



پایه‌سازی و مقایسه کیفیت طیفی و مکانی روش‌های ادغام تصاویر ماهواره‌ای مبتنی بر پیکسل

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۱/۱۲/۲۴

تاریخ دریافت: ۱۴۰۱/۱۰/۱۱

حسن امامی*^۱، آرش رحمانی‌زاده^۲

۱- استادیار، گروه مهندسی نقشه‌برداری، دانشکده فنی و مهندسی مرند، دانشگاه تبریز، آذربایجان شرقی، ایران

۲- استادیار، گروه مهندسی نقشه‌برداری، دانشکده فنی و مهندسی مرند، دانشگاه تبریز، آذربایجان شرقی، ایران

چکیده

در تصاویر سنجش از دور بدلیل محدودیت سیگنال به نویز سنجنده، امکان اخذ تصاویر با دقت طیفی و مکانی بالا مقدور نیست. هدف این تحقیق پیاده سازی و بررسی جامع طیفی - مکانی روش‌های مختلف ادغام تصویر در سطح پیکسل است. بر این اساس، ۱۵ روش مرسوم ادغام تصاویر در چهار گروه شامل روش‌های مبتنی بر انتقال، ترکیب محاسباتی، مبتنی بر فیلتر در حوزه زمان- مکان و فرکانس و روش‌های آماری ادغام تصاویر پیاده سازی و مقایسه گردید. همچنین جهت ارزیابی کیفیت نتایج ده معیار مختلف کیفیت طیفی و مکانی در چهار حالت مختلف مورد تجزیه- تحلیل قرار گرفتند. در حالت اول، تک تک پارامترهای در نظر گرفته شدند که نتایج این حالت نشان داد، بجز روش RVS و Gramshmit که هم اطلاعات طیفی و هم اطلاعات مکانی را در تصاویر ادغام شده حفظ می‌کند، بقیه روش‌های مذکور با اینکه اطلاعات مکانی را در تصاویر ادغام شده حفظ می‌کند در مقابل، در حفظ اطلاعات طیفی عملکرد ضعیفی دارند. در حالت دوم، میانگین تمامی هفت معیار طیفی هم جهت در دو دسته حداقل و حداکثر مقدار در نظر گرفته شدند که به ترتیب در معیار طیفی حداکثر، روش‌های LMVM، Gramshmit، SVR، Ehler و معیار طیفی حداقل روش‌های SVR، Ehler، SFIM، IHS و بهترین عملکرد را با حفظ ۹۰ درصد اطلاعات طیفی داشتند. در حالت سوم، معیار مکانی هم جهت هم نشان داد، روش‌های LMM، ISVR، Brovey، PCA به ترتیب بهترین عملکرد را در حفظ اطلاعات مکانی دارند. در حالت چهارم بررسی، با در نظر گرفتن میانگین معیارهای طیفی و مکانی هم جهت حداقل و حداکثر، بصورت توأم مورد بررسی قرار گرفتند. نتایج این حالت نشان داد، میانگین کیفیت طیفی- مکانی در حالت حداکثر، به ترتیب روش‌های LMM، LMVM، RVS، Ehler، Gramshmit و SVR در حالت حداقل، به ترتیب روش‌های SVR، Ehler، SFIM، IHS و در حفظ اطلاعات طیفی و مکانی در تصاویر ادغام شده بهترین عملکرد را داشته‌اند. مجموع چهار حالت بررسی نشان داد به ترتیب روش‌های SVR، Ehler، Gramshmit در حفظ اطلاعات طیفی- مکانی در تصاویر ادغام شده بهترین عملکرد را نسبت به سایر روش‌ها دارند و تقریباً از ۸۰ تا ۹۵ درصد اطلاعات را حفظ می‌کنند.

کلمات کلیدی: ادغام تصاویر ماهواره‌ای، سنجش از دور، معیارهای طیفی ادغام تصاویر، معیارهای مکانی ادغام تصاویر.

۱- مقدمه

توسعه فناوری ماهواره‌های سنجش از دور، قابلیت زیادی در تولید تصاویر چند طیفی ایجاد کرده است. این تصاویر ویژگی‌های مکانی، طیفی و رادیومتریکی مختلفی دارند. امکان اخذ تصاویری که هم قدرت طیفی و هم قدرت مکانی بالایی داشته باشند، به دلیل محدودیت‌های عملی در ساخت سنجنده‌ها امکانپذیر نمی‌باشد (Rogge et al., 2007). برای غلبه بر این مشکل می‌توان از فرایند ادغام تصاویر استفاده کرد. معمولاً فرآیند ادغام تصاویر سبب تخریب اطلاعات طیفی و مکانی موجود در تصاویر مرجع می‌گردد. ادغام داده‌ها در حقیقت تکمیل آنها توسط یکدیگر است، که در کاربردهای مختلفی نظیر واضح سازی تصاویر چندطیفی، بهبود دقت در تصحیح هندسی، بهبود دقت طبقه‌بندی، کشف تغییرات به کمک داده‌های چندزمانی، جایگزینی اطلاعات از دست رفته در یک تصویر به کمک تصویر دیگر و غیره استفاده کرد (Li et al., 2017). ادغام تصاویر در سه سطح مختلف انجام می‌شود که عبارتند از: سطح پیکسل، سطح عارضه و سطح تصمیم‌گیری^۱ (Belgium and Stein, 2019). ادغام تصویر در سطح پیکسل بر مبنای کوچکترین المان تصویر یعنی پیکسل‌ها می‌باشد. ادغام در سطح عوارض نیاز به استخراج عوارض مشخصی از تصاویر دارد. معمولاً جهت استخراج اولیه عوارض از الگوریتم‌های قطعه‌بندی استفاده می‌شود. این عوارض در اصل مجموعه پیکسل‌هایی هستند که بر اساس خصوصیات تصویر اولیه نظیر شدت، بافت، همسایگی و نظایر آن مشخص می‌شوند و ناحیه مشابه حاصل از منابع مختلف با یکدیگر مرتبط شده و سپس تلفیق می‌شوند (Xu et al., 2013). ادغام در سطح تصمیم‌گیری، روشی است بر مبنای پردازش جداگانه تصاویر ورودی و استخراج عوارض هر یک از سنجنده‌ها به صورت مجزا و در مرحله بعد بر مبنای بکارگیری تکنیک‌هایی مختلف اقدام می‌گردد (Xiao et al., 2020). ادغام تصاویر در سطح پیکسل، معمول‌ترین سطح ادغام تصاویر است و هدف به دست آوردن تصویری است که اطلاعات مکانی تصویر پانکروماتیک و اطلاعات طیفی تصویر چندطیفی را همزمان داشته باشد. اکثر سنجنده‌های سنجش از دور از قبیل Geoeye, WorldView Kompsat, Formsat, Ikonos, Spot, Landsat, Quickbird تصاویر پانکروماتیک با قدرت تفکیک مکانی بالا و تصاویر چندطیفی با قدرت تفکیک پایین‌تر تولید می‌کنند. تفاوت قدرت تفکیک مکانی بین تصاویر پانکروماتیک و چندطیفی با نسبت فاصله نمونه‌برداری زمینی آنها به دست می‌آید و بین 1:2 تا 1:5 متغیر می‌باشد، برای مثال ایکونوس با تصویر چندطیفی (4m) و تصویر پانکروماتیک (1m) دارای نسبت 1:4 می‌باشد. این نسبت وقتی تصویر از سنجنده‌های مختلف به دست می‌آید بدتر نیز می‌شود (Hasanlou and Saradjian, 2016; Rodríguez-Esparragón et al., 2017). هنگامی که از یک روش ادغام برای ترکیب تصاویر چند طیفی و پانکروماتیک از یک صحنه که توسط یک ماهواره به دست

1- Decision level

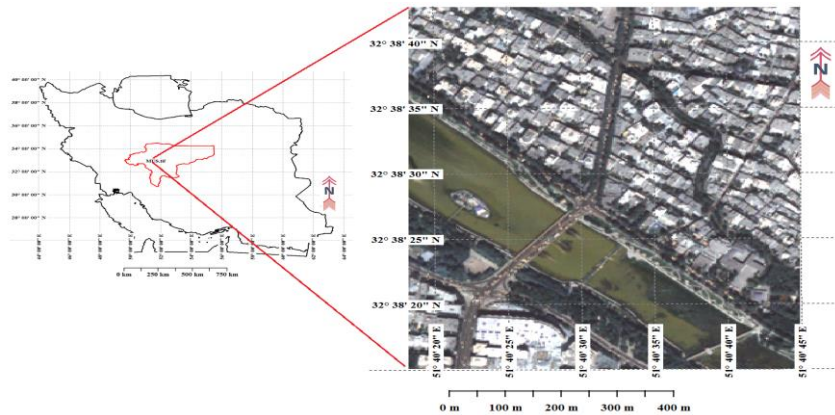
آمده است استفاده می‌شود، این نوع روش‌های ادغام همجوشی یا "pan-sharpening" نامیده می‌شود. کیفیت نتایج روش‌های ادغام همجوشی به دقت و کیفیت محصولات ادغام شده بستگی دارد. علاوه بر کیفیت تصاویر ورودی، عملکرد روش تلفیقی می‌تواند بر کیفیت تصاویر ادغام شده تأثیر بگذارد. بنابراین، روش‌ها و رویکردهای وسیعی از الگوریتم‌ها برای همجوشی تصاویر و ارزیابی کیفیت روش‌های ادغام همجوشی بررسی شده است (Jagalingam and Hegde, 2015; Liu et al., 2020b; Singh et al., 2019) که نشان‌دهنده اهمیت موضوع روش‌های ادغام همجوشی است. با این حال، انتخاب یک روش مناسب یا بهینه از میان تعداد زیادی از روش‌های ادغام همجوشی می‌تواند چالش‌برانگیز باشد. در نتیجه، بسیاری از مقالات تحقیقاتی کارایی روش‌های مختلف ادغام همجوشی را بر اساس روش‌های مختلف ارزیابی کیفیت بررسی کرده‌اند (DadrasJavan et al., 2018; Gogineni et al., 2021; Javan et al., 2021). معمولاً، تحقیقات مختلف پیشین، الگوریتم همجوشی جدیدی را معرفی کرده و عملکرد روش پیشنهادیشان را با برخی از روش‌های مرسوم موجود مقایسه کرده‌اند (برای مثال Diao et al., 2022; Fei et al., 2021; Ghahremani and Ghassemian, 2016; Huang et al., 2015; Liu et al., 2020a; Palsson et al., 2013).

هدف این تحقیق، پیاده‌سازی و بررسی جامع نتایج طیفی و مکانی روش‌های مختلف ادغام تصویر در سطح پیکسل است. به طور خاص، هدف آن ارائه یک تجزیه و تحلیل واضح از عملکرد نسبی روش‌های مختلف ادغام همجوشی است. این تحقیق ۱۵ روش مرسوم ادغام تصاویر را در چهار گروه از روش‌های ادغام همجوشی شامل روش‌های مبتنی بر انتقال، روش‌های ترکیب محاسباتی، روش‌های مبتنی بر فیلتر در حوزه زمان-مکان و فرکانس، روش‌های آماری ادغام تصاویر، پیاده‌سازی و مقایسه کرده است. همچنین جهت بررسی کیفیت نتایج ادغام تصاویر ۱۰ معیار مختلف، شامل ۷ معیار ارزیابی کیفیت طیفی و همچنین ۳ معیار ارزیابی کیفیت مکانی تصاویر ادغام شده را پیاده‌سازی و مورد تجزیه - تحلیل قرار داده است.

۱- مواد و روش‌ها

۱-۲ منطقه مورد مطالعه و داده‌های تحقیق

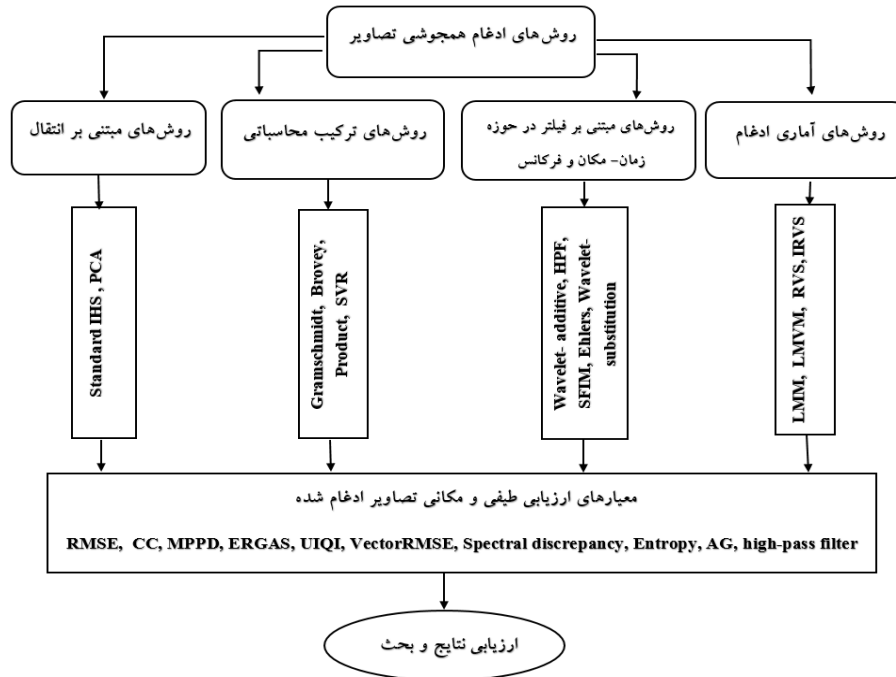
منطقه مورد مطالعه همانطور که در شکل ۱ نشان داده شده است، قسمتی از استان اصفهان بوده با تصاویر ماهواره Quick Bird می‌باشد. این ماهواره جزء پیشرفته‌ترین ماهواره‌های آمریکا بوده و دارای یک باند پانکروماتیک با قدرت تفکیک مکانی ۶۰ سانتیمتر و سه باند رنگی چند طیفی با قدرت تفکیک ۲/۴ متر می‌باشد (Yuan et al., 2018) که با ادغام کردن باندهای مختلف این سنجنده تصویری بدست خواهد آمد که قابلیت برداشت اطلاعات مکانی تا مقیاس حدودی ۱:۲,۰۰۰ را خواهد داشت (Toutin and Cheng, 2002).



شکل (۱): منطقه مورد مطالعه در این تحقیق
Figure (1): The area studied in this research

۲-۱- روش‌های مختلف ادغام همجوشی تصاویر

همانطوری که ذکر شد، در سال‌های اخیر روش‌های متفاوتی به منظور ادغام تصاویر پانکروماتیک و چندطیفی با مزایا و محدودیت‌های گوناگون ارائه گردیده است. در این قسمت تعدادی از پرکاربردترین روش‌های ادغام تصویر و مزایا و معایب آنها بررسی می‌شود. به طور کلی روش‌های مختلف ادغام همجوشی را می‌توان به چهار دسته کلی روش‌های مبتنی بر انتقال، روش‌های عددی (روش‌های ترکیب محاسباتی)، روش‌های مبتنی بر فیلتر، روش‌های چند مقیاسی مبتنی بر تبدیل موجک و روش‌های مبتنی بر آمار تقسیم‌بندی کرد (Javan et al., 2021; Pushparaj and Hegde, 2017). شکل ۲ خلاصه‌ای از فلوچارت تحقیق حاضر را نشان می‌دهد.



شکل (۲): مراحل کار تحقیق

Figure (2): Steps of research work

۲-۲-۱- روش‌های مبتنی بر انتقال

معروف‌ترین روش در این گروه تبدیل IHS استاندارد است. تبدیل رنگی IHS یکی از اساسی‌ترین و عمومی‌ترین روش‌های ادغام تصاویر است که می‌تواند به خوبی اطلاعات مکانی و طیفی یک تصویر استاندارد RGB را از یکدیگر جدا کند (Sulaiman et al., 2021). در این فضا، اطلاعات مکانی معمولاً در غالب مؤلفه شدت (I) و اطلاعات طیفی در مؤلفه‌های چرذگی (H) و اشباع (S) قرار می‌گیرند. تبدیلات مختلفی برای انتقال یک تصویر رنگی از فضای RGB به فضای IHS ارائه شده‌اند. دو مدل رایج این تبدیلات مدل رنگی استوانه‌ای و مدل رنگی مثلثی می‌باشد. روابط مربوط به مدل استوانه‌ای و تبدیل معکوس متناظر به صورت معادله ۱ می‌باشند (Sulaiman et al., 2021).

$$\begin{bmatrix} I \\ v_1 \\ v_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0.577 & 0.577 & 0.577 \\ -0.408 & -0.408 & 0.816 \\ -0.707 & 0.707 & 1.703 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} R \\ G \\ B \end{bmatrix} \quad (1)$$

$$H = \tan^{-1}\left(\frac{v_2}{v_1}\right), S = \sqrt{v_1^2 + v_2^2}$$

$$\begin{bmatrix} R \\ G \\ B \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0.577 & -0.408 & -0.707 \\ 0.577 & -0.408 & 0.816 \\ 0.577 & 0.816 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I \\ v_1 \\ v_2 \end{bmatrix}$$

روش مرسوم دیگر در این گروه روش تجزیه و تحلیل مؤلفه‌های اصلی (Principal Component Analysis - PCA) است. تجزیه و تحلیل مؤلفه‌های اصلی یک روش آماری است که با کاهش افزونگی داده‌ها، تصاویر به هم وابسته چندمتغیره را به تصاویر ناهمبسته جدید تبدیل می‌کند (Ghadjati et al., 2019). مؤلفه اول PCA حاوی اطلاعاتی است که بیشترین واریانس را در بین مؤلفه‌های دیگر دارد و لذا بیشترین شباهت را به تصویر با قدرت تفکیک بالاتر دارد. بر این اساس در این روش ابتدا تصویر چندطیفی به فضای PCA تبدیل شده، سپس هیستوگرام تصویر با قدرت تفکیک بالا با هیستوگرام مؤلفه اول همسان شده و این مؤلفه با تصویر مذکور جایگزین می‌شود. پس از این مرحله تبدیل معکوس PCA انجام می‌گردد و داده‌ها به فضای ابتدایی تبدیل خواهند شد.

۲-۲-۲- روش‌های ترکیب محاسباتی

در این روش‌ها عملیات محاسباتی شامل ضرب، تقسیم، جمع و تفریق به شکل‌های مختلف ترکیب می‌شود تا یک ادغام مؤثر صورت گیرد. مشهورترین روش در این گروه، روش گرام-اشمیت (Gram-Schmidt) است. این تبدیل توسط (Laben, 2000) برای ادغام تصاویر مورد استفاده قرار گرفت. تبدیل گرام-اشمیت یک روش رایج مورد استفاده در جبر خطی و آماره‌های چندمتغیره بوده و برای متعامد کردن یک ماتریس یا باندهای یک تصویر رقومی استفاده می‌شود. متعامد کردن داده، اطلاعات تکراری و اضافی که در چندین باند وجود دارد را حذف می‌کند. در این روش از تبدیل بهبود یافته گرام-اشمیت استفاده شده است به این ترتیب که هر پیکسل باند قبل از متعامدسازی از میانگین باند کم می‌شود. تعدیل آماره‌های میانگین و انحراف معیار تصویر پانکروماتیک با رزولوشن بالا (P) با آماره‌های میانگین و انحراف معیار باند اول تبدیل GS (GS1) با استفاده از معادلات ۲ تا ۴ محاسبه می‌گردد:

$$\begin{aligned} \text{Modified } P &= (P \times \text{Gain}) + \text{Bias} & (۲) \\ \text{Gain} &= \frac{\sigma_{GS1}}{\sigma_P} & (۳) \\ \text{Bias} &= \mu_{GS1} - (\text{Gain} \times \mu_P) & (۴) \end{aligned}$$

μ میانگین و σ انحراف معیار می‌باشد. برای شبیه‌سازی تصویر پانکروماتیک با رزولوشن کم، ابتدا باندهای چندطیفی با رزولوشن کم باهم ترکیب شده و یک باند پانکروماتیک با رزولوشن کم تولید می‌کنند. در این روش وزن‌های مناسب محاسبه شده و در فرایند ترکیب استفاده شود. شکل ۵ پاسخ طیفی تصویر چندطیفی فرضی با چهار باند آبی (B)، سبز (G)، قرمز (R) و مادون قرمز نزدیک (NIR) و پاسخ طیفی (SR) و پراکنش نوری

(OT) باند پانکروماتیک را نمایش می‌دهد. وزن‌ها برای هر کدام از باندها با استفاده از معادلات ۵ تا ۸ محاسبه می‌شود (Yilmaz et al., 2020):

$$G_{wt} = \int_{0.5}^{0.6} OT_G(\lambda) * SR_G(\lambda) * SR_P(\lambda) \quad (۶) \quad B_{wt} = \int_{0.4}^{0.5} OT_B(\lambda) * SR_B(\lambda) * SR_P(\lambda) \quad (۵)$$

$$NIR_{wt} = \int_{0.7}^{0.9} OT_{NIR}(\lambda) * SR_{NIR}(\lambda) * SR_P(\lambda) \quad (۸) \quad R_{wt} = \int_{0.6}^{0.7} OT_R(\lambda) * SR_R(\lambda) * SR_P(\lambda) \quad (۷)$$

وقتی وزن‌های مناسب محاسبه شد، تصویر پانکروماتیک با رزولوشن کم به صورت معادله ۹ تولید می‌شود:

$$\tilde{P} = (B * B_{wt}) + (G * G_{wt}) + (NIR * NIR_{wt}) \quad (۹)$$

روش دوم در این گروه روش Brovey است. در این روش ابتدا باندهای تصویر چندطیفی نرمال شده و سپس در تصویر با قدرت تفکیک بالا ضرب می‌شوند (Shahdoosti, 2017). روش Brovey را به صورت معادله ۱۰ محاسبه کرد.

$$BT_i = \frac{MS_i}{\sum_i^n MS_i} PAN \quad (۱۰)$$

روش سوم در این گروه، روش انتقال ضرب است. این روش از رابطه ریاضی ۱۱ به منظور ادغام داده‌ها استفاده می‌کند. به این صورت که با ضرب پیکسل‌های دو تصویر در یکدیگر تصویر ادغام شده حاصل می‌شود.

$$ML_{ijk} = (XS_{ijk} \times PN_{ij})^{1/2} \quad (۱۱)$$

در این رابطه ML_{ijk} ، XS_{ijk} و PN_{ij} به ترتیب تصویر ادغام شده، چند طیفی و تصویر پانکروماتیک می‌باشد. روش چهارم در این گروه، روش SVR^1 است (Yilmaz et al., 2021). روش SVR طبق رابطه ۱۲ عمل می‌کند.

$$XSP_i = Pan_H \frac{XS_{Hi}}{Pan_{HSyn}} \quad (۱۲)$$

در رابطه بالا XSP_i و Pan_H به ترتیب درجه خاکستری باند i تصویر ادغام شده و درجه خاکستری تصویر پانکروماتیک اصلی هستند. XS_{Hi} درجه خاکستری باند i تصویر چندطیفی است و Pan_{HSyn} درجه خاکستری

تصویر پانکروماتیکی است که به صورت شبیه‌سازی شده طبق رابطه ۱۳ به دست می‌آید. همچنین به منظور محاسبه پارامتر φ_i ، از معادله ۱۴ استفاده می‌شود.

$$Pan_H = \sum \varphi_i X S_{Hi} \quad (14) \quad Pan_{HSyn} = \sum \varphi_i X S_{Hi} \quad (13)$$

در این رابطه پارامتر φ_i مستقیماً از طریق آنالیز رگرسیون چندگانه بین تصویر پانکروماتیک و تصاویر چندطیفی ایجاد می‌شود. از معایب این روش آن است که برای هر تصویر از یک ماهواره بایستی آنالیز رگرسیون چندگانه به صورت جداگانه صورت پذیرد که این امر بار محاسباتی را بالا خواهد برد. روش پنجم در این گروه، روش $ISVR^1$ است. به منظور حل کردن مشکلات SVR و روش بهبود یافته ISVR پیشنهاد شد. تنها تفاوتی که این روش با روش SVR دارد در این است که در این روش ضرایب φ_i به صورت ساده و کلی‌تر به دست می‌آید. روش پیشنهادی براساس یک فرض اساسی است و آنهم اینکه رادیانس باند پانکروماتیک شبیه‌سازی شده می‌تواند از طریق ترکیب رادیانس باندهای چند طیفی به دست آید (Wang et al., 2008). بنابراین در این روش تصویر پانکروماتیک شبیه‌سازی شده می‌تواند طبق معادله ۱۵ به دست آید.

$$Pan_{HSyn} = X S_{H1} + X S_{H2} + \dots + X S_{Hn} + \left(\frac{X S_{H1}}{\lambda_{1,2} - \lambda_{1,1}} + \frac{X S_{H2}}{\lambda_{2,2} - \lambda_{2,1}} \right) \times \frac{\lambda_{2,1} - \lambda_{1,2}}{2} + \left(\frac{X S_{H2}}{\lambda_{2,2} - \lambda_{2,1}} + \frac{X S_{H3}}{\lambda_{3,2} - \lambda_{3,1}} \right) \times \frac{\lambda_{3,1} - \lambda_{2,2}}{2} + \dots \quad (15)$$

می‌توان رابطه ۱۵ را به صورت رابطه ۱۳ بازنویسی کرد، با این تفاوت که φ_i به صورت معادله ۱۶ محاسبه می‌شود (Wang et al., 2008).

$$\varphi_i = 1 + t_1 + t_2 \quad (16) \quad \begin{cases} t_1 = \begin{cases} \frac{\lambda_{i,1} - \lambda_{(-1),2}}{2(\lambda_{i,2} - \lambda_{i,1})} & (2 \leq i < n) \\ 0 & (i = 1) \end{cases} \\ t_2 = \begin{cases} \frac{\lambda_{(i+1),1} - \lambda_{i,2}}{2(\lambda_{i,2} - \lambda_{i,1})} & (1 \leq i < n) \\ 0 & (i = n) \end{cases} \end{cases}$$

در این رابطه $\lambda_{i,1}$ و $\lambda_{i,2}$ به ترتیب طول موج ابتدایی و انتهایی باند i از تصویر پانکروماتیک و n تعداد باندهای طیفی تصویر اولیه می‌باشد.

۳-۲-۲- روش‌های مبتنی بر فیلتر در حوزه زمان- مکان و فرکانس

روش اول در این گروه، روش ویولت است. ویولت تصویر را به مجموعه‌ای از تصاویر مولتی رزولوشن به همراه ضرایب ویولت برای هر سطح رزولوشن تجزیه می‌کند (Chai et al., 2017). مفاهیم و تئوری آنالیز مولتی رزولوشن بر مبنای ویولت به این صورت می‌باشد که فرض کنید، $\{s_{m,n}^{j+1}, m, n \in Z\}$ تصویر دوبعدی در رزولوشن $j+1$ می‌باشد که Z یک عدد صحیح می‌باشد. M و n تعداد سطر و ستون تصویر و متعلق به مجموعه اعداد صحیح Z می‌باشد. تبدیل مولتی رزولوشن ویولت به صورت معادله (۱۷) بیان می‌شود (Yang et al., 2014):

$$\begin{cases} d_{m,n}^{j2} = \frac{1}{2} \sum_{k,l \in Z} S_{k,1}^{j+1} g_{k-2m} h_{l-2n} & d_{m,n}^{j3} = \frac{1}{2} \sum_{k,l \in Z} S_{k,1}^{j+1} g_{k-2m} g_{l-2n} \\ S_{m,n}^j = \frac{1}{2} \sum_{k,l \in Z} S_{k,l}^{j+1} h_{k-2m} h_{l-2n} & d_{m,n}^{j1} = \frac{1}{2} \sum_{k,l \in Z} S_{k,l}^{j+1} h_{k-2m} g_{l-2n} \end{cases} \quad (17)$$

s^j تصویر تقریبی در رزولوشن j می‌باشد که با اعمال دو فیلتر پایین گذر بر روی تصویر اولیه به دست می‌آید (معادل LL^p). d^{j1}, d^{j2}, d^{j3} ضریب ویولت شامل جزئیات مکانی محلی می‌باشد (به ترتیب معادل HL^p, HHP, LHP). g_n بانک فیلتر بالاگذر و h_n بانک فیلتر پایین گذر می‌باشد. تبدیل معکوس ویولت برای بازسازی تصویر با رزولوشن بالا نیز به صورت معادله (۱۸) می‌باشد (Yang et al., 2014):

$$S_{m,n}^{j+1} = \frac{1}{2} \left(\sum_{k,l \in Z} S_{k,1}^i \tilde{h}_{2k-m} \tilde{h}_{2l-n} + \sum_{k,l \in Z} d_{k,h}^{j1} \tilde{h}_{2k-m} \tilde{g}_{2l-n} + \sum_{k,l \in Z} d_{k,1}^{j2} \tilde{g}_{2k-m} \tilde{h}_{2l-n} + \sum_{k,l \in Z} d_{k,1}^{j3} \tilde{g}_{2k-m} \tilde{g}_{2l-n} \right) \quad (18)$$

\tilde{g}_n, \tilde{h}_n با معادله (۱۹) تعریف می‌شوند.

$$g_n = (-1)^{-1+n} h_{1-n} \quad \tilde{h}_n = h_{1-n} \quad \tilde{g}_n = g_{1-n} \quad (19)$$

در روش‌های ادغام تصاویر مبتنی بر تبدیل ویولت دو روش کلی جایگزینی و افزودنی وجود دارد. در روش جایگزینی به جای مولفه با قدرت تفکیک مکانی پایین تصویر پانکروماتیک در فضای ویولت، هر باند از تصویر چندطیفی جایگزین می‌شود. ولی در روش افزودنی، مولفه‌های جزئی تصویر پانکروماتیک در فضای ویولت، به داده‌های تصویر چندطیفی اضافه می‌گردند. روش دوم در این گروه، روش HPF است. در این روش فرکانس‌های بالای تصویر پانکروماتیک که نشان دهنده جزئیات هستند به تصاویر چندطیفی تزریق می‌شوند تا به این ترتیب

قدرت تفکیک مکانی تصاویر چندطیفی بهتر شود که این کار توسط معادله ۲۰ صورت می‌پذیرد (Gangkofner et al., 2007).

$$F_k(i, j) = M_k(i, j) + HPH(i, j) \quad (20)$$

در رابطه بالا F_k ، M_k و HPH به ترتیب نشان‌دهنده تصویر ادغام شده، تصویر چندطیفی و تصویر حاصل از اعمال یک فیلتر بالاگذر بر روی تصویر پانکروماتیک هستند. روش سوم در این گروه، روش SFIM^۱ است. این روش از یک انتقال بر اساس فیلتر smoothing برای ادغام داده‌ها استفاده می‌کند. تصویر ادغام شده در این روش با استفاده از معادله ۲۱ به دست می‌آید (Tu et al., 2006).

$$B_{SFIM_i} = \sum_j \sum_k \frac{B_{low_{jk}} \times B_{high_{jk}}}{B_{mean_{jk}}} \quad (21)$$

در این رابطه B_{SFIM} ، B_{low} و B_{high} به ترتیب تصویر ادغام شده، چندطیفی و پانکروماتیک هستند و B_{mean} تصویری است که به وسیله یک فیلتر پایین گذر بر روی تصویر اعمال می‌شود. روش چهارم در این گروه، روش Ehlers مبتنی بر فیلترینگ در حوزه فرکانس است. در این روش به جای جایگزین کردن کل مؤلفه شدت در تبدیل IHS استاندارد، روش Ehlers فقط جزء فرکانس بالای مؤلفه شدت را با جزء فرکانس بالای تصویر پانکروماتیک اولیه جایگزین می‌کند (Klonus and Ehlers, 2007). ایده اساسی این روش بهبود دادن تصویر با رزولوشن بالای پانکروماتیک ورودی است تا به مؤلفه شدت تصویر چندطیفی ورودی شبیه تر شود (Ehlers, 2004). فیلترینگ تصویر در فضای فرکانس به طور وسیع در پردازش تصویر استفاده می‌شود زیرا کانولوشن در فضای فرکانس از نظر محاسباتی سریع‌تر از کانولوشن معمولی در فضای مکان است، مخصوصاً اگر سائز فیلتر افزایش یابد (Klonus and Ehlers, 2007). تبدیل فوریه یکی از مهم‌ترین ابزار پردازش تصویر است که برای تجزیه تصویر به مؤلفه‌های سینوسی و کسینوسی آن استفاده می‌شود. تبدیل فوریه‌ی یک تابع دوبعدی با معادلات ۲۲ و ۲۳ بیان می‌شود (AL-HELALI et al., 2021):

$$H(u, v) = \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} h(x, y) e^{-j2\pi(ux+vy)} dx dy \quad (23)$$

$$j = \sqrt{-1} \quad a_{na} e^{\pm jx} = \cos(x) \pm j \sin(x) \quad (24)$$

تصویر ورودی در فضای مکان بوده و تبدیل خروجی، تصویر را در فضای فوریه یا فرکانس نشان می‌دهد. در تصویر فضای فوریه هر نقطه یک فرکانس خاص را نشان می‌دهد. تصویر در فضای فوریه با عکس تبدیل فوریه مطابق معادله ۲۵ به فضای مکان برده می‌شود.

$$h(x, y) = \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} H(u, v) e^{-j2\pi(ux+vy)} dudv \quad (25)$$

از آنجایی که تصویر رقومی شامل تعداد محدودی از نمونه‌های گسسته است (همان پیکسل‌ها)، تبدیل فوریه گسسته (DFT) در آنالیز فوریه تصویر استفاده می‌شود. تبدیل فوریه سریع (FFT) از نظر محاسباتی کارآمدتر از DFT می‌باشد (Li and Jiang, 2020).

۴-۲-۲- روش‌های آماری ادغام تصاویر

روش‌های آماری یک سری متغیرها و عملگرهای آماری را بر روی باندهای طیفی و پانکروماتیک اعمال می‌کنند که از جمله این متغیرهای آماری می‌توان به میانگین و واریانس اشاره کرد. در این مطالعه از بین روش‌های ادغام مختلف سه روش مطرح با نام‌های LMM^۱، LMVM^۲ و RVS^۳ مورد مطالعه و ارزیابی قرار می‌گیرند (AI-Wassai et al., 2011). در الگوریتم LMM محاسبات به صورت محلی و براساس یک پنجره جستجو به اندازه‌ی 3 × 3 صورت می‌پذیرد. در این روش محاسبات مربوط به هر پنجره طبق معادله ۲۶ صورت می‌پذیرد.

$$F_{k(i,j)} = P_{(i,j)} \times \frac{\bar{M}_{k(i,j)}(w,h)}{\bar{P}_{(i,j)}(w,h)} \quad (26)$$

در این رابطه $F_{k(i,j)}$ تصویر ادغام شده در باند k ، $P_{(i,j)}$ و $M_{k(i,j)}$ به ترتیب تصویر پانکروماتیک و تصویر هم‌اندازه شده با تصویر پانکروماتیک هستند. هم‌چنین $\bar{M}_{k(i,j)}(w,h)$ و $\bar{P}_{(i,j)}(w,h)$ به ترتیب میانگین محاسبه شده برای تصویر فراطیفی و پانکروماتیک در پنجره مورد نظر هستند. در الگوریتم LMVM نیز محاسبات در هر پنجره جستجو با استفاده از معادله ۲۷ صورت می‌پذیرد (Mhangara et al., 2020).

$$F_{k(i,j)} = \frac{(P_{(i,j)} \bar{P}_{(i,j)}) \sigma_{M_{k(i,j)}(w,h)}}{\sigma_{P_{(i,j)}(w,h)}} + \bar{M}_{k(i,j)} \quad (27)$$

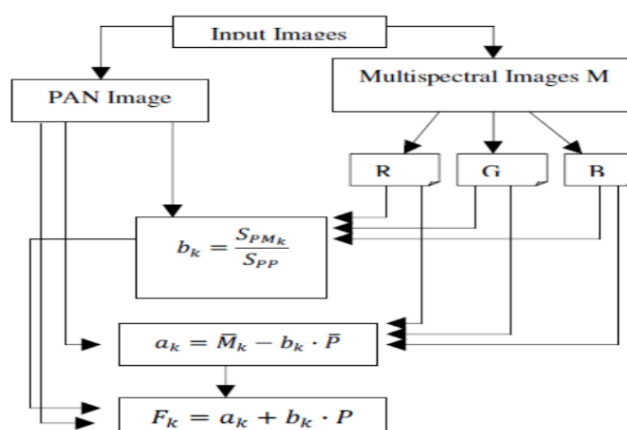
در رابطه بالا σ ، انحراف معیار محلی است که برای هر پنجره محاسبه می‌گردد. اگرچه اندازه‌های کوچک پنجره کمترین اعوجاج را ایجاد می‌کند اما باعث اعوجاجات طیفی بیشتر نیز خواهد شد. یک نکته در این روش بسیار

1- Local mean matching
2- Local mean and variance matching
3- Regression variable substitution

حایز اهمیت است و آنهم اینکه در حالتی که ابعاد پنجره کوچک است احتمال اینکه انحراف معیار پنجره محلی در تصویر پانکروماتیک صفر شود بالا است که در این حالت بایستی مقدار انحراف معیار با یک عدد کوچک نزدیک به صفر جایگزین گردد (Cornet et al., 2001). روش RVS براساس آنالیز رگرسیون خطی می باشد که در نرم افزار PCI نیز به عنوان یک ماژول کاربردی توسعه داده شده است (Abbas et al., 2019). تصویر ادغام شده در این حالت می توان به وسیله یک رگرسیون خطی که رابطه آن به صورت معادله ۲۸ است ایجاد می گردد:

$$F_k = a_k + b_k \cdot P \quad (28)$$

در این روش پارامتر اساسی a_k و مقیاس دهی b_k می توانند به وسیله کمترین مربعات بین تصویر چندطیفی و پانکروماتیک ایجاد گردند. نحوه عملکرد این الگوریتم در شکل ۳ آورده شده است.



شکل (۳) نحوه عملکرد روش RVS (Al-Wassai et al., 2011)

Figure (3): The RVS method (Al-Wassai et al., 2011)

البته از آنجایی که در این روش نهایتاً تصاویر ادغام شده با تکیه بر تصویر پانکروماتیک حاصل می گردند تصویر خاصیت رنگی بودن خود را تا حدود زیادی از دست می دهد. برای این منظور در مرحله آخر تصاویر ادغام شده براساس تصویر پانکروماتیکی که هیستوگرام آن متناظر با باند مورد نظر درآمده محاسبه گردد.

۲- روش های ارزیابی کیفیت ادغام تصاویر

مسئله مهمی که در ادغام تصاویر مطرح است ارزیابی کیفیت تصویر ادغام شده می باشد. در مقالات تحقیقاتی تعدادی زیادی از روش های ارزیابی کیفیت ادغام تصاویر ارائه شده که می توان به دو بخش اصلی تقسیم بندی نمود. اول: روش های کیفی که شامل مقایسه بصری رنگ بین تصاویر چندطیفی اولیه و ادغام شده و جزئیات

مکانی بین تصاویر پانکروماتیک اولیه و ادغام شده می‌باشد. دوم: روش‌های کمی که به دو قسمت ارزیابی کیفیت طیفی و ارزیابی کیفیت مکانی تقسیم می‌شود.

۳-۲- معیارهای ارزیابی طیفی و مکانی تصاویر ادغام شده

معیارهای مختلفی برای ارزیابی کیفیت طیفی و مکانی تصاویر ادغام شده مطرح شده است که تعدادی مرسوم ترین آنها که در این تحقیق مطابق جدول ۱ استفاده شده است.

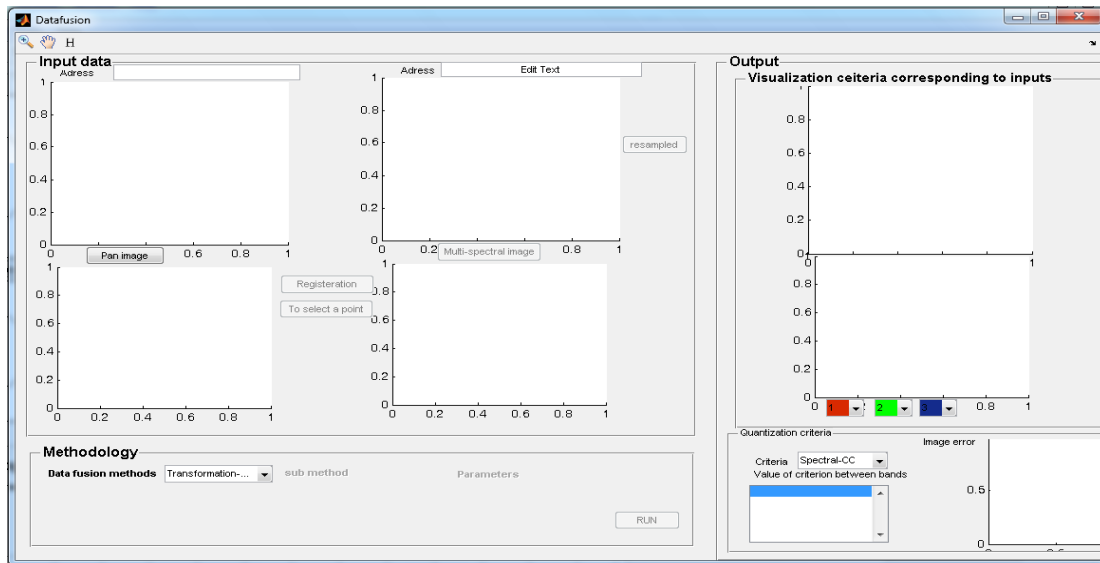
جدول (۱): معیارهای مختلفی برای ارزیابی کیفیت طیفی و مکانی روش‌های ادغام تصاویر

Table (1): The spectral and spatial criteria of image fusion methods

ردیف	نام معیار	معیار طیفی یا مکانی	مقدار بهینه معیار	رفرنس
۱	خطای جذر میانگین مربعی (RMSE)	طیفی	کمترین	(Wald, 2002)
۲	ضریب همبستگی (CC)	طیفی	بیشترین	(Aiazzi et al., 2012)
۳	انحراف برای هر پیکسل (MPPD)	طیفی	کمترین	(Wald, 2002) و (WG, 2008)
۴	خطای کلی بدون بعد نسبی (ERGAS)	طیفی	کمترین	(Wald, 2000)
۵	شاخص کیفیت کلی تصویر (UIQI)	طیفی	کمترین	(Wang and Bovik, 2002)
۶	خطای جذر میانگین مربعی برداری (VectorRMSE)	طیفی	کمترین	(May, 2018)
۷	اختلاف طیفی (Spectral discrepancy)	طیفی	بیشترین	(Bhavana and Krishnappa, 2015)
۸	انترپی Entropy	مکانی	بیشترین	(Han et al., 2008)
۹	گرادیان میانگین (AG)	مکانی	بیشترین	(Yakhdani and Azizi, 2010)
۱۰	اعمال فیلتر بالاگذر (high-pass)	مکانی	بیشترین	(Zhou et al., 1998)

۴- پایاده‌سازی، نتایج و بحث

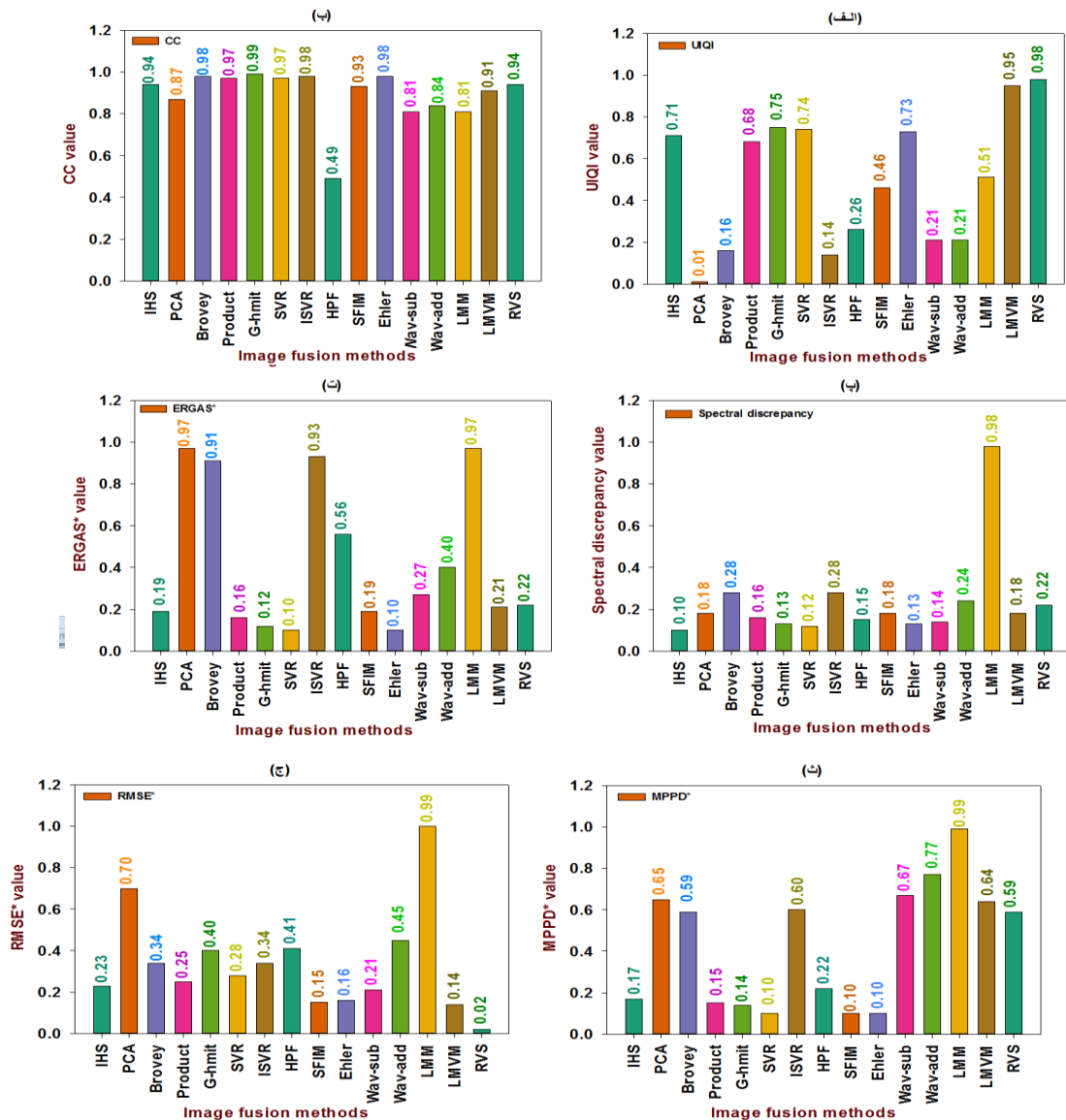
در این مطالعه از برنامه متلب جهت پایاده‌سازی روش‌های مختلف ادغام تصاویر استفاده گردید. برای این منظور یک GUI مطابق شکل (۴) طراحی شد.



شکل (۴): نمایی کلی از GUI پیاده‌سازی شده در این تحقیق
Figure (4): An overview of the GUI implemented in this research

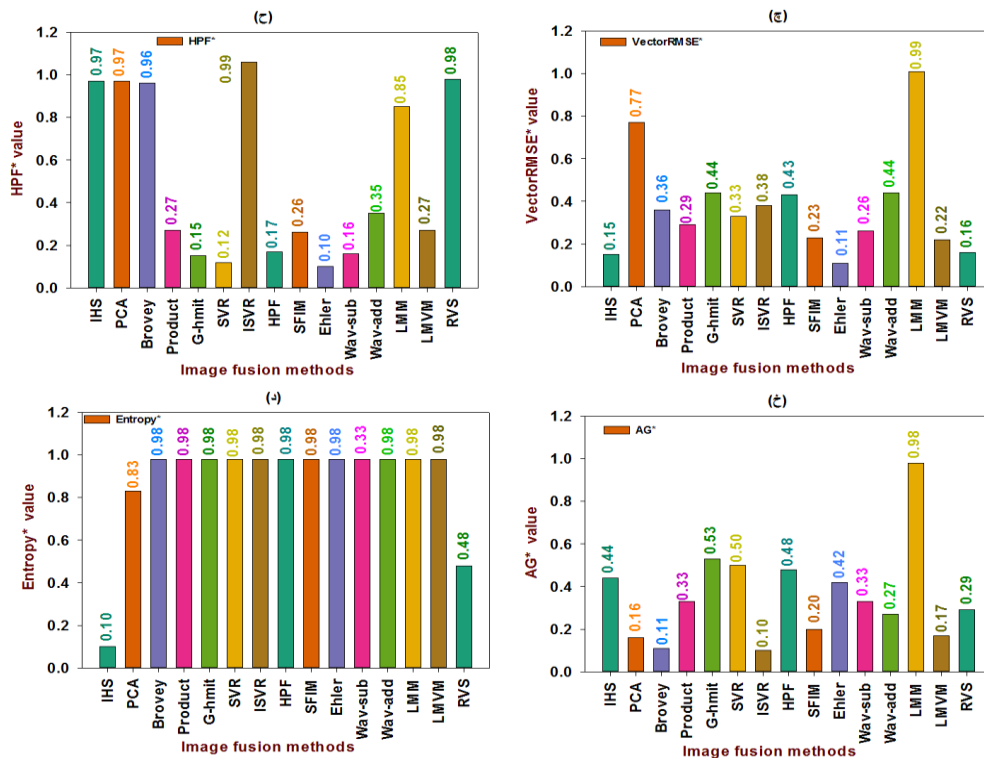
این GUI از بخش‌های ورودی داده، روش‌ها و خروجی و ارزیابی کمی و کیفی نتایج تشکیل شده است. در قسمت ورودی، ابتدا داده پانکروماتیک و چند طیفی فراخوانی می‌شوند، سپس با استفاده از دکمه registration این دو تصویر هم‌رجستر می‌شوند. از آنجایی که به‌منظور نظارت بصری لازم است تا بر روی بخشی از تصویر تمرکز کرد، این قابلیت در قسمت ورودی گذارده شده است که کاربر بتواند یک ناحیه را انتخاب کند. بعد از فراخوانی داده‌ها، کاربر می‌تواند از بخش متدولوژی، روش مورد نظر خود را انتخاب کند. برنامه هر یک از این روش‌ها با پیشوند IF (که مخفف Image Fusion است) به‌علاوه نام اختصاری آن روش مشخص شده است. به عنوان مثال IF_ISVR.m نشان‌دهنده کد روش ISVR است که در متلب پیاده‌سازی شده است. به علاوه در قسمت خروجی ۱۰ معیار برای ارزیابی روش‌های ادغام وجود دارد که کاربر می‌تواند با انتخاب هر یک از آنها روش خود را ارزیابی کند. از بین ۱۰ معیار ارزشیابی کیفیت طیفی و مکانی تصاویر و روش‌های ادغام تصاویر، معیار انترویی، در اکثر روش‌ها رنج یکسانی نشان داد که روش مناسبی برای مقایسه کیفیت طیفی و مکانی روش‌های ادغام تصاویر نمی‌باشد، ولی مقادیر معیارهای ارزشیابی کیفیت طیفی و مکانی دیگر، تفاوت محسوس بین روش‌های ادغام تصاویر می‌باشد. برای بررسی روش‌های مورد بحث در این تحقیق معیارها در چهار حالت با یکدیگر مقایسه شده‌اند. در حالت اول بررسی، تک تک پارامترهای ارزشیابی کیفیت طیفی و مکانی تصاویر و

روش‌های ادغام تصاویر در نظر گرفته شدند. در شکل ۵ مقادیر نرمال شده ۱۰ معیار ارزشیابی کیفیت طیفی و مکانی تصاویر ادغام شده نشان داده شده است.



شکل (۵): کیفیت مکانی و طیفی روش‌های ادغام تصاویر

Figure (5): Spatial and spectral quality of image fusion methods

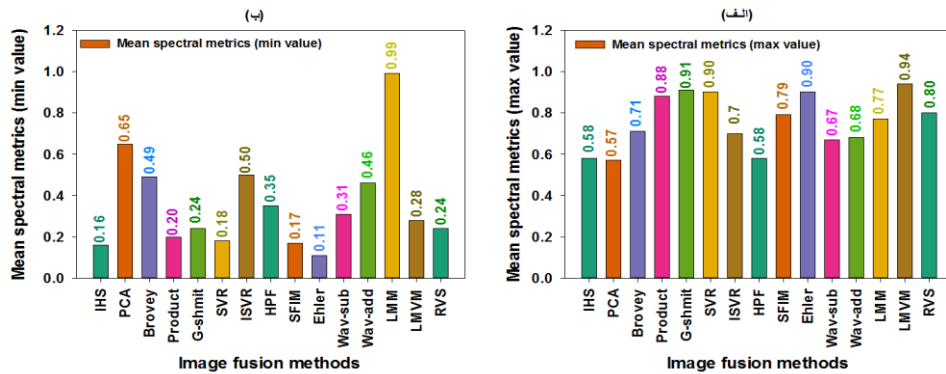


شکل (۵): ادامه کیفیت مکانی و طیفی روش‌های ادغام تصاویر
Figure (5): Continuation of spatial and spectral quality of image fusion methods

با در نظر گرفتن معیار UIQI (شکل ۷ب) به ترتیب روش‌های IHS، PCA، Brovey، Product، G-hmit، SVR، ISVR، HPF، SFIM، Ehler، Wav-sub، Wav-add، LMM، LMVM و RVS. Gramshmit، SVR، Ehler و RVS بیشترین مقدار (رنجی بین ۹۵ تا ۷۵ درصد) کیفیت طیفی تصاویر ادغام شده را حفظ می‌کنند. همین روند در پارامتر EGARS (شکل ۵ت) در روش‌های SVR، Ehler و LMVM به ترتیب کیفیت طیفی تصاویر ادغام شده را (در رنجی بین ۹۰ تا ۸۰ درصد) حفظ کرده‌اند. همین روند در ارزیابی سایر معیارهای ارزشیابی کیفیت طیفی شامل شکل‌های (۵ت، ۵چ) همین روند بین معیارهای مذکور تکرار شده است. همچنین با بررسی معیارهای ارزشیابی کیفیت مکانی تصاویر و روش‌های ادغام تصاویر در شکل‌های (۵ح و ۵خ) با در نظر گرفتن معیارهای HPF و AG روش‌های IHS، PCA، Brovey، RVS، ISVR، Brovey به ترتیب بالای ۹۵ تا ۹۸ درصد اطلاعات مکانی را در تصاویر ادغام شده حفظ کرده‌اند. بجز روش RVS که هم اطلاعات طیفی و هم اطلاعات مکانی را در تصاویر ادغام شده حفظ می‌کند، بقیه روش‌های مذکور با اینکه اطلاعات مکانی را در تصاویر ادغام شده حفظ می‌کنند، در مقابل در حفظ اطلاعات طیفی عملکرد ضعیفی دارند. علاوه بر آن، با در نظر گرفتن دیگر پارامتر مکانی AG، روش‌های SVR، Gramshmit، LMM و بهترین عملکرد در حفظ اطلاعات

مکانی داشتند. با در نظر گرفتن این پارامتر روش Gramshmit و SVR هم در حفظ اطلاعات طیفی و هم مکانی نسبت به دیگر روش‌ها پیشقدم بوده‌اند.

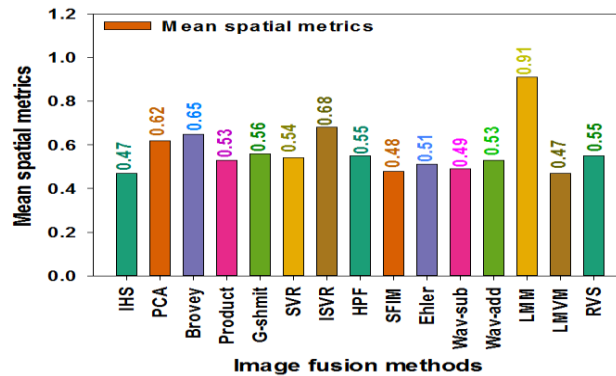
در حالت دوم بررسی، میانگین تمامی ۷ معیار ارزیابی طیفی تصاویر ادغام شده در نظر گرفته شد. با توجه به اینکه مقادیر بهینه این معیارها با هم متفاوت هستند بر این اساس این معیارها به دو دسته تقسیم بندی و سپس میانگین آنها در نظر گرفته شد که در شکل ۶ الف و ب نشان داده شده است. با در نظر گرفتن میانگین پ معیارهای ارزیابی طیفی هم جهت (حداکثر مقدار) در شکل ۶ الف، روش‌های LMVM، Gramshmit، SVR و Ehler به ترتیب بالای ۹۰ درصد اطلاعات طیفی تصاویر ادغام شده را حفظ می‌کنند. همچنین با در نظر گرفتن میانگین معیارهای ارزیابی طیفی هم جهت (حداقل مقدار) در شکل ۶ ب، روش‌های SVR، Ehler، SFIM و IHS به ترتیب بهترین عملکرد را در حفظ اطلاعات طیفی تصاویر ادغام شده را دارند.



شکل (۶): میانگین کیفیت طیفی روش‌های ادغام تصاویر

Figure (6): Average spectral quality of image fusion methods

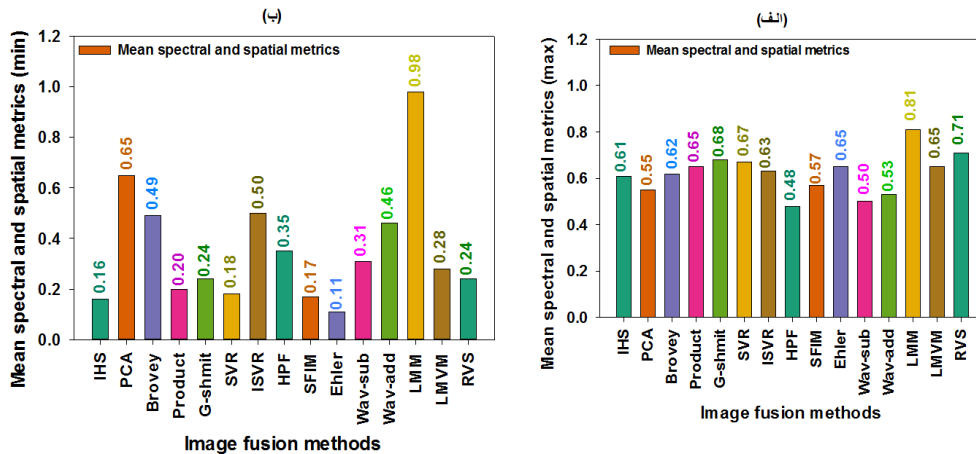
در حالت سوم بررسی میانگین معیارهای ارزیابی مکانی هم جهت تصاویر ادغام شده مورد بررسی قرار گرفت (شکل ۷).



شکل (۷): میانگین کیفیت مکانی روش‌های ادغام تصاویر

Figure (7): Average spatial quality of image fusion methods

نتایج این حالت نشان داد، روش‌های IHS، PCA، Brovey، ISVR، LMM به ترتیب بهترین عملکرد را در حفظ اطلاعات مکانی تصاویر ادغام شده را دارند. در حالت چهارم بررسی، با در نظر گرفتن میانگین پارامترهای ارزیابی طیفی و مکانی هم جهت (حداقل و حداکثر مقدار) بصورت توأم مورد بررسی قرار گرفت.



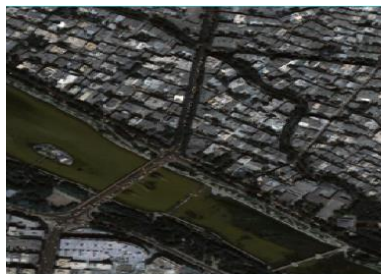
شکل (۸): میانگین کیفیت طیفی - مکانی روش‌های ادغام تصاویر

Figure (8): Average spectral-spatial quality of image fusion methods

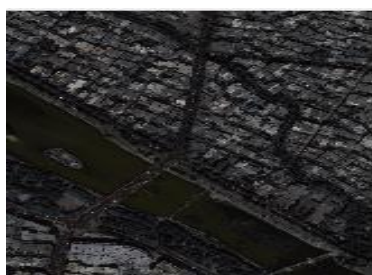
نتایج این حالت نشان داد، میانگین کیفیت طیفی - مکانی روش‌های ادغام تصاویر در حالت حداکثر، به ترتیب روش‌های IHS، PCA، Brovey، ISVR، LMM به ترتیب بهترین عملکرد نشان دادند. همچنین با در نظر گرفتن میانگین کیفیت طیفی - مکانی روش‌های ادغام تصاویر در حالت حداقل، به ترتیب روش‌های IHS، SFIM، SVR، Ehler در حفظ اطلاعات طیفی و مکانی در تصاویر ادغام شده بهترین عملکرد را داشته‌اند.

در این تحقیق بررسی‌های انجام گرفته، نشان داد در مجموع به ترتیب روش‌های SVR، Ehler و Gramshmit در حفظ اطلاعات طیفی و مکانی در تصاویر ادغام شده بهترین عملکرد را نسبت به سایر روش‌ها دارند و تقریباً از ۸۰ تا ۹۵ درصد اطلاعات را حفظ می‌کنند.

تصویر چندطیفی پایه



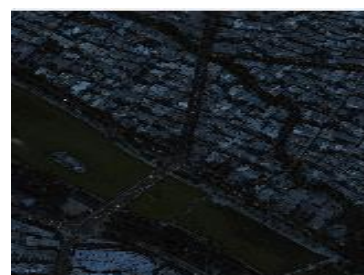
روش‌ها با بهترین عملکرد توام طیفی - مکانی



Gramshmit



Ehler



SVR

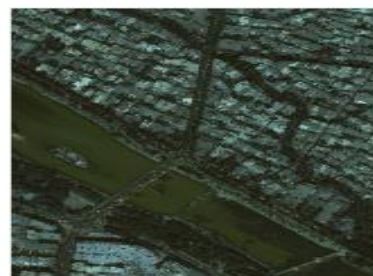
روش‌ها با ضعیف‌ترین عملکرد توام طیفی - مکانی



LMM



PCA



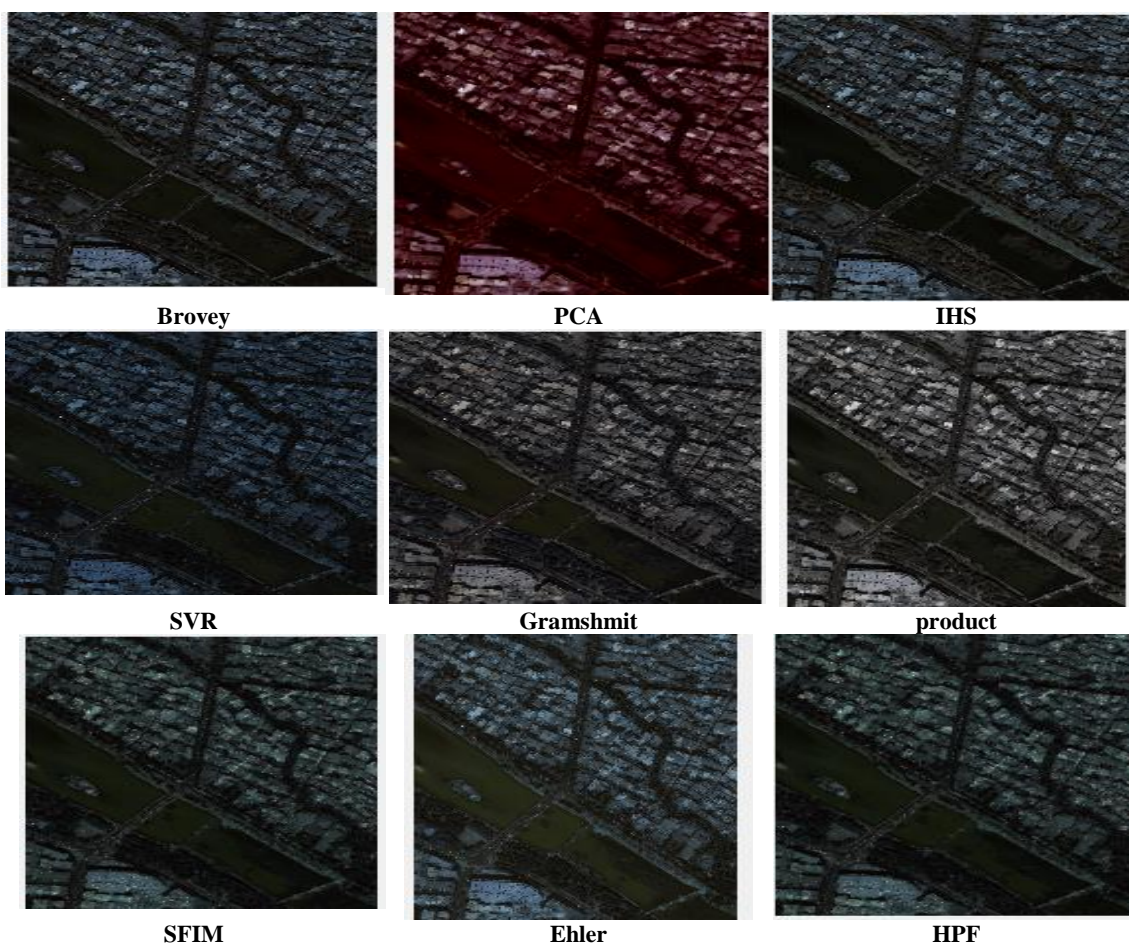
Wavelet- substitution

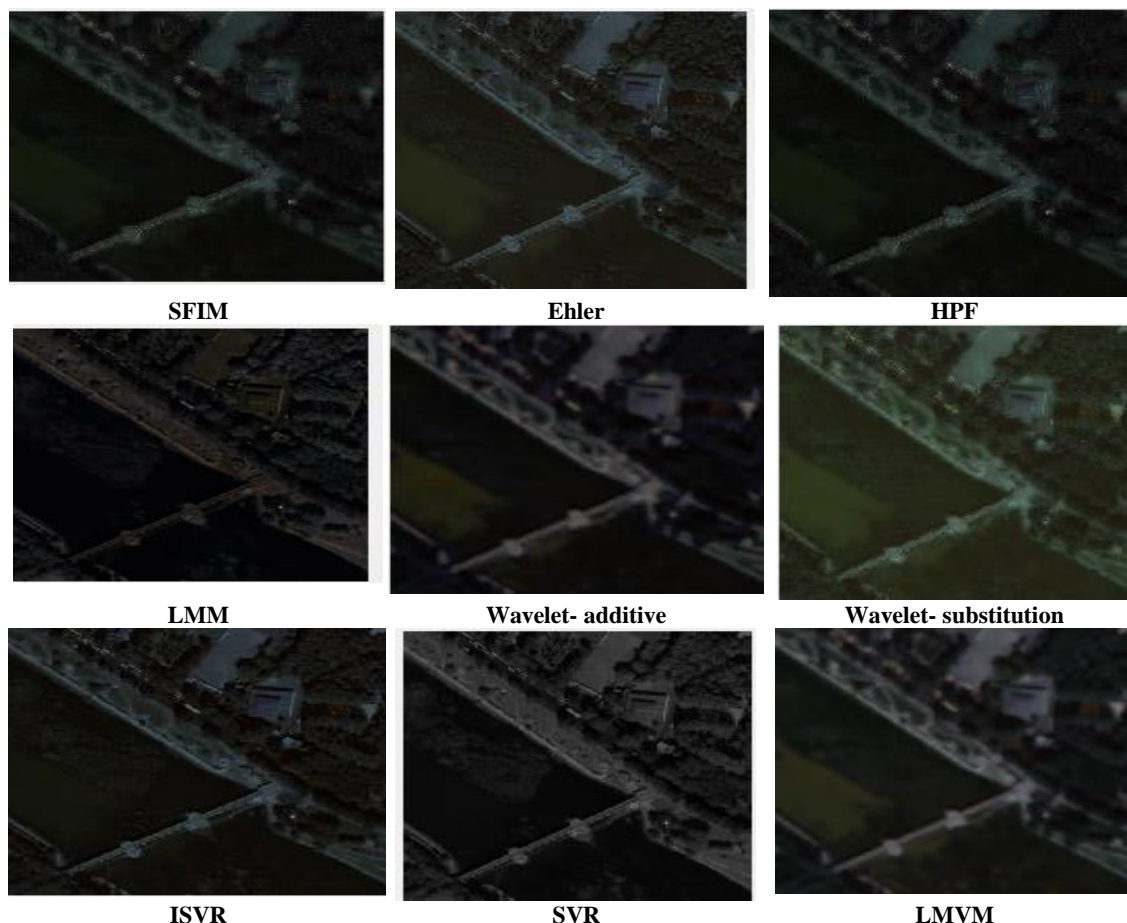
شکل (۹): روش‌ها با بهترین و ضعیف‌ترین عملکرد توام طیفی - مکانی

Figure (9): The methods with the best and the weakest spectral-spatial combined performance

شکل ۹ با در نظر گرفتن میانگین کیفیت توام طیفی - مکانی روش‌های ادغام تصاویر با بهترین و ضعیف‌ترین عملکرد را نشان می‌دهد. لازم به ذکر است، برخی روش‌ها اطلاعات مکانی در ادغام تصاویر ماهواره‌ای را بهتر

حفظ می‌کنند و برخی فقط قادر به حفظ اطلاعات طیفی هستند و برعکس. لذا مفهوم ضعیف‌ترین عملکرد، منحصرأ در بعد طیفی یا مکانی می‌باشد. بر این اساس، بسته به کاربردهای مختلف تصاویر ادغامی، که چه اطلاعاتی اعم از طیفی یا مکانی اهمیت دارد روش ادغام تصاویر را انتخاب نمود. بعد از اجرای ۱۵ روش همجوشی ادغام تصاویر بر روی داده مورد نظر، نتایج بصری هر یک از این روش‌ها در شکل ۹ آورده شده است.





شکل (۱۱): نتایج بصری روش‌های مختلف ادغام تصاویر در حالت بزرگنمایی شده

Figure (11): Visual results of different image fusion methods in zoomed-in mode

۴- نتیجه‌گیری

در این تحقیق پیاده‌سازی و بررسی جامع نتایج طیفی و مکانی از روش‌های مختلف ادغام تصویر در سطح پیکسل انجام رفت. برای این منظور ۱۵ روش مرسوم ادغام تصاویر را در چهار گروه شامل روش‌های مبتنی بر انتقال، روش‌های ترکیب محاسباتی، روش‌های مبتنی بر فیلتر در حوزه زمان- مکان و فرکانس، روش‌های آماری ادغام تصاویر پیاده‌سازی و مقایسه کرده است. همچنین جهت کیفیت نتایج ادغام تصاویر ۱۰ روش مختلف شامل هفت معیار ارزیابی کیفیت طیفی و همچنین سه معیار ارزیابی کیفیت مکانی تصاویر ادغام شده پیاده‌سازی و مورد تجزیه و تحلیل قرار گرفت. برای بررسی کامل هر یک از این روش‌ها ۴ حالت مختلف در نظر گرفته شد.

در حالت اول بررسی، تک‌تک معیارهای ارزیابی کیفیت طیفی و مکانی تصاویر و روش‌های ادغام تصاویر در نظر گرفته شدند. با در نظر گرفتن معیارهای طیفی به ترتیب روش‌های RVS، Ehler، Gramshmit و LMVM به ترتیب کیفیت طیفی تصاویر ادغام شده را در رنجی بین ۸۰ تا ۹۵ درصد حفظ کردند. همچنین با بررسی معیارهای ارزشیابی کیفیت مکانی تصاویر و روش‌های ادغام تصاویر با در نظر گرفتن معیارهای HPF و AG روش‌های ISVR، RVS، IHS، PCA و Brovey به ترتیب بالای ۹۵ تا ۹۸ درصد اطلاعات مکانی را در تصاویر ادغام شده حفظ کرده‌اند. بجز روش RVS که هم اطلاعات طیفی و هم اطلاعات مکانی را در تصاویر ادغام شده حفظ می‌کند، بقیه روش‌های مذکور با اینکه اطلاعات مکانی را در تصاویر ادغام شده حفظ می‌کند، در مقابل در حفظ اطلاعات طیفی عملکرد ضعیفی دارند. علاوه بر آن با در نظر گرفتن دیگر معیار مکانی AG، روش‌های Gramshmit، SVR و LMM بهترین عملکرد در حفظ اطلاعات مکانی داشتند. با در نظر گرفتن این پارامتر روش Gramshmit و SVR هم در حفظ اطلاعات طیفی و هم مکانی نسبت به دیگر روش‌ها پیشقدم بوده‌اند. در حالت دوم بررسی، میانگین تمامی هفت معیار ارزیابی طیفی تصاویر ادغام شده در نظر گرفته شد. با توجه به اینکه مقادیر بهینه این معیارها با هم متفاوت هستند بر این اساس این معیارها به دو دسته تقسیم‌بندی و سپس میانگین آنها در نظر گرفته شد. با در نظر گرفتن میانگین معیارهای ارزیابی طیفی هم جهت (حداکثر مقدار)، روش‌های LMVM، Gramshmit، SVR، Ehler و IHS به ترتیب بالای ۹۰ درصد اطلاعات طیفی تصاویر ادغام شده را حفظ می‌کنند. همچنین با در نظر گرفتن میانگین معیارهای ارزیابی طیفی هم جهت (حداقل مقدار)، روش‌های Ehler، SVR، SFIM و IHS به ترتیب بهترین عملکرد را در حفظ اطلاعات طیفی تصاویر ادغام شده را داشتند. در حالت سوم بررسی میانگین معیارهای ارزیابی مکانی هم جهت تصاویر ادغام شده مورد بررسی قرار گرفت. نتایج این حالت نشان داد، روش‌های LMVM، ISVR، Brovey و PCA به ترتیب بهترین عملکرد را در حفظ اطلاعات مکانی تصاویر ادغام شده را دارند. در حالت چهارم بررسی، با در نظر گرفتن میانگین معیارهای ارزیابی طیفی و مکانی هم جهت (حداقل و حداکثر مقدار) بصورت توأم مورد بررسی قرار گرفت. نتایج این حالت نشان داد، میانگین کیفیت طیفی- مکانی روش‌های ادغام تصاویر در حالت حداکثر، به ترتیب روش‌های LMVM، LMM، RVS، Ehler، Gramshmit و SVR را با بهترین عملکرد نشان دادند. همچنین با در نظر گرفتن میانگین کیفیت طیفی- مکانی روش‌های ادغام تصاویر در حالت حداقل، به ترتیب روش‌های Ehler، SVR، SFIM و IHS در حفظ اطلاعات طیفی و مکانی در تصاویر ادغام شده بهترین عملکرد را داشته‌اند. در این تحقیق بررسی‌های انجام گرفته، نشان داد در مجموع، به ترتیب روش‌های SVR، Ehler و Gramshmit در حفظ اطلاعات طیفی و مکانی در تصاویر ادغام شده بهترین عملکرد را نسبت به سایر روش‌ها دارند و تقریباً از ۸۰ تا ۹۵ درصد اطلاعات را حفظ می‌کنند. با در نظر گرفتن تمامی چهار حالت بررسی از ۱۵ روش ادغام تصاویر ماهواره‌ای و ۱۰ معیار ارزیابی کمی در حفظ اطلاعات طیفی و مکانی می‌توان نتیجه گرفت که برخی روش‌ها اطلاعات طیفی در ادغام

تصاویر ماهواره‌ای را بهتر حفظ می‌کنند و برخی فقط قادر به حفظ اطلاعات مکانی هستند و برعکس. لذا بسته به کاربردهای مختلف تصاویر ادغامی، که چه اطلاعاتی اعم از طیفی یا مکانی اهمیت دارد روش ادغام تصاویر را انتخاب نمود. روش‌های ادغام همجوشی تصاویر در طول سی سال پیشرفت چشمگیری داشته است. با این حال، در حال حاضر، هنوز بسیاری از مشکلات باز وجود دارد. یکی از چالش‌های اصلی، تفاوت پاسخ طیفی بین تصاویر چندطیفی و پانکروماتیک می‌باشد که این یکی از دلایل اصلی ایجاد اعوجاج برای روش‌های ادغام همجوشی تصاویر است. مشکل دوم ثبت هندسی دقیق دو تصویر اجتناب ناپذیر است به ویژه برای تصاویر واقع در منطقه شهر با اجسام متحرک همچنان این مشکل وجود دارد که نیازمند گسترش روش‌ها و الگوریتم‌های جدید در این زمینه است.

۵-منابع

- 1-Abbas, H.K., Al-Saleh, A.H. and Al-Zuky, A.A., (2019). Optical Images Fusion Based on Linear Interpolation Methods. *Iraqi Journal of Science*, 60(4): 924-936.
- 2-Aiazzi, B., Alparone, L., Baronti, S. and Selva, M., (2012). Twenty-five years of pansharpening. *Signal and Image Processing for Remote Sensing*: 533-548.
- 3-AL-HELALI, A.H.M., ZRAQOU, J.S., ALKHADOUR, W. and AL-NUEMI, A., (2021). A NEW HYBRID MULTI-FOCUS IMAGE-FUSION USING DMWT WITH FFT TRANSFORMS. *Journal of Theoretical and Applied Information Technology*, 991(10).
- 4-Al-Wassai, F.A., Kalyankar, N. and Al-Zaky, A.A., (2011). The statistical methods of pixel-based image fusion techniques. *ArXiv preprint arXiv: 1108.3250*.
- 5-Belgiu, M. and Stein, A., (2019). Spatiotemporal image fusion in remote sensing. *Remote sensing*, 11 :818(7).
- 6-Bhavana, V. and Krishnappa, H., (2015). Multi-modality medical image fusion using discrete wavelet transform. *Procedia Computer Science*, 70: 625-631.
- 7-Chai, P., Luo, X. and Zhang, Z., (2017). Image fusion using quaternion wavelet transform and multiple features. *IEEE access*, 5: 6724-6734.
- 8-Cornet, Y., de Béthune, S., Binard, M., Muller, F., Legros, G. and Nadasdi, I., (2001). RS data fusion by local mean and variance matching algorithms: their respective efficiency in a complex urban context, *IEEE/ISPRS Joint Workshop on Remote Sensing and Data Fusion over Urban Areas (Cat. No. 01EX482)*. IEEE, pp. 105-111.
- 9-DadrasJavan, F., Samadzadegan, F. and Fathollahi, F., (2018). Spectral and spatial quality assessment of IHS and wavelet based pan-sharpening techniques for high resolution satellite imagery. *Advances in image and video processing*, 6(2): 1.
- 10-Diao, W., Zhang, F., Wang, H., Wan, W., Sun, J. and Zhang, K., (2022). HLF-Net: Pansharpening Based on High and Low Frequency Fusion Networks. *IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters*.
- 11-Ehlers, M., (2004). Spectral characteristics preserving image fusion based on Fourier domain filtering, *Remote sensing for environmental monitoring, GIS applications, and geology IV*. SPIE, pp. 1-13.
- 12-Fei, R., Zhang, X., Li, W., Xiong, J. and Du, F., (2021). A new pansharpening method based on the sparse representation of classified injected details over a featured dictionary. *Remote Sensing Letters*, 12(8): 808-818.
- 13-Gangkofner, U.G., Pradhan, P.S. and Holcomb, D.W., (2007). Optimizing the high-pass filter addition technique for image fusion. *Photogrammetric Engineering & Remote Sensing*, 73(9): 1107-1118.

- 14-Ghadjati, M., Moussaoui, A. and Boukharouba, A., (2019). A novel iterative PCA-based pansharpening method. *Remote sensing letters*, 10(3): 264-273.
- 15-Ghahremani, M. and Ghassemian, H., (2016). Nonlinear IHS: A promising method for pansharpening. *IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters*, 13(11): 1606-1610.
- 16-Gogineni, R., Chaturvedi, A. and BS, D.S., (2021). A variational pan-sharpening algorithm to enhance the spectral and spatial details. *International Journal of Image and Data Fusion*, 12(3): 242-264.
- 17-Han, S., Li, H. and Gu., H., (2008). The study on image fusion for high spatial resolution remote sensing images. *Int. Arch. Photogramm. Remote Sens. Spat. Inf. Sci. XXXVII. Part B*, 7: 1159-1164.
- 18-Hasanlou, M. and Saradjian, M.R., (2016). Quality assessment of pan-sharpening methods in high-resolution satellite images using radiometric and geometric index. *Arabian Journal of Geosciences*, 9(1): 1-10.
- 19-Huang, W., Xiao, L., Wei, Z., Liu, H. and Tang, S., (2015). A new pan-sharpening method with deep neural networks. *IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters*, 12(5): 1037-1041.
- 20-Jagalingam, P. and Hegde, A.V., (2015). A review of quality metrics for fused image. *Aquatic Procedia*, 4: 133-142.
- 21-Javan, F.D., Samadzadegan, F., Mehravar, S., Toosi, A., Khatami, R. and Stein, A., (2021). A review of image fusion techniques for pan-sharpening of high-resolution satellite imagery. *ISPRS journal of photogrammetry and remote sensing*, 171: 101-117.
- 22-Klonus, S. and Ehlers, M., (2007). Image fusion using the Ehlers spectral characteristics preservation algorithm. *GIScience & Remote Sensing*, 44(2): 93-116.
- 23-Laben, E., (2000). Process for Enhancing the Spatial Resolution of Multispectral Imagery Using Pan-Sharpener (Gram-Schmidt). US Patent: USA, Eastman Kodak Company.
- 24-Li, S., Kang, X., Fang, L., Hu, J. and Yin, H., (2017). Pixel-level image fusion: A survey of the state of the art. *Information Fusion*, 33: 100-112.
- 25-Li, Y. and Jiang, S., 2020. Multi-focus image fusion using geometric algebra based discrete fourier transform. *Ieee Access*, 8: 60019-60028.
- 26-Liu, X., Liu, Q. and Wang, Y., (2020a). Remote sensing image fusion based on two-stream fusion network. *Information Fusion*, 55: 1-15.
- 27-Liu, Y., Wang, L., Cheng, J., Li, C. and Chen, X., (2020b). Multi-focus image fusion: A survey of the state of the art. *Information Fusion*, 64: 71-91.
- 28-May, R.I., (2018). Verification of sea ice drift data obtained from remote sensing information, IGARSS 2018-2018 IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium. IEEE, pp. 7344-7347.

- 29-Mhangara, P., Mapurisa, W. and Mudau, N., (2020). Comparison of image fusion techniques using satellite pour l'Observation de la Terre (SPOT) 6 satellite imagery. *Applied Sciences*, (5):1881.
- 30-Palsson, F., Sveinsson, J.R. and Ulfarsson, M.O., (2013). A new pansharpening algorithm based on total variation. *IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters*, 11(1): 318-322.
- 31-Pushparaj, J. and Hegde, A.V., (2017). Evaluation of pan-sharpening methods for spatial and spectral quality. *Applied Geomatics*, 9(1): 1-12.
- 32-Rodríguez-Esparragón, D., Marcello, J., Eugenio, F., García-Pedrero, A. and Gonzalo-Martín, C., (2017). Object-based quality evaluation procedure for fused remote sensing imagery. *Neurocomputing*, 255: 40-51.
- 33-Rogge, D.M., Rivard, B., Zhang, J., Sanchez, A., Harris, J. and Feng, J., (2007). Integration of spatial-spectral information for the improved extraction of endmembers. *Remote Sensing of Environment*, 110(3): 287-303.
- 34-Shahdoosti, H.R., (2017) .MS and PAN image fusion by combining Brovey and wavelet methods. ArXiv preprint arXiv:1701.01996.
- 35-Singh, M., Singh, R. and Ross, A., (2019). A comprehensive overview of biometric fusion. *Information Fusion*, 52: 187-205.
- 36-Sulaiman, A.G., Elashmawi, W.H. and Eltaweel, G.S., (2021). IHS-based pan-sharpening technique for visual quality improvement using KPCA and enhanced SML in the NSCT domain. *International Journal of Remote Sensing*, 42(2): 537-566.
- 37-Toutin, T. and Cheng, P., (2002). QuickBird—a milestone for high resolution mapping. *Earth Observation Magazine*, 11(4): 14-18.
- 38-Tu, T.-M., Lee, Y.-C., Huang, P.S. and Chang, C.-P., (2006). Modified smoothing-filter-based technique for IKONOS-QuickBird image fusion. *Optical Engineering*, 45(6): 066201.
- 39-Wald, L., (2000). Quality of high resolution synthesised images: Is there a simple criterion?, Third conference" Fusion of Earth data: merging point measurements, raster maps and remotely sensed images". SEE/URISCA, pp. 99-103.
- 40-Wald, L., (2002). Data fusion: definitions and architectures: fusion of images of different spatial resolutions. Presses des MINES.
- 41-Wang, L., Cao, X. and Chen, J., (2008). ISVR: an improved synthetic variable ratio method for image fusion. *Geocarto International*, 23(2): 155-165.
- 42-Wang, Z. and Bovik, A.C. (2002). A universal image quality index. *IEEE signal processing letters*, 9(3): 81-84.
- 43-WG, I., (2008). Quality assessment for multi-sensor multi-date image fusion.

44-Xiao, G., Bavirisetti, D.P., Liu, G., Zhang, X., Xiao, G., Bavirisetti, D.P., Liu, G. and Zhang, X., (2020). Decision-level image fusion. *Image Fusion*: 149-170.

45-Xu, L., Du, J., Hu, Q. and Li, Q., (2013). Feature-based image fusion with a uniform discrete curvelet transform. *International Journal of Advanced Robotic Systems*, 10(5): 255.

46-Yakhdani, M.F. and Azizi, A., (2010). Quality assessment of image fusion techniques for multisensor high resolution satellite images (case study: IRS-P5 and IRS-P6 satellite images). na.

47-Yang, Y., Huang, S., Gao, J. and Qian, Z., (2014). Multi-focus image fusion using an effective discrete wavelet transform based algorithm. *Measurement science review*, 14(2): 102.

48-Yilmaz, V., Serifoglu Yilmaz, C., Güngör, O. and Shan, J., (2020). A genetic algorithm solution to the gram-schmidt image fusion. *International Journal of Remote Sensing*, 41(4): 1458-1485.

49-Yilmaz, V., Yilmaz, C.S. and Gungor, O., (2021). Genetic algorithm-based synthetic variable ratio image fusion. *Geocarto International*, 36(9): 989-1006.

50-Yuan, Q., Wei, Y., Meng, X., Shen, H. and Zhang, L., (2018). A multiscale and multidepth convolutional neural network for remote sensing imagery pan-sharpening. *IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing*, 11(3): 978-989.

51-Zhou, J., Civco, D.L. and Silander, J., (1998). A wavelet transform method to merge Landsat TM and SPOT panchromatic data. *International journal of remote sensing*, 19(4): 743-757.