	۰,۰۰۴۳	۰,۰۱۴۳	۰,۰۰۷۵	۰,۰۱۳۳	۰,۰۰۹۶	۰,۰۱۶۵	۰,۰۱۹۶	۰,۰۰۳۵	۰,۰۰۶۴	۰,۰۰۸۱
	$\Delta E_{ab}(D65)$	۰,۵۴۹	۰,۷۳۴	۰,۶۸۹	۰,۳۳۸	۰,۵۹۱	۰,۳۵۵	۰,۶۱۸	۰,۳۵۵	۰,۷۸۹	۰,۹۲۷	۰,۳۸۹	۰,۵۷۹	۰,۵۱۴
	$\Delta E_{ab}(A)$	۰,۶۱۶	۰,۸۴۴	۰,۸۱۷	۰,۴۰۶	۰,۷۹۲	۰,۳۰۵	۰,۷۰۳	۰,۴۱۱	۱,۰۳۱	۱,۰۳۵	۰,۴۸۶	۰,۳۸۹	۰,۵۸۶
مانسل	GFC	۰,۹۹۸۹	۰,۹۹۹۵	۰,۹۹۹۶	۰,۹۹۹۲	۰,۹۹۹۶	۰,۹۹۹۳	۰,۹۹۹۷	۰,۹۹۹۸	۰,۹۹۹۳	۰,۹۹۹۶	۰,۹۹۹۳	۰,۹۹۱۱	۰,۹۹۹۵
	RMSE	۰,۰۰۶۵	۰,۰۰۶۷	۰,۰۰۵۵	۰,۰۰۳۹	۰,۰۰۸۵	۰,۰۰۶۹	۰,۰۰۶۸	۰,۰۰۵۵	۰,۰۰۹۲	۰,۰۰۹۰	۰,۰۰۲۸	۰,۰۱۰۰	۰,۰۰۴۸
	$\Delta E_{ab}(D65)$	۰,۲۵۷	۰,۱۱۱	۰,۱۶۵	۰,۲۶۶	۰,۲۰۰	۰,۳۰۶	۰,۰۶۹	۰,۱۹۳	۰,۲۹۴	۰,۱۳۰	۰,۰۹۳	۱,۱۲۵	۰,۱۷۸
	$\Delta E_{ab}(A)$	۰,۳۴۳	۰,۲۳۱	۰,۲۳۷	۰,۳۴۴	۰,۲۸۲	۰,۴۹۳	۰,۱۴۲	۰,۲۳۸	۰,۳۶۰	۰,۱۷۸	۰,۲۰۷	۱,۰۴۹	۰,۲۵۹

بازسازی داده‌های انعکاس طیفی نمونه‌های پشمی رنگری شده با مجموعه متنوعی از رنگزاهای طبیعی، مورد بررسی قرار گرفت. نتایج حاصل نشان داد که با به کارگیری ۵ و حتی در برخی موارد ۴ بردار ویژه می‌توان نمونه‌های رنگری شده با رنگزاهای طبیعی را با دقت بالایی (GFC حدود ۰,۹۹۹) بازسازی نمود. همچنین بهترین نتیجه زمانی حاصل می‌شود که بردارهای ویژه از مجموعه مشابه (رنگزاهای طبیعی) استخراج شده باشند. چنانچه مجموعه دیگری نظیر مانسل جهت استخراج بردارهای ویژه استفاده شود برای رسیدن به دقت مشابه، نیاز به تعداد بردارهای ویژه بیشتری می‌باشد.

۴- نتیجه‌گیری

با وجود اینکه داده‌های طیفی اطلاعات با ارزشی از رنگ نمونه را در اختیار می‌گذارند، اکثراً در تعداد بعد بالایی گزارش می‌شوند. نتایج تحقیقات و بررسی‌ها خصوصاً در به کارگیری ابزار ریاضی چون روش تحلیل اجزاء اصلی در طول نیم قرن گذشته نشان داده است که تعداد بردارهای ویژه لازم برای ارائه داده‌های طیفی بسیار محدودتر از ابعاد اندازه‌گیری شده می‌باشد. به عبارتی این امکان وجود دارد که این اطلاعات را در فضای با بعد بسیار کمتر، با خطای قابل قبول بازسازی نمود. در همین راستا در این تحقیق تعداد بردارهای ویژه لازم برای

۵- مراجع

1. A. Webb, Statistical pattern recognition, Chap. 9, 2nd Ed., England: John Wiley & Sons, 2002.
2. Fukunaga, Introduction to statistical pattern recognition, 9, 2nd Ed., USA: Academic Press INC, 1990.
3. J. B. Cohen, Dependency of the spectral reflectance curves of the Munsell color chips. *Psychon Sci.* 1(1964), 369-370.
4. L. T. Maloney, Evaluation of linear models of surface spectral reflectance with small numbers of parameters. *J. Opt. Soc. Am. A.* 3(1986), 1673-1683.
5. J. Parkkinen, T. Jaaskelainen, Color representation using statistical pattern recognition. *Appl. Optics.* 26(1987), 4240-4245.
6. J. L. Dannemiller, Spectral reflectance of natural objects: how many basis functions are necessary. *J. Opt. Soc. Am. A.* 9(1992), 507-515.
7. M. J. Vrhel, R. Gershon, L. S. Iwan, Measurement and analysis of object reflectance spectra. *Color Res. Appl.* 19(1994), 4-9.
8. J. K. Eem, H. D. Shin, S. O. Park, Reconstruction of surface spectral reflectances using characteristic vectors of Munsell colors. In Proceedings of IS&T and SID's 2nd Color Imaging Conference: Color Science, Systems and Applications, Scottsdale, Arizona, 1994, 127-131.
9. T. Jaaskelainen, J. Parkkinen, S. Toyooka, Vector-subspace model for color representation. *J. Opt. Soc. Am. A.* 7(1990), 725-730.
10. R. Lenz, M. Osterberg, J. Hiltunen, T. Jaaskelainen, J. Parkkinen, Unsupervised filtering of color spectra. *J. Opt. Soc. Am. A.* 13(1996a), 1315-1324.
11. A. Garcia-Beltran, J. L. Nieves, J. Hernandez-Andres and J. Romero, Linear bases for spectral reflectance functions of acrylic paints. *Color Res. Appl.* 23(1998), 39-45.
12. S. Ghanean, S. H. Amirshahi, F. Mazaheri, Determination of dimension of naturally dyed persian carpet by using principal components analyzing technique. The 6th National Iranian Textile Engineering Conference, 8-9 May 2007, Isfahan, Iran.
13. Spectral Database, University of Joensuu. Color Group <http://spectral.joensuu.fi/index.php?page=database>
14. J. Romero, A. Garcia-Beltran, J. Hernandez-Andres, Linear bases for representation of natural and artificial illuminants. *J. Opt. Soc. Am. A.* 14(1997), 1007-1014.
15. M. R. Luo, G. Cui, B. Rigg, The Development of the CIE 2000 Colour-Difference Formula: CIEDE2000. *Color Res. Appl.* 26(2001), 340-350.