

## فصل ۶

# پردازش تصویر رنگی

تصاویر رنگی این فصل را از سایت انتشارات علوم رایانه با آدرس [www.olomrayaneh.net](http://www.olomrayaneh.net) و پیوند "کتاب‌های الکترونیکی" دریافت نمایید.

فقط پس از سال‌ها آمادگی است که هنرمندان جوان می‌توانند رنگ را لمس کنند - یعنی رنگ به طور توصیفی استفاده نمی‌شود، بلکه به عنوان وسیله‌ای برای اظهارات شخصی است.

هنری ماتیس

به مدت زیادی خودم را به رنگ خاصی محدود کردم - به عنوان یک نظام.

پابلو پیکاسو

### مرور کلی

استفاده از رنگ در پردازش تصویر، ناشی از دو عامل است. اولاً، رنگ توصیفگر قدرتمندی است که غالباً شناسایی و استخراج اشیا را از صحنه آسان می‌سازد. ثانیاً، انسان می‌تواند در مقایسه با فقط ۲۴ سایه خاکستری، هزاران سایه رنگ و شدت را تشخیص دهد. این عامل دوم، مخصوصاً در تحلیل تصویر دستی (یعنی وقتی که توسط انسان انجام می‌گیرد) مهم است.

پردازش تصویر رنگی به دو ناحیه مهم تقسیم می‌شود: پردازش تمام رنگی و شبه رنگی<sup>۱</sup>. در دسته اول، تصاویر معمولاً توسط حسگر تمام رنگی دریافت می‌شوند، مثل دوربین TV رنگی یا اسکنر رنگی. در دسته دوم، مسئله، تخصیص رنگ به شدت تک رنگ خاص یا بازه‌ای از شدت‌ها است. تقریباً تاکنون، اغلب پردازش‌های تصویر رنگی در سطح شبه رنگی انجام شدند. اما، در دهه گذشته، حسگرهای رنگی و سخت افزار مربوط به پردازش تصاویر رنگی، با قیمت‌های مناسبی فراهم شدند.

نتیجه این است که اکنون تکنیک‌های پردازش تصویر تمام رنگی در گستره‌ای از کاربردها استفاده می‌شوند، از جمله چاپ و نشر، تجسم و اینترنت.

در این بحث روشن می‌شود که بعضی از روش‌های سطح خاکستری که در فصل‌های قبلی بحث شدند، مستقیماً در مورد تصاویر رنگی قابل استفاده‌اند. بعضی دیگر باید دوباره فرمول‌بندی شوند تا با خواص فضاهای رنگی که در این فصل ایجاد می‌شوند، سازگار باشد. تکنیک‌های شرح داده شده در این جا، چندان جامع نیستند؛ فقط تعدادی از روش‌های موجود را برای پردازش تصویر رنگی بحث می‌کنند.

---

1. pseudocolor



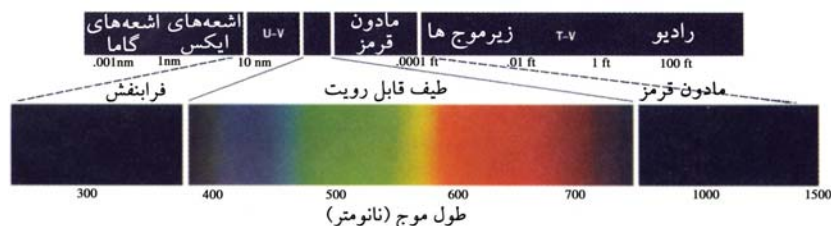
شکل ۶-۱ طیف رنگی که با عبور رنگ سفید از منشور دیده می‌شود.

## ۶-۱ مبانی رنگ

گرچه فرآیندی که مغز انسان در دریافت و تفسیر رنگ اجرا می‌کند، یک پدیده جسمی - روانی است که کاملاً درک نشده است، ماهیت فیزیکی رنگ می‌تواند به طور رسمی بیان شود که با نتایج آزمایشی و تئوری پشتیبانی می‌شود.

در سال ۱۶۶۶، اسحاق نیوتن کشف کرد که وقتی پرتوی از نور خورشید از منشور شیشه‌ای عبور می‌کند، پرتو خروجی نور، سفید نیست، بلکه شامل طیف پیوسته‌ای از رنگ‌ها است که در یک طرف بنفش و در طرف دیگر قرمز واقع است. همان‌طور که شکل ۶-۱ نشان می‌دهد، طیف رنگی ممکن است به شش ناحیه وسیع تقسیم شود: بنفش، آبی، سبز، زرد، نارنجی و قرمز. وقتی به صورت تمام رنگی دیده می‌شود (شکل ۶-۲)، هیچ رنگی در طیف به طور ناگهانی خاتمه نمی‌یابد، بلکه هر رنگ به آرامی در رنگ بعدی مخلوط می‌شود.

اساساً، رنگ‌هایی که انسان‌ها و سایر حیوانات در یک شیء دریافت می‌کنند، به وسیله طبیعت نور منعکس شده از شیء تعیین می‌شود. همان‌طور که در شکل ۶-۲ تشریح شده است، نور قابل رویت، مرکب از باند نسبتاً باریکی از فرکانس‌ها در طیف الکترومغناطیسی است. جسمی که نوری را منعکس می‌کند که طول موج‌های قابل رویت آن متوازن هستند، سفید به نظر می‌رسند. اما، جسمی که بازه محدودی از طیف قابل رویت را منعکس می‌سازد، سایه‌هایی از رنگ را نشان می‌دهد. به عنوان مثال، اشیای سبز، نوری را منعکس می‌سازند که طول موج‌های اولیه آن از ۵۰۰ تا ۵۷۰ نانومتر است، درحالی‌که اغلب انرژی را در طول موج‌های دیگر جذب می‌کند.

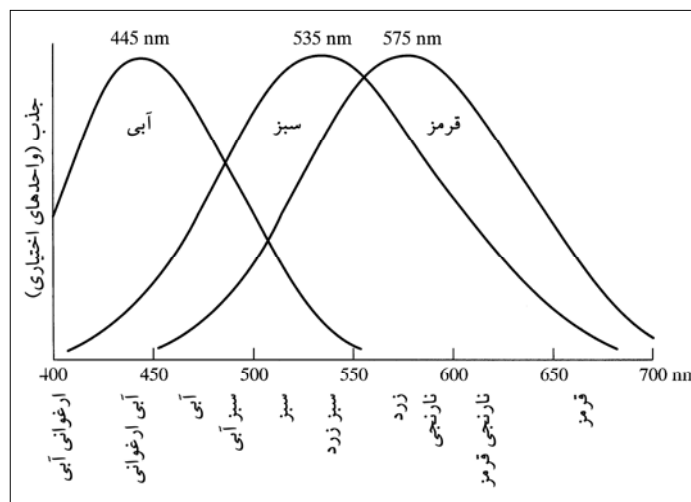


شکل ۶-۲ طول موج‌هایی که شامل بازه‌ی قابل رویت از طیف الکترومغناطیسی است.

توصیف نور، هسته علم رنگ است. اگر نور فاقد رنگ باشد، تنها صفت آن، شدت یا مقدار است. نور بی‌رنگ، همان نوری است که در تلویزیون سیاه و سفید دیده می‌شود، که موضوع ضمنی بحث ما در پردازش تصویر بود که تاکنون مطرح شد. همان‌طور که در فصل ۲ تعریف شد، و تاکنون چند بار استفاده گردید، منظور از واژه سطح خاکستری، مقدار اسکالر شدت است که از سیاه تا خاکستری و سفید است.

نور تکرنگ، طیف الکترومغناطیسی را تقریباً از ۴۰۰ تا ۷۰۰ نانومتر دربرمی‌گیرد. سه کمیت اصلی برای توصیف کیفیت منبع نور تکرنگ به کار می‌روند: تشعشع<sup>۱</sup>، لومینانس<sup>۲</sup>، و روشنی<sup>۳</sup>. تشعشع، مقدار کل انرژی است که از منبع نور جریان می‌یابد، و معمولاً برحسب وات (W) سنجیده می‌شود. لومینانس، که برحسب لومن (lm) سنجیده می‌شود، معیاری از مقدار انرژی است که بیننده از منبع نور دریافت می‌کند. به عنوان مثال، نور خارج‌شده از منبعی که در ناحیه راه دور مادون قرمز طیف کار می‌کند، می‌تواند انرژی زیادی (تشعشع) داشته باشد، اما بیننده به سختی آن را دریافت خواهد کرد، زیرا لومینانس آن تقریباً صفر است. سرانجام، روشنی، توصیفگر ذهنی است که اندازه‌گیری آن در عمل غیرممکن است. روشنی فرضیه غیررنگی شدت را دربرمی‌گیرد، و یکی از عوامل کلیدی در توصیف حس کردن رنگ است.

همان‌طور که در بخش ۱-۱-۲ بحث شد، مخروط‌ها حسگرهایی در چشم هستند که مسئول بینایی‌اند. آزمایشات متعددی نشان دادند که ۶ تا ۷ میلیون مخروط در چشم انسان می‌توانند به سه دسته حس‌کننده اصلی تقسیم شوند که متناظر با قرمز، سبز و آبی‌اند. تقریباً ۶۵ درصد در تمام مخروط‌ها به نور قرمز، ۳۳ درصد به نور سبز، و فقط ۲ درصد به نور آبی حساس‌اند (اما حساس‌ترین مخروط‌ها، آبی‌اند). شکل ۳-۶ میانگین منحنی‌های آزمایشی را نشان می‌دهد که جذب نور را توسط مخروط‌های قرمز، سبز، و آبی چشم مشخص می‌کند.



شکل ۳-۶ جذب نور توسط مخروط‌های قرمز، سبز و آبی چشم انسان به صورت تابعی از طول موج.

با توجه به این ویژگی‌های جذب چشم انسان، رنگ‌ها به صورت ترکیب‌های گوناگونی از رنگ‌های اولیه قرمز (R)، سبز (G) و آبی (B) دیده می‌شوند. به منظور استانداردسازی، CIE<sup>۱</sup> (مجمع بین‌المللی روشنی) در سال ۱۹۳۱ مقادیر طول موج را برای سه رنگ اولیه مشخص کرد: آبی،  $435.8 \text{ nm}$ ، سبز و  $546.1 \text{ nm}$  و قرمز  $700 \text{ nm}$ . این استاندارد قبل از منحنی‌های آزمایشی مشروح شکل ۳-۶، در سال ۱۹۶۵ مهیا شد. بنابراین، استانداردهای CIE تقریباً متناظر با داده‌های آزمایشی‌اند. از شکل‌های ۲-۶ و ۳-۶ می‌دانیم که هیچ رنگی را نمی‌توان به تنهایی قرمز، سبز یا آبی نامید. علاوه بر این، یادآوری این نکته مهم است که تعیین طول موج‌های رنگ اصلی به منظور استانداردسازی، به معنای این نیست که این سه قطعه RGB ثابت، می‌توانند تمام رنگ‌های طیف را تولید نمایند. استفاده از واژه/صلی، به غلط، به این صورت تفسیر شد که وقتی این سه رنگ اصلی با خواص شدت گوناگونی ترکیب می‌شوند، می‌توانند تمام رنگ‌های قابل رویت را تولید نمایند. همان‌طور که خواهد دید، این تفسیر درست نیست، مگر این‌که طول موج نیز تغییر کند، که در این صورت، سه رنگ اصلی استاندارد ثابت نخواهیم داشت.

رنگ‌های اولیه می‌توانند ترکیب شوند تا رنگ‌های ثانویه بنفش روشن (قرمز به اضافه آبی)، فیروزه‌ای



شکل ۴-۶ رنگ‌های اولیه و ثانویه نوری و مادی.

(سبز به اضافه آبی)، و زرد (قرمز به اضافه سبز) به وجود آیند. ترکیب سه رنگ اولیه یا یک رنگ ثانویه با رنگ اولیه متضاد آن با شدت مناسب، رنگ سفید را تولید خواهد کرد. این نتیجه در شکل ۴-۶ (الف) آمده است، که سه رنگ اولیه و ترکیب آن‌ها را برای تولید رنگ‌های ثانویه نیز نشان می‌دهد.

تفاوت‌های بین رنگ‌های اولیه نوری و رنگ‌های اولیه مادی<sup>۲</sup> یا کلرانت<sup>۳</sup>، مهم است. در دومی، رنگ اولیه به عنوان رنگی تعریف می‌شود که رنگ اولیه نوری را جذب یا تفریق می‌نماید و دو رنگ دیگر را انعکاس یا عبور می‌دهد. بنابراین، رنگ‌های اولیه مادی عبارتند از بنفش، فیروزه‌ای، و زرد، و رنگ‌های ثانویه مادی عبارتند از قرمز، سبز و آبی. این رنگ‌ها در شکل ۴-۶ (ب) نشان داده شده‌اند. ترکیب مناسبی از سه رنگ مادی اولیه، یا یک رنگ ثانویه با متضاد اصلی خودش، رنگ سیاه را تولید می‌کند.

دریافت تلویزیون رنگی، نمونه‌ای از ماهیت جمع‌پذیری رنگ‌های نور است. داخل صفحات CRT

تلویزیون رنگی، شامل آرایه بزرگی از الگوهای نقطه‌ای مثلثی از جنس فسفر حساس به الکترون وجود دارد. وقتی تحریک می‌شود، هر نقطه در یک مثلث، نور را به یکی از رنگ‌های اولیه تولید می‌کند. شدت نقاط فسفری قرمز منتشرشده، توسط یک تفنگ الکترونی در داخل لامپ مدوله می‌شود، که پالس‌هایی متناظر با "انرژی قرمز" است که توسط دوربین تلویزیون دیده می‌شود. اثری که در گیرنده تلویزیون دیده می‌شود این است که سه رنگ اولیه از هر مثلث فسفری به یکدیگر "اضافه می‌شوند"، و توسط مخروط‌های حساس به رنگ در چشم، به صورت تصویر کاملاً رنگی دریافت می‌گردد. مشاهده سی تصویر رنگی در هر ثانیه در هر سه رنگ، تصور نمایش تصویر پیوسته را روی صفحه‌نمایش، کامل می‌کند.

نمایشگرهای CRT در حال جایگزین شدن با فناوری‌های دیجیتال "پانل تخت" هستند، مثل دستگاه‌های LCD<sup>۱</sup> و پلاسما. گرچه آن‌ها اساساً با CRT ها متفاوت‌اند، این‌ها و فناوری‌های مشابه، از اصول یکسانی استفاده می‌کنند، به طوری که همه‌ی آن‌ها برای تولید یک پیکسل رنگی، به سه زیرپیکسل<sup>۲</sup> (قرمز، سبز و آبی) نیاز دارند. LCD ها از خواص نور پلاریزه شده برای جلوگیری یا عبور نور از صفحه LCD استفاده می‌کنند؛ در مورد فناوری نمایش ماتریس فعال، ترانزیستورهای فیلم نازک (TFT ها) برای فراهم کردن سیگنال‌های مناسب جهت آدرس‌دهی هر پیکسل در صفحه استفاده می‌نمایند. فیلترهای نوری برای تولید سه رنگ اصلی نور در مکان مثلثی پیکسل استفاده می‌کنند. در واحدهای پلاسما، پیکسل‌ها سلول‌های گازی هستند که با فسفر پوشیده شدند تا یکی از سه رنگ اصلی را تولید نمایند. هر یک از سلول‌ها مثل LCD ها آدرس‌دهی می‌شوند. این قابلیت آدرس‌دهی مختصات مثلثی پیکسل، اساس نمایشگرهای دیجیتال است.

ویژگی‌هایی که به طور کلی برای تمایز رنگ‌ها از یکدیگر به کار می‌روند، عبارتند از، روشنی، پرده رنگ<sup>۳</sup> و اشباع<sup>۴</sup>. روشنی، شامل فرضیه رنگی شدت است. پرده رنگ، صفت مربوط به طول موج غالب در ترکیب موج‌های نور است. پرده رنگ، رنگ غالب را که توسط بیننده دریافت شد، نشان می‌دهد. بنابراین، وقتی شیء‌ای را قرمز، نارنجی یا زرد می‌نامیم، به پرده رنگ آن اشاره داریم. اشباع، به درجه خلوص نسبی یا میزان ترکیب نور سفید با پرده رنگ مربوط می‌شود. رنگ‌های طیفی خالص، کاملاً اشباع‌اند. رنگ‌هایی مثل صورتی (قرمز و سفید) و کمرنگ (بنفش و سفید) کمتر اشباع شده‌اند، به طوری که درجه اشباع، به طور معکوس با میزان نور سفید اضافه شده متناسب است.

پرده رنگ و اشباع را روی هم رفته، رنگینی<sup>۵</sup> می‌نامند، و در نتیجه، رنگ ممکن است با رنگ و رنگینی آن مشخص شود. مقادیر قرمز، سبز و آبی مورد نیاز برای ایجاد هر رنگ، مقادیر قرمز، سبز، و آبی مورد نیاز برای تشکیل یک رنگ خاص، مقادیر محرک سه‌گانه<sup>۶</sup> نام دارند و به ترتیب با X، Y و Z نمایش داده می‌شوند. سپس، رنگ با ضرایب سه‌گانه‌ی رنگینی<sup>۷</sup> آن مشخص می‌گردد که به صورت زیر تعریف می‌شود:

$$x = \frac{X}{X + Y + Z} \quad (6-1-1)$$

$$y = \frac{Y}{X + Y + Z} \quad (6-1-2)$$

1. Liquid Cristal Display      2. subpixel      3. hue      4. saturation      5. chromaticity  
6. tristimulus      7. trichromatic coefficients

$$z = \frac{Z}{X + Y + Z} \quad (۶-۱-۳)$$

از معادلات فوق درمی‌یابیم که<sup>۱</sup>:

$$x + y + z = 1 \quad (۶-۱-۴)$$

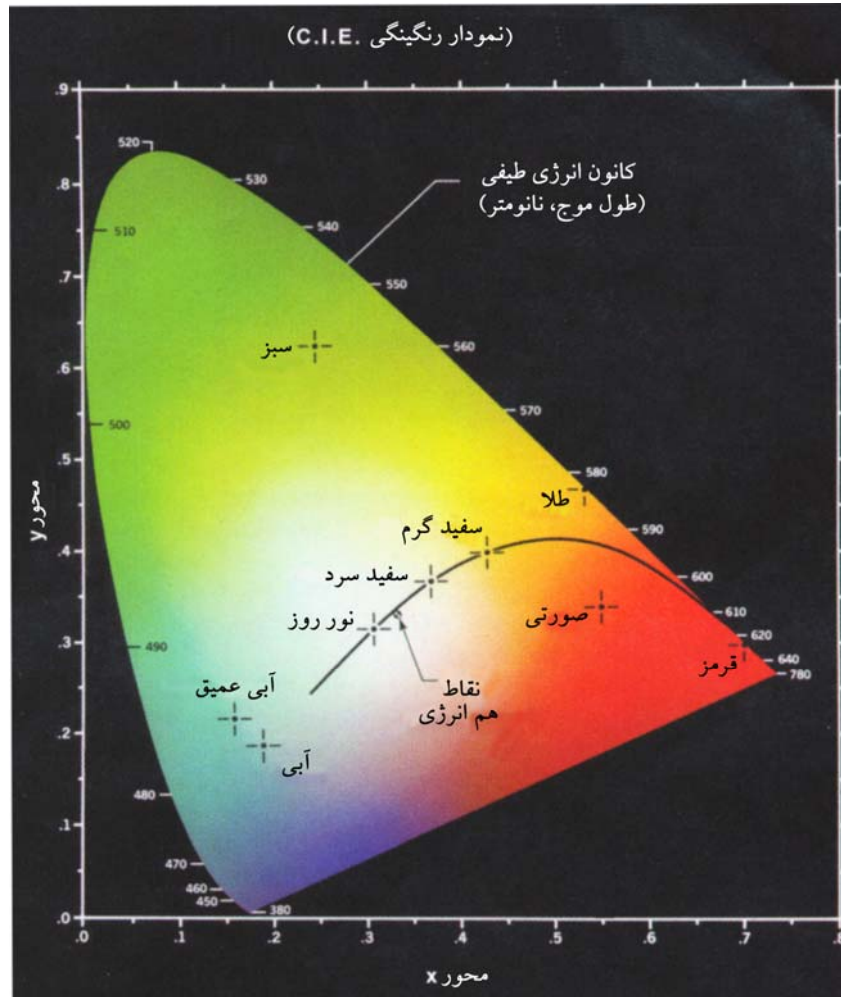
برای هر طول موج نوری در طیف قابل رویت، مقادیر محرک سه‌گانه‌ی مورد نیاز برای تولید رنگ متناظر با آن طول موج می‌تواند مستقیماً از منحنی‌ها یا جدول‌هایی که نتایج آزمایش‌های گسترده‌اند، به دست آید. روش دیگر برای مشخص کردن رنگ‌ها، استفاده از نمودار رنگینگی CIE است (شکل ۶-۵)، که ترکیب رنگ را به صورت تابعی از  $x$  (قرمز) و  $y$  (سبز) نشان می‌دهد. برای هر مقدار  $x$  و  $y$ ، مقدار متناظر  $z$  (آبی) از معادله (۶-۱-۴) با توجه به رابطه  $z = 1 - (x + y)$  به دست می‌آید. نقطه‌ای که با رنگ سبز در شکل ۶-۵ مشخص شد، تقریباً دارای ۶۲٪ محتوای سبز و ۲۵٪ قرمز است. طبق معادله (۶-۱-۴)، ترکیب آبی تقریباً ۱۳٪ است.

مکان رنگ‌های گوناگون طیف - از بنفش در ۳۸۰ نانومتر تا قرمز در ۷۸۰ نانومتر، حول مرز زبانه‌ای شکل نمودار رنگینگی نشان داده شده‌اند. این‌ها رنگ‌های خالص نشان‌داده‌شده در طیف شکل ۶-۲ هستند. هر نقطه‌ای که دقیقاً روی مرز نیست ولی در داخل نمودار قرار دارد، مخلوطی از رنگ‌های طیف را نشان می‌دهد. نقطه‌ای با انرژی مساوی که در شکل ۶-۵ نشان داده شده است، متناظر با کسرهای مساوی از سه رنگ اولیه است، که استاندارد CIE را برای رنگ سفید نشان می‌دهد. هر نقطه‌ی مستقر در روی مرز نمودار رنگینگی، کاملاً اشباع است. وقتی نقطه‌ای مرز را ترک می‌کند و به نقطه تساوی انرژی‌ها می‌رسد، نور سفید بیشتری به رنگ اضافه می‌گردد و کمتر اشباع می‌شود. اشباع در نقطه تساوی انرژی‌ها، صفر است.

نمودار رنگینگی برای مخلوط کردن رنگ‌ها مناسب است، زیرا قطعه خط مستقیمی که دو نقطه را در نمودار به هم متصل می‌کند، تمام رنگ‌های مختلفی را که می‌تواند با ترکیب این رنگ‌ها به دست آید، تعریف می‌نماید. به عنوان مثال، خط مستقیمی را در نظر بگیرید که در شکل ۶-۵ از نقطه قرمز به نقطه سبز رسم شده است. اگر نور قرمز بیش از نور سبز باشد، نقطه‌ای که رنگ جدید را نشان می‌دهد، روی این قطعه خط خواهد بود، اما به نقطه قرمز نزدیک‌تر است. به طور مشابه، خطی که از نقطه‌ای با تساوی انرژی به هر نقطه‌ای در مرز این نمودار رسم می‌شود، تمام سایه‌های رنگ طیف خاص را تعریف خواهد کرد.

بسط این رویه به سه رنگ، آسان است. برای تعیین بازه‌ی رنگ‌هایی که می‌توانند از هر سه رنگ دیگر در نمودار رنگینگی به دست آیند، خطوطی را به هر سه نقطه رنگی رسم می‌کنیم. نتیجه، یک مثلث است و هر رنگ روی مرز یا داخل مثلث می‌تواند از طریق ترکیب‌های گوناگونی از سه رنگ اولیه به دست آید. مثلی که رؤس آن در هر سه رنگ ثابت قرار دارد، نمی‌تواند کل ناحیه رنگی را در شکل ۶-۵ دربرگیرد. این مشاهدات، این گفته را که "تمام رنگ‌ها نمی‌توانند به سه رنگ اولیه ثابت به دست آیند"، تأکید می‌کند.

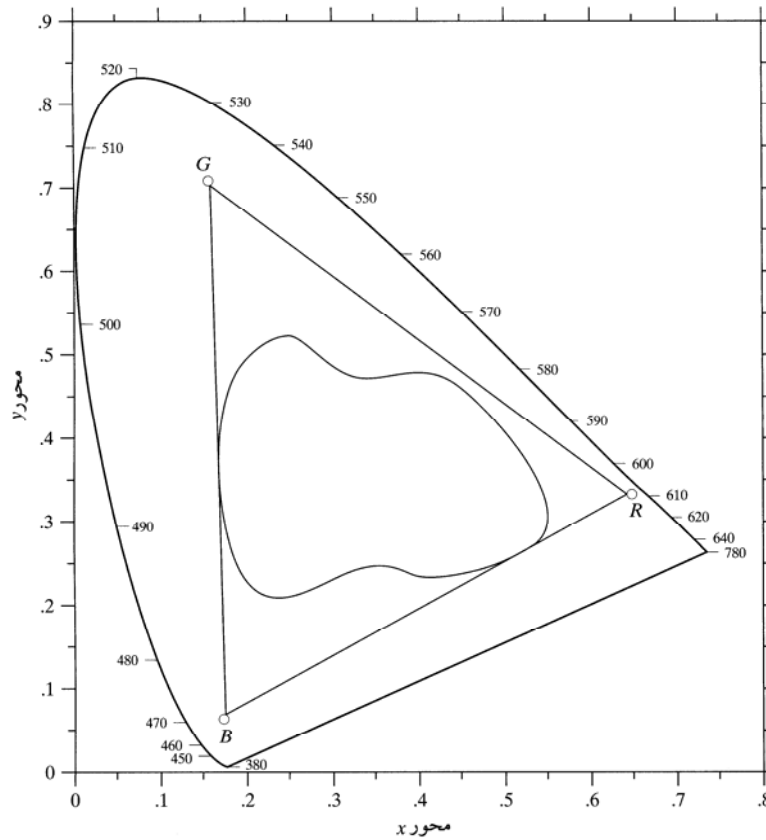
۱. در اینجا استفاده از  $x$ ،  $y$  و  $z$  از قاعده نمادگذاری پیروی می‌کند. این‌ها را با به کارگیری  $(X, Y)$  برای نمایش مختصات مکانی در بخش‌های دیگر کتاب اشتباه نکنید.



شکل ۵-۶ نمودار رنگی C.I.E.

مثلاً شکل ۶-۶، بازه‌ای از رنگ‌ها (به نام گام رنگ<sup>۱</sup>) را نشان می‌دهد که توسط مانیتورهای RGB تولید شدند. ناحیه غیرمثلی در داخل مثلث، نماینده گام رنگ در دستگاه‌های چاپ رنگی با کیفیت بالای امروزی است. مرز گام چاپ رنگی نامنظم است، زیرا چاپ رنگی، ترکیبی از جمع و تفریق رنگ‌ها است، که کنترل این فرآیند خیلی دشوارتر از نمایش رنگ‌ها در یک مانیتور است، که مبتنی بر اضافه کردن سه رنگ اولیه با قابلیت کنترل بالا است.

1. color gamut



شکل ۶-۶ گام رنگ مانتور (مثلثی) و دستگاه‌های چاپ رنگی (ناحیه نامنظم).

## ۶-۲ مدل‌های رنگ

هدف مدل رنگ (که فضای رنگ یا سیستم رنگ نیز نامیده می‌شود)، تسهیل تعیین مشخصات رنگ‌ها در یک استاندارد است که معمولاً روش قابل قبولی است. در اصل، مدل رنگ، مشخصات سیستم مختصات و زیرفضایی درون آن سیستم است که در آن، هر رنگ فقط با یک نقطه بیان می‌شود.

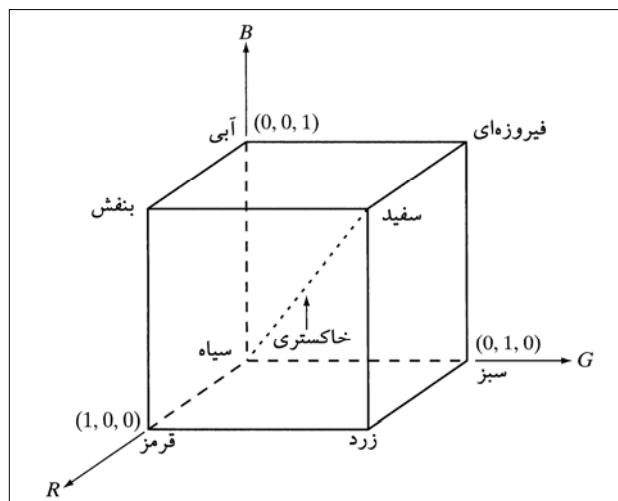
اغلب مدل‌های رنگی که امروزه به کار می‌روند، به سمت سخت‌افزار (مانند مانیتورها و چاپگرهای رنگی) یا کاربردهایی گرایش دارند که هدف آن‌ها کارکردن با رنگ‌ها می‌باشد (مثل ایجاد گرافیک‌های رنگی برای پویانمایی<sup>۱</sup>). بر اساس اصطلاحات پردازش تصویر، مدل‌های سخت‌افزاری که معمولاً در عمل به کار می‌آیند، عبارتند از مدل RGB (قرمز، سبز، آبی) برای مانیتورهای رنگی و دسته وسیعی از دوربین‌های ویدیویی

1. animation

رنگی؛ مدل‌های CMY (فیروزه‌ای، بنفش و زرد) و CMYK (فیروزه‌ای، بنفش، زرد، سیاه) برای چاپ رنگی؛ و مدل HSI (پرده رنگ، اشباع، شدت) که خیلی نزدیک به تفسیر و توصیف انسان از رنگ‌ها است. امتیاز مدل HSI این است که اطلاعات رنگ و سطح خاکستری موجود در تصویر را تفکیک می‌کند، و آن را برای بسیاری از تکنیک‌های سطح خاکستری که در این کتاب بررسی می‌شوند، مناسب می‌کند. امروزه مدل‌های رنگی متعددی وجود دارند، زیرا علم رنگ‌شناسی، حوزه وسیعی است که حوزه‌های بسیاری از کاربردها را دربرمی‌گیرد. در این جا سعی می‌کنیم بعضی از مدل‌ها را بررسی کنیم، زیرا جالب و مهم‌اند. اما مدل‌هایی که در این فصل بررسی می‌شوند، مدل‌های اولیه برای پردازش تصویراند. اگر با مطالب این فصل آشنا شوید، در مطالعه بقیه مدل‌های امروزی مشکلی نخواهید داشت.

### ۶-۲-۱ مدل رنگ RGB

در مدل RGB، هر رنگ به صورت مولفه‌های طیفی اولیه قرمز، سبز و آبی ظاهر می‌شود. این مدل مبتنی بر سیستم مختصات دکارتی است. زیرفضای رنگی مورد علاقه، مکعبی است که در شکل ۶-۷ نشان داده شده است، که در آن مقادیر اولیه RGB در سه گوشه قرار دارند؛ رنگ‌های ثانویه فیروزه‌ای، بنفش، و زرد در سه گوشه دیگر واقع‌اند. سیاه در مبدأ قرار دارد، و سفید در دورترین گوشه از مبدأ واقع است. در این مدل، سطح خاکستری (نقاطی با مقادیر RGB یکسان) از سیاه به سفید در امتداد خطی که این دو نقطه را به هم متصل می‌کند، قرار دارد. رنگ‌های مختلف در این مدل، نقاطی در داخل یا روی مکعب هستند، و توسط بردارهایی تعریف می‌شوند که از مبدأ عبور می‌کنند. برای سهولت، فرض می‌شود که مقادیر رنگ طوری نرمال شدند که مکعب نشان داده شده در شکل ۶-۷، مکعب واحدی است. یعنی فرض می‌شود تمام مقادیر R، G و B در بازه ی [0, 1] هستند.



شکل ۶-۷ مکعب رنگی RGB. نقاط در امتداد قطر اصلی، دارای مقادیر خاکستری از مبدأ تا سفید در نقطه (1,1,1) هستند.



شکل ۸-۶ مکعب رنگی ۲۴ بیتی.

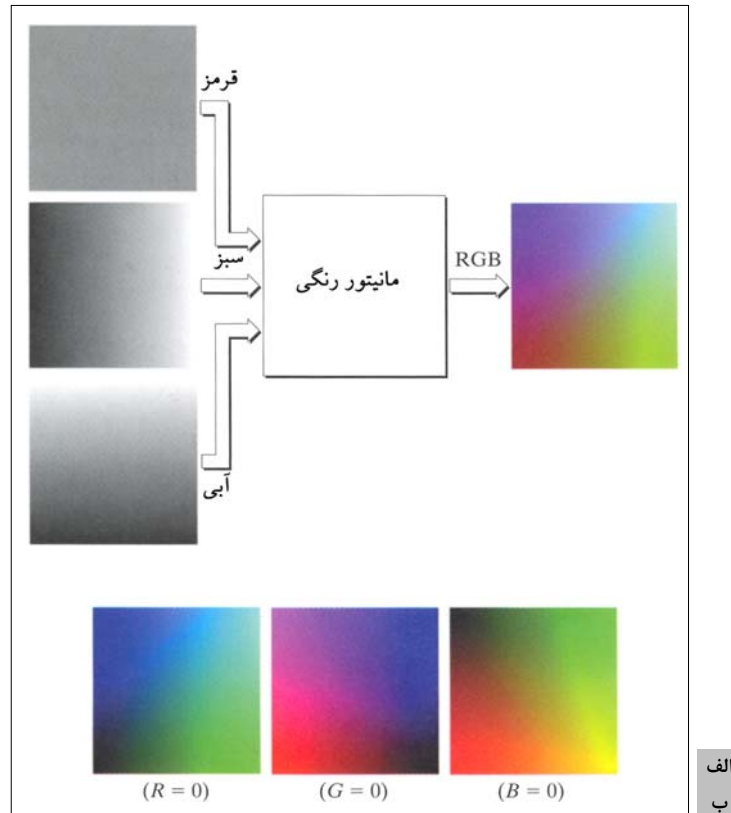
تصاویری که در مدل رنگ RGB نشان داده می‌شوند، شامل سه مولفه تصویر، برای هر رنگ اولیه یک مولفه دارند. وقتی وارد مانیتور رنگی می‌شوند، این سه تصویر، روی صفحه با هم ترکیب می‌شوند یا تصویر رنگی متضادی ایجاد کنند (مانند آنچه که در بخش ۶-۱ گفته شد). تعداد بیت‌های لازم برای نمایش هر پیکسل در فضای RGB، عمق پیکسل نام دارد. تصویر RGB را در نظر بگیرید که در آن، هر تصویر قرمز، سبز و آبی، تصویر ۸ بیتی‌اند. تحت این شرایط، هر پیکسل رنگی RGB (یعنی سه‌تایی (R, G, B)) دارای عمق ۲۴ بیت (سه

صفحه‌ی تصویر ضرب در تعداد بیت‌ها در هر صفحه). واژه‌ی تصویر تمام‌رنگی، معمولاً برای بیان تصویر رنگی ۲۴ بیتی RGB به کار می‌رود. تعداد کل رنگ‌ها در تصاویر ۲۴ بیتی RGB برابر با  $16,777,216 = (2^8)^3$  است. شکل ۸-۶ مکعب رنگی ۲۴ بیتی RGB متناظر با نمودار شکل ۷-۶ را نشان می‌دهد.

#### مثال ۱-۶: تولید صفحات وجه<sup>۱</sup> مخفی و برش عرضی مکعب رنگی RGB.

مکعب شکل ۸-۶، مرکب از  $16,777,216 = (2^8)^3$  رنگ است که در پاراگراف قبلی گفته شد. یک روش آسان برای مشاهده این رنگ‌ها، تولید صفحات رنگی (وجوه یا برش‌های عرضی مکعب) است. این کار با ثابت کردن یکی از سه رنگ و تغییر دو رنگ دیگر انجام می‌گیرد. به عنوان مثال، صفحه‌ی برش عرضی از مرکز مکعب و موازی با صفحه GB در شکل ۸-۶، صفحه (127, G, B) برای  $G, B = 0, 1, 2, \dots$  است. در این‌جا از مقادیر واقعی به جای مقادیر نرمال‌شده‌ی ریاضی در بازه  $[0, 1]$  استفاده کردیم، زیرا واقعاً اولی در کامپیوتر برای تولید رنگ‌ها استفاده می‌شود. شکل ۹-۶ (الف) نشان می‌دهد که تصویری از صفحه برش عرضی، با وارد کردن هر یک از سه تصویر مولفه در مانیتور رنگی، مشاهده می‌شود. در تصاویر مولفه، صفر نشان‌دهنده سیاه و ۲۵۵ نشان‌دهنده سفید است (توجه کنید که این‌ها تصاویر سطح خاکستری‌اند). سرانجام، شکل ۹-۶ (ب) سه صفحه سطحی مکعب را در شکل ۸-۶ نشان می‌دهد، که به روش مشابهی تولید شدند.

توجه به این نکته جالب است که تصویربرداری رنگی، معکوس فرآیندی است که در شکل ۹-۶ آمده است. تصویر رنگی می‌تواند با استفاده از سه فیلتر گرفته شود که به ترتیب نسبت به قرمز، سبز و آبی حساس هستند. وقتی صحنه رنگی را با دوربین تک‌رنگ مجهز به یکی از این فیلترها می‌بینیم، نتیجه، تصویر تک‌رنگی است که شدت آن متناسب با پاسخ آن فیلتر است. تکرار این فرآیند با هر فیلتر، سه تصویر تک‌رنگ را تولید می‌کند که تصاویر مولفه‌ی RGB از صحنه رنگی‌اند (در عمل، حسگرهای تصویر رنگی RGB، معمولاً این فرآیند را در یک دستگاه ترکیب می‌کنند). بدیهی است که نمایش این سه تصویر مولفه RGB به صورتی که در شکل ۹-۶ (الف) نشان داده شده‌اند، منجر به اجرای رنگی RGB از صحنه رنگی اصلی می‌شود. ■



شکل ۹-۶ (الف) تولید تصویر RGB از صفحه رنگی برش عرضی (127, G, B). (ب) سه سطح مخفی صفحات در مکعب رنگی شکل ۸-۶.

گرچه مانیتورها و کارت‌های نمایش با کیفیت بالا، اجرای معقولی از رنگ‌ها را در تصویر ۲۴ بیتی RGB فراهم می‌کند، اغلب سیستم‌هایی که امروزه در حال استفاده‌اند، فقط به ۲۵۶ رنگ محدود هستند. همچنین، کاربردهای متعددی وجود دارند که در آن‌ها صد رنگ یا کمتر از صد رنگ مورد استفاده قرار می‌گیرند. مثال خوبی از این مورد، توسط تکنیک‌های پردازش تصویر شبه‌رنگ فراهم می‌شود که در بخش ۳-۶ بحث شده است. با توجه به سیستم‌های متنوع امروزی، علاقه چشمگیری به زیرمجموعه‌ای از رنگ‌ها وجود دارد که احتمالاً به خوبی تولید می‌شوند که مستقل از قابلیت‌های سخت‌افزار بیننده‌اند. این زیرمجموعه از رنگ‌ها را رنگ‌های RGB/امن، یا مجموعه‌ای از رنگ‌های سیستم/امن می‌نامند. در کاربردهای اینترنت، به نام رنگ‌های امن وب یا رنگ‌های امن مرورگر خوانده می‌شود.

با فرض این‌که ۲۵۶ رنگ، کمترین تعداد رنگ‌هایی است که دقیقاً توسط سیستمی بازتولید می‌شود که نتیجه‌ی مطلوبی باید نمایش داده شود، باید برای مراجعه به این رنگ‌ها نمادگذاری استاندارد قابل قبولی وجود داشته باشد. چهل رنگ از این ۲۵۶ رنگ توسط انواع سیستم‌های عامل به صورت‌های مختلفی پردازش می‌شوند، و

جدول ۶-۱ مقادیر معتبر هر مولفه RGB در رنگ آمن.						
سیستم اعداد	معادل‌های رنگ					
مبنای شانزده	00 0	33 51	66 102	99 153	CC 204	FF 255

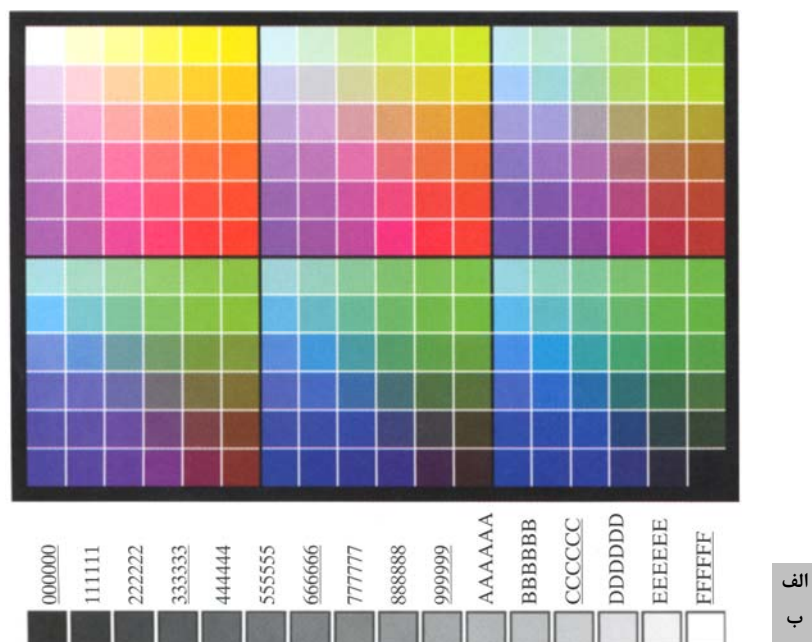
فقط ۲۱۶ رنگ باقی می‌ماند که برای اغلب سیستم‌ها مشترک است. این ۲۱۶ رنگ به عنوان استاندارد عملی رنگ‌های آمن محسوب می‌شوند، به خصوص در کاربردهای اینترنت. هر وقت مطلوب باشد که رنگ‌هایی که توسط اغلب افراد دیده می‌شود، یکسان باشند، از آن‌ها استفاده خواهد شد.

هر یک از ۲۱۶ رنگ آمن، همانند قبل، از سه مقدار RGB ایجاد می‌شوند، اما هر مقدار فقط می‌تواند ۰، ۵۱، ۱۰۲، ۱۵۳، ۲۰۴، یا ۲۵۵ باشد. بنابراین، سه‌تایی‌های RGB مربوط به این مقادیر،  $216 = (6^3)$  مقادیر ممکن را تولید می‌کند (توجه کنید که تمام مقادیر بر ۳ قابل قسمت هستند). معمولاً این مقادیر به مبنای ۱۶ بیان می‌شوند که در جدول ۶-۱ آمده‌اند. می‌دانید که اعداد مبنای شانزده ۰، ۱، ۲، ...، ۹، A، B، C، D، E و F متناظر با اعداد دهدهی ۰، ۱، ۲، ...، ۹، ۱۰، ۱۱، ۱۲، ۱۳، ۱۴ و ۱۵ هستند. به عنوان مثال،  $(FF)_{16} = (255)_{10} = (11111111)_2$  و مشاهده می‌شود که گروه‌بندی دو عدد مبنای شانزده، یک بایت ۸ بیتی را ایجاد می‌کند.

چون برای ایجاد رنگ RGB به سه عدد نیاز است، هر رنگ آمن، از سه عدد مبنای شانزده دورقمی در جدول ۶-۱ تشکیل می‌شود. به عنوان مثال، خالص‌ترین قرمز FF0000 است. مقادیر 000000 و FFFFFFFF به ترتیب سیاه و سفید را نشان می‌دهند. توجه کنید که با استفاده از نمادگذاری دهدهی نیز نتیجه‌ی مشابهی به دست می‌آید. به عنوان مثال، روشن‌ترین قرمز در نمادگذاری دهدهی با  $R=255(FF)$  و  $G=B=0$  مشخص می‌گردد.

شکل ۶-۱۰ (الف)، ۲۱۶ رنگ آمن را نشان می‌دهد، که با مقادیر RGB نزولی سازمان‌دهی شده است. مربع گوشه بالای چپ دارای مقدار FFFFFFFF (سفید)، مربع دوم در سمت راست آن دارای مقدار FFFFCF، مربع سوم دارای مقدار FFF999، و غیره برای سطر اول است. سطر دوم این آرایه دارای مقادیر FFCCFF، FFCCCC، FFCC99 و غیره است. مربع آخر این آرایه دارای مقدار FF0000 است (روشن‌ترین قرمز ممکن). آرایه دوم سمت راست آرایه اولی، با شروع از مقدار CCFFFF بررسی می‌شود که به روش مشابه ادامه می‌یابد و برای چهار آرایه باقیمانده نیز چنین است. مربع آخر (پایین راست) آخرین آرایه دارای مقدار 000000 (سیاه) است. توجه به این نکته مهم است که تمام رنگ‌های خاکستری ۸ بیتی، در ۲۱۶ رنگ آمن وجود ندارند. شکل ۶-۱۰ (ب) کدهای مبنای شانزده را برای تمام رنگ‌های خاکستری ممکن در سیستم ۲۵۶ رنگی RGB نشان می‌دهد. بعضی از این مقادیر در خارج از مجموعه رنگ آمن وجود دارند، اما توسط اغلب سیستم‌های نمایش، به طور مناسبی نمایش داده می‌شوند (برحسب شدت‌های نسبی آن‌ها). خاکستری‌هایی از گروه رنگ آمن،  $(KKKKKK)_{16}$  برای  $K=0, 3, 6, 9, C, F$  در شکل ۶-۱۰ (ب) با خط زیر مشخص شدند.

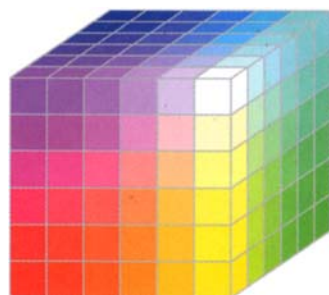
شکل ۶-۱۱ مکعب رنگ آمن RGB را نشان می‌دهد. برخلاف مکعب تمام‌رنگی در شکل ۶-۸ که یکپارچه است، مکعب شکل ۶-۱۱ فقط در صفحات وجه دارای رنگ‌های معتبری است. همان‌طور که در شکل ۶-۱۰ (الف) نشان داده شد، هر صفحه دارای ۳۶ رنگ است، لذا سطح کامل مکعب تمام‌رنگی، با ۲۱۶ رنگ مختلف پوشانده شده است، و این همان چیزی است که انتظار داریم.



شکل ۶-۱۰ الف) ۲۱۶ رنگ آمن RGB. ب) تمام خاکستری‌ها در سیستم ۲۵۶ رنگی RGB (خاکستری‌هایی که بخشی از گروه رنگ آمن هستند، با خط زیر مشخص شده‌اند).

## ۶-۲-۲ مدل‌های رنگ CMY و CMYK

همان‌طور که در شکل ۶-۱ نشان داده شد، فیروزه‌ای، بنفش، و زرد رنگ‌های ثانویه نوری‌اند، یا رنگ‌های اولیه مادی‌اند. به عنوان مثال، وقتی سطحی با ماده فیروزه‌ای پوشیده می‌شود، با رنگ سفید، روشن می‌شود، و رنگ قرمز از سطح منعکس نمی‌گردد. یعنی، فیروزه‌ای از نور سفید منعکس شده تفریق می‌گردد، که خودش مرکب از میزان یکسانی از نور قرمز، سبز و آبی است.



شکل ۶-۱۱ مکعب رنگ آمن RGB.

اغلب دستگاه‌هایی که مواد رنگی را روی کاغذ می‌پاشند، مثل دستگاه‌های کپی و چاپگرهای رنگی، نیاز به ورودی داده‌ی CMY یا اجرای تبدیل RGB به CMY در داخل خود دارند. این تبدیل با عملیات ساده‌ی زیر انجام می‌گیرد:

$$\begin{bmatrix} C \\ M \\ Y \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 \\ 1 \\ 1 \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} R \\ G \\ B \end{bmatrix} \quad (6-2-1)$$

که فرض می‌شود تمام مقادیر رنگ در بازه  $[0, 1]$  نرمال شده‌اند. معادله (۶-۲-۱) اثبات می‌کند که نور منعکس شده از سطح که با

فیروزه‌ای خالص پوشانده شده است، فاقد قرمز است (یعنی  $C = 1 - R$  در معادله). به طور مشابه، بنفش خالص، سبز را منعکس نمی‌کند، و زرد خالص، آبی را منعکس نمی‌کند. معادله (۶-۲-۱) همچنین روشن می‌کند که مقادیر RGB می‌توانند به آسانی از مجموعه مقادیر CMY به دست آیند، به طوری که هر یک از مقادیر CMY از یک تفریق شود. همان‌طور که نشان داده شد، در پردازش تصویر، این مدل رنگ در ارتباط با تولید خروجی کاغذ به کار می‌رود، لذا معمولاً عملیات معکوس از CMY به RGB از نظر عملی جالب نیست. بر اساس شکل ۶-۴، مقادیر یکسانی از رنگ‌های اولیه مادی، فیروزه‌ای، بنفش و زرد باید سیاه را تولید نمایند. در عمل، ترکیب این رنگ‌ها برای چاپ، سیاه کدر را تولید می‌نماید. لذا، برای تولید سیاه کامل (که رنگ غالبی در چاپ است)، رنگ چهارم، یعنی سیاه، به مدل رنگ CMYK اضافه می‌گردد. بنابراین، وقتی ناشرین راجع به چاپ "چهاررنگ" صحبت می‌کنند، منظورشان سه رنگ CMY به اضافه رنگ سیاه است.

### ۶-۲-۳ مدل رنگ HSI

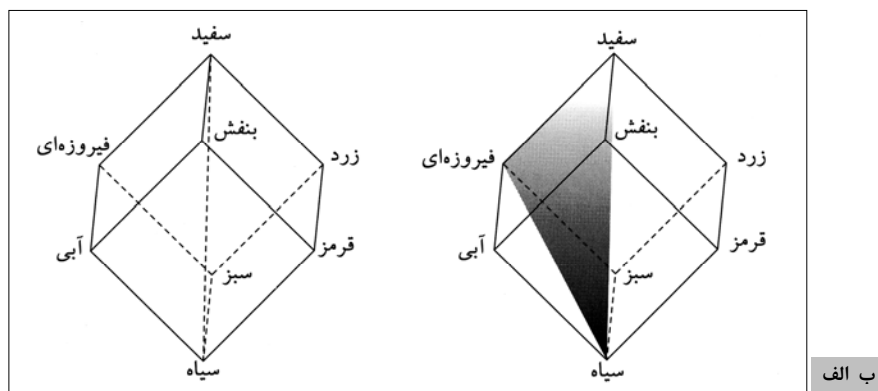
همان‌طور که دیدیم، ایجاد رنگ در مدل‌های RGB و CMY و تغییر از مدلی به مدل دیگر، فرآیند ساده‌ای است. همان‌طور که گفته شد، این سیستم‌های رنگ، برای پیاده‌سازی سخت‌افزاری ایده‌آل هستند. علاوه‌براین، سیستم RGB به خوبی با این حقیقت تطبیق دارد که "چشم انسان رنگ‌های اولیه قرمز، سبز، و آبی را به خوبی درک می‌کند". متأسفانه، RGB، CMY و سایر مدل‌های رنگ مشابه، برای توصیف رنگ‌ها بر اساس تفسیر انسان، مناسب نیستند. به عنوان مثال، فرد نمی‌تواند با مشخص کردن درصد رنگ‌های اولیه یک اتومبیل، رنگ آن را تجسم کند. علاوه‌براین، تصاویر رنگی را مرکب از سه تصویر اولیه نمی‌دانیم که با هم ترکیب می‌شوند تا یک تصویر را به وجود آورند.

وقتی انسان یک شیء رنگی را می‌بیند، آن را با پرده رنگ، اشباع، و روشنی توصیف می‌کنیم. از بخش ۶-۱ به یاد دارید که پرده رنگ، صفت رنگ است که رنگ خالص (زرد، سبز، یا قرمز خالص) را توصیف می‌کند، درحالی‌که اشباع، معیاری از درجه رقیق‌شدن رنگ خالص توسط نور سفید است. روشنی، توصیف‌گری ذهنی است که اندازه‌گیری آن در عمل غیرممکن است. روشنی، فرضیه رنگینگی شدت را دربرمی‌گیرد و یکی از عوامل مهم در توصیف حس کردن رنگ است. می‌دانیم که شدت (سطح خاکستری) مفیدترین توصیف‌گر تصاویر تک‌رنگ است. این کمیت، قابل اندازه‌گیری و تفسیر است. مدلی که در حال ارائه آن هستیم، یعنی مدل رنگ HSI (پرده رنگ، اشباع و شدت)، مولفه‌های شدت را از اطلاعات حامل رنگ (پرده رنگ و اشباع) در تصویر رنگی، تفکیک می‌نماید. در نتیجه، مدل HSI ابزار ایده‌آلی برای تولید الگوریتم‌های پردازش تصویر بر اساس توصیف‌های رنگی است که برای انسان، طبیعی و شهودی است. به طور خلاصه می‌توان گفت که RGB برای تولید رنگ تصویر مناسب است (مثل تصویربرداری توسط دوربین خانگی یا نمایش تصویر در صفحه مانیتور رنگی)، اما استفاده از آن برای توصیف رنگ، خیلی محدود است. مطالبی که در ادامه می‌آید، روش آسانی را برای انجام این کار فراهم می‌سازد.

همان‌طور که در مثال ۶-۱ بحث شد، رنگ RGB می‌تواند به صورت سه تصویر با شدت تک‌رنگ (برای قرمز، سبز و آبی) در نظر گرفته شود. لذا باید قادر به استخراج شدت از رنگ RGB باشیم. اگر مکعب رنگ شکل ۶-۷ را در نظر بگیریم و آن را روی رأس سیاه (0, 0, 0) قرار دهیم، به طوری که رأس سفید (1, 1, 1)

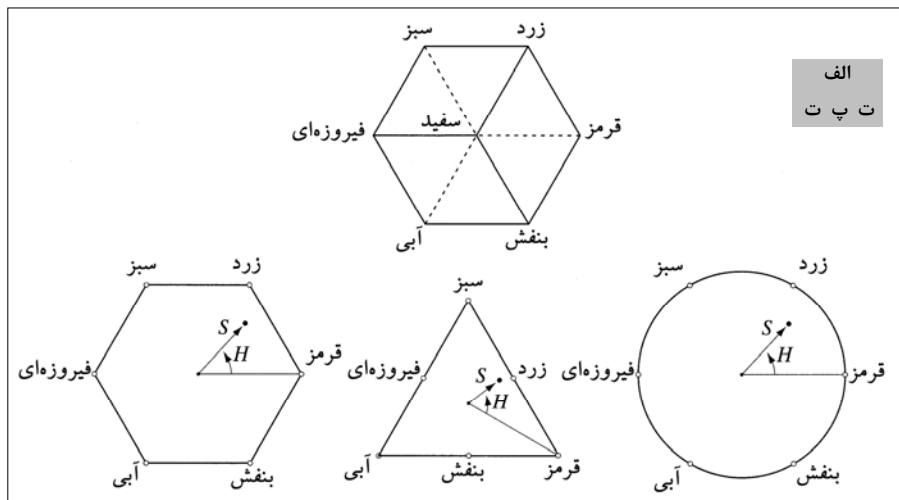
مستقیماً در بالای آن باشد (شکل ۶-۱۲ الف))، این موضوع روشن تر می شود. همان طور که در ارتباط با شکل ۶-۷ گفته شد، شدت (سطح خاکستری) در امتداد خطی وجود دارد که این دو رأس را به هم متصل می کند. در چیدمان شکل ۶-۱۲، خطی (محور شدت) که رئوس سیاه و سفید را به هم متصل می کند، عمودی است. بنابراین، اگر خواستیم مولفه شدت هر نقطه رنگی را در شکل ۶-۱۲ تعیین کنیم، از صفحه عمود بر محور شدت و حاوی این نقطه رنگی، عبور می کنیم. تقاطع صفحه با محور شدت، نقطه ای را ایجاد می کند که مقدار شدت آن در بازه  $[0, 1]$  است. با کمی تفکر پی می بریم که اشباع (خلوص) رنگ، به صورت تابعی از فاصله تا محور شدت بیان می شود. در حقیقت، اشباع نقاط روی محور شدت، صفر است، و این نکته از این حقیقت ناشی می شود که تمام نقاط در امتداد این محور، خاکستری اند.

برای این که ببینید پرده رنگ چگونه می تواند از نقطه RGB تعیین شود، شکل ۶-۱۲ ب) را در نظر بگیرید، که صفحه ای را نشان می دهد که توسط سه نقطه (سیاه، سفید و فیروزه ای) تعریف شده است. این حقیقت که نقاط سیاه و سفید در صفحه وجود دارند، به ما می گوید که محور شدت نیز در صفحه است. علاوه بر این، می بینیم که تمام نقاط موجود در قطعه صفحه ای تعریف شده توسط محور شدت و مرزهای مکعب دارای پرده رنگ یکسانی اند (در این مورد فیروزه ای). این نتیجه گیری، با توجه به مطالب بخش ۶-۱ نیز قابل حصول است که در آن جا گفته شد تمام رنگ های تولید شده توسط سه رنگ، در داخل مثلثی قرار می گیرند که توسط آن رنگ ها تعریف می شوند. اگر دو نقطه سیاه و سفید باشند و یک نقطه رنگی باشد، تمام نقاط روی مثلث، پرده رنگ یکسانی خواهند داشت، زیرا مولفه های سیاه و سفید نمی توانند پرده رنگ را تغییر دهند (البته شدت و اشباع نقاط در این مثلث، متفاوت خواهد بود). با چرخش (دوران) صفحه سایه دار حول محور شدت عمودی، پرده های رنگ مختلفی به دست خواهیم آورد. با توجه به این مفاهیم نتیجه می گیریم که مقادیر پرده رنگ، اشباع، و شدت مورد نیاز برای ایجاد فضای پرده رنگ، می تواند از مکعب رنگ RGB به دست آید. یعنی، می توانیم نقطه RGB را به نقطه متناظر در مدل رنگ HSI تبدیل کنیم. برای این کار باید بر روی فرمول های هندسی توصیف کننده ی استدلال های مطرح شده در بحث قبلی، متمرکز شویم.

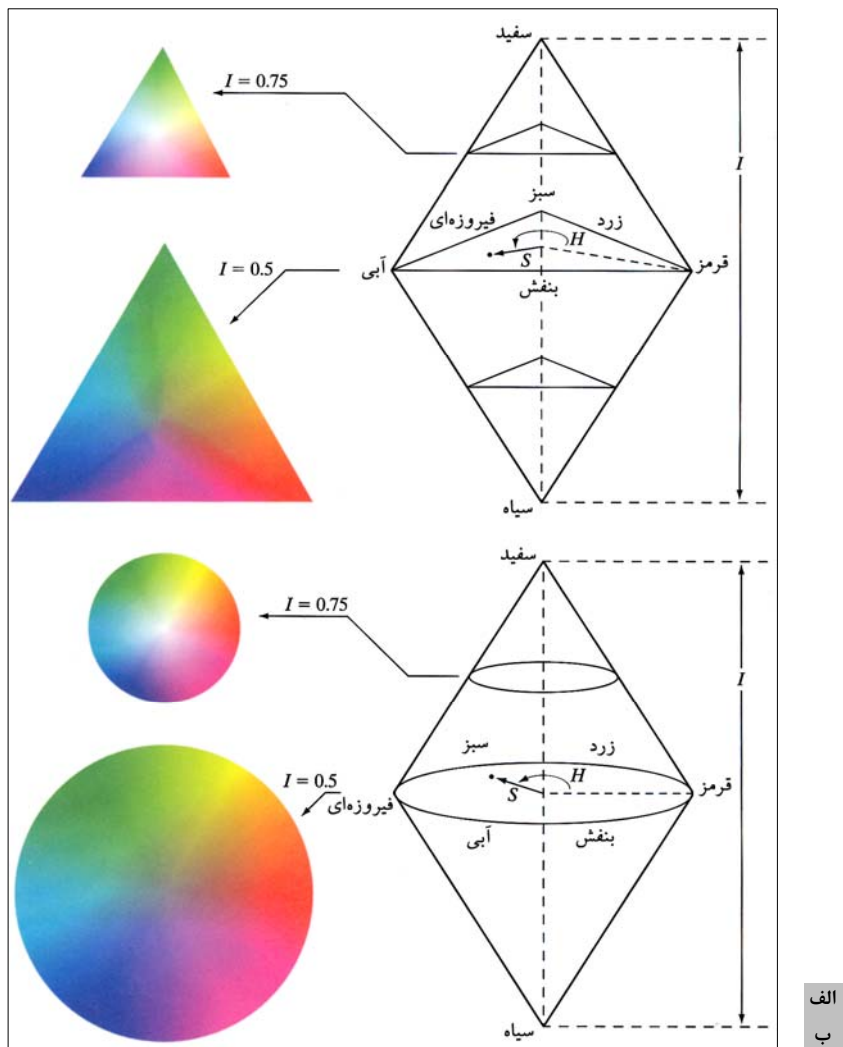


شکل ۶-۱۲ روابط ادراکی بین مدل های رنگ RGB و HSI.

نکته مهمی که باید درباره چیدمان مکعبی در شکل ۱۲-۶ و فضای رنگ HSI متناظر آن به خاطر داشته باشیم این است که، فضای HSI توسط محور شدت عمودی و locus نقاط رنگی که در صفحات عمود بر این محور قرار دارند، نمایش داده می‌شوند. همان‌طور که این صفحات در محور شدت بالا و پایین می‌روند، مرزهای تعریف‌شده توسط تقاطع هر صفحه با وجوه مکعب، به شکل مثلث یا چهارگوش هستند. این نکته، با نگاه کردن به مکعب به سمت پایین محور سطح خاکستری آن (شکل ۱۲-۶ الف)، مشهودتر می‌شود. در این صفحه می‌بینیم که رنگ‌های اولیه با زاویه ۱۲۰ درجه از هم جدا شده‌اند. رنگ‌های ثانویه در فاصله ۶۰ درجه از رنگ‌های اولیه قرار دارند، که به این معنا است که زاویه بین رنگ‌های ثانویه نیز ۱۲۰ درجه است. شکل ۱۳-۶ (ب) همان شکل شش ضلعی و یک نقطه رنگی اختیاری را نشان می‌دهد (که به صورت یک نقطه نشان داده شده است). پرده رنگ این نقطه توسط زاویه‌ای از یک نقطه مرجع تعیین می‌شود. معمولاً (اما نه همیشه) زاویه صفردرجه از محور قرمز، پرده رنگ صفر دارد، و پرده رنگ از این‌جا در جهت خلاف عقربه‌های ساعت افزایش می‌یابد. اشباع (فاصله از محور عمودی) برابر با طول بردار از مبدأ تا آن نقطه است. توجه کنید که مبدأ توسط تقاطع صفحه رنگ با محور عمودی شدت تعریف می‌شود. مولفه‌های مهم فضای رنگ HSI عبارتند از محورهای عمودی شدت، طول بردار به یک نقطه رنگی، و زاویه این بردار با محور قرمز. بنابراین، صفحات HSI تعریف‌شده، ممکن است برحسب شش ضلعی، مثلث، یا حتی دایره باشد که در شکل‌های ۱۳-۶ (پ) و (ت) آمده‌اند. شکل انتخابی مهم نیست، زیرا هر یک از این شکل‌ها می‌توانند با استفاده از یک تبدیل هندسی، در یکی از دو شکل دیگر قرار گیرد. شکل ۱۴-۶ مدل HSI مبتنی بر مثلث‌ها و دایره‌های رنگی را نشان می‌دهد.



شکل ۱۳-۶ پرده رنگ و اشباع در مدل رنگ HSI. نقطه، دارای رنگ اختیاری است. زاویه از محور قرمز، پرده رنگ را مشخص می‌کند و طول بردار اشباع را مشخص می‌نماید. شدت رنگ‌ها در هر یک از این صفحات، توسط مکان صفحه در محور عمودی شدت مشخص می‌شود.



شکل ۶-۱۴ مدل رنگ HSI مبتنی بر صفحات (الف) مثلثی، (ب) دایره‌ای. مثلث‌ها و دایره‌ها بر محور عمودی شدت، عمود هستند.

### تبدیل رنگ‌ها از RGB به HSI

محاسبات از RGB به HSI و برعکس، برحسب بیت‌ها انجام می‌گیرد. برای سهولت، وابستگی  $(x, y)$  را در معادلات تبدیلی در نظر نگرفتیم. اگر تصویری با فرمت RGB داشته باشیم، مولفه H هر پیکسل RGB با استفاده از معادله زیر به دست می‌آید:

$$H = \begin{cases} \theta & \text{اگر } B \leq G \\ 360 - \theta & \text{اگر } B > G \end{cases} \quad (۶-۲-۲)$$

که<sup>۱</sup>

$$\theta = \cos^{-1} \left\{ \frac{\frac{1}{2}[(R - G) + (R - B)]}{[(R - G)^2 + (R - B)(G - B)]^{1/2}} \right\}$$

مولفه اشباع به صورت زیر به دست می‌آید:

$$S = 1 - \frac{3}{(R + G + B)} [\min(R, G, B)] \quad (۶-۲-۳)$$

سرانجام، مولفه شدت به صورت زیر به دست می‌آید:

$$I = \frac{1}{3}(R + G + B) \quad (۶-۲-۴)$$

فرض می‌شود که مقادیر RGB به بازه‌ی  $[0, 1]$  نرمال‌سازی شدند و زاویه  $\theta$  نسبت به محور قرمز در فضای HSI محاسبه می‌شود (شکل ۶-۱۳). پرده رنگ می‌تواند به بازه  $[0, 1]$  نرمال شود، که برای این کار باید تمام مقادیر حاصل از معادله (۶-۲-۲) بر ۳۶۰ درجه تقسیم گردد. اگر مقادیر RGB در فاصله  $[0, 1]$  باشند، دو مولفه دیگر HSI نیز در این بازه بوده‌اند.

نتایج در معادلات (۶-۲-۲) تا (۶-۲-۴) می‌توانند از هندسه‌ی نشان‌داده‌شده در شکل‌های ۶-۱۲ و ۶-۱۳ مشتق شوند. این مشتق دشوار است و ارزشی برای این بحث ندارد (می‌توانید به منابع مربوطه مراجعه کنید).

### تبدیل رنگ‌ها از HSI به RGB

با توجه به مقادیر HSI در فاصله  $[0, 1]$ ، می‌خواهیم مقادیر RGB متناظر را در همان بازه پیدا کنیم. معادلات قابل اجرا به مقادیر H بستگی دارد. سه قطاع مورد علاقه، متناظر با فاصله‌های ۱۲۰ درجه‌ای در رنگ‌های اولیه وجود دارند (شکل ۶-۱۳ را ببینید). با ضرب H در ۳۶۰ درجه شروع می‌کنیم، که پرده رنگ را در بازه‌ی  $[0^\circ, 360^\circ]$  برمی‌گرداند.

**قطاع RG** ( $0^\circ \leq H < 120^\circ$ ): وقتی H در این قطاع قرار دارد، مولفه‌های RGB با معادلات زیر مشخص می‌شوند:

$$B = I(1 - S) \quad (۶-۲-۵)$$

$$R = I \left[ 1 + \frac{S \cos H}{\cos(60^\circ - H)} \right] \quad (۶-۲-۶)$$

و

$$G = 3I - (R + B) \quad (۶-۲-۷)$$

**قطاع GB** ( $120^\circ \leq H < 240^\circ$ ): اگر مقدار H در این قطاع باشد، ابتدا ۱۲۰ درجه را از آن کم می‌کنیم:

$$H = H - 120^\circ \quad (۶-۲-۸)$$

۱. خوب است در این معادله، برای جلوگیری از تقسیم بر صفر در موقعی که  $R = G = B$  است، که در این صورت  $\theta$  برابر با ۹۰ درجه خواهد شد، عدد کوچکی به مخرج کسر اضافه شود. توجه کنید که وقتی تمام مولفه‌های RGB برابراند، در معادله (۶-۲-۳) خواهیم داشت  $S = 0$ . علاوه‌براین، تبدیل از HSI به RGB در معادلات (۶-۲-۵) تا (۶-۲-۷) نتیجه می‌دهد که  $R = G = B = I$  است، زیرا وقتی  $R = G = B$ ، با تصویر سطح خاکستری سروکار خواهیم داشت.

سپس مولفه‌های RGB عبارتند از:

$$R = I(1 - S) \quad (۶-۲-۹)$$

$$G = I \left[ 1 + \frac{S \cos H}{\cos(60^\circ - H)} \right] \quad (۶-۲-۱۰)$$

و

$$B = 3I - (R + G) \quad (۶-۲-۱۱)$$

قطاع BR ( $240^\circ \leq H \leq 360^\circ$ ): اگر مقدار H در این بازه باشد،  $۲۴۰$  درجه را از آن کم می‌کنیم:

$$H = H - 240^\circ \quad (۶-۲-۱۲)$$

سپس مولفه‌های RGB عبارتند از:

$$G = I(1 - S) \quad (۶-۲-۱۳)$$

$$B = I \left[ 1 + \frac{S \cos H}{\cos(60^\circ - H)} \right] \quad (۶-۲-۱۴)$$

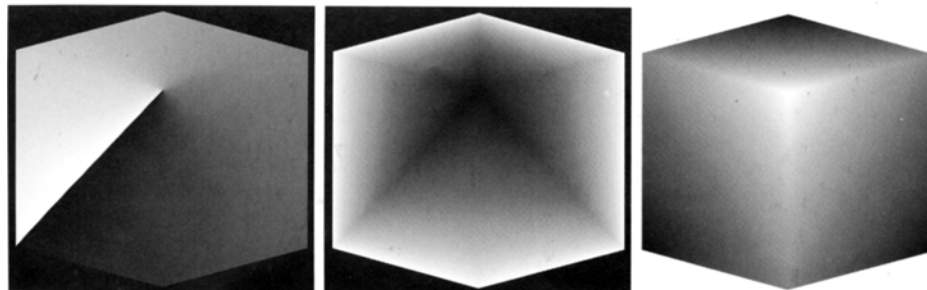
و

$$R = 3I - (G + B) \quad (۶-۲-۱۵)$$

کاربرد این معادلات در پردازش تصویر، در ادامه بحث خواهد شد.

**مثال ۶-۲: مقادیر HSI متناظر با تصویر مکعب رنگی RGB.**

شکل ۶-۱۵ تصاویر پرده رنگ، اشباع، و شدت را برای مقادیر RGB نشان داده شده در شکل ۶-۸ نشان می‌دهد. شکل ۶-۱۵ (الف)، پرده رنگ تصویر است. متمایزترین ویژگی آن، عدم پیوستگی مقادیر در امتداد خط  $45^\circ$  در صفحه جلویی (قرمز) مکعب است. برای درک علت این عدم پیوستگی، به شکل ۶-۸ مراجعه کنید، خطی از رئوس قرمز به سفید مکعب رسم کنید، و نقطه‌ای را در وسط این خط انتخاب نمایید. با شروع از آن نقطه، مسیری به راست و حول مکعب رسم کنید تا به نقطه شروع برسید. رنگ‌های اصلی که در این مسیر یافت می‌شوند، عبارتند از زرد، سبز، فیروزه‌ای، آبی، بنفش و سیاه تا قرمز. بر اساس شکل ۶-۱۳، مقادیر پرده رنگ در این امتداد، باید از صفر درجه تا  $۳۶۰$  درجه افزایش یابد (از کمترین تا بیشترین مقدار ممکن برای پرده رنگ). این، دقیقاً همان چیزی است که شکل ۶-۱۵ (الف) نشان می‌دهد، زیرا در سطح خاکستری، کمترین مقدار به صورت



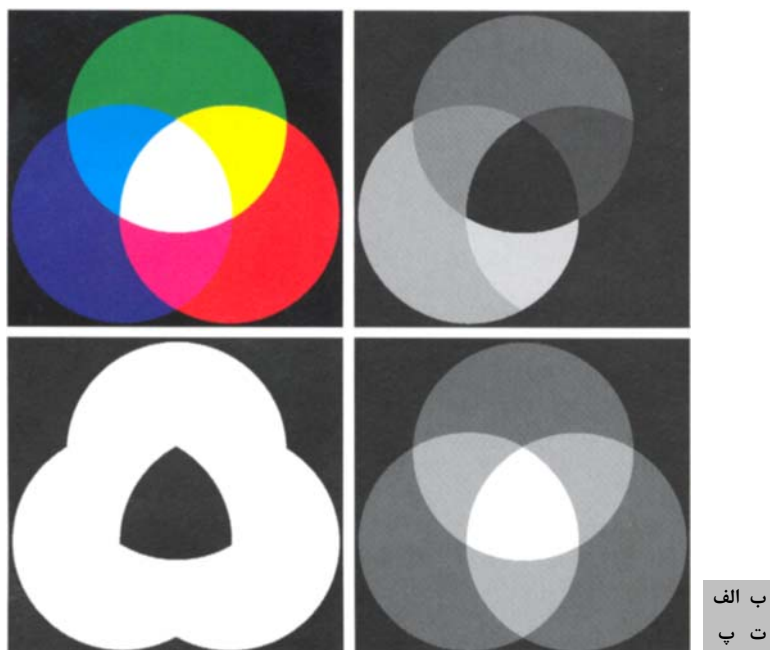
شکل ۶-۱۵ پ ب الف مولفه‌های HSI تصویر شکل ۶-۸. (الف) پرده رنگ، (ب) اشباع و (پ) شدت تصاویر.

سیاه و بیشترین مقدار به صورت سفید ظاهر می‌شود. در حقیقت، تصویر پرده رنگ ابتدا به بازه  $[0, 1]$  نرمال شد و سپس به ۸ بیت تغییر مقیاس داده شد؛ یعنی برای نمایش، به بازه  $[0, 255]$  تبدیل شد.

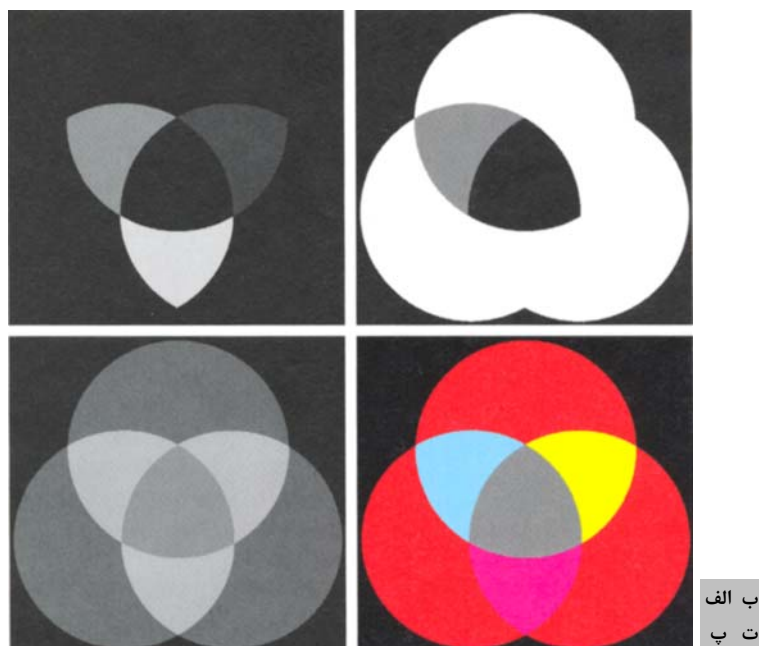
تصویر اشباع در شکل ۶-۱۵ (ب) مقادیر تیره‌ترشونده را به سمت رأس سفید مکعب RGB نشان می‌دهد، و مشخص می‌کند که رنگ‌ها هر چه به سفید نزدیک‌تر می‌شوند درجه اشباع آن‌ها کمتر می‌گردد. سرانجام، هر پیکسل در تصویر شدت در شکل ۶-۱۵ (پ)، برابر با میانگین مقادیر RGB در پیکسل متناظر در شکل ۶-۸ است. ■

### دستکاری تصاویر مولفه HSI

در بحث زیر، بعضی از تکنیک‌های ساده را برای دستکاری تصاویر مولفه HSI بررسی می‌کنیم. به این ترتیب، می‌توانید با این مولفه آشنایی پیدا کنید و درک عمیقی نسبت به مدل رنگ HSI به دست آورید. شکل ۶-۱۶ (الف) تصویری مرکب از رنگ‌های RGB اولیه و ثانویه را نشان می‌دهد، که از معادلات (۶-۲) تا (۶-۴) تولید شده است. به یاد بیاورید که مقادیر سطح خاکستری در شکل ۶-۱۶ (ب) متناظر با زاویه‌ها است؛ بنابراین، به عنوان مثال، چون قرمز متناظر با صفر درجه است، ناحیه قرمز در شکل ۶-۱۶ (الف) به ناحیه سیاه در تصویر پرده رنگ نگاشت می‌شود. به طور مشابه، سطوح خاکستری در شکل ۶-۱۶ (پ)، متناظر با اشباع است (برای نمایش، به بازه  $[0, 255]$  مقیاس‌بندی شدند)، و سطوح خاکستری در شکل ۶-۱۶ (ت) میانگین شدت‌ها است.



شکل ۶-۱۶ (الف) تصویر RGB و مولفه‌های تصویر HSI متناظر آن: (ب) پرده رنگ، (پ) اشباع و (ت) شدت.



شکل ۶-۱۷ (الف) تا (پ) تصاویر اصلاح‌شده‌ی مولفه HSI. (ت) تصویر RGB حاصل (برای دیدن تصاویر اصلی، شکل ۶-۱۶ را ببینید).

برای تغییر هر یک از رنگ‌های ناحیه در تصویر RGB، مقادیر ناحیه متناظر را در تصویر پرده رنگ در شکل ۶-۱۶ (ب) تغییر می‌دهیم. سپس تصویر H جدید را، به همراه تصاویر بدون تغییر S و I، با استفاده از رویه شرح داده شده در ارتباط با معادلات (۶-۲-۵) تا (۶-۲-۱۵)، به RGB تبدیل می‌کنیم. برای تغییر اشباع (خلوص) رنگ در هر ناحیه، از همان رویه پیروی می‌کنیم، با این تفاوت که تصویر اشباع را در فضای HSI تغییر می‌دهیم. همین توضیحات به تغییر در میانگین هر منطق صادق است. البته، این تغییرات می‌توانند همزمان انجام شوند. به عنوان مثال، تصویر در شکل ۶-۱۷ (الف)، با تغییر پیکسل‌های متناظر با مناطق آبی و سبز در شکل ۶-۱۶ (ب)، به صفر، به دست می‌آید. در شکل ۶-۱۷ (ب) اشباع ناحیه فیروزه‌ای در تصویر مولفه S از شکل ۶-۱۶ (پ) را به نصف تقلیل دادیم. در شکل ۶-۱۷ (پ)، شدت ناحیه سفید مرکزی در تصویر شدت شکل ۶-۱۶ (ت) را به نصف تقلیل دادیم. نتیجه تبدیل این تصویر HSI به RGB در شکل ۶-۱۷ (ت) نشان داده شده است. آن‌طور که انتظار می‌رود، در این شکل می‌بینیم که اکنون قسمت‌های بیرونی دایره‌ها قرمزاند؛ خلوص ناحیه فیروزه‌ای مشخص است، و ناحیه مرکزی به جای سفید، خاکستری شد. گرچه این نتایج ساده‌اند، قدرت مدل رنگ HSI را در کنترل مستقل روی کمیت‌های پرده رنگ، اشباع، و شدت تشریح می‌کند، به طوری که هنگام توصیف رنگ‌ها با آن‌ها آشنا هستیم.

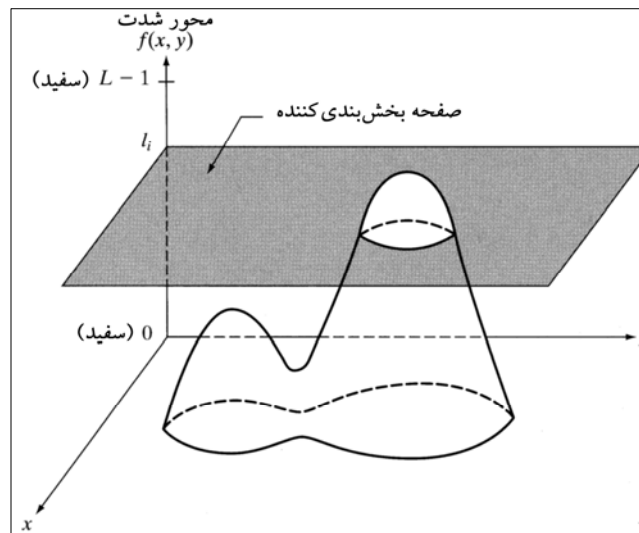
### ۶-۳ پردازش تصویر شبه‌رنگی

پردازش تصویر شبه‌رنگی<sup>۱</sup> (که رنگ نادرست نیز نامیده می‌شود)، شامل اختصاص رنگ به مقادیر خاکستری بر اساس معیارهای خاص است. واژه شبه‌رنگ یا رنگ نادرست، برای تمایز فرآیند تخصیص رنگ‌ها به تصاویر تک‌رنگ، از فرآیند مربوط به تصاویر تمام‌رنگی به کار می‌رود، که این موضوع در بخش ۴-۶ بحث می‌شود. کاربرد اصلی شبه‌رنگ، در تجسم انسان و تفسیر رویدادهای سطح خاکستری در یک تصویر یا دنباله‌ای از تصاویر است. همان‌طور که در ابتدای این بخش گفته شد، یکی از مهمترین انگیزه‌های استفاده از رنگ، این حقیقت است که انسان‌ها در مقایسه با ۲۴ سایه خاکستری، می‌توانند هزاران سایه و شدت رنگی را تشخیص دهند.

#### ۶-۳-۱ بخش‌بندی شدت

تکنیک بخش‌بندی شدت<sup>۲</sup> (که گاهی چگالی نیز نامیده می‌شود) و سایر رمزگذاری‌های رنگ، یکی از ساده‌ترین مثال‌های پردازش تصویر شبه‌رنگ است. اگر تصویری به صورت تابع سه‌بعدی تفسیر شود (شکل ۱۸-۲) (الف) را ببینید)، این روش را می‌توان به عنوان موازی‌کننده‌ی صفحات با صفحه مختصات تصویر نامید. سپس هر صفحه، تابع را به بخش‌هایی از ناحیه متقاطع تبدیل می‌کند. شکل ۱۸-۶ مثالی از به‌کارگیری صفحه‌ای در  $f(x,y)=I_i$  را برای بخش‌بندی تابع به دو سطح نشان می‌دهد.

اگر رنگ متفاوتی به هر سمت صفحه‌ی شکل ۱۸-۶ نسبت داده شود، هر پیکسلی که سطح شدت آن در بالای صفحه است، با یک رنگ رمزگذاری می‌شود، و هر پیکسل زیر صفحه با رنگ دیگری رمزگذاری می‌شود.



شکل ۱۸-۶ تفسیر هندسی تکنیک بخش‌بندی شدت.

1. pseudocolor

2. intensity slicing

## ۴۰۷ پردازش تصویر رنگی

به سطوحی که روی خود صفحه قرار می‌گیرند، ممکن است به اختیار، یکی از دو رنگ نسبت داده شود. نتیجه، تصویری دورنگی است که نمای نسبی آن می‌تواند با انتقال صفحه بخش‌بندی به بالا و پایین محور شدت، کنترل شود.

به طور کلی، این تکنیک می‌تواند به این صورت خلاصه شود: فرض کنید  $[0, L-1]$  نشان‌دهنده سطح خاکستری، و سطح  $I_0$  نشان‌دهنده سیاه  $[f(x, y)=0]$ ، و سطح  $I_{L-1}$  نشان‌دهنده سفید  $[f(x, y)=L-1]$  باشد. فرض کنید  $P$  صفحه‌ی عمود بر محور شدت در سطوح  $I_1, I_2, \dots, I_P$  تعریف شدند. آنگاه با فرض این‌که  $0 < P < L-1$ ، صفحه، سطح خاکستری را به  $P+1$  فاصله  $V_1, V_2, \dots, V_{P+1}$  تقسیم می‌کند. شدت در انتساب رنگ، بر اساس رابطه زیر مشخص می‌گردد:

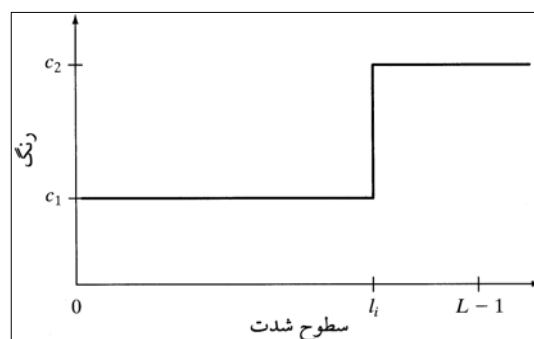
$$f(x, y) = c_k \quad \text{اگر } f(x, y) \in V_k \quad (۶-۳-۱)$$

که  $c_k$  رنگ مربوط به  $k$  امین فاصله شدت  $V_k$  است که توسط صفحه‌ی تقسیم‌کننده در  $l=k-1$  و  $l=k$  تعریف شده است.

ایده‌ی صفحات، مخصوصاً برای تفسیر هندسی تکنیک بخش‌بندی شدت مفید است. شکل ۶-۱۹ نمایش دیگری را نشان می‌دهد که نگاشتی مشابه با شکل ۶-۱۸ را تعریف می‌کند. بر اساس تابع نگاشت شکل ۶-۱۹، هر سطح شدت ورودی، به یک یا دو رنگ نسبت داده می‌شود که بستگی به این دارد که در بالا یا پایین مقدار  $I_i$  واقع است. وقتی از سطوح بیشتری استفاده شود، تابع نگاشت به شکل پلکان در می‌آید.

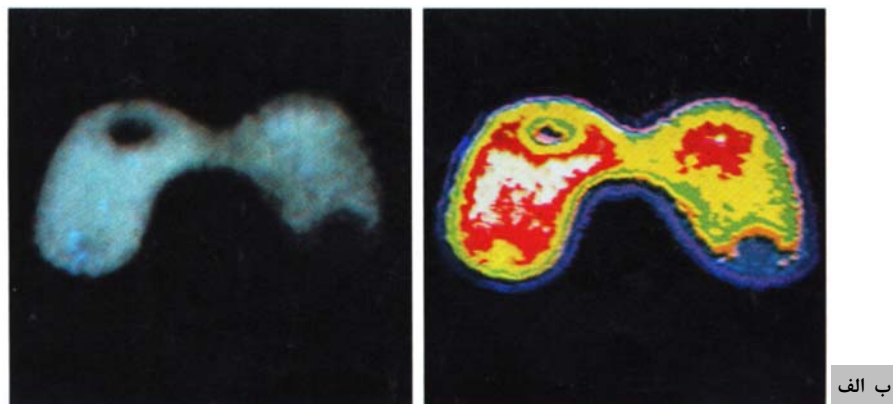
### مثال ۶-۳: بخش‌بندی شدت.

یک کاربرد ساده ولی عملی بخش‌بندی شدت، در شکل ۶-۲۰ نشان داده شده است. شکل ۶-۲۰ (الف) یک تصویر تک‌رنگ از فانتوم تیروئید (الگوی تست تشعشع)، و شکل ۶-۲۰ (ب) نتیجه‌ی بخش‌بندی شدت این تصویر به هشت ناحیه رنگی را نشان می‌دهد. ناحیه‌هایی که در تصویر تک‌رنگ شدت ثابتی دارند، کاملاً متغیراند، که با رنگ‌های مختلف در تصویر بخش‌بندی‌شده نشان داده شده‌اند. به عنوان مثال، قطعه سمت چپ، خاکستری کم‌رنگ در تصویر تک‌رنگ است، و تشخیص تنوع در شدت، دشوار می‌باشد. برعکس، تصویر رنگی، هشت ناحیه مختلف از شدت ثابت، یکی برای هر رنگ استفاده‌شده، را نشان می‌دهد. ■

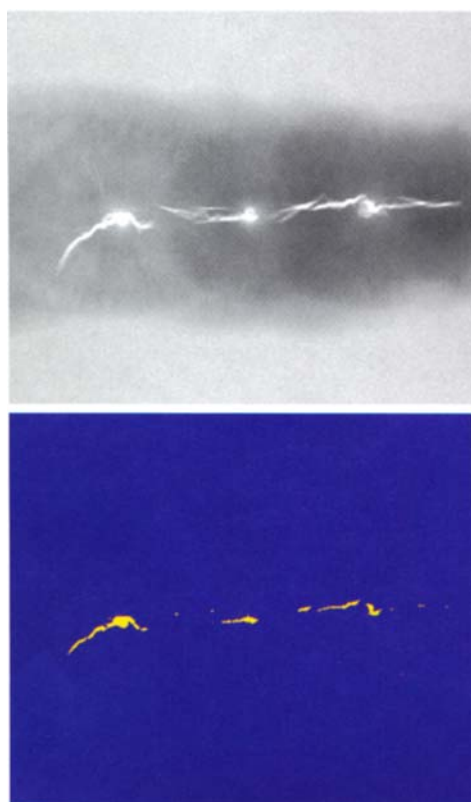


شکل ۶-۱۹ نمایش دیگری از تکنیک بخش‌بندی شدت.

در مثال ساده قبلی، سطح خاکستری به فواصلی تقسیم شد و رنگ متفاوتی به هر ناحیه نسبت داده شد، بدون این‌که به معنای سطوح خاکستری در تصویر، توجه شود. در این مورد، هدف، مشاهده سطوح خاکستری مختلف سازنده تصویر است. در بخش‌بندی شدت فرض می‌شود که نقش معنادار و مفید در هنگام تقسیم‌بندی سطح خاکستری، مبتنی بر ویژگی‌های فیزیکی تصویر است. به عنوان مثال،



شکل ۶-۲۰ (الف) تصویر تکرنگ فانتوم تیروئید. (ب) نتیجه بخش‌بندی شدت به هشت رنگ.



شکل ۶-۲۱ از بالا (الف) تصویر اشعه ایکس تکرنگ از جوشکاری. (ب) نتیجه رمزگذاری رنگی.

شکل ۶-۲۱ (الف) یک تصویر اشعه ایکس از جوشکاری را نشان می‌دهد (ناحیه تاریک افقی) که شامل چندین شکاف و روزنه است (سکه‌های سفید روشن که به طور افقی در وسط تصویر قرار دارد). معلوم است که وقتی شکاف یا روزنه‌ای در جوشکاری باشد، کل قدرت اشعه‌های ایکس که از شیء عبور می‌کند، حسگر تصویربرداری در طرف دیگر شیء را اشباع می‌کند. بنابراین، مقادیر شدت ۲۵۵ در تصویر ۸ بیتی که به طور خودکار از چنین سیستمی می‌آید، مشکلی را برای جوشکاری ایجاد می‌کند. اگر انسان می‌توانست قضاوت نهایی را درباره تحلیل ارائه دهد و فرآیندهای دستی برای بازرسی جوشکاری اعمال می‌شوند (که هنوز هم رویه متداولی است)، یک رمزگذاری ساده‌ی رنگ که یک رنگ را به ۲۵۵ و دیگری را به سایر سطوح شدت نسبت می‌دهد، کار بازرسی را به طور چشمگیری ساده می‌کند. شکل ۶-۲۱ (ب) نتیجه را نشان می‌دهد. بدیهی است که اگر تصاویر، به جای شکل ۶-۲۱ (الف)، همانند شکل ۶-۲۱ (ب) نمایش داده شوند، نرخ خطای انسانی کمتر خواهد بود. به عبارت دیگر، اگر مقدار دقیق شدت یا بازه‌ی مقادیری که به دنبال آن هستیم، معلوم باشد، بخش‌بندی شدت،

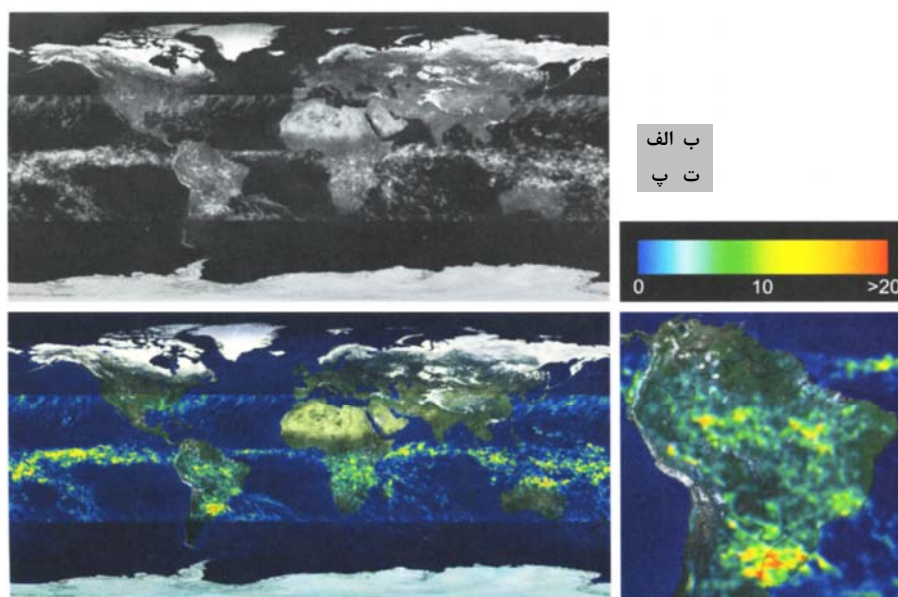
## ۴۰۹ پردازش تصویر رنگی

کمک ساده ولی قدرتمندی در تجسم است، مخصوصاً اگر تعداد تصاویر زیاد باشد. مثال پیچیده‌تری در زیر آمده است.

### مثال ۴-۶: استفاده از رنگ برای برجسته کردن سطوح باران.

اندازه‌گیری سطوح باران، مخصوصاً در مناطق استوایی زمین، در کاربردهای متنوعی که با محیط کار دارند، جالب است. اندازه‌گیری‌های دقیق با استفاده از حسگرهای زمینی، گران است و به دست آوردن آن دشوار می‌باشد، و به دست آوردن میزان بارش دشوارتر است، زیرا بخش عمده‌ای از ریزش باران روی اقیانوس اتفاق می‌افتد. یک روش برای به دست آوردن مقدار باران، استفاده از ماهواره است. ماهواره TRMM از سه حسگر استفاده می‌کند که خاص تشخیص باران است: رادار باران، تصویرساز ریزموج، و اسکنر مادون قرمز و قابل رویت (به بخش‌های ۳-۱ و ۳-۲ در ارتباط با روش‌های حس کردن تصویر مراجعه کنید).

نتایج حاصل از حسگرهای مختلف باران پردازش می‌شوند، تا میانگین بارش باران در دوره زمانی خاص در ناحیه تحت نظارت حسگرها به دست آید. با توجه به این تخمین‌ها، تولید تصاویر سطح خاکستری که مقادیر شدت آن مستقیماً متناسب با باران باشد، دشوار نیست، به طوری که هر پیکسل نشان‌دهنده‌ی ناحیه‌ای از زمین است که اندازه آن به دقت حسگرها بستگی دارد. چنین شدتی در شکل ۲۲-۶ (الف) نشان داده شده است، که ناحیه تحت نظارت ماهواره، نوار افقی روشن‌تری در یک سوم میانی تصویر است (این‌ها مناطق استوایی هستند). در این مثال خاص، مقادیر بارش باران، مقادیر میانگین ماهیانه (برحسب اینچ) در دوره سه‌ساله است.



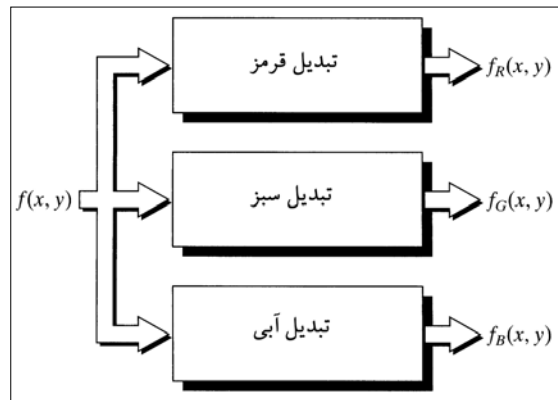
شکل ۲۲-۶ (الف) تصویر سطح خاکستری که در آن، شدت (در نوار افقی روشن‌تر) متناسب با میانگین ماهیانه بارش باران است. (ب) رنگ‌ها به مقادیر شدت نسبت داده شدند. (پ) تصویری با رنگ رمزگذاری شده. (ت) زوم ناحیه آمریکای جنوبی.

بررسی دیداری این تصویر برای الگوهای بارش باران، اگر غیرممکن نباشد، بسیار دشوار است. اما، فرض کنید با استفاده از رنگ‌های نشان داده شده در شکل ۶-۲۲ (ب)، سطوح شدت را از صفر تا ۲۵۵ رمزگذاری کنیم. مقادیر متمایل به آبی، مقادیر کم بارش را مشخص می‌کنند، که قرمز عکس آن است. توجه کنید که این مقیاس برای مقادیر بارش بزرگ‌تر از ۲۰ اینچ، از قرمز استفاده می‌کند. شکل ۶-۲۲ (پ) نتیجه‌ی رمزگذاری رنگ تصویر خاکستری را با نگاشت رنگی که بحث شد، نشان می‌دهد. همان‌طور که در این شکل و شکل زوم‌شده‌ی ۶-۲۲ (ت) می‌بینید، تفسیر این نتایج بسیار آسان‌تر است. این نوع داده‌ها، علاوه‌بر حالت کلی، به هواشناسان اجازه می‌دهد سیستم‌های زمینی ناظر باران را با دقت بیشتری تنظیم کنند. ■

### ۶-۳-۲ شدت تبدیلات رنگ

انواع دیگری از تبدیلات وجود دارند که کلی‌تر هستند و در نتیجه، نسبت به تکنیک‌های بخش‌بندی ساده‌ی بحث‌شده در بخش قبل، نتایج ارتقای شبه‌کد بهتری دارند. یک روش جذاب در شکل ۶-۲۳ آمده است. اساساً، ایده‌ی این روش، اجرای سه تبدیل مستقل روی شدت پیکسل ورودی است، سپس سه نتیجه به طور جداگانه به کانال‌های قرمز، سبز و آبی مانیتور تلویزیون رنگی ارسال می‌شوند. این روش، تصویر مرکبی را تولید می‌کند که محتوای رنگی آن توسط ماهیت توابع تبدیل مدوله می‌شود. توجه کنید که این‌ها تبدیلاتی روی مقادیر شدت تصویر هستند که توابعی از مکان‌ها نیستند.

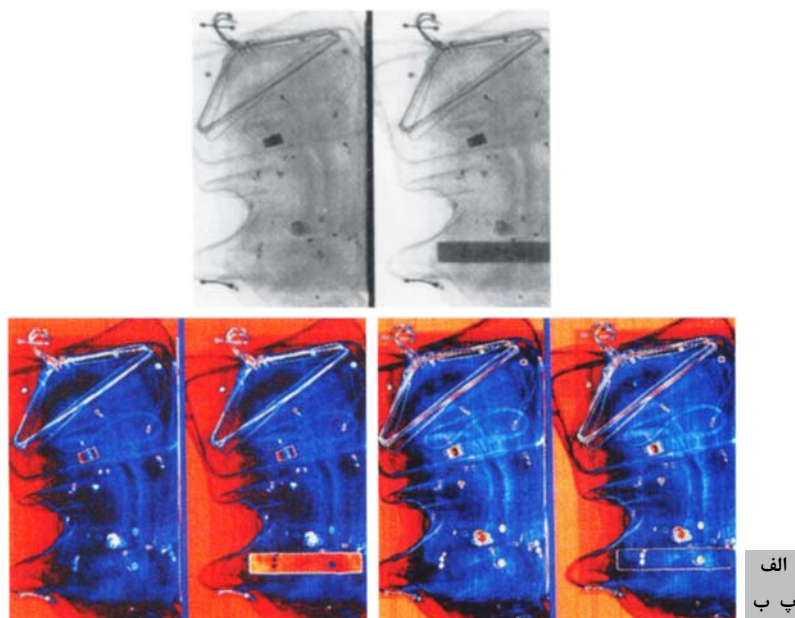
روش بحث‌شده در بخش قبلی، حالت خاصی از این تکنیک مطرح‌شده است. در آن‌جا، توابع خطی قطعه به قطعه<sup>۱</sup> سطوح شدت (شکل ۶-۱۹)، برای تولید رنگ به کار می‌روند. از طرف دیگر، روش بحث‌شده در این بخش، می‌تواند بر اساس توابع غیرخطی هموار باشد، که همان‌طور که انتظار می‌رود، این تکنیک را به‌طور چشمگیری قابل انعطاف می‌سازد.



شکل ۶-۲۳ نمودار بلوکی تابعی پردازش تصویر.  $f_R$ ،  $f_G$  و  $f_B$  به ورودی‌های قرمز، سبز و آبی مانیتور رنگی RGB وارد می‌شوند.

**مثال ۵-۶:** استفاده از شبه‌رنگ برای برجسته‌کردن مواد منفجره موجود در چمدان. شکل ۶-۲۴ (الف) دو تصویر تک‌رنگ از چمدان را نشان می‌دهد که توسط سیستم اسکن اشعه ایکس به دست آمد. تصویر سمت چپ شامل وسایل عادی است. تصویر سمت راست شامل همان وسایل، و مواد منفجره پلاستیکی شبیه‌سازی‌شده است. هدف این مثال، تشریح استفاده از سطح شدت برای تبدیلات رنگی جهت به دست آوردن درجه‌های مختلفی از ارتقا است.

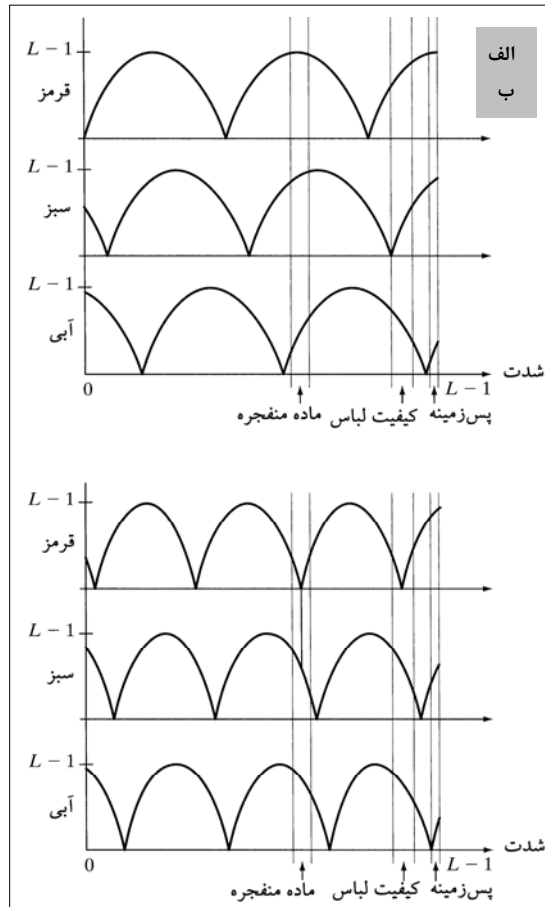
1. piecewise linear function



شکل ۶-۲۴ ارتقای شبه‌رنگی با استفاده از سطح خاکستری در تبدیلات شکل ۶-۲۵

شکل ۶-۲۵ توابع تبدیل مورد استفاده را نشان می‌دهد. این توابع سینوسی، شامل ناحیه‌هایی با مقدار ثابت نسبی حول قله‌ها، و ناحیه‌هایی است که در نزدیکی دره‌ها به سرعت تغییر می‌کند. تغییر فاز و فرکانس هر منحنی سینوسی، می‌تواند بازه‌های (رنگی) را در مقیاس خاکستری تأکید نماید. به عنوان مثال، اگر هر سه تبدیل دارای فاز و فرکانس یکسانی باشند، تصویر خروجی، تک‌رنگ خواهد بود. تغییر کوچکی در فاز بین سه تبدیل، منجر به تغییر اندکی در پیکسلی می‌شود که شدت‌های آن متناظر با قله‌ها در منحنی سینوسی است، مخصوصاً اگر منحنی‌های سینوسی پروفایل‌های وسیعی (فرکانس پایین) داشته باشند. به پیکسل‌هایی با مقادیر شدت در سراسری منحنی‌های سینوسی، محتویات رنگی قوی‌تری نسبت داده می‌شود، و این کار به دلیل تفاوت‌های چشمگیر بین دامنه‌های سه منحنی سینوسی انجام می‌شود که این تفاوت‌ها ناشی از جابه‌جایی فاز بین آن‌ها است.

تصویر نشان‌داده‌شده در شکل ۶-۲۴ (ب) با استفاده از توابع تبدیل شکل ۶-۲۵ (الف) به دست آمد، که به ترتیب باندهای سطح خاکستری متناظر با مواد منفجره، کیف لباس، و پس‌زمینه را نشان می‌دهد. توجه کنید که ماده منفجره و پس‌زمینه، سطوح شدت متفاوتی دارند، اما با توجه به متناوب‌بودن امواج سینوسی، با رنگ یکسانی رمزگذاری شدند. تصویر شکل ۶-۲۴ (پ) با استفاده از توابع تبدیل شکل ۶-۲۵ (ب) به دست آمد. در این مورد، باندهای شدت ماده منفجره و کیف لباس، با تبدیلات مشابهی نگاشت شدند و در نتیجه، رنگ‌های یکسانی به آن‌ها اختصاص یافت. توجه کنید که این نگاشت به بیننده اجازه می‌دهد که مواد منفجره را ببیند. نگاشت‌های پس‌زمینه همانند شکل ۶-۲۴ (ب) هستند، که رنگ تقریباً یکسانی را تخصیص می‌دهد. ■



روش نشان داده شده در شکل ۶-۲۳ بر اساس یک تصویر تک‌رنگ می‌باشد. اغلب، علاقه‌مند هستیم چندین تصویر تک‌رنگ را در یک تصویر رنگی ترکیب کنیم که در شکل ۶-۲۶ آمده است. یک استفاده مکرر از این روش (که در مثال ۶-۶ شرح داده شد)، در پردازش تصویر چندطیفی است، که در آن حسگرهای مختلف، تصاویر تک‌رنگی را تولید می‌کنند و هر تصویر در باند طیف گوناگونی وجود دارد. انواع فرآیندهای اضافی که در شکل ۶-۲۶ نشان داده شدند، می‌توانند تکنیک‌هایی مثل توازن رنگ (بخش ۴-۵-۶)، ترکیب تصاویر، و انتخاب سه تصویر برای نمایش، بر اساس دانش مربوط به ویژگی‌های پاسخ حسگرهای استفاده شده برای تولید تصاویر باشند.

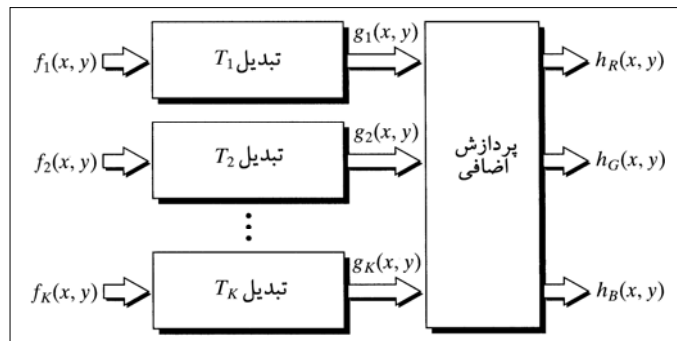
#### مثال ۶-۶: رمزگذاری رنگی تصاویر چندطیفی.

شکل‌های ۶-۲۷ (الف) تا (ت)، چهار تصویر ماهواره‌ای از واشینگتون دی‌سی را نشان می‌دهد که بخشی از رودخانه پوتوماک است. سه تصویر اول به رنگ‌های قابل

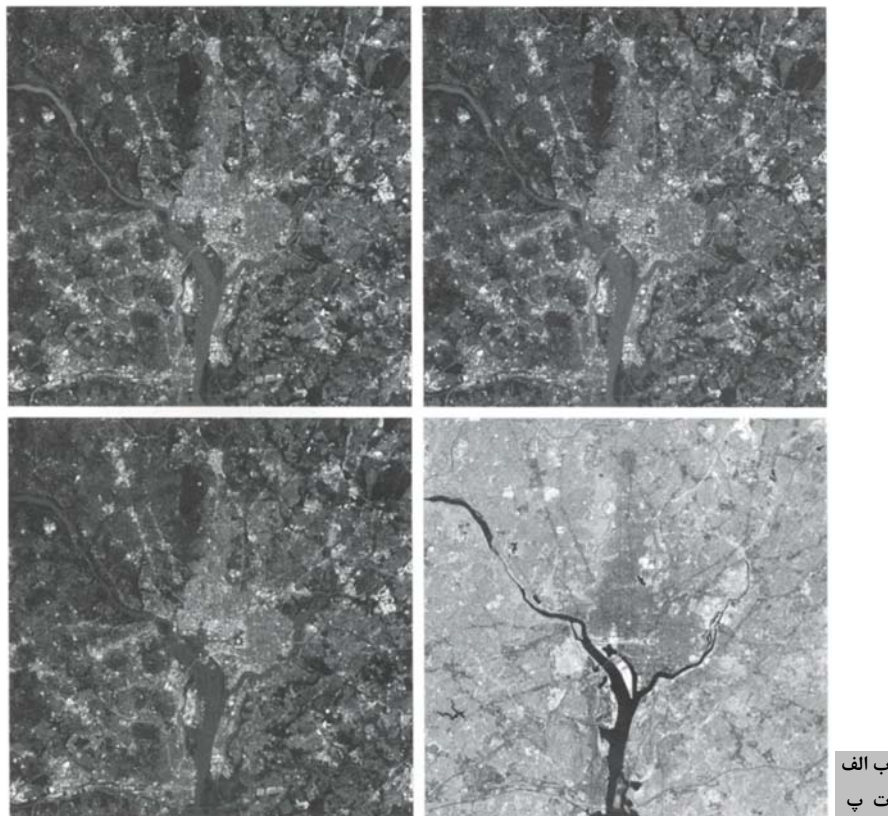
رویت قرمز، سبز، و آبی و تصویر چهارم نزدیک به مادون قرمز می‌باشد (جدول ۱-۱ در شکل ۶-۲۴). توابع تبدیل مورد استفاده برای به دست آوردن تصاویر

و شکل ۱-۱۰ را ببینید). شکل ۶-۲۷ (ث)، تصویر تمام‌رنگی است که با ترکیب سه تصویر اول در یک تصویر RGB به دست آمد. تفسیر تصاویر تمام‌رنگی ناحیه‌های فشرده دشوار است، اما یک ویژگی قابل توجه این تصویر، تفاوت رنگ در بخش‌های مختلف رودخانه پوتوماک است. شکل ۶-۲۷ (ج) جالب‌تر است. این تصویر با جایگزینی مولفه قرمز شکل ۶-۲۷ (ث) با تصویر نزدیک به مادون قرمز به دست آمد. با توجه به جدول ۱-۱ می‌دانیم که این باند، نشانه‌ای از مولفه‌های زیست‌توده<sup>۱</sup> در صحنه است. شکل ۶-۲۷ (چ) تفاوت بین زیست‌توده (به رنگ قرمز) و ویژگی‌های ساخت انسان را در صحنه نشان می‌دهد که به رنگ آبی دیده می‌شوند.

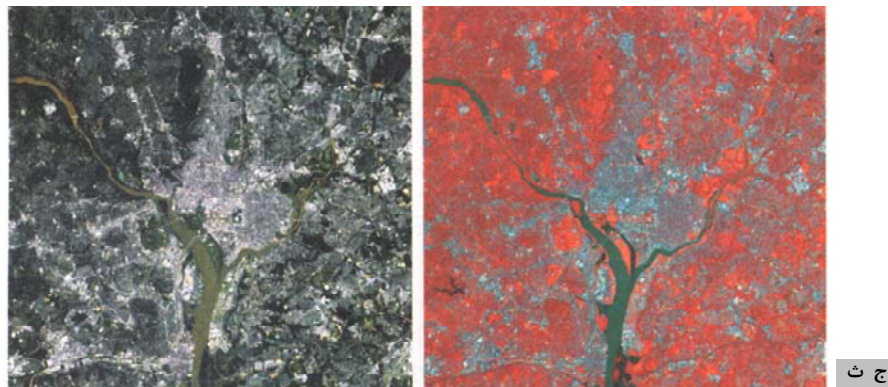
### پردازش تصویر رنگی ۴۱۳



شکل ۲۶-۶ روش رمزگذاری شبه‌رنگ که وقتی به کار می‌رود که چندین تصویر تک‌رنگ وجود داشته باشند.



شکل ۲۷-۶ (الف) تا (ت) تصاویر در باندهای ۱ تا ۴ در شکل ۱۰-۱ (جدول ۱-۱ را ببینید).  
(ادامه دارد...)



شکل ۶-۲۷ (ادامه) (ث) تصویر مرکب رنگی که با درنظرگرفتن (الف)، (ب) و (پ) به عنوان مولفه‌های قرمز، سبز، و آبی تصویر RGB به دست آمد. (ج) تصویری که به همان روش به دست آمد، اما در کانال قرمز از تصویر نزدیک به مادون قرمز شکل (ت) استفاده شد.



شکل ۶-۲۸ (الف) نمایش شبه‌رنگی سیاره مشتری. (ب) نمای نزدیک (بزرگ‌شده).

نوع پردازشی که شرح داده شد، به تجسم رویدادها در تصاویر پیچیده کمک می‌کند، مخصوصاً وقتی که آن رویدادها خارج از قابلیت‌های حس کردن عادی باشند. شکل ۶-۲۸-۶ تشریح جالبی از این وضعیت است. این تصاویر ستاره مشتری، با ترکیب چندین تصویر به دست آمده از حسگر فضایی گالیله، با شبه‌رنگ نمایش داده شده است، که بعضی از آن تصاویر در مناطقی از طیف قرار دارند که با چشم قابل رویت نیستند. اما، با درک فرآیندهای شیمی که ممکن است در پاسخ حسگر موثر باشند، می‌توان این تصاویر حس شده را در یک نقشه شبه‌رنگ معنادار ترکیب کرد. یک روش ترکیب داده‌های تصویر حس شده، بررسی چگونگی نمایش تفاوت‌ها در ترکیبات شیمی سطح، یا تغییرات در چگونگی انعکاس نور خورشید توسط سطح آن است. به عنوان مثال، در تصویر شبه‌رنگی در شکل ۶-۲۸-۶ (ب)، قرمز روشن، موادی را نشان می‌دهد که ناشی از آتشفشان روی

سیاره مشتری است، و موارد زرد دربرگیرنده، سولفورهای قدیمی‌اند. این تصویر، نسبت به تحلیل هر یک از تصاویر مولفه، ویژگی‌های خواناتری را حمل می‌کند. ■

## ۶-۴ مبانی پردازش تصویر تمام‌رنگی

در این بخش، مطالعه تکنیک‌های پردازشی را شروع می‌کنیم که برای تصاویر تمام‌رنگی مناسب‌اند. گرچه این مطالعات جامع نیستند، تکنیک‌های مطرح‌شده در این بخش، به چگونگی اداره‌کردن تصاویر تمام‌رنگی می‌پردازند. روش‌های پردازش تصویر تمام‌رنگی، دو دسته‌اند. در دسته اول، هر تصویر مولفه را به طور جداگانه پردازش می‌کنیم و سپس، از مولفه‌های پردازش‌شده، یک تصویر رنگی پردازش‌شده‌ی مرکب ایجاد می‌کنیم. در دسته دوم، مستقیماً با پیکسل‌های رنگی کار می‌کنیم. چون تصاویر تمام‌رنگی، حداقل سه مولفه دارند، پیکسل‌های رنگی، بردار هستند. به عنوان مثال، در سیستم RGB، هر نقطه رنگی می‌تواند به صورت برداری تفسیر شود که از مبدأ به نقطه‌ای در سیستم مختصات RGB ادامه دارد (شکل ۶-۷ را ببینید).

فرض کنید  $\mathbf{c}$ ، برداری در فضای رنگ RGB باشد:

$$\mathbf{c} = \begin{bmatrix} c_R \\ c_G \\ c_B \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R \\ G \\ B \end{bmatrix} \quad (6-4-1)$$

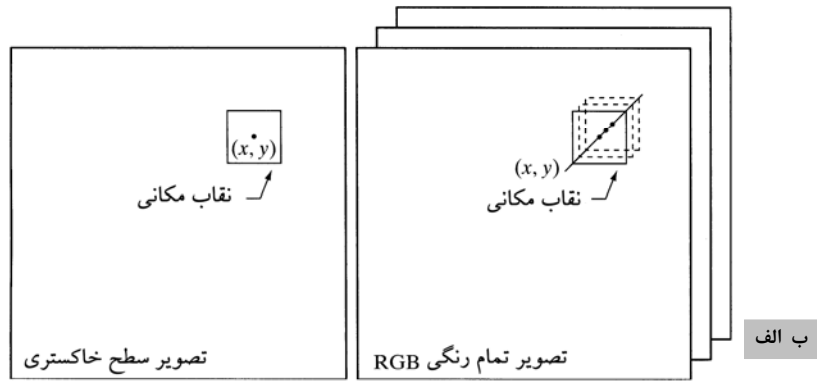
این معادله نشان می‌دهد که مولفه‌های  $\mathbf{c}$ ، مولفه‌های RGB مربوط به یک تصویر رنگی در آن نقطه است. این حقیقت را درنظر می‌گیریم که مولفه‌های رنگی، تابعی از مختصات  $(x, y)$ ، با استفاده از نمادگذاری زیر هستند:

$$\mathbf{c}(x, y) = \begin{bmatrix} c_R(x, y) \\ c_G(x, y) \\ c_B(x, y) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R(x, y) \\ G(x, y) \\ B(x, y) \end{bmatrix} \quad (6-4-2)$$

برای تصویری به اندازه  $M \times N$ ، تعداد  $MN$  بردار از نوع  $\mathbf{c}(x, y)$ ، برای  $x = 0, 1, 2, \dots, M-1$  و  $y = 0, 1, 2, \dots, N-1$  وجود دارد.

توجه به این نکته مهم است که معادله (۶-۴-۲)، برداری را نشان می‌دهد که مولفه‌های آن، متغیرهای مکانی در  $x$  و  $y$  هستند. این‌جا، منشأ بروز مشکلات است که با تأکید بر این حقیقت برطرف می‌شود "که علاقه‌مند به فرآیندهای مکانی هستیم". یعنی، به تکنیک‌های پردازش تصویری علاقه‌مند هستیم که برحسب  $x$  و  $y$  بیان شده باشند. با توجه به این‌که اکنون پیکسل‌ها رنگی‌اند، فاکتوری معرفی می‌شود که در ساده‌ترین فرمول‌بندی آن، به ما اجازه می‌دهد تصویر رنگی را با پردازش جداگانه‌ی هر یک از تصاویر مولفه‌های آن، با استفاده از روش پردازش سطح خاکستری، پردازش کنیم. اما، نتایج پردازش هر یک از مولفه‌های رنگی، همواره معادل پردازش مستقیم در فضای بردار رنگی نیست، که در این مورد باید روش‌های جدیدی را فرمول‌بندی کرد.

برای این‌که پردازش مولفه در هر رنگ و پردازش برداری (مبتنی بر بردار) معادل باشند، دو شرط باید برآورده شوند: اولاً، فرآیند باید به بردارها و اسکالرهای قابل اعمال باشد. ثانیاً، عملیات روی هر مولفه بردار باید مستقل از مولفه‌های دیگر باشد. برای توضیح بیشتر، شکل ۶-۲۹ پردازش همسایگی مکانی تصاویر تمام‌رنگی و سطح خاکستری را نشان می‌دهد. فرض کنید فرآیند موردنظر، میانگین‌گیری از همسایگی است. در شکل ۶-۲۹ (الف)،



شکل ۶-۲۹ نقاب‌های مکانی برای تصاویر رنگی RGB و سطح خاکستری.

میانگین‌گیری با مجموع شدت تمام پیکسل‌ها در همسایگی و تقسیم بر تعداد کل پیکسل‌های موجود در همسایگی انجام می‌شود. در شکل ۶-۲۹ (ب)، میانگین‌گیری با مجموع تمام بردارها در همسایگی و تقسیم هر مولفه بر تعداد بردارها در آن همسایگی انجام می‌گیرد. اما هر مولفه بردار میانگین، برابر با مجموع پیکسل‌ها در تصویر متناظر با آن مولفه است، که مشابه با نتیجه‌ای است که میانگین‌گیری بر اساس مولفه در هر رنگ و سپس تشکیل بردار، به دست خواهد آمد. این موضوع را با جزئیات بیشتری در بخش‌های بعدی بحث کردیم. علاوه‌براین، روش‌هایی را نشان دادیم که در آن‌ها، نتایج دو روش، یکسان نیستند.

## ۶-۵ تبدیلات رنگی

تکنیک‌های شرح‌داده‌شده در این بخش، که روی هم رفته، تبدیلات رنگی نامیده می‌شوند، با پردازش مولفه‌های تصویر رنگی در زمینه تنها یک مدل رنگی سروکار دارند، که برخلاف تبدیل این مولفه‌ها بین مدل‌ها است (مثل تبدیلات RGB به HSI و HSI به RGB در بخش ۳-۲-۶).

### ۶-۵-۱ فرمول‌بندی

همانند تکنیک‌های تبدیل شدت در فصل ۳، تبدیلات رنگ را با استفاده از عبارت زیر مدل‌سازی می‌کنیم:

$$g(x, y) = T[f(x, y)] \quad (6-5-1)$$

که  $f(x, y)$ ، تصویر ورودی رنگی،  $g(x, y)$  تصویر خروجی رنگی پردازش‌شده یا تبدیل‌شده، و  $T$  عملگری روی  $f$  در همسایگی مکانی  $(x, y)$  است. تفاوت عمده بین این معادله و معادله (۳-۱-۲) در تفسیر آن است. در این جا مقادیر پیکسل، سه‌تایی‌ها یا چهارتایی‌هایی (یعنی گروه‌هایی از مقادیر سه‌تایی یا چهارتایی) از فضای رنگ هستند که برای نمایش تصویر انتخاب شدند (شکل ۶-۲۹ (ب)).

مشابه با روشی که برای معرفی تبدیلات شدت در بخش ۳-۲ استفاده کردیم، در این بخش به تبدیلات رنگ به شکل زیر می‌پردازیم:

$$s_i = T_i(r_1, r_2, \dots, r_n), \quad i = 1, 2, \dots, n \quad (6-5-2)$$

که برای سهولت نمادگذاری،  $r_i$  و  $s_i$  متغیرهایی هستند که مولفه‌های رنگ  $f(x, y)$  و  $g(x, y)$  در هر نقطه  $(x, y)$  را نشان می‌دهند،  $n$  تعداد مولفه‌های رنگ، و  $\{T_1, T_2, \dots, T_n\}$  مجموعه‌ای از توابع نگاشت رنگ یا تبدیل است که بر روی  $r_i$  عمل می‌کنند تا  $s_i$  به دست آید. توجه کنید که  $n$  تبدیل  $T_i$  ترکیب می‌شوند تا یک تابع تبدیل  $T$  را در معادله (۶-۵-۱) پیاده‌سازی کنند. فضای رنگ انتخاب‌شده برای توصیف پیکسل‌های  $f$  و  $g$ ، مقدار  $n$  را تعیین می‌کند. اگر فضای رنگ RGB انتخاب شود، به عنوان مثال،  $r_1$  و  $r_2$  و  $r_3$  به ترتیب مولفه‌های قرمز، سبز و آبی را نشان می‌دهند. اگر فضای رنگ CMYK یا HSI انتخاب شوند،  $n=4$  یا  $n=3$  خواهد بود.

تصویر تمام‌رنگی در شکل ۶-۳۰ یک تصویر رنگی با دقت بالا از سبد توت‌فرنگی و یک فنجان قهوه را نشان می‌دهد که از نگاتیو رنگ بزرگ (۴"×۵")، دیجیتالی کردیم. سطر دوم شکل شامل مولفه‌های اسکن CMYK اولیه است. در این تصاویر، در هر یک از مولفه‌های CMYK، سیاه نشان‌دهنده صفر و سفید نشان‌دهنده یک است. بنابراین، می‌بینیم که توت‌فرنگی‌ها شامل مقادیر زیادی بنفش و زرد است، زیرا تصاویر متناظر با این دو مولفه CMYK، روشن‌تر است. سیاه به مقدار کم مورد استفاده قرار می‌گیرد و به طور کلی به قهوه و سایه‌ها در سبد توت‌فرنگی‌ها محدود است. وقتی تصویر CMYK به RGB تبدیل شد، آن‌طور که در سطر سوم شکل آمده است، به نظر می‌رسد که توت‌فرنگی‌ها شامل مقدار زیادی قرمز و مقدار خیلی کمی سبز و آبی است. آخرین سطر شکل ۶-۳۰ مولفه‌های HSI تصویر تمام‌رنگی را نشان می‌دهد که با استفاده از معادلات (۶-۲-۲) تا (۶-۲-۴) محاسبه شده است. همان‌طور که انتظار می‌رود، مولفه شدت، اجرای تک‌رنگ تصویر تمام‌رنگی اصلی است. علاوه‌براین، توت‌فرنگی‌ها از نظر رنگ نسبتاً خالص‌اند؛ آن‌ها بالاترین سطح اشباع یا کمترین میزان رقیق‌بودن را به وسیله نور سفید هر یک از پرده‌های رنگ در تصویر به دست می‌آورند. سرانجام، به مشکلاتی درباره تفسیر مولفه پرده رنگ توجه می‌کنیم. با توجه به این حقایق، مشکل پیچیده‌تر می‌شود: (۱) یک عدم پیوستگی در مدل HSI وجود دارد که در آن،  $0^\circ$  و  $360^\circ$  به هم می‌رسند (شکل ۶-۱۵ را ببینید)، و (۲) پرده رنگ برای اشباع صفر (یعنی برای سفید، سیاه، و خاکستری‌های خالص) تعریف شده نیست. عدم پیوستگی مدل در اطراف توت‌فرنگی مشهودتر است، که با مقادیر سطح خاکستری نزدیک به سیاه (صفر) و سفید (۱) نشان داده شده‌اند. نتیجه، ترکیب غیرمنتظره‌ای از سطوح خاکستری با انقیاد بالا برای نمایش یک رنگ - یعنی قرمز است.

هر یک از مولفه‌های فضای رنگ در شکل ۶-۳۰ می‌تواند در ارتباط با معادله (۶-۵-۲) به کار رود. در تئوری، هر تبدیل می‌تواند در هر مدل رنگی انجام شود. اما، در عمل، بعضی از عملیات‌ها برای مدل خاصی مناسب‌تراند. برای یک تبدیل خاص، هزینه تبدیل بین نمایش‌ها باید به تصمیماتی درباره فضای رنگی تجزیه شود که باید در آن پیاده‌سازی شود. به عنوان مثال، فرض کنید می‌خواهیم شدت تصویر تمام‌رنگی شکل ۶-۳۰ را با استفاده از معادله زیر اصلاح کنیم:

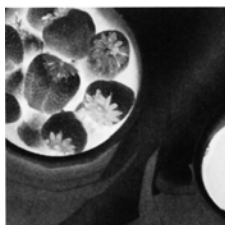
$$g(x, y) = kf(x, y) \quad (۶-۵-۳)$$

که  $0 < k < 1$  است. در فضای رنگ HSI، این کار می‌تواند با تبدیل ساده زیر انجام گیرد:

$$s_3 = kr_3 \quad (۶-۵-۴)$$



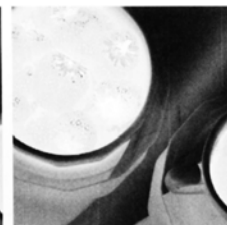
تمام رنگی



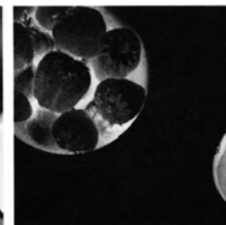
فیروزه‌ای



بنفش



زرد



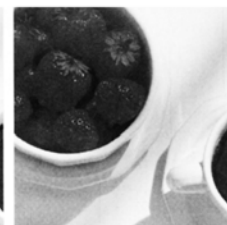
سیاه



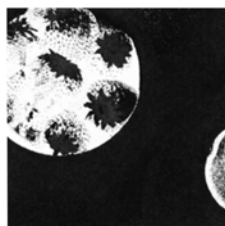
قرمز



سبز



آبی



پرده رنگ



اشباع



شدت

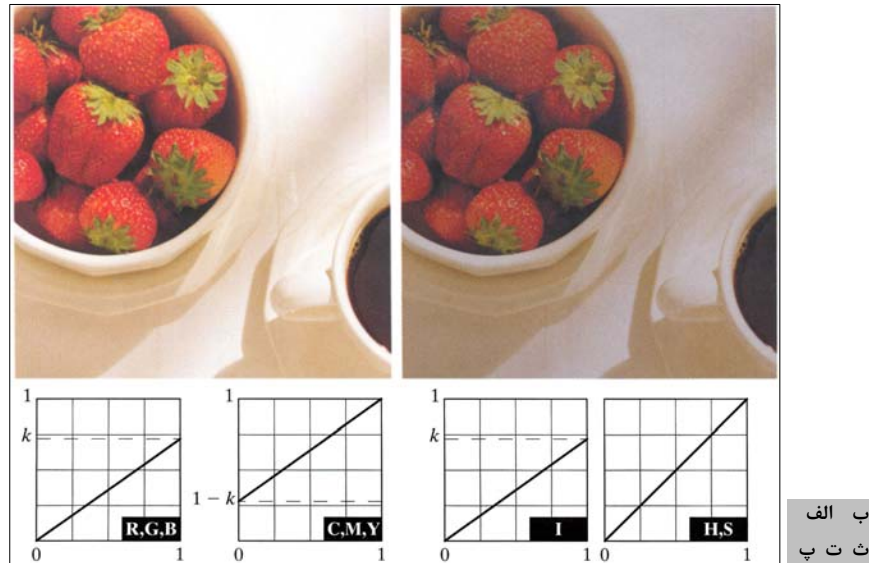
شکل ۶-۳۰ تصویر تمام‌رنگی و مولفه‌های فضای رنگ مختلف آن.

که  $s_1 = r_1$  و  $s_2 = r_2$ . فقط مولفه  $r_3$  شدت HSI اصلاح می‌شود. در فضای رنگ RGB، سه مولفه باید تبدیل شوند:

$$s_i = kr_i \quad i = 1, 2, 3 \quad (6-5-5)$$

فضای CMY به تبدیلات خطی مشابهی نیاز دارد:

$$s_i = kr_i + (1 - k) \quad i = 1, 2, 3 \quad (6-5-6)$$



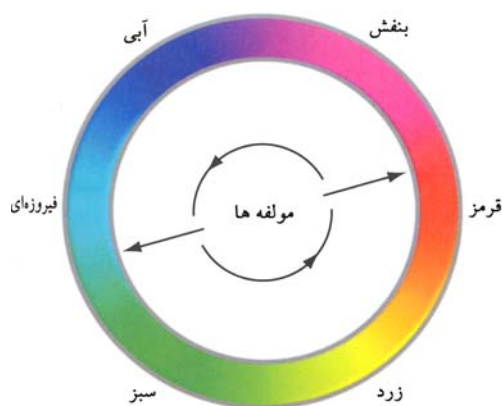
شکل ۶-۳۱ تنظیم شدت تصویر با استفاده از تبدیلات رنگ. (الف) تصویر اصلی. (ب) نتیجه‌ی افزایش شدت آن به میزان ۳۰٪ (یعنی  $k = 0.7$ ). (پ) تا (ث) توابع تبدیل مورد نیاز RGB، CMY و HSI.

گرچه تبدیل HSI شامل کمترین تعداد عملیات است، محاسبات لازم برای تبدیل تصویر RGB یا CMY(K) به فضای HSI، خیلی بیشتر از امتیازات تبدیلات ساده‌تر است - محاسبات تبدیل، شدیدتر از خود تبدیل شدت است. صرف‌نظر از فضای رنگ انتخاب‌شده، خروجی یکسان است. شکل ۶-۳۱ (ب) نتیجه‌ی اعمال هر یک از تبدیلات معادلات (۶-۵-۴) تا (۶-۵-۶) به تصویر تمام‌رنگی شکل ۶-۳۰ با استفاده از  $k = 0.7$  را نشان می‌دهد. خود توابع نگاشت به طور گرافیکی در شکل‌های ۶-۳۱ (پ) تا (ث) نشان داده شده‌اند. توجه به این نکته مهم است که هر تبدیل تعریف‌شده در معادلات (۶-۵-۴) تا (۶-۵-۶) فقط به یک مولفه در فضای رنگ آن بستگی دارد. به عنوان مثال، مولفه خروجی قرمز  $s_1$  در معادله (۶-۵-۵) مستقل از ورودی‌های سبز ( $r_2$ ) و آبی ( $r_3$ ) است؛ فقط به ورودی قرمز ( $r_1$ ) بستگی دارد. این نوع تبدیلات می‌تواند بر اساس مولفه در هر رنگ انجام شوند که در ابتدای بحث ما گفته شد. در ادامه‌ی این بخش، چند تبدیل را بررسی کرده و حالتی را بحث می‌کنیم که در آن، توابع تبدیل مولفه، به تمام مولفه‌های رنگی تصویر ورودی بستگی دارد، و در نتیجه، نمی‌تواند بر اساس هر مولفه رنگی انجام شود.

## ۶-۵-۲ مولفه‌های رنگی

پرده‌های رنگی که مستقیماً در مقابل یکدیگر در دایره رنگ<sup>۱</sup> شکل ۶-۳۲ قرار دارند، مولفه‌ها نامیده می‌شوند. علاقه ما به مولفه‌ها ناشی از این حقیقت است که مشابه منفی‌های سطح خاکستری در بخش ۳-۲-۱ هستند.

۱. دایره رنگ توسط اسحاق نیوتن معرفی شد که در قرن هفدهم، دو انتهای طیف رنگ را به هم متصل کرد تا اولین دایره رنگ را ایجاد کند.



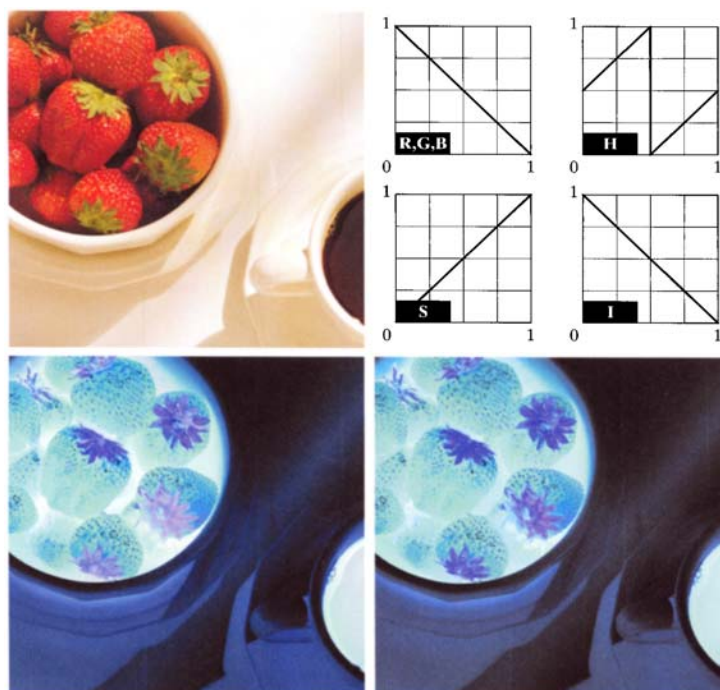
شکل ۶-۳۲ مولفه‌های دایره رنگ.

همانند حالت سطح خاکستری، مولفه‌های رنگی برای ارتقای جزئیاتی مفید هستند که در مناطق تاریک تصویر قرار دارند - مخصوصاً وقتی که اندازه این مناطق زیاد باشد.

**مثال ۶-۷: محاسبه مولفه‌های تصویر رنگی.**

شکل ۶-۳۳ (الف) و (ب) تصویر تمام‌رنگی از شکل ۶-۳۰ و مولفه رنگی آن را نشان می‌دهند. تبدیلات RGB مورد استفاده برای محاسبه مکمل، در شکل ۶-۳۳ (ب) رسم شده‌اند. آن‌ها متناظر تبدیلات منفی سطح خاکستری هستند که در بخش ۳-۲-۱ تعریف شدند. توجه کنید که مکمل

محاسبه شده حاکی از منفی‌های فیلم رنگی عکس‌برداری رایج است. قرمزهای تصویر اصلی با فیروزه‌ای در مکمل جایگزین می‌شوند. وقتی تصویر اصلی سیاه باشد، مکمل آن سفید است، و غیره. هر یک از پرده‌های رنگ در

ب الف  
ت پ

شکل ۶-۳۳ تبدیلات مکمل رنگی. (الف) تصویر اصلی. (ب) توابع تبدیل مکمل. (پ) مکمل (الف) بر اساس توابع نگاشت RGB. (ت) تخمین مکمل RGB با استفاده از تبدیلات HSI.

## ۴۲۱ پردازش تصویر رنگی

تصویر مکمل، می‌تواند با استفاده از دایره رنگ شکل ۶-۳۲، از تصویر اصلی پیش‌بینی شود، و هر یک از تبدیلات مولفه RGB موجود در محاسبات مکمل، فقط تابعی از مولفه رنگ ورودی متناظر است. برخلاف تبدیلات شدت شکل ۳-۳۱، توابع تبدیل مولفه RGB که در این مثال استفاده شد، فاقد معادل فضای HSI ساده‌ای است. به عنوان تمرین، در مسئله ۱۸ نشان دهید که مولفه اشباع مکمل نمی‌تواند فقط از مولفه اشباع ورودی محاسبه شود. شکل ۶-۳۳ (ت) تخمینی از مکمل را با استفاده از پرده رنگ، اشباع، و تبدیلات شدت موجود در شکل ۶-۳۳ (ب) فراهم می‌سازد. توجه کنید که مولفه اشباع تصویر ورودی، دخلتی ندارد؛ بلکه مسئول تفاوت دیداری بین شکل‌های ۶-۳۳ (پ) و (ت) است. ■

### ۶-۵-۳ بخش‌بندی رنگ

برجسته‌کردن بازه‌ی خاصی از رنگ‌ها در تصویر، برای تفکیک اشیاء از محیط آن‌ها مناسب است. ایده اصلی عبارت است از: (۱) نمایش رنگ‌های مورد علاقه به طوری که در پس‌زمینه برجسته باشند یا (۲) استفاده از ناحیه‌ی تعریف‌شده توسط رنگ‌ها به عنوان نقابی برای پردازش بیشتر. ساده‌ترین روش، بسط تکنیک‌های بخش‌بندی شدت مطرح‌شده در بخش ۴-۲-۳ است. چون پیکسل رنگی، یک کمیت  $n$  بعدی است، توابع تبدیل رنگی حاصل، خیلی پیچیده‌تر از همتای سطح خاکستری خود در شکل ۳-۲۱ هستند. در حقیقت، تبدیلات مورد نیاز، خیلی پیچیده‌تر از تبدیلات مولفه رنگی‌اند که تاکنون در نظر گرفته شدند. علتش این است که در تمام روش‌های عملی بخش‌بندی رنگ، لازم است تمام مولفه‌های رنگی تبدیل‌شده‌ی پیکسل، تابعی از تمام  $n$  مولفه رنگی پیکسل اصلی باشند.

یکی از ساده‌ترین راه‌ها برای "بخش‌بندی" تصویر رنگی، نگاشت رنگ‌های خارج از بازه‌ی مورد علاقه، به رنگ بی‌حالت غیر قابل رویت است. اگر رنگ‌های مورد علاقه، در داخل مکعبی (یا آبرمکعبی برای  $n > 3$ ) با پهنای  $W$  وجود داشته باشند و مرکز آن، رنگ نمونه اولیه<sup>۱</sup> با مولفه‌های  $(a_1, a_2, \dots, a_n)$  باشد، مجموعه‌ی تبدیلات لازم عبارتند از:

$$s_i = \begin{cases} 0.5 & \text{اگر } |r_j - a_j| > \frac{W}{2} \text{ برای } 1 \leq j \leq n \\ r_i & \text{وگرنه} \end{cases} \quad i = 1, 2, \dots, n \quad (6-5-7)$$

این تبدیلات، رنگ‌های حول نمونه اولیه را برجسته می‌کنند. برای این کار، سایر رنگ‌ها را به نقطه وسط فضای رنگ انتقال می‌دهند (یک نقطه اختیاری خنثی). به عنوان مثال، برای فضای رنگ RGB، نقطه خنثی مناسب، نقطه خاکستری یا رنگی  $(0.5, 0.5, 0.5)$  است.

اگر گره‌ای برای مشخص کردن رنگ‌های مورد علاقه به کار رود، معادله (۶-۵-۷) به صورت زیر

درمی‌آید:

$$s_i = \begin{cases} 0.5 & \text{اگر } \sum_{j=1}^n (r_j - a_j)^2 > R_0^2 \\ r_i & \text{وگرنه} \end{cases} \quad i = 1, 2, \dots, n \quad (6-5-8)$$

1. prototypical color

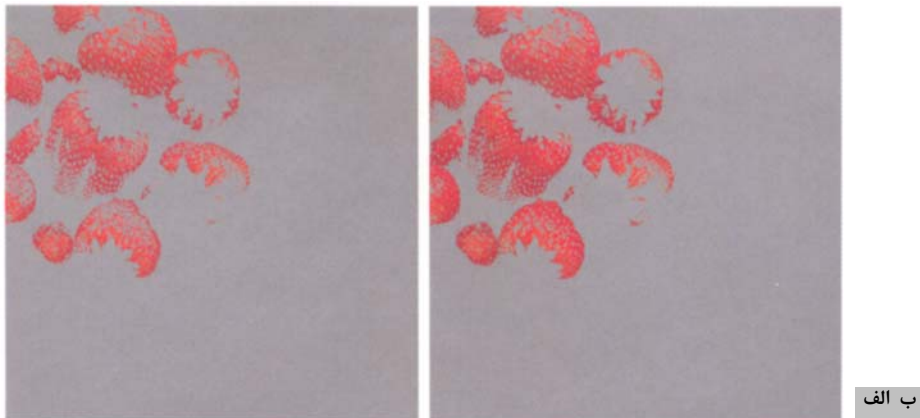
در این جا،  $R_0$  شعاع گرهی دربرگیرنده (یا اَبَرگَره برای  $n > 3$ ) است و  $(a_1, a_2, \dots, a_n)$  مولفه‌های مرکز آن هستند (یعنی، رنگ نمونه اولیه). شکل‌های مفید دیگر معادلات (۶-۵-۷) و (۶-۵-۸) شامل پیاده‌سازی نمونه‌های اولیه چندین رنگ و کاهش شدت رنگ‌های خارج از ناحیه مورد علاقه است - به جای این که آن‌ها را به ثابت خنثی تغییر دهیم.

**مثال ۸-۶: تشریح بخش‌بندی رنگ.**

معادلات (۶-۵-۷) و (۶-۵-۸) می‌توانند برای تفکیک بخش خوراکی توت‌فرنگی‌ها در شکل ۶-۳۱ (الف) از فنجان‌های پس‌زمینه، کاسه، قهوه، و میز به کار روند. شکل‌های ۶-۳۴ (الف) و (ب) نتایج اعمال هر دو تبدیل را نشان می‌دهند. در هر مورد، نمونه اولیه قرمز با مختصات رنگ  $(0.6863, 0.1608, 0.1922)$  RGB، از برجسته‌ترین توت‌فرنگی انتخاب شده است؛  $W$  و  $R_0$  طوری انتخاب شدند که ناحیه برجسته به بخش‌های نامطلوب تصویر بسط داده نشدند. مقادیر واقعی، یعنی  $W = 0.2549$  و  $R_0 = 0.1765$ ، به طور محاوره‌ای انتخاب شدند. توجه کنید که تبدیل مبتنی بر گرهی معادله (۶-۵-۸) اندکی بهتر است، زیرا ناحیه‌های قرمز بیشتری از توت‌فرنگی را دربرمی‌گیرد. کره‌ای با شعاع  $0.1765$  کاملاً مکعبی با پهنای  $0.2549$  را دربرنمی‌گیرد، اما به طور کامل توسط مکعب نیز دربرگرفته نشده است. ■

#### ۶-۵-۴ اصلاحات رنگ و تَن

تبدیلات رنگی می‌توانند در اغلب کامپیوترهای رومیزی انجام شوند. در ارتباط با دوربین‌های دیجیتال، اسکنرهای تخت، و چاپگرهای جوهرافشان، آن‌ها یک کامپیوتر شخصی را در *اتاق تاریک دیجیتال* قرار می‌دهند. به این ترتیب اجازه می‌دهند تنظیم‌های توانالیه و اصلاحات رنگ (که هسته اصلی سیستم‌های بازتولید رنگی است)، بدون نیاز به امکانات پردازش رطوبت قدیمی انجام گیرد. گرچه اصلاحات رنگ و تَن در سایر حوزه‌های تصویربرداری مهم‌اند، تأکید این بحث، بر متداول‌ترین کاربردها نیست - ارتقای عکس و بازتولید رنگ.



**شکل ۶-۳۴** تبدیلات بخش‌بندی رنگ که (۱) قرمزها را در داخل مکعب RGB با پهنای  $W = 0.2549$  و به مرکز  $(0.6863, 0.1608, 0.1922)$  را تشخیص می‌دهند، (ب) قرمزها را در داخل کره RGB به شعاع  $0.1765$  به مرکز همان نقطه تشخیص می‌دهند. پیکسل‌های خارج از مکعب و کره، با رنگ  $(0.5, 0.5, 0.5)$  جایگزین شدند.

## ۴۲۳ پردازش تصویر رنگی

اثر بخشی تبدیلات بررسی شده در این بخش، در نهایت در چاپ مشخص می‌شود. چون این تبدیلات روی مانیتورها ایجاد، بازسازی و ارزیابی شدند، لازم است درجه بالایی از سازگاری رنگ بین مانیتورهای استفاده شده و دستگاه‌های خروجی نهایی، حفظ شود. در حقیقت، رنگ‌های مانیتور، باید دقیقاً هر تصویر مبدأ اسکن شده را به همراه خروجی چاپ شده‌ی نهایی نشان دهد. این کار با مدل رنگ مستقل از دستگاه صورت می‌گیرد که گام رنگ مانیتورها و دستگاه‌های خروجی را به همراه سایر دستگاه‌های مورد استفاده نشان می‌دهد. موفقیت این روش، تابعی از کیفیت پروفایل‌های رنگ مورد استفاده برای نگاشت هر دستگاه به مدل و خود مدل است. مدل انتخاب برای اغلب سیستم‌های مدیریت رنگ (CMS)، مدل CIE L\*a\*b\* است که CIELAB نیز نامیده می‌شود (CIE [۱۹۷۸] و روبستون [۱۹۷۷]). مولفه‌های رنگ L\*a\*b\* توسط معادلات زیر مشخص می‌شوند:

$$L^* = 116 \cdot h \left( \frac{Y}{Y_W} \right) - 16 \quad (۶-۵-۹)$$

$$a^* = 500 \left[ h \left( \frac{X}{X_W} \right) - h \left( \frac{Y}{Y_W} \right) \right] \quad (۶-۵-۱۰)$$

$$b^* = 200 \left[ h \left( \frac{Y}{Y_W} \right) - h \left( \frac{Z}{Z_W} \right) \right] \quad (۶-۵-۱۱)$$

که

$$h(q) = \begin{cases} \sqrt[3]{q} & q > 0.008856 \\ 7.787q + 16/116 & q \leq 0.008856 \end{cases} \quad (۶-۵-۱۲)$$

و  $X_W$ ،  $Y_W$  و  $Z_W$  سه مقدار محرک سفید هستند - که معمولاً سفیدی است که پخش‌کننده را تحت استاندارد روشنایی D65 مربوط به CIE منعکس می‌سازد (در نمودار رنگینگی شکل ۵-۶ توسط  $x = 0.3127$  و  $y = 0.3290$  تعریف شده است). فضای رنگ L\*a\*b\*، رنگ‌سنجی (یعنی رنگ‌هایی که تطبیق می‌کنند، به طور یکسان رمزگذاری می‌شوند)، یکنواخت/ادراکی (یعنی تفاوت بین پرده‌های رنگ مختلف به طور یکنواخت درک می‌شود)، و مستقل از دستگاه است. گرچه این فرمت مستقیماً قابل نمایش نیست (نیاز به تبدیل به فضای رنگ دیگری است)، گام آن کل طیف قابل رویت را دربرمی‌گیرد و رنگ‌های هر دستگاه نمایش، چاپ، یا ورودی را دقیقاً نمایش می‌دهد. همانند سیستم HSI، سیستم L\*a\*b\* تفکیک‌کننده هوشمند شدت (که با روشنایی L\* نمایش داده می‌شود) و رنگ است (که با a\* برای قرمز منهای سبز و b\* برای سبز منهای آبی)، و در نتیجه برای دستکاری تصویر (ویرایش کنتراست و تُن) و کاربردهای فشرده‌سازی<sup>۱</sup> تصویر مفید است.

۱. مطالعات نشان می‌دهد که درجه تفکیک اطلاعات لومینانس از اطلاعات رنگ در L\*a\*b\*، در سایر مدل‌های رنگ بیشتر است - مثل XYZ و YCC، YUV، YIQ، CIELUV (کاسون و پلوف [۱۹۹۲]).

فایده اصلی سیستم‌های تصویربرداری تنظیم شده این است که اجازه می‌دهند عدم توازن رنگ و تونالیت به طور محاوره‌ای و مستقل از هم اصلاح شوند - یعنی، در دو عملیات ترتیبی انجام شوند. قبل از این که بی‌نظمی‌های رنگ، مثل رنگ‌هایی با اشباع کم و زیاد، برطرف شوند، مشکلات مربوط به بازه‌ی تونالیت تصویر اصلاح شدند. بازه‌ی تونالیت تصویر، که نوع کلید آن نیز نامیده می‌شود، به توزیع کلی شدت‌های رنگ اشاره دارد. اغلب اطلاعات موجود در تصاویری با کلید بالا، در شدت (یا نور) بالا متمرکز شدند. رنگ‌هایی از تصاویر با کلید پایین، در شدت‌های پایین مستقر هستند؛ تصاویر با کلید میانی در بین آن‌ها واقع‌اند. همانند حالت تک‌رنگ، معمولاً مطلوب است که شدت‌های تصویر رنگی به طور مساوی بین برجستگی‌ها و سایه‌ها توزیع گردد. مثال‌های بعدی، تبدیلات رنگی گوناگونی را برای اصلاح عدم توازن رنگ و تِن نشان می‌دهند.

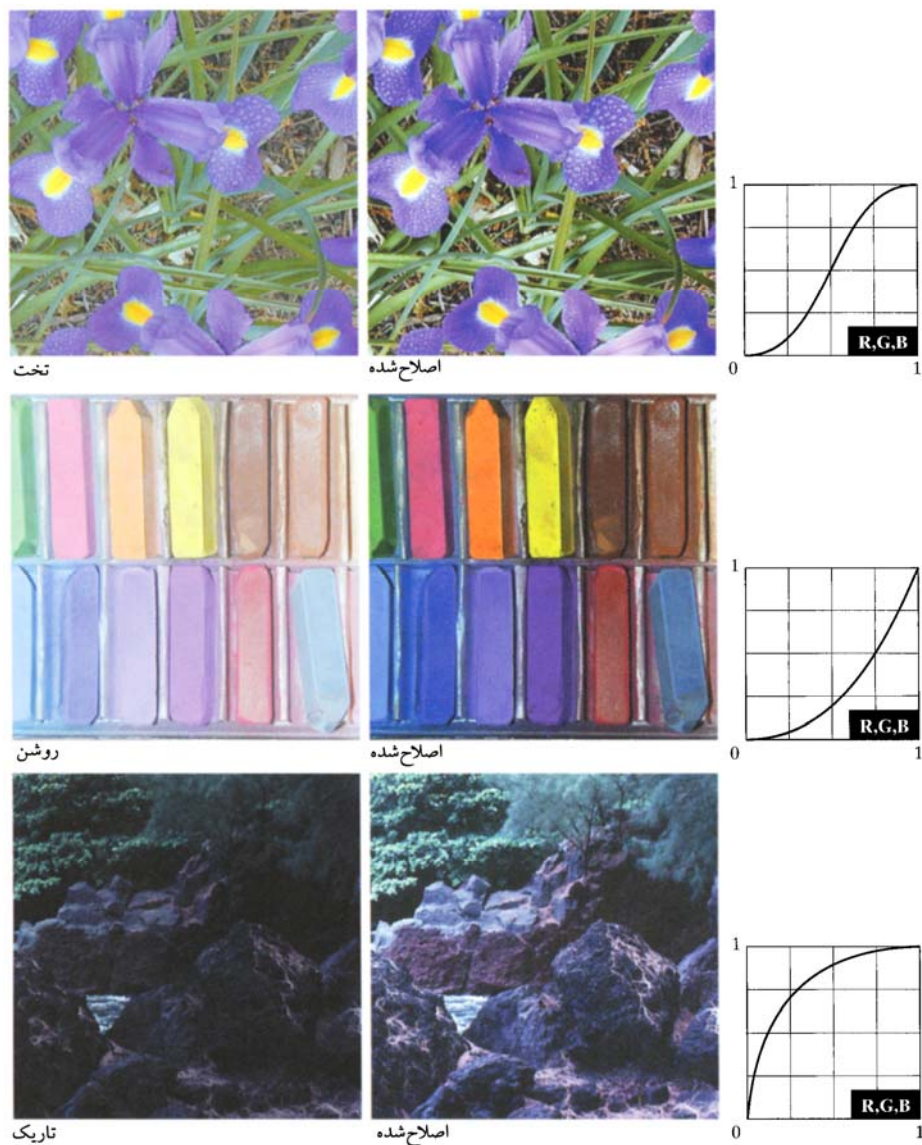
#### مثال ۹-۶: تبدیل تونالیت.

تبدیلات مربوط به اصلاح تِن‌های تصاویر، معمولاً به صورت محاوره‌ای انتخاب می‌شوند. هدف، تنظیم تجربی روشنی و کنتراست تصویر برای فراهم کردن حداکثر جزئیات روی بازه‌ی مناسبی از شدت‌ها است. خود رنگ‌ها تغییر نمی‌کنند. در فضا‌های RGB و CMY(K)، به معنای نگاشت هر سه (یا چهار) مولفه رنگ با تابع تبدیل یکسان است. در فضای رنگ HSI، فقط مولفه شدت اصلاح می‌شود.

شکل ۶-۳۵ تبدیلهای مورد استفاده برای اصلاح سه عدم توازن متداول را نشان می‌دهد - تصاویر تخت، روشن، و تاریک. منحنی شکل S در سطر اول شکل، برای تقویت کنتراست مناسب است (شکل ۲-۳ (الف) را ببینید). نقطه میانی آن طوری تثبیت شد که ناحیه‌های برجسته و سایه‌دار، به ترتیب می‌توانند روشن‌تر و تیره‌تر شوند (معکوس این منحنی می‌تواند برای اصلاح کنتراست زیاد به کار رود). تبدیلات در سطرهای دوم و سوم شکل، تصاویر روشن و تاریک را اصلاح می‌کنند و حاکی از تبدیلات قانون قدرت در شکل ۶-۳ است. گرچه مولفه‌های رنگی گسسته‌اند، همانند توابع تبدیل واقعی، خود توابع تبدیل، به صورت کمیت‌های پیوسته‌ای نمایش داده شده دستکاری می‌شوند - معمولاً از چندجمله‌ای مرتبه خطی قطعه به قطعه یا بالاتر ساخته می‌شود. توجه کنید که کلیدهای تصاویر شکل ۶-۳۵ مستقیماً قابل مشاهده‌اند. آن‌ها می‌توانند با استفاده از هیستوگرام‌های مولفه‌های رنگی تصویر نیز تعیین شوند. ■

#### مثال ۱۰-۶: متوازن کردن رنگ.

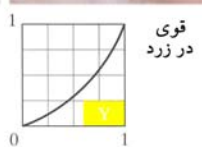
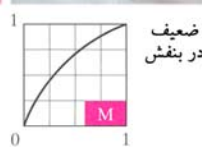
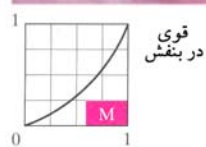
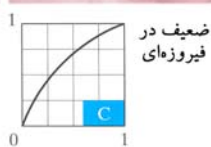
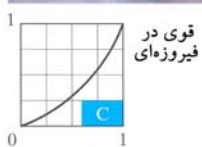
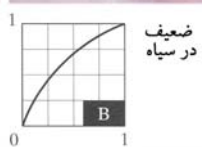
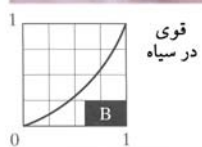
پس از این که ویژگی‌های تونالیت تصویر به طور مناسب تعیین شد، هر عدم توازن در رنگ را می‌توان برطرف کرد. گرچه عدم توازن‌های رنگ می‌تواند به وسیله تحلیل یک رنگ مشخص (با طیف‌سنج نور) به طور عملی تعیین گردد، هنگامی که ناحیه‌های سفید موجود باشند، که در آن‌ها مولفه‌های RGB یا CMY(K) باید برابر باشند، تخمین دقیق امکان‌پذیر است. همان‌طور که در شکل ۶-۳۶ می‌توان دید، تِن‌های پوست نیز موضوعات هوشمندی برای تخمین‌های رنگ دیداری‌اند، زیرا انسان‌ها گیرنده خوبی از رنگ پوست مناسب‌اند. رنگ‌های تند، مثل اشیای قرمز روشن، در هنگام تخمین رنگ دیداری، ارزش چندانی ندارند.



شکل ۶-۳۵ اصلاحات توانالیه برای تصاویر رنگی تخت، روشن (کلید بالا)، و تاریک (کلید پایین). تنظیم یکسان مولفه‌های قرمز، سبز و آبی، همیشه پرده‌های رنگ تصویر را به طور چشمگیری تغییر نمی‌دهند.



اصلی / اصلاح شده



شکل ۳۶-۶ اصلاحات متوازن کردن رنگ برای تصاویر رنگی CMYK.

## ۴۲۷ پردازش تصویر رنگی

وقتی عدم توازن رنگ وجود دارد، روش‌های گوناگونی برای اصلاح آن فراهم است. هنگام تنظیم مولفه‌های رنگ تصویر، درک این نکته مهم است که هر عملی بر کل توازن رنگ تصویر موثر است. یعنی، دریافت یک رنگ تحت تأثیر محیط آن است. با این وجود، چرخ رنگ شکل ۳۲-۶، می‌تواند برای پیش‌گویی چگونگی تأثیر یک رنگ بر دیگری به کار رود. بر اساس چرخ رنگ، به عنوان مثال، نسبت هر رنگ می‌تواند با کاهش میزان رنگ متضاد در تصویر، افزایش یابد. به طور مشابه، می‌تواند با به توان‌رساندن نسبت دو رنگ هم‌جوار بلافاصله یا کاهش درصد دو رنگ هم‌جوار در مکمل، افزایش یابد. به عنوان مثال، فرض کنید بنفش در تصویر RGB زیاد است. برای کاهش آن می‌توان (۱) قرمز و آبی را حذف کرد و (۲) سبز را اضافه کرد.

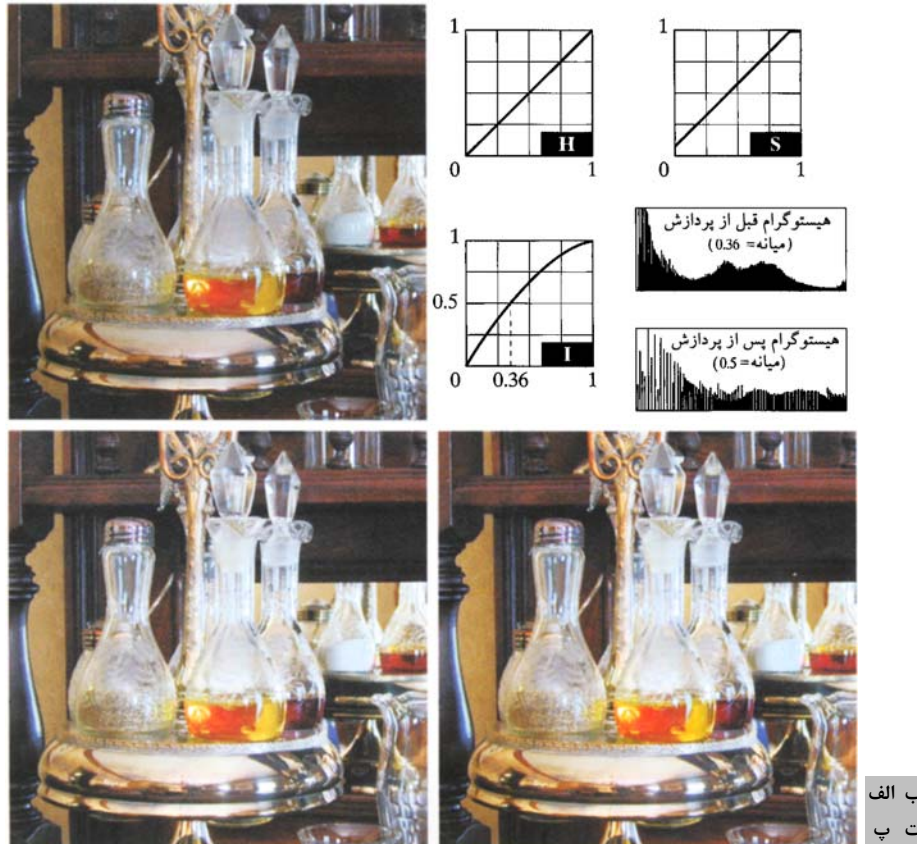
شکل ۳۶-۶ تبدیلات مورد استفاده برای اصلاح عدم توازن‌های خروجی CMYK ساده را نشان می‌دهد. توجه کنید که تبدیلات نشان‌داده‌شده، توابعی هستند که برای اصلاح تصاویر مورد نیاز می‌باشند؛ معکوس این توابع برای تولید عدم توازن‌های رنگی مربوطه به کار رفتند. روی هم رفته، این تصاویر شبیه چاپ رنگی حلقه‌ای از محیط اتاق تاریک هستند و به عنوان ابزار مرجعی برای مشخص کردن مشکلات چاپ مفید است. به عنوان مثال، توجه کنید که قرمز زیاد می‌تواند ناشی از بنفش مازاد (در پایین سمت چپ تصویر) یا فیروزه‌ای خیلی کم (سمت راست‌ترین تصویر سطر دوم) باشد.

## ۵-۶ پردازش هیستوگرام

برخلاف روش‌های ارتقای محاوره‌ای در بخش قبل، تبدیلات پردازش هیستوگرام سطح خاکستری بخش ۳-۳ می‌توانند به طور خودکار به تصاویر رنگی اعمال شوند. به یاد داشته باشید که تعدیل هیستوگرام، به طور خودکار، تبدیلی را تعیین می‌کند که تصویری با هیستوگرام یکنواخت از مقادیر شدت تولید نماید. در مورد تصاویر تک‌رنگ، نشان داده شد که (شکل ۲۰-۳ را ببینید) در اداره کردن تصاویری با کلید پایین، متوسط و بالا موفق است. اما، چون تصاویر رنگی، مرکب از چندین مولفه‌اند، برای تطبیق تکنیک سطح خاکستری با بیش از یک مولفه و یا هیستوگرام، ملاحظات باید در نظر گرفته شوند. همان‌طور که انتظار می‌رود، معقول نیست که هیستوگرام، مولفه‌های تصویر رنگی را به طور مستقل تعدیل نماید. این کار منجر به رنگ‌های نادرستی می‌شود. یک روش منطقی‌تر، بخش شدت رنگ به طور یکنواخت، و عدم تغییر خود رنگ‌ها (مثل پرده‌های رنگ) است. مثال زیر نشان می‌دهد که فضای رنگ HSI برای این نوع روش مناسب است.

### مثال ۱۱-۶: تعدیل هیستوگرام در فضای رنگ HSI.

شکل ۳۷-۶ (الف) یک تصویر رنگی از ظرف ایستاده‌ای را نشان می‌دهد که شامل جای نمک و فلفل و همزن است که مولفه شدت آن، کل بازه‌ی (نرمال‌شده‌ی) مقادیر  $[0, 1]$  را پوشش می‌دهد. همان‌طور که در هیستوگرام مولفه شدت آن قبل از پردازش می‌توان دید (شکل ۳۷-۶ (ب))، این تصویر شامل تعداد زیادی از رنگ‌های تاریک است که میانه شدت را به  $0.36$  تقلیل می‌دهد. هیستوگرام تعدیل‌کننده‌ی مولفه شدت، بدون تغییر پرده رنگ و اشباع، منجر به تصویر شکل ۳۷-۶ (پ) شده است. توجه کنید که کل تصویر به طور چشمگیری روشن‌تر است و تزیینات و ذراتی از میز چوبی که ظرف روی آن قرار دارد، اکنون قابل رویت است. شکل ۳۷-۶ (ب) هیستوگرام شدت تصویر جدید را نشان می‌دهد. علاوه‌براین، تبدیل شدت استفاده‌شده برای تعدیل مولفه شدت را نیز نشان می‌دهد (معادله ۸-۸-۳ را ببینید).



شکل ۶-۳۷ تعدیل هیستوگرام (و سپس تنظیم اشباع) در فضای رنگ HSI.

گرچه فرآیند تعدیل شدت، مقادیر پرده رنگ و اشباع تصویر را تغییر نمی‌دهد، بر دریافت کل رنگ اثر دارد. به حذف نوسان (لرزش) در روغن و سرکه در ظرف توجه کنید. شکل ۶-۳۷ (ت) نتیجه‌ی اصلاح این وضعیت را با افزایش مولفه اشباع تصویر، و تعدیل هیستوگرام با استفاده از تبدیل موجود در شکل ۶-۳۷ (ب) نشان می‌دهد. این نوع تنظیم، هنگام کارکردن با مولفه شدت در فضای HSI متداول است، تغییرات در شدت معمولاً در نمای نسبی رنگ‌ها در تصویر موثر است. ■

## ۶-۶ هموار و تیزکردن

مرحله بعدی در تبدیل هر پیکسل از تصویر رنگی، بدون توجه به همسایه‌هایش (همانند بخش قبل)، اصلاح مقدار آن بر اساس ویژگی‌های پیکسل‌های محصورکننده است. در این بخش، مبانی این نوع پردازش همسایگی، در زمینه هموار و تیزکردن تصویر رنگی شرح داده می‌شود.

### ۶-۶-۱ هموار کردن تصویر رنگی

با مراجعه به شکل ۶-۲۹ (الف) و بحث در بخش‌های ۳-۴ و ۳-۵، هموارسازی تصویر سطح خاکستری را می‌توان یک عمل فیلتر کردن مکانی در نظر گرفت که در آن، ضرایب نقاب فیلتر کردن، مقدار یکسانی دارند. وقتی نقاب در امتداد تصویری که باید هموار شود حرکت می‌کند، هر پیکسل با میانگین پیکسل‌ها در همسایگی تعریف شده توسط نقاب، جایگزین می‌شود. همان‌طور که در شکل ۶-۲۹ (ب) دیده می‌شود، این مفهوم به آسانی به پردازش تصاویر تمام‌رنگی بسط می‌یابد. تفاوت عمده این است که به جای مقادیر شدت اسکالر، باید با بردارهای مولفه به شکل نشان داده شده در معادله (۶-۴-۲)، سروکار داشته باشیم.

فرض کنید،  $S_{xy}$  مجموعه‌ای از مختصات است که یک همسایگی را به مرکز  $(x, y)$  در تصویر رنگی RGB تعریف می‌کند. میانگین بردارهای مولفه RGB در این همسایگی به صورت زیر است:

$$\bar{c}(x, y) = \frac{1}{K} \sum_{(s, t) \in S_{xy}} c(s, t) \quad (6-6-1)$$

از معادله (۶-۴-۲) و خواص جمع بردارها نتیجه می‌شود که:

$$\bar{c}(x, y) = \begin{bmatrix} \frac{1}{K} \sum_{(s, t) \in S_{xy}} R(s, t) \\ \frac{1}{K} \sum_{(s, t) \in S_{xy}} G(s, t) \\ \frac{1}{K} \sum_{(s, t) \in S_{xy}} B(s, t) \end{bmatrix} \quad (6-6-2)$$

مولفه‌های این بردار را به عنوان تصاویر اسکالری می‌دانیم که با هموار کردن مستقل هر صفحه شروع تصویر RGB، با استفاده از پردازش همسایگی مقیاس خاکستری به دست خواهد آمد. بنابراین، نتیجه می‌گیریم که هموارسازی به وسیله میانگین همسایگی، می‌تواند بر اساس صفحه در هر رنگ<sup>۱</sup> انجام شود. نتیجه همانند حالتی است که میانگین‌گیری با استفاده از بردارهای رنگ RGB انجام می‌گیرد.

**مثال ۶-۱۲: هموارسازی تصویر رنگی توسط میانگین‌گیری همسایگی.**

تصویر رنگی RGB در شکل ۶-۳۸ (الف) را در نظر بگیرید. تصاویر مولفه قرمز، سبز، و آبی آن در شکل‌های ۶-۳۸ (ب) تا (ت) نشان داده شده‌اند. شکل‌های ۶-۳۹ (الف) تا (پ) مولفه‌های HSI تصویر را نشان می‌دهند. بر اساس بحث پاراگراف قبلی، هر تصویر مولفه‌ی تصویر RGB در شکل ۶-۳۸ را به طور مستقل، با استفاده از نقاب میانگین‌گیری مکانی  $5 \times 5$  هموار کردیم. سپس این تصاویری را که مستقلاً هموار شدند، ترکیب کردیم تا نتیجه‌ی RGB تمام‌رنگی هموار شده‌ی شکل ۶-۴۰ (الف) را به دست آوریم. توجه کنید که این تصویر طوری ظاهر می‌شود که در اثر اجرای عملیات هموارسازی مکانی، مانند آنچه که در مثال‌های بخش ۳-۵ آمده‌اند، انتظار داریم.

1. per-color-plane



ب الف  
ت پ

شکل ۶-۳۸ (الف) تصویر RGB، (ب) تصویر مولفه قرمز، (پ) مولفه سبز و (ت) مولفه آبی.



پ ب الف

شکل ۶-۳۹ مولفه‌های HSI تصویر رنگی RGB در شکل ۶-۳۸ (الف)، (الف) پرده رنگ، (ب) اشباع، (پ) شدت.



پ ب الف

شکل ۶-۴۰ هموارسازی تصویر با نقاب میانگین‌گیری  $5 \times 5$ . (الف) نتیجه پردازش هر تصویر RGB. (ب) نتیجه پردازش مولفه شدت تصویر HSI و تبدیل به RGB. (پ) تفاوت بین دو نتیجه.

در بخش ۶-۲ یادآور شدیم که امتیاز مهم مدل رنگ HSI این است که اطلاعات رنگ و شدت را تفکیک می‌کند. به این ترتیب، این مدل برای بسیاری از تکنیک‌های پردازش مقیاس خاکستری مفید است، و نتیجه می‌شود که فقط برای هموارکردن مولفه شدت نمایش HSI در شکل ۶-۳۹ موثرتر است. برای تشریح این امتیاز و یا نتایج این روش، فقط مولفه شدت را هموار می‌کنیم (مولفه‌های پرده رنگ و اشباع را تغییر نمی‌دهیم) و نتیجه پردازش شده را به تصویر RGB تبدیل می‌کنیم تا به نمایش درآید. تصویر رنگی هموار شده در شکل ۶-۴۰ (ب) آمده است. توجه کنید که شبیه شکل ۶-۴۰ (الف) است، اما همان‌طور که می‌توانید در تصویر تفاضل در شکل ۶-۴۰ (پ) ببینید، دو تصویر هموار شده، یکسان نیستند. علتش این است که در شکل ۶-۴۰ (الف)، رنگ هر پیکسل، رنگ میانگین پیکسل‌ها در آن همسایگی است. از طرف دیگر، با هموارکردن فقط تصویر مولفه شدت در شکل ۶-۴۰ (ب)، پرده رنگ و اشباع هر پیکسل تحت تأثیر قرار نگرفت، و در نتیجه، رنگ‌های پیکسل تغییر نکردند. از این مشاهدات نتیجه می‌شود که تفاوت بین دو روش هموارسازی، به عنوان تابعی از اندازه صعودی فیلتر، برجسته‌تر است. ■

## ۶-۶-۲ تیزکردن تصویر رنگی

در این بخش، تیزکردن تصویر را با استفاده از لاپلاسیان در نظر می‌گیریم (بخش ۶-۲-۳ را ببینید). با توجه به تحلیل بردار می‌دانیم که لاپلاسیان بردار به صورت برداری تعریف می‌شود که مولفه‌های آن برابر با لاپلاسیان هر یک از مولفه‌های اسکالر بردار ورودی است. در سیستم رنگ RGB، لاپلاسیان بردار  $c$  در معادله (۶-۴-۲) به صورت زیر است:

$$\nabla^2[c(x, y)] = \begin{bmatrix} \nabla^2 R(x, y) \\ \nabla^2 G(x, y) \\ \nabla^2 B(x, y) \end{bmatrix} \quad (۶-۶-۳)$$

که، همانند بخش قبل، بیان می‌کند که می‌توانیم لاپلاسیان تصویر تمام‌رنگی را با محاسبه لاپلاسیان هر یک از مولفه‌ها به طور جداگانه، محاسبه کنیم.



شکل ۶-۴۱ پ ب الف : تیزکردن تصویر با لاپلاسین. (الف) نتیجه پردازش هر کانال RGB. (ب) نتیجه پردازش مولفه شدت HSI و تبدیل به RGB. (پ) تفاوت بین دو نتیجه.

مثال ۶-۱۳: تیزکردن تصویر با لاپلاسین.

شکل ۶-۴۱ (الف) با استفاده از معادله (۷-۶-۳) و نقاب شکل ۳۷-۳ (پ) برای محاسبه لاپلاسین تصاویر مولفه RGB در شکل ۶-۳۸ به دست آمد. این نتایج ترکیب شدند تا نتیجه تمام‌رنگی تیزشده به دست آید. شکل ۶-۴۱ (ب) تصویر تیزشده‌ی مشابهی را بر اساس مولفه‌های HSI در شکل ۶-۳۹ نشان می‌دهد. این نتیجه به وسیله ترکیب لاپلاسین مولفه شدت با مولفه‌های تغییرنیافته اشباع و پرده رنگ تولید شده است. تفاوت بین تصاویر تیزشده‌ی RGB و HSI در شکل ۶-۴۱ (پ) آمده است. علت اختلاف‌های بین این دو تصویر، مانند مثال ۶-۱۲ است. ■

## ۶-۷ بخش‌بندی تصویر بر اساس رنگ

بخش‌بندی فرآیندی است که تصویر را به ناحیه‌هایی تقسیم می‌کند. گرچه بخش‌بندی موضوع فصل ۱۰ است، در این‌جا بخش‌بندی بر اساس رنگ را به طور مختصر بحث می‌کنیم. در بحث زیر مشکلی نخواهید داشت.

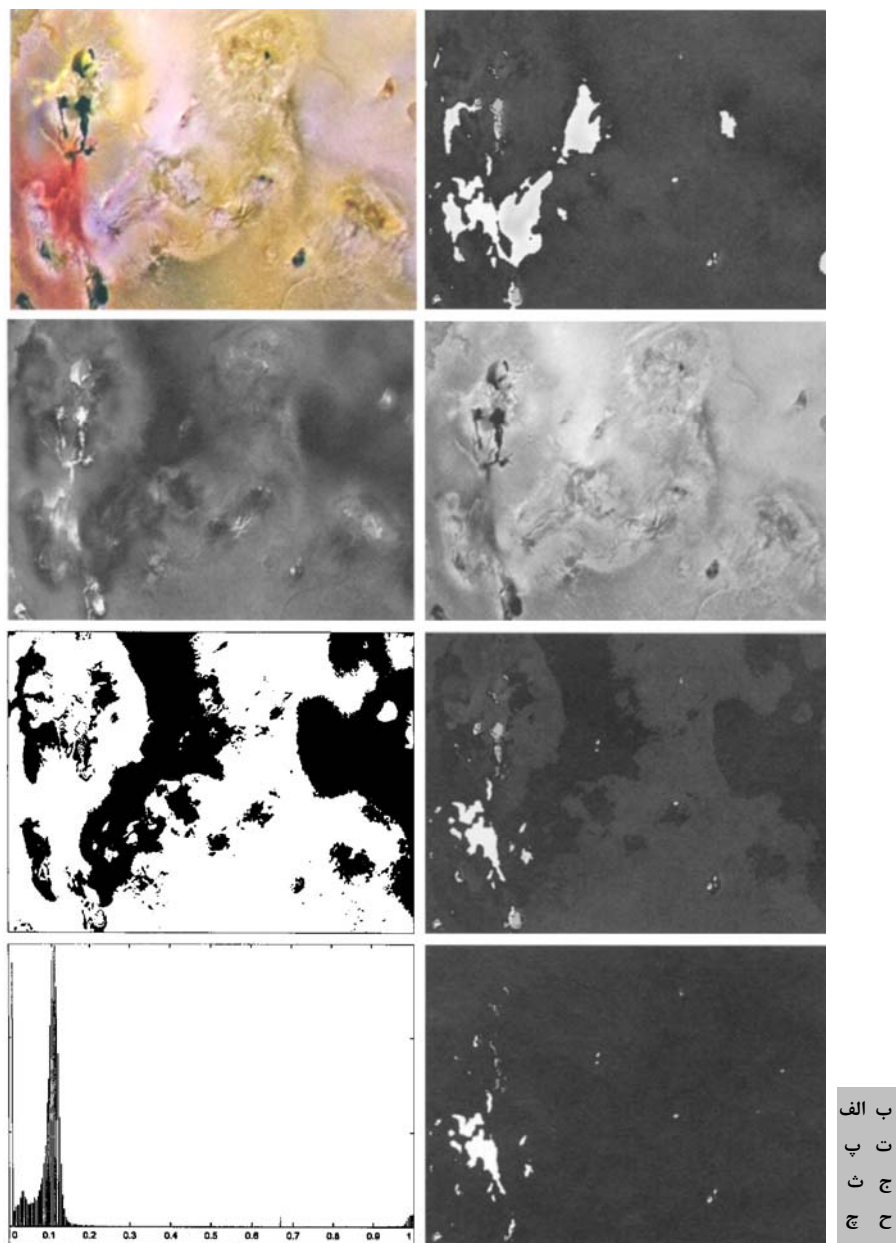
### ۶-۷-۱ بخش‌بندی در فضای رنگ HSI

اگر بخواهیم تصویری را بر اساس رنگ بخش‌بندی<sup>۱</sup> کنیم، و علاوه‌براین بخواهیم این فرآیند را در هر یک از صفحات انجام دهیم، طبیعی است که ابتدا فضای HSI را در نظر بگیریم، زیرا رنگ به طور سستی در تصویر پرده رنگ به نمایش درمی‌آید. معمولاً، اشباع به عنوان تصویر نقاب به کار می‌رود تا مناطق بیشتری را در تصویر پرده رنگ تفکیک نماید. تصویر شدت، کمتر برای بخش‌بندی تصاویر رنگی به کار می‌رود، زیرا هیچ اطلاعات رنگی را حمل نمی‌کند. مثال زیر چگونگی بخش‌بندی را در فضای رنگ HSI نشان می‌دهد.

مثال ۶-۱۴: بخش‌بندی در فضای HSI.

فرض کنید علاقه‌مند هستیم ناحیه قرمز در پایین سمت چپ تصویر شکل ۶-۴۲ (الف) را بخش‌بندی کنیم. گرچه این تصویر به روش‌های شبه‌رنگ تولید شد، می‌تواند به عنوان تصویر تمام‌رنگی (بخش‌بندی‌شده) پردازش شود، بدون این‌که کلیت را از دست بدهیم. شکل‌های ۶-۴۲ (ب) تا (ت) تصاویر مولفه HSI آن هستند.

1. segmentation



شکل ۶-۴۲ بخش‌بندی تصویر در فضای HSI. (الف) تصویر اصلی. (ب) پرده رنگ. (پ) اشباع. (ت) شدت. (ث) نقاب اشباع دودویی (سیاه = ۰). (ج) حاصلضرب (ب) و (ث). (چ) هیستوگرام (ج). (ح) بخش‌بندی مولفه‌های قرمز در (الف).

با مقایسه شکل‌های ۶-۴۲ (الف) و (ب) متوجه می‌شویم که ناحیه‌ای که به آن علاقه‌مند هستیم، دارای مقادیر پرده رنگ نسبتاً بالایی است، و نشان می‌دهد که رنگ‌ها در سمت بنفش آبی قرمز وجود دارند (شکل ۶-۱۳ را ببینید). شکل ۶-۴۲ (ث) یک نقاب دودویی را نشان می‌دهد که با آستانه‌گیری تصویر اشباع با آستانه‌ای برابر با ۱۰ درصد مقدار ماکزیمم در آن تصویر تولید شده است. هر مقدار پیکسل بزرگ‌تر از این حد آستانه، برابر با یک شده است (سفید). بقیه صفر شده‌اند (سیاه).

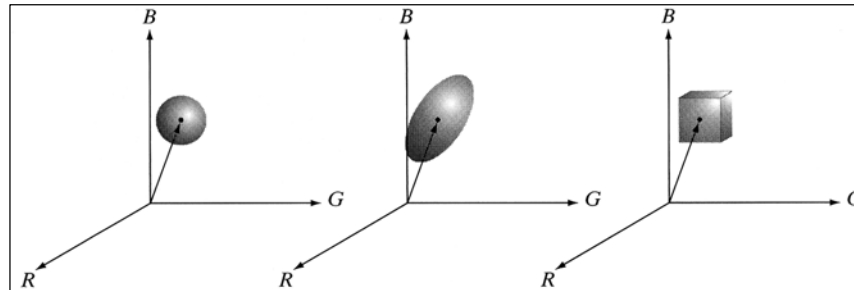
شکل ۶-۴۲ (ج)، حاصلضرب نقاب با تصویر پرده رنگ، و شکل ۶-۴۲ (چ) هیستوگرام تصویر حاصلضرب است (توجه کنید که مقیاس خاکستری در بازه  $[0, 1]$  است). در هیستوگرام مشاهده می‌شود که مقادیر بالا (که مربوط به شدت هستند) در انتهای سطح خاکستری، نزدیک  $1/0$  گروه‌بندی می‌شوند. نتیجه آستانه‌گیری تصویر حاصلضرب با مقدار آستانه  $0/9$ ، منجر به تصویر دودویی شد که در شکل ۶-۴۲ (ح) آمده است. موقعیت مکانی نقاط سفید در این تصویر، نقاطی را در تصویر اصلی مشخص می‌کند که دارای پرده رنگ قرمز مورد علاقه ما هستند. این وضعیت، با بخش‌بندی کامل فاصله زیادی دارد، زیرا نقاطی در تصویر اصلی وجود دارند که پرده رنگ قرمز دارند، اما آن‌ها توسط این روش بخش‌بندی مشخص نشدند. به هر حال، با تجربه (آزمایش) می‌توان تعیین کرد که مناطق نشان‌داده‌شده در قسمت سفید در شکل ۶-۴۲ (ح)، جای خوبی برای مشخص کردن مولفه‌های قرمز تصویر اصلی، در این روش است. روش بخش‌بندی که در بخش بعدی بحث می‌شود، نتایج بهتری ارائه می‌کند. ■

## ۶-۷-۲ بخش‌بندی در فضای بردار RGB

گرچه کارکردن در فضای HSI شهودی‌تر است، بخش‌بندی، حوزه‌ای است که در آن، با استفاده از بردارهای رنگ RGB، به طور کلی نتایج بهتری به دست می‌آید. این روش ساده است. فرض کنید، هدف، بخش‌بندی اشیایی با بازه‌ی رنگ خاص در تصویر RGB است. با توجه به نقاط رنگی نمونه‌ای که نماینده رنگ‌های مورد علاقه هستند، تخمینی از رنگ "میانگین" را به دست می‌آوریم که می‌خواهیم بخش‌بندی شود. این رنگ میانگین را با بردار  $\mathbf{a}$  در RGB نمایش می‌دهیم. هدف بخش‌بندی، دسته‌بندی هر پیکسل RGB در تصویر موردنظر است، به طوری که دارای رنگی در بازه‌ی خاص باشد یا خیر. برای انجام این مقایسه، باید معیار شباهت را در دست داشته باشیم. یکی از ساده‌ترین معیارها، فاصله اقلیدسی است. فرض کنید  $\mathbf{z}$  یک نقطه اختیاری در فضای RGB باشد. می‌گوییم  $\mathbf{z}$  مشابه با  $\mathbf{a}$  است اگر فاصله بین آن‌ها کمتر از حد آستانه‌ای مثل  $D_0$  باشد. فاصله اقلیدسی بین  $\mathbf{z}$  و  $\mathbf{a}$  به صورت زیر تعیین می‌شود:

$$\begin{aligned} D(\mathbf{z}, \mathbf{a}) &= \|\mathbf{z} - \mathbf{a}\| \\ &= [(\mathbf{z} - \mathbf{a})^T (\mathbf{z} - \mathbf{a})]^{\frac{1}{2}} \\ &= [(z_R - a_R)^2 + (z_G - a_G)^2 + (z_B - a_B)^2]^{\frac{1}{2}} \end{aligned} \quad (6-7-1)$$

که زیرنویس‌های  $R$ ،  $G$  و  $B$  نشان‌دهنده مولفه‌های RGB بردارهای  $\mathbf{a}$  و  $\mathbf{z}$  هستند. مکان هندسی نقاطی که  $D(\mathbf{z}, \mathbf{a}) \leq D_0$  باشد، کره‌ای به شعاع  $D_0$  است که در شکل ۶-۴۳ (الف) آمده است. نقاط موجود در این کره، معیار رنگ مشخص‌شده را برآورده می‌کنند ولی نقاط خارج از کره برآورده نمی‌کنند. رمزگذاری این دو مجموعه از نقاط در تصویری، مثلاً با رنگ سفید و سیاه، تصویر بخش‌بندی‌شده‌ی دودویی را تولید می‌نماید.



پ ب الف شکل ۶-۴۳ سه روش برای دربرگرفتن مناطق داده برای بخش‌بندی بردار RGB.

یک تعمیم مفید معادله (۶-۷-۱)، سنجش فاصله به صورت زیر است:

$$D(\mathbf{z}, \mathbf{a}) = \sqrt{(\mathbf{z} - \mathbf{a})^T \mathbf{C}^{-1} (\mathbf{z} - \mathbf{a})} \quad (6-7-2)$$

که  $\mathbf{C}$  ماتریس<sup>۱</sup> کوواریانس نمونه‌های نماینده رنگی است که می‌خواهیم بخش‌بندی کنیم. مکان هندسی نقاطی که  $D(\mathbf{z}, \mathbf{a}) \leq D_0$  است، یک بدنه بیضوی سه‌بعدی (شکل ۶-۴۳ ب) را توصیف می‌کند که خاصیت مهم آن این است که محورهای اصلی آن در جهت ماکزیمم پخش داده‌ها، امتداد دارند. وقتی  $\mathbf{C} = \mathbf{I}$ ، ماتریس شدت  $3 \times 3$ ، معادله (۶-۷-۲) به معادله (۶-۷-۱) تبدیل می‌شود. بخش‌بندی به همان صورتی است که در پاراگراف قبلی گفته شد.

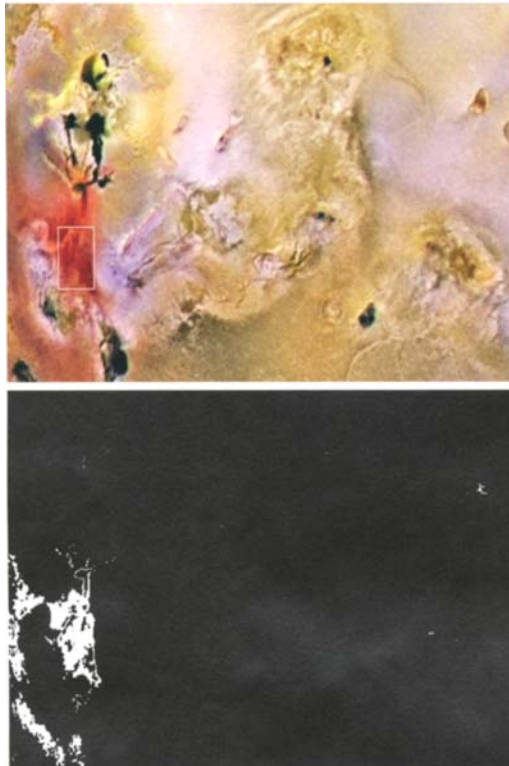
چون فاصله‌ها مثبت و یکنواخت هستند، به جای آن‌ها می‌توان از مربع فاصله استفاده کرد، و در نتیجه از محاسبات ریشه مربع اجتناب گردد. اما، پیاده‌سازی معادله (۶-۷-۱) یا (۶-۷-۲)، برای تصاویری با اندازه‌های عملی، دارای محاسبات زیادی است، حتی اگر ریشه‌های مربع محاسبه نشود. روش مناسب‌تر این است که از جعبه انقباض<sup>۲</sup> استفاده شود که در شکل ۶-۴۳ پ) تشریح شده است. در این روش، مرکز جعبه  $\mathbf{a}$  است، و ابعادش در امتداد هر محور رنگ، متناسب با انحراف معیار نمونه‌ها در امتداد هر محور انتخاب شده است. محاسبه انحراف‌های معیار، فقط یک بار با استفاده از داده‌های رنگ انجام می‌شود.

با توجه به یک نقطه رنگی، آن را برحسب این که بر روی سطح باشد یا نباشد یا داخل جعبه باشد، بخش‌بندی می‌کنیم (مانند فرمول‌بندی فاصله). اما، تعیین این که نقطه در داخل یا خارج جعبه است، در مقایسه با حصار کره‌ای یا بیضوی، محاسبات ساده‌تری دارد. توجه کنید که بحث قبلی، تعمیم روشی است که در بخش ۳-۵-۶ درباره بخش‌بندی رنگ‌ها گفته شد.

#### مثال ۶-۱۵: بخش‌بندی تصویر رنگی در فضای RGB.

ناحیه چهارگوش نشان داده شده در شکل ۶-۴۴ الف) شامل نمونه‌هایی از رنگ‌های قرمز است که می‌خواهیم نسبت به تصویر رنگ، بخش‌بندی کنیم. این مسئله، مانند مسئله‌ای است که در مثال ۶-۱۴ با استفاده از پرده رنگ در

۱. محاسبه ماتریس کوواریانس نمونه‌های برداری در بخش ۴-۱۱ بحث خواهد شد.



شکل ۶-۴۴ بخش‌بندی در فضای RGB. از بالا (الف) تصویر اصلی با رنگ‌های مورد علاقه که توسط چهارگوش محصور شده است. (ب) نتیجه‌ی بخش‌بندی در فضای بردار RGB. با شکل ۶-۴ (ج) مقایس کنید.

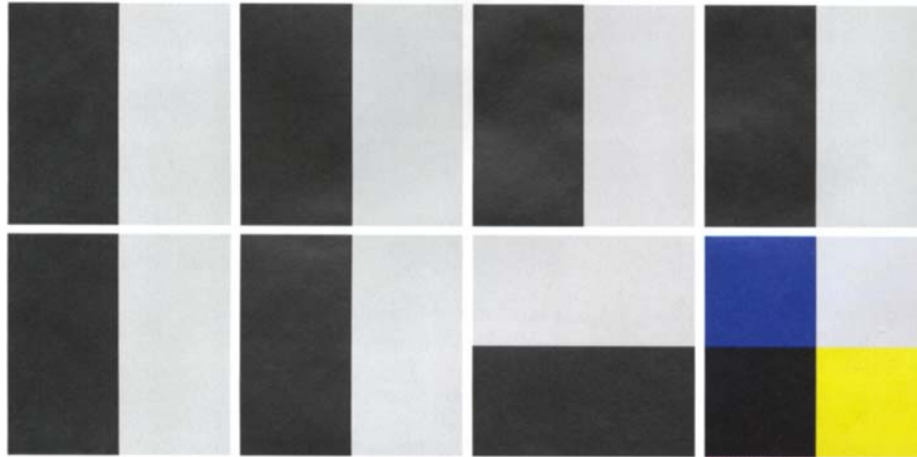
نظر گرفتیم. اما در این‌جا مسئله را با استفاده از بردارهای رنگ RGB حل می‌کنیم. در این روش، بردار میانگین  $\mathbf{a}$  با استفاده از نقاط رنگی موجود در چهارگوش شکل ۶-۴۴ (الف) محاسبه می‌شود، و سپس برای محاسبه انحراف معیار مقادیر قرمز، سبز و آبی این نمونه‌ها استفاده می‌گردد. مرکز جعبه،  $\mathbf{a}$  است و ابعاد آن در امتداد هر محور RGB،  $1/25$  برابر انحراف معیار داده‌ها در امتداد محور متناظر انتخاب شد. به عنوان مثال، فرض کنید  $\sigma_R$  نشان‌دهنده انحراف معیار مولفه‌های قرمز نقاط نمونه باشد، آنگاه ابعاد جعبه در امتداد محور  $R$ ، از  $(a_R - 1.25\sigma_R)$  به  $(a_R + 1.25\sigma_R)$  ادامه دارد، که  $a_R$  مولفه قرمز بردار میانگین  $\mathbf{a}$  را نشان می‌دهد. نتیجه‌ی رمزکردن هر نقطه در کل تصویر رنگی، سفید است اگر روی سطح یا داخل جعبه باشد، وگرنه سیاه است (شکل ۶-۴۴ (ب)). توجه کنید که چگونه ناحیه بخش‌بندی‌شده، از نمونه‌های رنگی محصورشده توسط مستطیل، تعمیم‌یافته است. در حقیقت، با مقایسه شکل‌های ۶-۴۴ (ب) و ۶-۲۴ (ج)، می‌بینیم که بخش‌بندی در فضای بردار RGB منجر به نتایجی شد که دقیق‌تر هستند، از این نظر

که خیلی نزدیک‌تر به چیزی است که به عنوان نقاط "قرمز" در تصویر رنگی اصلی تعریف می‌کنیم.

### ۶-۷-۳ تشخیص لبه رنگ

همان‌طور که در فصل ۱۰ بحث شد، تشخیص لبه، ابزار مهمی برای بخش‌بندی تصویر است. در این بخش، به موضوع محاسبه لبه‌ها بر اساس هر یک از تصویرها، در مقابل محاسبه لبه‌ها مستقیماً از فضای بردار رنگ می‌پردازیم. جزئیات بخش‌بندی بر اساس لبه، در بخش ۱۰-۲ آمده است.

تشخیص لبه با استفاده از عملیات‌های گرادیان، در بخش ۴-۶-۳ در ارتباط با تیزکردن تصویر معرفی شد. متأسفانه، گرادیان بحث‌شده در بخش ۴-۶-۳ برای کمیت‌های برداری تعریف نشده است. بنابراین، فوراً پی می‌بریم که محاسبه گرادیان روی هر یک از تصاویر، و سپس استفاده از نتایج برای ایجاد تصویر رنگی، منجر به نتایج نادرستی خواهد شد. با مثال ساده‌ای علت را تشریح خواهیم کرد.



شکل ۶-۴۵ الف) تا (پ) تصاویر مولفه‌های R، G و B. (ت) تصویر رنگی RGB حاصل. (ث) تا (چ) تصاویر مولفه R، G و B. (ح) تصویر رنگی RGB حاصل.

دو تصویر رنگی  $M \times N$  (فرد) در شکل‌های ۶-۴۵ (ت) و (ح) را در نظر بگیرید که مرکب از سه تصویر مولفه در شکل‌های ۶-۴۵ (الف) تا (پ) و (ت) تا (چ) است. اگر، به عنوان مثال، تصویر گرادیان هر تصویر مولفه را محاسبه کنیم (معادله ۳-۶-۱۱) را ببینید) و نتایج را جمع کنیم تا دو تصویر گرادیان RGB متناظر به دست آید، مقدار گرادیان در نقطه  $[(M+1)/2, (M+1)/2]$  در هر دو مورد یکسان خواهد بود. از نظر شهودی، انتظار داریم که گرادیان در آن نقطه، برای تصویر شکل ۶-۴۵ (ت) قوی‌تر باشد، زیرا لبه‌های تصاویر R، G و B در آن تصویر در یک جهت می‌باشند، و برعکس تصویر شکل ۶-۴۵ (ح) است که در آن فقط دو لبه در یک جهت قرار دارند. بنابراین، از این مثال ساده می‌بینیم که پردازش هر یک از سه صفحه برای ایجاد یک تصویر گرادیان مرکب می‌تواند منجر به نتایج نادرستی شود. اگر مسئله، تشخیص لبه باشد، آنگاه روش مبتنی بر هر یک از مولفه‌ها، معمولاً منجر به نتایج قابل قبولی می‌شود. اما، اگر دقت مورد نظر باشد، نیاز به تعریف جدیدی از گرادیان داریم که بتواند به کمیت‌های برداری اعمال شود. در ادامه، روشی را برای این کار بررسی خواهیم کرد که توسط دای زنزو [۱۹۸۶] پیشنهاد شد.

مسئله، تعریف گرادیان (اندازه و جهت) بردار  $c$  در معادله (۶-۴-۲) در هر نقطه  $(x, y)$  است. همان‌طور که اشاره شد، گرادیانی که در بخش ۳-۶-۴ بحث کردیم، به تابع اسکالر  $f(x, y)$  قابل اعمال است؛ و به توابع برداری قابل اعمال نیست. در ادامه، یکی از روش‌هایی را بررسی می‌کنیم که می‌توان مفهوم گرادیان را به توابع برداری بسط داد. به یاد داشته باشید که برای تابع اسکالر  $f(x, y)$ ، گرادیان، برداری است که به جهت ماکزیمم نرخ تغییر  $f$  در مختصات  $(x, y)$  اشاره می‌کند.

فرض کنید  $r$ ،  $g$  و  $b$  بردارهای واحدی در امتداد محور R، G و B در فضای رنگ RGB (شکل ۶-۷) باشند، و بردارهای زیر را تعریف می‌کنیم:

$$u = \frac{\partial R}{\partial x} r + \frac{\partial G}{\partial x} g + \frac{\partial B}{\partial x} b \quad (۶-۷-۳)$$

و

$$\mathbf{v} = \frac{\partial R}{\partial y} \mathbf{r} + \frac{\partial G}{\partial y} \mathbf{g} + \frac{\partial B}{\partial y} \mathbf{b} \quad (۶-۷-۴)$$

فرض کنید کمیت‌های  $g_{xx}$ ،  $g_{yy}$  و  $g_{xy}$  برحسب حاصلضرب نقطه‌ای این بردارها به صورت زیر تعریف شوند:

$$g_{xx} = \mathbf{u} \cdot \mathbf{u} = \mathbf{u}^T \mathbf{u} = \left| \frac{\partial R}{\partial x} \right|^2 + \left| \frac{\partial G}{\partial x} \right|^2 + \left| \frac{\partial B}{\partial x} \right|^2 \quad (۶-۷-۵)$$

$$g_{yy} = \mathbf{v} \cdot \mathbf{v} = \mathbf{v}^T \mathbf{v} = \left| \frac{\partial R}{\partial y} \right|^2 + \left| \frac{\partial G}{\partial y} \right|^2 + \left| \frac{\partial B}{\partial y} \right|^2 \quad (۶-۷-۶)$$

و

$$g_{xy} = \mathbf{u} \cdot \mathbf{v} = \mathbf{u}^T \mathbf{v} = \frac{\partial R}{\partial x} \frac{\partial R}{\partial y} + \frac{\partial G}{\partial x} \frac{\partial G}{\partial y} + \frac{\partial B}{\partial x} \frac{\partial B}{\partial y} \quad (۶-۷-۷)$$

به یاد داشته باشید که  $R$ ،  $G$  و  $B$ ، و در نتیجه،  $g$  تابعی از  $x$  و  $y$  هستند. با استفاده از این نمادگذاری، می‌توان نشان داد که (دای زنزو [۱۹۸۶])، جهت ماکزیمم نرخ تغییر  $\mathbf{c}(x, y)$  با زاویه زیر مشخص می‌شود:

$$\theta(x, y) = \frac{1}{2} \tan^{-1} \left[ \frac{2g_{xy}}{g_{xx} - g_{yy}} \right] \quad (۶-۷-۸)$$

و مقدار نرخ تغییر در  $(x, y)$ ، در جهت  $\theta(x, y)$ ، به صورت زیر مشخص می‌شود:

$$F_{\theta}(x, y) = \left\{ \frac{1}{2} [(g_{xx} + g_{yy}) + (g_{xx} - g_{yy}) \cos 2\theta(x, y) + 2g_{xy} \sin 2\theta(x, y)] \right\}^{\frac{1}{2}} \quad (۶-۷-۹)$$

چون  $\tan(\alpha) = \tan(\alpha \pm \pi)$ ، اگر  $\theta_0$  راه‌حلی برای معادله (۶-۷-۸) باشد، آنگاه  $\theta_0 \pm \pi/2$  نیز راه‌حل این معادله خواهد بود. علاوه‌براین،  $F_{\theta} = F_{\theta+\pi}$  است، لذا  $F$  فقط باید برای مقادیر  $\theta$  در فاصله نیمه‌باز  $[0, \pi)$  محاسبه شود. این حقیقت که معادله (۶-۷-۸) دو مقدار با فاصله  $90^\circ$  را فراهم می‌کند، بدان معنا است که این معادله به هر نقطه  $(x, y)$ ، جفتی از جهت‌های عمود بر هم را مربوط می‌کند. در امتداد یکی از آن‌ها  $F$  ماکزیمم است، و در ابتدای دیگری مینیمم است. مشتق این نتایج بسیار طولانی است که در این‌جا تا حدی آن را بررسی می‌کنیم. برای جزییات بیشتر به مقاله دای زنزو [۱۹۸۶] مراجعه کنید. مشتق‌های جزیی مورد نیاز برای پیاده‌سازی معادلات (۶-۷-۵) تا (۶-۷-۷)، مثلاً می‌تواند با استفاده از عملگرهای سوبل بحث‌شده در بخش ۴-۶-۳، محاسبه شود.

#### مثال ۱۶-۶: تشخیص لبه در فضای بردار.

شکل ۴۶-۶ (ب)، گرادیان تصویر شکل ۴۶-۶ (الف) است، که با استفاده از روش برداری بحث شده به دست آمد. شکل ۴۶-۶ (پ) تصویر به دست آمده توسط محاسبه گرادیان هر تصویر مولفه  $RGB$  و ایجاد تصویر گرادیان متضاد، با افزودن مقادیر متناظر سه تصویر مولفه در هر مختصات  $(x, y)$  را نشان می‌دهد. جزییات لبه تصویر گرادیان بردار، کامل‌تر از جزییات مربوط به تصویر گرادیان به ازای هر صفحه، در شکل ۴۶-۶ (پ) است.



شکل ۶-۴۶ (الف) تصویر RGB . (ب) گرادیان محاسبه شده در فضای بردار رنگ RGB . (پ) گرادیانهای محاسبه شده بر اساس هر تصویر و سپس اضافه شدن آنها. (ت) تفاوت بین (ب) و (پ).

به عنوان مثال، جزییات اطراف چشم راست فرد را ببینید. تصویر در شکل ۶-۴۶ (ت) تفاوت بین دو تصویر گرادیان را در هر نقطه  $(x, y)$  نشان می دهد. توجه به این نکته مهم است که هر دو روش منجر به نتایج معقولی می شوند. این که آیا جزییات فوق العاده در شکل ۶-۴۶ (ت) در برابر افزودن میزان محاسبات، ارزشمند است یا خیر (برعکس پیاده سازی عملگرهای سوپل، که برای تولید گرادیان هر یک از صفحات به کار رفت)، تنها به وسیله نیازمندی های مسئله تعیین می شود. شکل ۶-۴۷ سه تصویر گرادیان مولفه را نشان می دهد، که وقتی اضافه و مقیاس بندی شد، برای به دست آوردن شکل ۶-۴۶ (پ) استفاده شده است. ■

## ۶-۸ نويز در تصاویر رنگی

مدل های نويز بحث شده در بخش ۵-۲ برای تصاویر رنگی نیز قابل استفاده اند. معمولاً، محتوای نويز تصویر رنگی در هر کانال رنگی دارای ویژگی های یکسانی اند، اما کانال های رنگی ممکن است تأثیر متفاوتی از نويز بپذیرند. یک امکان، این است که الکترونیک کانال خاصی بد عمل کند. اما، سطوح مختلف نويز به احتمال زیاد



پ ب الف

**شکل ۶-۴۷** تصاویر گرادین مولفه‌ی تصویر رنگی در شکل ۶-۴۶ (الف) مولفه قرمز، (ب) مولفه سبز، (پ) مولفه آبی. این سه تصویر اضافه و مقیاس‌بندی شدند تا تصویر شکل ۶-۴۶ (پ) تولید شود.

ناشی از تفاوت‌ها در قدرت نسبی روشنی موجود در هر کانال رنگی است. به عنوان مثال، استفاده از فیلتر (حذف) قرمز در دوربین CCD، از قدرت روشنی حسگر قرمز می‌کاهد. حسگرهای CCD در سطوح پایین روشنی، نویز بیشتری دارند، لذا مولفه‌ی قرمز حاصل در تصویر RGB، در این وضعیت نسبت به دو تصویر مولفه دیگر، نویز بیشتری دارد.

#### مثال ۶-۱۷: تشریح آثار تبدیل تصاویر RGB نویزدار به HSI.

در این مثال، مختصری به نویز در تصاویر رنگی، و چگونگی حمل نویز در هنگام تبدیل از یک مدل رنگ به دیگری می‌پردازیم. شکل‌های ۶-۴۸ (الف) تا (پ) صفحه رنگی تصویر RGB را نشان می‌دهند که توسط نویز گوسی تخریب شدند، و شکل ۶-۴۸ (ت) تصویر RGB مرکب است. توجه کنید که این نوع نویز درشت در تصویر رنگی، نسبت به تصویر تک‌رنگ از نظر دیداری کمتر قابل توجه است. شکل‌های ۶-۴۹ (الف) تا (پ) نتیجه‌ی تبدیل تصویر RGB در شکل ۶-۴۸ (ت) را به HSI نشان می‌دهند. این نتایج را با مولفه‌های HSI تصویر اصلی (شکل ۶-۳۹) مقایسه کنید و ببینید که مولفه‌های پرده رنگ و اشباع تصویر نویزدار، چگونه به طور چشمگیری تقلیل یافتند. علتش، خطی‌نبودن عملیات‌های  $\min$  و  $\cos$  در معادلات (۶-۲-۲) و (۶-۲-۳) می‌باشد. از طرف دیگر، مولفه شدت در شکل ۶-۴۹ (پ) نسبت به هر یک از سه تصویر مولفه RGB نویزدار، هموارتر است. علتش، این حقیقت است که تصویر شدت، میانگین تصاویر RGB است که در معادله (۶-۲-۴) نشان داده شده است (از بحث بخش ۳-۶-۲ به یاد داشته باشید که میانگین‌گیری تصویر موجب کاهش نویز تصادفی می‌شود).

در مواردی که فقط یک کانال RGB تحت تأثیر نویز قرار می‌گیرد، تبدیل به HSI، نویز را به تمام تصاویر مولفه HSI پخش می‌کند. شکل ۶-۵۰ مثالی را نشان می‌دهد. شکل ۶-۵۰ (الف) یک تصویر RGB را نشان می‌دهد که تصویر سبز آن توسط نویز نمک و فلفل تخریب شده است، که در آن، احتمال نمک یا فلفل ۰/۰۵ است. تصاویر مولفه HSI در شکل‌های ۶-۵۰ (ب) تا (ت) نشان می‌دهند که نویز چگونه از کانال سبز RGB به تمام تصاویر HSI پخش شده است. البته، این وضعیت غیرمنتظره نیست، زیرا محاسبه مولفه‌های HSI از تمام مولفه‌های RGB استفاده می‌کنند که در بخش ۳-۶-۲ نشان داده شده است. ■

#### پردازش تصویر رنگی ۴۴۱



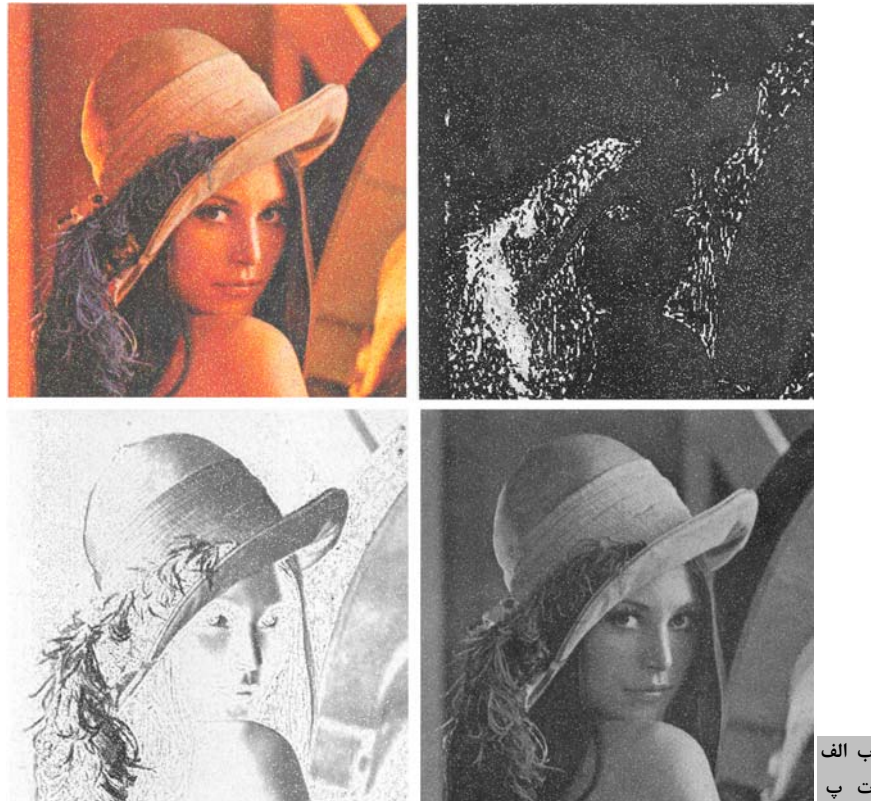
ب الف  
ت پ

شکل ۶-۴۸ (الف) تا (پ) تصاویر مولفه قرمز، سبز و آبی که با نویز گوسی جمع‌پذیری با میانگین صفر و واریانس ۸۰۰ تخریب شده است. (ت) تصویر RGB حاصل. ((ت) را با شکل ۶-۴۶ (الف) مقایسه کنید).



پ ب الف

شکل ۶-۴۹ مولفه‌های HSI تصویر رنگی نویزدار در شکل ۶-۴۸ (ت). (الف) پرده رنگ، (ب) اشباع، (پ) شدت.



شکل ۶-۵۰ (الف) تصویر RGB که صفحه سبز آن توسط نویز نمک و فلفل تخریب شده است. (ب) مولفه پرده رنگ تصویر HSI. (پ) مولفه اشباع. (ت) مولفه شدت.

فیلترکردن تصاویر تمام‌رنگی می‌تواند بر اساس هر تصویر یا مستقیماً در فضای بردار رنگ صورت گیرد، که به نوع پردازش بستگی دارد. به عنوان مثال، کاهش نویز با استفاده از فیلتر میانگین‌گیری، پردازشی است که در بخش ۱-۶-۶ بحث شد، و می‌دانیم که اگر تصاویر مولفه به طور مستقل پردازش شوند، نتایج یکسانی در فضای بردار ارائه می‌کند. اما، فیلترهای دیگر نمی‌توانند به این روش فرمول‌بندی شوند. مثال‌ها شامل دسته‌ای از فیلترهای مرتبه آماری است که در بخش ۲-۳-۵ بحث شدند. به عنوان مثال، برای پیاده‌سازی فیلتر میانه در فضای بردار رنگ، نیاز به یافتن طرحی برای مرتب‌سازی بردارها است، به طوری که میانه قابل استفاده باشد. گرچه این فرآیند در هنگام اداره اسکارها ساده بود، هنگام اداره‌کردن بردارها فرآیند پیچیده‌ای است. بحث در باره مرتب‌سازی بردار، خارج از حوزه این کتاب است.

## ۶-۹ فشرده‌سازی تصویر رنگی

چون تعداد بیت‌های مورد نیاز برای نمایش رنگ، معمولاً سه تا چهار برابر بیشتر از تعداد بیت‌ها در نمایش سطوح خاکستری است، فشرده‌سازی داده‌ها نقش مهمی در ذخیره‌سازی و انتقال تصاویر رنگی دارد. در مورد

تصاویر RGB، CMY(K)، و HSI مربوط به بخش قبل، داده‌های موردنظر برای فشرده‌سازی، مولفه‌های هر پیکسل رنگی است (یعنی مولفه‌های قرمز، سبز و آبی پیکسل‌ها در تصویر RGB)؛ آن‌ها ابزارهایی هستند که اطلاعات رنگ را حمل می‌کنند. فشرده‌سازی، فرآیند کاهش یا حذف داده‌های نامربوط زائد است. گرچه فشرده‌سازی موضوع فصل ۸ است، در مثال زیر، مفهوم آن را با استفاده از تصویر رنگی شرح می‌دهیم.

#### مثال ۱۸-۶: نمونه‌ای از فشرده‌سازی تصویر رنگی.

شکل ۵۱-۶ یک تصویر تمام‌رنگی ۲۴ بیتی RGB از زنبق را نشان می‌دهد که در آن هر ۸ بیت برای نمایش



شکل ۵۱-۶ فشرده‌سازی تصویر رنگی. از بالا (الف) تصویر اصلی. (ب) نتیجه فشرده‌سازی و سپس گسترده‌سازی تصویر (الف). ■

مولفه‌های قرمز، سبز و آبی به کار می‌روند. شکل ۵۱-۶ (ب) از نسخه‌ی فشرده‌ی تصویر در (الف) ساخته شد، و در حقیقت، حالت فشرده‌شده و سپس تخمین گسترده‌شده از آن تصویر است. گرچه تصویر فشرده مستقیماً نمایش داده نمی‌شود – قبل از ورود به مانیتور رنگی باید گسترده شود – تصویر فشرده، برای هر ۲۳۰ بیت از داده‌های تصویر اصلی، فقط یک بیت دارد. با فرض این‌که تصویر فشرده، مثلاً باید از طریق اینترنت به مدت یک دقیقه منتقل گردد، انتقال تصویر اصلی تقریباً ۴ ساعت طول می‌کشد. البته، داده‌های منتقل‌شده، برای مشاهده باید گسترده‌سازی<sup>۱</sup> شوند، اما گسترده‌سازی می‌تواند در چند ثانیه انجام گیرد. الگوریتم فشرده‌سازی JPEG 2000 که برای تولید شکل ۵۱-۶ (ب) به کار رفت، استاندارد جدیدی است که در بخش ۱۰-۲-۸ شرح داده شده است. توجه کنید که تصویر تخمینی بازسازی‌شده کمی مات است. این نتیجه، ویژگی تکنیک‌های فشرده‌سازی با تلفات<sup>۲</sup> است. با تغییر سطوح فشرده‌سازی می‌توان آن را کاهش داد یا حذف کرد. ■

## ۱۰-۶ مسئله‌ها

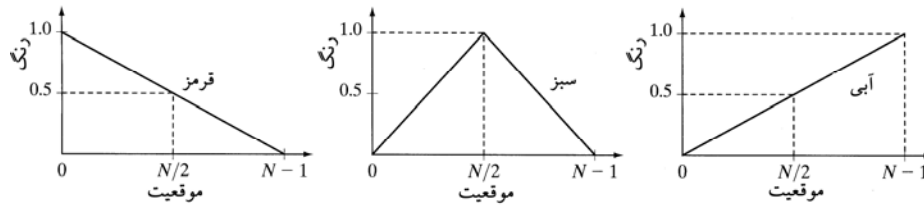
۱. درصد نور قرمز  $(X)$ ، سبز  $(Y)$  و آبی  $(Z)$  مورد نیاز برای تولید نقطه‌ای با برجسب "warm white" را در شکل ۵-۶ مشخص کنید.

\* ۲. دو رنگ معتبر  $c_1$  و  $c_2$  با مختصات  $(x_1, y_1)$  و  $(x_2, y_2)$  را در نمودار رنگینی شکل ۵-۶ در نظر بگیرید. عبارات کلی مورد نیاز برای محاسبه درصدهای نسبی رنگ‌های  $c_1$  و  $c_2$  تشکیل‌دهنده یک رنگ خاص را مشخص کنید که روی خط مستقیمی قرار دارند که این دو رنگ را به هم متصل می‌کنند.

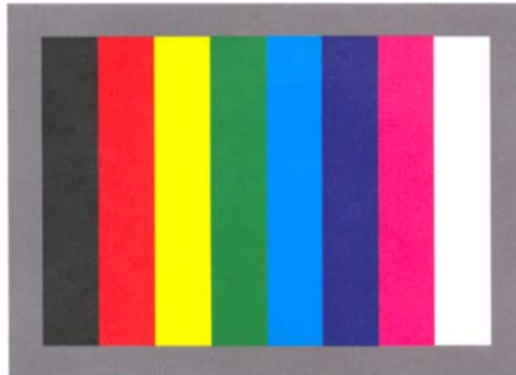
۳. سه رنگ معتبر  $c_1$ ،  $c_2$  و  $c_3$  با مختصات  $(x_1, y_1)$ ،  $(x_2, y_2)$  و  $(x_3, y_3)$  در نمودار رنگینی شکل ۵-۶ در نظر بگیرید. عبارات کلی مورد نیاز برای محاسبه درصدهای  $c_1$ ،  $c_2$  و  $c_3$  تشکیل‌دهنده یک رنگ را مشخص کنید که در داخل مثلثی قرار می‌گیرد که رئوس آن در مختصات  $c_1$ ،  $c_2$  و  $c_3$  قرار دارند.

\* ۴. در یک کاربرد مونتاژ خودکار، سه دسته از قطعات باید به صورت رنگی رمزگذاری شوند تا تشخیص آن‌ها آسان باشد. اما، فقط یک دوربین TV تک‌رنگ برای تصویربرداری دیجیتال موجود است. تکنیکی را برای استفاده از این دوربین پیشنهاد کنید که سه رنگ مختلف را تشخیص دهد.

۵. در یک تصویر RGB ساده، تصاویر مولفه  $R$ ،  $G$  و  $B$  دارای پروفایل شدت افقی‌اند که در نمودار زیر نشان داده شده است. فرد در ستون وسط این تصویر، چه رنگی را مشاهده خواهد کرد؟



\* ۶. تصویر زیر را به صورتی که در مانیتور تک‌رنگ نمایش داده می‌شوند، ترسیم کنیم. تمام رنگ‌ها در ماکزیمم شدت و اشباع قرار دارند. در حل این مسئله، مرز خاکستری میانی را به عنوان بخشی از تصویر در نظر بگیرید:

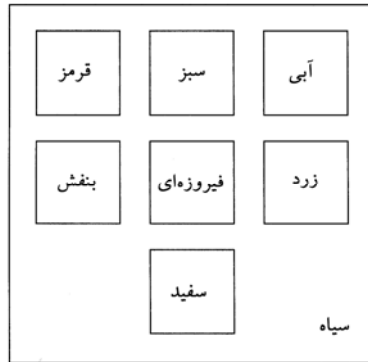


## ۴۴۵ پردازش تصویر رنگی

۷. در یک سیستم RGB که در آن، هر تصویر RGB یک تصویر ۸ بیتی است، چند سایه مختلف وجود دارند؟
۸. مکعب رنگ شکل ۸-۶ را در نظر بگیرید و به پرسش‌های زیر پاسخ دهید:
- \* الف. توضیح دهید در تصاویر اولیه R، G و B که وجه جلویی مکعب رنگ را می‌سازند، سطوح خاکستری چگونه تغییر می‌کنند.
- ب. فرض کنید هر رنگ در مکعب RGB را با رنگ CMY آن جایگزین کنیم. این مکعب جدید در مانیتور RGB نمایش داده می‌شود. نام رنگ را با هشت رأس مکعب جدیدی که در صفحه مشاهده خواهید کرد، برچسب‌گذاری کنید.
- پ. درباره رنگ‌های روی لبه‌های مکعب رنگی مربوط به اشباع، چه می‌توان گفت؟
۹. الف. مولفه‌های تصویر CMY در مسئله ۶ را به صورتی که در مانیتور تک‌رنگ نمایش داده می‌شوند، رسم کنید.
- ب. اگر مولفه‌های CMY رسم‌شده در (الف)، به ترتیب به ورودی‌های قرمز، سبز و آبی مانیتور رنگی وارد شوند، تصویر حاصل را توصیف کنید.
- \* ۱۰. تابع نگاشت شدت CMY در معادله (۶-۵) را از همتای RGB آن در معادله (۵-۵) به دست آورید.
۱۱. کل آرایه ۲۱۶ رنگ آمن نشان‌داده‌شده در شکل ۱۰-۶ (الف) را در نظر بگیرید. هر سلول را با (ستون وسط) آن برچسب‌گذاری کنید، به طوری که سلول بالای چپ (I, I) و سلول پایین راست (12, 18) باشد. در کدام سلول موارد زیر را می‌یابید:
- الف. خالص‌ترین سبز؟
- ب. خالص‌ترین آبی؟
- \* ۱۲. مولفه‌های HSI تصویر مسئله ۶ را آن‌طور که در مانیتور تک‌رنگ نمایش داده می‌شوند، رسم کنید.
۱۳. روشی را برای تولید باند رنگی، مشابه با آنچه که در بخش زوم‌شده با عنوان "طیف قابل رویت" در شکل ۲-۶ نشان داده شده است، پیشنهاد کنید. توجه کنید که باند از صورتی تیره در سمت چپ شروع می‌شود و به سمت قرمز خالص در سمت راست پیش می‌رود (راهنمایی: از مدل رنگ HSI استفاده کنید).
- \* ۱۴. روشی را برای تولید نسخه رنگی تصویر نشان‌داده‌شده در شکل ۱۳-۶ (الف) پیشنهاد کنید. پاسخ خود را به صورت نمودار گردشی ارائه کنید. فرض کنید مقدار شدت، معین و ثابت است (راهنمایی: از مدل رنگ HSI استفاده کنید).
۱۵. تصویر زیر را در نظر بگیرید که شامل مربع‌های رنگی است. برای بحث درباره پاسخ خود، یک مقیاس خاکستری را در نظر بگیرید که شامل هشت سایه از خاکستری، صفر تا ۷ است که صفر سیاه و ۷ سفید است. فرض کنید تصویر به فضای رنگ HSI تبدیل شده است. در پاسخ به پرسش‌های زیر، از اعداد خاصی برای سایه‌های خاکستری استفاده کنید (اگر استفاده از اعداد مناسب است). وگرنه، روابطی مثل "مشابه با"، "روشن‌تر از"، یا "تیره‌تر از" کافی‌اند. اگر نمی‌توانید یک سطح خاکستری خاص یا یکی از این روابط را در تصویر موردنظر تعیین کنید، علت را شرح دهید:
- الف. تصویر پرده رنگ را رسم کنید.

ب. تصویر اشباع را رسم کنید.

پ. تصویر شدت را رسم کنید.

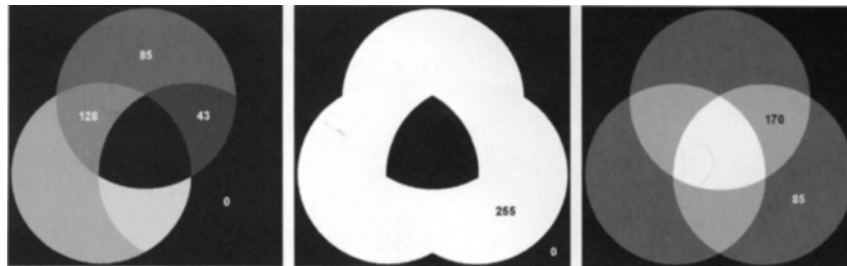


۱۶. تصاویر ۸ بیتی زیر (از چپ به راست) مولفه‌های H، S و I در شکل ۱۶-۶ است. اعداد، مقادیر سطح خاکستری را نشان می‌دهند. به پرسش‌های زیر پاسخ دهید، و مبنای پاسخ خود را شرح دهید. اگر نتوانید بر اساس اطلاعات داده‌شده پاسخ دهید، علت را شرح دهید.

\* الف. مقادیر سطح خاکستری تمام ناحیه‌ها در تصویر پرده رنگ را مشخص کنید.

ب. مقادیر سطح خاکستری تمام ناحیه‌ها در تصویر اشباع را مشخص کنید.

پ. مقادیر سطح خاکستری تمام ناحیه‌ها در تصویر شدت را مشخص کنید.



(الف)

(ب)

(پ)

۱۷. با مراجعه به شکل ۲۷-۶، به پرسش‌های زیر پاسخ دهید:

الف. چرا تصویر شکل ۲۷-۶ (ج) تن‌های قرمز را غالب نشان می‌دهد؟

ب. یک رویه خودکار برای رمزگذاری آب در شکل ۲۷-۶ به رنگ آبی روشن، پیشنهاد کنید.

پ. یک رویه خودکار برای رمزگذاری مولفه‌های عمده‌ی ترسیم دستی به رنگ زرد روشن، پیشنهاد کنید.

(راهنمایی: با شکل ۲۷-۶ کار کنید).

\* ۱۸. نشان دهید که مولفه اشباع مکمل تصویر رنگی نمی‌تواند فقط از مولفه اشباع تصویر ورودی محاسبه شود.

## ۴۴۷ پردازش تصویر رنگی

۱۹. شکل تابع تبدیل پرده رنگ را برای تخمین مکمل در شکل ۳۳-۶ (ب)، با استفاده از مدل رنگ HSI، تشریح کنید.

\*۲۰. تبدیلات CMY را برای تولید مکمل تصویر رنگی مشخص کنید.

۲۱. شکل کلی توابع تبدیل مورد استفاده برای کنتراست صحیح را در فضای رنگ RGB مشخص کنید.

\*۲۲. فرض کنید مانیتور و چاپگر سیستم تصویربرداری، به طور نامناسب تنظیم شده است. تصویری که در مانیتور، متوازن به نظر می‌رسد، در چاپگر به رنگ زرد چاپ می‌شود. تبدیلات کلی را توصیف کنید که بتواند عدم توازن را اصلاح کند.

۲۳. مولفه‌های  $L^*a^*b^*$  تصویر در مسئله ۶ را با فرض زیر محاسبه کنید:

$$\begin{bmatrix} X \\ Y \\ Z \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0.588 & 0.179 & 0.183 \\ 0.29 & 0.606 & 0.105 \\ 0 & 0.068 & 1.021 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} R \\ G \\ B \end{bmatrix}$$

این معادله ماتریسی، سه مقدار محرک رنگ‌ها را تعریف می‌کند که توسط استاندارد NTSC<sup>۱</sup> فسفرهای TV رنگی، تحت روش استاندارد D65 مشاهده شد (بنسون [۱۹۸۵]).

\*۲۴. معادل رنگی تطبیق هیستوگرام (مشخصات) مقیاس خاکستری در بخش ۲-۳-۳ را چگونه پیاده‌سازی می‌کنید؟

۲۵. تصویر RGB زیر را به اندازه  $500 \times 500$  در نظر بگیرید، که در آن مربع‌ها رنگ‌های قرمز، سبز و آبی اشباع شده‌اند، و هر رنگ در ماکزیمم شدت خود قرار دارد (مثلاً  $(1, 0, 0)$  برای مربع قرمز). یک تصویر HSI از این تصویر ایجاد شد.

الف. نمای هر تصویر مولفه HSI را توصیف کنید.

ب. مولفه اشباع تصویر HSI با استفاده از نقاب میانگین‌گیری به اندازه  $125 \times 125$  هموار شده است. نمای نتیجه را توصیف کنید (ممکن است در عمل فیلترکردن، از آثار مرز تصویر صرف‌نظر کنید).

پ. (ب) را برای تصویر پرده رنگ تکرار کنید.

سبز	قرمز
آبی	سبز

۲۶. نشان دهید که اگر  $C = I$  باشد، معادله  $(6-7-2)$  به  $(6-7-1)$  تبدیل می‌شود. توجه کنید که  $I$  ماتریس همانی است.

1. National Television System Committee

۲۷. \* الف. با مراجعه به بحث بخش ۲-۷-۶، رویه‌ای را (به شکل نمودار گردشی) ارائه کنید تا تعیین نماید که آیا بردار رنگ  $z$  در داخل مکعبی با اضلاعی به پهنای  $W$  و به مرکز میانگین بردار رنگ  $a$  قرار دارد یا خیر. محاسبه فاصله مجاز نیست.

ب. اگر جعبه توسط محورهای قطع شود، این فرآیند می‌تواند بر مبنای تصویر به تصویر نیز انجام گیرد. چگونه این کار را انجام می‌دهید؟

۲۸. در فضای RGB، برای نقاطی که در معادله صدق می‌کنند، سطح<sup>۱</sup> را رسم کنید.

$$D(z, a) = [(z - a)^T C^{-1} (z - a)]^{\frac{1}{2}} = D_0$$

که  $D_0$  یک ثابت غیر صفر مشخص شده است. فرض کنید  $a = 0$  و داریم:

$$C = \begin{bmatrix} 8 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

۲۹. به بخش ۳-۷-۶ مراجعه کنید. ممکن است تصور کنید که یک روش منطقی برای تعریف گرادیان تصویر RGB در هر نقطه  $(x, y)$ ، محاسبه بردار گرادیان هر تصویر مولفه است و سپس با جمع کردن سه بردار گرادیان، یک بردار گرادیان را برای تصویر رنگی ارائه کنید. متأسفانه، این روش در اغلب موارد منجر به نتایج نادرست می‌شود. در این روش، مخصوصاً، ممکن است تصویر رنگی که لبه‌های آن به روشنی تعریف شدند، دارای گرادیان صفر باشد. نمونه‌ای از چنین تصویری را ارائه کنید (راهنمایی: برای آسان شدن تحلیل، مقدار یکی از صفحات رنگی را ثابت در نظر بگیرید).

---

1. surface