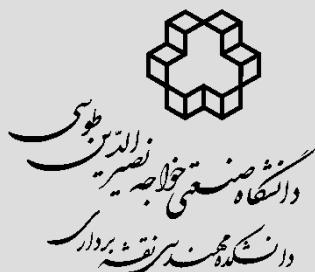


نشریه علمی مهندسی فناوری اطلاعات مکانی



سال دوازدهم، شماره دوم، تابستان ۱۴۰۳

Vol.12, No.2, Summer 2024

۵۹ - ۸۱

مقاله پژوهشی

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

نگار جوهری^۱، رضا شاه حسینی^{۲*}، مهدی حسنلو^۱، امین صداقت^۳، نازیلا محمدی^۲، سیامند اوستان^۴

۱- دانشجوی دکتری فتوگرامتری، دانشکده مهندسی نقشه‌برداری و اطلاعات مکانی، دانشگاه 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 رباتیک، دانشگاه بولی‌سینا همدان

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

چکیده

تصاویر ماهواره‌ای با توان تفکیک مکانی بالا در بردارنده عوارض موضعی ساختاری در فرکانس‌های متعدد بوده که چالش‌های اساسی را به‌هنگام پردازش و تولید محصولات قابل اعتماد سنجش‌ازدor 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. به علاوه، اختلاف میان داده آموزشی و تست و همچنین عدم دسترسی به داده مرجع، می‌تواند تعمیم‌پذیری روش‌های یادگیرنده را تحت الشاعع قرار دهد. بدین‌منظور، این تحقیق با ارائه رویکردنی دو مرحله‌ای، به‌دلیل بهبود فرآیند تلفیق پیکسل‌مبنا (پن‌شارپ‌کردن) تصاویر ماهواره‌ای است. در مرحله اول، عوارض ساختاری موضعی در رویکردنی 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 مدل سازی انتقال (MTF) سنجنده بازسازی می‌شوند. در ادامه، نقشه تمایز دودویی با استفاده از گرادیان‌های مورفلوژیکی و آستانه‌گذاری اتسو (OTSU) ایجاد می‌شود. تصویر بازسازی‌شده حاصل به‌عنوان تصویر راهنمای و نقشه تمایز به‌عنوان فیلتر راهنمای در نظر گرفته شده 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، از جمله، پارامترهای مبتنی و عدم مبتنی بر تصویر مرتع 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 روش‌های دیگر داشته که با استفاده از رویکرد پیشنهادی بهبود یافته است. 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 به ترتیب از ۰,۰۵۷۶ و از ۰,۰۴۸۳ به ۰,۰۵۰۵ افزایش یافته است. میانگین معیار زاویه طیفی (SAM) نیز از ۰,۳۵۰۲۲ به ۰,۳۲۶۸ کاهش یافته است که در مجموع، حاکی از کاهش اعوجاجات و بهبود واقع‌گرایی فرآیند تلفیق هستند.

کلیدواژه‌ها: تلفیق تصاویر سنجش‌ازدor، فیلترهای هدایت‌پذیر گوسین، نقشه تمایز، گرادیان مورفلوژیکی، MTF سنجنده، الگوریتم LPPN

* نویسنده مکاتبه کننده: گروه فتوگرامتری و سنجش‌ازدor، دانشکده مهندسی نقشه‌برداری و اطلاعات مکانی، پردیس دانشکده‌های فنی، دانشگاه تهران، تهران، ایران.
تلفن: ۰۲۱۶۱۱۴۵۲۷

۱- مقدمه

با توسعه فناوری مدرن سنجش از دور، امکان اخذ تصاویر چندطیفی (MS)^۱ چندسنجدندهای، چندزمانه و در توان تفکیک‌های مختلف از مناظر یکسان پدید آمده است. این داده‌ها اطلاعات تکمیلی را برای مطالعه ویژگی‌های منطقه و شرح کاملی از عوارض فراهم می‌کنند [۱]. هدف اصلی تصویربرداری برمبنای سنجندهای سنجش از دوری، شبیه‌سازی دقیق و قابل اعتماد سطح زمین است. با توجه به محدودیت در سیگنال به نویز دریافتی، تنها امکان اخذ تصاویر در طیف‌های گوناگون موج الکترومغناطیس با توان تفکیک مکانی پایین و به موجب آن، تصویر پنکروماتیک تکباندی (PAN)^۲ با توان تفکیک مکانی بالا وجود دارد [۲]. با این حال، آنچه که در بسیاری از کاربردها از جمله آشکارسازی تغییرات، طبقه‌بندی و استخراج اهداف و اشیا موردنیاز بوده، در دست داشتن مجموعه داده‌ای با توان تفکیک مکانی و طیفی بالا است [۳].

تلفیق تصاویر چندطیفی ماهواره‌ای با باند PAN که تحت عنوان پن شارپ کردن^۳ شناخته می‌شود، همواره توجه بسیاری از محققین در حوزه سنجش از دور و فتوگرامتری را به خود جذب کرده است [۴]. هدف از آن، تلفیق اطلاعات طیفی و مکانی تصاویر ماهواره‌ای و تولید تصاویری با توان تفکیک 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 فراینده انواع مختلف سنجندهای ماهواره‌ای و کاربرد روزافرون تصاویر رقومی حاصل از آن‌ها در بسیاری از اهداف سنجش از دور و فتوگرامتری، از اهمیت بسزایی برخوردار

است [۵]. متعاقباً، مروری بر روش‌های شاخص ارائه شده، اعم از مبتنی و عدم مبتنی بر یادگیری عمیق انجام خواهد گرفت.

۱- مروری بر شماری از روش‌های ریاضیاتی پن شارپ کردن با اینکه همیشه مورد توجه محققین بوده، هنوز هم با چالش‌های اساسی مواجه است. روش‌های ریاضیاتی متعددی در چند دهه اخیر بدین منظور ارائه شده که به طور کلی در سه دسته جایگزینی مؤلفه (CS)^۶، تحلیل چندمقیاسی (MRA)^۷ و کلاس بهینه‌سازی متغیر مبنا (VO)^۸ جای می‌گیرند [۴]. در دسته اول، یک تبدیل رادیومتریکی بر روی تصاویر با توان تفکیک 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 روش‌نای-رنگ- اشباع مکانی باندمبنا با برآورد پارامتر محلی (BDSD)^۹ اشاره کرد. Vivone^{۱۰} و همکاران^{۱۱} (۲۰۱۹) نسخه‌های توسعه‌یافته‌ای را تحت عنوان جزیيات پایدار مکانی باندمبنا با برآورد پارامتر محلی (R_BDSD)^{۱۱} و عنوان جزیيات پایدار مکانی باندمبنا با قیود فیزیکی^{۱۲} (BDSD_PC)^{۱۲} ارائه داده که به دنبال کاهش اعوجاجات طیفی با استفاده از بهینه‌سازی مقید برمبنای برآورده کمترین مربعات نرمال^{۱۳} و قیود فیزیکی هستند [۱۰]. الگوریتم‌های گراماشمیت موضعی

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

¹ Multispectral

² Panchromatic

³ Pansharpening

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. به علاوه، 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 این حال، نتایج امیدوارکننده‌ای در بسیاری از کاربردهای پردازش تصویر در برداشته‌اند [۱۵]. در خصوص تلفیق تصاویر ماهواره‌ای، می‌توان این روش‌ها را به طور کلی در دو دسته مبتنی بر شبکه‌های عصبی پیچشی (*CNN*)^۵ و شبکه‌های مولد تخاصمی (*GAN*)^۶ تقسیم‌بندی کرد. مسی^۷ و همکاران (۲۰۱۶) از یک شبکه با سه لایه پیچشی برای پن‌شارپ‌کردن استفاده کرده که ورودی آن، تصاویر چندطیفی بازنونه‌برداری شده در ادغام با تصویر *PAN* است [۱۹]. فو^۸ و همکاران (۲۰۲۰) یک شبکه *CNN* طراحی کرده که بر روی تصاویر ورودی فیلتر بالاگذر اعمال شده است [۲۰]. ونگو^۹ و سرتل^{۱۰} (۲۰۲۱) از مکانیزم توجه طیفی مکانی ادر شبکه *CNN* خود استفاده کرده که در آن بر روی تصاویر چندطیفی ورودی، فیلتر بالاگذر اعمال شده است [۲۱]. جین^{۱۱} و همکاران (۲۰۲۲) یک

[۱۱] و گرام‌اشمیت موضعی مبنی بر قطعه-بندي (*S_GSA*)^{۱۲} نیز، نسخه‌های توسعه‌یافته‌ای از الگوریتم گرام‌اشمیت (*GS*)^{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 قطعه‌بندي درخت دودویی انجام می‌دهد. روش جایگزینی موضعی مؤلفه (*PRACS*)^{۱۴} نیز در رویکردی مشابه، از تزریق آماری عوارض با فرکانس بالا را به صورت نسبت‌منما و موضعی انجام می‌دهد.

دسته دوم جزئیات مکانی را از تصویر *PAN* با استفاده از تبدیل موجک، هرم لابلسین، تابع اختلاف گوسین و غیره استخراج کرده و به تصاویر چندطیفی بازنمونه-برداری شده تزریق می‌کنند [۱۵]. روش‌های مبتنی بر *CS* و *MRA* از پیچیدگی محاسباتی بالایی برخوردار نبوده، با این حال، احتمال ایجاد اعوجاجات طیفی و مکانی در آن‌ها می‌تواند بالا باشد. در خصوص مقایسه این دو چارچوب با هم، به طور کلی می‌توان گفت که عموماً، 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 کرده‌اند [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 به دنبال مدل‌سازی روابط احتمالی میان تصویر *PAN*، *MS* و تصاویر تلفیقی در یک روند بهینه-

⁵ Convolutional Neural Network

⁶ Generative Adversarial Network

⁷ Masi

⁸ Fu

⁹ Wang

¹⁰ Sertel

¹¹ Spatial and Spectral Attention Mechanism

¹² Jin

¹ Gram Schmidt Adaptive

² Segmentation-based Gram Schmidt Adaptive

³ Gram Schmidt

⁴ Partial Replacement and Component Substitution

PAN آن‌ها از توان تفکیک مکانی بالایی برخوردار است، همچون ولدویو^۳، کوییکبرد^۴ و گائوفن دو^۵، 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 است 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 خواهد بود.

الگوریتم‌های مبتنی بر CNN اگرچه نسبت سیگنال به نویز مناسبی به همراه خواهد داشت، ممکن است که ساختارهای نرم‌شده‌ای تولید کنند [۲۴]. روش‌های ارائه شده برای تصاویر بینایی ماشین قادر به حصول عملکرد موفقیت‌آمیزی در خصوص تصاویر ماهواره‌ای نیستند. علاوه بر این که مکانیزم تصویربرداری سنجنده‌های ماهواره‌ای متفاوت بوده بلکه تصاویر سنجش-ازدوری دربردارنده ساختارهای متنوع بیشتری نسبت به تصاویر معمولی بوده و توزیع بافت در آن‌ها با توجه به مقیاس مکانی بزرگ، غیریکنواخت‌تر است. نواحی ساختاری گوناگون، ناپیوستگی‌های قابل توجهی با توجه 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 به همراه 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

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 هر کدام از شاخه‌ها در سطوح مختلف باهم ادغام شده و در پایان، تصویر تلفیق‌شده نهایی را تشکیل می‌دهند. معماری‌های چندشاخه‌ای اگرچه احتمال حفظ اطلاعات طیفی را می‌تواند افزایش دهنده، با این حال به زمان محاسباتی بالایی نیاز دارند.

لیو^۶ 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 افودن مجراکننده ارتقا یافت. اگرچه این روش‌ها معماری‌های متفاوتی را ارائه می‌دهند، با این حال، می‌توان گفت که تقریباً تمامی آن‌ها از نظریه مشابه پیروی می‌کنند. در این روش‌ها فرض بر این است که تصاویر بازنمونه-برداری شده Pan و MS دربردارنده ساختارهای مکانی مشابهی بوده، درحالی‌که تصاویر کاهش ابعاد داده شده Pan، حاوی عوارض غنی‌تری هستند. به‌منظور حل این مسئله، از لیک^۷ و همکاران (۲۰۲۰) فرآیند پن‌شارپ-کردن 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، به عنوان ورودی تولیدگر شبکه تخصصی معرفی می‌شود.

۱-۳- جمع‌بندی روش‌های ارائه شده ضرورت ارائه رویکرد پیشنهادی

علی‌رغم تحقیقات متعدد ارائه شده در سال‌های اخیر، تلفیق تصاویر ماهواره‌ای، به‌ویژه سنجنده‌هایی که باند

³WorldView

⁴QuickVrird

⁵GeoFan2

¹ Liu

² Ozcelik

حاصل از اعمال فیلتر هدایت‌پذیر به کار گرفته خواهد شد. همچنین، به منظور افزایش پایداری هندسی، استخراج عوارض در سطوح مقیاس متوالی با الهام از الگوریتم شاخص تبدیل ویژگی مستقل از مقیاس (*SIFT*)^۲، [۲۸]، انجام می‌گیرد. حائز ذکر است که این فرآیند از تابع مدولاسیون انتقال (*MTF*)^۳ 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 است. با استخراج یک نقشه تمایز دودویی و به-کارگیری آن به عنوان فیلتر راهنمای می‌توان اطلاعات طیفی و مکانی را به طور مؤثری حفظ کرده؛ بهنحوی که همگام با حفظ تمایز طیفی میان باندهای سنجنده، لبه‌ها و جزئیات مکانی تضعیف نشوند. در ادامه نقشه دودویی ایجاد شده به عنوان فیلتر راهنمای در نظر گرفته شده و به کمک آن، عوارض ساختاری مستخراج در تصاویر تلفیقی حاصل از الگوریتم‌های پیشین ارائه شده بازیابی خواهد 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 اخیراً توسط از لیک و همکاران (۲۰۲۰) مورد بررسی قرار گرفته است، اینست که روش‌های سنتی گاهای 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، نه تنها می‌تواند ناشی از واقع‌گرایی ناکافی الگوریتم بوده، بلکه حاکی از ضرورت به کارگیری معیارهای و چارچوب‌های متنوع به منظور ارزیابی الگوریتم باشد. به همین دلیل، در این تحقیق نیز، به این مساله پرداخته شده و از معیارهای متعددی مبتنی و عدم

اختلافات موضعی مکانی و واقع‌گرایی تصویر ایجاد کند، برای استخراج اطلاعات پایدار ساختاری ضروری است. از طرفی دیگر، معمولاً، 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 این حال، اغلب، مدل تخمین‌یافته خطی بوده و از دقت کافی برخوردار نیست.

به طور خلاصه می‌توان گفت که عدم دسترسی به داده مرجع بسیاری از الگوریتم‌های یادگیرنده را به شیوه‌های مختلف تحت الشعاع قرار می‌دهد. اختلاف داده آموزشی با داده تست نیز، چالشی اساسی است. بنابراین، طراحی رویکردی که به صورت هدفمند و راهنمایی‌باشید 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 راست، رویکردی که عوارض در مقیاس‌های مختلف را بر مبنای چارچوب *MRA* استخراج کند، گزینه مناسبی برای استخراج اطلاعات ساختاری در یک تصویر راهنمای خواهد بود. بدین‌منظور، در ابتدا، با الهام از رویکرد به کاررفته به منظور ایجاد نقشه تمایز در توصیفگر هیستوگرام خود شباهتی محلی جهتی (*HOSS*)^۱[۲۶]، یک نقشه معیار میانه جهتی با استفاده از فیلترهای هدایت‌پذیر گوسین [۲۷] در رویکردی چند مقیاسی استفاده می‌شود. ایده اساسی آن بر مبنای شبیه‌سازی یک فیلتر طراحی شده در جهات متعدد بر مبنای تعدادی محدود از توابع پایه است. به کارگیری فیلترهای هدایت‌پذیر، امکان توصیف تصویر را در جهات مختلف با سرعت بالا و بدون ایجاد خطاهای مربوط به درون‌یابی برقرار می‌کند. بدین‌منظور، برای هر پیکسل در نقشه معیار، میانه مقادیر

² Scale invariant Feature Transform

³ Modulation Transform Function

¹ Histogram of Oriented Self-Similarity

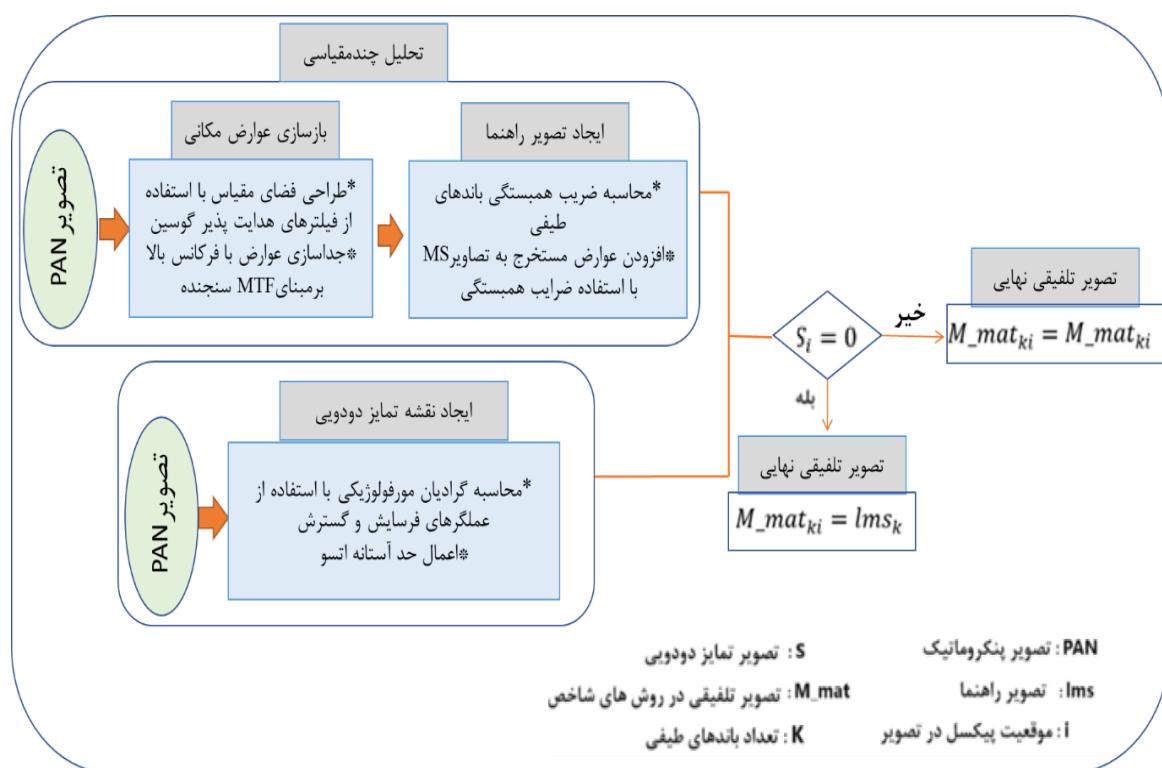
است. در مرحله اول، استخراج عوارض متمایز مکانی در فرکانس‌های بالا بر مبنای ادغام MTF سنجنده و فیلترهای هدایت‌پذیر گوسین در حوزه مکان انجام می‌گیرد. MTF سنجنده رویکرد مؤثری برای در نظر گیری روند فیزیکی اخذ تصویر است. همچنین، انتظار می‌رود که به کار گیری فیلترهای هدایت‌پذیر در رویکردی چندمقیاسی از قابلیت بالایی برای استخراج اطلاعات ساختاری موضعی برخوردار باشد. در ادامه به منظور حفظ اطلاعات رادیومتریکی، نقشه تمایز دودویی بر مبنای عملگرهای مورفو‌لوزی ایجاد می‌شود. درنهایت، به منظور افزایش واقع گرایی، تصویر تخمین زده شده با استفاده از نقشه تمایز دودویی تحت عنوان فیلتر راهنمایی 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 به طور خلاصه نشان می‌دهد.

مبتنی بر داده مرجع و حتی چارچوب‌های مرتبط با دیگر پردازش‌های سنجش‌ازدor بهره گرفته شده است. به طور خلاصه نوآوری‌های این تحقیق به صورت زیر بوده که متعاقباً در بخش‌های آتی به تفصیل 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 بر مبنای عملگرهای مورفو‌لوزی
- ۳) در نظر گیری نقشه تمایز ایجاد شده به عنوان فیلتر راهنمایی به منظور بازیابی عوارض بازسازی شده در مجموعه‌ای از روش‌های شاخص و شناخته شده تلفیق تصاویر ماهواره‌ای.

۲- روش پیشنهادی

هدف از این تحقیق، طراحی و توسعه روشی مناسب به منظور افزایش تعادل میان اعوجاجات طیفی و مکانی همگام با واقع گرایی فرآیند تلفیق تصاویر ماهواره‌ای



شکل ۱: مراحل روش پیشنهادی

(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، بدین-صورت عمل می‌کند که در ابتدا تصویر با مقیاس σ_0 نرم می‌شود. حال یک ضریب افزایش $K = \sqrt[3]{2}$ در نظر گرفته شده 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 گرفته شده برای مشتقهای پایه گوسین بوده، بدین-صورت سطح اطمینان در هر لایه برابر $(\sigma_i \times 3 \times 3)$ 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 به کارگیری فیلترهای هدایت‌پذیر عملکرد بهتری در مقایسه با تصاویر تفاضل گوسین در روش SIFT به عنوان تقریب خطی تابع انتشار در استخراج نواحی ساختاری و تمایز داشته باشد. همچنین، به منظور جلوگیری از کاهش دقیق موقعیتی، تنها به اوکتاو^۱ اول بستنده 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 فعل شده‌اند.

¹ octave

۱-۲- 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 به معنای 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 عمدی به-کارگیری چنین فیلتری، توصیف تمایز ویژگی‌های ساختاری موجود در تصویر است. با در نظر گیری چنین رویه‌ای، جزیيات 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 به منظور ایجاد ترکیب خطی موردنیاز است. بدین‌جهت از مشتقات گوسین برای ایجاد ترکیب خطی استفاده می‌شود. برای حفظ جزیيات هندسی و مرز عوارض، به مشتق اول گوسین بستنده 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))

(رابطه(۲))

در روابط فوق، x و y نیز در بازه $(-\pi/3 \times \sigma, \pi/3 \times \sigma)$ در نظر گرفته شده‌اند 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:

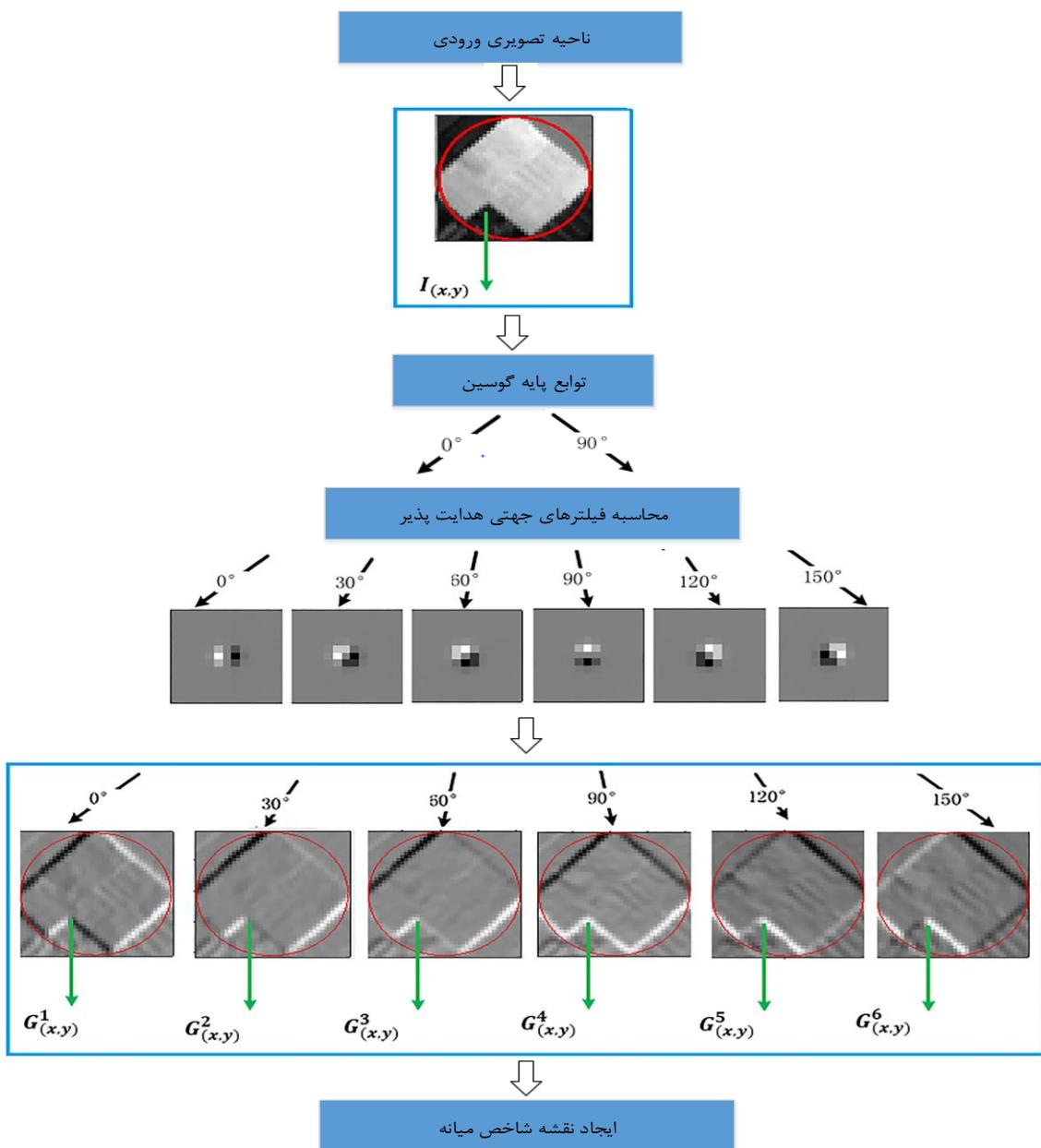
(رابطه(۳))

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

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 عملکر پیچش باشد، تصاویر فیلترشده

جهتی مطابق رابطه (۴) محاسبه می‌شوند:



شکل ۲: بازسازی عوارض ساختاری با استفاده از فیلترهای هدایت پذیر گوسی در حوزه مکان

درنهایت، مطابق روابط (۶) و (۷)، از اختلاف تصویر PAN_{LP} حاصل از PAN_D ، تصویر دربردارنده عوارض ساختاری بازسازی شده به دست می‌آید.

$$PAN_{LP} = Conv(f_{MTF}, PAN_D) \quad \text{رابطه (۶)}$$

$$\delta = PAN_D - PAN_{LP} \quad \text{رابطه (۷)}$$

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

تصویر پن شارپ شده نهایی، در عین دقت بالا، از واقع-گرایی کافی برخوردار خواهد بود. ایده اساسی در این مرحله، طراحی یک تصویر تمایز که عملکرد فیلتر راهنمای را داشته باشد، به منظور هدایت فرآیند تلفیق به صورت موضعی است.

در این تحقیق، از عملگرهای مورفولوژی، با توجه به سرعت محاسباتی بالا، برای استخراج تصویر دودویی تمایز استفاده شده است. ایده اصلی این رویکرد بر اساس تحلیل اطلاعات هندسی توسط جستجوی یک ساختار هندسی کوچک است. بدین منظور، عملگرهای فرسایش و گسترش به طور جداگانه بر روی تصویر *PAN* اعمال شده، سپس، با محاسبه گرادیان مورفولوژی از اختلاف این دو عملگر و بارزسازی لبها، تصویر تمایز ایجاد شده که با استفاده از آستانه‌گذاری اتسو^۳ 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 *M_mat* باشد، مقدار *lms* جایگزین پیکسل اصلی در می‌شود. انتظار می‌رود که شناسایی و تفکیک مناطق تمایز موضعی از مناطق با بافت ضعیف یا بدون بافت، پتانسیل مؤثری در بهبود عملکرد تلفیق داشته باشد. در بخش بعد، نتایج به دست آمده، تشریح خواهد شد.

۳- پیاده‌سازی و ارزیابی نتایج

همان‌طور که سابقاً اشاره گردید، هدف از این تحقیق، طراحی و توسعه روشی به منظور بهبود عملکرد تلفیق تصاویر چندمقیاسی ماهواره‌ای با توان تفکیک مکانی بالا است. بدین منظور، 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، به منظور افزایش تعادل میان اعوجاجات طیفی و مکانی و واقع‌گرایی فرآیند تلفیق، با استفاده از نقشه تمایز موضعی به عنوان فیلتر راهنمای، به بهبود عملکرد مجموعه‌ای از روش‌های شاخص

³ OTSU

در رابطه (۶)، f_{MTF} نشان‌دهنده عملگر پیچش و فیلتر *MTF* سنجنده هستند. *delta* نیز عوارض بازسازی شده نهایی است. حال، مطابق رابطه (۸)، عوارض بازسازی شده 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^۱، 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 تحریب شدید اطلاعات طیفی انجام گیرد. لذا، مطابق توضیحات پیشین، در وهله اول، مجموعه‌ای از روش‌های شاخص ارائه شده را در نظر گرفته شده است. سپس به منظور حفظ مؤثرتر اطلاعات طیفی، تصویر تمایز دودویی به عنوان تصویر راهنمای در نظر گرفته شده و به مناطقی که فاقد انتروپی^۲ کافی هستند (نواحی با درجه خاکستری صفر) مقدار تصویر بازسازی شده 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 داده شده، بتوان عملکرد آن‌ها را افزایش داد.

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،

¹ BICUBIC

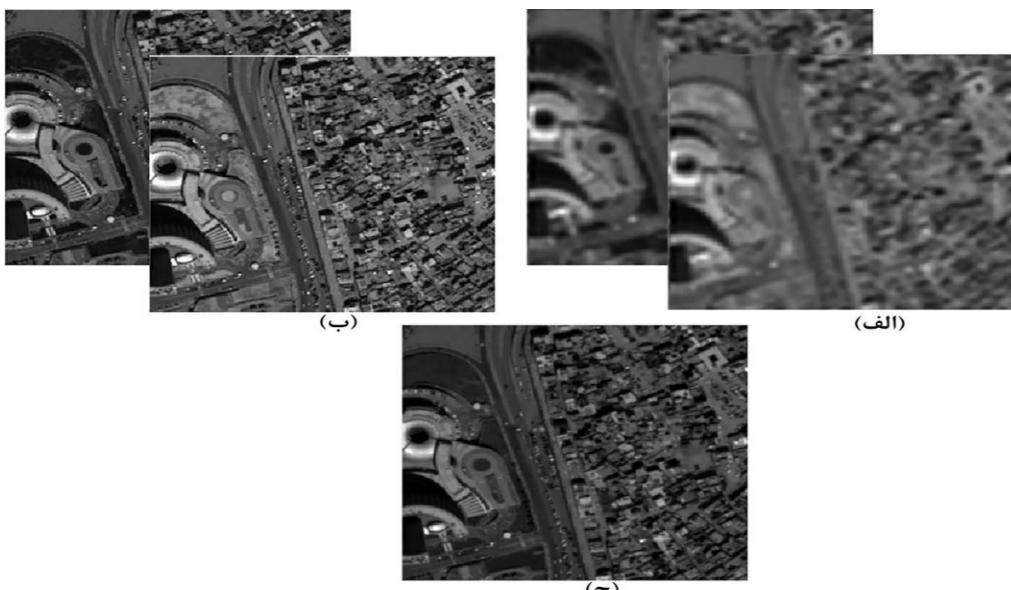
² Entropy

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 ارائه شده باشند. همچنین، این مسائل، خود، چالش اساسی برای بسیاری از روش‌های تشخیص تمایز ارائه شده 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 تحت الشعاع قرار خواهد گرفت.

و شناخته شده 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.

۱-۳- داده‌های مورداستفاده

در این تحقیق، از تصاویر چندطیفی ماهواره ولدویو^۳ استفاده شده است. تصویر *PAN* در ابعاد 256×256 و تصاویر چندطیفی در 8×8 در ابعاد 64×64 هستند. شکل (۳) نمایش بصری از داده‌های مورد استفاده را نشان می‌دهد. مشاهده می‌شود که تصویر *PAN* دربردارنده عوارض موضعی ساختاری در فرکانس‌های

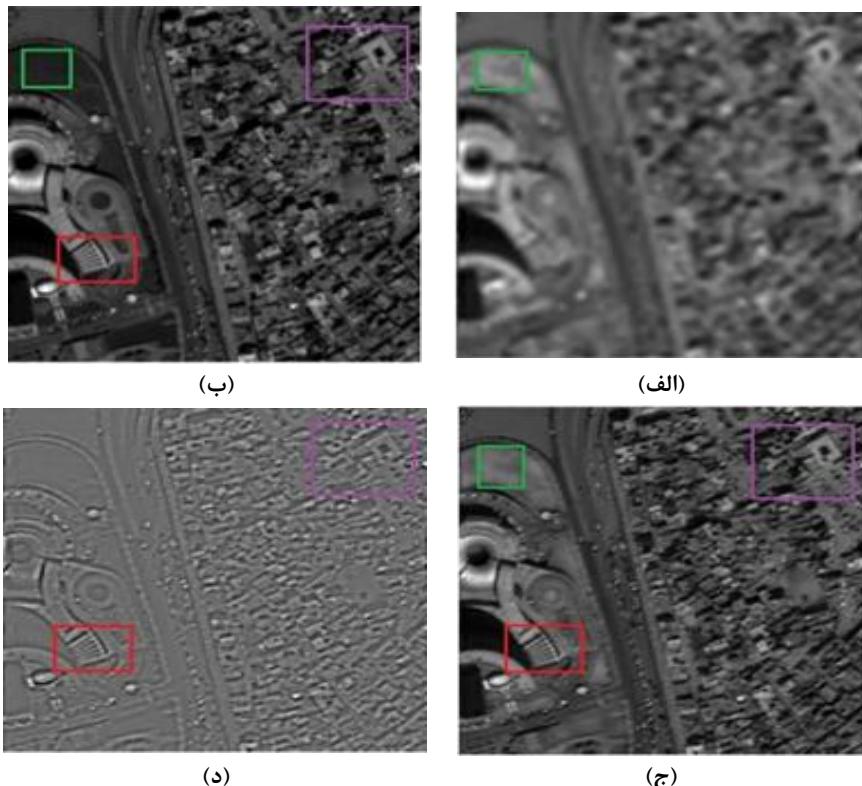


شکل ۳: نمایش بصری داده مورداستفاده. (الف): شماری از تصاویر *MS* هم اندازه با تصویر *PAN*. (ب): شماری از باندهای طیفی تصاویر مرجع مورداستفاده. (ج): تصویر *PAN*

بازسازی گردند. به منظور حفظ اطلاعات طیفی، این کار با استفاده از *MTF* سنجنده انجام می‌گیرد. شکل (۴) تصویر بازسازی شده اولیه را در قسمت (ج) و عوارض موضعی مستخرج را که همان *delta* در رابطه (۷) است، در قسمت (د) را نشان می‌دهد. همچنین، به منظور مقایسه بهتر، تصویر *MS* در (الف) و تصویر *PAN* در (ب) نشان داده شده است.

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

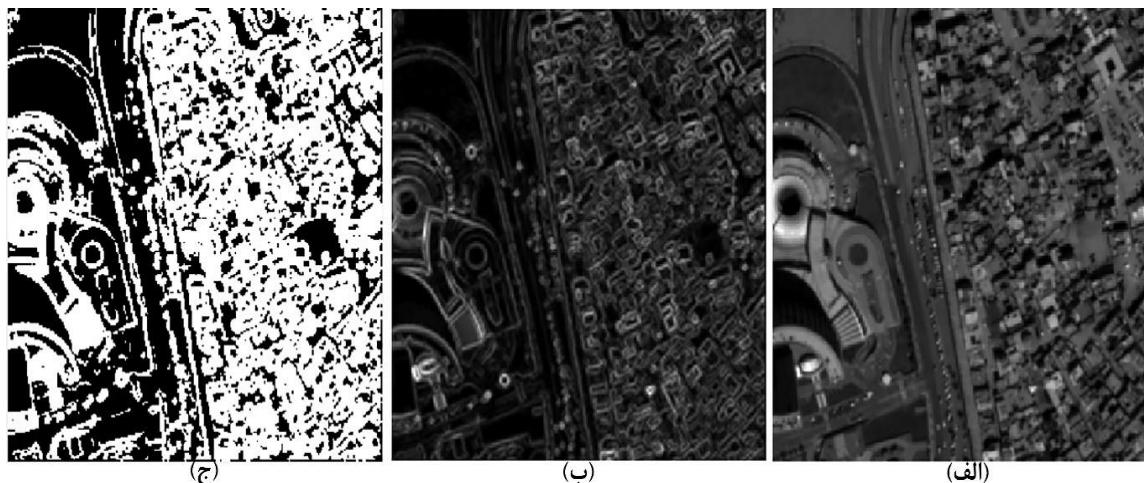
با توجه به بخش‌های سابق، در گام اول، فیلترهای هدایت‌پذیر گوسین در رویکردی چندمقیاسی با الهام از الگوریتم شاخص *SIFT* بر روی تصویر *PAN* اعمال شده تا عوارض ساختاری در مقیاس‌ها و جهات متعدد



شکل ۴: عوارض بازسازی شده با استفاده از روش پیشنهادی، (الف): تصویر MS و هماندازه با تصویر PAN، (ب): تصویر PAN، (ج): تصویر بازسازی شده MS، (د): عوارض ساختاری مستخرج (*delta*)

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 به طورکلی تعادل میان پایداری هندسی و رادیومتریکی افزایش داده شود. شکل (۵) تصویر تمایز موضعی حاصل را نشان می‌دهد. همان‌طور که مشاهده می‌شود، نواحی ساختاری متایز به‌طور مناسبی از نواحی کم انتروپی و با بافت ضعیف تفکیک شده‌اند.

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



شکل ۵: ایجاد نقشه تمایز بر مبنای عملگر مورفولوژی، (الف): تصویر اصلی *PAN*، (ب): اعمال عملگر گرادیان مورفولوژی، (ج): اعمال حد آستانه اتسو

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) و D_s 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)^(۲۹) [۲۹] مطابق آرینزو و همکاران^(۲۰۲۲) تنظیم شده‌اند [۴]. همچنین، MS و M_{mat} به ترتیب تصویر تلفیقی، تصویر اولیه MS ، تصویر MS که بعد آن گسترش داده شده و تصویر *PAN* تحریب شده هستند. N و K نیز به ترتیب 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.

درنهایت، با درنظرگیری تصویر تمایز به عنوان فیلتر راهنمای، تصویر بازسازی شده با مجموعه‌ای از روش‌های شاخص ارائه شده ادغام می‌شود. در زیربخش بعدی، نتایج کمی و کیفی به دست آمده تشریح خواهد شد.

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)^(۱) و ارزیابی ترکیبی کیفیت بدون مرجع^(HQNR)^(۲) استفاده شده است. طبق تحقیقات انجام گرفته 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

^۳ Universal Image Quality Index

^۱ Quality with No Reference

^۲ Hybrid Quality with No Reference

طیفی با استفاده از شاخص کیو ۲^[۴] [۴] مطابق رابطه (۱۲) محاسبه شده است که $M_{mat_{ll}}$ تصویر تلفیقی تخریب شده است.

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

$$D_S^{QNR} = \frac{1}{N_K} \sum_{i=1}^{N_K} \| Q(M_i, P_L) - Q(M_{mat_i}, P) \|_{norm}^1 \quad (10)$$

$$D_L^{QNR} = \frac{1}{N_K(N_K-1)} \sum_{l=1}^{N_K} \sum_{r=1, r \neq l}^{N_K} \| Q(MS_l, MS_r) - Q(M_{mat_l}, M_{mat_r}) \|_{norm}^1 \quad (11)$$

$$D_L^{HQNR} = 1 - Q2^n(M_{mat_{ll}}, M) \quad (12)$$

$$HQNR = (1 - D_l^{HQNR})^\alpha \times (1 - D_S^{HQNR})^\beta \quad (13)$$

به طور کلی تبدیل یافته که حاکی از افزایش واقع گرایی فرآیند تلفیق است. اعوجاج مکانی نیز، برای تمامی روشها تبدیل یافته است.

ارزیابی دیگری که می توان در نظر گرفت، به کارگیری معیارهای مبتنی بر داده مرجع است. از معیارهای شاخص در این زمینه، می توان به تبدیل گر زاویه طیفی (SAM)^[۳۰] اشاره کرد. با توجه به این که این معیار از دسته معیارهای ناشبهاتی بوده، هرچه از مقدار کم تری برخوردار باشد، فرآیند تلفیق از عملکرد بهتری برخوردار بوده است. جدول (۲) نتایج حاصل از ارزیابی این بخش را نشان می دهد.

¹ Spectral Angle Mapper

در رابطه (۱۱)، معیار اعوجاج برای باندهای طیفی به صورت دوبعدی عمل کرده، لذا، عبارات l و r بیانگر باندهای مجزا هستند. همان‌طور که اشاره گردید، معیارهای دیگری با الهام از QNR ارائه شده که از جمله آن‌ها می‌توان به $HQNR$ اشاره کرد. مطابق با پروتکل والد و با توجه به این که ارزیابی میزان ثبات اطلاعات مستلزم انجام فرآیند تخریب است، این معیار از فیلترهای تطبیقی MTF برای تخریب مکانی در تصاویر استفاده می‌کند. درنتیجه، میزان ثبات اطلاعات MS

رابطه (۱۰)

رابطه (۱۱)

رابطه (۱۲)

رابطه (۱۳)

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

همان‌طور که سابقاً بیان گردید، به منظور حفظ واقع گرایی تصویر بازسازی شده، بهناچار میان اعوجاجات طیفی و مکانی بایستی تعادل برقرار شود. درنتیجه، به منظور بررسی عملکرد روش پیشنهادی، در مرحله اول، مجموعه‌ای از روش‌های شاخص و شناخته شده تلفیق تصاویر ماهواره‌ای پیاده می‌شود. در ادامه، نقشه تمایز حاصل به عنوان فیلتر راهنمای در نظر گرفته شده و در مناطقی که برابر صفر است، مقدار تصویر تخمین زده شده به کمک فیلترهای هدایت پذیر گوسین به تصویر نهایی اختصاص می‌یابد. در خصوص ارزیابی بخش‌های مختلف طراحی شده در روش پیشنهادی، از الگوریتم‌های متعدد و شناخته شده‌ای 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

جدول ۱: ارزیابی عملکرد روش پیشنهادی با استفاده از بروتکل‌های مبتنی QNR

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

جدول ۲: ارزیابی عملکرد روش پیشنهادی با استفاده از معیار مرجع مبنا

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

[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.

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



(الف)



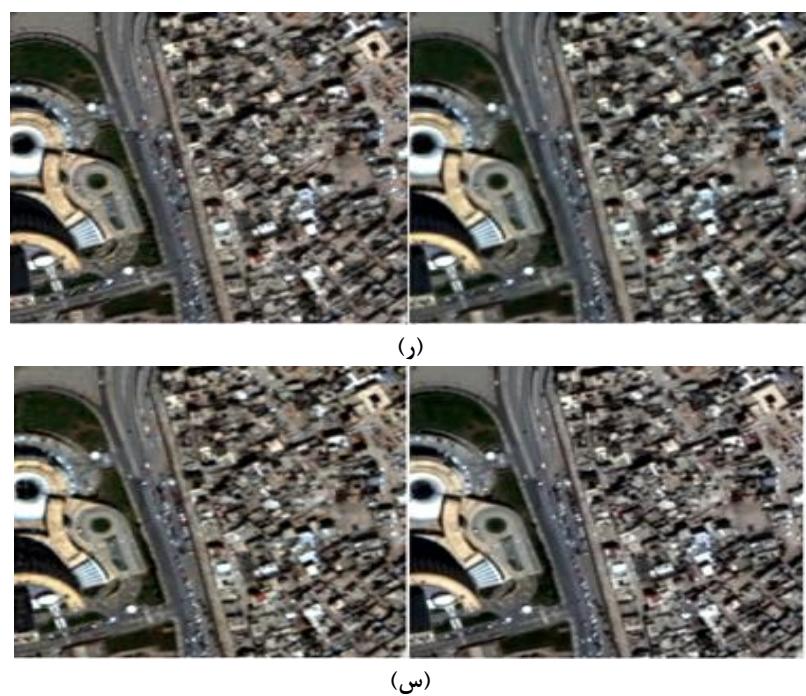
(ب)

شکل ۶: نمایش بصری تصاویر تلفیقی برای الگوریتم‌های (الف) و (ب).

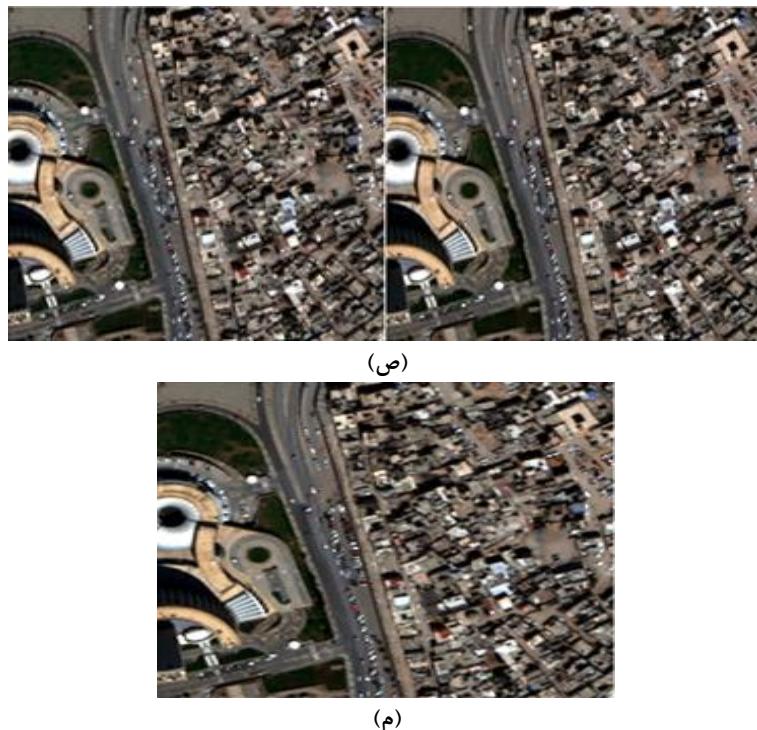
سمت چپ نتایج حاصل از رویکرد پیشنهادی و سمت راست نتایج حاصل از الگوریتم‌های اصلی را نشان می‌دهد.



شکل ۷: 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.



شکل ۸: 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.



شکل ۹: نمایش بصری تصاویر تلفیقی برای الگوریتم (ص)، (م) تصویر مرجع را نشان می‌دهد.

طیفی Dl_HQ متناظر با آن کاهش یافته است. با توجه به نمایش بصری تصاویر، برخلاف روش قبلی، روش R_BDSD به لحاظ حفظ اطلاعات طیفی، به نوعی 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. به علاوه، نتایج به دست آمده حاکی از تعدیل اعوجاجات مکانی و درنتیجه افزایش واقع‌گرایی تلفیق است. این روش‌ها که متعلق به دسته CS هستند، تماماً به لحاظ معیار مرجع مبنا SAM نیز بهبود یافته‌اند.

الگوریتم تابع تبدیل مدولاسیون مبتنی بر هرم تعمیم-یافته لایپلاس، مدولاسیون فرکانس بالا و تصحیح ابهام MRA ⁴ که در چارچوب $(MTF-GLP-HPM-HC)$ ⁴

روش تبدیل براوی مبتنی بر تصحیح ابهام (BT_HC) ¹ نسخه توسعه‌یافته‌ای از تبدیل براوی² بوده که با تصحیح ابهام³ به دنبال بهبود مدولاسیون مکانی طیف پیکسل است [۳۱]. به کارگیری رویکرد پیشنهادی در روش BT_HC کاهش اعوجاجات طیفی و مکانی قابل توجهی را به دنبال داشته است. بهبود فرآیند تلفیق به طور بصری نیز بهوضوح قابل شهود است. بهویژه آن‌که الگوریتم اصلی دچار فرو برآش طیفی شده است. همان‌طور که اشاره گردید، $BDSD$ یکی از شناخته‌شده‌ترین روش‌های تلفیق در سطح پیکسل بوده که به دنبال کمینه‌سازی مربعات خطاهای 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

¹ Brovey Transform Haze Correction² Brovey³ Haze correction⁴ MTF-Generalized Laplacian Pyramid via High Pass Modulation and Haze Correction

به طور کلی، عملکرد تمامی روش‌ها، به طور کلی، به ویژه از منظر معیارهای QNR و $HQNR$ و همچنین ارزیابی بصری بهبود یافته است. تعديل اعوجاجات مکانی در وهله اول، حاکی از قابلیت بالای فیلترهای هدایت‌پذیر گویند در بازسازی عوارض در فرکانس‌های متنوع است. فیلترهای جهتی طراحی شده به کمک تابع گوسین، اقدام به توصیف اطلاعات ساختاری نرم شده در جهات متعدد نموده بدون آن که لبه‌ها و جزئیات هندسی تحت الشعاع قرار گیرند. همچنین، مشاهده گردید که در بعضی روش‌ها، شباهت طیفی به مراتب به تصویر مرجع نزدیک شده و در بعضی روش‌ها، علی‌رغم افزایش جزئی در اعوجاج طیفی، همچنان پروتکل‌های در نظر گرفته شده بهبود یافته که حاکی از بهبود واقع-گرایی عملکرد تلفیق است. این مسئله نیز حاکی از قابلیت بالای نقشه تمایز در نظر گرفته شده است.

۵-۳- ارزیابی ثانویه رویکرد پیشنهادی به منظور بازسازی محتوای ساختاری

از منظری دیگر، الگوریتم‌های تناظریابی تصویری، با توجه به ماهیت مکانی که دارند، یکی از بهترین رویکردها به منظور ارزیابی میزان اطلاعات ساختاری بازسازی شده هستند. لذا در این تحقیق، از روش تلفیقی هسین^۴ بر مبنای روش شایستگی یکنواخت $SIFT$ در ادغام با توصیفگر $SIFT$ به-^۵(*UC-Hessian*) 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-علوه هیستوگرام وزنی جهتی، از تمایز و پایداری کافی در برابر بسیاری از اعوجاجات هندسی و رادیومتریکی برخوردار نیست. با این اوصاف، با توجه به جدول(۳)، در می‌یابیم که تعداد بالای عوارض متناظر صحیح با صحت و تمایز بالا میان تصاویر *PAN* و تصویر تخمین

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 *MRA* مورفولوژیکی (*MF*)^۱ 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 به لحاظ بیشتر پارامترها و همچنین به لحاظ بصری نیز بهبود یافته است. الگوریتم تلفیقی مدل‌بنا براساس تبدیل موجک و تحلیل مؤلفه اصلی (*PWMBF*)^۲ 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*)^۳ 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 به دست آمده، مشاهده می‌شود که استراتژی چندمقیاسی به طوری مؤثری قادر به بازسازی اطلاعات مکانی بوده است. همچنین، به کارگیری فیلتر *MTF* سنجنده متناظر با هر باند به جای هسته ثابت مانع از کاهش تمایز طیفی گردیده است. این روش، خود از عملکرد بالاتری در مقایسه با روش‌های قبلی به-دبیل داشته است. با این حال، رویکرد پیشنهادی قادر به حصول بهبود بوده است.

¹ Morphological Functions

² PCA and Wavelet Model-Based Fusion

³ Laplacian Pyramid Pansharpening Network

⁴ Hessian

⁵ Brovey Transform Haze Correction

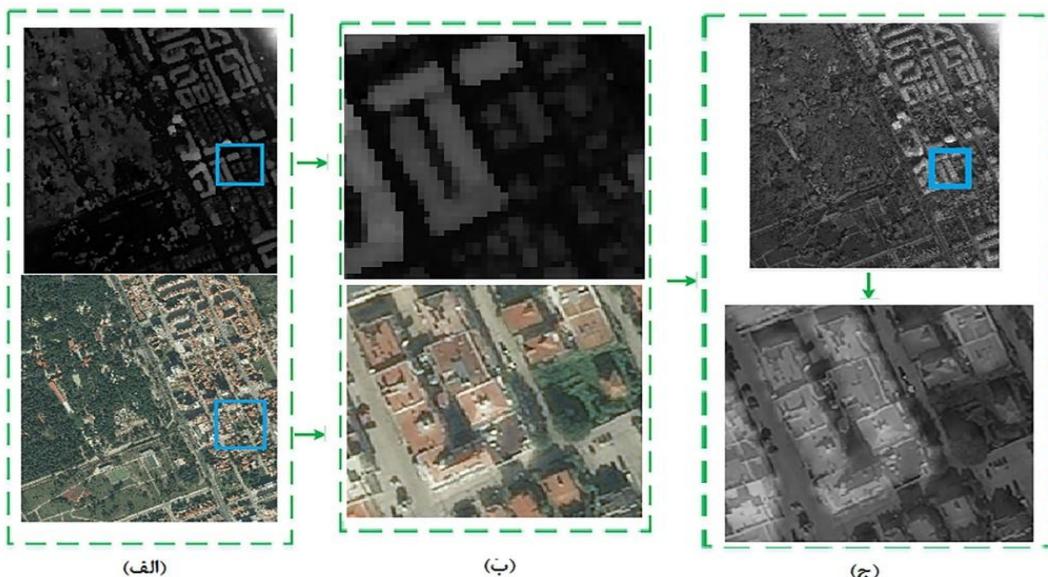
داده‌های چندمنبعی (تصویر و مدل رقومی سطح) که از اختلافات غیرخطی رادیومتریکی برخوردار هستند، اعمال شده است. همان‌طور که از شکل (۱۰) می‌توان دریافت، حتی ساختارهای موضعی کوچک نیز به خوبی بازسازی شده‌اند.

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

جدول ۳: ارزیابی عملکرد روش پیشنهادی به‌منظور بازسازی عوارض ساختاری با استفاده از فرآیند تناول‌یابی عوارض موضعی ساختاری

تصویر <i>Pan</i> و تصویر <i>PAN</i> تخمین اولیه	تصویر <i>Pan</i> و تصویر <i>MS</i>	معیار
۸۲/۵	۵۷/۲۲	بازخوانی
۱۴۵۳	۴۲۴	تعداد متناظر صحیح



شکل ۱۰: اعمال روش پیشنهادی بازسازی عوارض به تصاویر چندمنبعی، (الف): از بالا به پایین مدل رقومی سطح و تصویر اولیه
(ب): نمایش نواحی داخل مستطیل آبی، (ج): مدل رقومی سطح بارز شده

همان‌طور که در بخش‌های قبلی و همچنین، با استفاده از نتایج کمی و بصری، مقصلاً بیان گردید، این روش‌ها با چالش‌های اساسی همراه بوده که حاکی از عدم درنظرگیری موثر و همزمان محتوای رادیومتریکی و هندسی داده‌های ماهواره‌ای است. به علاوه، فرض برخی از روش‌ها اینست که تصویر کاوش ابعاد داده‌شده *PAN*

۴- بحث و چشم‌اندازهای آینده

همان‌طور که مشاهده گردید، الگوریتم‌های متعددی مبتنی بر چارچوب‌های متنوع ریاضیاتی به‌منظور پن‌شارپ‌کردن تصاویر ماهواره‌ای ارائه شده است. در سال‌های اخیر نیز، محققین بسیاری از دیدگاه رویکردهای یادگیری مبنا به این مساله پرداخته‌اند. با این حال،

متعدد هستند، استخراج و بازسازی آن‌ها به‌منظور حصول محصولات قابل‌اعتماد از اهمیت بسزایی برخوردار است. بدین‌منظور در مرحله اول، در رویکردن چندمقیاسی، عوارض ساختاری موضعی با استفاده از روشی نوین مبنی بر ادغام *MTF* سنجنده و فیلترهای *SIFT* هدایت‌پذیر گویند با الهام از الگوریتم شاخص *LPPN* بازسازی می‌شوند. در مرحله دوم، به‌منظور حفظ اطلاعات طیفی و حفظ واقع‌گرایی، نقشه تمایز دودویی برمبانای گرادیان مورفولوژی ایجاد شده که به عنوان فیلتر راهنمای برای هدایت فرآیند تلفیق به کار می‌رود؛ بدین‌صورت که رویکرد پیشنهادی با استفاده از تصویر تمایز با مجموعه‌ای از روش‌های ارائه شده 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 استفاده شده که شامل معیار مرجع مبنا *SAM* و پروتکل‌های *QNR* و *HQNR* بودند. این پروتکل‌ها به تصویر مرجع نیاز نداشتند و از جمله 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 مت Shank از چندین زیرشبکه به‌طور مؤثری به بازسازی اطلاعات ساختاری در فرکانس‌های *MTF* متعدد انجامیده است. همچنین به کارگیری فیلتر سنجنده به‌جای هسته ثابت، حفظ اطلاعات طیفی را به‌دبیل 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 ۹۳۱٪ به ۹۴۳٪ و میانگین معیار

با تصویر اخذشده در باندهای طیفی دیگر، از محتوای هندسی مشابهی برخوردارند. مجموعه این عوامل باعث کاهش واقع‌گرایی روش، علی‌رغم حصول نتیجه کمی قابل قبول توسط برخی معیارهای ارزیابی باشد. لذا، این تحقیق، با ارائه رویکردن به‌منظور بازسازی موثر محتوای ساختاری ضمن حفظ تمایز طیفی میان باندهای مختلف، به بهبود روش‌های پیشین پرداخت. این امر، به‌طور اخص، برای رویکردهای یادگیری مبنا 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 پیش رو 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 بازسازی شده را به عنوان تخمین اولیه به شبکه‌های یادگیری عمیق معرفی کرده و مجدداً به فرآیند آموزش پرداخت. مساله دیگر به کارگیری معیار ارزیابی موثر بوده که از هم‌خوانی بالای 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، به کار گرفته و ارزیابی جانبی دیگری فراهم آورد.

۵- نتیجه‌گیری

هدف از این تحقیق، ارائه رویکردن نوین دومرحله‌ای به‌منظور بهبود عملکرد تلفیق تصاویر ماهواره‌ای با توان تفکیک مکانی بالا است. با توجه به اینکه تصاویر ماهواره‌ای در بردارنده عوارض موضعی در فرکانس‌های

ارزیابی قرار گرفت. در گام اول، از روش *UC-Hessian-SIFT* استفاده شده که یک روش تناظریابی عارضه‌منبا است. بدین صورت که یک بار تصاویر چندطیفی اصلی با تصویر *PAN* و بار دیگر، تصویر بازسازی شده 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 اعمال شده که مقایسه آن با تصویر نوری متناظر حاکی از بازسازی مدل رقومی است.

- [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. Arienzzo, 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-

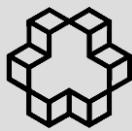
ارزیابی ترکیبی بدون مرجع (*HQNR*) از ۰۹۲۰ به ۰۹۳۰ افزایش یافته است. همچنین میانگین اعوجاجات طیفی و مکانی نیز، به ترتیب از ۰۰۵۰ به ۰۰۴ و از ۰۰۴۸۳ به ۰۰۵۷۶ کاهش یافته است. میانگین معیار زاویه طیفی (*SAM*) نیز از ۳۵۰۲۲ به ۳۲۶۸ کاهش یافته است که در مجموع، حاکی از هستند. حائز ذکر است که قابلیت اطمینان و کیفیت عوارض بازسازی شده با استفاده از فیلترهای هدایت پذیر گوسین و نقشه شاخص میانه از دو منظر دیگر مورد

مراجع

- 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

- 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 pansharpening," 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 pansharpening," 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. Lowe, "Distinctive image features*

- 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.



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

Negar Jovhari¹, Reza Shah-Hosseini^{2*}, Mahdi Hasanlou³, Amin Sedaghat⁴, Nazila Mohammadi⁴, and Siamand Avestan⁵

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- Artificial Intelligent & 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: rshahhosseini@ut.ac.ir