نشریه علمی مهندسی فناوری اطلاعات مکانی

سال سیزدهم، شماره چهارم، زمستان ۱۴۰۴

Vol.13, No.4, Winter 2026

۸۱- ۶۵

مقاله پژوهشی

ارزیابی عملکرد روش‌های ادغام تصاویر مادون قرمز حرارتی و مرئی در تصاویر پهپاد براساس چارچوب *VIFB*

علی عبداللهی[۱]، رضا شاه حسینی[۲*]

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

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

تاریخ دریافت مقاله: ۱۴۰۳/۰۶/۳۰ تاریخ پذیرش مقاله: ۱۴۰۵/۰۳/۲۵

چکیده

در حوزه علوم مرتبط با سنجش از دور، ادغام تصاویر مرئی و حرارتی فرآیندی است که در آن اطلاعات طیفی حاصل از تصویر حرارتی و اطلاعات جزئیات مکانی بافت از تصاویر مرئی با هم دیگر ترکیب شده و یک تصویر با ماهیت حرارتی، با جزئیات بالاتر و قدرت تفکیک مکانی بهبود داده شده ارائه می‌شود. آنچه حائز اهمیت است این است که هرچه سطح جزئیات مکانی مورد نیاز افزایش یابد یا بازه زمانی مورد نیاز بین دوره‌های پایش کاهش یابد و یا نیاز به نتایج در لحظه *(real time)* افزایش یابد، تصاویر ماهواره‌های سنجش از دوری از درجه کارایی خارج اند و یکی از جایگزین‌های مناسب برای آن استفاده از تصاویر مبتنی بر فتوگرامتری پهپاد مبنا است. هدف از انجام این پژوهش مقایسه نتایج حاصل از تعدادی از روش‌های توسعه داده شده متناسب با وجود بسترهای پیاده سازی روش‌ها در ادغام تصاویر حرارتی و مرئی بر اساس شاخص‌های موجود و با تمرکز بر داده‌های حاصل از تصویربرداری هوایی پهپاد است. در این تحقیق از یک مجموعه داده خام تصاویر مرئی و حرارتی، شامل ۳۰ تصویر مرئی اخذ شده با دوربین *Zenmuse X3* و ۸۰ تصویر حرارتی اخذ شده با دوربین *Zenmuse XT* نصب شده به روی پهپاد *Matrice۱۰۰* از یک صحنه مسطح در منطقه‌ای به وسعت ۱٫۵۴ هکتار در دانشگاه دل واله کلمبیا استفاده شده است. فرآیند ادغام مبتنی بر ۱۲ الگوریتم مختلف و در قالب چارچوب *VIFB* انجام شده است. سپس خروجی هر روش با ۱۳ معیار استاندارد ارزیابی کیفیت ادغام بررسی شده است. در نهایت با استانداردسازی نسبی شاخص‌ها فرآیند امتیاز دهی به هر الگوریتم انجام شده است. سه الگوریتم *Hybrid-MSD*، *CBF* و *HMSD-GF* از میان روش‌های مورد آزمون، به صورت نسبی به ترتیب ۸۲٫۳ ، ۸۰٫۳ و ۷۹٫۵ درصد در حل مسئله ادغام تصاویر مرئی و حرارتی پهپاد موفق بوده اند. همچنین پس از انجام فرآیند ادغام تصاویر، خروجی‌ها توسط یک مدل رگرسیون خطی آموزش داده می‌شود و تصویر ادغام حاوی درجات خاکستری به تصویر دمای درخشندگی تبدیل شده‌اند.

کلیدواژه‌ها : ادغام تصاویر هوایی، تلفیق تصاویر، تصویر مرئی، تصویر حرارتی، فتوگرامتری پهپاد، سنجش از دور.

* نویسنده مکاتبه‌کننده: گروه فتوگرامتری و سنجش از دور، دانشکده مهندسی نقشه برداری و اطلاعات مکانی، دانشکدگان فنی، دانشگاه تهران، تهران، ایران.

تلفن: ۰۲۱۶۱۱۱۴۵۲۷

Email: rshahosseini@ut.ac.ir

[Downloaded from jgit.kntu.ac.ir on 2026-11-23]

۱- مقدمه

امروزه تصویربرداری در محدوده طیف الکترومغناطیس جهت استفاده در کاربردهای مختلف مانند تشخیص شی، تشخیص الگو، استخراج ویژگی، طبقه بندی تصویر، تفسیر تصویر و امثال آن در حوزه علوم مرتبط با فتوگرامتری، سنجش از دور و بینایی کامپیوتر یکی از مباحث مورد توجه است. با این وجود، ارائه حجم کاملی از اطلاعات از یک صحنه به دلیل محدودیت‌های ذاتی و فناوی سخت افزارهای مرتبط با علم اپتیک و طیف الکترومغناطیسی تنها به کمک یک سنجنده امکانپذیر نیست. برای مثال در کاربردی متناسب با این پژوهش، یک عکس سه باندی رنگی (قرمز، سبز، آبی) می‌تواند اطلاعات مربوط به رنگ و ویژگی‌های بافت را برای درک بصری ارائه دهد. اما در این تصویر هر ویژگی غیر مرتبط با طیف مرئی از پس زمینه آن قابل تشخیص نیست[۱]. برعکس، تصویر مادون قرمز حرارتی می‌تواند هدف را با مقایسه پاسخ دمایی نواحی با پس زمینه شناسایی کند اما مسئله اصلی این دسته از تصاویر به علت پایین تر بودن سطح انرژی گرمایی تابیده شده از سطح زمین و فناوری ساخت سنجنده معمولا قدرت تفکیک مکانی پایین تری به نسبت تصاویر مرئی دارند و حاوی اطلاعات بافتی ضعیف هستند. لذا هدف از ادغام تصاویر مرئی و حرارتی تولید تصویری با ماهیت طیفی حرارتی و با قدرت تفکیک مکانی و جزئیات تقویت شده به کمک تصویر مرئی است [۱].

همچنین یکی دیگر از مسائل مهم در این نوع ادغام که مرتبط با ذات داده‌های مورد استفاده است، عدم تطبیق محدوده طیفی تصاویر مرئی و تصاویر حرارتی است که بنابر الگوریتم مورد استفاده باعث بروز مشکلات طیفی در تصویر ادغام شده خواهد شد. تعداد بسیاری از کارهای انجام گرفته در زمینه ادغام تصاویر مرئی و حرارتی بر مبنای تصاویر ماهواره ای انجام شده است و کمتر از تصاویر با قدرت تفکیک مکانی بالا مانند تصاویر فتوگرامتری پهپاد استفاده شده است. بدیهی است که سطح جزئیات در این تصاویر به نسبت تصاویر ماهواره‌ای بالاتر است [۲ و ۳].

در این پژوهش، هدف اصلی ارزیابی قابلیت‌ها و شناسایی نقاط ضعف و قوت روش‌های موجود ادغام تصاویر مرئی و حرارتی بر مبنای شاخص‌های استاندارد، جهت ارزیابی کمی و کیفی تصویر ادغام شده خروجی است. همچنین، راهکار حل مسئله تعدادی از روش‌های شاخص ارائه شده در این حوزه بررسی خواهد شد.

در ادامه این این پژوهش در قسمت بعد یعنی پیشینه تحقیق روش‌های ادغام تصاویر مرئی و حرارتی در یک دیدگاه کلی تقسیم بندی و ویژگی‌های کلی هر کدام ارائه خواهد شد. در فصل بعد از آن یعنی روش‌های ادغام تصاویر مرئی و حرارتی توضیحاتی در رابطه با چارچوب و معیار مقایسه انجام شده، داده‌های مورد استفاده و روش‌های مورد استفاده آن پرداخته خواهد شد. سپس در فصل آخر آماره‌های ارزیابی تصاویر تعریف شده و نتایج و رتبه بندی روش‌ها در مورد کاربرد مد نظر ارائه خواهد شد. سپس در قسمت نتیجه‌گیری مزایا و معایب روش‌ها مورد ارزیابی قرار خواهند گرفت و پیشنهاداتی در رابطه با مسائل آینده پژوهش در این موضوع ارائه خواهد شد.

۲- پیشینه تحقیق

سیر تحول روش‌های سنتی تلفیق تصاویر مرئی و حرارتی از دهه ۱۹۸۰ تا اواسط دهه ۲۰۱۰ را می‌توان به چند مرحله کلیدی تقسیم کرد. در دهه ۱۹۸۰ و اوایل ۱۹۹۰، روش‌های ساده‌ای مانند میانگین‌گیری حسابی و ترکیب وزن‌دار خطی رایج بودند که با وجود سرعت بالا، نتایجی با کنتراست پایین و از دست رفتن جزئیات تولید می‌کردند. در اواسط دهه ۱۹۹۰، روش‌های هرمی مانند هرم لاپلاسین معرفی شدند که با تجزیه تصاویر به سطوح مختلف، امکان تلفیق هوشمندانه‌تر را فراهم کردند. در اواخر دهه ۱۹۹۰ و اوایل ۲۰۰۰، تبدیل موجک به‌عنوان یک روش پیشرفته‌تر مطرح شد که با تحلیل چندمقیاسی، بهبود قابل‌توجهی در حفظ جزئیات و کاهش آثار نامطلوب ایجاد کرد. در دهه ۲۰۰۰، روش‌های تبدیل پیشرفته

[Downloaded from jgit.kntu.ac.ir on 2026-11-23]

مانند کانتورلت، برای پردازش بهتر لبه‌ها و ویژگی‌های هندسی تصاویر معرفی شدند. همزمان، روش‌های مبتنی بر تجزیه به مؤلفه‌های اصلی و منطق فازی نیز برای افزایش انعطاف‌پذیری در تلفیق تصاویر مورد استفاده قرار گرفتند. با ظهور یادگیری عمیق در دهه ۲۰۱۰، روش‌های سنتی به‌تدریج جای خود را به شبکه‌های عصبی دادند، اما هنوز در برخی کاربردهای خاص به‌دلیل سادگی و سرعت، مورد استفاده قرار می‌گیرند. با عنایت به موارد مذکور، الگوریتم‌های ادغام تصاویر را از دید روش حل مسئله، می‌توان به شش دسته زیر تقسیم کرد. تبدیل چند مقیاسی[1] *[۴]*، تخمین تنک[2] *[۵]*، شبکه عصبی و یادگیری عمیق ، زیرفضا[3] *[۷]*، و روش‌های مبتنی بر *saliency [۸]*، روش‌های مبتنی بر فضای فرکانس و روش‌های ترکیبی و متفرقه *[۹]*. روش‌های مبتنی بر تبدیل چند مقیاسی تصاویر که به نسبت سایر روش‌ها دارای فراوانی بیشتری هستند، منبع را در سطوح مختلف تجزیه می‌کنند، لایه‌های متناظر را بر اساس قوانین ادغام ترکیب می‌کنند و تصاویر هدف را بر اساس آن بازسازی می‌کنند. روش‌های مبتنی بر تبدیل موجک و مبتنی بر هرم تصویر را می‌توان از پر تکرار ترین روش‌های این دسته دانست. هدف روش‌های ادغام تصویر مبتنی بر تخمین تنک ارائه تصویر در قالب بردارهای پایه پراکنده خطی بر اساس دیکشنری حاصل از قسمت‌های متناظر یافت شده در تصاویر رزولوشن بالا *(HR)* [4] و رزولوشن پایین *(LR)* [5] است.

در نتیجه ساخت دیکشنری‌های کامل و غنی که نمایش خوبی از ارتباط داده‌ها را داشته باشند، از مسائل اصلی این دسته از روش‌ها است. مطابق شکل(۱) روش‌های مبتنی بر شبکه‌های عصبی و یادگیری عمیق نیز از مورد توجه ترین روش‌ها در سالیان اخیر بوده اند. این روش‌ها از رفتار ادراک مغز انسان برای مقابله با اطلاعات عصبی تقلید می‌کنند.

برای مدل سازی مسئله ادغام تصاویر به کمک یادگیری عمیق از مشتقات شبکه‌هایی بر مبنای *CAE*، *Res Net*، *GAN*، *CNN* و غیره استفاده شده است *[۶]*. روش‌های مبتنی بر زیرفضا، هر کدام با هدفی داده تصویری را از فضای اصلی به فضای ثانویه انتقال می‌دهند که در این فضا معمولا هم حجم پردازش‌ها کاهش پیدا می‌کند و هم اطلاعات با ارزش‌تری از داده استخراج و در فرآیند ادغام استفاده می‌شود. تجزیه و تحلیل مؤلفه‌های اصلی (*PCA*) [6]، فاکتورسازی ماتریس غیر منفی *(NMF)* [7] و تجزیه و تحلیل مؤلفه‌های مستقل *(ICA)* [8] را می‌توان از نمونه روش‌های پر استفاده در این دسته بر شمرد. روش‌های مبتنی بر *Saliency* نیز بر این اصل استوار است که توجه بصری انسان اغلب توسط اشیا یا پیکسل‌هایی جلب می‌شود که مهم‌تر از همسایگان خود هستند. علاوه بر این، این روش‌ها می‌توانند یکپارچگی مناطق شی برجسته[9] را نیز حفظ کرده و کیفیت بصری تصویر ادغام شده را بخصوص در مورد فرکانس‌های بالای تصویر بهبود بخشند. هر کدام از روش‌های ادغام تصویر حرارتی و مرئی فوق مزایا و معایب خود را دارند لذا، در روش‌های ترکیبی با هدف افزایش کارایی و تکمیل متقابل نقاط ضعف روش‌های گوناگون تعدادی از روش‌های فوق طی فرآیند ادغام استفاده می‌شوند.

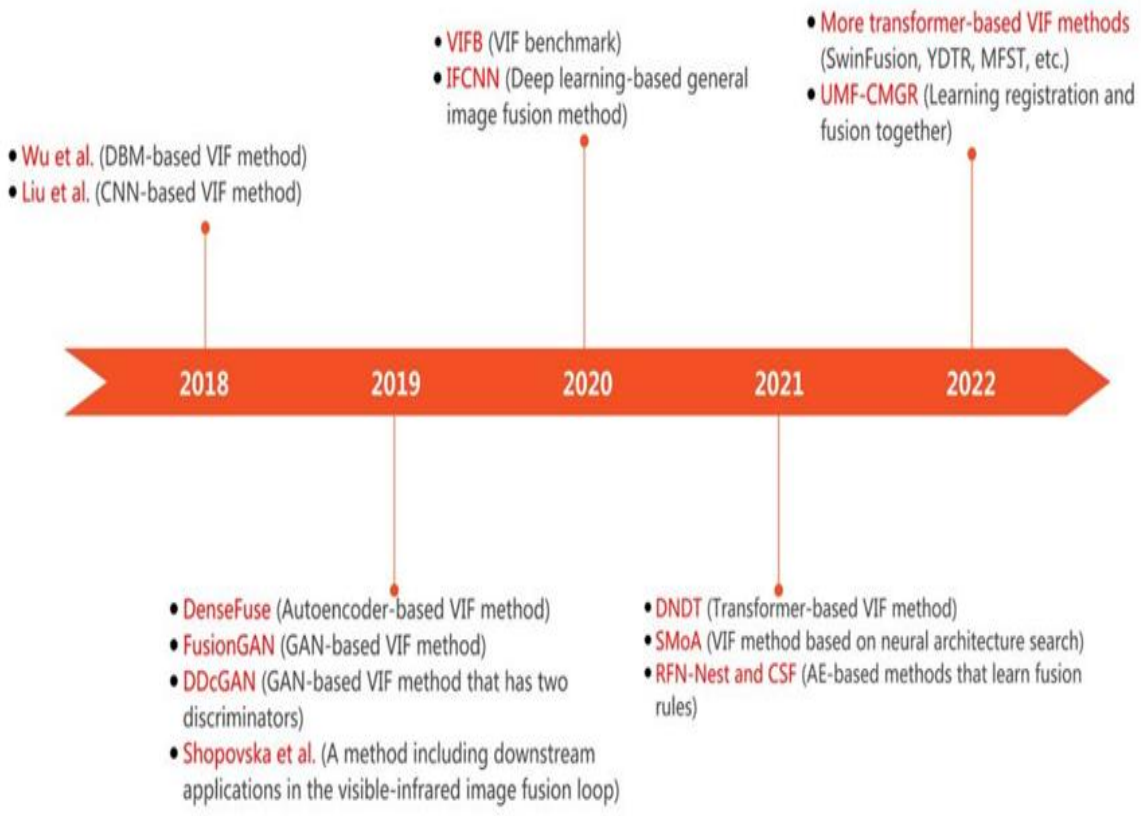
از این به بعد در فرآیند ادغام تصاویر، از تصویر مرئی با رزولوشن بالاتر به عنوان تصویر *HR* و تصویر حرارتی با

[1] *Multi-scale transform*
[2] *Sparse representation*
[3] *Subspace*
[4] *High resolution*
[5] *Low resolution*

[6] *Principal component analysis*
[7] *Non-negative matrix factorization*
[8] *Independent component analysis*
[8] *Sharp*
[9] *Sharp*

[Downloaded from jgit.kntu.ac.ir on 2026-11-23]

رزولوشن پایین به عنوان *LR* بیان خواهد شد. مطابق ذات روش‌های ادغام تصاویر، فارغ از روش مورد استفاده ایده آل در فرآیند ادغام تصاویر مرئی و حرارتی استخراج جزئیات، بافت مکانی و عوارض با فرکانس بالا از تصویر *HR* و افزودن آن به تصویر *LR* و همچنین حفظ اطلاعات طیفی تصویر *LR* است. لذا در یک دیدگاه کلی تصویری را می‌توان خروجی مناسبی برای یک الگوریتم ادغام تصاویر دانست که در دیدگاه کمی جزئیات مکانی تصویر *HR* و اطلاعات طیفی تصویر *LR* را داشته باشد و در دیدگاه کیفی نیز تفسیرپذیری بصری مناسبی داشته باشد.



شکل۱: سیر توسعه روش‌های مبتنی بر یادگیری عمیق در مسئله ادغام تصاویر مرئی و حرارتی (اقتباسی از *[۶]*)

در این تحقیق الگوریتم‌های *CBF* [۱]، *MSVD* [۱۳]، *ADF* [۱۴]، *GFCE* [۱۵]، *GF* [۱۵]، *HMSD* [۱۶]، *Hybrid MSD* [۱۷]، *TIF* [۱۸]، *GTF* [۱۸]، *FPDE* [۱۹]، *IFEVIP* [۲۰]، *CNN* [۲۱] و *VSM WLS* [۲۲] مورد ارزیابی قرار خواهند گرفت. در انتخاب این الگوریتم‌ها سعی بر آن بوده که طیف متنوعی از الگوریتم‌های ادغام تصاویر مرئی و حرارتی پوشش داده شوند و بستر پیاده سازی آن‌ها از سوی ارائه دهندگان فراهم باشد.

شایان ذکر است که بطور کلی روش‌های مبتنی بر تبدیل چند مقیاسی بخش بیشتری از تحقیقات در این حوزه را شامل می‌شوند و در در سالیان اخیر (۲۰۱۸ به بعد) الگوریتم‌های مبتنی یادگیری عمیق به شدت در حال توسعه اند. با وجود توسعه گسترده روش‌های ادغام تصاویر مرئی و مادون قرمز حرارتی، بخش عمده‌ای از پژوهش‌های انجام‌شده بر داده‌هایی با ماهیت زمینی یا نظارتی متمرکز بوده‌اند و مطالعاتی که به‌طور مشخص

[Downloaded from jgit.kntu.ac.ir on 2026-11-23]

به ادغام تصاویر مرئی و حرارتی پهپاد مبنا پرداخته باشند، محدودتر هستند.

ایلماز و همکاران (۲۰۱۶) نشان دادند که افزایش تفکیک مکانی تصاویر پهپادی می‌تواند رفتار الگوریتم‌ها و مدل‌های ادغام را نسبت به داده‌های ماهواره‌ای به‌طور معناداری تغییر دهد [۲] . همچنین یو و همکاران (۲۰۲۲) و لیو و همکاران (۲۰۲۳) نیز با تمرکز بر کاربردهای کشاورزی و پایش آتش‌سوزی، کارایی ادغام تصاویر مرئی و حرارتی پهپادی را تأیید کرده‌اند [۳ و ۱۰] لازم به ذکر است در این تحقیقات ارزیابی عمدتاً به یک یا چند روش خاص محدود بوده است. مورنو و همکاران (۲۰۲۲) با ارائه یک مجموعه‌داده مرئی و حرارتی پهپاد مبنا، بستر مناسبی برای پژوهش‌های ادغام تصویر فراهم کرده‌اند [۱۱]، اما بررسی‌های مقایسه‌ای جامع مبتنی بر چارچوب‌های استاندارد ارزیابی کمتر مورد توجه قرار گرفته است. بنابراین، با وجود پیشرفت‌های انجام‌شده، همچنان خلأ پژوهشی در ارزیابی منصفانه و سیستماتیک روش‌های ادغام تصاویر مرئی و حرارتی بر روی داده‌های فتوگرامتری پهپاد مبنا وجود دارد. پژوهش حاضر با فراهم‌سازی یک بستر ارزیابی یکپارچه و استاندارد، امکان مقایسه منصفانه عملکرد روش‌های پیشین ادغام تصاویر مرئی و حرارتی را فراهم می‌کند تا پژوهشگران با تحلیل نقاط قوت و ضعف هر روش بر اساس معیارهای ارزیابی متنوع، مسیر توسعه الگوریتم‌های جدید را هدفمندتر دنبال کنند.

۳- تلفیق تصاویر مرئی و حرارتی پهپاد مبنا

در این بخش به بررسی ساختار روش های پیاده سازی شده جهت مقایسه پرداخته می‌شود.

۳-۱- روش‌های پیاده سازی

همانطور که بسیار حائز اهمیت است هرگاه هدف مقایسه یک یا چند روش در مورد یک مسئله خاص با یک دیگر باشد، بهتر است همه روش‌ها در قالب یک چارچوب مشخص بررسی و ارزیابی شوند.

یکی از بسترهای مناسب چارچوب تلفیق تصاویر مرئی و حرارتی [1] *VIFB* است که در سال ۲۰۲۰ توسعه داده شده است. *VIFB* اولین معیار در زمینه ادغام تصاویر مرئی-مادون قرمز حرارتی است که هدف آن ارائه بستری برای انجام مقایسه عملکرد منصفانه و جامع الگوریتم‌های ادغام تصاویر مرئی و مادون قرمز است [۲۶]. در حال حاضر، ۲۱ جفت تصویر مورد ارزیابی و حدود ۲۰ نوع الگوریتم فیوژن (در حال توسعه و افزایش) و ۱۳ معیار ارزیابی در *VIFB* یکپارچه سازی شده است که می‌توان از آنها برای مقایسه عملکردها به راحتی استفاده کرد. تمام نتایج ادغام نیز در دسترس هستند که می‌توانند مستقیما توسط کاربران استفاده شوند. علاوه بر این، با استفاده از جعبه ابزار ارائه شده، می‌توان جفت تصاویر آزمایشی جدید ، الگوریتم‌های ادغامی جدید، معیارهای ارزیابی و تصاویر ترکیبی را به راحتی در محیط *MATLAB* به این چارچوب اضافه کرد [۱۲].

همچنین اکثر الگوریتم‌های منتخب موجود در این چارچوب در کمتر از هشت سال اخیر (۲۰۱۶ به بعد) انتخاب شده‌اند که می‌توانند گویای روند توسعه الگوریتم‌های ادغام تصاویر در این حوزه باشند.

در جدول(۱) اطلاعاتی در رابطه با سال انتشار و نوع روش در دسته بندی کلی انجام شده در قسمت پیشینه تحقیق در رابطه با هر روش ارائه شده است [۹]. همچنین لازم به ذکر است که روش‌های مورد بحث، برای آموزش یا ارزیابی، از مجموعه داده‌های موجود در وبسایت به نشانی *www.imagefusion.org* استفاده کرده اند که ماهیت اکثریت این جفت تصاویر موجود، زمینی است و از محیط‌های پیرامونی شهری، انسان‌ها یا محیط‌های طبیعی در شرایط نوری مختلف اخذ شده است.

[1] *Visible and Infrared image Fusion Benchmark*

[Downloaded from jgit.kntu.ac.ir on 2026-11-23]

جدول۱: روش‌های مورد ارزیابی

نام روش	مجله / کنفرانس (سال انتشار)	روش حل مسئله
ADF [۱۴]	*IEEE Sensors Journal* (۲۰۱۶)	چند مقیاسی
CNN [۲۱]	*International Journal of Wavelets, Multiresolution and Information Processing* (۲۰۱۸)	یادگیری عمیق
CBF [۱]	*Signal, image and video processing* (۲۰۱۵)	چند مقیاسی
FPDE [۱۹]	*International Conference on Information Fusion* (۲۰۱۷)	زیرفضا
GFCE [۱۵]	*Applied Optics* (۲۰۱۶)	چند مقیاسی
GTF [۱۸]	*Information Fusion* (۲۰۱۶)	متفرقه
HMSD-GF [۱۵]	*Applied Optics* (۲۰۱۶)	چند مقیاسی
Hybrid-MSD [۱۶]	*Information Fusion* (۲۰۱۶)	چند مقیاسی
IFEVIP [۲۰]	*Infrared Physics & Technology* (۲۰۱۷)	متفرقه
TIF [۱۷]	*Infrared Physics & Technology* (۲۰۱۶)	مبنا *Saliency*
MSVD [۱۳]	*Defense Science Journal* (۲۰۱۱)	چند مقیاسی
VSMWLS [۲۲]	*Infrared Physics & Technology* (۲۰۱۷)	ترکیبی

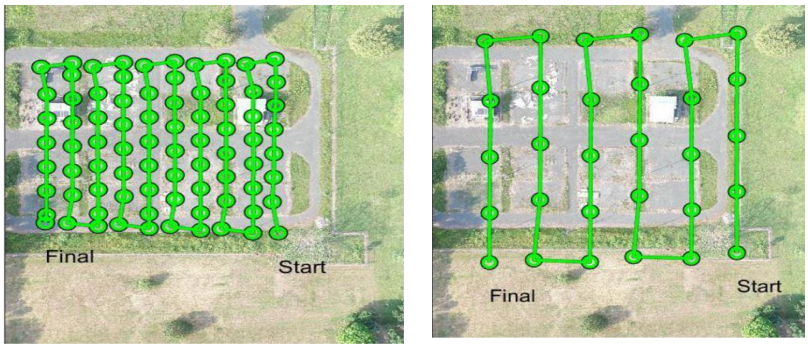
۳-۲- داده مورد استفاده

مجموعه داده شامل ۳۰ تصویر مرئی و ۸۰ تصویر حرارتی از یک صحنه مسطح در منطقه ای به وسعت ۱٫۵۴ هکتار در دانشگاه دل واله کلمبیا است. تصاویر در فرمت *JPG* فشرده شده و موقعیت طول و عرض جغرافیایی و ارتفاع بیضوی آنها بر اساس بیضوی مبنای *WGS84* در هر هدر تصاویر گنجانده شده است *[۱۶]*. مجموعه داده همچنین شامل یک تصویر ارتوموزاییک زمین مرجع شده و ماتریس‌های هموگرافی بین تصویر ارتوموزاییک و هر تصویر مرئی و حرارتی قابل مشاهده است. ابتدا، تصاویر مرئی در یک پرواز فتوگرامتری با نسبت همپوشانی تقریبی ۸۰٪ برای هر دو جهت طولی و عرضی با استفاده از دوربین *Zenmuse X3* بر روی پهپاد *Matrice 100* که در ارتفاع تقریبی ۸۰ متر از سطح زمین پرواز می‌کند، با رزولوشن زمینی ۳٫۵ سانتی متر به دست آمده است. سپس بلافاصله، تصاویر حرارتی در یک پرواز فتوگرامتری با نسبت همپوشانی تقریبی ۹۰٪ برای هر دو جهت طولی و عرضی با استفاده از دوربین *Zenmuse XT* بر روی همان پهپاد که در ارتفاع تقریبی ۱۰۰ متر پرواز می‌کند، با رزلوشن زمینی حدودا ۱۸٫۵سانتی متر به دست آمده است. اندکس پرواز مربوط به تصاویر مرئی و تصاویر حرارتی

[Downloaded from jgit.kntu.ac.ir on 2026-11-23]

جانمایی شده به روی ارتوموزاییک منطقه بارزولوشن ۳/۵ سانتی متری در شکل(۲) قابل بررسی است. این ارتوموزاییک به کمک نرم افزار *Agisoft metashape* توسط تیم ارائه دهنده پردازش و به همراه تصاویر خام ارائه شده است.

همچنین مشخصات کلی سنجنده تصاویر مرئی و حرارتی در جدول(۲) قابل مشاهده است.



شکل۲: اندکس پرواز تصاویر مرئی و حرارتی به روی ارتوموزاییک (اقتباسی از *[۱۱]*)

جدول۲: مشخصات سنجنده مرئی و حرارتی در جمع‌آوری داده

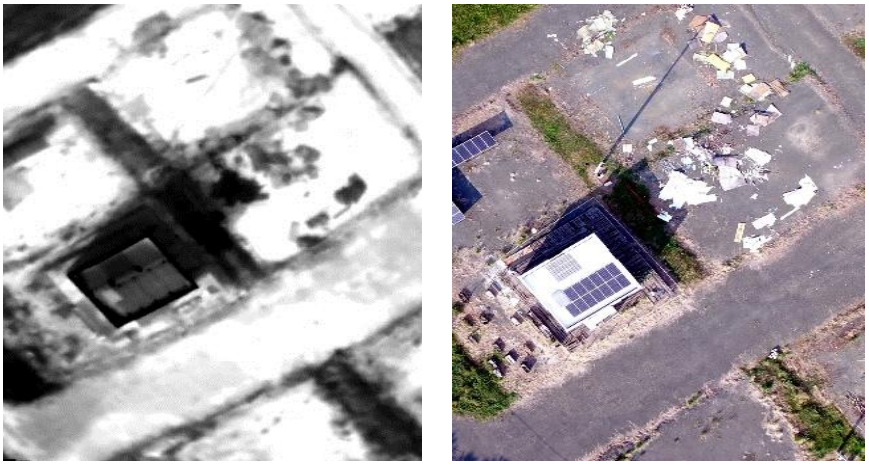
سنجنده	محدوده طیفی (میکرومتر)	رزولوشن (پیکسل)	میدان دید قطری (درجه)	فاصله کانونی (میلی متر)
Zenmuse X3	۰/۴ – ۰/۷	۴۰۰۰*۳۰۰۰	۹۴	۳/۶
Zenmuse XT	۷/۵ -۱۳	۲۵۶*۳۳۶	۴۴	۹

با توجه به آن چه ذکر شد در ادامه به بررسی شرایط و نوع زمین مرجع سازی تصاویر جهت استفاده در بحث ادغام تصاویر پرداخته خواهد شد.

۳-۳- زمین مرجع سازی تصاویر

اولین گام در هر روش ادغام تصویر هم مرجع سازی تصاویر است. با توجه به آنچه گفته شد از آنجایی که تصاویر ارائه شده بصورت خام و خروجی تصویربرداری پهپاد است، هم مرجع سازی به دو شکل قابل انجام است. روش اول استفاده از ماتریس هموگرافی دو بعدی برقراری ارتباط هر تصویر مرئی یا حرارتی با ارتوموزاییک زمین مرجع شده است *[۱۱]*. با توجه به عدم اطلاع کافی، از دقت ماتریس‌های هموگرافی، فرآیند زمین مرجع سازی به کمک ماتریس‌های هموگرافی در مورد بعضی از تصاویر دارای محدوده مشترک کنترل شد و بعضا عدم زمین مرجع سازی مناسب با خطاهای بیش از یک پیکسل در نتایج مشاهده شد. خطای بیش از یک پیکسل باعث وارد شدن خطای عدم زمین مرجع سازی صحیح به عنوان یک خطای سیستماتیک به محاسبات ادغام تصاویر می‌شود. لذا برای زمین مرجع سازی تصاویر از ارتوموزاییک استفاده شد و عملیات زمین مرجع سازی هر جفت تصویر دارای محدوده مشترک به کمک حداقل ۸ نقطه کنترل زمینی در مورد تصاویر به کمک نرم افزار *Envi* ۵/۳ با *RMSE* برابر با ۰/۶۹ پیکسل تصویر حرارتی انجام شد. نمونه تصاویر زمین مرجع‌سازی شده مرئی و حرارتی در شکل(۳) قابل ازیابی است.

[Downloaded from jgit.kntu.ac.ir on 2026-11-23]



(ب) (الف)

شکل ۳: تصاویر زمین مرجع شده (الف) مرئی، (ب) حرارتی

۳-۴- تصویر دمای درخشندگی

درجات خاکستری در هر باند که در واقع حاصل متوسط انرژی ذخیره شده در سطح هر پیکسل متناسب هستند. اما آن چه از تصویر حرارتی در بسیاری از کاربردها انتظار می‌رود ارائه دما در کمیت‌های فیزیکی تعریف شده مانند دمای درخشندگی[1] و دمای سطح زمین[2] و همچنین در واحدهای ملموس دما مانند سلسیوس، کلوین است *[۲۳]*. یکی از روش‌های پر استفاده برای برقراری ارتباط میان درجات خاکستری با پارامترهای فیزیکی استفاده از روش‌های مبتنی بر رگرسیون است. ماهیت این روش‌ها بر برقراری ارتباط میان درجات خاکستری و داده واقعیت زمینی حاصل از اندازه گیری مستقیم از طریق یک مدل رگرسیون است. *FLIR Tools* یک ابزار متن باز است که برای تعداد قابل توجهی از دوربین های حرارتی مدل‌هایی را برای باز ارائه شاخص‌های فیزیکی یا بصری تعریف کرده است *[۲۴]*. در این تحقیق تصویر دمای درخشندگی به کمک مدل مربوطه از درجات خاکستری بازسازی شد.

۴- ارزیابی و تحلیل نتایج

ارزیابی یک تصویر حاصل از ادغام را می‌توان به دو روش مختلف انجام داد. روش اول مقایسه نتیجه ادغام با تصویر مرجع شناخته شده (حقیقت زمینی) است. یکی از رویکردهای ممکن در این زمینه استفاده از پهپادها و انجام پرواز با سنجنده حرارتی در ارتفاع پایین‌تر به منظور افزایش حد تفکیک مکانی تصاویر و استفاده از آن‌ها به عنوان واقعیت زمینی برای ارزیابی نتایج تلفیق و دمای درخشندگی است. البته در این پژوهش با توجه به اینکه از داده‌های از پیش تعیین شده توسط پژوهش‌های پیشین استفاده شده است چنین امکانی وجود نداشته است. رویکرد دوم، ارزیابی بدون مرجع است و عموماً نسبت به اولی بیشتر استفاده می‌شود *[۲۴]*. مبنای این نوع مقایسه در مقایسه اطلاعات طیفی و مکانی در قالب روش‌هایی مبتنی بر خود مشابهت است. بطور کلی این شاخص‌ها را می‌توان به چهار دسته کلی شاخص‌های مبتنی بر نئوری اطلاعات، ویژگی‌های تصاویر، شباهت عناصر ساختاری تصاویر و شاخص‌های مرتبط با ادارک انسان از تصویر تقسیم کرد. روش‌های مبتنی بر تئوری اطلاعات معمولا آماره‌هایی را برای تحلیل هیستوگرام بین تصاویر ورودی و خروجی ارائه می‌دهند، پس به نوعی روی

[1] *Brightness temperature*
[2] *Land surface temperature*

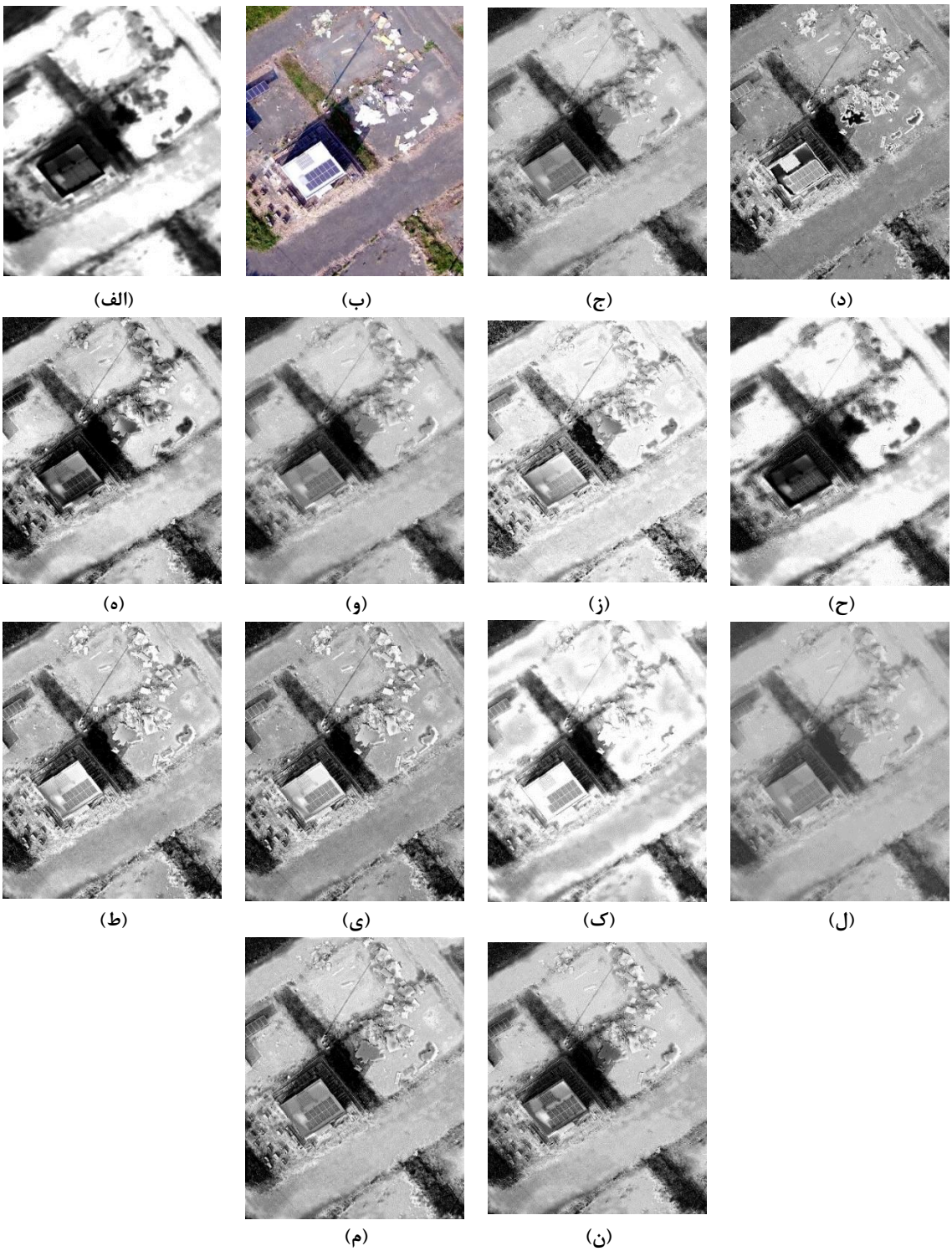
[Downloaded from jgit.kntu.ac.ir on 2026-11-23]

نحوه توزیع درجات خاکستری و مشابهت آنها با یک دیگر تحلیل می‌شود. شاخص‌های مبتنی بر ویژگی تصاویر با اندازه‌گیری میزان انتقال ویژگی‌ها از تصاویر ورودی به تصویر خروجی اجرا می‌شود. منظور از عبارت ویژگی، هم اطلاعات طیفی و هم اطلاعات بافت و با جزئیات بالا است. اندازه‌گیری روش‌های بر مبنای خود مشابهت تصاویر بر اساس این اصل است که سیستم بینایی انسان به شدت با درک اطلاعات ساختاری مشابه در تصاویر سازگار است و اندازه‌گیری از دست دادن اطلاعات ساختاری می‌تواند تقریب خوبی از ضعف‌ها و اعوجاجات طیفی و مکانی تصویر ادغام شده ارائه دهد [۲۵] شاخص‌های ترکیبی مرتبط با ادراک انسان نیز همانگونه که از این عبارت بر می‌تابد، از ترکیب چند شاخص مختلف سعی در تولید شاخص‌هایی دارند که این شاخص‌ها با ادراک بینایی انسان از یک تصویر انطباق خوبی دارند. همچنین شاخص‌های کیفیت چندمقیاسی (*Multiscale Quality Metrics*) نیز از دسته دیگری از شاخص‌ها هستند که در سطوح مختلف میزان حفظ اطلاعات طیفی را ارزیابی می‌کنند. همانطور که پیش تر هم اشاره شد در این پژوهش از ۱۳ مورد از شاخص‌های ارزیابی موجود در این چهار دسته استفاده شده است. در جدول(۳) دسته‌بندی این شاخص‌ها و مسقیم و یا معکوس بودن (مقدار بالاتر بهتر است یا مقدار کمتر) مورد بررسی قرار گرفته اند [۱۲].
در شکل(۴) خروجی حاصل از اعمال تمامی روش‌های نام برده تحت چارچوب *VIFB* به روی تصویر مرئی و حرارتی هم مرجع شده جهت ارزیابی به صورت بصری ارائه شده است.

جدول۳: شاخص‌های ارزیابی کیفیت ادغام تصاویر

دسته شاخص	نام اختصاری	نام کامل آماره آزمون	مستقیم (+) معکوس (−)
تئوری اطلاعات	*CE*	*Cross entropy*	−
	EN	*Entropy*	+
	MI	*Mutual information*	+
	PSNR	*Peak signal-to-noise ration*	+
شباهت عناصر ساختاری تصاویر	*SSIM*	*Structural similarity index measure*	+
	RMSE	*Root mean squared error*	-
ویژگی‌های تصاویر	*AG*	*Average gradient*	+
	EI	*Edge intensity*	+
	SD	*Standard deviation*	+
	SF	*Spatial frequency*	+
	$Q^{AB\,F}_{/}$	*Gradient-based fusion performance*	+
شاخص‌های ادراک انسانی	Q_{CB}	*Chen-Blum metric*	+
	Q_{CV}	*Chen-Varshney metric*	-

[Downloaded from jgit.kntu.ac.ir on 2026-11-23]



شکل۴: خروجی فرآیند ادغام، به ترتیب، (الف) تصویر حرارتی، (ب) تصویر مرئی، (ج) *ADF*، (د) *CBF*، (ه) *CNN*، (و) *FPDE*، (ز) *GFCE*، (ح) *GTF*، (ط) *HMSD GF*، (ی) *Hybrid MSD*، (ک) *IFEVIP*، (ل) *MSVD*، (م) *TIF*، (ن) *VSMWLS*

[Downloaded from jgit.kntu.ac.ir on 2026-11-23]

در تصاویر ادغام شده انتظار بر این است که ویژگی‌های طیفی تصویر حرارتی حفظ شده باشد و توسط ویژگی‌های بافت و جزئیات تصویر مرئی تقویت شده باشد.

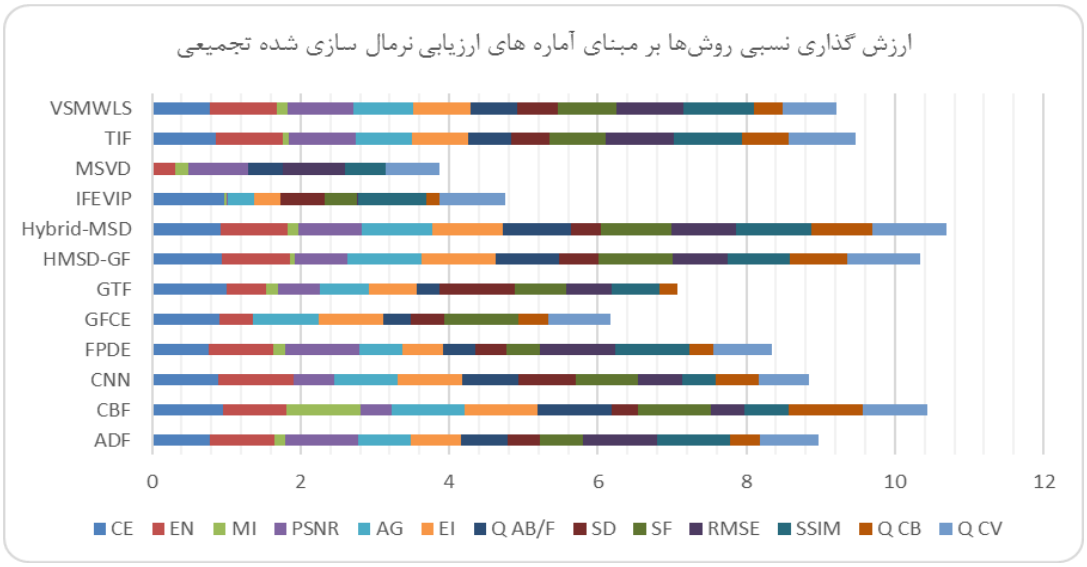
همانطور که پیش تر اشاره شد برای ارزیابی بصری تصاویر خروجی بر اساس شاخص‌های تعریف شده مورد ارزیابی قرار گیرند و در نهایت در رابطه با رتبه‌بندی خروجی‌ها اقدام شود.

در جدول(۴) نتایج حاصل از ارزیابی تمامی خروجی‌های فوق بر اساس شاخص‌های ارزیابی ۱۳ گانه ارائه شده است. با توجه به این مسئله که هدف، مقایسه خروجی الگوریتم‌ها است و شاخص‌ها بعضا کران بالا و پایین مشخصی ندارند، موارد زیر جهت ایجاد بستر مقایسه خروجی‌ها انجام می‌شود. ابتدا شاخص‌ها با توجه به بیشترین و کمترین مقدار بدست آمده در بازه ۰ تا ۱، نرمالیزه (*Normalize*) می‌شوند. در واقع جدول(۴) بصورت ستون به ستون به روش فوق استاندارد سازی می‌شود. سپس با توجه به اینکه پیش تر هم اشاره شد، بعضی از شاخص‌ها نمایانگر معکوس هستند، شاخص‌های معکوس را بصورت (*Normal value* − ۱) باز نویسی می‌شود تا تاثیر تمامی شاخص‌ها بصورت مستقیم بازسازی شود. سپس با جمع زدن سطر به سطر مقادیر امتیاز حاصل شده هر روش، از سقف ۱۳ بدست می‌آید. نتایج اعمال این چارچوب مقایسه ای پیشنهادی در جدول(۵) بصورت عددی و در شکل(۵) بصورت گرافیکی برای درک بهتر از هر روش ارائه شده است.

در این جدول، رنگ‌های قرمز، آبی و سبز به عنوان رتبه‌های اول تا سوم به عنوان بهترین خروجی‌های متناسب هر شاخص دارند. برای مثال در معیار ارزیابی *Cross Entropy* که یک شاخص با عملکرد معکوس است، بهترین نتیجه مرتبط با روش *GTF* و پس از آن روش‌های *IFEVIP* و *CBF* قرار می‌گیرند. همچنین در مورد سایر معیارهای ارزیابی نیز این رتبه بندی سه روش برتر بصورت مشابه انجام شده است.

مطابق آنچه شرح داده شد، پس از نرمال سازی شاخص‌ها و مستقیم سازی شاخص‌های با اثر معکوس و میانگین‌گیری از آن‌ها جهت ایجاد یک چارچوب استاندارد مقایسه، روش‌های *Hybrid-MSD*، *CBF* و *HMSD-GF* به ترتیب با ارزش‌های ۱۰/۷۰، ۱۰/۴۴ و ۱۰/۳۴ از مجموع ۱۳، بهترین عملکرد را در بین روش‌های مورد ارزیابی دارند.

شکل۵: نمودار شاخص‌های نرمال شده تجمیعی جهت مقایسه عملکرد روش‌ها در یک چارچوب استاندارد



[Downloaded from jgit.kntu.ac.ir on 2026-11-23]

جدول۴: ارزیابی خروجی روش‌های مختلف به کمک شاخص‌های ادغام تصاویر

روش تلفیق تصاویر	CE	EN	MI	PSNR	AG	EI	$Q^{AB/F}$	SD	SF	RMSE	SSIM	Q_{CB}	Q_{CV}
ADF	۱٫۲۷۴۲	۷٫۴۹۳۴	۱٫۶۲۷	۶۳٫۱۶۶	۸٫۳۵۰۳	۸۱٫۳۵۲	۰٫۶۸۲۳۴	۵۸٫۹۵۹	۲۰٫۱۸۳	۰٫۰۳۱۳۶۸	۱٫۲۷۹۵	۰٫۴۶۲۶۲	۶۸۲٫۶۷
CBF	۰٫۷۳۴۰۵	۷٫۴۸۷۸	۳٫۹۳۳۶	۶۲٫۲۸۳	۱۰٫۲۲۸	۱۰۲٫۰۸	۰٫۸۲۴۳۸	۵۵٫۶۴۷	۲۵٫۸۶۴	۰٫۰۳۸۴۴۴	۱٫۲۳۷۲	۰٫۷۴۸۱۲	۵۶۸٫۵
CNN	۰٫۹۰۳۰۲	۷٫۶۳۱۲	۱٫۲۲۵۴	۶۲٫۵۰۳	۹٫۳۸۳۹	۹۳٫۴۲۲	۰٫۷۳۴۰۹	۷۳٫۳۷۹	۲۳٫۹۴۶	۰٫۰۳۶۵۴۳	۱٫۲۱۹۲	۰٫۵۴۳۲۵	۸۴۴٫۷۳
FPDE	۱٫۳۱۷۴	۷٫۴۸۴۸	۱٫۶۶۰۹	۶۳٫۱۸۷	۷٫۵۱۸۳	۷۲٫۶۵۱	۰٫۶۱۲۹۸	۵۸٫۵۲۳	۱۸٫۲۱۷	۰٫۰۳۱۲۱۹	۱٫۲۸۱۴	۰٫۴۲۵۹	۶۹۱٫۶۸
GFCE	۰٫۸۷۸۸۹	۷٫۰۷۹۸	۱٫۲۴۱	۶۱٫۶۵۵	۹٫۵۳۲۷	۹۴٫۲	۰٫۵۹۳	۵۹٫۸۱۲	۲۶٫۱۶۵	۰٫۰۴۴۴۱۷	۱٫۱۶۹۹	۰٫۴۵۹۱۱	۶۲۲٫۶۵
GTF	۰٫۵۷۷۹۴	۷٫۱۶۳	۱٫۶۷۸۲	۶۲٫۵۲۶	۷٫۹۹۴	۷۸٫۴۲۱	۰٫۵۷۲۸۱	۸۲٫۶۲۵	۲۱٫۷۸۵	۰٫۰۳۶۳۴۹	۱٫۲۴۲۶	۰٫۳۷۹۳	۱۹۱۵
HMSD -GF	۰٫۷۴۴۵	۷٫۵۳۹۶	۱٫۳۸۳۴	۶۲٫۷۴	۱۰٫۳۲۱	۱۰۳٫۲۹	۰٫۷۷۱۰۴	۶۲٫۹۳۴	۲۶٫۲۴۶	۰٫۰۳۴۵۹۸	۱٫۲۶۳۳	۰٫۶۳۳۰۳	۳۶۸٫۸۹
Hybrid -MSD	۰٫۸۳۲۰۵	۷٫۵۳۶۴	۱٫۶۰۴۵	۶۲٫۹۶۸	۹٫۹۹۸۷	۹۹٫۶۶۹	۰٫۷۹۳۱۴	۵۷٫۸۵۷	۲۵٫۴۳۵	۰٫۰۳۲۸۲۹	۱٫۲۸۱۳	۰٫۶۶۷۸۶	۳۶۳٫۶
IFEVI P	۰٫۶۸۴۲۷	۶٫۶۲۹۸	۱٫۳۱۸۶	۶۱٫۶۸۸	۶٫۰۱۵	۵۸٫۸۴	۰٫۴۵۴۵۲	۶۵٫۷۱۹	۱۷٫۸۲۸	۰٫۰۴۴۰۸۳	۱٫۲۷۱۹	۰٫۳۵۴۹۱	۵۶۳٫۳۷
MSVD	۳٫۸۰۶۱	۶٫۹۴	۱٫۷۰۷	۶۲٫۹	۳٫۶۷۰۲	۳۴٫۴۸۱	۰٫۶۲۲۹۸	۴۰٫۷۸۷	۱۱٫۴۵۶	۰٫۰۳۳۳۵۳	۱٫۲۳۱۵	۰٫۲۶۷۸۷	۷۸۵٫۳۵
TIF	۱٫۰۳۹۱	۷٫۵۲۹۹	۱٫۴۷۶۴	۶۳٫۰۳۷	۸٫۶۴۱۹	۸۶٫۱۲۸	۰٫۶۶۹۷۹	۶۲٫۲۹۶	۲۲٫۶۲۶	۰٫۰۳۲۳۳۱	۱٫۲۷۲۱	۰٫۵۷۲۰۴	۵۰۴٫۵۱
VSMWLS	۱٫۳۱۲۵	۷٫۵۴۳۳	۱٫۵۸۷	۶۳٫۰۲۶	۸٫۹۹۴۵	۸۷٫۷۷۹	۰٫۶۸۳۹۱	۶۳٫۸۸۶	۲۳٫۰۸۳	۰٫۰۳۲۳۹۶	۱٫۲۷۴۸	۰٫۴۵۸۶۸	۸۰۷٫۴۱

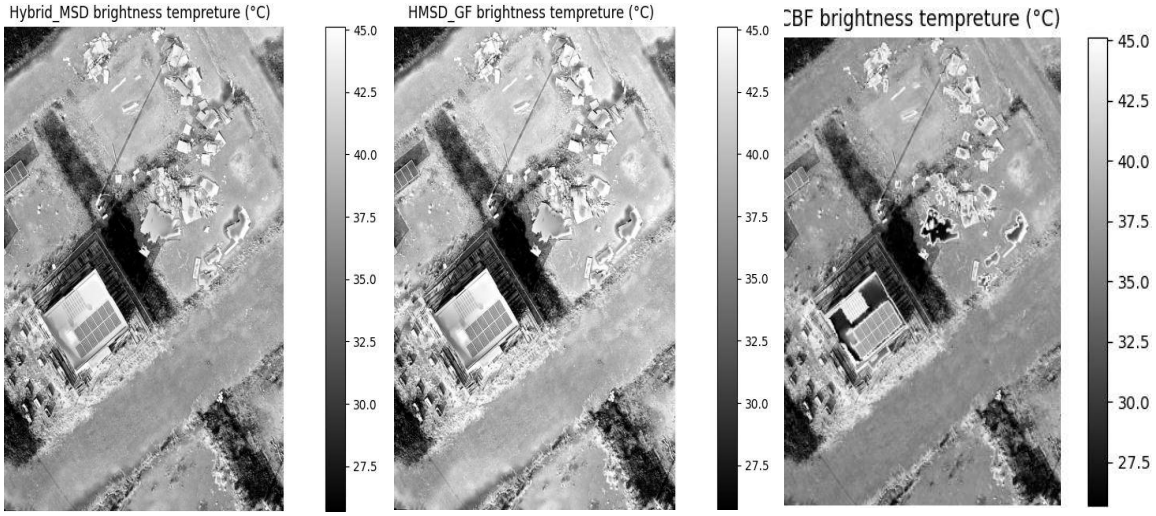
[Downloaded from jgit.kntu.ac.ir on 2026-11-23]

جدول۵: ارزیابی خروجی روش‌های مختلف به کمک شاخص‌های نرمال سازی شده جهت مقایسه با یکدیگر

روش تلفیق تصاویر	CE	EN	MI	PSNR	AG	EI	$Q^{AB/F}$	SD	SF	RMSE	SSIM	Q_{CB}	Q_{CV}	SCORE
ADF	۰٫۷۸۴	۰٫۸۶۲	۰٫۱۴۸	۰٫۹۸۶	۰٫۷۰۴	۰٫۶۸۱	۰٫۶۱۶	۰٫۴۳۴	۰٫۵۹۰	۰٫۹۸۹	۰٫۹۸۳	۰٫۴۰۶	۰٫۷۹۴	۸٫۹۷۸
CBF	۰٫۹۵۲	۰٫۸۵۷	۱٫۰۰۰	۰٫۴۱۰	۰٫۹۸۶	۰٫۹۸۲	۱٫۰۰۰	۰٫۳۵۵	۰٫۹۷۴	۰٫۴۵۳	۰٫۶۰۴	۱٫۰۰۰	۰٫۸۶۸	۱۰٫۴۴۰
CNN	۰٫۸۹۹	۱٫۰۰۰	۰٫۰۰۰	۰٫۵۵۴	۰٫۸۵۹	۰٫۸۵۷	۰٫۷۵۶	۰٫۷۷۹	۰٫۸۴۴	۰٫۵۹۷	۰٫۴۴۲	۰٫۵۷۳	۰٫۶۹۰	۸٫۸۵۰
FPDE	۰٫۷۷۱	۰٫۸۵۴	۰٫۱۶۱	۱٫۰۰۰	۰٫۵۷۹	۰٫۵۵۵	۰٫۴۲۸	۰٫۴۲۴	۰٫۴۵۷	۱٫۰۰۰	۱٫۰۰۰	۰٫۳۲۹	۰٫۷۸۹	۸٫۳۴۶
GFCE	۰٫۹۰۷	۰٫۴۴۹	۰٫۰۰۶	۰٫۰۰۰	۰٫۸۸۱	۰٫۸۶۸	۰٫۳۷۴	۰٫۴۵۵	۰٫۹۹۵	۰٫۰۰۰	۰٫۰۰۰	۰٫۳۹۸	۰٫۸۳۳	۶٫۱۶۶
GTF	۱٫۰۰۰	۰٫۵۳۲	۰٫۱۶۷	۰٫۵۶۹	۰٫۶۵۰	۰٫۶۳۹	۰٫۳۲۰	۱٫۰۰۰	۰٫۶۹۸	۰٫۶۱۱	۰٫۶۵۲	۰٫۲۳۲	۰٫۰۰۰	۷٫۰۷۰
HMSD-GF	۰٫۹۴۸	۰٫۹۰۹	۰٫۰۵۸	۰٫۷۰۸	۱٫۰۰۰	۱٫۰۰۰	۰٫۸۵۶	۰٫۵۲۹	۱٫۰۰۰	۰٫۷۴۴	۰٫۸۳۸	۰٫۷۶۰	۰٫۹۹۷	۱۰٫۳۴۷
Hybrid-MSD	۰٫۹۲۱	۰٫۹۰۵	۰٫۱۴۰	۰٫۸۵۷	۰٫۹۵۲	۰٫۹۴۷	۰٫۹۱۶	۰٫۴۰۸	۰٫۹۴۵	۰٫۸۷۸	۰٫۹۹۹	۰٫۸۳۳	۱٫۰۰۰	۱۰٫۷۰۱
IFEVIP	۰٫۹۶۷	۰٫۰۰۰	۰٫۰۳۴	۰٫۰۲۲	۰٫۳۵۳	۰٫۳۵۴	۰٫۰۰۰	۰٫۵۹۶	۰٫۴۳۱	۰٫۰۲۵	۰٫۹۱۵	۰٫۱۸۱	۰٫۸۷۱	۴٫۷۴۹
MSVD	۰٫۰۰۰	۰٫۳۱۰	۰٫۱۷۸	۰٫۸۱۳	۰٫۰۰۰	۰٫۰۰۰	۰٫۴۵۵	۰٫۰۰۰	۰٫۰۰۰	۰٫۸۳۸	۰٫۵۵۲	۰٫۰۰۰	۰٫۷۲۸	۳٫۸۷۵
TIF	۰٫۸۵۷	۰٫۸۹۹	۰٫۰۹۳	۰٫۹۰۲	۰٫۷۴۸	۰٫۷۵۱	۰٫۵۸۲	۰٫۵۱۴	۰٫۷۵۵	۰٫۹۱۷	۰٫۹۱۷	۰٫۶۳۳	۰٫۹۰۹	۹٫۴۷۷
VSMWLS	۰٫۷۷۲	۰٫۹۱۲	۰٫۱۳۴	۰٫۸۹۵	۰٫۸۰۱	۰٫۷۷۵	۰٫۶۲۰	۰٫۵۵۲	۰٫۷۸۶	۰٫۹۱۱	۰٫۹۴۱	۰٫۳۹۷	۰٫۷۱۴	۹٫۲۱۰

[Downloaded from jgit.kntu.ac.ir on 2026-11-23]

مدل رگرسیون خطی آموزش داده شده جهت تولید تصاویر درخشندگی سطح با نرخ داده تست ۳۰ درصد، دارای $R^2=$ ۰/۹۹ و $RMSE=$۰/۰۷۵ است که به منزله وجود ارتباط خطی بین ورودی و خروجی در ذات مسئله و تقریب مدلی مناسب برای این مسئله است. در شکل(۶) شاخص درخشندگی سطح حاصل از روش‌های *Hybrid-MSD*، *CBF* و *HMSD-GF* به عنوان بهترین روش‌های حاصل از ارزیابی‌های فوق، قابل بررسی است.



(ج) (ب) (الف)

شکل۶: تصاویر شاخص درخشندگی سطح روش‌های (الف) *CBF*، (ب) *HMSD GF* و (ج) *Hybrid MSD*

برای ارزیابی تصاویر دمای درخشندگی، بهترین روش ارزیابی به کمک داده‌های زمینی حاصل از اندازه گیری مستقیم دما است. ایده دیگر تکرار پرواز در ارتفاع مختلف با پهپاد و با رعایت حداقل اتلاف زمانی بین اپک‌ها است. در این روش سازگاری دمای درخشندگی در بین دو اپک با روش‌های مشابهت به صورت محلی و سراسری قابل ارزیابی است. در مواقعی که مانند این تحقیق ارزیابی به روش‌های فوق میسر نیست، برآورد انحراف معیار و یا روش‌های آنالیز پراکندگی هیستوگرام در قسمت‌های مورد انتظار با دمای یکنواخت نیز می‌تواند استفاده شود. بجز روش اول یعنی استفاده از داده زمینی، دو روش دیگر صرفا بصورت نسبی تصویر دمای درخشندگی را بررسی می‌کند. در این تحقیق با فرض توزیع یکنواخت دما با انتخاب یک محدوده به روی آسفالت موجود در ضلع جنوبی ساختمان به ابعاد ۱۰۰*۱۰۰ پیکسل مقایسه بین نتایج حاصل از ۳ روش منتخب انجام شده است. انحراف معیار در این محدوده به ترتیب برای روش‌های *Hybrid-MSD*، *CBF* و *HMSD-GF* برابر ۰/۷۷، ۰/۷۷ و ۰/۸۳ سانتیگراد است.

۵- بحث و نتیجه‌گیری

همانطور که در ابتدا نیز اشاره شد هدف اصلی این پژوهش ارزیابی میزان توانایی الگوریتم‌های توسعه داده شده به روی تصاویر حاصل از تصویر برداری پهپاد مبنا بوده است. از روش‌های مورد ارزیابی قرار گرفته در رابطه با ادغام تصاویر مرئی و حرارتی حاصل از تصویربرداری هوایی با پهپاد، بر اساس چارچوب ارزیابی ارئه شده روش‌های *Hybrid-MSD*، *CBF* و *HMSD-GF* به ترتیب بهترین روش‌های مورد استفاده شناخته شدند. این سه روش هر سه در حوزه روش‌های تبدیلات چند مقیاسی قرار می‌گیرد. این مسئله بیانگر این است که یکی از دلایل تعدد تحقیقات پیشین انجام شده درحوزه ادغام تصاویر مرئی و حرارتی انجام شده با

[Downloaded from jgit.kntu.ac.ir on 2026-11-23]

تمرکز به بحث تبدیل چند مقیاسی توانایی این روش‌ها در حل مسئله بوده است. با توجه به چارچوب رتبه بندی که بیشینه ارزش قابل کسب، ۱۳ بوده است، می‌توان گفت الگوریتم‌های فوق بصورت نسبی به ترتیب ۸۲٫۳، ۸۰٫۳ و ۷۹٫۵ درصد در حل مسئله ادغام تصاویر مرئی و مادون قرمز حرارتی کارا بوده اند. علاوه بر کیفیت ادغام، کارایی محاسباتی و سرعت اجرا از عوامل مهم در کاربردهای مبتنی بر تصاویر پهپاد است. هرچند تمرکز اصلی این پژوهش متناسب با چارچوب مورد استفاده، به روی ارزیابی کیفیت نتایج خروجی‌ها بوده است، اما به‌طور کلی، روش‌های مبتنی بر تبدیلات چندمقیاسی و فیلترها، به دلیل ساختار غیرآموزشی و پیچیدگی محاسباتی کمتر، از سرعت اجرای بالاتری برخوردار بوده و برای پردازش سریع داده‌های پهپادی مناسب‌تر هستند. در مقابل، روش‌های مبتنی بر یادگیری عمیق به علت وابستگی به معماری شبکه و منابع سخت‌افزاری، عمدتا در فاز یادگیری مدل، زمان بیشتری را می‌طلبند ولی در فاز پیش بینی، زمان پردازش‌ها قابل مقایسه با سایر دسته روش‌ها است. از این رو با تمرکز بر پتانسیل‌های ذاتی روش‌های یادگیری مبنا و نتایج حاصل شده از این پژوهش، در بخش نهایی این پژوهش به ارائه پیشنهاداتی در خصوص تحقیقات آتی این حوزه پرداخته خواهد شد.

۶- پیشنهادها

کیفیت خروجی روش‌های آماری سنتی بسیار وابسته به پارامترهای هر الگوریتم و حد آستانه گذاری‌های موجود در هر روش پیشنهادی است که از عمومیت و کارایی روش پیشنهادی میکاهد. در مقابل با پیشروی روش‌های مبتنی بر یادگیری عمیق و جامعیت این دسته روش‌ها، انجام تحقیقات آتی در موضوع تلفیق تصاویر مرئی و حرارتی پهپادی با تکیه بر ترنسفورمرها (*Transformers*) پیشنهاد می‌گردد. با توجه به اینکه معمولا بیشتر مجموعه داده‌های آموزشی موجود در مورد موضوع تلفیق تصاویر مرئی و حرارتی داده‌هایی با ماهیت تصاویر زمینی، معابر شهری، طبیعی و نظارتی (مانند *INO,TNO* و مجموعه داده‌های موجود در *www.imagefusion.org*) بوده است، مدل‌های آموزش داده شده کمتر با داده‌هایی با ماهیت هوایی انطباق و سازگاری دارند. لذا ارزیابی مدل‌های مذکور با تصاویر با ماهیت هوایی لزوما نتایج ایده آلی را ندارد. به منظور افزایش کارایی مدل‌های موجود، راه حل پیشنهادی *fine tuning* مدل‌های مبتنی بر یادگیری است؛ به این صورت که لایه‌های ابتدایی شبکه مورد استفاده و آموزش داده شده اصطلاحا *freeze* شده و پیرو آن در لایه‌های انتهایی شبکه، داده‌های مرئی و حرارتی مبتنی بر تصاویر هوایی پهپاد در فرآیند آموزش به شبکه اضافه شوند، تا سازگاری مدل با این نوع داده‌ها افزایش یابد. در این حالت افزایش جامعیت‌پذیری بیشتر، کیفیت بصری، بهبود آماره‌های ارزیابی و عدم وابستگی به حدآستانه گذاری‌های الگوریتم‌های سنتی از مهمترین دست آوردهای تلفیق تصاویر مرئی و حرارتی مبتنی بر یادگیری خواهد بود

مراجع

[1] B. K. Shreyamsha Kumar, "Image Fusion Based on Pixel Significance Using Cross Bilateral Filter," Signal, Image Video Process., vol. 9, pp. 1193–1204, 2015.

[2] V. Yilmaz and O. Gungor, "Fusion of Very High-Resolution UAV Images with Criteria-Based Image Fusion Algorithm," Arab. J. Geosci., vol. 9, pp. 1–16, 2016.

[3] Y. Liu, C. Zheng, X. Liu, Y. Tian, J. Zhang, and W. Cui, "Forest Fire Monitoring Method Based on UAV Visual and Infrared Image Fusion," Remote Sens., vol. 15, 2023.

[4] S. Li, B. Yang, and J. Hu, "Performance Comparison of Different Multi-Resolution Transforms for Image Fusion," Inf. Fusion,

[Downloaded from jgit.kntu.ac.ir on 2026-11-23]

vol. 12, pp. 74–84, 2011.

[5] J. Wang, J. Peng, X. Feng, G. He, and J. Fan, "Fusion Method for Infrared and Visible Images by Using Non-Negative Sparse Representation," Infrared Phys. Technol., vol. 67, pp. 477–489, 2014.

[6] X. Zhang and Y. Demiris, "Visible and Infrared Image Fusion Using Deep Learning," IEEE Trans. Pattern Anal. Mach. Intell., vol. 45, pp. 10535–10554, 2023.

[7] W. Kong, Y. Lei, and H. Zhao, "Adaptive Fusion Method of Visible Light and Infrared Images Based on Non-Subsampled Shearlet Transform and Fast Non-Negative Matrix Factorization," Infrared Phys. Technol., vol. 67, pp. 161–172, 2014.

[8] X. Zhang, Y. Ma, F. Fan, Y. Zhang, and J. Huang, "Infrared and Visible Image Fusion via Saliency Analysis and Local Edge-Preserving Multi-Scale Decomposition," J. Opt. Soc. Am. A, vol. 34, p. 1400, 2017.

[9] J. Ma, Y. Ma, and C. Li, "Infrared and Visible Image Fusion Methods and Applications: A Survey," Inf. Fusion, vol. 45, pp. 153–178, 2019.

[10] J. Yu, C. Zhou, and J. Zhao, "Improvement of Wheat Growth Information by Fusing UAV Visible and Thermal Infrared Images," Agronomy, vol. 12, 2022.

[11] L. M. García-Moreno, J. P. Díaz-Paz, H. Loaiza-Correa, and A. D. Restrepo-Girón, "Dataset of Thermal and Visible Aerial Images for Multi-Modal and Multi-Spectral Image Registration and Fusion," Data Br., vol. 29, 2020.

[12] "Visible and Infrared Image Fusion Benchmark," in IEEE Comput. Soc. Conf. Comput. Vis. Pattern Recognit. Work., 2020, pp. 468–478.

[13] V. P. S. Naidu, "Image Fusion Technique Using Multi-Resolution Singular Value Decomposition," Def. Sci. J., vol. 61, pp. 479–484, 2011.

[14] D. P. Bavirisetti and R. Dhuli, "Fusion of Infrared and Visible Sensor Images Based on Anisotropic Diffusion and Karhunen-Loeve Transform," IEEE Sens. J., vol. 16, pp. 203–209, 2016.

[15] Z. Zhou, M. Dong, X. Xie, and Z. Gao, "Fusion of Infrared and Visible Images for Night-Vision Context Enhancement," Appl. Opt., vol. 55, p. 6480, 2016.

[16] Z. Zhou, B. Wang, S. Li, and M. Dong, "Perceptual Fusion of Infrared and Visible Images through a Hybrid Multi-Scale Decomposition with Gaussian and Bilateral Filters," Inf. Fusion, vol. 30, pp. 15–26, 2016.

[17] D. P. Bavirisetti and R. Dhuli, "Two-Scale Image Fusion of Visible and Infrared Images Using Saliency Detection," Infrared Phys. Technol., vol. 76, pp. 52–64, 2016.

[18] J. Ma, C. Chen, C. Li, and J. Huang, "Infrared and Visible Image Fusion via Gradient Transfer and Total Variation Minimization," Inf. Fusion, vol. 31, pp. 100–109, 2016.

*[19] D. P. Bavirisetti, G. Xiao, and G. Liu, "Multi-Sensor Image Fusion Based on Fourth Order Partial Differential Equations," in *20th Int. Conf. Inf. Fusion, Fusion 2017 - Proc.*, 2017.*

[20] Y. Zhang, L. Zhang, X. Bai, and L. Zhang, "Infrared and Visual Image Fusion through Infrared Feature Extraction and Visual Information Preservation," Infrared Phys. Technol., vol. 83, pp. 227–237, 2017.

[21] Y. Liu, X. Chen, J. Cheng, H. Peng, and Z. Wang, "Infrared and Visible Image Fusion with Convolutional Neural Networks," Int. J. Wavelets, Multiresolution Inf. Process., vol. 16, 2018.

[22] J. Ma, Z. Zhou, B. Wang, and H. Zong, "Infrared and Visible Image Fusion Based on Visual Saliency Map and Weighted Least Square Optimization," Infrared Phys. Technol., vol. 82, pp. 8–17, 2017.

[23] G. Yuan et al., "Accuracy Assessment and Scale Effect Investigation of UAV Thermography for Underground Coal Fire

[Downloaded from jgit.kntu.ac.ir on 2026-11-23]

Surface Temperature Monitoring," Int. J. Appl. Earth Obs. Geoinf., vol. 102, p. 102426, 2021.

[24] FLIR Systems, "User's Manual FLIR Tools/Tools+ 5.1," T810209, pp. 129–133, 2017.

[25] Z. Liu, E. Blasch, Z. Xue, J. Zhao, R. Laganiére, and W. Wu, "Objective Assessment of Multiresolution Image Fusion Algorithms for Context Enhancement in Night Vision: A Comparative Study," IEEE Trans. Pattern Anal. Mach. Intell., vol. 34, pp. 94–109, 2012.

[26] X. Zhang, "VIFB: Visible and Infrared Image Fusion Benchmark," GitHub. [Online]. Available: https://github.com/xingchenzhang/VIFB.

[Downloaded from jgit.kntu.ac.ir on 2026-11-23]

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

Journal of Geospatial Information Technology
Vol.13, No.4, Winter 2026

Research Paper

Performance Evaluation of Thermal Infrared and Visible Image Fusion Methods using UAV Images based on VIFB

Ali Abdollahi [1], Reza Shah-Hosseini. [2]*

1- PhD student of photogrammetry in Faculty of Surveying and Geospatial Engineering, College of Engineering, University of Tehran
2- Associate professor in Scool of Surveying and Geospatial Engineering, College of Engineering, University of Tehran

Abstract

In the field of remote sensing, the fusion of visible and thermal images is a process in which the spectral information from thermal imagery is combined with the spatial detail information from visible imagery to produce a thermally-informative image with enhanced spatial resolution. As the demand for higher spatial details, shorter monitoring intervals, and real-time results increases, the satellite-based remote sensing imagery becomes less practical. In such scenarios, the UAV-based photogrammetric imagery presents a viable alternative. The aim of this study is to compare the results of several fusion methods, tailored to specific implementation platforms, based on the established evaluation metrics, with a focus on UAV-acquired aerial data. The dataset used in this study comprises 30 visible images captured using a Zenmuse X3 camera and 80 thermal images acquired using a Zenmuse XT camera mounted on a Matrice 100 UAV. The area of interest is a flat scene covering approximately 1.54 hectares, located within the Universidad del Valle, Colombia. The fusion process was conducted using 12 different algorithms within the VIFB framework. Each fused output was evaluated using 13 standard image fusion quality metrics. Subsequently, a relative standardization of the metrics was performed to rank the algorithms. Among the evaluated methods, the Hybrid-MSD, CBF, and HMSD-GF algorithms demonstrated superior performance, in the UAV-based thermal-visible image fusion task achieving relative scores of 82.3, 80.3, and 79.3, respectively. Furthermore, following the fusion process, the grayscale output images were converted into surface luminance maps using a linear regression model.

Key words: *Aerial image fusion, image integration, visible imagery, thermal imagery, UAV photogrammetry, remote sensing*

Correspondence Address*: School of Surveying and 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 2026-11-23]