



بهبود تصاویر ماهواره‌ای ادغام شده با روش آنالیز مؤلفه‌های اصلی و تبدیل موجک ایستا

مهرشاد بریمانی^۱، علی آقاگل‌زاده^۲

^۱ دانشجوی دکتری تخصصی، گروه مهندسی مخابرات، دانشکده مهندسی برق و کامپیوتر، دانشگاه صنعتی نوشیروانی بابل
mehrshad_brm@nit.ac.ir

^۲ استاد، گروه مهندسی مخابرات، دانشکده مهندسی برق و کامپیوتر، دانشگاه صنعتی نوشیروانی بابل
aghagol@nit.ac.ir

جمع‌آوری شده و در تعداد کمتری تصویر، معمولاً به صورت یک تصویر، قرار می‌گیرند. تصویر ادغام یافته برای اهدافی همچون ادراک دیداری و پردازش‌های کامپیوتری مناسب‌تر از تصویر اولیه است [۱]. ادغام تصویر نه تنها باعث کاهش حجم انبوه اطلاعات ذخیره شده می‌شود، بلکه به تولید تصویری با کیفیت‌تر و دارای اطلاعات مفیدتر می‌شود. ماهواره‌های مشاهده‌گر زمین، تصاویر را در باندهای مختلف طیف الکترومغناطیسی تهیه می‌کنند [۲ و ۳]. به منظور ثابت نگاه داشتن نسبت سیگنال به نویز تصاویر دریافتی، تصاویری که دقت مکانی بالایی دارند، دقت طیفی پایین و تصاویری که دقت طیفی بالایی دارند دقت مکانی پایینی خواهند داشت. در ادغام تصاویر ماهواره‌ای، یک تصویر تک‌رنگ با وضوح مکانی بالاتر و یک تصویر چندطیفی با وضوح مکانی پایین‌تر اما اطلاعات طیفی بالاتر، ادغام شده و یک تصویری که هم دارای اطلاعات جزئی مکانی و هم اطلاعات طیفی بالاتری است، به دست می‌آید [۴ و ۵].

۲. مواد و روش‌ها

برای مقایسه روش‌های پیشنهادی با روش‌های دیگر به تصاویر آزمون معتبری احتیاج است و در این مقاله از دو شکل آزمون (۱) و (۲) استفاده شده است. در شکل (۲) قسمت (الف) به دلیل خرابی حسگر دوربین عکس برداری ماهواره‌ای تصاویر ورودی دچار نویز شده‌اند و می‌خواهیم با استفاده روش‌های پیشنهادی و روش‌های معتبر، این نویز ناخواسته را کاهش دهیم. داده‌های اصلی این مقاله، تصاویر ماهواره‌ای تک‌رنگ (باند ۹) و چندطیفی (باندهای ۲، ۳ و ۴) به دست آمده از ماهواره Landsat 8 هستند. داده‌های مربوطه در تاریخ 2022-05-27 (مسیر: ۱۸۵، ردیف: ۳۲) جمع‌آوری شده است. باندهای تصویر چندطیفی به ترتیب در

چکیده- امروزه به منظور پایش زمین مانند آشکارسازی تغییرات، طبقه‌بندی پوشش‌های زمینی و تشخیص عارضه، اغلب نیاز به تصاویری با قدرت تفکیک مکانی و طیفی مناسب بیش از پیش احساس می‌شود. روش آنالیز مؤلفه‌های اصلی استاندارد یک انتخاب محبوب و مناسب است که در نتایج به دست آمده از آن اطلاعات مکانی به خوبی حفظ می‌شود. در تصویر ادغام شده توسط روش تبدیل موجک ایستا، ویژگی‌های طیفی به خوبی حفظ می‌شود اما وضوح مکانی تصویر حاصل نسبت به روش آنالیز مؤلفه‌های اصلی استاندارد بهبود چندانی نیافته است. در این مقاله، یک الگوریتم ترکیبی جدید با ترکیب روش‌های آنالیز مؤلفه‌های اصلی استاندارد مکانی و روش تبدیل موجک ایستا طیفی، توسط یک فیلتر بهبود یافته پیشنهاد شده است. ارزیابی تصاویر بهبود یافته، با استفاده از شاخص‌های اعتبار سنجی کلی از جمله روش‌های معیار خطای نسبی کلی ترکیب، فهرست کیفیت کلی تصویر، ریشه میانگین مربع خطا، معیار ضریب هم‌بستگی، معیار مقدار متوسط خطای طیفی نسبی تصویر و معیار نقشه‌یابی طیفی لبه، نشان می‌دهد که روش پیشنهادی در مقایسه با الگوریتم‌های معروف، کیفیت تصویر ادغام شده را هم از نظر طیفی و هم از نظر مکانی بهبود می‌بخشد.

کلمات کلیدی- آنالیز مؤلفه‌های اصلی، ادغام تصاویر ماهواره‌ای، تبدیل موجک ایستا، تصاویر تک‌رنگ، تصاویر چندطیفی.

۱. مقدمه

ادغام تصویر فرآیندی است که در آن دو یا چند تصویر از یک صحنه مشترک با یکدیگر ترکیب می‌شوند و تصویری جدید تولید می‌کنند به این صورت که تمام اطلاعات مهم از چندین تصویر

ماتریس X و Y تصاویر اولیه بارگذاری شده هستند و n تعداد ماتریس داده است. با توجه به رابطه‌های (۱) و (۲)، $cov(X, X)$ و $cov(Y, Y)$ به ترتیب تبدیل به واریانس تصویر X و واریانس تصویر Y می‌گردند.

مرحله دوم: با توجه به ماتریس کوواریانس، می‌توان مقادیر ویژه و بردارهای ویژه را به دست آورد. اگر ماتریس کوواریانس را C در نظر بگیریم، آنگاه با حل معادله رابطه (۳) می‌توان مقادیر ویژه (λ) را به دست آورد.

$$\det(C - \lambda I) = 0 \quad (3)$$

اگر ماتریس کوواریانس C را به ماتریس v که همان بردار ویژه است، اعمال کنیم، آنگاه با توجه به رابطه (۴)، می‌توان ماتریس مقدار ویژه را به دست آورد:

$$cv = \lambda v \quad (4)$$

نکته مهم که باید توجه شود این است که بزرگترین مقدار ویژه همان مقدار ویژه اصلی بوده و در نتیجه بردار ویژه متناظر با آن، به عنوان بردار ویژه اصلی در نظر گرفته می‌شود.

مرحله سوم: پس از به دست آمدن بردار ویژه متناظر با بزرگترین بردار ویژه ماتریس کوواریانس C که آن را $v(x, y)$ می‌نامیم، وزن‌های تصاویر اصلی برای ادغام باید محاسبه شود. به طوری که وزن‌های تصویر ورودی X و تصویر ورودی Y را مطابق با رابطه زیر به دست می‌آوریم:

$$a_x = \frac{x}{x+y}, \quad a_y = \frac{y}{x+y} \quad (5)$$

(یعنی $a_x + a_y = 1$) پس از محاسبه وزن‌های تصاویر ورودی اصلی، تصویر ادغام شده F را با توجه به رابطه زیر به دست می‌آوریم:

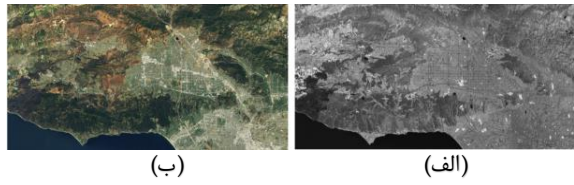
$$F(x, y) = X(x, y).a_x + Y(x, y).a_y \quad (6)$$

دیگرام روش آنالیز مؤلفه‌های اصلی پیشنهادی به صورت شکل (۳) است. تصاویر چندطیفی و تک‌رنگ ورودی به صورت دو بردار ستونی چیده شده‌اند. در شکل (۳) منظور از ماتریس P_1 تا P_m تصویرهای با ابعاد $K \times L$ پیکسل هر یک از زیرباندهای تصویر چند طیفی هستند و منظور از LMS زیر باند تصویر چندطیفی است که هیستوگرام آن با PC_1 مطابقت دارد. به روش مشابه برای سایر باندهای تصویر چندطیفی، ادغام را با استفاده از روش آنالیز مؤلفه‌های اصلی انجام می‌دهیم. سپس تصویر به دست آمده را باید در محدوده $[0, 1]$ نرمال‌سازی نمود. در روش پیشنهادی این مقاله از مؤلفه‌های اصلی PC_1 (که بیش از ۹۰ درصد اطلاعات تصویر ورودی در آن جای دارد) و مؤلفه PC_2 برای ادغام استفاده شده است.

محدوده $0.45-0.51 \mu m$ ، $0.53-0.59 \mu m$ و $0.63-0.67 \mu m$ باند تک‌رنگ در محدوده پهنای باند $0.50-0.68 \mu m$ ثبت شده‌اند. تصاویر چندطیفی و تک‌رنگ به ترتیب دارای وضوح ۳۰ و ۱۵ متر هستند و با یکدیگر رجیستر شده‌اند. همچنین مکان تصاویر، مربوط به بخشی از بندر مالیبو لوس آنجلس است [۶ و ۷].



شکل ۱: تصویر آزمون اول (الف) تصویر تک‌رنگ، (ب) تصویر چندطیفی [۶].



شکل ۲: تصویر آزمون دوم (الف) تصویر تک‌رنگ، (ب) تصویر چندطیفی [۷].

۲-۱- روش‌های ادغام پیشنهاد شده

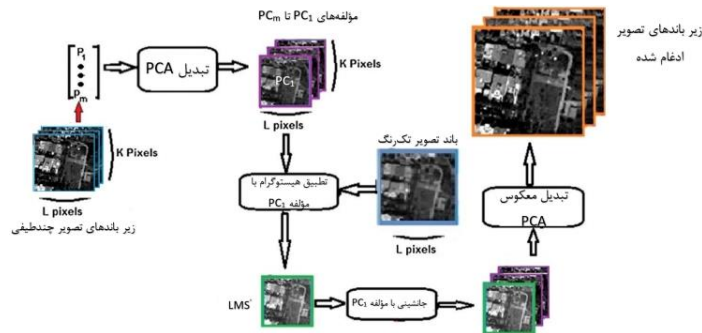
الگوریتم آنالیز مؤلفه‌های اصلی یک روش ریاضی است که از تبدیلات متعامد استفاده می‌کند تا مجموعه‌ای از متغیرهای همبسته را به مجموعه‌ای از مقادیر متغیرهای غیر همبسته به نام مؤلفه‌های اصلی تبدیل کند. اولین مؤلفه اصلی به عنوان مؤلفه متناظر با حداکثر واریانس در نظر گرفته می‌شود. مؤلفه اصلی دوم محدود به قرار گرفتن در زیر فضای متعامد مؤلفه اصلی اول است. در این زیر فضای، مؤلفه اصلی سوم جهت حداکثر کردن واریانس در زیر فضای عمود بر مؤلفه اصلی اول و دوم قرار می‌گیرد و همین شیوه تا آخرین مؤلفه اصلی ادامه می‌یابد. جزئیات این روش پیشنهادی در ادامه مرحله به مرحله توضیح داده شده است:

مرحله اول: در این روش پیشنهادی ابتدا باید یکی از باندهای تصویر چندطیفی را انتخاب کرده (تصویر ورودی X) و به همراه تصویر تک‌رنگ بارگذاری شده (تصویر ورودی Y)، سپس نرمال‌سازی سطر و ستون را انجام می‌دهیم. در مرحله بعد ماتریس 2×2 کوواریانس C ، را از طریق رابطه زیر به دست می‌آوریم.

$$C = \begin{pmatrix} cov(X, X) & cov(X, Y) \\ cov(Y, X) & cov(Y, Y) \end{pmatrix} \quad (1)$$

به‌طوریکه:

$$cov(X, Y) = \frac{\sum_{i=1}^n (X_i - \bar{X})(Y_i - \bar{Y})}{n - 1} \quad (2)$$



شکل ۳: دیاگرام روش آنالیز مؤلفه‌های اصلی پیشنهادی

مرحله دوم: در این مرحله میانگین ضرائب محتوی ناشی از هر دو تصویر محاسبه خواهد شد.
مرحله سوم: قدر مطلق ضرائب جزئیات افقی گرفته شده و سپس اختلاف ضرائب جزئیات (افقی HH) هر دو تصویر حساب خواهد شد (D).

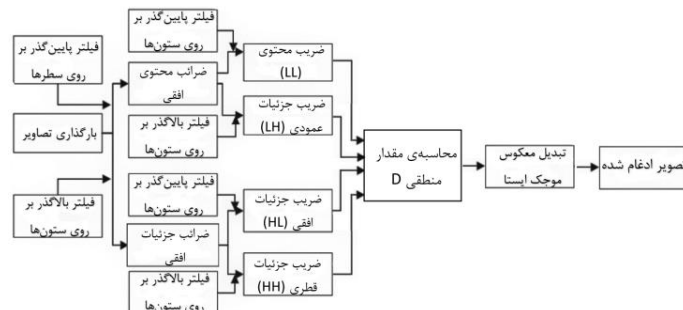
$$D = (abs(H1L2) - abs(H2L2)) \gg= 0 \quad (7)$$

مرحله چهارم: به منظور ادغام ضرائب افقی دو تصویر، باید مجموع ضرب مقادیر منطقی D در ضرائب افقی تصویر اول و ضرب مقادیر عکس منطقی D در ضرائب افقی تصویر دوم، محاسبه شود.
مرحله پنجم: D را به روش مشابه برای ضرائب عمودی و قطری تکرار خواهیم کرد.

مرحله ششم: در مرحله آخر با معکوس تبدیل موجک ایستا، یکی از زیر باندهای تصویر ادغام شده حاصل خواهد شد. در انتها به روش مشابه برای سایر باندهای تصویر چندطیفی، ادغام را با استفاده از روش تبدیل موجک ایستا انجام می‌دهیم. سپس تصویر به‌دست آمده را باید در محدوده [0,1] نرمال‌سازی نمود. در روش پیشنهادی این مقاله از اطلاعات مکانی تصویر تک‌رنگ استفاده بیشتری شده و آن‌ها کم‌تر دور ریخته شده‌اند.

الگوریتم تبدیل موجک ایستا یک روش ریاضی پیشرفته است که اصولاً در حیطه فرکانس عمل می‌کند و آنالیز سطوح چندگانه بر پایه تئوری موجک‌ها استوار است و به‌کارگیری اصول این تئوری فرآیندی را طراحی و پیاده‌سازی می‌کند که بیان‌کننده پردازش اطلاعات در سطوح گوناگون و با قدرت تفکیک داده‌هاست. در این روش همانند روش آنالیز مؤلفه‌های اصلی باید یکی از باندهای تصویر چندطیفی را انتخاب کرده و سپس عمل ادغام را انجام دهیم و همین کار را برای سایر باندها نیز انجام می‌دهیم. نکته‌ای که باید توجه شود این است که برای اعمال تبدیل موجک ایستا باید اندازه ابعاد تصاویر اصلی عدد زوج باشند. طبق شکل (۴) ابتدا تصاویر ورودی را بارگذاری کرده و اگر ابعاد فرد بود با اضافه کردن صفر ابعاد تصاویر را زوج خواهیم کرد. جزئیات روش پیشنهادی ما برای طراحی روش تبدیل موجک ایستا در ادامه مرحله به مرحله توضیح داده شده است:

مرحله اول: در ابتدا تصاویر ورودی بارگذاری شده را توسط تبدیل موجک ایستا تجزیه خواهیم کرد و خروجی شامل ضرائب موجک جزئیات (LL, LH, HL, HH) و ضرائب محتوی (LL) برای هر تصویر می‌باشد.



شکل ۴: بلوک دیاگرام روش تبدیل موجک ایستا پیشنهادی

وجود ندارد، استفاده از معیارهای ارزیابی عمل‌کرد کلی با مرجع مانند معیارهای میانگین مربعات خطا ممکن نیست. لذا نویسندگان در تلاش هستند با معرفی معیارهای ارزیابی عمل‌کرد

۲-۲- معیارهای ارزیابی عمل‌کرد کلی

در حوزه ادغام تصاویر سنجنش از دور به دلیل اینکه تصویر ایده‌آلی برای تصاویر ماهواره‌ای ثبت شده در محیط‌های واقعی



که μ میانگین L باند طیفی تصویر ادغام شده (B_i) و تصویر مرجع چندطیفی است [۱۱].

۵- معیار نقشه‌یابی طیفی لبه: معیار نقشه‌یابی طیفی لبه بین هر باند از تصویر ادغام شده و تصویر مرجع به صورت زیر قابل محاسبه است:

$$SAM(u, \hat{u}) = ArcCos\left(\frac{\langle u, \hat{u} \rangle}{\|u\| \times \|\hat{u}\|}\right) \quad (12)$$

که در این رابطه، بردار $u = \{F_1, F_2, \dots, F_L\}$ برای هر پیکسل حاوی مقدار باندهای ادغام شده در همان پیکسل، و بردار $\hat{u} = \{R_1, R_2, \dots, R_K\}$ حاوی مقدار باندهای تصویر مرجع است. عملگر $\langle \cdot, \cdot \rangle$ بیانگر ضرب داخلی بین دو بردار و عملگر $\|\cdot\|$ بیانگر نرم بردار است [۱۲].

۶- معیار شباهت ساختاری: معیار شباهت ساختاری، شاخصی ادراکی است که شباهت میان دو یا تعدادی از تصاویر را اندازه‌گیری می‌کند. مقدار بزرگ‌تر و نزدیک به یک شاخص SSIM شباهت بیشتر بین تصویر ادغام شده و تصویر مرجع را نشان می‌دهد. این روش با مدل‌سازی هر گونه اعوجاج کنتراست و رادیومتریکی طراحی شده است. معیار شباهت ساختاری به صورت زیر تعریف می‌شود:

$$SSIM = \frac{(2\mu_x\mu_y + c_1)(2\sigma_{xy} + c_2)}{(\mu_x^2 + \mu_y^2 + c_1)(\sigma_x^2 + \sigma_y^2 + c_2)} \quad (13)$$

که در این رابطه μ_x میانگین x ، μ_y میانگین y ، σ_x^2 واریانس x ، σ_y^2 واریانس y و σ_{xy} کوواریانس x و y هستند. در رابطه معیار شباهت ساختاری همچنین دو متغیر c_1 و c_2 به منظور پایدارسازی تقسیم در نظر گرفته شده است [۱۳].

۷- معیار کیفیت تصویر: معیار کیفیت تصویر تعمیمی از شاخص جهانی کیفیت تصویر است. شاخص کیفیت تصویر بین صفر و یک است که یک به معنی ادغام با کمترین خطا و اعوجاج طیفی و صفر به معنی ادغام ناصحیح داده‌ها است. $Q4$ را می‌توان به صورت زیر محاسبه کرد:

$$Q4 = \frac{4|\sigma_{z_1 z_2}| \cdot |\mu_{z_1}| \cdot |\mu_{z_2}|}{(\sigma_{z_1}^2 + \sigma_{z_2}^2)(\mu_{z_1}^2 + \mu_{z_2}^2)} \quad (14)$$

کلی بدون مرجع، کیفیت تصاویر ادغام شده سنجش از دور را به صورت کمی بررسی کنند. در این مقاله از γ معیار ارزیابی عمل کرد کلی بدون مرجع معروف استفاده شده است که به صورت مختصر در ادامه معرفی و تشریح می‌شود.

۱- معیار ضریب هم‌بستگی: ضریب هم‌بستگی میان تصویر ادغام شده و تصویر چندطیفی را نشان می‌دهد:

$$CC = \frac{\sum_{x=1}^K \sum_{y=1}^L (f - \mu_f)(r - \mu_r)}{\sqrt{\sum_{x=1}^K \sum_{y=1}^L ((f - \mu_f)(r - \mu_r))^2}} \quad (8)$$

در این رابطه f و r بیانگر پیکسل‌های باند تصویر چندطیفی و ادغام شده و μ_f و μ_r بیانگر میانگین پیکسل‌های باند تصویر چندطیفی و ادغام شده است [۸].

۲- معیار ریشه میانگین خطای مربعی: این معیار نشان دهنده میزان تغییرات بین نتیجه ادغام یک باند و باند اصلی است. مقدار کم معیار ریشه میانگین خطای مربعی نشان دهنده حفظ اطلاعات طیفی باند اصلی در فرآیند ادغام است. خطای معیار ریشه میانگین خطای مربعی بر اساس رابطه زیر محاسبه می‌گردد:

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{KL} \sum_{i=1}^K \sum_{j=1}^L (I_r(i, j) - I_f(i, j))^2} \quad (9)$$

در معادله فوق، K و L اندازه ماتریس تصاویر مرجع و تصویر ادغام شده است [۹].

۳- معیار خطای نسبی کلی ترکیب: معیار خطای نسبی کلی ترکیب به صورت رابطه زیر تعریف می‌شود:

$$ERGAS = 100 \frac{h}{l} \sqrt{\frac{1}{L} \sum_{i=1}^L \frac{RMSE^2(F_i, R_i)}{m_{R_i}^2}} \quad (10)$$

که در این رابطه h دقت مکانی تصویر تک‌رنگ، l دقت مکانی تصویر چندطیفی و m_{R_i} میانگین باند i ام تصویر مرجع است [۱۰].

۴- معیار خطای میانگین طیفی نسبی: این معیار مقدار متوسط خطای طیفی نسبی تصویر ادغام شده در باندهای طیفی را نشان می‌دهد و به صورت رابطه زیر محاسبه می‌شود:

$$RASE = \frac{100}{\mu} \sqrt{\frac{1}{L} \sum_{i=1}^L RMSE^2(B_i)} \quad (11)$$



آزمون اول در شکل (۵) نشان داده شده است. تصویر نهایی ادغام شده توسط روش‌های پیشنهادی ارائه شده در این مقاله حاصل از تصویر آزمون اول در قسمت‌های (خ)، (د) و (ذ) شکل (۵) نشان داده شده است.

همان‌طور که قابل مشاهده است کیفیت و دقت در لبه‌های تصویر حاصل از ادغام در این روش‌ها به وضوح قابل مشاهده و درک است. می‌توان اظهار کرد که برخلاف نتایج روش‌های ادغام دیگر، روش‌های پیشنهادی به خوبی ویژگی‌های طیفی را حفظ کرده‌اند همچنین وضوح مکانی آن‌ها بسیار نزدیک به هم‌تای تصویر تک‌رنگ آن‌ها است و ویژگی‌های طیفی (رنگی) تصاویر تولید شده بسیار خوب است. به‌طور مثال، محدوده سبز رنگ دامنه کوه‌ها در تصویر ادغام شده قابل تشخیص است. همچنین وضوح مکانی آن‌ها نسبت به روش‌های دیگر بهبود یافته است. مصداق این امر را می‌توان در لبه ساحل و موج دریا، شیارها و دره‌های کوه‌ها و خانه‌های شهر مشاهده کرد. در همین راستا، مقایسه کمی بر روی تصویر آزمون اول و تصویر حاصل از ادغام روش‌های پیشنهادی با معیارهای CC, ERGAS, RASE, RMSE, SAM, UIQI و Q4 در جدول (۱) انجام شده است. در آزمایش‌های کمی صورت گرفته نیز مقادیر ثبت شده برای روش پیشنهادی دوم در مجموع، در مقایسه با روش‌های ادغام پیشین بهتر عمل کرده است.

جدول ۱: مقایسه کمی روش‌های پیشنهادی با روش‌های پیشین در بخش اول آزمایش به‌وسیله‌ی تصویر آزمون اول

روش‌ها	معیارها	CC	ERGAS	RASE	RMSE	SSIM	SAM	Q4
روش مرجع	۱	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰
روش برووی	۰/۹۸۵۹	۳/۳۸۹۱	۹/۶۰۵۴	۳/۲۹۵۳	۰/۹۸۵۴	۵/۷۴۳۹	۰/۹۹۴۴	۰/۹۹۴۴
روش DWT	۰/۹۸۵۷	۳/۹۶۶۲	۵/۸۶۵۰	۴/۶۲۸۴	۰/۸۷۸۶	۵/۹۹۰۳	۰/۸۰۱۶	۰/۸۰۱۶
روش GS	۰/۸۳۲۱	۵/۰۵۳۵	۶/۷۱۶۷	۵/۶۳۷۳	۰/۹۰۵۹	۴/۷۵۳۹	۰/۹۸۶۹	۰/۹۸۶۹
روش HPF	۰/۹۷۵۱	۴/۰۱۴۶	۷/۵۳۹۷	۶/۰۴۵۴	۰/۹۱۴۴	۴/۸۹۳۳	۰/۸۱۶۷	۰/۸۱۶۷
روش IHS	۰/۹۵۷۴	۴/۲۲۸۸	۶/۱۴۶۰	۵/۲۶۷۶	۰/۷۸۱۱	۶/۲۷۳۵	۰/۹۲۶۰	۰/۹۲۶۰
روش PCA	۰/۹۷۸۲	۳/۳۷۸۳	۸/۹۹۸۸	۴/۲۱۰۷	۰/۹۲۸۳	۵/۷۳۵۹	۰/۹۹۶۶	۰/۹۹۶۶
روش SFIM	۰/۹۶۷۰	۵/۴۹۰۷	۶/۲۸۱۳	۵/۳۶۴۲	۰/۶۹۵۷	۶/۰۴۲۴	۰/۹۹۳۴	۰/۹۹۳۴
روش SWT	۰/۹۸۰۹	۳/۰۶۰۴	۵/۹۳۶۵	۴/۶۸۴۳	۰/۹۲۷۶	۵/۸۷۶۰	۰/۹۹۶۸	۰/۹۹۶۸
روش پیشنهادی اول	۰/۹۸۶۱	۳/۳۲۵۹	۶/۹۹۸۸	۴/۲۱۱۱	۰/۹۹۷۰	۴/۶۵۵۱	۰/۹۹۸۰	۰/۹۹۸۰
روش پیشنهادی دوم	۰/۹۸۷۴	۳/۳۷۸۱	۵/۲۲۷۱	۳/۳۲۸۲	۰/۹۹۷۷	۷/۶۶۹۲	۰/۹۹۸۱	۰/۹۹۸۱
روش پیشنهادی سوم	۰/۹۷۶۲	۳/۴۰۱۴	۸/۶۰۵۴	۴/۳۸۰۴	۰/۹۹۱۷	۴/۷۳۰۶	۰/۹۹۷۶	۰/۹۹۷۶

البته همان‌طور که در مقایسه‌های کیفی بیان شده است، روش‌های پیشنهادی نتایج قابل قبول‌تر و چشم‌گیرتری دارند. در بخش بعدی از آزمایش، روش‌های پیشنهادی ارائه شده در این مقاله با روش‌های برووی، DWT, GS, HPF, IHS, PCA, SFIM و SWT مورد مقایسه کمی و کیفی قرار گرفته است. در مقایسه کمی این آزمایش، معیارهای CC, ERGAS, RASE, RMSE, SAM, UIQI و Q4 بر روی تصویر آزمون ورودی در جدول (۲) نشان داده شده است.

که در این رابطه، Z_1 و Z_2 دو پارامتر متشکل از بردارهای طیفی تصویر چندطیفی هستند، به عنوان مثال، $z = a + ib + jc + kd$. μ_{Z_1} و μ_{Z_2} میانگین‌های Z_1 و Z_2 ، و $\sigma_{Z_1 Z_2}$ نیز نشان دهنده‌ی کوواریانس Z_1 و Z_2 است. در رابطه (۱۴) همچنین منظور از $\sigma_{Z_1}^2$ و $\sigma_{Z_2}^2$ واریانس‌های Z_1 و Z_2 است [۱۳].

۳. بررسی نتایج

برای بررسی نتایج روش پیشنهادی حاصل از ادغام تصاویر ماهواره‌ای ارائه شده در این مقاله، آزمایش‌هایی به صورت کیفی و کمی در دو بخش در نظر گرفته شده است. در مجموع ۸ روش معتبری که در حوزه‌های متفاوت ادغام تصاویر ماهواره‌ای در سال‌های اخیر در مجلات معتبر به چاپ رسیده است جهت مقایسه با روش‌های پیشنهادی، انتخاب شده است.

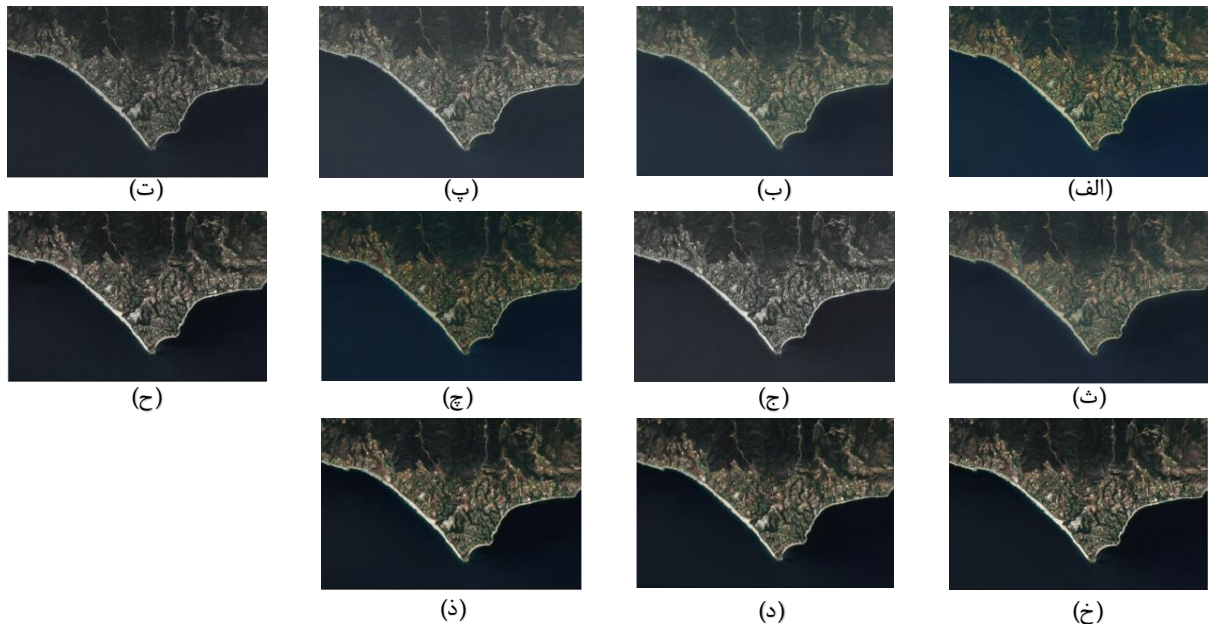
در بخش اول آزمایش، روش‌های پیشنهادی ارائه شده در این مقاله، با روش‌های پیشین برووی، DWT, GS, HPF, IHS, PCA, SFIM و SWT مورد بررسی کمی و کیفی قرار گرفته‌اند [۱۴-۱۸]. الگوریتم برووی یکی از موفق‌ترین روش‌های ادغام تصاویر است که بر اساس مدل سازی طیفی، به باندهای ورودی نرمال می‌رسد. این الگوریتم جزو روش‌های ادغام نسبت‌های باندی و ترکیب‌های حسابی است. در روش تبدیل موجک گسسته (DWT) می‌توان اطلاعات یک تصویر یا باند اطلاعاتی را در سطوح مختلف و مقیاس‌های مختلف با جزئیات یا قدرت‌های تفکیک جداگانه مشابه یک هرم اطلاعاتی نشان داد. روش گرام اشمیت (GS) یکی از روش‌های ادغام تصاویر چندطیفی است که همانند روش آنالیز مؤلفه‌های اصلی جزو روش‌های جایگزینی مؤلفه به حساب می‌آید. در روش HPF تصویر با وضوح مکانی پایین با استفاده از عملیات ریاضی هم‌چون تفریق، جمع، ضرب و نسبت با اطلاعات مکانی دریافت شده از طریق فیلتر کردن بالاگذر بر روی تصویر با وضوح مکانی بالا ادغام می‌شود. تبدیل IHS یکی از روش‌های رایج ترکیب تصویر سنجش از دور است. I, H, S مشخصات سه کانال را منعکس می‌کنند: I شدت، H پرده رنگ و S اشباع است. I وضوح مکانی تصویر را نشان می‌دهد و H و S نیز نشان دهنده وضوح طیفی تصویر هستند. ادغام در روش SFIM بر اساس فیلترهای پایین‌گذر است و سعی بر آن است که اطلاعات طیفی تصویر تا حد امکان حفظ شود. روش‌های پیشنهادی ما در این مقاله به سه بخش تقسیم شده است. در بخش اول روش پیشنهادی ما با استفاده از فیلتر بالاگذر و پایین‌گذر ایده‌آل بهبود یافته طراحی شده و در بخش‌های دوم و سوم به ترتیب از فیلترهای باترورث مرتبه ۲ و گوسی بهبود یافته استفاده خواهد شد. مقایسه کیفی روش‌های پیشنهادی با سایر روش‌ها برای تصویر ورودی

ماهواره‌ای در تصویر ورودی آزمون دوم، تصویر تک‌رنگ ورودی دچار نویز ناخواسته شده است. در این بخش از آزمایش روش‌های پیشنهادی و روش‌های معتبر پیشین بررسی خواهند شد تا تعیین شود کدام یک از روش‌ها خواهند توانست این نویز ناخواسته را بهتر کاهش دهند. تصویر حاصل از ادغام روش‌های پیشنهادی در این مقاله در قسمت‌های (خ)، (د) و (ذ) شکل (۶) نشان داده شده است که بیانگر این است که روش‌های پیشنهادی دارای نتیجه حاصل ایده‌آل‌تری نسبت به روش‌های معتبر پیشین است که ویژگی مکانی و طیفی تصاویر ورودی را به خوبی حفظ کرده است. به همین دلیل روش پیشنهادی مزیتی بر خلاف سایر روش‌ها دارد که تصویر حاصل از آن به‌طور هم‌زمان هم ویژگی طیفی و هم ویژگی مکانی را بهبود یافته است و توانسته به خوبی نویز ورودی ناخواسته را کاهش دهد و بیشترین کیفیت ادغام را داشته باشد. آزمایش‌های کمی و کیفی صورت گرفته بیانگر افزایش و بهبود کیفیت تصویر حاصل از ادغام توسط روش پیشنهادی این مقاله در مقایسه با روش‌های ارائه شده در مقالات معتبر سال‌های اخیر است.

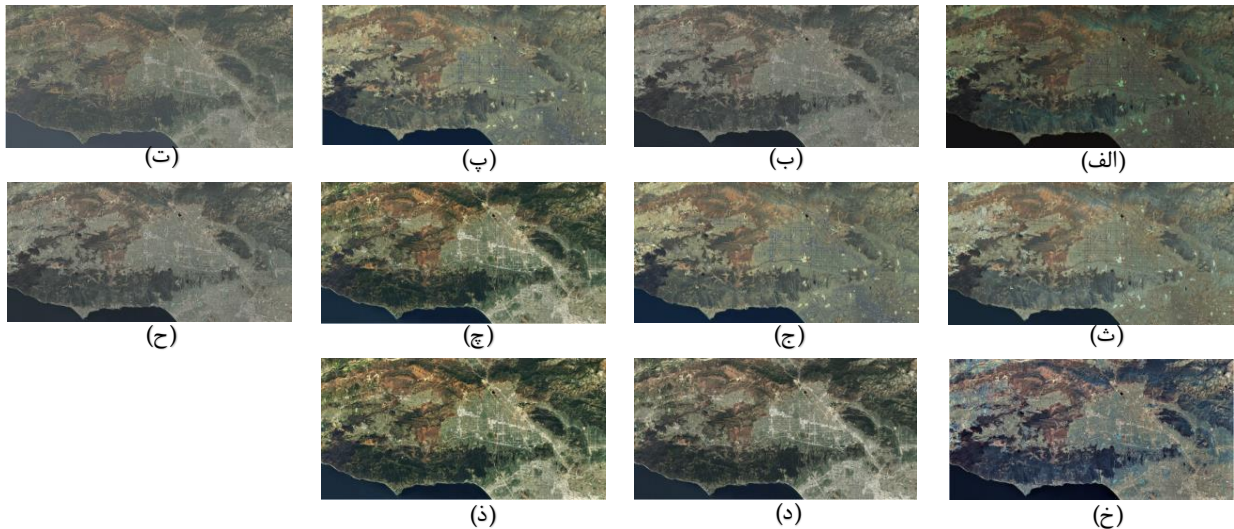
جدول ۲: مقایسه کمی روش‌های پیشنهادی با روش‌های پیشین در بخش دوم آزمایش به‌وسیله تصویر آزمون دوم

روش‌ها	CC	ERFAS	RASE	RMSE	SSIM	SAM	Q4
مقدار مرجع	۰/۷۰۶۳	۲/۷۹۷۴	۱۸/۷۲۷۷	۷/۰۸۷۹	۰/۹۳۳۴	۵/۳۹۱۵	۰/۹۹۵۵
روش برووی	۰/۸۰۵۲	۵/۸۰۸۶	۱۴/۲۳۴۴	۵/۱۲۱۳	۰/۶۲۷۱	۴/۴۸۱۴	۰/۹۴۲۲
روش DWT	۰/۷۲۲۹	۴/۴۹۷۴	۱۷/۶۷۹۸	۶/۲۵۷۲	۰/۸۴۴۹	۷/۷۸۱۴	۰/۸۸۷۶
روش GS	۰/۶۴۹۱	۴/۰۱۵۴	۱۵/۵۵۶۵	۶/۹۹۴۹	۰/۸۹۸۸	۵/۵۴۷۰	۰/۸۹۹۷
روش HPF	۰/۷۵۷۵	۳/۳۸۹۴	۱۴/۰۹۱۶	۵/۱۹۹۱	۰/۹۰۰۵	۶/۸۰۶۶	۰/۹۰۲۳
روش IHS	۰/۶۴۹۳	۴/۷۳۲۱	۱۵/۹۰۲۲	۶/۷۹۵۰	۰/۹۱۴۵	۵/۸۶۳۴	۰/۹۲۴۵
روش PCA	۰/۸۲۷۸	۲/۸۵۱۳	۱۳/۳۹۹۹	۴/۸۰۰۱	۰/۹۱۱۷	۴/۱۳۳۴	۰/۹۸۲۲
روش SFIM	۰/۸۰۴۳	۳/۰۸۳۷	۱۳/۶۷۱۳	۵/۰۰۵۱	۰/۹۴۰۳	۴/۷۴۷۲	۰/۹۷۹۸
روش SWT	۰/۷۹۷۴	۲/۸۵۵۱	۱۶/۶۶۶۸	۴/۸۲۸۷	۰/۹۷۹۸	۴/۳۶۷۵	۰/۹۸۳۱
روش پیشنهادی اول	۰/۸۲۷۶	۳/۰۰۵۷	۱۶/۴۷۹۱	۵/۸۰۰۱	۰/۹۸۰۹	۵/۲۴۴۹	۰/۹۸۶۲
روش پیشنهادی دوم	۰/۸۲۷۶	۲/۶۵۰۷	۱۷/۴۰۲۸	۴/۷۲۱۴	۰/۹۸۴۳	۴/۷۹۶۴	۰/۹۸۹۳

بیشترین مقدار این معیارها برای روش پیشنهادی سوم این مقاله در مقابله با نویز است. همچنین در مقایسه کیفی این بخش، روش‌های پیشنهادی با سایر روش‌ها با استفاده از تصویر آزمون دوم در شکل‌های (۶) به نمایش گذاشته شده است. همانطور که پیش‌تر بیان شد، به دلیل خرابی حسگر دوربین عکس‌برداری



شکل ۵: مقایسه کیفی روش‌های پیشنهادی با روش‌های پیشین (الف) روش برووی، (ب) روش DWT، (پ) روش GS، (ت) روش HPF، (ث) روش IHS، (ج) روش PCA، (چ) روش SFIM، (ح) روش SWT، (خ) روش پیشنهادی اول، (د) روش پیشنهادی دوم، (ذ) روش پیشنهادی سوم



شکل ۶: مقایسه کیفی روش‌های پیشنهادی با روش‌های پیشین (الف) روش برووی، (ب) روش DWT، (پ) روش GS، (ت) روش HPF، (ث) روش IHS، (ج) روش PCA، (چ) روش SFIM، (ح) روش SWT، (خ) روش پیشنهادی اول، (د) روش پیشنهادی دوم، (ذ) روش پیشنهادی سوم

۴. نتیجه‌گیری

با پیدایش روش‌های سنجش از راه دور در حوزه ادغام تصاویر، محققان این حوزه در تلاش برای بهبود نتایج خود با استفاده از روش‌های سنجش از راه دور هستند. در تحقیق حاضر مبحث ادغام تصاویر ماهواره‌ای و کاربردهای آن معرفی شد. روش پیشنهادی ارائه شده در این مقاله، مورد آزمایش و بررسی‌های متعدد و متفاوتی به صورت کیفی برای مقایسه روش پیشنهادی ادغام تصاویر ماهواره‌ای با روش‌های پیشین قرار گرفت. در این آزمایش‌ها به صورت مقایسه، تصاویر حاصل از ادغام الگوریتم‌های مختلف با تصاویر ورودی کنار هم قرار گرفته‌اند. آزمایش‌های کمی بسیاری به وسیله‌ی معیارهای ارزیابی عمل‌کرد ادغام تصاویر ماهواره‌ای بر روی تصاویر آزمون در این مقاله گردآوری شد. آزمایش‌های کمی و کیفی انجام شده بر روی تصویر حاصل از ادغام همگی بیانگر برتری داشتن روش پیشنهادی مبتنی بر ادغام تصاویر ماهواره‌ای به وسیله آنالیز مؤلفه‌های اصلی و روش موجک ایستا با فیلتر بهبود یافته نسبت به روش‌های پیشین بوده است. همچنین همه آزمایش‌های انجام شده اثبات ادعای این مقاله مبنی بر برتری داشتن کیفیت تصاویر ادغام شده هم از نظر مکانی و هم از نظر طیفی روش ارائه شده این مقاله نسبت به روش‌های ارائه شده سال‌های اخیر بوده است.

مراجع

- [3] M. Amin-Naji, A. Aghagolzadeh, "Multi-Focus Image Fusion in DCT Domain using Variance and Energy of Laplacian and Correlation Coefficient for Visual Sensor Networks," *Journal of AI and Data Mining*, (vol. 6/ Issue 2), pp no: 233-250, 2017.
- [4] Shahdoosti. H. R, Ghassemian. H, "Combining the spectral PCA and spatial PCA fusion methods by an optimal filter," *Information Fusion*, 27, pp no: 150-160, 2016.
- [5] Shah, E., Jayaprasad, P. & James, M.E, "Image Fusion of SAR and Optical Images for Identifying Antarctic Ice Features," *J Indian Soc Remote Sens* 47, pp no: 2113-2127, 2019.
- [6] <http://earthexplorer.usgs.gov/> Last Accessed: Nov 20, 2022.
- [7] <https://landsat.gsfc.nasa.gov/landsat-8/landsat-8-bands/> Last Accessed: Nov 20, 2022.
- [8] Joy Jinju, N. Santhi, K. Ramar, B. Sathya Bama, "Spatial frequency discrete wavelet transform image fusion technique for remote sensing applications," *Engineering Science and Technology, an International Journal*, (vol. 22/ Issue 3), pp no: 715-726, 2019.
- [9] Lei Wu, Yunqiang Yin, Xunyan Jiang, T.C.E. Cheng, "Pan-sharpening based on multi-objective decision for multi-band remote sensing images", *Elsevier, Pattern Recognition*, Volume 118, 2021.
- [10] B. Pal, S. Mahajan and S. Jain, "A Comparative Study of Traditional Image Fusion Techniques with a Novel Hybrid Method," *International Conference on Computational Performance Evaluation (ComPE)*, pp no: 820-825, 2020.
- [11] Diego. R, Estibliz. M, Agueda. A. "A new approach to change detection in multispectral images by means of ERGAS index". *IEEE Geoscience and remote sensing letters*. (vol. 10/ Issue 1), pp no: 76-80, 2013.
- [12] R. Malhotra, K. Kaur and P. Singh, "Wavelet Based Image Fusion Techniques: A Comparison Based Review". *6th International Conference on Communication and Electronics Systems (ICCES)*, pp no: 1148-1152, 2021.
- [13] Qizhi Xu, Yuan Li, Jinyan Nie, Qingjie Liu, Mengyao Guo, "UPanGAN: Unsupervised pansharpening based on the spectral and spatial loss constrained Generative Adversarial Network," *Elsevier, Information Fusion*, Volume 91, pp no: 31 - 46, 2023.
- [14] M. Rubén Javier, V. Nelson Enrique and R. Andrés Ovidio, "Sallfus, library for satellite images fusion on homogeneous and heterogeneous computing
- [1] Cigdem Serifoglu Yilmaz, Volkan Yilmaz, Oguz Gungor, "A theoretical and practical survey of image fusion methods for multispectral pansharpening", *Elsevier, Information Fusion*, Volume 79, pp no: 1-43, 2022.
- [2] S. Li, X. Kang, L. Fang, J. Hu, and H. Yin. "Pixel-level image fusion: A survey of the state of the art". *Information Fusion*, (vol. 33/ Issue C), pp no: 100-112, 2017.



architectures". in IEEE Latin America Transactions, (vol. 18/ Issue 12), pp no: 2130-2137, 2020.

- [15] Tambe, R.G., Talbar, S.N. & Chavan, S.S, "Fusion of Multispectral and Panchromatic Images by Integrating Standard PCA with Rotated Wavelet Transform", Springer, J Indian Soc Remote Sens 49, pp no: 2033-2055, 2021.
- [16] Kaur, H., Koundal, D. & Kadyan, V. "Image Fusion Techniques: A Survey", Springer, Archives of Computational Methods in Engineering 28, pp no: 4425-4447, 2021.
- [17] Singh, P., Diwakar, M., Cheng, X. et al, "A new wavelet-based multi-focus image fusion technique using method noise and anisotropic diffusion for real-time surveillance application", Springer, Journal of Real-Time Image Processing 18, pp no: 1051-1068, 2021.
- [18] Lei Wu, Yunqiang Yin, Xunyan Jiang, T.C.E. Cheng, "Pan-sharpening based on multi-objective decision for multi-band remote sensing images", Elsevier, Pattern Recognition, Volume 118, 2021.