



بخش از دور

GIS ایران



سنجش از دور و GIS ایران سال هشتم، شماره چهارم، زمستان ۱۳۹۵
Iranian Remote Sensing & GIS Vol.8, No. 4, Winter 2017

۱۷-۳۰

مقایسه روش‌های تلفیق مبتنی بر PCA و IHS به منظور تلفیق تصاویر هایپریون و Cartosat-1

مرتضی بشیرپور^{۱*}، محمدجواد ولدان‌زوج^۲، یاسر مقصودی^۳

۱. دانشجوی کارشناسی ارشد سنجش از دور، دانشکده مهندسی ژئودزی و ژئوماتیک، دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی

۲. استاد دانشکده مهندسی ژئودزی و ژئوماتیک، دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی

۳. استادیار دانشکده مهندسی ژئودزی و ژئوماتیک، دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی

تاریخ پذیرش مقاله: ۱۳۹۵/۹/۱۳

تاریخ دریافت مقاله: ۱۳۹۴/۱۱/۶

چکیده

برای بهره‌مندی هم‌زمان از اطلاعات داده‌های چندمنبعی، از تکنیک‌های عددی یا تحلیلی تلفیق استفاده می‌شود. تلفیق باعث تفسیر بهتر، کاهش ابهام و بهبود طبقه‌بندی می‌شود. روش‌های گوناگونی برای تلفیق گسترش داده شده است؛ از جمله روش‌های مبتنی بر IHS، Wavelet و PCA. در این پژوهش، قابلیت روش‌های تلفیق مبتنی بر IHS و روش‌های تلفیق مبتنی بر PCA بررسی شده است. در این راستا، از روش‌های Wavelet-PCA، FFT-PCA، Wavelet-IHS و Wavelet-IHS برای تلفیق روی داده‌های Hyperion LIR با اندازه پیکسل ۳۰ متر و تصویر پانکروماتیک سنجنده Cartosat-1 با اندازه پیکسل ۲/۵ متر استفاده شده است. همچنین برای ارزیابی نتایج این روش‌ها، معیارهای ضریب همبستگی، ضریب همبستگی فیلترشده، خطای کمترین مربعات و شاخص ERGAS و معیار SAM به‌کار رفته است. نتایج معیار خطای کمترین مربعات به‌ترتیب برای Wavelet-PCA، FFT-PCA، Wavelet-IHS و FFT-IHS برای باند ۱۵ برابر با ۰/۰۲۰، ۰/۰۲۲ و ۰/۰۲۵ و ۰/۰۲۴، برای باند ۲۵ برابر با ۰/۰۳۲ و ۰/۰۳۵ و ۰/۰۳۸ و ۰/۰۳۶، و برای باند ۳۴ عبارت‌اند از ۰/۰۴۰ و ۰/۰۴۳ و ۰/۰۴۴ و ۰/۰۴۱. نتایج این معیار و نیز دیگر معیارها بیانگر دقت بالای روش‌های مبتنی بر PCA در تلفیق تصاویر بود. در واقع روش‌های مبتنی بر PCA مزایایی بیشتر از روش‌های مبتنی بر IHS دارد؛ مانند نداشتن محدودیت باندی. از بین تمامی این روش‌ها نیز، روش FFT-PCA و Wavelet-PCA دارای نتایج دقیق‌تر و بهتری بود و در حفظ اطلاعات طیفی و مکانی عملکردی بهتر از دیگر روش‌ها دارد.

کلیدواژه‌ها: تلفیق تصاویر، FFT-PCA، Wavelet-PCA، IHS، PCA، هایپریون، Cartosat-1.

* نویسنده عهده‌دار مکاتبات: تهران، خیابان ولی‌عصر، بالاتر از میرداماد، دانشکده مهندسی نقشه‌برداری، دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی. تلفن: ۰۹۱۴۸۴۷۰۶۵۶
Email: mbashirpour@mail.kntu.ac.ir

۱- مقدمه

ماهواره‌های سنجنش از دوری، به منظور پوشش زمین، در طول موج‌های متفاوتی از طیف الکترومغناطیسی و با قدرت تفکیک‌های طیفی، زمانی و مکانی گوناگونی اقدام به اخذ داده می‌کنند. برای بهره‌مندی کامل از اطلاعات داده‌های چندمنبعی به‌طور هم‌زمان، از تکنیک‌های عددی یا تحلیلی تلفیق استفاده می‌شود (Pohl and Van Genderen., 1998). برای نمونه، برای بهره‌مندی از اطلاعات تصاویر SAR و اپتیک یا لیدار و اپتیک به‌صورت هم‌زمان می‌توان از تلفیق بهره برد؛ یا برای افزایش دقت مکانی یک تصویر با اطلاعات مکانی تصویری با دقت مکانی بالاتر از همان منطقه، می‌توان از تکنیک‌های تلفیق استفاده کرد. در حالت کلی، به ترکیب دو یا چند تصویر گوناگون و ایجاد یک تصویر جدید با استفاده از الگوریتمی خاص تلفیق گفته می‌شود (Pohl and Van Genderen., 1998). تکنیک تلفیق می‌تواند جزئیات مکانی تصاویر با اندازه پیکسل بالا و ویژگی‌های (مشخصه‌های) طیفی تصاویر چندطیفی را به‌صورت بسیار مؤثرتر ترکیب (ادغام) بکند که تصویر حاصل کاربردهای بسیاری در سنجنش از دور دارد (Zhang and Hong., 2005). تلفیق باعث تفسیر بهتر، کاهش ابهام و بهبود طبقه‌بندی می‌شود. در واقع نتایج حاصل از تلفیق تصاویر باید از نظر طیفی شباهت بسیار زیادی با تصویر چندطیفی (فراطیفی) داشته باشد و همچنین از نظر مکانی نیز شبیه به تصویر پانکروماتیک باشد. تصویر تلفیق شده هرچه قدر دقت بیشتری از دیدگاه بیان شده داشته باشد، می‌توان گفت الگوریتم دقیق‌تری برای تلفیق به‌شمار می‌رود.

تلفیق، براساس سطح پردازشی گوناگون، به سه دسته پیکسل‌مینا، عارضه^۱ مینا و تصمیم^۲ مینا تقسیم می‌شود (Pohl and Van Genderen., 1998). سطح پردازشی پیکسل‌مینا براساس تلفیق پیکسل به پیکسل تصاویر است که به تطابق^۳ دقیق تصاویر و نمونه‌برداری مجدد^۴ پیکسل‌ها نیاز دارد. این سطح از تلفیق در پایین‌ترین سطح پردازش قرار دارد و تطابق تصاویر باید با دقت بسیاری (در سطح زیرپیکسل) انجام شود؛ در غیر این صورت، باعث ایجاد مشکل در پردازش تصویر خواهد شد (Pohl and Van Genderen., 1998).

بنابراین تصحیحات هندسی و هم‌مرجع کردن نقش بسیار مهمی در نتایج تلفیق دارد. این تصحیحات و پردازش‌ها باید با دقت بسیار زیادی انجام بگیرد زیرا تطبیق نادرست داده‌ها موجب ایجاد عوارض مصنوعی و اشتباه در تصویر می‌شود.

از جمله الگوریتم‌های تلفیق در این سطح می‌توان به روش‌های Wavelet (Povjares and Delacruz., 2004)، IHS^۵ (Carper., 1990; Gharbia et al., 2014)، PCA (Shahdosst and Ghassemiar, 2016; Chavez et al., 1991) اشاره کرد. روش‌هایی مثل IHS و PCA از پرکاربردترین روش‌ها در حوزه تلفیق اند ولی مشکل عمده این روش‌ها این است که باعث ایجاد اعوجاج طیفی در تصویر می‌شوند که این اعوجاج در کاربردهای بسیاری همچون طبقه‌بندی قابل قبول نیست (Shahdoosti and Ghassemian, 2016). هرچه نتایج تلفیق با روش مورد نظر اعوجاج طیفی کمتری داشته باشد و بتواند اطلاعات مکانی تصویر پانکروماتیک را بهتر حفظ کند، روش مناسب‌تر و دقیق‌تری برای تلفیق خواهد بود. برای کاهش این خطا، برخی روش‌های بهبودیافته مانند GIHS (Yang et al., 2007)، SPCA (Shahdoosti and Ghassemian, 2016) مطرح شد. روش موجک به‌طور معمول در حفظ اطلاعات طیفی، درمقایسه با روش‌های متداولی مثل IHS و PCA، در تلفیق تصاویر بهتر عمل می‌کند. با این حال روش موجک نیز، به‌دلیل تفاوت در جزئیات تصویر پانکروماتیک و تصویر چندطیفی، اعوجاج طیفی دارد. برای کاستن اعوجاج طیفی و افزایش دقت تلفیق، روش Wavelet-IHS (Zhang and Hong, 2005) و همچنین روش FFT-IHS (Ling et al, 2007) پیشنهاد شد و روش dWPC (Gonzalez Audicana et al., 2004) نیز برای کاهش اعوجاج طیفی روش PCA مطرح شد. روش‌های FFT-IHS و Wavelet-IHS بر مبنای IHS هستند و محدودیت‌هایی همچون محدودیت بانندی و اعوجاج طیفی دارند.

1. feature
2. decision
3. registering
4. resampling
5. Intensity-Hue-Saturation

۲۰۰۹ و تصویر فراطیفی هایپریون با سطح پردازشی LIR با اندازه پیکسل ۳۰ متر و قدرت تفکیک طیفی ۱۰ نانومتر مربوط به سال ۲۰۰۹ است. منظور از سطح پردازشی LIR این است که مجموعه‌ای تصحیحات روی تصویر انجام شده و داده‌های این سطح رادیانس است. تصویر هایپریون ۲۴۲ باند طیفی دارد و شامل دو طیف‌سنج VNIR و SWIR است که محدوده ۴۰۰ تا ۲۵۰۰ نانومتری را پوشش می‌دهد. طیف‌سنج VNIR دارای ۷۰ باند و SWIR دارای ۱۷۲ باند است.

۲-۲- روش‌های تلفیق اجرا شده

۲-۲-۱- روش FFT-IHS

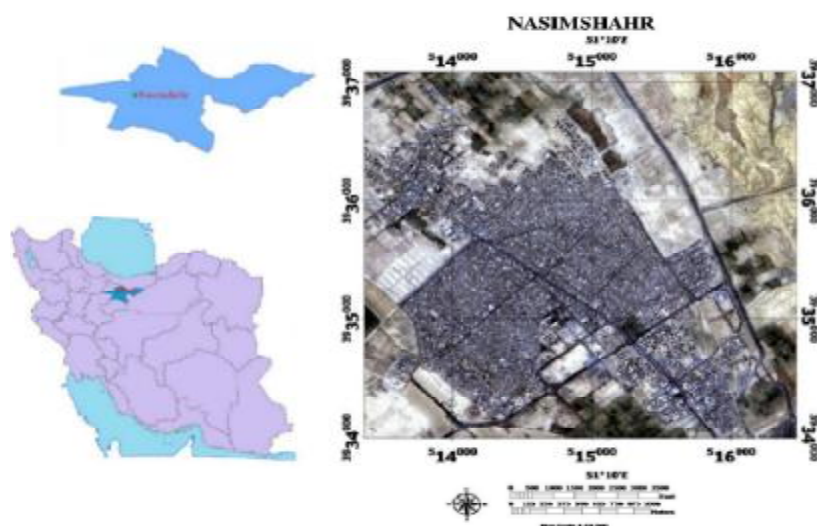
روش FFT-IHS از روش‌هایی است که لینگ و همکارانش (۲۰۰۷) برای بهبود روش IHS و افزایش دقت تلفیق و کاهش اعوجاج طیفی مطرح کردند. در واقع ایده اصلی این روش جایگذاری جزئی تصویر پانکروماتیک به جای مؤلفه شدت است که به منظور این جایگذاری از روش فیلترینگ فوریه سریع^۱ (FFT) استفاده شده است. مراحل کلی روش FFT-IHS به این صورت است که ابتدا تصاویر باید بر هم رجیستر

یکی از اهداف تحقیق پیش رو پیاده‌سازی روش تلفیق Wavelet-PCA (Gonzalez Aadican et al., 2004) پیشنهاد و پیاده‌سازی روش نوین FFT-PCA است. این روش‌ها بر PCA مبتنی‌اند. همچنین مقایسه و ارزیابی روش‌های مبتنی بر PCA و روش‌های مبتنی بر IHS از اهداف اصلی این تحقیق شمرده می‌شود. در این تحقیق از تصاویر هایپریون، به دلیل قدرت تفکیک طیفی بسیار بالای آنها، برای تلفیق با تصویر Cartosat-1 استفاده شده است. در واقع هدف تولید تصویری با قدرت تفکیک طیفی و مکانی بالاست.

۲- مواد و روش‌ها

۲-۱- منطقه مورد مطالعه و داده‌ها

منطقه مورد مطالعه نسیم‌شهر واقع در جنوب غرب استان تهران است. ارتفاع این شهر از سطح دریا ۱۰۵۰ متر است. نسیم‌شهر در عرض جغرافیایی $35^{\circ}33'0''$ و طول جغرافیایی $51^{\circ}10'0''$ قرار گرفته و وسعتی حدود ۲۵۵ کیلومتر دارد. داده‌های به کاررفته برای تلفیق، در تحقیق پیش رو، تصویر پانکروماتیک سنجنده Cartosat-1 با اندازه پیکسل ۲/۵ متر مربوط به سال



شکل ۱. موقعیت منطقه مطالعاتی نسیم‌شهر، واقع در جنوب غرب استان تهران

1. fast fourier transform

مجدد تصویر چندطیفی به‌اندازه پیکسل تصویر پانکروماتیک، تصویر چندطیفی به سیستم IHS منتقل می‌شود. سپس تطابق هیستوگرامی تصویر پانکروماتیک با مؤلفه شدت صورت می‌گیرد و تصویر پانکروماتیک جدید تولید می‌شود. پس از آن، تجزیه موجک روی مؤلفه شدت و تصویر پانکروماتیک جدید اعمال و ضرایب موجک برای هر دو تصویر ایجاد می‌شود، ضریب تقریب تصویر شدت تجزیه شده (LL^1) به جای ضریب تقریب تصویر پانکروماتیک تجزیه شده (LL^{Pdn}) قرار می‌گیرد، تبدیل معکوس موجک روی آن اعمال می‌شود و تصویر شدت جدیدی پدید می‌آید که درجات خاکستری آن توزیع یکسانی با مؤلفه شدت اصلی دارد و شامل جزئیات مکانی یکسانی با تصویر پانکروماتیک است. در نهایت تبدیل معکوس IHS انجام و تصویر تلفیق شده تولید می‌شود.

۲-۲-۳- روش پیشنهادی Wavelet-PCA

روش موجک به‌طور معمول در مقایسه با روش‌هایی همچون PCA در حفظ محتوای طیفی موفق‌تر است. با این حال، این روش نیز اعوجاج طیفی دارد و روش PCA نیز، در انتقال محتوای مکانی تصویر پانکروماتیک، عملکرد خوبی دارد. برای استفاده از قابلیت‌های هر دو الگوریتم، روش Wavelet-PCA معرفی می‌شود. این روش نیز از روش‌هایی است که از جایگذاری جزئی تصویر پانکروماتیک استفاده می‌کند. مراحل انجام دادن این روش طبق شکل ۲ به این صورت است که پس از رجیستر (منطبق) کردن تصویر چندطیفی (فراطیفی) با تصویر پانکروماتیک و نمونه‌برداری مجدد تصویر چندطیفی (فراطیفی) به‌اندازه پیکسل تصویر پانکروماتیک، تبدیل PCA روی تصویر چندطیفی (فراطیفی) صورت می‌گیرد و مؤلفه‌های PCA تصویر چندطیفی (فراطیفی) تولید می‌شود. سپس تطابق هیستوگرامی بین تصویر

(منطبق) باشند، سپس نمونه‌برداری مجدد تصویر چندطیفی به‌اندازه پیکسل تصویر پانکروماتیک، به‌منظور یکسان شدن اندازه پیکسل دو تصویر انجام می‌گیرد و تصویر چندطیفی حاصل شده به سیستم IHS منتقل می‌شود. تصویر چندطیفی در این سیستم به سه مؤلفه I, H و S تبدیل می‌شود. دو مؤلفه H و S در بردارنده اطلاعات طیفی و مؤلفه I شامل اطلاعات مکانی است. سپس مؤلفه شدت و تصویر پانکروماتیک به فضای فوریه منتقل می‌شوند. در فضای فوریه روی مؤلفه شدت، فیلتر پایین‌گذر و روی تصویر پانکروماتیک، فیلتر بالاگذر اعمال می‌شود. سپس روی هر دو تصویر حاصل، تبدیل معکوس فوریه انجام می‌شود. در نهایت پس از جایگذاری اطلاعات فرکانس بالا از تصویر پانکروماتیک با همان قسمت از مؤلفه شدت، مؤلفه شدت جدیدی تولید می‌شود که پس از تطابق هیستوگرامی این مؤلفه شدت جدید با مؤلفه شدت اصلی، تبدیل معکوس IHS اعمال می‌شود و تصویر تلفیق شده به‌وجود می‌آید.

۲-۲-۲- روش Wavelet-IHS

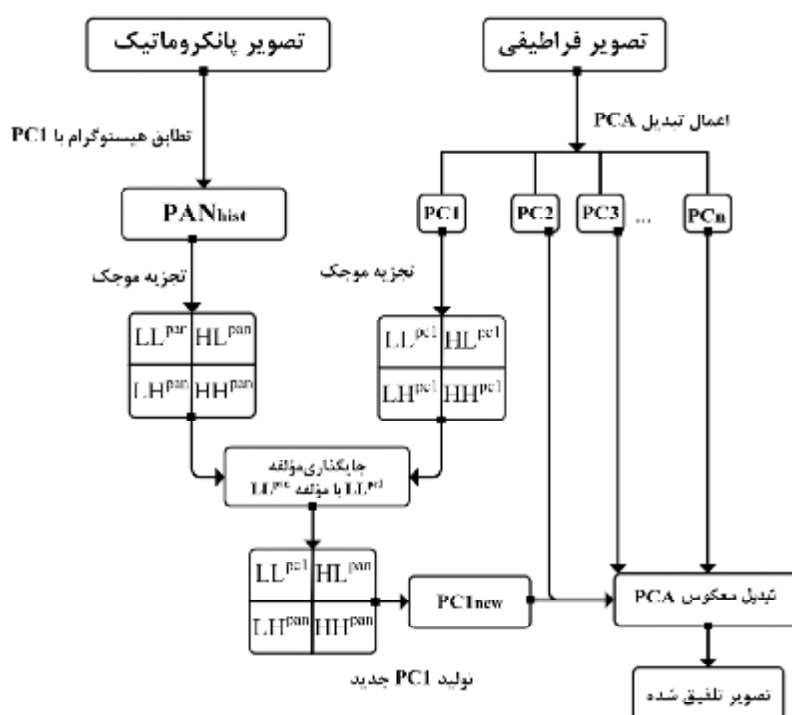
به‌دلیل همبستگی پایین بین تصویر پانکروماتیک و مؤلفه شدت، در تلفیق به روش IHS اعوجاج طیفی ایجاد می‌شود. با اینکه روش موجک در حالت کلی بهتر از روش‌های پرکاربردی مانند IHS و PCA در تلفیق تصاویر و حفظ محتوای طیفی عمل می‌کند، روش موجک نیز، به‌دلیل تفاوت در جزئیات تصویر پانکروماتیک و تصویر چندطیفی، اعوجاج طیفی دارد. ژانگ^۱ و همکارانش (۲۰۰۵) برای کم کردن این اعوجاج روش Wavelet-IHS را پیشنهاد کردند. تصویر در تجزیه موجک به چهار زیرتصویر (LL , LH , HL , HH) به نام ضرایب موجک تبدیل می‌شود. به LL زیرتصویر تقریب و به ضرایب HL , LH و HH به ترتیب ضرایب جزئیات در راستای عمودی، افقی و قطری می‌گویند. روند کلی این روش به این صورت است که پس از رجیستر (منطبق) کردن دو تصویر و نمونه‌برداری

1. Zhang

۲-۲-۴- روش پیشنهادی نوین FFT-PCA

روش PCA یکی از متداول ترین روش های تلفیق است. در این روش، به دلیل جایگذاری کامل تصویر پانکروماتیک به جای مؤلفه اصلی اول (PC1)، تمامی اطلاعات جزئیات مکانی تصویر پانکروماتیک به تصویر تلفیق شده انتقال خواهد یافت که در این صورت، تصویر تلفیق شده به تصویر پانکروماتیک شبیه تر خواهد بود (Shahdoosti and Ghassemian, 2012). این امر باعث افزایش دقت مکانی تصویر تلفیق شده به بهترین نحو خواهد شد ولی از سویی، باعث اعوجاج طیفی می شود؛ یعنی محتوای طیفی تصویر چندطیفی (فراطیفی) را حفظ نمی کند. برای رفع این خطا روش FFT-PCA پیشنهاد می شود. در این روش به جای جایگذاری کامل تصویر پانکروماتیک، از جایگذاری جزئی آن با استفاده

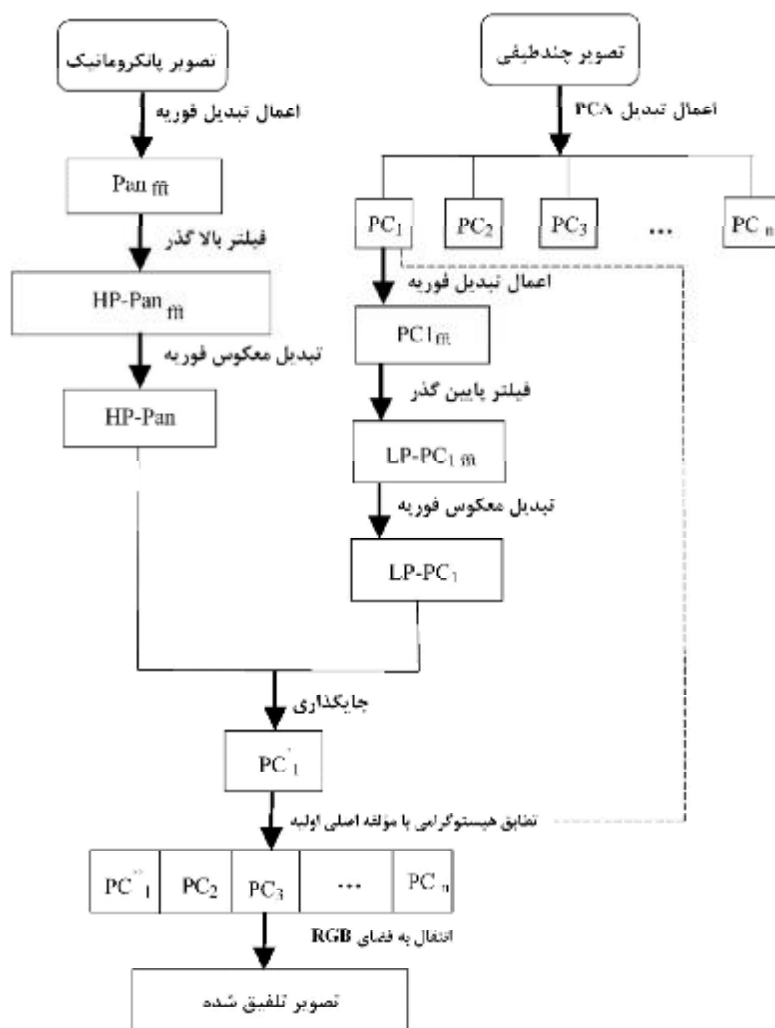
پانکروماتیک و نخستین مؤلفه اصلی (PC1) انجام و تصویر پانکروماتیک جدیدی تولید می شود. سپس تجزیه موجک روی نخستین مؤلفه اصلی (PC1) و تصویر پانکروماتیک جدید انجام می شود، ضرایب موجک هر دو تصویر حاصل می شود و ضریب تقریب نخستین مؤلفه اصلی (LL^{PC1}) به جای ضریب تقریب تصویر پانکروماتیک (LL^{pan}) جایگذاری می شود. سپس تبدیل معکوس موجک صورت می گیرد و اولین مؤلفه اصلی جدیدی ($PC1_{new}$) تولید می شود که درجات خاکستری آن توزیع یکسانی با PC1 اصلی دارد و شامل جزئیات مکانی یکسانی با تصویر پانکروماتیک است. در نهایت PC1 جدید به جای PC1 اصلی جایگذاری و تبدیل معکوس موجک انجام می شود و تصویر تلفیق شده به دست می آید.



شکل ۲. روند کلی روش تلفیق Wavelet-PCA

به اندازه پیکسل تصویر پانکروماتیک، تبدیل PCA روی تصویر چندطیفی (فراطیفی) انجام می‌شود و مؤلفه‌های PCA برای تصویر چندطیفی (فراطیفی) تولید می‌شود. سپس مؤلفه اصلی اول (PC1) و تصویر پانکروماتیک به فضای فوریه منتقل می‌شود. در فضای فوریه، روی تصویر پانکروماتیک فیلتر بالاگذر و روی مؤلفه اصلی اول (PC1) فیلتر پایین‌گذر اعمال می‌شود و سپس تبدیل معکوس فوریه بر آن‌ها اعمال می‌شود. در نهایت اطلاعات فرکانس بالا از تصویر پانکروماتیک با همان قسمت از مؤلفه اصلی اول فیلتر شده جایگذاری می‌شود و مؤلفه اصلی اول جدیدی شکل می‌گیرد و تطابق

از فیلترینگ فوریه سریع استفاده می‌شود. در واقع اطلاعات فرکانس بالای تصویر پانکروماتیک جایگزین بخش فرکانس بالای اولین مؤلفه اصلی (PC1) می‌شود. به طور کلی اولین مؤلفه اصلی (PC1) اطلاعات مشترک از همه باندهای استفاده شده را به منزله داده ورودی در PCA دربر دارد؛ یعنی اطلاعات مکانی، در حالی که اطلاعات طیفی خاص هر باند در دیگر مؤلفه‌های اصلی قرار می‌گیرد. روند کلی این روش، طبق شکل ۳، به این صورت است که پس از رجیستر (منطبق) کردن تصویر چندطیفی (فراطیفی) با تصویر پانکروماتیک و نمونه‌برداری مجدد تصویر چندطیفی (فراطیفی)



شکل ۳. فلوچارت روش تلفیق پیشنهادشده FFT-PCA

$$\text{فیلتر بالاگذر} = \begin{bmatrix} -1 & -1 & -1 \\ -1 & 8 & -1 \\ -1 & -1 & -1 \end{bmatrix}$$

۲-۳-۳- خطای کمترین مربعات (RMSE)

این معیار نیز به منظور بررسی محتوای طیفی تصویر تلفیق شده بسیار پر کاربرد است. هرچه مقدار این معیار کوچک تر باشد، کیفیت بالای طیفی تصویر تلفیق شده را می‌رساند. با رابطه (۲) می‌توان این معیار را محاسبه کرد (Strait et al., 2008).

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_x \sum_i (F_i(x) - M_i(x))^2}{n * m * d}} \quad \text{رابطه (۲)}$$

M تصویر چندطیفی (فراطیفی)، F تصویر تلفیق شده، x پیکسل، i شماره باند، n تعداد باند، m تعداد ستون و d تعداد باند است.

۲-۳-۴- شاخص ERGAS

از این شاخص نیز برای ارزیابی کیفیت طیفی استفاده می‌شود. کمترین مقدار این شاخص بیانگر دقت بهتر تصویر تلفیق شده است. رابطه (۳) این معیار را نشان می‌دهد (Strait et al., 2008).

$$ERGAS = 100 \frac{h}{l} \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{N=1}^N \left(\frac{RMSE(n)}{\mu(n)} \right)^2} \quad \text{رابطه (۳)}$$

h/l نسبت پیکسل سائز تصویر چندطیفی و پانکروماتیک، $\mu(n)$ میانگین n آمین باند و N تعداد باندهاست.

۲-۳-۵- شاخص SAM

دیگر معیار استفاده شده برای بررسی کیفیت طیفی تصویر تلفیق شده معیار SAM محسوب می‌شود. این معیار از طریق محاسبه زاویه بین طیفها، مشابهت

هیستوگرامی این مؤلفه اصلی نخست با مؤلفه اصلی اولیه انجام می‌شود و مؤلفه اصلی اول جدیدی تولید می‌شود. سرانجام، این مؤلفه جدید به جای مؤلفه اصلی اولیه جایگذاری و تبدیل معکوس PCA اعمال می‌شود و تصویر تلفیق شده به وجود می‌آید.

در این روش، محدودیت باندی وجود ندارد و از هر تعداد باندی می‌توان به منظور تلفیق تصاویر استفاده کرد. شکل ۳ روند کلی روش FFT-PCA را نشان می‌دهد.

۲-۳-۳- معیارهای ارزیابی

در این تحقیق، معیارهای زیر برای ارزیابی کیفیت طیفی و مکانی تصاویر تلفیق شده به کار رفته است:

۲-۳-۱- ضریب همبستگی (CC)

از معیارهای پر کاربرد برای ارزیابی کیفیت طیفی تصاویر تلفیق شده، می‌توان به ضریب همبستگی اشاره کرد. عدد این معیار هر چقدر به +1 نزدیک تر باشد بیانگر دقت بیشتر و شباهت طیفی بیشتر تصویر تلفیق شده به تصویر چندطیفی (فراطیفی) است. از رابطه (۱) می‌توان این معیار را محاسبه کرد (Al-Wassai and Kalyankar, 2012).

رابطه (۱)

$$CC = \frac{\sum_i^F \sum_j^m (F_k(i,j) - \bar{F}_k)(M_k(i,j) - \bar{M}_k)}{\sqrt{\sum_i^F \sum_j^m (F_k(i,j) - \bar{F}_k)^2 (M_k(i,j) - \bar{M}_k)^2}}$$

M_k و F_k به ترتیب بیانگر پیکسل‌های k آمین باند تصویر چندطیفی (فراطیفی) و تلفیق شده، و \bar{M}_k و \bar{F}_k به ترتیب بیانگر میانگین پیکسل‌های k آمین باند تصویر چندطیفی (فراطیفی) و تلفیق شده‌اند.

۲-۳-۲- ضریب همبستگی فیلتر شده (FCC)

از معیارهای پر کاربرد به منظور بررسی و ارزیابی کیفیت مکانی تصاویر تلفیق شده، معیار ضریب همبستگی فیلتر شده است. این معیار، برای پیاده‌سازی، روی تصویر پانکروماتیک و تصویر تلفیق شده فیلتر بالاگذر اعمال می‌شود و سپس ضریب همبستگی بین این دو تصویر فیلتر شده برای ارزیابی به کار می‌رود (Al-Wassai and Kalyankar, 2012).

1. Correlation Coefficient
2. Root Mean Square Error

جدول ۱. زیرمجموعه ۱۵۵ باندهای هایپریون

باند های هایپریون	طول موج (نانومتر)
۱۰-۵۷	۴۴۸-۹۲۶
۸۱-۹۷	۹۵۳-۱۱۱۴
۱۰۱-۱۱۹	۱۱۵۵-۱۳۳۶
۱۳۴-۱۶۴	۱۴۸۸-۱۷۹۰
۱۸۲-۲۲۱	۱۹۷۲-۲۳۶۵

اگر این خطوط روی منطقه مطالعاتی مورد نظر نباشد، می‌توان از آن صرف نظر کرد. در این تحقیق، به دلیل واقع نبودن این خطوط روی منطقه مطالعاتی مورد نظر، از این تصحیح صرف نظر شد. تصحیح اتمسفریکی یکی از مراحل اصلی پیش پردازش محسوب می‌شود. پردازش سطح یک روی تصاویر هایپریون، که از طریق USGS در اختیار کاربران قرار می‌گیرد، انجام گرفته است و این داده‌ها به صورت رادیانس‌اند بنابراین پس از صورت دادن تصحیحات یادشده برای حذف آثار جوی و همچنین تبدیل رادیانس به بازتابندگی از ماژول FLAASH استفاده شد که روی نرم‌افزار ENVI قرار دارد. تصحیح اثر Smile یکی از پردازش‌های مهم در تصحیح تصاویر هایپریون به شمار می‌رود. این اثر در همه تصاویر هایپریون وجود دارد و باعث ایجاد گرادیان روشنایی در تصویر می‌شود که برای مشاهده آن از تبدیل MNF استفاده می‌شود و پیش از پردازش‌های بعدی باید حذف شود. دلیل آن جابه‌جایی طول مرکز باند برای پیکسل‌های عمود بر مسیر اصلی از طول موج مرکزی است که به علت تغییرات پراکندگی زاویه با موقعیت میدان دید و روش‌های مورد استفاده پراکندن طیف در تصویر ورودی پدید می‌آید (Goodenough et al., 2003).

تصاویر فراطیفی ابعاد بالایی از اطلاعات طیفی دارند که بسیاری از این اطلاعات برای تحقیق مورد نظر لازم نیست؛ بنابراین برای اینکه حجم محاسباتی و زمان پردازش کاهش یابد، زیرمجموعه مکانی و طیفی از تصویر به‌طور معمول استفاده می‌شود. همبستگی بین باندهای تصاویر فراطیفی بسیار زیاد است (Sa et al., 2008). هم‌پوشانی طیفی آشکارسازهای باندهای مجاور باعث

طیفی بین طیف مرجع و طیف مورد نظر را بررسی می‌کند. هرچقدر مقدار این معیار کوچک‌تر باشد، یعنی طیف مورد نظر به طیف مرجع شباهت بیشتری دارد. رابطه (۴) این معیار را نشان می‌دهد (Yang et al., 2008).

$$\alpha = \cos^{-1} \frac{X \cdot R}{\|X\| \|R\|} = \cos^{-1} \frac{\sum_{i=1}^n x_i r_i}{\sqrt{\sum_{i=1}^n x_i^2} \sqrt{\sum_{i=1}^n r_i^2}} \quad (4)$$

X پیکسل تصویر تلفیق شده، R پیکسل تصویر رفرنس، α زاویه بین طیف مرجع و طیف مورد نظر، و n تعداد باند است.

۲-۳-۶- ارزیابی بصری

ارزیابی بصری قادر به تشخیص کیفیت طیفی و مکانی دقیق تصویر تلفیق شده نیست و از این معیار می‌توان برای تشخیص تغییرات رنگ و کنترل کیفیت کلی تصویر استفاده کرد.

۳- پیاده‌سازی و تجزیه و تحلیل نتایج

داده‌های ماهواره‌ای معمولاً به صورت خام در اختیار کاربران قرار می‌گیرد و برای استفاده از این داده‌ها استخراج اطلاعات باید پردازش‌هایی روی این داده‌ها صورت بگیرد. تصاویر هایپریون دارای ۲۲۰ باند طیفی در محدوده ۴۰۰ - ۲۵۰۰ نانومتر است. از بین باندهای تصاویر فراطیفی باندهای نویزی، غیرکالیبره و فاقد اطلاعات باید شناسایی و حذف شوند. پس از شناسایی و حذف باندهای نویزی و غیرکالیبره، یک زیرمجموعه ۱۵۵ باندهای باقی خواهد ماند. باندهای جذب بخار آب نیز پس از تصحیح اتمسفریکی حذف شده است. جدول ۱ فهرست این زیرمجموعه ۱۵۵ باندهای را نشان می‌دهد.

سپس نوارهای بد قائم در تصویر، که به دلیل کالیبره ناصحیح آشکارسازها به وجود می‌آیند باید شناسایی و تصحیح شوند. این نوارها را می‌توان با میانگین‌گیری از درجات خاکستری ستون‌های مجاور تصحیح کرد. ولی میانگین‌گیری باعث بروز خطا در طیف پیکسل می‌شود.

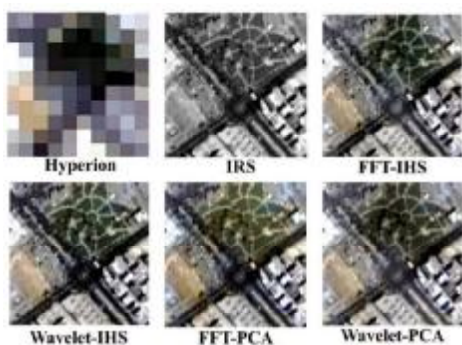
جدول ۲. مشخصات باندهای مورد استفاده از هایپریون در تلفیق

شماره باند	طول موج
باند آبی ۱۱-۱۵	۴۵۷/۳۴۱۷-۴۹۸/۰۴۲۸
باند سبز ۲۱-۲۵	۵۵۹/۰۹۴۴-۵۹۹/۷۹۵۵
باند قرمز ۲۹-۳۱	۶۴۰/۴۹۷۴-۶۶۰/۸۴۷۷
۳۳-۳۴	۶۸۱/۱۹۸۳-۶۹۱/۳۷۳۶

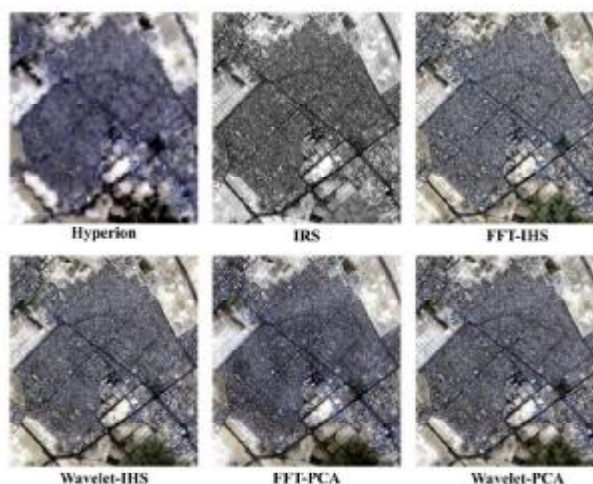
۳-۱- ارزیابی نتایج

پس از انجام دادن پردازش‌های یادشده روی تصاویر، تلفیق تصاویر مورد نظر با روش‌های مذکور پیاده‌سازی شد و کیفیت تصاویر تلفیق‌شده با معیارهای ارزیابی کیفیت طیفی و مکانی مورد بررسی و ارزیابی قرار گرفت. شکل ۴ ترکیب رنگی حاصل از تلفیق با روش‌های بیان‌شده را نشان می‌دهد.

افزودگی داده و افزایش هزینه پردازش می‌شود و همچنین سبب می‌شود داده‌ها اطلاعات و نویز داشته باشد که درصد نویز در تصاویر فراطیفی بالاتر است (Fountanas, 2004). همچنین به دلیل اینکه هدف تلفیق تصاویر است، از باندهایی می‌توان استفاده کرد که در محدوده طیفی مشابه در هر دو تصویر قرار داشته باشند. بنابراین از بین باندهای هایپریون، ۵۰ باند برای استفاده در تلفیق مجازند و از بین این تعداد باند نیز، ۱۵ باند برای تلفیق انتخاب و پیاده‌سازی شدند. سپس تصحیح هندسی روی تصویر هایپریون و تصویر پانکروماتیک Cartosat-1 انجام گرفت. برای تلفیق باید پیکسل‌های متناظر دو تصویر با هم رجیستر^۱ باشند. جدول ۲ مشخصات باندهای مورد استفاده از تصویر هایپریون در تلفیق را نشان می‌دهد. تصاویر مورد نظر، پس از پردازش‌های بیان‌شده، با روش‌های مذکور تلفیق شد. در ادامه، نتایج حاصل از آن ارزیابی شده است.



شکل ۵. بزرگ‌نمایی قسمتی از تصاویر ترکیب رنگی حاصل از تلفیق با روش‌های مورد نظر روی تصویر هایپریون سال ۲۰۰۹ و تصویر پانکروماتیک Cartosat-1



شکل ۴. تصاویر ترکیب رنگی حاصل از پیاده‌سازی تلفیق تصاویر هایپریون و پانکروماتیک Cartosat-1 و ۲۰۰۹

1. co-registering

با توجه به نتایج ارائه شده در جدول ۳، روش‌های پیشنهادی FFT-PCA و Wavelet-PCA دقت‌های بالاتری را نشان می‌دهند؛ هرچند روش Wavelet-IHS و FFT-IHS نیز نتایج قابل قبولی دارند. در حالت کلی، روش‌هایی که از جایگذاری جزئی تصویر پانکروماتیک استفاده می‌کنند نتایج قابل قبولی دارند.

جدول ۳. نتایج حاصل از ارزیابی تصویر تلفیق شده با تصویر هایپریون سال ۲۰۰۹ با معیارهای CC و FCC

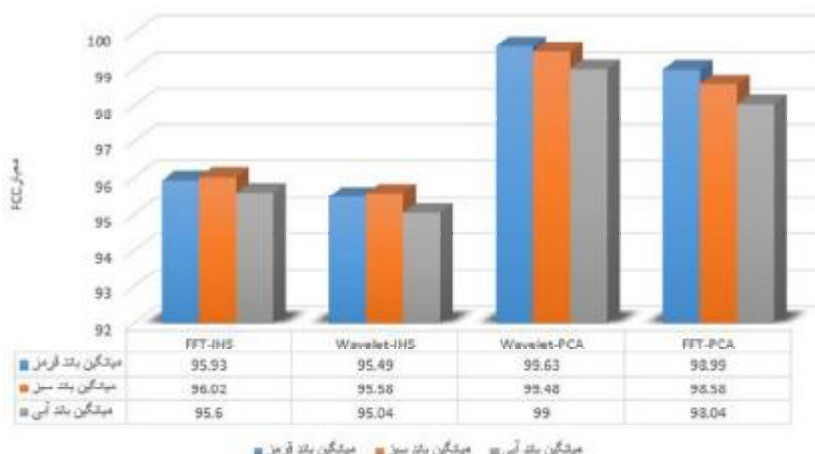
	FCC	FFT-IHS	Wavelet-IHS	Wavelet-PCA	FFT-PCA
	۲۹	۹۵/۷۶	۹۵/۴۸	۹۹/۶۰	۹۹/۱۴
باند قرمز	۳۰	۹۵/۹۰	۹۵/۵۶	۹۹/۶۲	۹۹/۰۴
	۳۱	۹۵/۹۰	۹۵/۴۴	۹۹/۶۴	۹۹/۰۹
	۳۳	۹۶/۰۴	۹۵/۴۳	۹۹/۶۶	۹۸/۹۲
	۳۴	۹۶/۰۸	۹۵/۵۵	۹۹/۶۴	۹۸/۷۶
باند سبز	۲۱	۹۵/۷۱	۹۵/۴۵	۹۹/۲۹	۹۸/۵۲
	۲۲	۹۵/۹۳	۹۵/۶۰	۹۹/۴۱	۹۸/۵۳
	۲۳	۹۶/۰۴	۹۵/۵۹	۹۹/۵۵	۹۸/۸۱
	۲۴	۹۶/۲۰	۹۵/۵۸	۹۹/۵۷	۹۸/۵۶
	۲۵	۹۶/۲۶	۹۵/۷۰	۹۹/۵۹	۹۸/۵۱
باند آبی	۱۱	۹۴/۶۴	۹۴/۲۱	۹۸/۹۹	۹۸/۵۵
	۱۲	۹۵/۴۵	۹۵/۰۱	۹۹/۰۱	۹۸/۲۹
	۱۳	۹۵/۸۴	۹۵/۳۰	۹۹/۰۲	۹۸/۱۲
	۱۴	۹۵/۹۹	۹۵/۲۹	۹۸/۹۹	۹۷/۶۹
	۱۵	۹۶/۰۸	۹۵/۴۳	۹۹/۰۱	۹۷/۵۵
	CC	FFT-IHS	Wavelet-IHS	Wavelet-PCA	FFT-PCA
	۲۹	۷۲/۰۴	۷۷/۰۴	۷۹/۴۶	۷۶/۹۹
باند قرمز	۳۰	۷۳/۹۰	۷۷/۳۸	۷۹/۴۶	۷۷/۷۶
	۳۱	۷۵/۰۱	۷۷/۹۶	۷۹/۴۸	۷۷/۸۱
	۳۳	۷۷/۲۷	۷۸/۳۰	۷۹/۴۹	۷۸/۹۰
	۳۴	۷۷/۳۱	۷۷/۸۳	۷۹/۵۰	۷۹/۱۹
باند سبز	۲۱	۶۳/۴۶	۷۰/۵۳	۷۹/۳۸	۷۶/۹۰
	۲۲	۶۷/۲۶	۷۲/۱۱	۷۹/۳۸	۷۷/۶۸
	۲۳	۷۰/۰۷	۷۳/۹۷	۷۹/۳۷	۷۷/۶۸
	۲۴	۷۲/۳۷	۷۴/۰۴	۷۹/۴۱	۷۸/۸۱
	۲۵	۷۴/۰۸	۷۴/۹۶	۷۹/۴۴	۷۹/۱۴
باند آبی	۱۱	۷۹/۶۷	۸۲/۸۰	۸۰/۴۵	۷۸/۲۱
	۱۲	۷۷/۰۵	۷۹/۷۹	۸۰/۴۲	۷۸/۹۱
	۱۳	۷۲/۷۱	۷۵/۹۰	۸۰/۳۲	۷۸/۸۲
	۱۴	۷۳/۸۲	۷۵/۱۴	۸۰/۳۶	۷۹/۸۸
	۱۵	۷۳/۹۱	۷۴/۶۸	۸۰/۳۲	۸۰/۱۲

ارزیابی بصری از معیارهای اولیه برای ارزیابی تصاویر تلفیق شده شمرده می‌شود. ارزیابی بصری قادر به تشخیص کیفیت طیفی و مکانی دقیق نیست و از این معیار می‌توان به منظور کنترل کیفیت کلی تصویر تلفیق شده استفاده کرد. همان‌طور که از شکل ۴ مشخص است، از لحاظ بصری، بهبود کیفیت مکانی در تمامی تصاویر تلفیق شده به وضوح مشخص است. برای ارزیابی بهتر نتایج، بزرگ‌نمایی قسمتی از منطقه در شکل ۵ نشان داده شده است که به وضوح، بهبود کیفیت مکانی تصویر پانکروماتیک دیده می‌شود. برای ارزیابی دقیق‌تر نتایج، شاخص‌های ارزیابی کیفیت طیفی و مکانی دقیق‌تری به کار رفته است.

نتایج حاصل از ارزیابی تصویر تلفیق شده با معیارهای FCC و CC در جدول ۳ ارائه کرده‌ایم. ضریب همبستگی فیلترشده (FCC) در واقع اطلاعات مکانی تصویر تلفیق شده را با اطلاعات مکانی تصویر پانکروماتیک مقایسه می‌کند. شباهت بیشتر این اطلاعات دقت مکانی بالاتر را نشان می‌دهد. همچنین از ضریب همبستگی (CC) نیز به منظور سنجش محتوای طیفی تصویر تلفیق شده استفاده شده است. اعداد این دو معیار هرچه بیشتر باشد، دقت بهتر و بالاتر تصویر تلفیق شده با آن روش را نشان می‌دهد. همچنین برای نمایش بهتر نتایج حاصل از روش ضریب همبستگی فیلترشده، نمودار میله‌ای نتایج حاصل از آن معیار در شکل ۶ نشان داده شده است.

با توجه به جدول ۳، از نظر معیار FCC، دقت مکانی روش‌های FFT-PCA، Wavelet-PCA بیشتر از دیگر روش‌های پیاده‌سازی شده است و نیز محتوای مکانی تصاویر تلفیق شده با روش‌های FFT-PCA و Wavelet-PCA بهتر و دقیق‌تر حفظ شده است. در شکل ۶ این نتایج به شکل بهتری نمایش داده شده است. دقت مکانی روش‌های مبتنی بر PCA بهتر و دقیق‌تر از روش‌های مبتنی بر IHS است. محتوای مکانی تصویر تلفیق شده با روش‌های مبتنی بر PCA شباهت بیشتری به تصویر پانکروماتیک دارد. از نظر طیفی نیز،

مرئضی بشیربور و همکاران



شکل ۶. مقایسه و ارزیابی کیفیت مکانی تصاویر تلفیق‌شده با معیار FCC

ERGAS	FFT-IHS	Wavelet-IHS	Wavelet-PCA	FFT-PCA
باند قرمز	۲۹	۱۱/۷۷	۱۱/۳۶	۱۰/۹۰
	۳۰	۱۱/۴۴	۱۱/۳۳	۱۰/۹۷
	۳۱	۱۱/۳۷	۱۱/۳۵	۱۱/۱۶
	۳۳	۱۱/۰۵	۱۱/۴۷	۱۱/۳۷
باند سبز	۲۱	۱۲	۱۱/۵۷	۹/۵۶
	۲۲	۱۱/۶۳	۱۱/۵۱	۹/۸۶
	۲۳	۱۱/۵۱	۱۱/۵۰	۱۰/۲۸
	۲۴	۱۱/۲۰	۱۱/۶۳	۱۰/۴۱
باند آبی	۲۵	۱۰/۹۳	۱۱/۴۹	۱۰/۵۰
	۱۱	۱۱/۹۵	۱۱/۴۸	۱۲/۵۷
	۱۲	۱۱/۶۵	۱۱/۵۰	۱۱/۵۲
	۱۳	۱۱/۶۵	۱۱/۶۲	۱۰/۵۳
SAM	۱۴	۱۱/۳۵	۱۱/۷۷	۱۰/۴۶
	۱۵	۱۱/۱۰	۱۱/۶۵	۱۰/۲۵
	۲۹	۰/۱۹۷	۰/۱۸۹	۰/۱۸۱
	۳۰	۰/۱۹۱	۰/۱۸۸	۰/۱۸۲
باند قرمز	۳۱	۰/۱۸۹	۰/۱۸۸	۰/۱۸۵
	۳۳	۰/۱۸۴	۰/۱۹۰	۰/۱۸۸
	۳۴	۰/۱۸۰	۰/۱۸۹	۰/۱۸۴
	۲۱	۰/۲۰۲	۰/۱۹۴	۰/۱۶۰
باند سبز	۲۲	۰/۱۹۶	۰/۱۹۳	۰/۱۶۵
	۲۳	۰/۱۹۳	۰/۱۹۲	۰/۱۷۱
	۲۴	۰/۱۸۸	۰/۱۹۴	۰/۱۷۳
	۲۵	۰/۱۸۳	۰/۱۹۱	۰/۱۷۵
باند آبی	۱۱	۰/۱۹۶	۰/۱۸۸	۰/۲۰۵
	۱۲	۰/۱۹۳	۰/۱۹۰	۰/۱۸۵
	۱۳	۰/۱۹۴	۰/۱۹۳	۰/۱۷۵
	۱۴	۰/۱۹۰	۰/۱۹۶	۰/۱۷۴
۱۵	۰/۱۸۶	۰/۱۹۴	۰/۱۷۱	

به‌منظور ارزیابی بیشتر تصویر تلفیق‌شده از نظر طیفی، معیارهای ارزیابی طیفی RMSE، ERGAS، SAM نیز به‌کار رفته‌اند. جدول ۴ نتایج حاصل از سنجش محتوای طیفی با روش‌های ERGAS، RMSE و SAM را نشان می‌دهد. همچنین برای نمایش بهتر نتایج حاصل از سنجش محتوای طیفی با روش RMSE، نمودار میله‌ای آن در شکل ۷ نمایش داده شده است.

جدول ۴. نتایج حاصل از ارزیابی تصویر تلفیق‌شده با معیارهای SAM و ERGAS، RMSE

	RMSE	FFT-IHS	Wavelet-IHS	Wavelet-PCA	FFT-PCA
باند قرمز	۲۹	۰/۰۴۰	۰/۰۳۹	۰/۰۳۷	۰/۰۳۷
	۳۰	۰/۰۴۱	۰/۰۴۱	۰/۰۴۰	۰/۰۳۸
	۳۱	۰/۰۳۸	۰/۰۳۸	۰/۰۳۸	۰/۰۳۶
	۳۳	۰/۰۴۰	۰/۰۴۲	۰/۰۴۱	۰/۰۳۹
باند سبز	۲۱	۰/۰۳۶	۰/۰۳۵	۰/۰۲۹	۰/۰۲۸
	۲۲	۰/۰۳۶	۰/۰۳۵	۰/۰۳۰	۰/۰۲۹
	۲۳	۰/۰۳۶	۰/۰۳۶	۰/۰۳۲	۰/۰۳۱
	۲۴	۰/۰۳۸	۰/۰۳۹	۰/۰۳۵	۰/۰۳۳
باند آبی	۲۵	۰/۰۳۶	۰/۰۳۸	۰/۰۳۵	۰/۰۳۲
	۱۱	۰/۰۱۶	۰/۰۱۶	۰/۰۱۷	۰/۰۱۷
	۱۲	۰/۰۱۹	۰/۰۱۸	۰/۰۱۹	۰/۰۱۸
	۱۳	۰/۰۲۲	۰/۰۲۲	۰/۰۲۰	۰/۰۱۹
۱۴	۰/۰۲۲	۰/۰۲۳	۰/۰۲۱	۰/۰۱۹	
۱۵	۰/۰۲۴	۰/۰۲۵	۰/۰۲۲	۰/۰۲۰	

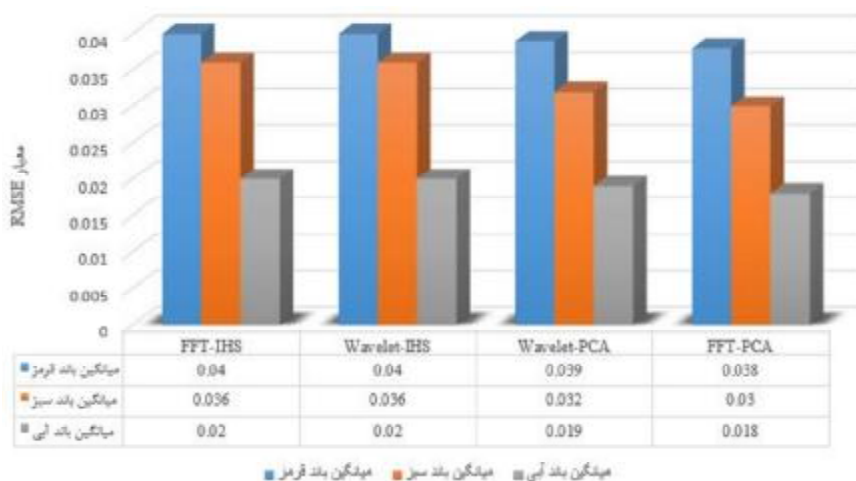
تصویر تلفیق‌شده و طیف مرجع شده‌اند. بنابراین زاویه بین طیف‌ها هر قدر کوچک‌تر باشد، بیان می‌کند طیف مورد نظر به طیف مرجع شباهت بیشتری دارد. در واقع در حالت کلی، با توجه به نتایج حاصل از پیاده‌سازی روش‌های تلفیق، روش‌های مبتنی بر PCA دقتی بیشتر از به روش‌های مبتنی بر IHS به دست دادند.

۴- نتیجه‌گیری

یکی از موضوعات مهم در سنجش از دور در زمینه تلفیق تصاویر است. تلفیق کاربردهای وسیعی دارد؛ همچون بهبود طبقه‌بندی، بهبود تفسیر نتایج و جایگذاری اطلاعات از دست‌رفته در یک تصویر با استفاده از تصویر سنجنده دیگر. روش‌های گوناگونی برای تلفیق تصاویر مطرح شده است؛ بنابراین تلفیقی بهتر و کارآتر است که، در کنار افزایش دقت مکانی تصویر مورد نظر، بتواند محتوای طیفی تصویر فرافیزی/چندطیفی را به بهترین شکل حفظ کند. در این تحقیق، روش‌های تلفیق مبتنی بر PCA و IHS بررسی و ارزیابی شد و نتایج تلفیق با معیارهای ارزیابی معیارهای ضریب همبستگی، ضریب همبستگی فیلترشده، خطای کمترین مربعات، شاخص ERGAS و

هرچه مقدار RMSE کمتر باشد، بیان می‌کند که تصویر تلفیق‌شده با آن روش در حفظ محتوای طیفی عملکرد بهتری داشته است. با توجه به نتایج جدول ۴، کمترین RMSE به ترتیب مربوط به FFT-PCA، Wavelet-PCA، Wavelet-IHS و FFT-IHS است. با توجه به این نتایج، دقت حاصل از روش FFT-PCA از نظر نتایج حاصل از معیار RMSE از دیگر روش‌ها بیشتر است و روش Wavelet-IHS کمترین دقت را در بین این روش‌ها دارد. نتایج حاصل از این روش برای نمایش بهتر در شکل ۷ به صورت نمودار میله‌ای نشان داده شده است. روش‌های مبتنی بر PCA عملکردی بهتر از روش‌های مبتنی بر IHS دارد.

نتایج به دست آمده با معیار ERGAS نیز نشان از دقت بالای روش FFT-PCA و Wavelet-PCA دارد. در واقع هرچه عدد این معیار کوچک‌تر باشد، گویای دقت طیفی بیشتر است. معیار SAM از طریق محاسبه زاویه بین طیف‌ها مشابهت طیفی بین طیف مرجع و طیف مورد نظر را بررسی می‌کند. با توجه به نتایج ارائه شده در جدول ۴، به ترتیب روش‌های FFT-PCA، Wavelet-PCA، Wavelet-IHS و FFT-IHS، از نظر شاخص SAM، باعث ایجاد زاویه کمتری بین طیف



شکل ۷. مقایسه و ارزیابی کیفیت طیفی تصاویر تلفیق‌شده با معیار RMSE

۶- منابع

- Al-Wassai, F.A. & Kalyankar, D.N., 2012, **A Novel Metric Approach Evaluation For The Spatial Enhancement Of Pan-Sharpned Images**, arXiv preprint arXiv:1207.5064.
- Carper, W.J., 1990, **The Use of Intensity-Hue-Saturation Transformations for Merging SPOT Panchromatic and Multispectral Image Data**, Photogramm. Eng. Remote Sens., Vol. 56, PP. 457-467.
- Chavez, P., Sides, S.C. & Anderson, J.A., 1991, **Comparison of Three Different Methods to Merge Multiresolution and Multispectral Data-Landsat TM and SPOT Panchromatic**, Photogrammetric Engineering and Remote Sensing, Vol. 57, PP. 295-303.
- Fountanas, L., 2004, **Principal Components Based Techniques for Hyperspectral Image Data**, Monterey California. Naval Postgraduate School.
- Gharbia, R., Azar, A.T., Baz, A.E. & Hassanien, A.E., 2014, **Image Fusion Techniques in Remote Sensing**, arXiv preprint arXiv:1403.5473.
- González-Audicana, M., Saleta, J.L., Catalán, R.G. & García, R., 2004, **Fusion of Multispectral and Panchromatic Images Using Improved IHS and PCA Mergers Based on Wavelet Decomposition**, Geoscience and Remote Sensing, IEEE Transactions on, Vol. 42, PP. 1291-1299.
- Goodenough, D.G., Dyk, A., Niemann, K.O., Pearlman, J.S., Chen, H., Han, T., Murdoch, M. & West, C., 2003, **Processing Hyperion and ALI for Forest Classification**, Geoscience and Remote Sensing, IEEE Transactions on, Vol. 41, PP. 1321-1331.
- شاخص SAM تجزیه و تحلیل شدند. نتایج معیار خطای کمترین مربعات به ترتیب برای FFT-PCA، Wavelet-PCA، Wavelet-IHS و FFT-IHS برای باند ۱۵ برابر با ۰/۰۲۰، ۰/۰۲۲، ۰/۰۲۵ و ۰/۰۲۴؛ برای باند ۲۵ برابر با ۰/۰۳۲، ۰/۰۳۵، ۰/۰۳۸ و ۰/۰۳۶؛ و برای باند ۳۴ برابر با ۰/۰۴۰، ۰/۰۴۳، ۰/۰۴۴ و ۰/۰۴۱. همچنین نتایج معیار SAM برای FFT-PCA، Wavelet-PCA، Wavelet-IHS و FFT-IHS برای باند ۱۵ برابر با ۰/۱۶۰، ۰/۱۷۱، ۰/۱۹۴ و ۰/۱۸۶؛ برای باند ۲۵ برابر با ۰/۱۷۵، ۰/۱۹۱، ۰/۱۸۳ و ۰/۱۸۰؛ و برای باند ۳۴ برابر با ۰/۱۷۳، ۰/۱۸۴، ۰/۱۸۹ و ۰/۱۸۰ حاصل شد. برای معیارهای دیگر نیز نتایج مشابهی به دست آمد.
- در مجموع با توجه به نتایج حاصل از تمامی معیارهای ارزیابی کیفی طیفی و مکانی پیاده‌سازی شده، می‌توان بیان داشت که الگوریتم‌های تلفیق مبتنی بر PCA، در مقایسه با الگوریتم‌های تلفیق مبتنی بر IHS، محتوای طیفی تصویر هایپریون و محتوای مکانی تصویر پانکروماتیک را بهتر حفظ می‌کنند. روش FFT-PCA و روش Wavelet-PCA، افزون بر دقت مکانی بسیار خوبی که به دست می‌دهند، محتوای طیفی تصویر هایپریون را مطلوب‌تر از دیگر روش‌های پیاده‌سازی شده حفظ می‌کند. از بین تمامی روش‌های پیاده‌سازی شده، روش FFT-PCA از نظر طیفی دقت بیشتری حاصل کرده است و در واقع بهتر از دیگر روش‌ها توانسته اطلاعات طیفی را حفظ کند. این روش‌ها، به دلیل استفاده از جایگذاری جزئی برای تلفیق تصاویر، دقت بیشتری دارند.

۵- پیشنهادات

پیشنهاد می‌شود این الگوریتم‌ها روی مجموعه‌ای دیگر از تصاویر و روی منطقه مطالعاتی دیگری نیز پیاده‌سازی، و نتایج ارزیابی شود تا عملکرد این الگوریتم‌ها را بتوان بهتر مشخص کرد. همچنین تأثیر نسبت اندازه پیکسل دو تصویر روی تصویر تلفیق شده ارزیابی شود.

- Ling, Y., Ehlers, M., Usery, E.L. & Madden, M., 2007, **FFT-Enhanced IHS Transform Method for Fusing High-Resolution Satellite Images**, ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing, Vol. 61, pp. 381-392.
- Pajares G. & De La Cruz, J.M., 2004, **A Wavelet-Based Image Fusion Tutorial**, Pattern Recognition, Vol. 37, PP. 1855-1872.
- Pohl, C., Van Genderen, J. L., 1998, **Multisensor Image Fusion in Remote Sensing: Concepts, Methods, and Application**, *Int J Remote Sensing*.
- Pohl, C. & Van Genderen, J.L., 1998, **Review Article Multisensor Image Fusion in Remote Sensing: Concepts, Methods and Applications**, International Journal of Remote Sensing, Vol. 19, PP. 823-854.
- Shahdoosti, H.R. & Ghassemian, H., 2012, **Spatial PCA as a New Method for Image Fusion**, Artificial Intelligence and Signal Processing (AISP), 16th CSI International Symposium, PP. 090-094.
- Shahdoosti, H.R. & Ghassemian, H., 2016, **Combining the Spectral PCA and Spatial PCA Fusion Methods by an Optimal Filter**, Information Fusion, Vol. 27, PP. 150-160.
- Strait, M., Rahmani, S. & Merkurev, D., 2008, **Evaluation of Pan-Sharpning Methods**, UCLA Department of Mathematics.
- Su, L., Liu, X., Wang, X. & Jiang, N., 2008, **Dimensional Reduction In Hyperspectral Images By Danger Theory Based Artificial Immune System**, The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences, Beijing, Vol. 37.
- Yang, C., Everitt, J.H. & Bradford, J.M., 2008, **Yield Estimation from Hyperspectral Imagery Using Spectral Angle Mapper (SAM)**, Transactions of the ASABE, Vol. 51, PP. 729-737.
- Yang, S., Zeng, L., Jiao, L. & Xiao, J., 2007, **Fusion of Multispectral and Panchromatic Images Using Improved GHS and PCA Mergers Based on Contourlet**, International Symposium on Multispectral Image Processing and Pattern Recognition, PP. 67871J-67871J-7.
- Zhang Y. & Hong, G., 2005, **An IHS and Wavelet Integrated Approach to Improve Pan-Sharpning Visual Quality of Natural Colour IKONOS and QuickBird Images**, Information Fusion, Vol. 6, PP. 225-234.