

# ادغام اطلاعات تصاویر سنجنده ها در کاربردهای

## سنجش از دور با بهره گیری از مدل چشم

محمد رضا ولوی<sup>۱</sup>، محمد حسن قاسمیان<sup>۲</sup>.

### چکیده

توسعه فن آوری ماهواره های سنجش از دور، قابلیت زیادی در تولید تصاویر چند طیفی ایجاد نموده است. این تصاویر بر حسب نوع کاربرد دارای ویژگی های مکانی، طیفی و رادیومتری مختلفی هستند. ادغام اطلاعات موجب افزایش کاربری آن گشته، بنحوی که می توان به تصویر جدید با اطلاعات جامع تر دسترسی پیدا کرد. در دهه اخیر الگوریتم های مختلفی برای افزایش توام دقت مکانی و طیفی این تصاویر ابداع و ارائه شده است. مشهورترین آنها تبدیل برای، IHS، PCA و تبدیل موجک است. روش های مذکور، هر کدام به نوعی سبب تخریب در اطلاعات طیفی و مکانی تصاویر می شوند. در این مقاله یک روش جدید، الهام گرفته از مدل شبکه چشم ارائه شده است. یکی از ویژگی های این روش عدم نیاز به فرایند نمونه برداری مجدد است، که در تمامی روش های قبلی اجتناب ناپذیر بوده. و یک فرایند مخرب اطلاعات مکانی محسوب می شود. نتایج پیاده سازی بر روی تصاویر چند طیفی ماهواره لندست و تصویر تک رنگ ماهواره اسپات موید بهینه بودن الگوریتم جدید، از نظر حفظ اطلاعات طیفی و مکانی می باشد.

### کلمات کلیدی:

ادغام اطلاعات - دقت مکانی - دقت طیفی - تصاویر چند دقتی - تصاویر چند طیفی - سنجش از دور - مدل شبکه چشم.

## *Multi-Sensor Image Data Fusion in Remote Sensing Applications*

M.R. Valavi, M.H. Ghassemian

### ABSTRACT

The information content of a single image is mainly limited by the spatial and spectral resolution of the imaging system. Current imaging systems offer a trade-off between high spatial and high spectral resolutions. No single system offers both of these characteristics. In order to obtain the both characteristics in a single image, that is high spatial and spectral resolutions, a technique image fusion can be employed. Image fusion can incorporate the processing principles of human vision. This paper presents a multi-resolution data fusion scheme, based on visual channels image decomposition. In this method, there is no need to resample images, which is an advantage over IHS, PCA, Brovey and wavelet methods, it can perform in any aspect ratio between the panchromatic image and multi-spectral images' pixels. The re-sampling procedure degrade the spectral features of the multi-spectral images in any image merging method, so, it is important to avoid the re-sampling process as much as possible.

### KEY WORDS

Image Fusion-Spatial Resolution-Spectral Resolution-Retina Model-Multispectral -Multiresolution.

<sup>۱</sup> دانشگاه تربیت مدرس - بخش مهندسی برق و کامپیوتر - تهران - [rzvalavi@yahoo.com](mailto:rzvalavi@yahoo.com)

<sup>۲</sup> استاد دانشگاه تربیت مدرس - بخش مهندسی برق و کامپیوتر - تهران - ص پ ۱۱۱-۱۴۱۱۵: [ghassemi@modares.ac.ir](mailto:ghassemi@modares.ac.ir)

دوم روش های آماری بر پایه مشخصات آماری باندها از جمله میزان همبستگی استوار است، مانند تبدیل PCA. همچنین روشهای حسابی و عددی از عملیات ریاضی مانند ضرب، جمع، اختلاف و نسبت بین باندها استفاده می کنند. یکی از روش های ریاضی تبدیل موجک در محیط های چنددقتی است.

## ۲-۱- روش تبدیل برای در ادغام تصاویر چند دقتی

این تبدیل ساده به منظور ترکیب دو سری تصویر با قدرت مکانی متفاوت ارائه شده است [۴]. در این روش مقدار هر باند  $TM$  بر مجموعه ای از دیتای  $TM$  تقسیم و سپس در مقدار  $PAN$  با قدرت تفکیک مکانی بالا ضرب می شود با تنظیم مقدار تأثیر تصویر تک رنگ  $PAN$  می توان کیفیت طیفی اطلاعات  $TM$  را حفظ کرد.

$$\begin{aligned} R &= \frac{TM_i}{TM_i + TM_j + TM_k} \cdot PAN \\ G &= \frac{TM_j}{TM_i + TM_j + TM_k} \cdot PAN \\ B &= \frac{TM_k}{TM_i + TM_j + TM_k} \cdot PAN \end{aligned} \quad (1)$$

که در آن  $i, j, k$  شماره باندهای  $TM$  است. با انتخاب هر باند و نمایش آن بصورت یک رنگ می توان تصویر را بصورت RGB استخراج و با ادغام تصویر  $PAN$  تفکیک مکانی را افزایش داد. این عمل سبب افزایش شدت روشنایی و وضوح تصویر می گردد [۵]. توجه شود که اضافه کردن اطلاعات مکانی  $PAN$  موجب اعوجاج در ویژگی های طیفی می شود. این روش برای تفسیر خودکار از جمله طبقه بندی مناسب نیست.

ابتدا تصاویر چند طیفی اطلاعات  $TM$  با دقت مکانی تصویر  $PAN$  از نظر دقت نمونه برداری یکسان می شوند. برای اینکه ادغام با کیفیت بهتری انجام شود لازم است که هیستوگرام مؤلفه  $PAN$  را قبل از ادغام با هیستوگرام مؤلفه  $TM$  معادل کرد.

## ۲-۲- روش تبدیل IHS در ادغام تصاویر چند دقتی

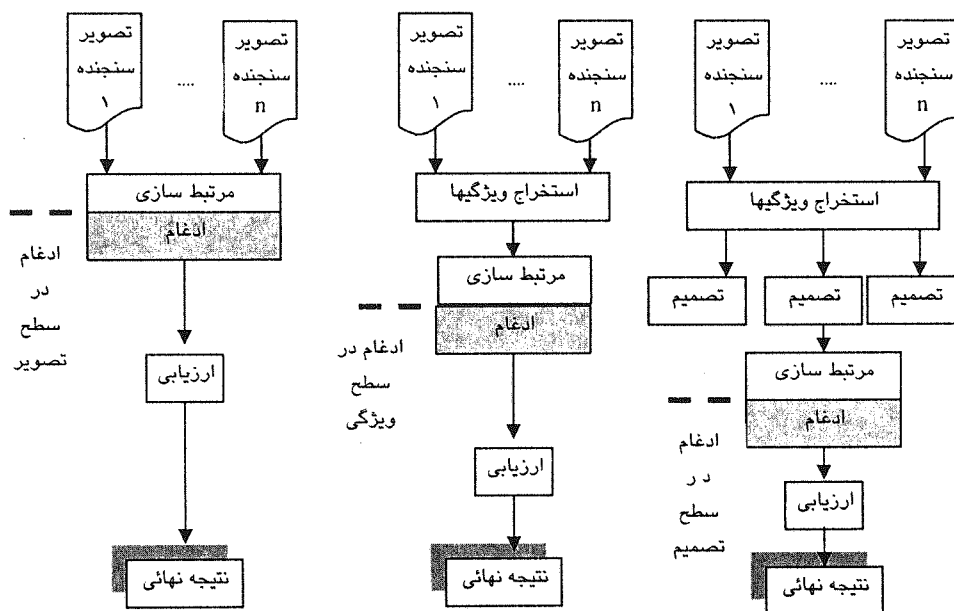
در این روش سه باند  $TM$ ، با قدرت تفکیک مکانی پایین به فضای مختصات IHS تبدیل می شود.  $I$  شدت روشنایی،  $H$  میزان رنگ متناسب با طول موج روشنایی و  $S$  اشباع میزان خلوص رنگ است. در این تبدیل  $I$  (متوسط مکانی متناظر با ناهمواری های سطح زمین) و  $S$  و  $H$  (اطلاعات طیفی بازتاب) طبق رابطه (۳) از تصویر RGB استخراج می شوند. اطلاعات مکانی با تفکیک بالا جایگزین اطلاعات مکانی  $I$  می گردد. سپس عملیات تبدیل عکس طبق رابطه (۴) انجام می شود [۶]. توجه

در سنجنش از دور، ماهواره های کاوشگر زمینی اطلاعات تصویری را از قسمت های مختلف سطح زمین در زمان های مختلف تهیه می کنند. این اطلاعات دارای دقت های رادیومتری، طیفی و مکانی متفاوتی می باشند. برای بهره برداری مؤثر از این اطلاعات متنوع، از فناوری ادغام استفاده می شود. در این فناوری تصاویر ادغام شده قابلیت و نمود بهتری برای نمایش، تفسیر و بهره برداری داشته و نتایج قابل اعتمادتری ارائه می کنند. به عبارت دیگر هدف ادغام تصاویر بکاربردن داده های متفاوت برای دستیابی به اطلاعات بیشتر است، اطلاعاتی که در هر یک از منابع اولیه به تنهایی قابل حصول نیست [۱].

ادغام اطلاعات تصویر در سطوح دیتا، ویژگی، و تصمیم انجام می شود (شکل (۱)). اگر ادغام در سطح پائین (سطح تصویر) انجام شود، اطلاعات کامل تر ولی حجم پردازش بالاست و در صورتی که در سطح بالا (سطح تصمیم) صورت پذیرد، اطلاعات کمتری در ادغام وجود دارد و پردازش سریع تر نتیجه خواهد داد [۲]. فرایند ادغام اطلاعات به دو بخش آماده سازی اطلاعات، و بخش ادغام قابل تفکیک هستند. آماده سازی اطلاعات خود شامل سه وظیفه هم مختصات کردن، مرتبط سازی و استخراج ویژگی های، تصاویر شرکت کننده در ادغام می باشد [۳]. پس از دریافت تصاویر سنجنش از دور، تصحیحات رادیومتری صورت می گیرد. در بسیاری از کاربردها، قبل از فرایند فوق، فیلتر لکه گیری اعمال می شود، تا اندازه گیری مربوط به نقاط مرجع زمینی با دقت بیشتری انجام پذیرد. همچنین، تقویت لبه ها جهت جبران اعوجاجات ناشی از تغییر زاویه دوربین و اختلاف سطح صحنه، مؤثر است. یکی دیگر از پیش پردازش ها، همسان سازی دقت مکانی تصاویر است. اگر دقت مکانی تصاویر همسان نباشد، با فرایند نمونه برداری مجدد رقومی، تصاویر با کمترین دقت مکانی یکسان می شوند، که باعث ظهور بلوک های نامطلوب در بافت تصاویر می شود. برای حذف این پدیده می توان از فیلترهای هموارسازی استفاده کرد. برای تصاویر استفاده شده در این تحقیق نیازی به این پیش پردازش ها وجود ندارد.

## ۲- روش های متداول در ادغام تصاویر

روش های ادغام تصاویر به دو گروه عمده روشهای مبتنی بر رنگ و روشهای ریاضی تقسیم می شود. گروه اول شامل ترکیب های رنگی از سه باند تصویر در فضای رنگ RGB یا روش های تبدیل پیچیده تر مانند تبدیل برای ادغام تصاویر



شکل (۱): بلوک دیاگرام سطوح مختلف ادغام اطلاعات تصویر

شود که قبلاً اجزای  $H$  و  $S$  با دقت مکانی  $PAN$  از نظر دقت نمونه برداری یکسان می‌شوند. روش وقتی همبستگی بین مؤلفه های رنگی زیاد باشد به بالابردن کیفیت و تنظیم رنگ کمک می کند [۶].

$$\begin{bmatrix} TM^h_i \\ TM^h_j \\ TM^h_k \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{1}{\sqrt{3}} & \frac{1}{\sqrt{6}} & \frac{1}{\sqrt{2}} \\ \frac{1}{\sqrt{3}} & \frac{1}{\sqrt{6}} & -\frac{1}{\sqrt{2}} \\ \frac{1}{\sqrt{3}} & -\frac{2}{\sqrt{6}} & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} PAN \\ S \cos(H) \\ S \sin(H) \end{bmatrix} \quad (3)$$

$$\begin{bmatrix} I \\ V1 \\ V2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{1}{\sqrt{3}} & \frac{1}{\sqrt{3}} & \frac{1}{\sqrt{3}} \\ \frac{1}{\sqrt{6}} & \frac{1}{\sqrt{6}} & \frac{1}{\sqrt{6}} \\ \frac{1}{\sqrt{2}} & -\frac{1}{\sqrt{2}} & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} TM_i \\ TM_j \\ TM_k \end{bmatrix}$$

$$H = \tan^{-1} \left( \frac{V2}{V1} \right), \quad S = \sqrt{V1^2 + V2^2} \quad (2)$$

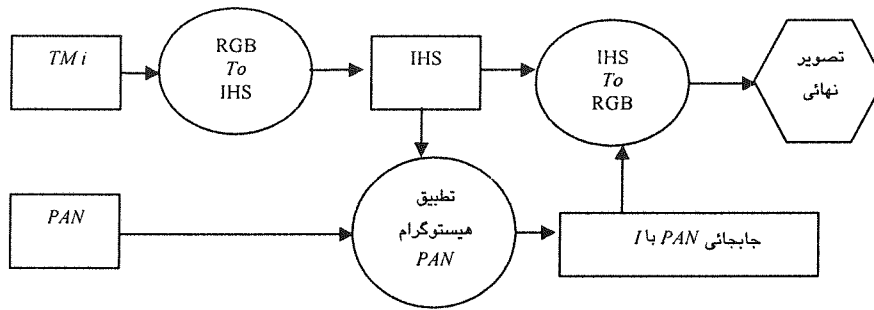
### ۲-۳- روش تبدیل PCA در ادغام تصاویر چند دقتی

این تبدیل بر پایه خواص آماری و استفاده از ماتریس کواریانس باندهای TM استوار است. در این روش تصاویر با همبستگی زیاد به فضای دیگری که بین دیتا همبستگی آماری وجود ندارد تبدیل می‌شود. و در نتیجه تصاویر بر روی تعدادی پایه متعامد بسط داده می‌شود. بر حسب شرایط می‌توان تعدادی محدود از باندها و یا تمامی باندها را متناسب با اطلاعات قبلی انتخاب نمود. در خروجی نیز می‌توان از تعدادی مؤلفه اصلی استفاده نمود. مثلاً در TM سه مؤلفه اصلی اول حدود ۹۹ درصد کل اطلاعات را دربر دارند، و در نتیجه برای اکثر کاربردها کفایت می‌کند [۷].

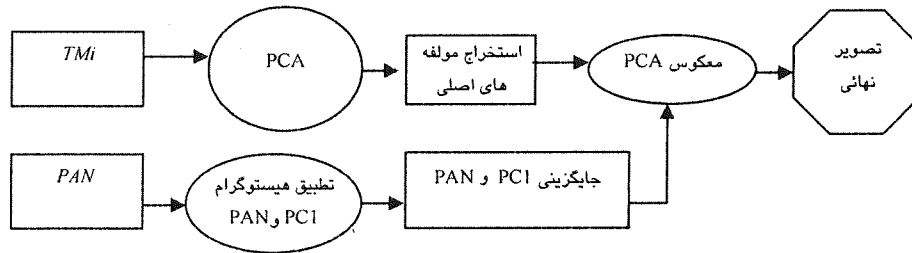
در این روش از یک تصویر با دقت مکانی بالا (PAN) و جایگزینی مؤلفه PCI، با این تصویر استفاده می‌شود. کانالی که با PCI جابجا می‌شود به اندازه واریانس و میانگین آن گسترش می‌یابد (شکل ۳). در این روش از یک تبدیل خطی از فضای چند طیفی به فضای بردار ویژه استفاده می‌شود. اگر  $X$  یک بردار  $1 \times n$  از یک پیکسل مشخص از تصویر  $n$  باندی باشد، آنگاه تبدیل PCA به فرم زیر تعریف می‌گردد:

در این رابطه  $I$  روشنایی ناشی از بازتاب،  $V1$  و  $V2$  متغیرهای واسط،  $H$  درجه رنگ و  $S$  درجه اشباع می باشد. در شیوه جایگزینی فوق تنها ۳ باند مناسب به عنوان مؤلفه های  $R$  و  $G$  و  $B$  انتخاب و با استفاده از رابطه بالا تبدیل می‌شوند.

پس از محاسبه مؤلفه های  $I$ ،  $H$  و  $S$  بر طبق معادلات (۲) مؤلفه  $I$  آن با تصویر تک رنگ  $PAN$  جابجا می‌شود. برای اینکه ادغام با کیفیت بهتری انجام شود لازم است که هیستوگرام مؤلفه  $PAN$  را قبل از ادغام به هیستوگرام مؤلفه  $I$  تبدیل کرد. برای این کار ابتدا هیستوگرام این تصویر بصورت خطی چنان گسترش می‌یابد (و یا فشرده می‌شود) که متوسط و انحراف معیار نمونه های آن با متوسط و انحراف معیار نمونه های مؤلفه های  $I$  هریک از باند های  $TM$  بطور جداگانه همسان گردد. در نهایت بایک تبدیل معکوس IHS تصویر ادغام شده به فضای RGB باز گردانیده می‌شود (شکل ۲). روش IHS به یک روش متعارف در نرم افزار های کاربردی سنجش از دور (از قبیل ERmapper و ERDOS) تبدیل شده است. این



شکل (۲): مدل عمومی تبدیل IHS



شکل (۳): دیاگرام عمومی تبدیل PCA

افقی، عمودی و قطری و یک تصویر تقریب خام تجزیه می شوند. در آزمایشات انجام شده سطح تجزیه در سه سطح انجام شده است. این سطوح تجزیه در جدول های (۱) و (۲) و (۳) با نشانه WT1 و WT2 و WT3 نشان داده شده است [۹]. در روابط زیر چگونگی این تبدیل بیان شده است.

$$\{H_{j,l}, V_{j,l}, D_{j,l}, \dots, H_{j,L}, V_{j,L}, D_{j,L}, A_{j,L}, j=1,2\} \quad (5)$$

جفت زیر تصویر های  $I_1$  و  $I_2$  ادغام می یابند که نتیجه به صورت زیر نشان داده می شود:

$$\{H_1, V_1, D_1, \dots, H_L, V_L, D_L, A_L\} \quad (6)$$

در نهایت با تبدیل موجک معکوس ضرایب تعمیم یافته، تصویر ادغام یافته نهایی بازسازی می گردد. تجزیه موجک تصویر شامل عملیات فیلترینگ دو جهته و زیر نمونه برداری با مضربی از دو است. از آنجا که مقیاس و تابع موجک جدا پذیر هستند، تجزیه تصویر را می توان با استفاده از بسط جدا پذیر تجزیه تک بعدی روی ردیف ها و ستون ها بدست آورد. در هر مرحله تبدیل، تصویر به چهار زیر تصویر تجزیه می شود. بعنوان نمونه اگر  $A_{j,k}$  ( $j=1,2; k=0, \dots, L; I; A_{j,l}=I_j$ ) را چهار زیر تصویر  $A_{j,k+1}, H_{j,k+1}, V_{j,k+1}$  و  $D_{j,k+1}$  همانگونه که در شکل (۵) نشان داده شده، تجزیه می گردد.

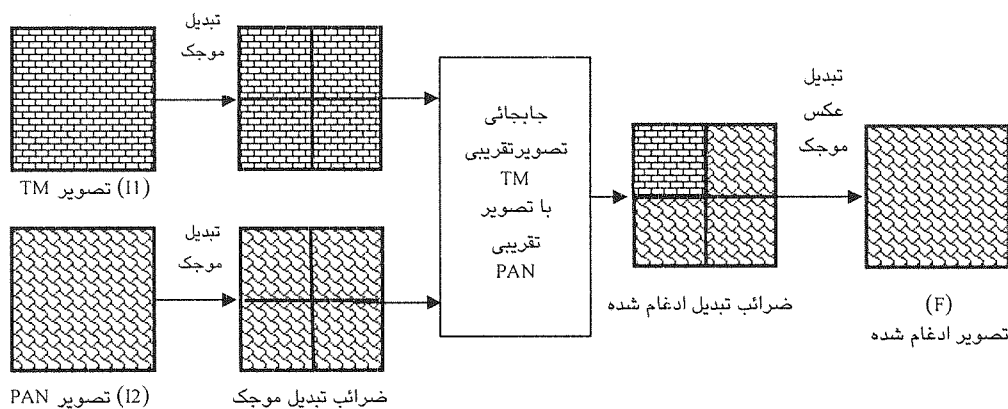
جزء  $A_{j,k+1}$  که بعد از دو بار عبور از فیلتر پایین گذر بدست می آید، تقریب تصویر  $A_{j,k}$  نامیده می شود. این جز برای مراحل بعدی تبدیل موجک بعنوان تصویر اولیه و ورودی

$$Y = A^T X \quad (4)$$

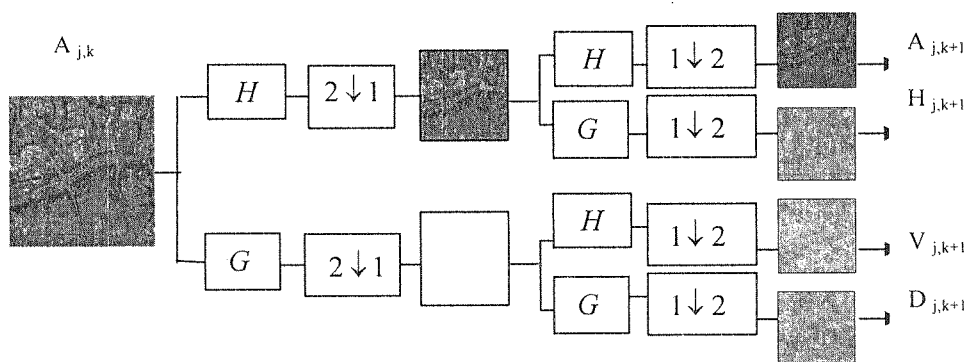
ماتریس  $A$  شامل بردارهای ویژه که ماتریس کواریانس  $X$  را چنان متعامد می کند که ماتریس کواریانس  $Y$  بصورت قطری در می آید.  $\lambda$  نشانه ترانواده می باشد. که در آن  $\lambda_1, \lambda_2, \lambda_3, \dots, \lambda_n$  مقادیر ویژه ماتریس کواریانس هستند. برای ادغام تصاویر باندهای TM با تصاویر تک رنگ، ابتدا تمام شش باند TM مورد استفاده قرار می گیرد. سپس با اعمال تبدیل  $Y = A^T X$  اجزاء اصلی بدست می آید، که همگی از هم مستقلند در تصویر PC1 اطلاعاتی وجود دارد که بیشترین همبستگی را با هر شش باند دارد. در اولین قدم تصویر تک رنگ PAN متناسب برهستوگرام PC1 گسترش یافته، تا دارای میانگین و واریانس مشابه شوند. سپس برای دستیابی به تصویر ادغام شده از تبدیل معکوس PCA استفاده می شود.  $X = A^{-1} Y$  در این شرایط اطلاعات طیفی تصویر جدید به همان اندازه تصویر  $X$  اولیه حفظ می شود.

#### ۲-۴- روش تبدیل موجک در ادغام تصاویر چند دقتی

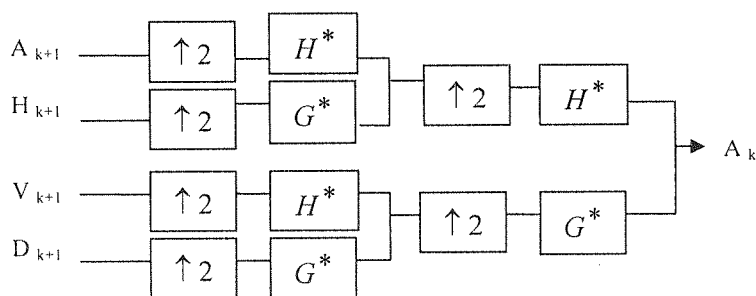
موجک هاتوابعی هستند که داده ها را به مؤلفه های فرکانسی مجزا تجزیه کرده و هر مؤلفه را بادقت تفکیکی که متناسب با مقیاس آنست بیان می نماید [۸]. روش کلی ادغام مبتنی بر موجک در شکل (۴) نشان داده شده است.  $I_1$  تصویر PAN و  $I_2$  تصاویر TM که ابتدا تثبیت شده اند تحت فرایند ادغام قرار می گیرند. F تصویر نهایی ادغام شده است.  $I_1$  و  $I_2$  در ابتدا بوسیله تبدیل موجک در یک یا چند مرحله به زیر تصویر جزئی



شکل (۴): شمای کلی الگوریتم ادغام مبتنی بر موجک



شکل (۵-الف): دو مرحله از تجزیه تبدیل موجک دو بعدی



شکل (۵-ب): بازسازی موجک تصویر  $A_{k+1}, H_{k+1}, V_{k+1}$  و  $D_{k+1}$

بازیافت است. دیاگرام این فرایند در شکل (۵-ب) نشان داده شده است.  $H^*$  و  $G^*$  به ترتیب معکوس شده  $H$  و  $G$  هستند.

### ۳- مدل چشم و کاربرد آن در ادغام تصاویر

در سیستم های سنجش از دور (مانند سیستم بینائی) یک نمونه از پیکسل تصویر در طیف های الکترومغناطیسی متفاوتی مشاهده می شود. اکثر این سیستم ها با مجموعه ای از محدودیت ها، و مصالحه ای بین دقت مکانی و دقت طیفی عمل می کنند. برای افزایش اطلاعات طیفی ناگزیر باید فوتون های

بکار می رود.  $D_{j,k+1}$  و  $V_{j,k+1}, H_{j,k+1}$  حاوی اطلاعات فرکانس بالای افقی، عمودی و مایل (جزئیات تصویر  $A_{j,k}$ ) می باشند. در شکل (۵-الف) یک فیلتر پایین گذر و  $G$  یک فیلتر بالاگذر است. بعد از تجزیه، ضرایب جزئی  $H_{j,k}, V_{j,k}, D_{j,k}$  و  $A_{j,k}$  به ترتیب با  $cD_{j,k}, cV_{j,k}, cH_{j,k}$  و  $cA_{j,k}$  نمایش داده می شوند [۱۰]. الگوریتم ادغام تصاویر جزئیات افقی، عمودی و قطری حاصل از تصویر PAN را جایگزین تصاویر جزئیات افقی، عمودی و قطری حاصل از تصاویر TM می کند. سپس، بر عکس آنچه در تجزیه موجک عنوان شد، تبدیل موجک معکوس یا بازسازی موجک یک عملیات نمونه برداری افزایشی و

بیشتری جذب شود که این خود عاملی برای افزایش سطح نمونه و کاهش دقت مکانی است در فرایند ادغام تصاویر سعی بر این است که اطلاعات طیفی تصاویر با خصوصیات طیفی بالا در مرحله ادغام حفظ شود. عملکرد دوربین سنجنده ها مشابهت زیادی با مدل چشم دارد. چشم اطلاعات اپتیکی را به سیگنال های الکتریکی تبدیل می نماید ضمن اینکه پردازش اولیه را برای انتقال تصویر به سطوح بعدی انجام می دهد. آزمایش های فیزیولوژی بینائی نشان می دهد که سیستم بینائی به عنوان یک پردازش گر و تحلیل گر بهینه عمل می کند. آنچه از عملکرد شبکه در سطوح اولیه فرایند بینائی انسان کشف شده حاوی نکات جالبی است که می تواند الهام بخش استخراج ویژگی های تصویر در سیستم های هوشمند بینائی و انتقال تصویر باشد. سیستم بینائی دارای دو دسته سلول (حساسه) مختلف است. یک دسته شامل سلول های مخروطی برای دید رنگی (RGB) با دقت مکانی بالا در محیط های با نور کافی و دقت رادیومتریک پائین و دسته دیگر سلول های تک رنگ استوانه ای با دقت مکانی پائین و رادیومتری بالا که وظیفه دید سیاه و سفید را در شرایط نوری ضعیف برعهده دارند. در ادامه مروری بر آناتومی و فیزیولوژی شبکه چشم خواهیم داشت.

لایه های مختلف سلولی شبکه در شکل (۶) نشان داده شده است. همانطور که از روی شکل مشخص است، شبکه چشم از چند لایه سلول تشکیل شده است. لایه سلولی خارجی شامل سلول های استوانه ای و مخروطی است. لایه سلولی داخلی نیز شامل سلول های دو قطبی، افقی و آمکرین است. لایه سلول های عقده ای نیز بدنه سلولی سلول های عقده ای را در بر می گیرد.

اولین ناحیه از شبکه در هم عصبی لایه پلکسی فرم خارجی است که سلول های استوانه و مخروط را به یکدیگر متصل می کند. علاوه بر این، اتصال افقی بین سلول های افقی و اتصال عمودی آنها با سلول های دو قطبی را نیز فراهم می کند. دومین ناحیه از شبکه در هم عصبی در شبکه، لایه پلکسی فرم داخلی است که بعنوان یک ایستگاه تقویت برای جریان عمودی اطلاعات در سلول های دو قطبی عمل کرده و سلول های دو قطبی را به سلول های عقده ای متصل می نماید.

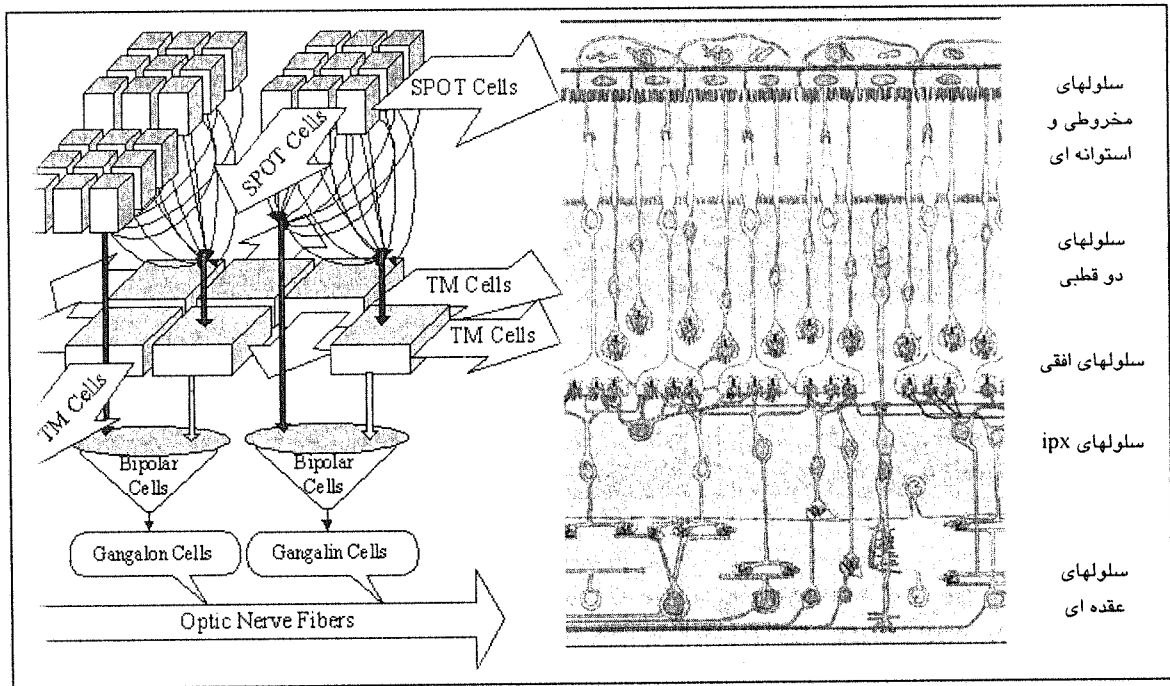
یکی دیگر از سلول های شبکه سلول ipx است که ورودی خود را از سلول های دو قطبی دریافت می کند. این سلول ها دارای میدان های دریافت بزرگی هستند که همانند تمام سلول های شبکه با دور شدن از مرکز بزرگتر می شوند. دوپامینی که در شرایط تحریک توسط این سلول ها آزاد می شوند میزان هدایت اتصالات را در لایه سلول افقی کاهش داده بنابراین

اندازه موثر سلول های افقی را کاهش می دهند. سلول های ipx سیگنال کنتراست مکانی- زمانی را از خروجی های چندین سلول دو قطبی واقع در میدان دریافتشان دریافت می کنند و خروجی آن ها به سلول های افقی بازخورد می شود. در نتیجه اندازه میدان دریافت تنظیم می شود. نوری که از طریق قرنیه و عدسی وارد کره چشم می شود قبل از برخورد به حسگرهای نوری باید از ضخامت کامل شبکه عبور کند. سلول های مخروطی و وظیفه دید رنگی و با دقت بالا در نور کافی و سلول های استوانه و وظیفه دید سیاه و سفید در عدم نور کافی را بر عهده دارند. سلول های دو قطبی اطلاعات دریافتی از حسگرها را به سلول های عقده ای می رسانند. دو نوع سلول دو قطبی شامل سلول دو قطبی با میدان دریافت کوچک (*midget*) و سلول دو قطبی با میدان دریافت وسیع (*diffuse*) وجود دارد. سلول های عقده ای نیز اطلاعات دریافتی از سلول های دو قطبی را بصورت مناسبی به مغز مخابره می کنند. این جریان اطلاعات از حسگرها به سلول های عقده ای بصورت انتقال در مسیر عمودی است. اما ثابت شده که اطلاعات در مسیر افقی نیز در شبکه جریان دارند که این کار توسط سلول های افقی و سلول های آمکرین انجام می شود. سلول های افقی امکان ارتباط حسگرها با یکدیگر را فراهم می کنند و اجازه می دهند سلول های دو قطبی نیز با هم ارتباط داشته باشند. از سوی دیگر سلول های آمکرین امکان ارتباط سلول های عقده ای و سلول های دو قطبی با هم را فراهم کرده و خودشان نیز با همدیگر در ارتباط هستند [۱۱]. مدل سلول دو قطبی و کاربرد آن در ادغام تصاویر حائز اهمیت است. میدان دریافت سلول دو قطبی حاصل تفاضل میدان دریافت حسگرهای مخروطی (یک میدان دریافت وزن دار گوسی با عرض  $\sigma_c$  و میدان دریافت سلول های افقی (یک میدان دریافت وزن دار گوسی با عرض  $\sigma_c$  است. بنابراین مدلی که در اینجا برای سلول دو قطبی ارائه می شود، یک فیلتر تفاضلی گوسی (DOG) بصورت زیر است:

$$CS(r) = \alpha_c G(r; \sigma_c) - \alpha_s G(r; \sigma_s) \quad (7)$$

$$G(r; \sigma) = \frac{1}{2\pi\sigma^2} \exp\left[-\frac{|r|^2}{2\sigma^2}\right] \quad (8)$$

که در آن  $\sigma_c, \sigma_s$  بترتیب عرض گوسی میدان های دریافت پیرامونی و مرکزی هستند و وزن های مربوط به ورودی های پیرامونی و مرکزی را نمایندگی می کنند.  $r$  نشان دهنده موقعیت مکانی دو بعدی است. هنگامی که  $\sigma_s = 1.6\sigma_c$  باشد، عملکرد *DOG* خواص واقعی و دینامیک میدان دریافت برای سلول های دو قطبی شبکه چشم را به خوبی توصیف می کند. پدیده دیگری که در تشخیص یک پیکسل موثر است تاثیر نقاط



شکل (۶): مدل مقایسه‌ای بین لایه‌های مختلف شبکه‌ی و ادغام تصاویر چند دقتی

می‌کنند. با انتخاب مناسب  $\alpha_s, \alpha_c$  اطلاعات مکانی و طیفی دو سنجنده با هم ترکیب شده و در نتیجه تصویر با دقت مکانی و طیفی بالا ایجاد می‌شود. رابطه زیر بیان ساده‌ای از این مدل است [۱۲].

$$DOG(r, \sigma_s) = \alpha_c g(r; \sigma_c) - \alpha_s g(r; \sigma_s) \quad (9)$$

مدل فوق در شکل (۶) ارائه شده است. این مدل شامل پنج لایه می‌باشد. لایه اول آرایه‌ای از تصویر PAN با دقت مکانی  $(\Delta 1)$  را که از سنجنده اسپات استخراج گشته شامل می‌شود. در لایه دوم ویژگی‌های طیفی تصاویر TM با دقت مکانی  $(\Delta 2)$  از سنجنده لندست اخذ می‌شود. عملکرد لایه سوم با رابطه زیر بیان می‌شود که در آن  $\alpha$  برابر با نسبت دقت مکانی TM به PAN است.

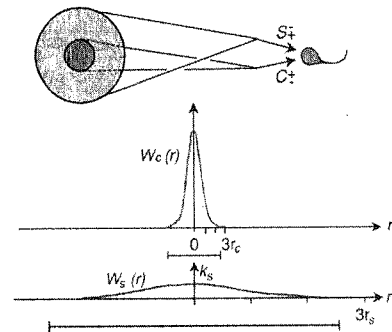
$$h_{\Delta}(r) = \frac{\Delta}{2\pi} \exp\{-|r/\Delta|^2\} - \frac{(\alpha\Delta)}{2\pi} \exp\{-|r/\alpha\Delta|^2\} \quad (10)$$

چهارم و پنجم شامل سلول‌های دو قطبی و عقده‌ای که در حوزه فرکانس با رابطه زیر بیان می‌شود.

$$F(u, v) = H_{\Delta 1}(u, v) F_1(u, v) + H_{\Delta 2}(u, v) F_2(u, v) \quad (11)$$

که  $F_1(u, v)$  تصویر با دقت تفکیک مکانی بالا، و  $F_2(u, v)$  تصویر با دقت مکانی پائین است. در خروجی نهایی تصویر ادغامی مشخصه با تفکیک بالا خواهد داشت.

پیرامونی بر روی نقطه مرکزی است هر چه پیرامون یک پیکسل روشن تر باشد آن نقطه تاریکتر بنظر می‌رسد. کنتراست، اختلاف روشنایی بین فازهای تاریک و روشن است. توابع حساسیت کنتراست را می‌توان بصورت تفریق خطی از دو مکانیزم میدان دریافت متضاد و هم مرکز مدل کرد شکل (۷) در این مدل هر دو میدان مرکزی  $(W_c)$  و پیرامونی  $(W_s)$  دارای گستره حساسیت گوسی هستند، بطوریکه بیشترین حساسیت در مرکز قرار دارد. هر چه از مرکز دور شویم میزان حساسیت کاهش می‌یابد. در روش پیشنهادی ادغام تصاویر از مدل فوق استفاده شده است. در این روش خصوصیات مکانی و طیفی تصاویر چند طیفی و PAN با استفاده از فیلتر DOG متمایز شده و سپس با توجه به اهمیت هر کدام (ویژگی‌های طیفی TM و ویژگی‌های مکانی PAN) در فرایند ادغام شرکت



شکل (۷): مدل تفاضلی گوسی برای میدان دریافت

الف) پوشش گیاهی: همانطور که در تصاویر شکل (۹) دیده می‌شود، مناطق دارای پوشش گیاهی در تصویر TM4,3,2 به رنگ سرخ روشن دیده می‌شوند. با توجه به تصاویر ترکیبی حاصل از روش‌های IHS, Brovey, PCA دیده می‌شود که این رنگ، بر اثر ترکیب با باند PAN به رنگ سرخ تیره تبدیل شده است که این تیرگی، به ترتیب در روش‌های Brovey, PCA, IHS افزایش یافته است. اما در تصاویر تبدیل موجک و مدل چشم رنگ پوشش گیاهی بدون تغییر باقی مانده است.

ب) آب: در منطقه مورد مطالعه، دو دریاچه‌ی مصنوعی، نزدیک به مرکز تصویر اصلی وجود دارد که به رنگ سیاه دیده می‌شود. در تصویر IHS4,3,2 رنگ دریاچه به خاکستری تغییر یافته است. در تبدیل Brovey رنگ دریاچه‌ها، آبی شده است که این امر کمک زیادی به تشخیص چشمی عوارض آبی می‌کند. در بقیه تصاویر رنگ اصلی حفظ شده است.

ج) مناطق شهری: رنگ عوارض شهری تقریباً در همه‌ی ترکیب‌ها به خوبی حفظ شده‌اند. در تصاویر ترکیبی، روش‌های مدل چشم، موجک، IHS، Brovey، PCA، به ترتیب نتایج بهتری دقیق تری را نشان می‌دهد.

د) خاک: در روش پیشنهادی پوشش‌های خاکی مشخص تر است. سپس روش‌های Brovey، PCA و IHS و موجک نتایج مناسبی را نشان می‌دهد.

#### ۴-۲- ارزیابی کمی حفظ اطلاعات طیفی

ضریب همبستگی بین تصویر اولیه  $(b_k)$  و تصویر ادغام شده متناظر آن  $f_k$  (شماره باند است) به عنوان معیار ارزیابی کمی استفاده می‌شود.

$$\rho(k) = \frac{C(f_k, b_k)}{\sqrt{\sigma_{f_k}^2 \cdot \sigma_{b_k}^2}} \quad (12)$$

این معیار، میزان حفظ اطلاعات طیفی را برای هر یک از باندها بطور جداگانه نشان می‌دهد. هدف این است که خصوصیات طیفی موجود در تصاویر ترکیبی نسبت به تصویر اولیه، دستخوش تخریب نشود.

در جدول (۱) ضرایب همبستگی بین باندهای اولیه TM و نتیجه ادغام محاسبه شده است. به روشنی مشخص است که میزان همبستگی در روش پیشنهادی مدل چشم (Retina) بیشتر از سایر روش‌ها می‌باشد. همچنین متوسط نتایج بدست آمده بر روی شش باند طیفی (TMav) نیز در جدول (۱) بیان شده است. این کمیت نیز در روش پیشنهادی از روش‌های دیگر بیشتر است. تبدیل موجک، PCA، براوی و IHS در رتبه‌های بعدی قرار دارند.

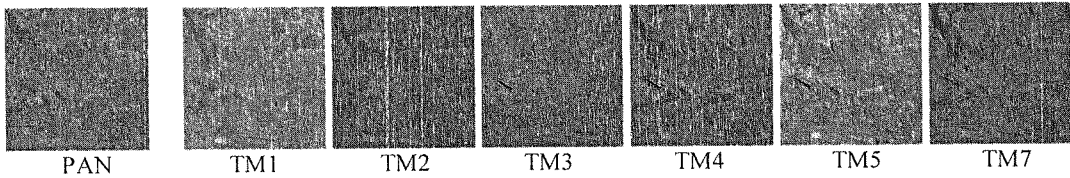
آنچه در ارزیابی نتایج ادغام تصاویر مورد نظر است، حفظ اطلاعات طیفی و افزایش دقت مکانی است. در اکثر تحقیقات، هدف افزایش دقت مکانی است بنحوی که اطلاعات طیفی حفظ شود. نتایج عمومی حاصل از ادغام تصاویر چندطیفی و تصویر با دقت تفکیک بالا نشان می‌دهد که معمولاً بهبود ویژگی‌های مکانی به قیمت از دست دادن اطلاعات طیفی تمام می‌شود. در نتیجه در میان روش‌های مطرح شده، روشی مناسب است که در عین تقویت دقت مکانی کمترین تخریب را بر ویژگی‌های طیفی وارد سازد. اما آنچه در ارزیابی این پارامترها دخالت دارد چگونگی اندازه‌گیری این ارزیابی است. برای ارزیابی نتایج از دو دسته معیار کمی و کیفی استفاده می‌شود که در این قسمت به آن می‌پردازیم. در این مقاله نتایج ادغام بر روی تصویر با دقت مکانی ۱۰ متر PAN از ماهواره اسپات و تصاویر شش باند با دقت مکانی ۲۷ متر TM از ماهواره لندست که از شمال غربی تهران گرفته شده است مقایسه شده‌اند. تصاویر اولیه در شکل (۸) و نتایج ادغام در شکل‌های (۹) (الف - ز) نشان داده شده است. تصویر ترکیبی RGB شکل (۹-الف) از ترکیب باند‌های TM2 و TM3 و TM4 بدست آمده است. این تصویر رنگ‌های مشخصی را برای پوشش زمین در بر دارد. هر گونه تغییر طیفی در مرحله ادغام به منزله تخریب در اطلاعات طیفی به حساب می‌آید.

در شکل‌های (۹) (الف - ز) بخشی از تصاویر ترکیبی با بزرگ‌نمایی بیشتر نمایش داده شده است.

#### ۴-۱- ارزیابی کیفیت طیفی تصاویر

در شرایط ایده آل میزان حفظ اطلاعات طیفی با استفاده از تصاویر استاندارد با پترن مشخص ارزیابی می‌شود، ولی بدلیل عدم دسترسی به تصاویر استاندارد، می‌توان از تصاویر TM به عنوان مرجع طیفی و تصویر PAN به عنوان مرجع مکانی استفاده کرد و میزان تغییرات تصاویر ادغامی را نسبت به آنها سنجید. برای مقایسه نتایج طیفی تصاویر ترکیبی از دو روش شهودی و کمی استفاده شده است. در روش شهودی، تغییرات رنگ‌های عوارض گوناگون زمین در تصاویر ترکیبی، نسبت به تصویر مرجع مقایسه می‌شود. عوارض موجود در تصویر مورد آزمایش را می‌توان به چند گروه اصلی تقسیم کرد: از قبیل آب، پوشش گیاهی، باند فرودگاه، بافت کم تراکم و پرتراکم شهری، بافت روستایی، و خاک بایر که در این قسمت به مقایسه‌ی شهودی این تصاویر می‌پردازیم





شکل (۸): تصویر انتخابی PAN و شش تصویر چندطیفی TM از منطقه شمال غربی تهران



شکل (۹- الف): تصویر ترکیبی RGB باندهای ۲،۳،۴ ماهواره لندست



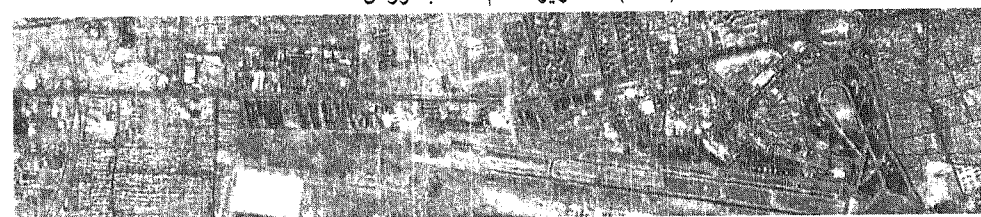
شکل (۹- ب): تصویر ادغام شده به روش IHS



شکل (۹- ج): تصویر ادغام شده به روش Brovey



شکل (۹- د): تصویر ادغام شده به روش PCA



شکل (۹- و): تصویر ادغام شده به روش WAVELET2



شکل (۹- ز): تصویر ادغام شده به روش مدل چشم

طیفی حذف شده است. اختلاف مورد نظر از رابطه (۱۶) بدست می آید.

$$\rho(k) = \frac{C(PAN_{HPF}, f_{k,HPF})}{\sqrt{\sigma_{PAN}^2 \cdot \sigma_f^2}} \quad (14)$$

$$PAN_{Fuse} = \frac{TM_R + TM_G + TM_B}{3} \quad (15)$$

$$d(k) = |PAN_{Fuse} - PAN| \quad (16)$$

در جدول (۵) مقادیر حاصل از رابطه (۱۶) آورده شده است. نتایج حاصل گویای موثر بودن روش پیشنهادی است. در مراتب بعدی تبدیل موجک، براوی، IHS و PCA قرار گرفته اند. معیار ارزیابی ترکیبی حاصل ضرب متوسط همبستگی طیفی و مکانی: این معیار براساس حاصل ضرب متوسط ضریب همبستگی طیفی  $\rho_{T_{spectral}}$  و متوسط ضریب همبستگی مکانی،  $\rho_{T_{spatial}}$  محاسبه می شود.

$$S = \rho_{T_{spectral}} \cdot \rho_{T_{spatial}} \quad (17)$$

معیار ارزیابی ترکیبی، حاصل جمع متوسط همبستگی طیفی و مکانی این معیار بر اساس حاصل جمع متوسط ضرائب همبستگی طیفی  $\rho_{spectral}$  و متوسط ضرائب همبستگی مکانی،  $\rho_{spatial}$  محاسبه می شود.

$$S = \rho_{T_{spectral}} + \rho_{T_{spatial}} \quad (18)$$

به دلیل توجه همزمان، دو معیار اخیر به حفظ اطلاعات طیفی و افزایش اطلاعات مکانی، این دو معیار مناسب ترین معیار برای بررسی عملکرد روش های ادغام هستند. این مقادیر در جدول (۶) مشخص شده است که بیانگر ارجحیت روش پیشنهادی بر سایر روش های ادغام می باشد. در مراتب بعدی تبدیل موجک، براوی، PCA، IHS قرار گرفته اند.

## ۵- نتیجه گیری

در این تحقیق یک روش جدید، مبتنی بر مدل شبکه چشم، برای ادغام تصاویر سنجنده Landsat TM که دارای دقت طیفی بالایی هستند، با تصویر SPOT PAN که دارای دقت مکانی بالایی است، ارایه شد. ادغام تصاویر چند سنجنده ای، معمولاً با تبادل اطلاعات مکانی از سنجنده‌ی با دقت مکانی بالا، به تصویر با دقت طیفی بالا و یا برعکس انجام می شود. برای مقایسه‌ی نتایج حاصل از ادغام از روش های شهودی و هم چنین کمی استفاده شده است.

نتایج نشان می دهد: تصویر حاصل در روش پیشنهادی از دقت مکانی و طیفی بهتری نسبت به چهار روش دیگر

روش ارزیابی دیگر، محاسبه اختلاف بین تصویر ترکیبی و تصویر مرجع است. برای محاسبه این کمیت ابتدا دقت مکانی تصویر ادغام شده به اندازه دقت مکانی TM کاهش می یابد و سپس مقادیر بدست می آید.

در جدول (۲) اختلاف دو تصویر آمده است. به روشنی دیده می شود که روش پیشنهادی در کلیه ی باندها، بهتر از بقیه‌ی روش‌ها خواص طیفی را حفظ می کند. پس از آن به ترتیب روش‌های ترکیب موجک، PCA، IHS و Brovey قرار دارند.

## ۴-۳- ارزیابی کمی حفظ اطلاعات مکانی تصاویر

علاوه بر مقایسه‌ی شهودی، از دو روش کمی برای ارزیابی حفظ اطلاعات مکانی استفاده شده است. ویژگی مکانی به مولفه‌های فرکانسی بالاگذر تصویر وابسته است. چون تصاویر ادغام شده، ویژگی‌های مکانی خود را از تصویر PAN به دست می آورند، با محاسبه‌ی ضریب همبستگی بین این دو تصویر، و مقایسه‌ی آن‌ها می توان کیفیت این فرایند را ارزیابی کرد. هرچه همبستگی مولفه‌های فرکانس بالا تصویر (PANHPF) و تصویر ادغام شده ( $f_{k,HPF}$ ) بیشتر باشد، حفظ اطلاعات مکانی می باشد. به همین منظور از فیلتر بالاگذر لاپلاسین  $3 \times 3$  (HPF(mask)) برای استخراج مولفه های فرکانس بالا استفاده شده است. با استفاده از (۱۴) ضریب همبستگی بین این مولفه ها بدست آمده است.

$$HPF(mask) = \begin{bmatrix} -1 & -1 & -1 \\ -1 & 8 & -1 \\ -1 & -1 & -1 \end{bmatrix} \quad (19)$$

در جدول (۳) ضرایب همبستگی بین مولفه های فرکانس بالا تصاویر PAN و ادغامی محاسبه شده است. نتایج نشان می دهد که مدل پیشنهادی بهترین نتایج مکانی را ارایه کرده و پس از آن روش Brovey، تبدیل موجک، IHS و PCA قرار گرفته اند.

همچنین ضرایب همبستگی بین مولفه فرکانس بالا تصاویر RGB ادغام شده باندهای ۴۲۲ و تصویر PAN به عنوان معیار ارزیابی کمی حفظ اطلاعات مکانی تصاویر استفاده شده است. مقادیر بدست آمده در جدول (۴) مشخص شده است که روش پیشنهادی بهترین کیفیت و روش های تبدیل موجک، IHS، Brovey و PCA در مراتب بعدی قرار دارند.

محاسبه اختلاف تصویر مرجع PAN و تصویر معادل PANFuse معیار دیگری برای ارزیابی کمی می باشد. با توجه به اینکه تصویر PAN فاقد اطلاعات طیفی است لازم است اطلاعات طیفی موجود در تصاویر ادغام شده را حذف کرد. با متوسط گیری بین تصاویر چند طیفی از رابطه (۱۵) اطلاعات

جدول (۱): ضریب همبستگی بین تصاویر ادغام شده و تصاویر باندهای TM (کیفیت طیفی)

روش ادغام	TM1	TM2	TM3	TM4	TM5	TM7	TMav
IHS	.766	.330	.564	.700	.809	.612	.510
BROVEY	.693	.763	.817	.475	.720	.801	.712
PCA	.805	.754	.735	.937	.746	.714	.781
WT1	.971	.972	.972	.966	.972	.972	.971
WT2	.942	.940	.950	.890	.930	.931	.931
WT3	.865	.860	.871	.445	.808	.826	.812
RETINA	.983	.972	.980	.971	.974	.977	.976

جدول (۲): میانگین اختلاف بین تصاویر ادغام شده و تصاویر باندهای TM (کیفیت طیفی)

روش ادغام	TM1	TM2	TM3	TM4	TM5	TM7	Tmav
IHS	10.58	20.34	12.50	22.37	10.58	10.58	14.49
BROVEY	89.89	33.17	41.53	45.51	71.70	39.02	53.47
PCA	8.72	5.87	9.62	3.13	11.85	8.46	7.94
WT1	3.49	2.13	3.37	2.54	4.51	3.02	3.18
WT2	6.56	6.26	6.53	6.80	7.21	6.59	6.66
WT3	8.61	8.37	8.33	9.83	9.76	8.82	8.95
RETINA	3.32	2.08	3.27	2.57	4.31	3.12	3.11

جدول (۳): ضریب همبستگی بین مولفه های فرکانس بالاتر تصاویر PAN و تصاویر ادغامی (کیفیت مکانی)

روش ادغام	TM1	TM2	TM3	TM4	TM5	TM7	TMav
IHS	.891	.734	.739	.846	.909	.970	.848
BROVEY	.943	.974	.955	.891	.955	.936	.942
PCA	.869	.927	.953	.409	.910	.937	.834
WT1	.778	.798	.804	.645	.786	.796	.768
WT2	.915	.924	.910	.821	.880	.900	.890
WT3	.952	.962	.952	.901	.931	.950	.940
RETINA	.957	.972	.959	.912	.943	.957	.950

جدول (۴): ضرایب همبستگی بین مولفه فرکانس بالا تصاویر RGB ادغام شده باندهای ۴۳۲ و تصاویر PAN

	PCA432	Brovey 432	IHS 432	WT1 432	WT2432	Retina432
PAN	.874	.909	.912	.976	.977	.981

جدول (۵): معیار اختلاف بین تصاویر PAN Fuse و PAN

	Brovey	IHS	PCA	WT1	WT2	WT3	Retina
$ PAN - PAN_{fuse} $	9.67	10.16	18.06	9.21	7.69	6.32	4.32

جدول (۶): معیار های ترکیبی

	Brovey	IHS	PCA	WT1	WT2	WT3	Retina
M	670	.432	.651	.745	.828	.763	.927
S	1.654	1.358	1.615	1.739	1.822	1.752	1.926

تجزیه کیفیت طیفی تصاویر تخریب می شود و بهترین کیفیت در سطح دو تجزیه، مشاهده می شود، هر چند این روش به فرایند های پیش پردازش نمونه برداری مجدد و تطبیق تصاویر و گسترش هیستوگرام نیازمند است.

روش تبدیل Brovey نسبت به بقیه روش ها بسیار ساده تر است و دقت مکانی مناسبی دارد. اما در همان شرایط، تخریب طیفی زیادی در برخی عوارض مانند آبها ایجاد می نماید. این تخریب در کاربردهای طبقه بندی خودکار تصاویر مشکل ایجاد می کند.

روش IHS عوارض کشاورزی و بافت شهری را ( از نظر ویژگی های طیفی) حفظ کرده، و از نظر دقت مکانی حداقل بین روش های تبدیل Brovey و PCA است. خطای این روش

برخوردار است. شکل (۹- ز) نشان می دهند که تشابه طیفی (از نظر رنگ) روش پیشنهادی و تصویر اولیه TM (شکل ۹- الف) بیشتر از روشهای دیگر است. این تشابه به معنای حفظ خصوصیت های طیفی تصاویر چند طیفی است. به همین ترتیب جدول های (۱) تا (۶) مویید این هستند که نتایج روش پیشنهادی نسبت به روشهای دیگر برتر است. از توانایی های مهم روش پیشنهادی علاوه بر بهبود توام دقت طیفی و مکانی، عدم نیاز این روش به فرایند های پیش پردازش نمونه برداری مجدد و تطبیق تصاویر و هم چنین فرایند گسترش هیستوگرام می باشد.

جدول های کمی ارزیابی نشان می دهد که روش تبدیل موجک در رتبه بعدی قرار دارد. در این روش با افزایش سطوح

IEEE transactions on Geosciences and Remote Sensing, vol. 42, no. 6, pp. 1291-1299, 2004.

[۱۱] Shah, S. and Levine, M. D., "Visual Information Processing in Primate Cone Pathways, Part 1: A Model", IEEE Transactions on System, Man, and Cybernetics-Part 2: Cybernetics, vol. 26, No. 2, 1996.

[۱۲] Ghassemian, H., "A Retina Based Multi-Resolution Image Fusion", Proceeding of IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium, IGRSS2001, pp. 709-711, July 2001

روی تصاویر رنگی سبز، قرمز و آبی یکسان است. از سوی دیگر عوارض کوچک در این تصویر اغلب حذف شده‌اند. با این حال نسبت به دو روش برای و PCA در حفظ همزمان کیفیت مکانی - طیفی روش بهتری محسوب می‌شود.

روش PCA تخریب طیفی کمی داشته است، و عوارض بزرگ و کوچک در آن همچنان قابل تشخیص‌اند. ضمن اینکه خصوصیت مکانی در آن به شدت صدمه دیده‌اند و اطلاعات مکانی کمتری نسبت به دو روش برای و IHS دارد. در این روش هر تعداد از باندهای چند طیفی را می‌توان در یک زمان با تصویر اسپات ادغام نمود.

## مراجع

[۱] Linas, J. Hall, D. "An introduction to multisensor data fusion", Proceeding of the IEEE, vol. 85, no. 1, pp. 6-23, 1997.

[۲] Price, J. "Combining multispectral data of different spatial resolution technique for spatial enhancement of multispectral image using a higher resolution data set", Photogrammetry engineering and remote sensing, vol. 58, no. 5, pp. 561-567, 1999.

[۳] Fonseca, M. G., B. Manjunath, S. "Registration techniques and multisensor remotely sensed imagery", Photogrammetric & remote sensing vol. 62, no. 9, 1996.

[۴] Zhou, J., et al., "A wavelet transform method to merge Landsat TM and SPOT panchromatic data", Int. J. Remote sensing, vol. 19, no. 4, pp. 743-757, 1998.

[۵] Pohl, C., and Van Genderen J., "Multisensor image fusion in remote sensing: concepts, methods and applications", Int. J. Remote Sensing vol. 19, no. 5, pp. 823-854, 1998.

[۶] Edwards K., and Davis P., "The use of Intensity-Hue-Saturation transformation for producing color shaded-relief image", photogrammetric engineering and remote sensing, vol. 11, 1994.

[۷] Liu, J. G., and Moore, J., "Hue image RGB color composition, A simple technique to suppress shadow and enhance spectral signature", International Journal of Remote Sensing, vol. 8, pp. 1521-1530, 1990.

[۸] Nunez, J. and Otazu, X., "Multiresolution based image fusion with wavelet decomposition", IEEE Transactions and geoscience and remote sensing, vol. 37, no. 3, 1999.

[۹] Moigne, J. L. Laporte, N., and Netanyahu, N. S., "Enhancement of tropical land cover mapping with wavelet-based fusion and unsupervised clustering of SAR and landsat image data", International Society for Optical Engineering (SPIE), 2001.

[۱۰] Gonzalez, M., et al., "Fusion of Multispectral and Panchromatic Image using Improved IHS and PCA merges Based on Wavelet decomposition",