نشریه علمی مهندسی فناوری اطلاعات مکانی

سال دوازدهم، شماره دوم، تابستان ۱۴۰۳

Vol.12, No.2, Summer 2024

۸۱- ۵۹

مقاله پژوهشی

تلفیق چندمقیاسی تصاویر ماهواره‌ای با توان‌تفکیک مکانی بالا با استفاده از فیلترهای هدایت‌پذیر گوسین و نقشه تمایز موضعی

نگار جوهری[۱]، رضا شاه حسینی[۲*]، مهدی حسنلو[۲]، امین صداقت[۳]، نازیلا محمدی[۳]، سیامند اوستان[۴]

۱- دانشجوی دکتری فتوگرامتری، دانشکده مهندسی نقشه‌برداری و اطلاعات مکانی، دانشکدگان فنی، دانشگاه تهران

۲- دانشیار دانشکده مهندسی نقشه‌برداری و اطلاعات مکانی، پردیس دانشکده‌های فنی، دانشگاه تهران

۳- دانشیار دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه تبریز

۴- کارشناسی ارشد مهندسی کامپیوتر گرایش هوش مصنوعی و رباتیکز، دانشگاه بوعلی‌سینا همدان

تاریخ دریافت مقاله: ۱۴۰۲/۰۷/۱۶ تاریخ پذیرش مقاله: ۱۴۰۳/۰۷/۱۷

چکیده

تصاویر ماهواره‌ای با توان‌تفکیک مکانی بالا دربردارنده عوارض موضعی ساختاری در فرکانس‌های متعدد بوده که چالش‌های اساسی را به‌هنگام پردازش و تولید محصولات قابل‌اعتماد سنجش‌ازدور و فتوگرامتری از جمله تلفیق تصاویر چندطیفی با باند پنکروماتیک ایجاد خواهند کرد. درنتیجه، تعادل میان اعوجاجات طیفی و مکانی، کاهش یافته و تصاویر حاصل، از واقع‌گرایی لازم برخوردار نخواهند بود. این مساله، مانعی اساسی برای بسیاری از روش‌های سنتی و یادگیرنده است. به‌علاوه، اختلاف میان داده آموزشی و تست و همچنین عدم دسترسی به داده مرجع، می‌تواند تعمیم‌پذیری روش‌های یادگیرنده را تحت‌الشعاع قرار دهد. بدین‌منظور، این تحقیق با ارائه رویکردی دومرحله‌ای، به‌دنبال بهبود فرآیند تلفیق پیکسل‌مبنا (پن‌شارپ‌کردن) تصاویر ماهواره‌ای است. در مرحله اول ، عوارض ساختاری موضعی در رویکردی چندمقیاسی با استفاده از نقشه معیار میانه حاصل از فیلترهای هدایت‌پذیر گوسین در حوزه مکان و با الهام از الگوریتم شاخص تبدیل ویژگی مستقل از مقیاس (*SIFT*) در ادغام با تابع مدل‌سازی انتقال (*MTF*) سنجنده بازسازی می‌شوند. در ادامه، نقشه تمایز دودویی با استفاده از گرادیان‌های مورفولوژیکی و آستانه‌گذاری اتسو (*OTSU*) ایجاد می‌شود. تصویر بازسازی‌شده حاصل به‌عنوان تصویر راهنما و نقشه تمایز به‌عنوان فیلتر راهنما درنظرگرفته‌شده و به منظور بهبود عملکرد و تعمیم‌پذیری مجموعه‌ای از روش‌های شاخص ارائه شده تلفیق در چارچوب‌های محاسباتی متنوع (مبتنی و عدم مبتنی بر یادگیری عمیق) اعمال می‌شود. به‌منظور ارزیابی از چارچوب‌های متنوع، ازجمله، پارامترهای مبتنی و عدم مبتنی بر تصویر مرجع استفاده شده که نتایج کمی و کیفی حاصل از بهبود عملکرد روش‌های انتخابی و افزایش واقع‌گرایی فرآیند تلفیق است. از این میان، الگوریتم شبکه پن‌شارپ‌کننده مبتنی بر هرم لاپلاسین (*LPPN*) که مبتنی بر یادگیری عمیق بوده، عملکرد بهتری در مقایسه با روش-های دیگر داشته که با استفاده از رویکرد پیشنهادی بهبود یافته‌است. میانگین معیار ارزیابی بدون مرجع (*QNR*) روش‌های انتخابی با استفاده از رویکرد پیشنهادی از ۰٫۹۳۱ به ۰٫۹۴۳۰ و میانگین معیار ارزیابی ترکیبی بدون مرجع (*HQNR*) از ۰٫۹۲۰ به ۰٫۹۳۱ افزایش یافته است. همچنین میانگین اعوجاجات طیفی و مکانی نیز به‌ترتیب از ۰٫۰۵ به ۰٫۰۴ و از ۰٫۰۵۷۶ به ۰٫۰۴۸۳ کاهش یافته است. میانگین معیار زاویه طیفی (*SAM*) نیز از ۳٫۵۰۲۲ به ۳٫۲۶۸ کاهش یافته است که در مجموع، حاکی از کاهش اعوجاجات و بهبود واقع‌گرایی فرآیند تلفیق هستند.

کلیدواژه‌ها : تلفیق تصاویر سنجش ازدوری، فیلترهای هدایت‌پذیر گوسین، نقشه تمایز، گرادیان مورفولوژیکی، *MTF* سنجنده، الگوریتم *LPPN*

* نویسنده مکاتبه کننده: گروه فتوگرامتری و سنجش‌ازدور، دانشکده مهندسی نقشه‌برداری و اطلاعات مکانی، پردیس دانشکده‌های فنی، دانشگاه تهران، تهران، ایران.

تلفن: ۰۲۱۶۱۱۱۴۵۲۷

Email: rshahosseini@ut.ac.ir

[Downloaded from jgit.kntu.ac.ir on 2026-01-29]

[DOI: 10.61186/jgit.12.2.59]

۱- مقدمه

با توسعه فناوری مدرن سنجش‌ازدور، امکان اخذ تصاویر چندطیفی (*MS*)[1] چندسنجنده‌ای، چندزمانه و در توان تفکیک‌های مختلف از مناظر یکسان پدید آمده‌است. این داده‌ها اطلاعات تکمیلی را برای مطالعه ویژگی‌های منطقه و شرح کاملی از عوارض فراهم می‌کنند [۱]. هدف اصلی تصویربرداری برمبنای سنجنده‌های سنجش‌ازدوری، شبیه‌سازی دقیق و قابل‌اعتماد سطح زمین است. با توجه به محدودیت در سیگنال به نویز دریافتی، تنها امکان اخذ تصاویر در طیف‌های گوناگون موج الکترومغناطیس با توان‌تفکیک مکانی پایین و به‌موجب آن، تصویر پنکروماتیک تک‌باندی (*PAN*)[2] با توان‌تفکیک مکانی بالا وجود دارد [۲]. با این‌حال، آنچه که در بسیاری از کاربردها از جمله آشکارسازی تغییرات، طبقه‌بندی و استخراج اهداف و اشیا موردنیاز بوده، در دست داشتن مجموعه داده‌ای با توان‌تفکیک مکانی و طیفی بالا است [۳].

تلفیق تصاویر چندطیفی ماهواره‌ای با باند *PAN* که تحت عنوان پن‌شارپ‌کردن[3] شناخته می‌شود، همواره توجه بسیاری از محققین در حوزه سنجش‌ازدور و فتوگرامتری را به خود جذب کرده است [۴]. هدف از آن، تلفیق اطلاعات طیفی و مکانی تصاویر ماهواره‌ای و تولید تصاویری با توان‌تفکیک مکانی و طیفی بالاست. تصاویر تلفیقی حاصل که ابعاد یکسانی با باند پنکروماتیک دارند، حاوی اطلاعات مکانی ساختاری در فرکانس‌های متعدد و در باندهای طیفی گوناگون خواهند بود. بنابراین، ارائه چارچوبی خودکار برای تلفیق تصاویر، به‌ویژه با توسعه فزاینده انواع مختلف سنجنده‌های ماهواره‌ای و کاربرد روزافزون تصاویر رقومی حاصل از آن‌ها در بسیاری از اهداف سنجش‌ازدور و فتوگرامتری، از اهمیت بسزایی برخوردار است [۵]. متعاقبا، مروری بر روش‌های شاخص ارائه‌شده، اعم از مبتنی و عدم مبتنی بر یادگیری عمیق انجام خواهد گرفت.

۱-۱- مروری بر شماری از روش‌های ریاضیاتی

پن‌شارپ‌کردن با اینکه همیشه موردتوجه محققین بوده، هنوز هم با چالش‌های اساسی مواجه است. روش‌های ریاضیاتی متعددی در چند دهه اخیر بدین منظور ارائه‌شده که به‌طورکلی در سه دسته جایگزینی مؤلفه (*CS*)[4]، تحلیل چندمقیاسی (*MRA*)[5] و کلاس بهینه‌سازی متغیرمبنا (*VO*)[6] جای می‌گیرند [۴].

در دسته اول، یک تبدیل رادیومتریکی بر روی تصاویر با توان‌تفکیک پایین، اعمال شده، سپس یک مؤلفه اساسی با تصویر *PAN* جایگزین می‌شود. درنهایت تصویر حاصل با استفاده از تبدیل معکوس به دامنه اولیه بازگردانده خواهد شد [۶]. از این دسته می‌توان به الگوریتم‌های مبتنی بر تبدیل روشنایی-رنگ- اشباع (*IHS*)[7][۷]، تحلیل مؤلفه اصلی (*PCA*)[8][۸]، جزییات مکانی باندمبنا با برآورد پارامتر محلی (*BDSD*)[9][۹] اشاره کرد. ویونه[10] و همکاران (۲۰۱۹) نسخه‌های توسعه‌یافته‌ای را تحت عنوان جزییات پایدار مکانی باندمبنا با برآورد پارامتر محلی (*R_BDSD*)[11] و عنوان جزییات پایدار مکانی باندمبنا با قیود فیزیکی (*BDSD_PC*)[12] ارائه داده که به دنبال کاهش اعوجاجات طیفی با استفاده از بهینه‌سازی مقید برمبنای برآوردگر کم‌ترین مربعات نرمال[13] و قیود فیزیکی هستند [۱۰]. الگوریتم‌های گرام‌اشمیت موضعی

---

[1] *Multispectral*
[2] *Panchromatic*
[3] *Pansharpening*
[4] *Component Substitute*
[5] *Multi-Resolution Analysis*
[6] *Variational Optimization*
[7] *Intensity Hue Saturation*
[8] *Principal Component Analysis*
[9] *Band Dependent Spatial Detail*
[10] *Vivone*
[11] *Robust-BDSD*
[12] *BDSD_Physical Constraints*
[13] *Ordinary Least Square Estimator*

[Downloaded from jgit.kntu.ac.ir on 2026-01-29]
[DOI: 10.61186/jgit.12.2.59]

(*GSA*)[1] [۱۱] و گرام‌اشمیت موضعی مبنی بر قطعه-بندی (*S_GSA*)[2] [۱۲] نیز، نسخه‌های توسعه‌یافته‌ای از الگوریتم گرام‌اشمیت (*GS*)[3] [۱۳] هستند. روش *GSA* یک میانگین وزن‌دار از تصاویر *MS* استخراج کرده که مقادیر وزن با استفاده از ضرایب رگرسیون چندمتغیره میان تصاویر *MS* و *PAN* تعیین می‌شوند. *S_GSA* نیز بازیابی اطلاعات را با استفاده از یک رویکرد موضعی محتوامبنا براساس قطعه‌بندی درخت دودویی انجام می‌دهد. روش جایگزینی موضعی مؤلفه (*PRACS*)[4] [۱۴] نیز در رویکردی مشابه، از تزریق آماری عوارض با فرکانس بالا را به‌صورت نسبت‌مبنا و موضعی انجام می-دهد.

دسته دوم جزییات مکانی را از تصویر *PAN* با استفاده از تبدیل موجک، هرم لاپلاسین، تابع اختلاف گوسین و غیره استخراج کرده و به تصاویر چندطیفی بازنمونه-برداری‌شده تزریق می‌کنند [۱۵]. روش‌های مبتنی بر *CS* و *MRA* از پیچیدگی محاسباتی بالایی برخوردار نبوده، با این‌حال، احتمال ایجاد اعوجاجات طیفی و مکانی در آن‌ها می‌تواند بالا باشد. در خصوص مقایسه این دو چارچوب با هم، به‌طور کلی می‌توان گفت که عموما، اعوجاجات مکانی دسته دوم بالاتر از دسته اول است [۴]. با درنظرگیری همزمان محتوای طیفی و مکانی، یعقوبی و همکاران (۲۰۲۱) از یکسری شاخص وزن‌دار مبتنی بر ویژگی‌های هندسی و آماری برای تعیین ابعاد بهینه فیلترهای حوزه فرکانس استفاده کردند [۱۶]. نتایج آن‌ها حاکی از عملکرد بهتر در مقایسه با روش‌هایی چون *GS* و *PCA* بود. دسته سوم نیز فرآیند تلفیق را از منظر یک مسئله معکوس بدوضع بررسی کرده و به‌دنبال مدل‌سازی روابط احتمالی میان تصویر *PAN*، *MS* و تصاویر تلفیقی در یک روند بهینه-سازی با ترم منظم‌سازی مناسب است. این روش‌ها عموماً مستلزم محاسبات پیچیده هستند. همچنین، رابطه خطی میان تصاویر *PAN* و *MS* درنظر گرفته که می‌تواند منجر به اعوجاجات مکانی گردد. به‌علاوه، نیاز به تنظیم پارامترهای متعدد از کنترل‌پذیری الگوریتم می‌کاهد [۱۷].

۱-۲- مروری بر روش‌های مبتنی بر یادگیری عمیق

اخیراً توجه بسیاری از محققین معطوف به روش‌های مبتنی بر یادگیری عمیق به‌منظور پردازش تصاویر ماهواره‌ای جذب شده است [۱۸]. اگرچه، استراتژی‌های یادگیرنده، چندان بر مبنای توسعه ریاضیاتی عمل نکرده و مجموعه داده گسترده‌ای برای آموزش شبکه نیاز دارند، با این‌حال، نتایج امیدوارکننده‌ای در بسیاری از کاربردهای پردازش تصویر در برداشته‌اند [۱۵]. در خصوص تلفیق تصاویر ماهواره‌ای، می‌توان این روش‌ها را به‌طورکلی در دو دسته مبتنی بر شبکه‌های عصبی پیچشی (*CNN*)[5] و شبکه‌های مولد تخاصمی (*GAN*)[6] تقسیم‌بندی کرد. مسی[7] و همکاران (۲۰۱۶) از یک شبکه با سه لایه پیچشی برای پن‌شارپ‌کردن استفاده کرده که ورودی آن، تصاویر چندطیفی بازنمونه‌برداری-شده در ادغام با تصویر *PAN* است [۱۹]. فو[8] و همکاران (۲۰۲۰) یک شبکه *CNN* طراحی کرده که بر روی تصاویر ورودی فیلتر بالاگذر اعمال شده است [۲۰]. ونگ[9] و سرتل[10] (۲۰۲۱) از مکانیزم توجه طیفی مکانی[11] در شبکه *CNN* خود استفاده کرده که در آن بر روی تصاویر چندطیفی ورودی، فیلتر بالاگذر اعمال شده است [۲۱]. جین[12] و همکاران (۲۰۲۲) یک

[1] *Gram Schmidt Adaptive*
[2] *Segmentation-based Gram Schmidt Adaptive*
[3] *Gram Schmidt*
[4] *Partial Replacement and Component Substitution*
[5] *Convolutional Neural Network*
[6] *Generative Adversarial Network*
[7] *Masi*
[8] *Fu*
[9] *Wang*
[10] *Sertel*
[11] *Spatial and Spectral Attention Mechanism*
[12] *Jin*

[Downloaded from jgit.kntu.ac.ir on 2026-01-29]
[DOI: 10.61186/jgit.12.2.59]

شبکه چندشاخه‌ای را طراحی کرده که در آن علاوه بر استخراج ویژگی از تصاویر *Pan* و *MS* هم‌اندازه، یک شاخه نیز به تصاویر چندطیفی اولیه با ابعاد کوچک‌تر اختصاص یافته است [۵]. ویژگی‌های حاصل از هرکدام از شاخه‌ها در سطوح مخالف باهم ادغام شده و در پایان، تصویر تلفیق‌شده نهایی را تشکیل می‌دهند. معماری‌های چندشاخه‌ای اگرچه احتمال حفظ اطلاعات طیفی را می‌توانند افزایش دهند، بااین‌حال به زمان محاسباتی بالایی نیاز دارند.

لیو[1] و همکاران (۲۰۲۰) مدلی را طراحی کرده که اطلاعات جمع‌آوری‌شده از تصاویر *Pan* و *MS* را پس از اعمال پیچش‌های متعدد در سطح ویژگی ادغام می‌کند [۲۲]. مدل حاصل با استفاده از *GAN* و افزودن مجزاکننده ارتقا یافت. اگرچه این روش‌ها معماری‌های متفاوتی را ارائه می‌دهند، بااین‌حال، می‌توان گفت که تقریباً تمامی آن‌ها از نظریه مشابه پیروی می‌کنند. در این روش‌ها فرض بر این است که تصاویر بازنمونه‌برداری‌شده *Pan* و *MS* دربردارنده ساختارهای مکانی مشابهی بوده، درحالی‌که تصاویر کاهش ابعاد داده‌شده *Pan*، حاوی عوارض غنی‌تری هستند. به‌منظور حل این مسئله، ازلیک[2] و همکاران (۲۰۲۰) فرآیند پن‌شارپ‌کردن را در قالب رنگی‌سازی عنصر روشنایی انجام می‌دهند [۲۳]. در ابتدا تصاویر *MS* با نسبت یک به چهار کاهش و سپس با نسبت چهار به یک افزایش بعد داده می‌شوند. تصاویر حاصل را در ادغام با تصویر روشنایی که از میانگین تصاویر *MS* به دست می‌آید، به‌عنوان ورودی تولیدگر شبکه تخاصمی معرفی می‌شود.

۱-۳- جمع‌بندی روش‌های ارائه‌شده ضرورت ارائه رویکرد پیشنهادی

علی‌رغم تحقیقات متعدد ارائه‌شده در سال‌های اخیر، تلفیق تصاویر ماهواره‌ای، به‌ویژه سنجنده‌هایی که باند *PAN* آن‌ها از توان‌تفکیک مکانی بالایی برخورداراست، همچون ورلدویو[3]، کوییک‌برد[4] و گائوفن دو[5]، هنوز هم با توجه به مسائل فوق‌الذکر با چالش‌های جدی همراه است. برخلاف روش‌های سنتی *CS* و *MRA*، باید محتوای هندسی و رادیومتریکی را همزمان درنظر گرفت. به عبارتی دیگر، به الگوریتمی نیاز هست که همگام با استخراج موثر عوارض ساختاری، عملکرد خود را در حضور نویز و اختلافات رادیومتریکی حفظ کند. باندهای تلفیقی حاصل، علاوه بر حصول پایداری مکانی بالا، باید از تمایز طیفی کافی نیز برخوردار باشند. در چنین شرایطی هست که تصاویر تلفیقی حاصل، از واقع‌گرایی مناسبی برخوردار خواهند بود.

الگوریتم‌های مبتنی بر *CNN* اگرچه نسبت سیگنال به نویز مناسبی به‌همراه خواهند داشت، ممکن است که ساختارهای نرم‌شده‌ای تولید کنند [۲۴]. روش‌های ارائه‌شده برای تصاویر بینایی ماشین قادر به حصول عملکرد موفقیت‌آمیزی در خصوص تصاویر ماهواره‌ای نیستند. علاوه بر این‌که مکانیزم تصویربرداری سنجنده‌های ماهواره‌ای متفاوت بوده بلکه تصاویر سنجش‌ازدوری دربردارنده ساختارهای متنوع بیشتری نسبت به تصاویر معمولی بوده و توزیع بافت در آن‌ها باتوجه به مقیاس مکانی بزرگ، غیریکنواخت‌تر است. نواحی ساختاری گوناگون، ناپیوستگی‌های قابل‌توجهی باتوجه به توزیع پیچیده عوارض ساختمانی، رودخانه، جنگل و .. دارند [۲۵]. روش‌های مبتنی بر *GAN* نیز، ویژگی‌های مشابه بافتی را در نواحی ایجاد کرده که اساساً از فرکانس متوسطی برخوردارند. درنتیجه نه تنها اعوجاجات مکانی با خود به‌همراه داشته، از واقع‌گرایی تصویر هم کاسته خواهد شد. به‌ویژه آن‌که این چارچوب به زمانی محاسباتی بالایی نیاز دارد[۱۵]. بر همین اساس، طراحی الگوریتمی که تعادل کافی میان

[1] *Liu*
[2] *Ozcelik*
[3] *WorldView*
[4] *QuickVrird*
[5] *GeoFan2*

[Downloaded from jgit.kntu.ac.ir on 2026-01-29]
[DOI: 10.61186/jgit.12.2.59]

اختلافات موضعی مکانی و واقع‌گرایی تصویر ایجاد کند، برای استخراج اطلاعات پایدار ساختاری ضروری است.
از طرفی دیگر، معمولا، روش‌های بانظارت فرآیند آموزش را در وضوح کاهش یافته انجام داده و بر روی وضوح کامل تست کرده که منجر به بروز اعوجاج خواهد شد. روش‌های بدون نظارت نیز، آموزش را براساس مدلسازی تخریب در وضوح بالا انجام می‌دهند. با این‌حال، اغلب، مدل تخمین‌یافته خطی بوده و از دقت کافی برخوردار نیست.
به‌طور خلاصه می‌توان گفت که عدم دسترسی به داده مرجع بسیاری از الگوریتم‌های یادگیرنده را به شیوه‌های مختلف تحت‌الشعاع قرار می‌دهد. اختلاف داده آموزشی با داده تست نیز، چالشی اساسی است. بنابراین، طراحی رویکردی که به‌صورت هدفمند و راهنمامبنا قادر به بهبود در عملکرد الگوریتم‌های قبلی باشد، از اهمیت به‌سزایی برخوردار است. چنین رویکردی بایستی قابل استفاده برای روش‌های ریاضیاتی و یادگیرنده باشد. بر این راستا، رویکردی که عوارض در مقیاس‌های مختلف را برمبنای چارچوب *MRA* استخراج کند،گزینه مناسبی برای استخراج اطلاعات ساختاری در یک تصویر راهنما خواهد بود. بدین‌منظور، در ابتدا، با الهام ازرویکرد به کاررفته به‌منظور ایجاد نقشه تمایز در توصیفگر هیستوگرام خودشباهتی محلی جهتی (*HOSS*)[1][۲۶]، یک نقشه معیار میانه جهتی با استفاده از فیلترهای هدایت‌پذیر گوسین [۲۷] در رویکردی چند مقیاسی استفاده می‌شود. ایده اساسی آن برمبنای شبیه‌سازی یک فیلتر طراحی‌شده در جهات متعدد برمبنای تعدادی محدود از توابع پایه است. به‌کارگیری فیلترهای هدایت‌پذیر، امکان توصیف تصویر را در جهات مختلف با سرعت بالا و بدون ایجاد خطاهای مربوط به درون‌یابی برقرار می‌کند. بدین-منظور، برای هر پیکسل در نقشه معیار، میانه مقادیر حاصل از اعمال فیلتر هدایت‌پذیر به‌کار گرفته خواهد شد. همچنین، به‌منظور افزایش پایداری هندسی، استخراج عوارض در سطوح مقیاس متوالی با الهام از الگوریتم شاخص تبدیل ویژگی مستقل از مقیاس (*SIFT*)[2] [۲۸]، انجام می‌گیرد. حائز ذکر است که این فرآیند از تابع مدولاسیون انتقال (*MTF*)[3] سنجنده بهره گرفته است. درنتیجه، انتظار می‌رود که دخیل-کردن ویژگی‌های فیزیکی اخذ داده، مانع از تخریب اطلاعات طیفی به هنگام بازسازی عوارض مکانی گردد.
مسئله بسیار مهمی که باید همگام با استخراج عوارض ساختاری در نظر گرفت، تمایز باندهای طیفی تلفیقی حاصل است. با استخراج یک نقشه تمایز دودویی و به-کارگیری آن به‌عنوان فیلتر راهنما، می‌توان اطلاعات طیفی و مکانی را به‌طور مؤثری حفظ کرده؛ به‌نحوی‌که همگام با حفظ تمایز طیفی میان باندهای سنجنده، لبه‌ها و جزییات مکانی تضعیف نشوند. در ادامه نقشه دودویی ایجادشده به‌عنوان فیلتر راهنما در نظر گرفته شده و به‌کمک آن، عوارض ساختاری مستخرج در تصاویر تلفیقی حاصل از الگوریتم‌های پیشین ارائه‌شده بازیابی خواهند شد. انتظار بر اینست که رویکرد پیشنهادی ابزار مناسبی برای بهبود عملکرد و افزایش قابلیت تعمیم‌پذیری بسیاری از روش‌های قبلی باشد.
مساله مهم دیگری که اخیرا توسط ازلیک و همکاران (۲۰۲۰) مورد بررسی قرار گرفته است، اینست که روش‌های سنتی گاها ممکن است نتایج عددی بهتری در برخی معیارهای ارزیابی داشته، با این حال، اختلاف فاحشی به لحاظ بصری از تصاویر مرجع داشته باشند [۲۳]. این مساله، نه‌تنها می‌تواند ناشی از واقع‌گرایی ناکافی الگوریتم بوده، بلکه حاکی از ضرورت به‌کارگیری معیارها و چارچوب‌های متنوع به‌منظور ارزیابی الگوریتم باشد. به همین دلیل، در این تحقیق نیز، به این مساله پرداخته شده و از معیارهای متعددی مبتنی و عدم

[1] *Histogram of Oriented Self-Similarity*

[2] *Scale invariant Feature Transform*

[3] *Modulation Transform Function*

[Downloaded from jgit.kntu.ac.ir on 2026-01-29]

[DOI: 10.61186/jgit.12.2.59]

مبتنی بر داده مرجع و حتی چارچوب‌های مرتبط با دیگر پردازش‌های سنجش‌ازدور بهره گرفته شده‌است. به‌طور خلاصه نوآوری‌های این تحقیق به‌صورت زیر بوده که متعاقباً در بخش‌های آتی به‌تفصیل شرح داده خواهند شد.

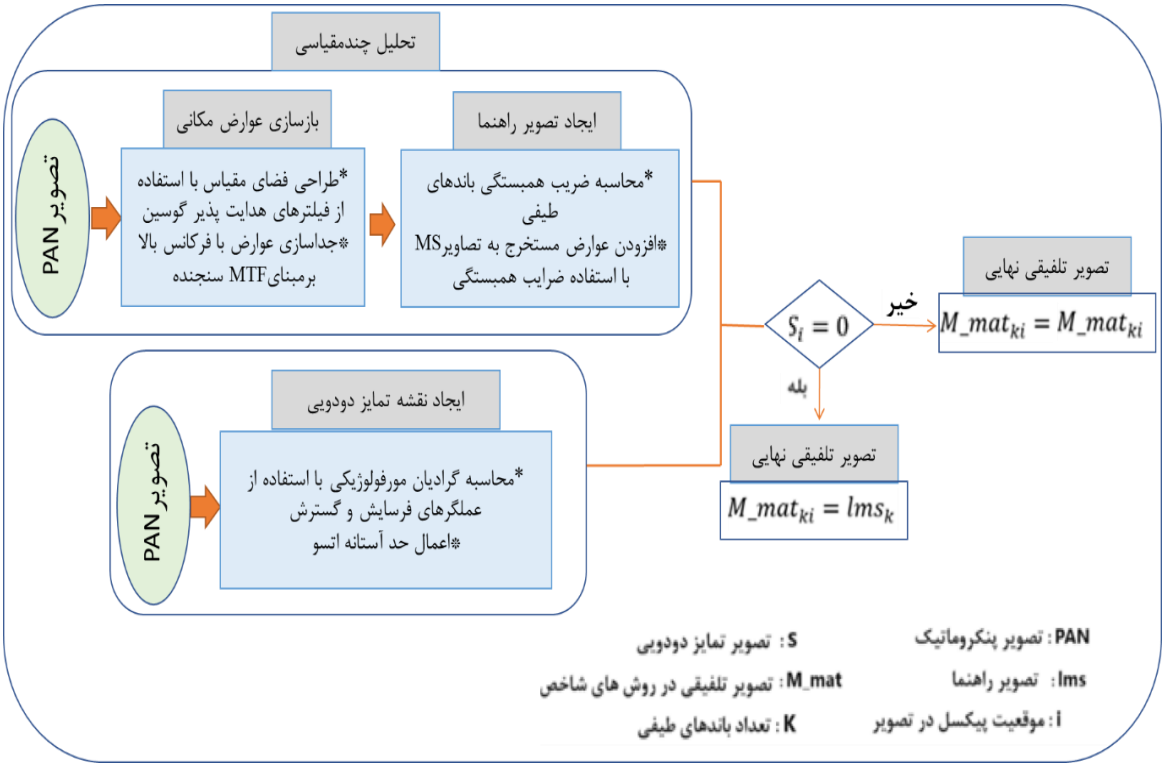
۱) بازسازی عوارض متمایز موضعی در رویکردی چندمقیاسی با استفاده از *MTF* سنجنده و فیلترهای هدایت‌پذیر گوسین در حوزه مکان،

۲) طراحی نقشه تمایز برمبنای عملگرهای مورفولوژی

۳) در نظرگیری نقشه تمایز ایجادشده به‌عنوان فیلتر راهنما به‌منظور بازیابی عوارض بازسازی‌شده در مجموعه‌ای از روش‌های شاخص و شناخته‌شده تلفیق تصاویر ماهواره‌ای.

۲- روش پیشنهادی

هدف از این تحقیق، طراحی و توسعه روشی مناسب به‌منظور افزایش تعادل میان اعوجاجات طیفی و مکانی همگام با واقع‌گرایی فرآیند تلفیق تصاویر ماهواره‌ای است. در مرحله اول، استخراج عوارض متمایز مکانی در فرکانس‌های بالا برمبنای ادغام *MTF* سنجنده و فیلترهای هدایت‌پذیر گوسین در حوزه مکان انجام می‌گیرد. *MTF* سنجنده رویکرد مؤثری برای در نظرگیری روند فیزیکی اخذ تصویر است. همچنین، انتظار می‌رود که به‌کارگیری فیلترهای هدایت‌پذیر در رویکردی چندمقیاسی از قابلیت بالایی برای استخراج اطلاعات ساختاری موضعی برخوردار باشد. در ادامه به‌منظور حفظ اطلاعات رادیومتریکی، نقشه تمایز دودویی برمبنای عملگرهای مورفولوژی ایجاد می‌شود. درنهایت، به‌منظور افزایش واقع‌گرایی، تصویر تخمین زده‌شده با استفاده از نقشه تمایز دودویی تحت عنوان فیلتر راهنما به مجموعه‌ای از روش‌های شاخص تلفیق تصاویر ماهواره اعم از مبتنی و عدم مبتنی بر یادگیری عمیق معرفی خواهد شد. شکل(۱) مراحل روش پیشنهادی را به‌طور خلاصه نشان می‌دهد.



شکل۱: مراحل روش پیشنهادی

[Downloaded from jgit.kntu.ac.ir on 2026-01-29]
[DOI: 10.61186/jgit.12.2.59]

۲-۱- بازسازی عوارض ساختاری با استفاده از فیلترهای هدایت‌پذیر گوسین و *MTF* سنجنده

ایده اساسی این مرحله بر مبنای استفاده از یکسری فیلتر جهتی تحت عنوان فیلترهای هدایت‌پذیر در رویکردی چندمقیاسی است. اصطلاح هدایت‌پذیر در اینجا به‌معنای ترکیب خطی یکسری توابع پایه و ایجاد فیلتر در جهات متعدد است. در این خصوص، تابع گوسین و تمامی مشتقات آن هدایت‌پذیر هستند [۲۷]. مزیت عمده به‌کارگیری چنین فیلتری، توصیف متمایز ویژگی‌های ساختاری موجود در تصویر است. با در نظرگیری چنین رویه‌ای، جزییات هندسی به‌طور مؤثری حفظ خواهد شد.

رویکردهای مختلفی برای محاسبه پاسخ جهتی یک فیلتر دلخواه می‌توانند در نظر گرفته شوند. در اینجا به یکسری توابع پایه به‌منظور ایجاد ترکیب خطی موردنیاز است. بدین‌جهت از مشتقات گوسین برای ایجاد ترکیب خطی استفاده می‌شود. برای حفظ جزییات هندسی و مرز عوارض، به مشتق اول گوسین بسنده کرده و از اعمال مشتقات مراتب بالا اجتناب شده است. توابع پایه در جهات صفر و نود درجه مطابق روابط (۱) و (۲) محاسبه می‌شوند:

رابطه(۱) $$G_0 = -2xe^{-(x^2+y^2)}$$

رابطه(۲) $$G_{90} = -2ye^{-(x^2+y^2)}$$

در روابط فوق، x و y نیز در بازه ($-3\times\sigma$: $3\times\sigma$) در نظر گرفته‌شده‌اند که σ بیان‌گر انحراف معیار استاندارد بوده و مقدار آن برابر ۱ است. مشتقات جهتی دیگر با استفاده از ترکیب خطی توابع پایه با توجه به رابطه (۳) محاسبه می‌شوند:

رابطه(۳) $$G_\alpha = G_0\cos(\alpha) + G_{90}\sin(\alpha)$$

$\alpha = 0, \pi/6, \pi/3, \ldots, 5\pi/6$

در رابطه (۳)، sin و cos ضرایب درون‌یابی و α زاویه دوران بوده که بازه $(0-\pi)$ را به شش قسمت مساوی تقسیم‌بندی می‌کند. در مرحله بعد تصاویر فیلترشده با پیچش توابع جهتی در تصویر اصلی ایجاد می‌شوند.

اگر * بیانگر عملگر پیچش باشد، تصاویر فیلترشده جهتی مطابق رابطه (۴) محاسبه می‌شوند:

رابطه(۴) $$R_\alpha = G_\alpha * I$$

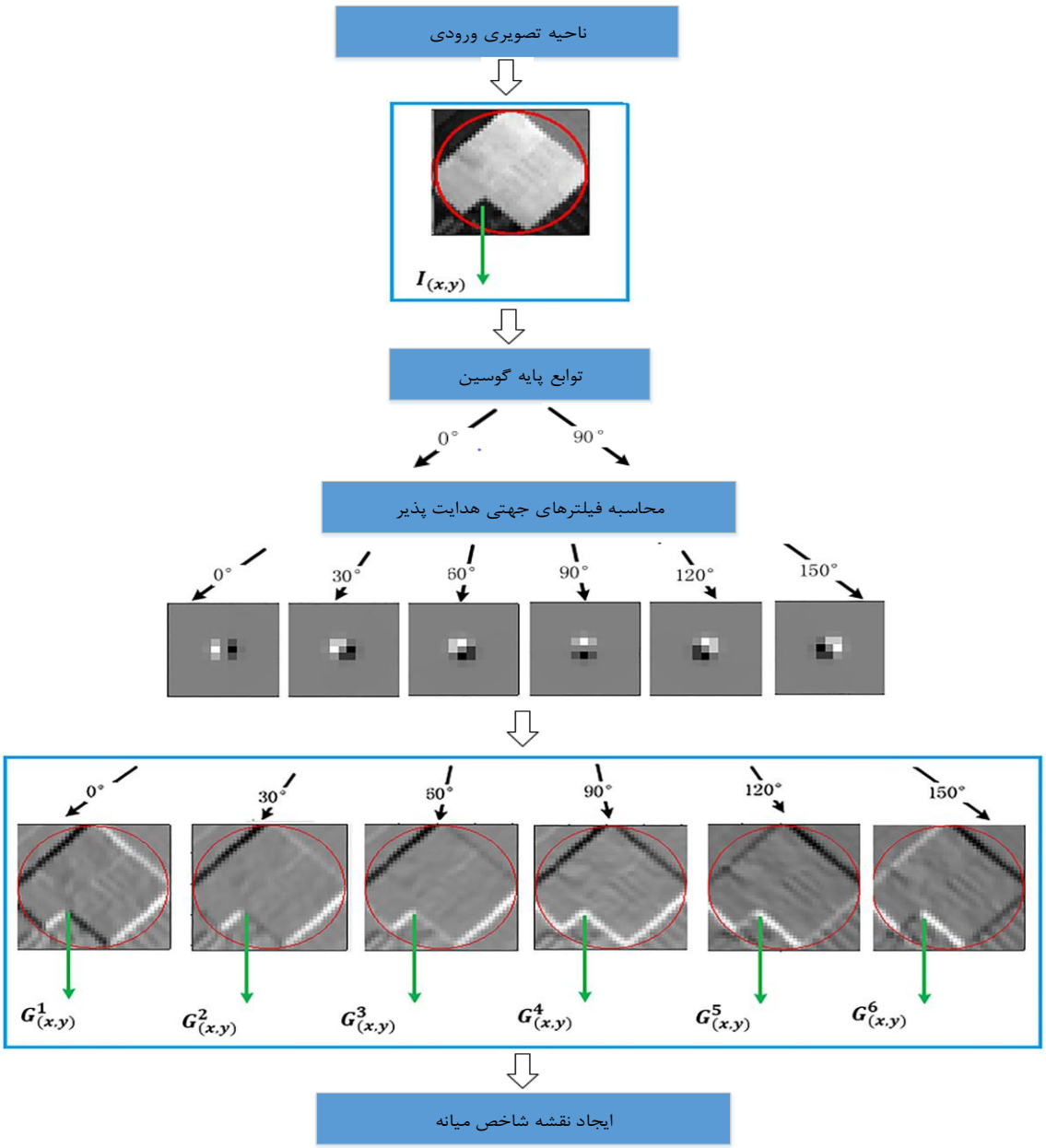
در ادامه، با الهام از نقشه تمایز توصیفگر *HOSS* برای هر پیکسل در تصویر اصلی، مقدار میانه در فیلترهای جهتی ایجاد شده به موقعیت متناظر آن در نقشه شاخص، اختصاص می‌یابد.چنین رویکردی، علاوه‌بر افزایش پایداری در برابر نویز، مانع از کاهش تمایز ساختارهای موضعی در حضور درجات خاکستری معکوس بین باندهای طیفی می‌گردد. برای اینکه چنین رویکردی در قالب چارچوب *MRA* انجام گیرد، روش پیشنهادی با الهام از آشکارساز شاخص *SIFT*، بدین‌صورت عمل می‌کند که در ابتدا تصویر با مقیاس σ_0 نرم می‌شود. حال یک ضریب افزایش $K = \sqrt[3]{2}$ در نظر گرفته‌شده و مقیاس سطوح بعدی مطابق رابطه (۵) محاسبه می‌شود:

رابطه(۵) $$\sigma_i = K^{i-1} \times \sigma_0 \ , \ i = 2.3.4.5.6$$

در رابطه (۵)، σ_i در ارتباط با انحراف معیار در نظر گرفته‌شده برای مشتق‌های پایه گوسین بوده، بدین‌صورت سطح اطمینان در هر لایه برابر ($-3\times\sigma_i$ ×: $3\times\sigma_i$) خواهد بود. می‌توان گفت که ایده اساسی، ایجاد یک فضای ویژه تحت عنوان فضای مقیاس است که شبیه‌سازی توصیف‌های متعددی از تصویر را در مقیاس‌های مختلف، امکان‌پذیر سازد. انتظار می‌رود که به‌کارگیری فیلترهای هدایت‌پذیر عملکرد بهتری در مقایسه با تصاویر تفاضل گوسین در روش *SIFT* به‌عنوان تقریب خطی تابع انتشار در استخراج نواحی ساختاری و متمایز داشته باشد. همچنین، به‌منظور جلوگیری از کاهش دقت موقعیتی، تنها به اوکتاو[1] اول بسنده شده است. شکل(۲) نمایش بصری فیلترهای هدایت‌پذیر و نقشه ویژگی حاصل از اعمال آن‌ها بر روی تصویر را نشان می‌دهد. مشاهده می‌شود، که انواع عوارض ساختاری در جهت‌های متعدد فعال شده‌اند.

[1] *octave*

[Downloaded from jgit.kntu.ac.ir on 2026-01-29]
[DOI: 10.61186/jgit.12.2.59]



شکل۲: بازسازی عوارض ساختاری با استفاده از فیلترهای هدایت‌پذیر گوسی در حوزه مکان

در مرحله بعد، در هر سطح مقیاس، قدرمطلق تفاضل تصویر شاخص به‌دست‌آمده را از تصویر PAN به دست آورده PAN_D نامیده می‌شود. حال، به‌منظور کاهش اعوجاجات طیفی، فیلتر (MTF) متناسب با سنجنده ایجادشده و به PAN_D اعمال شده که حاصل آن PAN_{LP} نامیده می‌شود.

درنهایت، مطابق روابط (۶) و (۷)، از اختلاف تصویر PAN_{LP} حاصل از PAN_D، تصویر دربردارنده عوارض ساختاری بازسازی‌شده به‌دست می‌آید.

$$PAN_{LP} = Conv(f_{MTF}.PAN_D)$$ رابطه(۶)

$$delta = PAN_D - PAN_{LP}$$ رابطه(۷)

[Downloaded from jgit.kntu.ac.ir on 2026-01-29]
[DOI: 10.61186/jgit.12.2.59]

در رابطه(۶)، $Conv$ و f_{MTF} نشان‌دهنده عملگر پیچش و فیلتر MTF سنجنده هستند. $delta$ نیز عوارض بازسازی‌شده نهایی است. حال، مطابق رابطه (۸)، عوارض بازسازی‌شده به باندهای تصویر MS افزوده می‌شوند.

رابطه(۸)

$$lms_k = \sum_{k=1}^{N} delta * C_k + MS_k$$

در رابطه (۸)، k برابر تعداد باندهای طیفی است. همچنین MS تصاویر چندطیفی بوده که با استفاده از روش بایکیوبیک[1] ، به ابعاد تصویر PAN رسانده شده‌اند. پارامتر C نیز ضریب همبستگی بین باندهای طیفی اصلی و PAN_{LP} است. مسئله‌ای که باقی می‌ماند، اعوجاجات طیفی است. همان‌طور که سابقاً اشاره گردید، بهبود مکانی نباید به هزینه تخریب شدید اطلاعات طیفی انجام گیرد. لذا، مطابق توضیحات پیشین، در وهله اول، مجموعه‌ای از روش‌های شاخص ارائه‌شده را در نظر گرفته شده است. سپس به‌منظور حفظ مؤثرتر اطلاعات طیفی، تصویر تمایز دودویی به‌عنوان تصویر راهنما در نظر گرفته شده و به مناطقی که فاقد انتروپی[2] کافی هستند (نواحی با درجه خاکستری صفر) مقدار تصویر بازسازی‌شده اولیه اختصاص می‌یابد. همان‌طور که پیشتر اشاره گردید، الگوریتم‌های مختلف از سطوح پایداری هندسی و رادیومتریکی متنوعی مختلف برخوردارند با استفاده از همین استراتژی ساده، انتظار می‌رود که بدون نیاز به طراحی الگوریتمی جدید، با تلفیق الگوریتم‌های توسعه داده‌شده، بتوان عملکرد آن‌ها را افزایش داد.

۲-۲- طراحی نقشه تمایز موضعی دودویی

همان‌طور که در بخش‌های قبل توضیح داده شد، یک چالش اساسی در فرآیند تلفیق تصاویر ماهواره‌ای، استخراج اطلاعات ساختاری در فرکانس‌های متعدد در عین حفظ اطلاعات رادیومتریکی است. در نتیجه آن، تصویر پن‌شارپ‌شده نهایی، در عین دقت بالا، از واقع‌گرایی کافی برخوردار خواهد بود. ایده اساسی در این مرحله، طراحی یک تصویر تمایز که عملکرد فیلتر راهنما را داشته باشد، به‌منظور هدایت فرآیند تلفیق به‌صورت موضعی است.

در این تحقیق، از عملگرهای مورفولوژی، باتوجه به سرعت محاسباتی بالا، برای استخراج تصویر دودویی تمایز استفاده شده است. ایده اصلی این رویکرد بر اساس تحلیل اطلاعات هندسی توسط جست‌وجوی یک ساختار هندسی کوچک است. بدین‌منظور، عملگرهای فرسایش و گسترش به‌طور جداگانه بر روی تصویر PAN اعمال‌شده، سپس، با محاسبه گرادیان مورفولوژی از اختلاف این دو عملگر و بارزسازی لبه‌ها، تصویر تمایز ایجاد شده که با استفاده از آستانه‌گذاری اتسو[3] به تمایز دودویی تبدیل می‌شود. اگر تصویر تمایز حاصل را S بنامیم و M_mat هر کدام از روش‌های انتخابی باشد، برای هر پیکسل در S که مقدار آن برابر صفر باشدُ، مقدار lms جایگزین پیکسل اصلی در M_mat می‌شود. انتظار می‌رود که شناسایی و تفکیک مناطق متمایز موضعی از مناطق با بافت ضعیف یا بدون بافت، پتانسیل مؤثری در بهبود عملکرد تلفیق داشته باشد. در بخش بعد، نتایج به‌دست‌آمده، تشریح خواهد شد.

۳- پیاده‌سازی و ارزیابی نتایج

همان‌طور که سابقاً اشاره گردید، هدف از این تحقیق، طراحی و توسعه روشی به‌منظور بهبود عملکرد تلفیق تصاویر چندطیفی ماهواره‌ای با توان‌تفکیک مکانی بالا است. بدین‌منظور، در ابتدا با استفاده از MTF سنجنده و رویکردی مبنی بر فیلترهای هدایت‌پذیر گوسین به بازسازی عوارض موضعی ساختاری در فرکانس‌های مختلف پرداخته و در ادامه، به‌منظور افزایش تعادل میان اعوجاجات طیفی و مکانی و واقع‌گرایی فرآیند تلفیق، با استفاده از نقشه تمایز موضعی به‌عنوان فیلتر راهنما، به بهبود عملکرد مجموعه‌ای از روش‌های شاخص

[1] *BICUBIC*

[2] *Entropy*

[3] *OTSU*

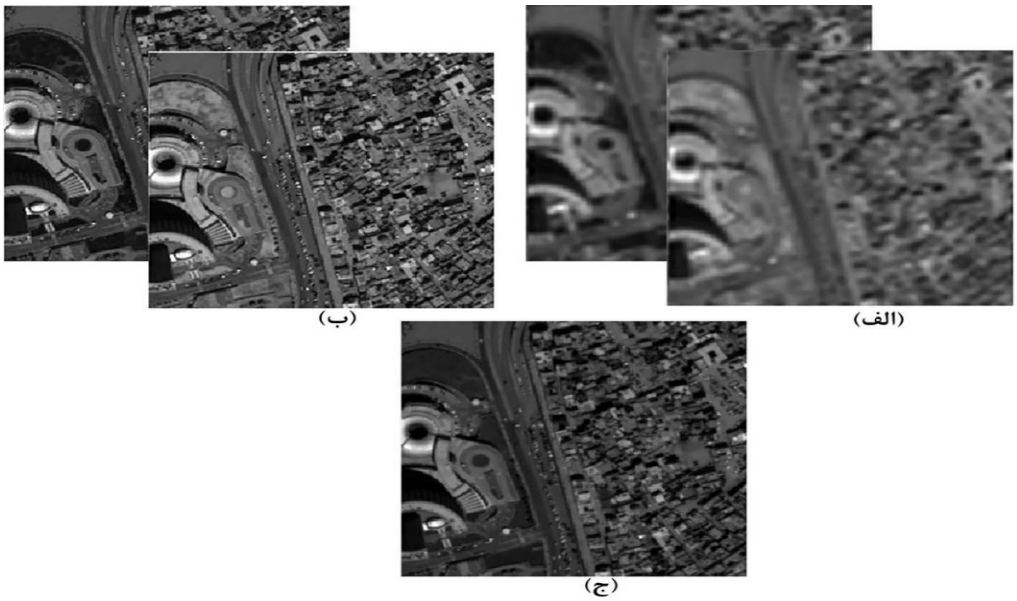
[Downloaded from jgit.kntu.ac.ir on 2026-01-29]

[DOI: 10.61186/jgit.12.2.59]

و شناخته‌شده تلفیق پرداخته شده است. لذا، در این بخش، ابتدا، تشریح و نمایش داده‌های مورداستفاده انجام-شده و در ادامه، نتایج کمی و بصری حاصل از رویکرد پیشنهادی موردبررسی قرار خواهد گرفت.

۳-۱- داده‌های مورداستفاده

در این تحقیق، از تصاویر چندطیفی ماهواره ورلدویو۳ استفاده شده است. تصویر *PAN* در ابعاد ۲۵۶×۲۵۶ و تصاویر چندطیفی در ۸ باند در ابعاد ۶۴×۶۴ هستند. شکل (۳) نمایش بصری از داده‌های مورد استفاده را نشان می‌دهد. مشاهده می‌شود که تصویر *PAN* دربردارنده عوارض موضعی ساختاری در فرکانس‌های متعدد بوده که بازسازی آن‌ها با چالش اساسی مواجه است. مسائلی از جمله تغییرات شدید موضعی فرکانس و همچنین، حضور عوارض موضعی کوچک، می‌توانند باعث عملکرد بسیاری از الگوریتم‌های ارائه‌شده باشند. همچنین، این مسائل، خود، چالش اساسی برای بسیاری از روش‌های تشخیص تمایز ارائه‌شده خواهند شد. عوارض یکسان در باندهای طیفی مختلف، از درجات روشنایی مختلف برخوردار بوده که به الگوریتم‌هایی با پایداری رادیومتریکی بالا نیاز دارند. در غیر این صورت، واقع‌گرایی تصاویر تلفیقی تحت‌الشعاع قرار خواهد گرفت.



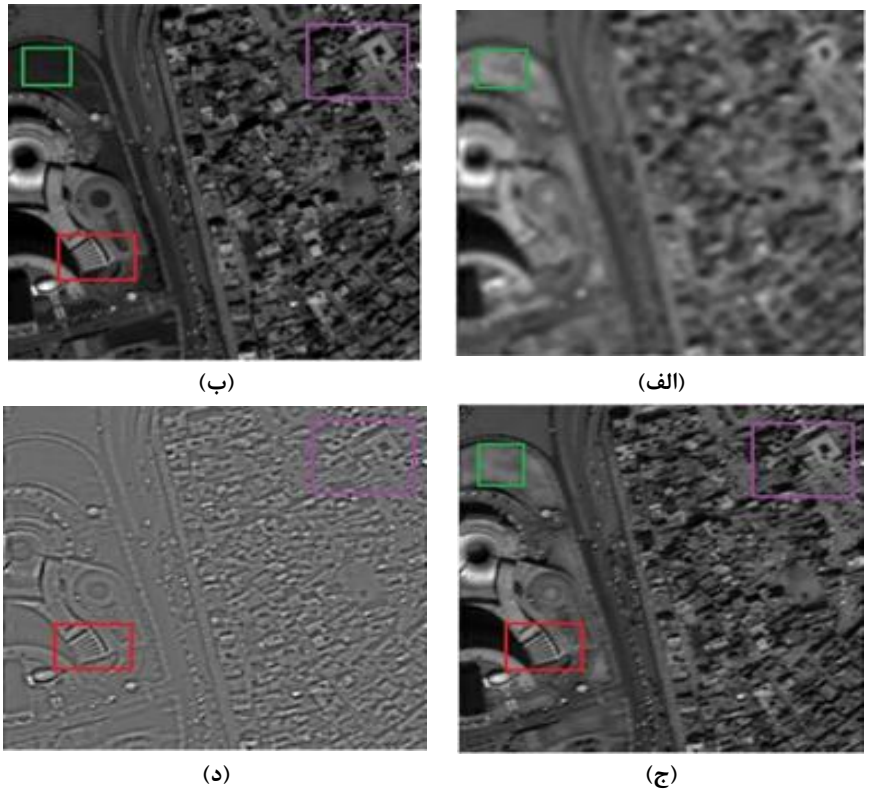
شکل۳: نمایش بصری داده مورداستفاده.(الف): شماری از تصاویر *MS* هم‌اندازه با تصویر*PAN*، (ب) شماری از باندهای طیفی تصاویر مرجع مورداستفاده، (ج): تصویر *PAN*

۳-۲- تحلیل کمی و بصری عناصر مختلف الگوریتم پیشنهادی

با توجه به بخش‌های سابق، در گام اول، فیلترهای هدایت‌پذیر گوسین در رویکردی چندمقیاسی با الهام از الگوریتم شاخص *SIFT* بر روی تصویر *PAN* اعمال شده تا عوارض ساختاری در مقیاس‌ها و جهات متعدد بازسازی گردند. به‌منظور حفظ اطلاعات طیفی، این کار با استفاده از *MTF* سنجنده انجام می‌گیرد.

شکل (۴) تصویر بازسازی‌شده اولیه را در قسمت (ج) و عوارض موضعی مستخرج را که همان *delta* در رابطه(۷) است، در قسمت (د) را نشان می‌دهد. همچنین، به‌منظور مقایسه بهتر، تصویر *MS* در (الف) و تصویر *PAN* در (ب) نشان داده شده است.

[Downloaded from jgit.kntu.ac.ir on 2026-01-29]
[DOI: 10.61186/jgit.12.2.59]

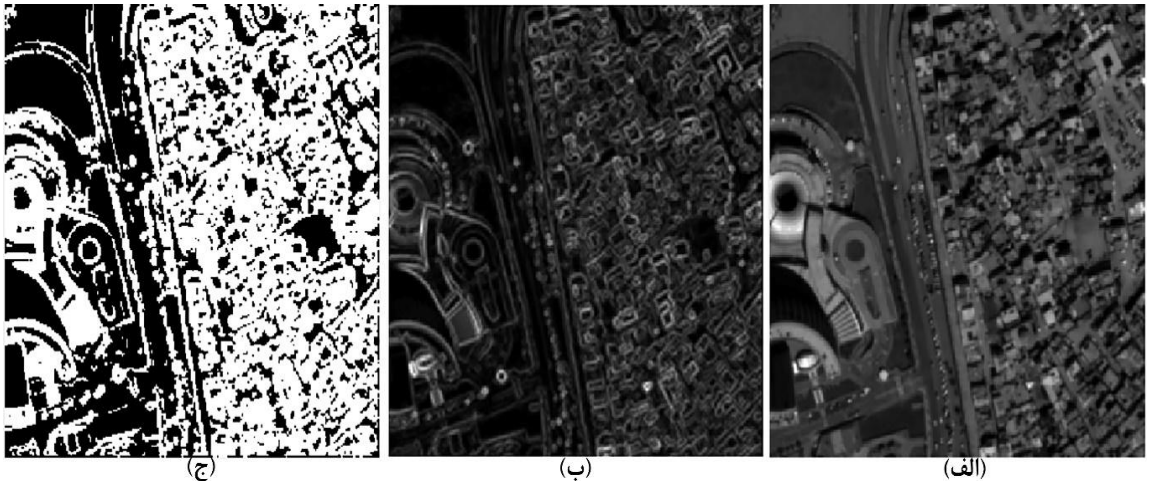


شکل۴: عوارض بازسازی‌شده با استفاده از روش پیشنهادی، (الف): تصویر *MS* و هم‌اندازه با تصویر *PAN*، (ب): تصویر *PAN* ، (ج): تصویر بازسازی‌شده *MS*، (د): عوارض ساختاری مستخرج (*delta*)

بلوک‌های قرمز و بنفش دربردارنده عوارض موضعی در فرکانس‌های مختلف هستند. همان‌طور که مشاهده می‌شود، اطلاعات ساختاری مکانی در فرکانس‌های مختلف به‌خوبی بازسازی شده است. بلوک سبز نیز مربوط به ناحیه با انتروپی کم بوده که از اختلافات شدید رادیومتریکی میان تصاویر *PAN* و*MS* برخورداراست. مشاهده می‌شود که تصویر بازسازی‌شده به‌طور قابل‌قبولی به لحاظ بصری، قادر به حفظ اطلاعات طیفی بوده که حاکی از قابلیت مؤثر فیلترهای *MTF* در فرآیند تلفیق است. با این‌حال، به‌منظور افزایش واقع‌گرایی تصاویر تلفیقی به‌عنوان مسئله اساسی فرآیند تلفیق، از یک نقشه تمایز دودویی موضعی به‌عنوان تصویر راهنما استفاده شده، تا به‌کمک آن، عملکرد روش‌های پیشین بهبود یابند.

مطابق با بخش‌های پیشین، رویکردهای مختلف تلفیق تصاویر ماهواره‌ای، از پایداری هندسی و رادیومتریکی یکسانی برخوردار نیستند. بسته به کاربرد مدنظر که پایداری هندسی در اولویت باشد، یا پایداری رادیومتریکی، می‌توان با استفاده از نقشه تمایز ایجادشده، الگوریتم‌های مختلف را باهم ادغام کرده و بازسازی نواحی ساختاری را بهبود داده یا ویژگی‌های طیفی بهتر حفظ شوند، و یا اینکه به‌طورکلی تعادل میان پایداری هندسی و رادیومتریکی افزایش داده شود. شکل (۵) تصویر تمایز موضعی حاصل را نشان می‌دهد. همان‌طور که مشاهده می‌شود، نواحی ساختاری متمایز به‌طور مناسبی از نواحی کم انتروپی و با بافت ضعیف تفکیک شده‌اند.

[Downloaded from jgit.kntu.ac.ir on 2026-01-29]
[DOI: 10.61186/jgit.12.2.59]



(الف) (ب) (ج)

شکل۵:: ایجاد نقشه تمایز برمبنای عملگر مورفولوژی، (الف): تصویر اصلی *PAN*، (ب): اعمال عملگر گرادیان مورفولوژی، (ج): اعمال حدآستانه اتسو

درنهایت، با درنظرگیری تصویر تمایز به‌عنوان فیلتر راهنما، تصویر بازسازی‌شده با مجموعه‌ای از روش‌های شاخص ارائه‌شده ادغام می‌شود. در زیربخش بعدی، نتایج کمی و کیفی به‌دست‌آمده تشریح خواهدشد.

۳-۳- معیارها و رویکردهای ارزیابی

حائز ذکر است که ارزیابی عملکرد الگوریتم‌ها در هر دو رویکرد مبتنی و عدم مبتنی بر داده مرجع انجام گرفته است. در رویکرد اول از پروتکل‌های ارزیابی کیفیت بدون مرجع (*QNR*)[1] و ارزیابی ترکیبی کیفیت بدون مرجع (*HQNR*)[2] استفاده شده است. طبق تحقیقات انجام‌گرفته توسط آرینزو و همکاران (۲۰۲۲)، پروتکل *QNR* و مشتقات آن، پرکاربردترین رویکرد مورد استفاده به‌منظور ارزیابی عملکرد الگوریتم‌های تلفیق تصاویر ماهواره‌ای در چندسال اخیر در نشریات معتبر علمی بوده است [۴]. این پروتکل دربردارنده هر دو دسته اعوجاجات طیفی و مکانی بوده، به‌نحوی که به ترتیب حاکی از تغییرات میان تصاویر در باندهای گوناگون و تغییرات میان تصاویر تلفیقی حاصل و تصویر *PAN* هستند. شاخص ارزیابی *QNR* مطابق رابطه(۹) محاسبه می‌شود.

رابطه(۹)

$$QNR = (1 - D_l^{QNR})^{\alpha} \times (1 - D_S^{QNR})^{\beta}$$

در رابطه (۹)، D_s و D_l مطابق روابط (۱۰) و (۱۱) محاسبه شده و به ترتیب بیانگر اعوجاجات طیفی و مکانی هستند. این پروتکل، میزان شباهت را براساس معیار شاخص کیفیت سراسری تصویر(*UIQI*)[3][۲۹] سنجیده که در بلوک‌های با ابعاد ۱۶ پیکسل برآورد شده و در نهایت میانگیری می‌شوند. مقادیر α و β نیز مطابق آرینزو و همکاران (۲۰۲۲) تنظیم شده‌اند [۴] . همچنین، *M_mat*، *M*، *MS* و P_L به‌ترتیب تصویر تلفیقی، تصویر اولیه *MS*، تصویر *MS* که ابعاد آن گسترش داده شده و تصویر *PAN* تخریب شده هستند. $\|.\|$، *N* و *K* نیز به‌ترتیب عملگر قدر مطلق فاصله مرتبه اول، تعداد پیکسل‌ها در یک باند طیفی و تعداد باندهای طیفی مورد استفاده هستند. *i* نیز، نمایانگر پیکسل‌های تشکیل‌دهنده تصویر است.

[1] *Quality with No Reference*

[2] *Hybrid Quality with No Reference*

[3] *Universal Image Quality Index*

[Downloaded from jgit.kntu.ac.ir on 2026-01-29]

[DOI: 10.61186/jgit.12.2.59]

در رابطه (۱۱)، معیار اعوجاج برای باندهای طیفی به‌صورت دوبه‌دو عمل کرده، لذا، عبارات l و r بیانگر باندهای مجزا هستند. همان‌طور که اشاره گردید، معیارهای دیگری با الهام از QNR ارائه‌شده که از جمله آن‌ها می‌توان به $HQNR$ اشاره کرد. مطابق با پروتکل والد و باتوجه به این‌که ارزیابی میزان ثبات اطلاعات مستلزم انجام فرآیند تخریب است، این معیار از فیلترهای تطبیقی MTF برای تخریب مکانی در تصاویر MS استفاده می‌کند. درنتیجه، میزان ثبات اطلاعات طیفی با استفاده از شاخص کیو۲ ($Q2^n$) [۴] مطابق رابطه (۱۲) محاسبه شده است که $M_{mat_{ll}}$ تصویر تلفیقی تخریب‌شده است.

درنهایت، معیار $HQNR$ مطابق رابطه (۱۳) محاسبه می‌شود. قابل ذکر است که شاخص ارزیابی میزان ثبات اطلاعات مکانی در این پروتکل مشابه معیار QNR محاسبه می‌شود. بنابراین D_S^{HQNR} با D_S^{QNR} برابر خواهد بود.

$$D_S^{QNR} = \frac{1}{N_K}\sum_{i=1}^{N_K}\left\|Q(M_i.P_L) - Q(M_{mat_i}.P)\right\|_{norm}^1$$ رابطه(۱۰)

$$D_L^{QNR} = \frac{1}{N_K(N_K-1)}\sum_{l=1}^{N_K}\sum_{r=1,r\neq 1}^{N_K}\left\|Q(MS_l.MS_r) - Q(M_{mat_l}.M_mat_r)\right\|_{norm}^1$$ رابطه(۱۱)

$$D_L^{HQNR} = 1 - Q2^n(M_{mat_{ll}}.M)$$ رابطه(۱۲)

$$HQNR = (1 - D_l^{HQNR})^{\alpha} \times (1 - D_S^{HQNR})^{\beta}$$ رابطه(۱۳)

۳-۴- مقایسه و تحلیل کمی و بصری نتایج حاصل از الگوریتم‌های انتخابی

همان‌طور که سابقاً بیان گردید، به‌منظور حفظ واقع‌گرایی تصویر بازسازی‌شده، به‌ناچار میان اعوجاجات طیفی و مکانی بایستی تعادل برقرار شود. درنتیجه، به‌منظور بررسی عملکرد روش پیشنهادی، در مرحله اول، مجموعه‌ای از روش‌های شاخص و شناخته‌شده تلفیق تصاویر ماهواره‌ای پیاده می‌شود. در ادامه، نقشه تمایز حاصل به‌عنوان فیلتر راهنما در نظر گرفته‌شده و در مناطقی که برابر صفر است، مقدار تصویر تخمین زده‌شده به‌کمک فیلترهای هدایت‌پذیر گوسین به تصویر نهایی اختصاص می‌یابد. در خصوص ارزیابی بخش‌های مختلف طراحی‌شده در روش پیشنهادی، ازالگوریتم‌های متنوع و شناخته‌شده‌ای مبنی بر چارچوب‌های مختلف ریاضیاتی استفاده شده است.

نتایج حاصل از این بخش در جدول (۱) نشان داده شده است. همان‌طور که مشاهده می‌شود، مقادیر پروتکل‌ها به‌طورکلی تعدیل‌یافته که حاکی از افزایش واقع‌گرایی فرآیند تلفیق است. اعوجاج مکانی نیز، برای تمامی روش‌ها تعدیل یافته است.

ارزیابی دیگری که می‌توان در نظر گرفت، به‌کارگیری معیارهای مبتنی بر داده مرجع است. از معیارهای شاخص در این زمینه، می‌توان به تبدیل‌گر زاویه طیفی (SAM)[1] اشاره کرد [۳۰]. باتوجه به این‌که این معیار از دسته معیارهای ناشباهتی بوده، هرچه از مقدار کم‌تری برخوردار باشد، فرآیند تلفیق از عملکرد بهتری برخوردار بوده است. جدول (۲) نتایج حاصل از ارزیابی این بخش را نشان می‌دهد.

[1] *Spectral Angle Mapper*

[Downloaded from jgit.kntu.ac.ir on 2026-01-29]
[DOI: 10.61186/jgit.12.2.59]

جدول۱: ارزیابی عملکرد روش پیشنهادی با استفاده از پروتکل‌های مبتنی *QNR*

دسته‌بندی	الگوریتم	*HQNR*	*Ds_HQ*	*Dl_HQ*	*QNR*	*Ds_Q*	*Dl_Q*
(۱)	*BT_HC*	۰٫۹۰۵۲	۰٫۸۰۳	۰٫۰۳۲۹	۰٫۸۹۸۳	۰٫۸۰۳	۰٫۰۷۰۶
	روش پیشنهادی	۰٫۹۲۹	۰٫۰۵۹۸	۰٫۰۳۱۴	۰٫۹۱۷۴	۰٫۰۵۹۸	۰٫۶۱۹
(۲)	*R_BDSD*	۰٫۹۳۰۵	۰٫۰۳۲۱	۰٫۰۴۲۹	۰٫۹۶۱۹	۰٫۰۳۲۱	۰٫۰۱۰۵
	روش پیشنهادی	۰٫۹۳۱۱	۰٫۰۴۲۶	۰٫۰۳۲۸	۰٫۹۴۹۵	۰٫۰۴۲۶	۰٫۰۳۱۴
(۳)	*BDSD_PC*	۰٫۹۲۳۸	۰٫۰۵۱۱	۰٫۰۳۲۶	۰٫۹۳۹۵	۰٫۰۵۱۱	۰٫۰۲۴
	روش پیشنهادی	۰٫۹۲۷۳	۰٫۰۴۸۱	۰٫۰۳۱۸	۰٫۹۴۳	۰٫۰۴۸۱	۰٫۰۴۰۹
(۴)	*MTF_GLP_HPM_H*	۰٫۹۰۴۸	۰٫۰۷	۰٫۰۲۵	۰٫۹۰۱۷	۰٫۰۷	۰٫۰۷۱۵
	روش پیشنهادی	۰٫۹۲۴۳	۰٫۰۵۸۳	۰٫۰۲۵	۰٫۹۳۱	۰٫۰۵۸۳	۰٫۰۶۳۷
(۵)	*MF*	۰٫۹۳۹۶	۰٫۰۵۱	۰٫۰۱۷۵	۰٫۹۳۸۱	۰٫۰۵۱	۰٫۰۵۲۵
	روش پیشنهادی	۰٫۹۴۴۲	۰٫۰۴۱۴	۰٫۰۲۰۱	۰٫۹۵۱	۰٫۰۴۱۴	۰٫۰۴۷۸
(۶)	*PWMBF*	۰٫۹۲۰۲	۰٫۰۶۷۵	۰٫۰۳۵۵	۰٫۹۰۷	۰٫۰۶۷۵	۰٫۰۶۴۷
	روش پیشنهادی	۰٫۹۳۱	۰٫۰۴۶۶	۰٫۰۲۰	۰٫۹۴۴۸	۰٫۰۴۶۶	۰٫۰۵۱۷
(۷)	*LPPN*	۰٫۹۴۱۲	۰٫۰۴۴	۰٫۰۲۰۸	۰٫۹۴۷۹	۰٫۰۴۴	۰٫۰۳۶۳
	روش پیشنهادی	۰٫۹۴۱۶	۰٫۰۴۱	۰٫۰۲۳	۰٫۹۵۲۱	۰٫۰۴۱	۰٫۰۳۱۲

جدول۲: ارزیابی عملکرد روش پیشنهادی با استفاده از معیار مرجع‌مبنا

دسته‌بندی	الگوریتم	*SAM*
(الف)	*BT_HC*	۳٫۹۸۴۵
	روش پیشنهادی	۳٫۶۸۱۸
(ب)	*R_BDSD*	۳٫۷۸۶۱
	روش پیشنهادی	۳٫۳۸۴۲
(ج)	*BDSD_PC*	۳٫۲۷۹۴
	روش پیشنهادی	۳٫۳۸۱۸
(د)	*MTF_GLP_HPM_H*	۳٫۰۳۰۷
	روش پیشنهادی	۳٫۶۸۳۱
(ر)	*MF*	۳٫۱۹۲۷
	روش پیشنهادی	۳٫۱۷۷۶
(س)	*PWMBF*	۳٫۵۴۷۷
	روش پیشنهادی	۳٫۳۴۴۱
(ص)	*LPPN*	۲٫۶۹۴۶
	روش پیشنهادی	۲٫۴۲۹۴

[Downloaded from jgit.kntu.ac.ir on 2026-01-29]

[DOI: 10.61186/jgit.12.2.59]

مشاهده می‌شود که روند حصول نتایج برای تمامی پارامترها (مبتنی و عدم‌مبتنی بر تصویر مرجع) یکسان نیست. طبق مطالعه سرتل و همکاران (۲۰۲۰)، ممکن است که معیارهای کمی ارزیابی نتیجه بهتری را نشان داده ولی به لحاظ بصری، بهبود حاصل نشده باشد [۲۳]. لذا، ارزیابی کیفی و بصری تصاویر تلفیقی می‌تواند بسیار مؤثر باشد. شکل‌های (۶)، (۷)، (۸) و (۹) نتایج بصری حاصل از فرآیند تلفیق را برای روش‌های اصلی (سمت راست) و رویکرد پیشنهادی (سمت چپ) نشان می‌دهد.

(الف)

(ب)

شکل۶: نمایش بصری تصاویر تلفیقی برای الگوریتم‌های (الف) و (ب).
سمت چپ نتایج حاصل از رویکرد پیشنهادی و سمت راست نتایج حاصل از الگوریتم‌های اصلی را نشان می‌دهد.

[Downloaded from jgit.kntu.ac.ir on 2026-01-29]

[DOI: 10.61186/jgit.12.2.59]

(ج)

(د)

شکل۷: نمایش بصری تصاویر تلفیقی برای الگوریتم‌های (ج) و (د).
سمت چپ نتایج حاصل از رویکرد پیشنهادی و سمت راست نتایج حاصل از الگوریتم‌های اصلی را نشان می‌دهد.

(ر)

(س)

شکل۸: نمایش بصری تصاویر تلفیقی برای الگوریتم‌های (ر) و (س).
سمت چپ نتایج حاصل از رویکرد پیشنهادی و سمت راست نتایج حاصل از الگوریتم‌های اصلی را نشان می‌دهد.

[Downloaded from jgit.kntu.ac.ir on 2026-01-29]

[DOI: 10.61186/jgit.12.2.59]

(ص)

(م)

شکل۹: نمایش بصری تصاویر تلفیقی برای الگوریتم (ص)، (م) تصویر مرجع را نشان می‌دهد.

روش تبدیل براوی مبتنی بر تصحیح ابهام (*BT_HC*)[1] نسخه توسعه‌یافته‌ای از تبدیل براوی[2] بوده که با تصحیح ابهام[3] به دنبال بهبود مدولاسیون مکانی طیف پیکسل است [۳۱]. به‌کارگیری رویکرد پیشنهادی در روش *BT_HC* کاهش اعوجاجات طیفی و مکانی قابل-توجهی را به‌دنبال داشته است. بهبود فرآیند تلفیق به-طور بصری نیز به‌وضوح قابل شهود است. به‌ویژه آن‌که الگوریتم اصلی دچار فرو برازش طیفی شده است. همان‌طور که اشاره گردید، *BDSD* یکی از شناخته-شده‌ترین روش‌های تلفیق در سطح پیکسل بوده که به-دنبال کمینه‌سازی مربعات خطاها میان تصاویر در مقیاس مشابه است. معیار طیفی *Dl_ Q*، کم‌ترین مقدار را برای الگوریتم *R_BDSD* کسب کرده است. این معیار در رویکرد پیشنهادی افزایش یافته است. اما معیار طیفی *Dl_HQ* متناظر با آن کاهش یافته است. باتوجه به نمایش بصری تصاویر، برخلاف روش قبلی، روش *R_BDSD* به‌لحاظ حفظ اطلاعات طیفی، به‌نوعی دچار فرابرازش شده است. مشاهده می‌شود که رویکرد پیشنهادی باعث تعدیل اعوجاجات طیفی شده است. روش *BDSD_PC* نیز رفتاری مشابه روش قبلی در حفظ اطلاعات طیفی داشته است. به‌علاوه، نتایج به‌دست‌آمده حاکی از تعدیل اعوجاجات مکانی و درنتیجه افزایش واقع‌گرایی تلفیق است. این روش‌ها که متعلق به دسته *CS* هستند، تماماً به لحاظ معیار مرجع‌مبنا *SAM* نیز بهبود یافته‌اند.

الگوریتم تابع تبدیل مدولاسیون مبنی بر هرم تعمیم-یافته لاپلاس، مدولاسیون فرکانس بالا و تصحیح ابهام (*MTF–GLP-HPM-HC*)[4] که در چارچوب *MRA*

[1] *Brovey Transform Haze Correction*

[2] *Brovey*

[3] *Haze correction*

[4] *MTF-Generalized Laplacian Pyramid via High Pass Modulation and Haze Correction*

[Downloaded from jgit.kntu.ac.ir on 2026-01-29]

[DOI: 10.61186/jgit.12.2.59]

عمل می‌کند، از منظر تمامی پارامترها بهبود یافته است [۳۲]. این روش، همان‌طور که از نام آن پیداست، تصحیح ابهام را در رویکرد چندمقیاسی مبنی بر تجزیه لاپلاسین و تابع *MTF* انجام می‌دهد. افزایش واقع‌گرایی تلفیق با استفاده از رویکرد پیشنهادی به لحاظ بصری نیز قابل شهود است. الگوریتم مبتنی بر تابع مورفولوژیکی (*MF*)[1] نیز متعلق به چارچوب *MRA* بوده و از رویکرد تجزیه غیرخطی براساس عملگر گرادیان مورفولوژیکی استفاده می‌کند [۳۳]. این روش، نتیجه بهتری در مقایسه روش قبلی کسب کرده است. همچنین از منظر *SAM* و *Dl_HQ* نیز از سایر روش‌ها پیشی گرفته است. عملکرد این روش نیز به‌لحاظ بیشتر پارامترها و همچنین به‌لحاظ بصری نیز بهبود یافته است. الگوریتم تلفیقی مدل‌مبنا براساس تبدیل موجک و تحلیل مؤلفه اصلی (*PWMBF*)[2] فرآیند بهینه‌سازی را باهدف تضعیف نویز و اعوجاجات طیفی در عین حفظ عوارض مکانی انجام می‌دهد [۱۷]، عملکرد متوسطی داشته که با استفاده از رویکرد پیشنهادی بهبود یافته است. الگوریتم شبکه پن‌شارپ‌کردن مبتنی بر هرم لاپلاسین (*LPPN*)[3] روش مبتنی بر یادگیری عمیق بوده که از یک شبکه چندمقیاسی با استفاده از هرم لاپلاسین و *MTF* سنجنده استفاده می‌کند. مطابق نتایج کمی و کیفی به‌دست‌آمده، مشاهده می‌شود که استراتژی چندمقیاسی به‌طوری مؤثری قادر به بازسازی اطلاعات مکانی بوده است. همچنین، به‌کارگیری فیلتر *MTF* سنجنده متناظر با هر باند به‌جای هسته ثابت مانع از کاهش تمایز طیفی گردیده است. این روش، خود از عملکرد بالاتری در مقایسه با روش‌های قبلی به‌دنبال داشته است. با این‌حال، رویکرد پیشنهادی قادر به حصول بهبود بوده است.

[1] *Morphological Functions*

[2] *PCA and Wavelet Model-Based Fusion*

[3] *Laplacian Pyramid Pansharpening Network*

به‌طور کلی، عملکرد تمامی روش‌ها، به‌طورکلی، به‌ویژه از منظر معیارهای *QNR* و *HQNR* و همچنین ارزیابی بصری بهبود یافته است. تعدیل اعوجاجات مکانی در وهله اول، حاکی از قابلیت بالای فیلترهای هدایت‌پذیر گوسین در بازسازی عوارض در فرکانس‌های متنوع است. فیلترهای جهتی طراحی‌شده به کمک تابع گوسین، اقدام به توصیف اطلاعات ساختاری نرم شده در جهات متعدد نموده بدون آن‌که لبه‌ها و جزئیات هندسی تحت‌الشعاع قرارگیرند. همچنین، مشاهده گردید که در بعضی روش‌ها، شباهت طیفی به‌مراتب به تصویر مرجع نزدیک شده و در بعضی روش‌ها، علی‌رغم افزایش جزئی در اعوجاج طیفی، همچنان پروتکل‌های در نظر گرفته‌شده بهبودیافته که حاکی از بهبود واقع-گرایی عملکرد تلفیق است. این مسئله نیز حاکی از قابلیت بالای نقشه تمایز در نظر گرفته‌شده است.

۳-۵- ارزیابی ثانویه رویکرد پیشنهادی به‌منظور بازسازی محتوای ساختاری

از منظری دیگر، الگوریتم‌های تناظریابی تصویری، باتوجه به ماهیت مکانی که دارند، یکی از بهترین رویکردها به‌منظور ارزیابی میزان اطلاعات ساختاری بازسازی شده هستند. لذا در این تحقیق، از روش تلفیقی هسین[4] برمبنای روش شایستگی یکنواخت (*UC-Hessian*)[5] [۳۴] در ادغام با توصیفگر *SIFT* به-منظور میزان عملکرد تصویر تخمین اولیه استفاده می-شود. توصیفگر *SIFT* شناخته شده‌ترین روش به‌منظور شناسایی عوارض متناظر است. علی‌رغم کاربرد گسترده آن، از ساختار مکانی مستطیلی ساده استفاده کرده، به-علاوه هیستوگرام وزنی جهتی، از تمایز و پایداری کافی در برابر بسیاری از اعوجاجات هندسی و رادیومتریکی برخوردار نیست. با این اوصاف، باتوجه به جدول(۳)، درمی‌یابیم که تعداد بالای عوارض متناظر صحیح با صحت و تمایز بالا میان تصاویر *PAN* و تصویر تخمین

[4] *Hessian*

[5] *Brovey Transform Haze Correction*

[Downloaded from jgit.kntu.ac.ir on 2026-01-29]

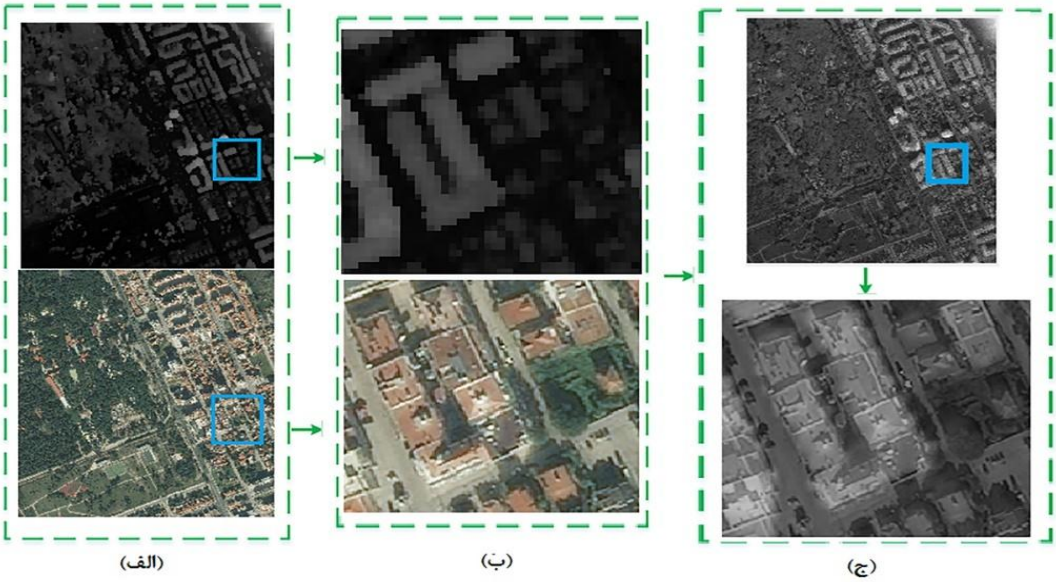
[DOI: 10.61186/jgit.12.2.59]

اولیه شناسایی شده است که حاکی از بازسازی موفقیت‌آمیز عوارض ساختاری مکانی با استفاده از روش طراحی شده است.

از منظری دیگر، به‌منظور بررسی عملکرد بازسازی عوارض مکانی، الگوریتم پیشنهادی بر مبنای فیلترهای هدایت‌پذیر گوسین (با حذف *MTF* سنجنده) را به داده‌های چندمنبعی (تصویر و مدل رقومی سطح) که از اختلافات غیرخطی رادیومتریکی برخوردار هستند، اعمال شده است. همان‌طور که از شکل (۱۰) می‌توان دریافت، حتی ساختارهای موضعی کوچک نیز به‌خوبی بازسازی شده‌اند.

جدول۳: ارزیابی عملکرد روش پیشنهادی به‌منظور بازسازی عوارض ساختاری با استفاده از فرآیند تناظریابی عوارض موضعی ساختاری

معیار	تصویر *Pan* و تصویر *MS*	تصویر *Pan* و تصویر تخمین اولیه
بازخوانی	۵۷/۲۲	۸۲/۵
تعداد متناظر صحیح	۴۲۴	۱۴۵۳



شکل۱۰: اعمال روش پیشنهادی بازسازی عوارض به تصاویر چندمنبعی، (الف): از بالابه‌پایین مدل رقومی سطح و تصویر اولیه (ب): نمایش نواحی داخل مستطیل آبی، (ج): مدل رقومی سطح بارزشده

۴- بحث و چشم‌اندازهای آینده

همان‌طور که مشاهده گردید، الگوریتم‌های متعددی مبتنی بر چارچوب‌های متنوع ریاضیاتی به‌منظور پن-شارپ‌کردن تصاویر ماهواره‌ای ارائه شده است. در سال-های اخیر نیز، محققین بسیاری از دیدگاه رویکردهای یادگیری‌مبنا به این مساله پرداخته‌اند. با این حال، همان‌طور که در بخش‌های قبلی و همچنین، با استفاده از نتایج کمی و بصری، مقصلا بیان گردید، این روش‌ها با چالش‌های اساسی همراه بوده که حاکی از عدم درنظرگیری موثر و همزمان محتوای رادیومتریکی و هندسی داده‌های ماهواره‌ای است. به‌علاوه، فرض برخی از روش‌ها اینست که تصویر کاهش ابعاد داده‌شده *PAN*

[Downloaded from jgit.kntu.ac.ir on 2026-01-29]
[DOI: 10.61186/jgit.12.2.59]

با تصویر اخذشده در باندهای طیفی دیگر، از محتوای هندسی مشابهی برخوردارند. مجموعه این عوامل باعث کاهش واقع‌گرایی روش، علی‌رغم حصول نتیجه کمی قابل‌قبول توسط برخی معیارهای ارزیابی باشد. لذا، این تحقیق، با ارائه رویکردی به‌منظور بازسازی موثر محتوای ساختاری ضمن حفظ تمایز طیفی میان باندهای مختلف، به بهبود روش‌های پیشین پرداخت. این امر، به‌طور اخص، برای رویکردهای یادگیری‌مبنا از اهیت به‌سزایی برخوردار است. همان‌طور که نتایج کمی و کیفی نشان داد، روش *LPPN* از عملکرد بهتری در مقایسه با سایر روش‌ها برخوردار بود. با این حال، افزایش تعمیم‌پذیری شبکه‌های آموزش‌داده شده برای داده‌های جدید، همواره مورد توجه بسیاری از محققین بوده است. تحقیق پیش‌رو بدون نیاز به آموزش مجدد و استراتژی‌های یادگیری انتقالی توانست به این هدف برسد.

با این حال، می‌توان در تحقیقات آتی، این رویکرد را در خصوص شبکه‌های پیش‌آموزش بیشتری آزمایش کرد. همچنین می‌توان، تصویر بازسازی‌شده را به‌عنوان تخمین اولیه به شبکه‌های یادگیری عمیق معرفی کرده و مجددا به فرآیند آموزش پرداخت. مساله دیگر به‌کارگیری معیار ارزیابی موثر بوده که از هم‌خوانی بالایی با واقعیت زمینی برخوردار باشد. در این تحقیق، از معیارهای شاخص متنوع به‌منظور ارزیابی رویکرد پیشنهادی استفاده گردید، با این حال، ارائه یک معیار کلی قابل‌اعتماد همواره مورد توجه محققین بوده است. در نهایت، می‌توان تصاویر تلفیقی حاصل را در کاربردهای متفاوت که در آن‌ها محتوای رادیومتریک و هندسی از اهمیت یکسانی برخوردار نباشند، به‌کار گرفته و ارزیابی جانبی دیگری فراهم آورد.

۵- نتیجه‌گیری

هدف از این تحقیق، ارائه رویکردی نوین دومرحله‌ای به‌منظور بهبود عملکرد تلفیق تصاویر ماهواره‌ای با توان‌تفکیک مکانی بالا است. باتوجه به اینکه تصاویر ماهواره‌ای دربردارنده عوارض موضعی در فرکانس‌های متعدد هستند، استخراج و بازسازی آن‌ها به‌منظور حصول محصولات قابل‌اعتماد از اهمیت بسزایی برخوردار است. بدین‌منظور در مرحله اول، در رویکردی چندمقیاسی، عوارض ساختاری موضعی با استفاده از روشی نوین مبنی بر ادغام *MTF* سنجنده و فیلترهای هدایت‌پذیر گوسین با الهام از الگوریتم شاخص *SIFT* بازسازی می‌شوند. در مرحله دوم، به‌منظور حفظ اطلاعات طیفی و حفظ واقع‌گرایی، نقشه تمایز دودویی برمبنای گرادیان مورفولوژی ایجادشده که به‌عنوان فیلتر راهنما برای هدایت فرآیند تلفیق به‌کار می‌رود؛ بدین‌صورت که رویکرد پیشنهادی با استفاده از تصویر تمایز با مجموعه‌ای از روش‌های ارائه‌شده در چارچوب‌های مختلف *CS*، *MRA*، *VO* و یادگیری عمیق، ادغام می‌شود. روش پیشنهادی با استفاده از ارزیابی‌های کمی و کیفی مورد بررسی قرار گرفت. بدین‌منظور، در گام اول، از معیارهای ارزیابی روش‌های تلفیق استفاده‌شده که شامل معیار مرجع‌مبنا *SAM* و پروتکل‌های *QNR* و *HQNR* بودند. این پروتکل‌ها به تصویر مرجع نیاز نداشته و ازجمله پرکاربردترین پروتکل‌های ارزیابی تلفیق تصاویر ماهواره‌ای هستند. به‌منظور افزایش اطمینان‌پذیری و تسهیل نتیجه‌گیری، نتایج کمی با کاوش بصری تصاویر تلفیقی همراه گردید. نتایج حاکی از بهبود عملکرد روش‌های انتخابی و افزایش واقع‌گرایی فرآیند تلفیق است. از این میان، روش *LPPN* که مبتنی بر یادگیری عمیق بوده، عملکرد بهتری نسبت به سایر روش‌ها داشته است. طراحی رویکرد چندمقیاسی در قالب شبکه‌ای متشکل از چندین زیرشبکه به‌طور مؤثری به بازسازی اطلاعات ساختاری در فرکانس‌های متعدد انجامیده است. همچنین به‌کارگیری فیلتر *MTF* سنجنده به‌جای هسته ثابت، حفظ اطلاعات طیفی را به‌دنبال داشته است. عملکرد این روش نیز مطابق نتایج به‌دست‌آمده با استفاده از رویکرد پیشنهادی بهبود یافته است. همچنین، میانگین معیار ارزیابی بدون مرجع (*QNR*) روش‌های انتخابی با استفاده از رویکرد پیشنهادی از ۰/۹۳۱ به ۰/۹۴۳۰ و میانگین معیار

[Downloaded from jgit.kntu.ac.ir on 2026-01-29]
[DOI: 10.61186/jgit.12.2.59]

ارزیابی ترکیبی بدون مرجع (*HQNR*) از ۰٫۹۲۰ به ۰٫۹۳۱۰ افزایش یافته است. همچنین میانگین اعوجاجات طیفی و مکانی نیز، به‌ترتیب از ۰٫۰۵۰ به ۰٫۰۴ و از ۰٫۰۵۷۶ به ۰٫۰۴۸۳ کاهش یافته است. میانگین معیار زاویه طیفی (*SAM*) نیز از ۳٫۵۰۲۲ به ۰۳٫۲۶۸ کاهش یافته است که در مجموع، حاکی از کاهش اعوجاجات و بهبود واقع‌گرایی فرآیند تلفیق هستند. حائز ذکر است که قابلیت اطمینان و کیفیت عوارض بازسازی‌شده با استفاده از فیلترهای هدایت‌پذیر گوسین و نقشه شاخص میانه از دو منظر دیگر مورد ارزیابی قرار گرفت. در گام اول، از روش *UC-Hessian-SIFT* استفاده شده که یک روش تناظریابی عارضه‌مبنا است. بدین‌صورت که یک‌بار تصاویر چندطیفی اصلی با تصویر *PAN* و بار دیگر، تصویر بازسازی‌شده با تصویر *PAN* تطبیق داده شدند. نتایج حاکی از افزایش چشم-گیر تعداد متناظرهای صحیح و پارامتر بازخوانی است. درنهایت، روش مورداستفاده برای بازسازی عوارض موضعی، به مدل رقومی ایجادشده از تصویر ماهواره‌ای اعمال‌شده که مقایسه آن با تصویر نوری متناظر حاکی از بارزسازی مدل رقومی است.

مراجع

[1] *X. Jiang, J. Ma, G. Xiao, Z. Shao, and X. Guo, "A review of multimodal image matching: Methods and applications," Information Fusion, vol. 73, pp. 22-71, 2021.*

[2] *X. Meng, H. Shen, H. Li, L. Zhang, and R. Fu, "Review of the pansharpening methods for remote sensing images based on the idea of meta-analysis: Practical discussion and challenges," Information Fusion, vol. 46, pp. 102-113, 2019.*

[3] *I. Amro, J. Mateos, M. Vega, R. Molina, and A. K. Katsaggelos, "A survey of classical methods and new trends in pansharpening of multispectral images," EURASIP Journal on Advances in Signal Processing, vol. 2011, no. 1, pp. 1-22, 2011.*

[4] *A. Arienzo, G. Vivone, A. Garzelli, L. Alparone, and J. Chanussot, "Full-resolution quality assessment of pansharpening: Theoretical and hands-on approaches," IEEE Geoscience and Remote Sensing Magazine, vol. 10, no. 3, pp. 168-201, 2022.*

[5] *Z.-R. Jin, Y.-W. Zhuo, T.-J. Zhang, X.-X. Jin, S. Jing, and L.-J. Deng, "Remote sensing pansharpening by full-depth feature fusion," Remote Sensing, vol. 14, no. 3, p. 466, 2022.*

[6] *G. Khademi and H. Ghassemian, "A multi-objective component-substitution-based pansharpening," in 2017 3rd International Conference on Pattern Recognition and Image Analysis (IPRIA), 2017: IEEE, pp. 248-252.*

[7] *S. Wady, Y. Bentoutou, A. Bengermikh, A. Bounoua, and N. Taleb, "A new IHS and wavelet based pansharpening algorithm for high spatial resolution satellite imagery," Advances in space research, vol. 66, no. 7, pp. 1507-1521, 2020.*

[8] *V. P. Shah, N. H. Younan, and R. L. King, "An efficient pan-sharpening method via a combined adaptive PCA approach and contourlets," IEEE transactions on geoscience and remote sensing, vol. 46, no. 5, pp. 1323-1335, 2008.*

[9] *A. Garzelli, F. Nencini, and L. Capobianco, "Optimal MMSE pan sharpening of very high resolution multispectral images," IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, vol. 46, no. 1, pp. 228-236, 2007.*

[10] *G. Vivone, "Robust band-dependent spatial-detail approaches for panchromatic sharpening," IEEE transactions on Geoscience and Remote Sensing, vol. 57, no. 9, pp. 6421-6433, 2019.*

[11] *B. Aiazzi, S. Baronti, and M. Selva, "Improving component substitution pansharpening through multivariate*

[Downloaded from jgit.kntu.ac.ir on 2026-01-29]

[DOI: 10.61186/jgit.12.2.59]

regression of MS $+ $ Pan data," IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, vol. 45, no. 10, pp. 3230-3239, 2007.

[12] R. Restaino, M. Dalla Mura, G. Vivone, and J. Chanussot, "Context-adaptive pansharpening based on image segmentation," IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, vol. 55, no. 2, pp. 753-766, 2016.

[13] C. A. Laben and B. V. Brower, "Process for enhancing the spatial resolution of multispectral imagery using pan-sharpening," ed: Google Patents, 2000.

[14] J. Choi, K. Yu, and Y. Kim, "A new adaptive component-substitution-based satellite image fusion by using partial replacement," IEEE transactions on geoscience and remote sensing, vol. 49, no. 1, pp. 295-309, 2010.

[15] C. Jin, L.-J. Deng, T.-Z. Huang, and G. Vivone, "Laplacian pyramid networks: A new approach for multispectral pansharpening," Information Fusion, vol. 78, pp. 158-170, 2022.

[16] K. Yaghoubi, A. Safdarinezhad, and M. Jafari, "A method for determining the optimum parameter of the soft filters to image fusion in the frequency domain," Journal of Space Science and Technology, vol. 14, no. 3, pp. 23-37, 2021.

[17] F. Palsson, J. R. Sveinsson, M. O. Ulfarsson, and J. A. Benediktsson, "Model-based fusion of multi-and hyperspectral images using PCA and wavelets," IEEE transactions on Geoscience and Remote Sensing, vol. 53, no. 5, pp. 2652-2663, 2014.

[18] N. Ahmadian, A. Sedaghat, and N. Mohammadi, "Performance evaluation of three deep learning models in building footprint extraction from aerial and satellite images," Engineering Journal of Geospatial Information Technology, vol. 11, no. 1, pp. 105-123, 2023.

[19] G. Masi, D. Cozzolino, L. Verdoliva, and G. Scarpa, "Pansharpening by convolutional neural networks," Remote Sensing, vol. 8, no. 7, p. 594, 2016.

[20] X. Fu, W. Wang, Y. Huang, X. Ding, and J. Paisley, "Deep multiscale detail networks for multiband spectral image sharpening," IEEE Transactions on Neural Networks and Learning Systems, vol. 32, no. 5, pp. 2090-2104, 2020.

[21] P. Wang and E. Sertel, "Channel–spatial attention-based pan-sharpening of very high-resolution satellite images," Knowledge-Based Systems, vol. 229, p. 107324, 2021.

[22] Q. Liu, H. Zhou, Q. Xu, X. Liu, and Y. Wang, "PSGAN: A generative adversarial network for remote sensing image pan-sharpening," IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, vol. 59, no. 12, pp. 10227-10242, 2020.

[23] F. Ozcelik, U. Alganci, E. Sertel, and G. Unal, "Rethinking CNN-based pansharpening: Guided colorization of panchromatic images via GANs," IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, vol. 59, no. 4, pp. 3486-3501, 2020.

[24] H. Wu, L. Zhang, and J. Ma, "Remote sensing image super-resolution via saliency-guided feedback GANs," IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, vol. 60, pp. 1-16, 2020.

[25] B. Liu et al., "Saliency-guided remote sensing image super-resolution," Remote Sensing, vol. 13, no. 24, p. 5144, 2021.

[26] A. Sedaghat and N. Mohammadi, "Illumination-robust remote sensing image matching based on oriented self-similarity," ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing, vol. 153, pp. 21-35, 2019.

[27] W. T. Freeman and E. H. Adelson, "The design and use of steerable filters," IEEE Transactions on Pattern analysis and machine intelligence, vol. 13, no. 9, pp. 891-906, 1991.

[28] D. G. Lowe, "Distinctive image features

[Downloaded from jgit.kntu.ac.ir on 2026-01-29]

[DOI: 10.61186/jgit.12.2.59]

from scale-invariant keypoints," International journal of computer vision, vol. 60, no. 2, pp. 91-110, 2004.

[29]Z. Wang and A. C. Bovik, "A universal image quality index," IEEE signal processing letters, vol. 9, no. 3, pp. 81-84, 2002.

[30]R. H. Yuhas, J. W. Boardman, and A. F. Goetz, "Determination of semi-arid landscape endmembers and seasonal trends using convex geometry spectral unmixing techniques," in JPL, Summaries of the 4th Annual JPL Airborne Geoscience Workshop. Volume 1: AVIRIS Workshop, 1993.

[31]S. Lolli, L. Alparone, A. Garzelli, and G. Vivone, "Haze correction for contrast-based multispectral pansharpening," IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters, vol. 14, no. 12, pp. 2255-2259, 2017.

[32]A. Garzelli, B. Aiazzi, L. Alparone, S. Lolli, and G. Vivone, "Multispectral pansharpening with radiative transfer-based detail-injection modeling for preserving changes in vegetation cover," Remote Sensing, vol. 10, no. 8, p. 1308, 2018.

[33]R. Restaino, G. Vivone, M. Dalla Mura, and J. Chanussot, "Fusion of multispectral and panchromatic images based on morphological operators," IEEE Transactions on Image Processing, vol. 25, no. 6, pp. 2882-2895, 2016.

[34]A. Sedaghat and N. Mohammadi, "Uniform competency-based local feature extraction for remote sensing images," ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing, vol. 135, pp. 142-157, 2018.

[Downloaded from jgit.kntu.ac.ir on 2026-01-29]

[DOI: 10.61186/jgit.12.2.59]

K. N. TOOSI UNIVERSITY OF TECHNOLOGY
FACULTY OF GEODESY AND GEOMATICS ENGINEERING

Journal of Geospatial Information Technology
Vol.12, No.2, Summer 2024

Research Paper

Multi-Scale Fusion of High Spatial Resolution Satellite Images Based on Steerable Gaussian Filters and Local Saliency Map

Negar Jovhari[1], Reza Shah-Hosseini[2*], Mahdi Hasanlou[3], Amin Sedaghat[4], Nazila Mohammadi[4], and Siamand Avestan[5]

1- P.h.D Candidate, School of Surveying & Geospatial Engineering, College of Engineering, University of Tehran
2- Associate Professor, School of Surveying & Geospatial Engineering, College of Engineering, University of Tehran
3- Associate Professor, School of Surveying & Geospatial Engineering, College of Engineering, University of Tehran
4- Associate Professor, Department of Geomatics Engineering, University of Tabriz
5- Ms.c, Department of Computer Engineering- Artifical Inteligent & Robotocs,Faculty of Engineering, Bu-Ali Sina University

Abstract

High-resolution remote sensing images capture intricate local structural features across a range of frequencies, causing significant challenges in producing reliable remote sensing and photogrammetry products, particularly in the fusion of multispectral images with panchromatic bands. Many existing methods suffer from spectral and spatial distortions due to inadequate reconstruction of these local features, which poses a critical obstacle for both traditional and learning-based approaches. Furthermore, discrepancies between the training and test samples, with lack of access to reference data, can hinder the generalizability of learning-based methods. Accordingly, this paper introduces a novel two-stage approach aimed at enhancing the pixel-based fusion process of satellite images, specifically in pan-sharpening applications. The first stage focuses on reconstructing the local structural features through a multiscale technique inspired by the well-established SIFT algorithm. This method utilizes a median index map derived from steerable Gaussian filters in the spatial domain, and also incorporates the sensor's Modulation Transfer Function (MTF). Following this, a binary saliency map is generated using morphological gradients and Otsu thresholding. The reconstructed image and the saliency map are subsequently employed as a guiding image and guiding filter, respectively, and are integrated with various pan-sharpening methods across both conventional and learning-based computational frameworks. The qualitative and quantitative results demonstrate a marked improvement in the performance of these methods, yielding more realistic pansharpened images. Notably, the learning-based LPPN algorithm shows a superior performance compared to the other methods and is further enhanced by the proposed approach. On average, the Quality No-Reference (QNR) and the Hybrid Quality No-Reference (HQNR) evaluation metrics for the selected methods using the proposed approach have increased from 0.931 to 0.9430, and from 0.920 to 0.9310, respectively. Additionally, the average spectral and spatial distortions have decreased from 0.05 to 0.04 and from 0.0576 to 0.0483, respectively. Moreover, the average Spectral Angle Metric (SAM) has decreased from 3.5022 to 3.268, indicating a reduction in the distortions and an improvement in the realism of the fusion process.

Key words: *remote sensing image fusion, steerable Gaussian filter, saliency map, morphological gradients, the sensor MTF, the learning-based LPPN.*

Correspondence Address*: Photogrammetry & Remote Sensing Group, School of Surveying & Geospatial Engineering, College of Engineering, University of Tehran, Tehran, Iran.*
Tel*: +98 21 61114527*
Email: *rshahosseini@ut.ac.ir*

[Downloaded from jgit.kntu.ac.ir on 2026-01-29]

[DOI: 10.61186/jgit.12.2.59]