

مقاله علمی - پژوهشی

روشی جهت تعیین پارامتر بهینه فیلترهای نرم به منظور تلفیق تصاویر در فضای فرکانس

کبری یعقوبی ترکی^۱، علیرضا صفدری نژاد^{۲*} و مرضیه جعفری^۳

۱، ۲ و ۳- گروه ژئودزی و مهندسی نقشه برداری، دانشگاه تفرش، تفرش، ایران

*safdarinezhad@tafreshu.ac.ir

تلفیق تصویر راهکاری رایج به منظور ایجاد هم‌افزایی در محتوای تصاویر چندطیفی و پانکروماتیک محسوب می‌شود. تاکنون راهکارهای مختلفی به منظور انجام فرایند تلفیق توسعه یافته‌اند که به کارگیری فضای فرکانس یکی از این راهکارها بشمار می‌رود. تلفیق تصاویر در فضای فرکانس به کمک فیلترهای بالاگذر و پایین‌گذر انجام شده که تعیین ابعاد بهینه فیلترها مهم‌ترین چالش آن محسوب می‌شود. در این مقاله به منظور بهره‌مندی توأمان از محتوای طیفی و جزئیات مکانی تصاویر، شاخصی وزن‌دار متشکل از دو شاخص رنگ‌پذیری و جزئیات مکانی پیشنهاد شده است. شاخص مذکور توانسته با اتکا به معیارهای هندسی و آماری فضای ویژگی در کنار به کارگیری فیلترهای نرم، نتایج مطلوبی را در شناسایی ابعاد بهینه فیلترگذاری تأمین سازد. در سازوکار پیشنهادی، وزن شاخص‌های رنگ‌پذیری و جزئیات مکانی با در نظر گرفتن تمایز در محتوای تصاویر، برای هر تصویر به‌طور مستقل برآورد می‌گردد. مقایسه‌ی بهترین نتایج کسب‌شده از روش پیشنهادی با روش‌های رایج تلفیق حاکی از بهبود به‌طور متوسط ۵۸ درصدی در دقت (RMSE) فرایند تلفیق است.

واژه‌های کلیدی: سنجش‌ازدور، تلفیق تصویر، فضای فرکانس، تبدیل فوریه، فیلترگذاری

علائم و اختصارات

F_{opt}	شاخص بهینه‌گی وزن‌دار		
D_0	فرکانس قطع (شعاع برش در فیلترگذاری فضای فرکانس)		
D	فاصله از مرکز تصویر در فضای فرکانس	HSI	فضای رنگی (پرده رنگ، اشباع، شدت)
b	تعداد باندهای تصویر	RGB	فضای رنگی (قرمز، سبز، آبی)
$x_{i,j,k}$	یک درجه خاکستری از تصویر مرجع (مکان i, j و باند k)	Lab	فضای رنگی استاندارد
$\hat{x}_{i,j,k}$	یک درجه خاکستری از تصویر تلفیق شده (مکان i, j و باند k)	HSV	فضای رنگی (پرده رنگ، اشباع، مقدار)
μ_k	میانگین باند k از تصویر مرجع	PCA	تحلیل مؤلفه‌های اساسی
$\hat{\mu}_k$	میانگین باند k از تصویر تلفیق شده	$F(u, v)$	تابع تبدیل فوریه
σ_k	انحراف معیار باند k از تصویر مرجع	$f(x, y)$	تصویر در فضای مکان
$\hat{\sigma}_k$	انحراف معیار باند k از تصویر تلفیق شده	F_1	شاخص رنگ‌پذیری
		F_2	شاخص جزئیات مکانی

مقدمه

امروزه با توسعه سامانه‌های سنجش‌ازدوری، داده‌های طیف گسترده‌ای از سنجنده‌های هوایی و فضایی به‌منظور پایش و تحلیل

۱. دانشجوی کارشناسی ارشد

۲. استادیار (نویسنده مخاطب)

۳. استادیار

تصاویر به فضای فرکانس، جزئیات مکانی به کمک فرکانس‌های بالای تصاویر پانکروماتیک و اطلاعات طیفی از طریق فرکانس‌های پایین تصاویر چندطیفی با یکدیگر تلفیق شده و بدین ترتیب یک محصول تلفیقی تولید می‌گردد. جداسازی فرکانس‌های بالا و پایین به ترتیب به کمک فیلترهای بالاگذر و پایین‌گذر در فضای فرکانس صورت می‌پذیرند. در ادامه، انتقال محصول تلفیقی به فضای مکان منجر به تولید تصاویر تلفیق شده خواهد شد. مزیت روش‌های مبتنی بر فضای فرکانس را می‌توان در کاهش میزان اعوجاجات مکانی و طیفی در محصولات نهایی دانست که این امر در سایه‌ی تلفیق بهینه‌ی فرکانس‌ها از تصاویر پانکروماتیک و چندطیفی محقق می‌گردد [۵]. تاکنون تحقیقات متعددی در زمینه‌ی تلفیق تصاویر در حوزه فرکانس صورت پذیرفته که در ادامه، برخی از آن‌ها مرور شده‌اند.

لینگ، آهلرز، یوزری و مدن [۷] روشی مبتنی بر تبدیل HSI^۹ و به همراه فیلترگذاری در فضای فرکانس را به‌منظور تولید تصاویر پن-شارپن شده پیشنهاد دادند. آنان مؤلفه‌ی شدت به‌دست‌آمده از تبدیل HSI را با باند پانکروماتیک در فضای فرکانس تلفیق کرده و نتیجه‌ی آن را به‌عنوان مؤلفه‌ی شدت جدید، جایگزین نمودند. درنهایت با انتقال از فضای HSI به فضای RGB تصویر تلفیق شده تولید گردید. بدین ترتیب، مؤلفه‌ی شدت تلفیقی به‌طور هم‌زمان از ویژگی‌های با فرکانس پایین تصاویر RGB و جزئیات با فرکانس بالا در تصاویر پانکروماتیک بهره‌مند شد. دنیپوته و پایوا [۸] نیز برای تلفیق تصاویر چند بانده‌ی پانکروماتیک در فضای فرکانس، اطلاعات فرکانس پایین باندهای چندطیفی را با محتوای با فرکانس بالا در تصاویر پانکروماتیک ادغام نمودند. این کار به کمک فیلترهای سخت^{۱۰}، گوسی^{۱۱}، باترورث^{۱۲} و هنینگ^{۱۳} با ابعاد و تنظیماتی از پیش تعیین شده صورت گرفته که نتایج حاکی از کفایت بیشتر فیلترهای نرم در مقایسه با فیلترهای سخت بود. علیرغم نشانه‌های موفقیت‌آمیز به‌کارگیری فیلترهای نرم در فرایند تلفیق در فضای فرکانس، در این تحقیق بهینه‌بودن تنظیمات طراحی این فیلترها مورد ارزیابی قرار نگرفته است. صفدری نژاد و همکاران [۹] نیز روشی به‌منظور یافتن ابعاد بهینه‌ی فیلترهای سخت در تلفیق تصاویر چندطیفی و پانکروماتیک سنجنده‌ی IKONOS ارائه نمودند. در این روند خودکار، ابعاد بهینه‌ی فیلتر تلفیق متناسب با مجموع دو شاخص هندسی و آماری در فضای ویژگی شناسایی شده و نتایج تلفیق به کمک فیلترهای بهینه‌ی مربعی و دایره‌ای تولید شده است. نتایج این تحقیق نشان داد که

ویژگی‌های سطح زمین در دسترس عموم قرار دارد { Ma, 2015 } #4 [۱]. محدودیت فن‌آوری در حوزه‌ی سخت‌افزار، چالش‌هایی را در بهره‌برداری حداکثری از تصاویر سنجنش‌ازدوری به وجود آورده که محققان را به سمت توسعه‌ی راهکارهای جبران‌کننده از طریق محاسبات نرم سوق داده است. تقابل میان حد تفکیک مکانی و طیفی یکی از محدودیت‌های وابسته به فن‌آوری محسوب شده که ثبت تصاویر چندطیفی با حد تفکیک مکانی بالا را در سکوهای فضایی با چالش روبه‌رو می‌سازد [۲]. کاهش عرض باندهای طیفی با هدف افزایش تعداد آن‌ها، منجر به کاهش شاخص نسبت سیگنال به نویز شده که این موضوع به طرق سخت‌افزاری و با افزایش سطح دریافت انرژی (ابعاد پیکسل در فضای تصویر) در سیستم‌های تصویربرداری قابل جبران خواهد بود. بر این اساس، ارتقاء حد تفکیک طیفی در یک سنجنده با ارتفاع و زاویه‌ی میدان دید ثابت، با افزایش ابعاد پیکسل‌های تصویری و به‌تبع آن کاهش توان تفکیک مکانی میسر خواهد بود [۳].

تلفیق تصاویر راهکاری محاسباتی به‌منظور ایجاد هم‌افزایی میان داده‌های ثبت‌شده در لایه‌های رستری مختلف با هدف دستیابی به محصولی با ویژگی‌های کارآمدتر نسبت به داده‌های اولیه است [۴]. توسعه چنین راهکارهایی را می‌توان به‌عنوان بخشی از زیرسامانه‌های فضایی به‌منظور بهره‌برداری از تصاویر سنجنش‌ازدوری قلمداد کرد. در حوزه‌ی ثبت تصاویر سنجنش‌ازدوری، به‌طورمعمول واژه‌ی تلفیق به روندی اطلاق شده که در آن تصاویر پانکروماتیک با توان تفکیک مکانی بالا و تصاویر چندطیفی با توان تفکیک مکانی پایین، با یکدیگر ترکیب می‌شوند. انتظار می‌رود نتیجه‌ی این ترکیب، تولید تصویری چندطیفی با حد تفکیک مکانی بهتر باشد [۵]. اصطلاح رایج‌تر برای این فرایند پن‌شارپنینگ^۴ بوده که تاکنون راهکارهای متعددی برای آن توسعه یافته است. این راهکارها را می‌توان در پنج گروه شامل: ۱- روش‌های مبتنی بر تعویض اجزا^۵، ۲- روش‌های مبتنی بر آنالیز چند مقیاسی^۶، ۳- روش‌های عددی^۷، ۴- روش‌های آماری و ۵- روش‌های ترکیبی^۸ دسته‌بندی نمود. علیرغم تنوع راهکارهای توسعه‌یافته، سازوکار اجرای تمام روش‌ها از دو مرحله‌ی: ۱- استخراج جزئیات مکانی از تصویر پانکروماتیک و ۲- تزریق آن از طریق مدل‌های مختلف به باندهای تصویر چندطیفی، تشکیل شده‌اند [۶].

به‌کارگیری فضای فرکانس در تلفیق تصاویر را می‌توان دسته‌ی روش‌های تعویض اجزاء قرار داد. در این روش‌ها، با انتقال

9. Hue Saturation Intensity
10. Crisp
11. Gaussian
12. Butterworth
13. Hanning

4. Pan-Sharpning
5. Component Substitution
6. Multi-Resolution Approaches
7. Numerical Methods
8. Hybrid Methods

به صورت تکراری شناسایی شده است. با این حال رویکردی مبنی بر حصول اطمینان از صحت و یا دقت این فرایند در دستورکار قرار نداشته است. روند به کار گرفته شده در تحقیق مذکور مبتنی بر محاسبه‌ی شاخص‌های آماری و هندسی در فضای ویژگی بوده ولیکن عدم تنظیم میزان اثرگذاری هر یک از شاخص‌های هندسی و آماری به منظور شناسایی ابعاد فیلترهای تلفیق را می‌توان از محدودیت‌های آن برشمرد. با توجه به موفقیت بیشتر استفاده از فیلترهای نرم در روند تلفیق تصاویر در فضای فرکانس، در مقاله‌ی حاضر تلاش شده راهکاری الهام گرفته شده از [۹] با هدف به کارگیری از فیلترهای نرم و همچنین کاهش محدودیت ذکر شده در به کارگیری شاخص‌های شناسایی ابعاد بهینه‌ی فیلترهای تلفیقی، توسعه یابد. به عبارت بهتر در این تحقیق، علاوه بر به کارگیری فیلترهای نرم در روند تلفیق تصاویر در فضای فرکانس، تلاش شده تا شاخصی بهینه به منظور شناسایی خودکار ابعاد بهینه‌ی فیلترگذاری شناسایی گردد. با توجه به احتمال تمایز محتوای طیفی و مکانی هر تصویر سنجش‌ازدوری، در روش پیشنهاد شده تلاش شده تا اهمیت رنگ‌پذیری و جزئیات مکانی فرایند تلفیق از طریق یافتن وزن شاخص‌های هندسی و آماری فضای ویژگی تنظیم گردد. این اقدام به صورت خودکار انجام شده و نتایج حاصل از تلفیق در مقایسه با روش پیشنهادی در [۹] از کفایت بیشتری برخوردار بوده است.

مقاله پیش‌رو در شش بخش تدوین شده است. بعد از بخش نخست به‌عنوان مقدمه، در بخش دوم مبانی نظری لازم این تحقیق ارائه شده است. بخش سوم به تشریح الگوریتم پیشنهادی اختصاص داشته و در بخش چهارم داده‌های مورد استفاده در این مقاله معرفی شده است. بخش پنجم به پیاده‌سازی و بحث و ارزیابی روش پیشنهادی پرداخته و در بخش ششم نتیجه‌گیری و ارائه پیشنهاداتی برای تحقیقات آتی ارائه شده است.

مبانی نظری تحقیق

در این تحقیق از فیلترگذاری در فضای فرکانس به منظور تلفیق تصاویر چندطیفی و پانکروماتیک استفاده شده که یافتن ابعاد بهینه‌ی فیلترگذاری مبتنی بر تحلیل‌های هندسی و آماری توزیع داده‌ها در فضای ویژگی صورت می‌پذیرد. به عبارت بهتر، نوآوری‌های این تحقیق در جزئیات روند تلفیقی بوده که در این بخش به تفصیل تشریح شده است. براین اساس در این بخش مبانی تئوری این فرایند به تفکیک در چهار زیر بخش: ۱- تبدیل فوریه، ۲- فیلترگذاری در فضای فرکانس با هدف تلفیق تصویر، ۳- شناسایی ابعاد

شاخص‌های به کار گرفته شده توان شناسایی ابعاد بهینه فیلترهای تلفیق را داشته و همچنین فیلترهای سخت مربعی برای فرایند تلفیق مناسب نیستند. هیو، شیانگلی، سو و یوهان [۱۰] با رویکردی مشابه با [۷] صرفاً با به کارگیری تبدیل رنگی Lab به جای HSI، فرایند تلفیق را برای تصاویر پانکروماتیک و رنگی (سه بانده) به انجام رساندند. در این فرایند مؤلفه‌ی L^{14} و تصاویر پانکروماتیک در فضای فوریه تلفیق شده و به جای مؤلفه‌ی L از تصاویر رنگی قرار گرفته است. مانچاندا [۵] نیز مجدداً از تبدیل رنگی HSV^{15} با فرایندی مشابه با [۷] برای تلفیق تصاویر استفاده کرده است. وی به منظور ارزیابی، این رویکرد تلفیق را به صورت بصری با روند تلفیق مستقیم باندهای رنگی و پانکروماتیک در فضای فرکانس مقایسه نموده است. نتایج نشان داد که در مورد تصاویر رنگی واقعی، به کارگیری هم‌زمان تبدیل HSV و تلفیق در فضای فرکانس نتایج نزدیک‌تری را با انتظارات بصری از تصاویر هوایی و فضایی خواهد داشت. در پژوهشی دیگر، بشیر پور، ولدان زوج و مقصودی [۱۱] روش FFT_PCA را به منظور بهبود کیفیت روش تلفیق مبتنی بر تبدیل PCA^{16} پیشنهاد دادند. در رویکرد سنتی این فرایند، مؤلفه‌ی اول تبدیل PCA مربوط به تصویر چندطیفی با تصویر پانکروماتیک تعویض شده و از طریق معکوس این تبدیل خطی، تصویر تلفیقی تولید می‌گردد. به واسطه‌ی عدم مشابهت صد درصدی ویژگی اول تبدیل PCA با تصویر پانکروماتیک، این اقدام عموماً با اعوجاجات طیفی در سطح نتایج تلفیق همراه بوده است. در روش پیشنهاد شده، فرکانس‌های پایین از ویژگی اول تبدیل PCA با فرکانس‌های بالا از تصویر پانکروماتیک تلفیق شده و این محصول پس از انتقال به فضای مکان، به جای تصویر پانکروماتیک در تلفیق PCA استفاده شده است. نتایج این روش نشان‌دهنده‌ی کاهش اعوجاجات طیفی در نتایج تلفیق بوده است.

عملکرد بهبوددهنده‌ی فضای فرکانس در کنار روش‌های دیگر، نشان از پتانسیل این رویکرد در روند تلفیق تصویر است. در عمده‌ی راهکارهای توسعه‌یافته در حوزه‌ی فرکانس، شناسایی ابعاد بهینه‌ی فیلترگذاری به منظور انجام فرایند تلفیق منوط به مقایسه‌ی تصویر تلفیق شده با یک تصویر مرجع (تصویری با حد تفکیک مکانی و طیفی متناظر با نتایج تلفیق) بوده است. بدیهی است این موضوع می‌تواند به‌عنوان یک محدودیت اجرایی در داده‌های واقعی محسوب شود. از سوی دیگر، در برخی دیگر از این روش‌ها، ابعاد فیلترگذاری یا از طریق تحلیل‌های تئوری شناسایی شده و یا رویکردی تکراری و جستجو مینا دنبال شده است. به‌عنوان مثال در [۹]، بدون نیاز به تصاویر مرجع، ابعاد بهینه‌ی فیلترگذاری

14. Lightness

15. Hue Saturation Value

16. Principal Component Analysis

بهینه‌ی فیلترگذاری و ۴- روش‌های ارزیابی دقت و کیفیت تلفیق تصاویر ارائه شده است.

تبدیل فوریه

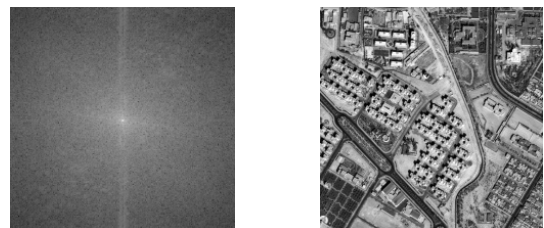
تجزیه یک تابع پیوسته یا گسسته به یک سری از توابع سینوسی و کسینوسی با فرکانس‌های مشخص و جهت‌دار، محور اصلی تبدیل فوریه را به خود اختصاص می‌دهد. به عبارت بهتر، در این تبدیل دامنه‌ی متناظر با جملات یک سری از توابع سینوسی و کسینوسی دوبعدی با فرکانس‌های متمایز برآورد شده که نظم مشخصی در گام‌های فرکانسی آن‌ها وجود دارد [۷]. بدین ترتیب با اعمال این تبدیل می‌توان سهم مشارکت هر فرکانس در بازسازی تصویر را محاسبه نمود. رابطه‌ی (۱) فرم کلی تبدیل مستقیم و رابطه‌ی (۲) معکوس فوریه را برای فضای گسسته نشان می‌دهد.

$$F(u, v) = \sum_{x=0}^{M-1} \sum_{y=0}^{N-1} f(x, y) e^{-2\pi j \left(u \frac{x}{M} + v \frac{y}{N} \right)} \quad (1)$$

$$f(x, y) = \frac{1}{MN} \sum_{u=0}^{M-1} \sum_{v=0}^{N-1} F(u, v) e^{2\pi j \left(u \frac{x}{M} + v \frac{y}{N} \right)} \quad (2)$$

در روابط (۱) و (۲)، F تابع تبدیل فوریه، f تابع تصویر در فضای مکان، u و v بیانگر فرکانس‌ها در دو راستای مختلف، x و y معرف موقعیت پیکسل‌های تصویر در فضای مکان و همچنین M و N ابعاد ماتریس تصویر می‌باشند [۱۲].

انتقال به فضای فوریه با هدف کاربردهایی همچون: ۱- فیلترگذاری بالاگذر و پایین‌گذر [۱۳]، ۲- حذف نویزهای سیستماتیک [۵ و ۱۴] و ۳- تلفیق تصاویر صورت می‌پذیرد [۱۵]. بعد از انتقال یک تصویر به فضای فرکانس، به‌طور معمول ماتریسی هم بعد با ابعاد تصویر ورودی تولید شده که در هر درایه از آن دامنه و فاز ترم‌های سینوسی و کسینوسی یک فرکانس جهت‌دار از تصویر ثبت شده است [۱۶]. ساختار این ماتریس متقارن بوده و ماتریس دامنه‌ی این اعداد به‌عنوان تصویر طیف فوریه شناخته می‌شود. شکل (۱) تصویر در فضای مکان و طیف متناظر در فضای فرکانس را به نمایش می‌گذارد.



شکل ۱- الف- تصویر در فضای مکان ب- طیف تصویر در فضای فرکانس

شکل ۱- یک تصویر در فضای مکان و طیف متناظر در فضای فرکانس

مناطق روشن در تصویر طیف مبین دامنه‌های بزرگ و مناطق تاریک دامنه‌های کوچک را نشان می‌دهند. مرکز این تصویر محل ثبت دامنه‌های مرتبط با فرکانس‌های پایین تصویر بوده و با فاصله گرفتن از مرکز تصویر طیف به تدریج و به‌طور متقارن مقادیر فرکانس افزایش می‌یابد [۹].

فیلترگذاری در فضای فرکانس با هدف تلفیق تصاویر

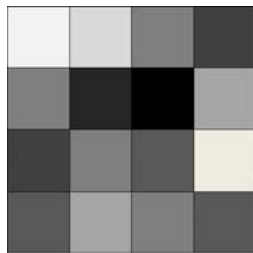
یکی از راهکارهای تلفیق تصاویر به‌کارگیری فیلترهای بالاگذر و پایین‌گذر در فضای فرکانس است. هر یک از تصاویر ورودی در فرایند تلفیق از جنبه‌ای حائز مزیت و از جنبه‌ای دیگر دچار محدودیت هستند. جزئیات مکانی تصاویر پانکروماتیک و محتوای طیفی تصاویر چندطیفی مزایای هریک از این تصاویر محسوب شده که فرایند تلفیق به دنبال هم‌افزایی آن‌ها است. جزئیات مکانی را می‌توان محتوای فرکانس بالای تصویری و اطلاعات طیفی را می‌توان محتوای فرکانس پایین تصویر قلمداد نمود [۵]. به‌کارگیری فیلترهای پایین‌گذر به‌منظور جداسازی محتوای فرکانس پایین تصاویر چندطیفی و همچنین استفاده از فیلترهای بالاگذر به‌منظور جداسازی محتوای فرکانس بالای تصاویر پانکروماتیک اولین اقدام به‌منظور به‌کارگیری فضای فرکانس در فرایند تلفیق تصویر می‌باشد. هرچند همان‌طور که در بخش "مقدمه" نیز بدان اشاره شد، جداسازی محتوای فرکانس بالا و پایین ممکن است که به‌طور مستقیم از فضای تصاویر خام صورت نپذیرفته و این اقدام در فضاهای تبدیل یافته‌ای همچون PCA، HSV، Lab و مواردی از این دست انجام پذیرد. گام دوم از روند تلفیق به ترکیب نتایج فیلترگذاری شده از باندهای طیفی و تصویر پانکروماتیک در فضای فرکانس اختصاص دارد. شکل (۲) نمایی شماتیک از روند فیلترگذاری و تلفیق تصویر در فضای فرکانس را نشان می‌دهد.

شایان ذکر است که باز نمونه‌برداری هندسی به‌منظور یکسان‌سازی ابعاد تصاویر چندطیفی با تصاویر پانکروماتیک یکی از پیش‌پردازش‌های اصلی قبل از فرایند فیلترگذاری و تلفیق در فضای فرکانس محسوب می‌شود. فیلترهای بالاگذر و پایین‌گذر متنوعی به‌منظور به‌کارگیری در فضای فرکانس توسعه یافته‌اند. شکل (۳) نمونه‌ای از فیلترهای پایین‌گذر و بالاگذر را نشان می‌دهد.

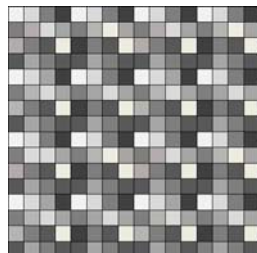
فیلترگذاری در فضای فرکانس با ضرب فیلتر و درایه‌های ماتریس تبدیل فوریه انجام شده و همان‌طور که در شکل (۳) مشاهده می‌شود، این فیلترها یا به‌صورت قطعی یا به‌صورت نرم شده اثرات بخشی از فرکانس‌های تصویر را حذف یا تضعیف می‌سازند.

تصاویر مرجع و یا استخراج مستقل شاخص‌های آماری دو روش در این حوزه می‌باشند [۱۷]. در اختیار بودن تصاویر مرجع با حد تفکیک مکانی و طیفی مشابه با نتایج تلفیق، یک چالش در به‌کارگیری روش‌های نیازمند به تصاویر مرجع بوده که انگیزه‌ی استفاده عملی از چنین روش‌هایی را محدود می‌سازد. از سوی دیگر، یافتن شاخص‌های آماری کارآمد نیز نیازمند مطالعه‌ی دقیق از روند تلفیق و تصاویر ورودی خواهد بود.

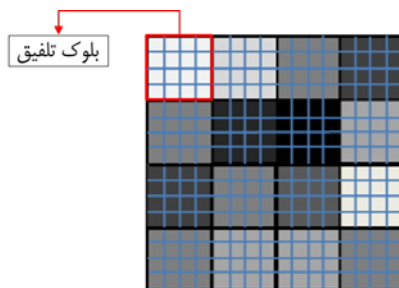
یکی از روش‌های آماری که تاکنون برای یافتن ابعاد بهینه‌ی فیلترگذاری در فضای فرکانس پیشنهاد شده در [۹] ارائه شده است. در این مقاله نیز این رویکرد با اعمال اصلاحاتی پیشنهاد شده است. در این روش، به ازای هر برش فرکانسی از فضای فرکانس به‌منظور تلفیق تصویر، دو شاخص آماری رنگ‌پذیری و جزئیات مکانی در فضای ویژگی محاسبه می‌شود. با معلوم بودن نمونه‌های مرتبط با هر پیکسل از تصویر چندطیفی در تصویر پانکروماتیک و تصاویر باز نمونه‌برداری شده چندطیفی شکل (۴)، شاخص‌های رنگ‌پذیری و جزئیات مکانی به‌شرح زیر برآورد می‌شوند. در ادامه‌ی متن مقاله نمونه‌های مشخص شده در شکل (۴-ج) که به ازای هر پیکسل از تصویر چندطیفی تولید شده‌اند، به‌عنوان بلوک‌های تلفیق شناخته می‌شوند. بدیهی است که به ازای ابعاد تصویر چندطیفی $(R \times C)$ ، بلوک‌های تلفیق وجود خواهد داشت. نمایی شماتیک از پیکسل‌های تصویر پانکروماتیک، تصویر چندطیفی و تصویر باز نمونه‌برداری شده‌ی چندطیفی، در شکل (۴) نمایش داده شده است. در این شکل به ازای هر پیکسل از تصویر چندطیفی، ۱۶ پیکسل از تصویر پانکروماتیک تصور شده است.



ب- برشی از یک باند تصویر چند طیفی پیش از فرآیند باز نمونه‌برداری

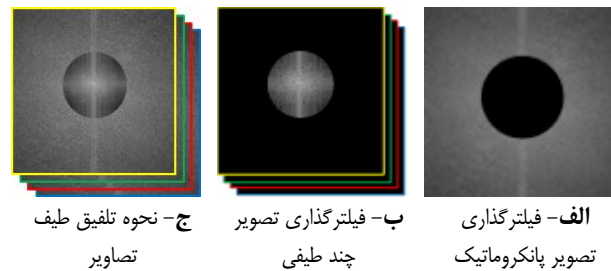


الف- برشی از تصویر پانکروماتیک



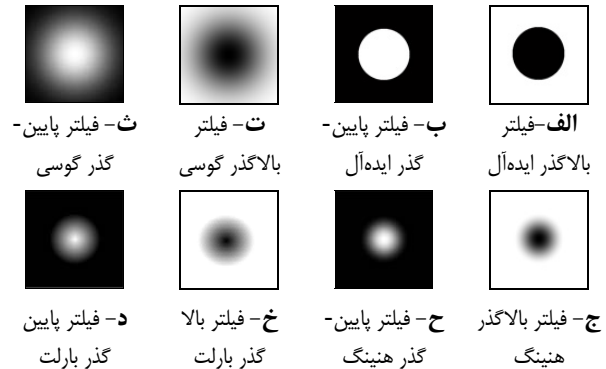
ج- برشی از یک باند تصویر چند طیفی پس از فرآیند باز نمونه‌برداری

شکل ۴- فرآیند باز نمونه‌برداری تصویر چند طیفی به‌منظور هم بعد سازی با تصویر پانکروماتیک



الف- فیلترگذاری تصویر پانکروماتیک
ب- فیلترگذاری تصویر چند طیفی
ج- نحوه تلفیق طیف تصاویر

شکل ۲- نمایی شماتیک از روند فیلترگذاری و تلفیق تصویر در فضای فرکانس



شکل ۳- نمونه‌ای از فیلترهای بالاگذر و پایین‌گذر فضای فرکانس

فیلترگذاری در فضای فرکانس با ضرب فیلتر و درایه‌های ماتریس تبدیل فوریه انجام شده و همان‌طور که در شکل (۳) مشاهده می‌شود، این فیلترها یا به‌صورت قطعی یا به‌صورت نرم شده اثرات بخشی از فرکانس‌های تصویر را حذف یا تضعیف می‌سازند.

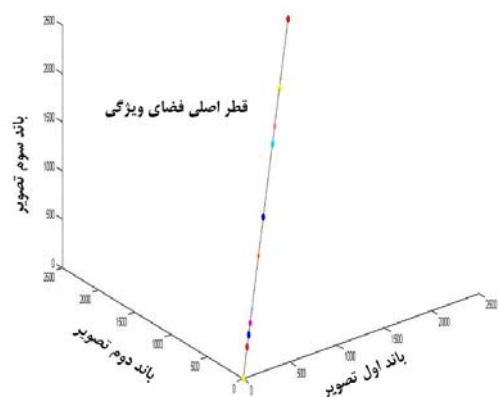
شناسایی ابعاد بهینه‌ی فیلترگذاری در فرآیند تلفیق

یکی از چالش‌های مرتبط با فرآیند تلفیق در فضای فرکانس، یافتن دامنه‌ی فرکانسی مورد استفاده در فرآیند فیلترگذاری به‌منظور دستیابی به نتایج بهینه است. به‌عنوان مثال، با فرض اینکه از فیلترهای قطعی برای برش فرکانس‌های پایین تصاویر چندطیفی و برش فرکانس‌های بالای تصاویر پانکروماتیک استفاده شود؛ یافتن شعاع برش فرکانسی بهینه برای این هدف، مسئله‌ی یافتن ابعاد بهینه‌ی فیلترگذاری خواهد بود. در صورتی که شعاع صفر برای فیلترهای بالاگذر و پایین‌گذر انتخاب شود، هیچ محتوایی از تصاویر چندطیفی به تصاویر تلفیق شده انتقال نیافته و بالعکس شعاع بیش از حد بزرگ نیز منجر به تخریب محتوای با فرکانس بالا در نتایج تلفیقی می‌گردد.

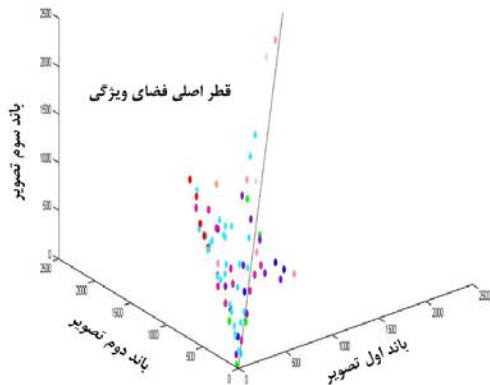
استفاده از روابط مرتبط با تئوری نمونه‌برداری به‌منظور تعیین ابعاد فیلترگذاری و به‌کارگیری راهکارهای جستجو با هدف یافتن برش فرکانسی بهینه، دو رویکرد اصلی در زمینه‌ی یافتن ابعاد فیلترگذاری محسوب می‌شوند [۸]. در روش جستجو مینا، به ازای به‌کارگیری هر گام از ابعاد فیلترگذاری، شاخص‌هایی به‌منظور ارزیابی عملکرد فرآیند تلفیق محاسبه می‌شوند. در نهایت ابعاد بهینه‌ی فیلترگذاری بر اساس بیشینه‌یابی یا کمینه‌یابی شاخص ارزیابی تعیین می‌گردد. مقایسه‌ی نتایج تلفیق با

همان طور که قبلاً اشاره شد، در صورتی که هیچ تأثیری از تصاویر چندطیفی در فرایند تلفیق وجود نداشته باشد (شعاع برش فرکانسی در فیلترهای بالاگذر و پایین‌گذر صفر باشد)، تصاویر تلفیق شده نسخه‌ای مشابه با تصویر پانکروماتیک خواهند بود. در چنین شرایطی، هر پیکسل از تصویر تلفیق شده دارای درجات خاکستری مشابه بوده و عملاً باندهای طیفی فاقد رنگ خواهند بود. بر این اساس، انتظار می‌رود تمامی نمونه‌های واقع در بلوک‌های تلفیق منطبق بر قطر اصلی فضای ویژگی باشند شکل (۵-الف). در سوی مقابل، هر بلوک تلفیق معادل با تعداد مشخصی نقطه در فضای ویژگی است. در صورتی که نتایج تلفیق تأثیری از تصاویر پانکروماتیک نگرفته باشند؛ پیکسل‌های واقع در هر بلوک تلفیق در فضای ویژگی برهم منطبق خواهند بود شکل (۵-ب). شایان ذکر است که برای رخداد شکل (۵-ب) می‌بایست در روند نمونه‌برداری مجدد شکل (۴-ج)، درجات خاکستری متناظر از تصویر چندطیفی شکل (۴-ب) عیناً تکثیر شده باشند. در شکل (۵-پ) نیز می‌توان تأثیرپذیری هم‌زمان فرایند تلفیق، از تصاویر چندطیفی و پانکروماتیک را مشاهده نمود. همان‌طور که مشاهده می‌شود، در این شکل نمونه‌های واقع در هر بلوک تلفیق دچار پراکندگی شده و به همین دلیل تعداد نمونه‌های ترسیم شده در فضای ویژگی بیشتر به نظر می‌رسند.

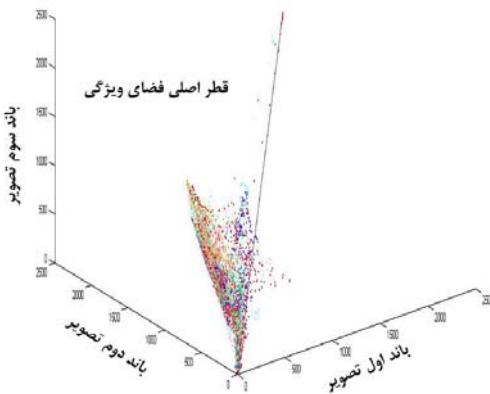
روند پراکنش پیکسل‌های تصویر تلفیق شده در فضای ویژگی در شکل (۵) نمایش داده شده است (ابعاد فضای ویژگی متناسب تعداد باندهای تصویر تلفیق شده است؛ اما با توجه به اینکه امکان نمایش بیش از سه بعد در فضای اقلیدسی وجود ندارد، نمایش فضای ویژگی در سه بعد صورت پذیرفته است).



الف- پراکندگی پیکسل‌های تصویر تلفیق شده بدون تأثیرپذیری از تصویر چندطیفی



ب- پراکندگی پیکسل‌های تصویر تلفیق شده بدون تأثیرپذیری از تصویر پانکروماتیک



ج- پراکندگی پیکسل‌های تصویر تلفیق شده با تأثیرپذیری هم‌زمان از تصاویر چندطیفی و پانکروماتیک

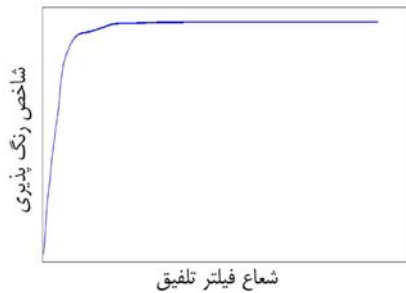
شکل ۵- روند تکثیر پیکسل‌های تصویر تلفیق شده در فضای ویژگی

در طراحی شاخص بهینه‌گی از دو معیار ۱- فاصله‌ی بردار میانگین نمونه‌های واقع در بلوک‌های تلفیق از قطر اصلی فضای ویژگی به‌عنوان شاخص رنگ‌پذیری (F_1) و ۲- متوسط پراکندگی نمونه‌های واقع در بلوک‌های تلفیق حول بردار میانگین به‌عنوان شاخص جزئیات مکانی (F_2) استفاده شده است. با فرض وجود $r \times c$ بلوک تلفیق، در رابطه‌ی (۳) نحوه‌ی محاسبه مؤلفه (F_1) ارائه شده است.

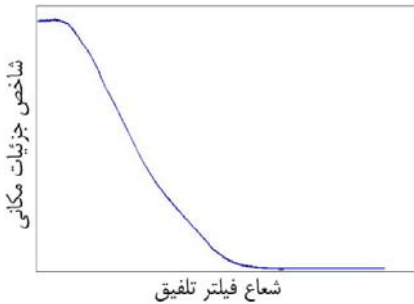
$$F_1 = \frac{1}{r \times c} \sum_{i=1}^r \sum_{j=1}^c d_{i,j} \quad (3)$$

در رابطه‌ی (۳)، $d_{i,j}$ فاصله‌ی بردار میانگین نمونه‌های واقع در بلوک تلفیق i, j نسبت به قطر اصلی فضای ویژگی بوده که مقدار آن برای هر بلوک تلفیق از طریق رابطه‌ی (۴) قابل محاسبه خواهد بود.

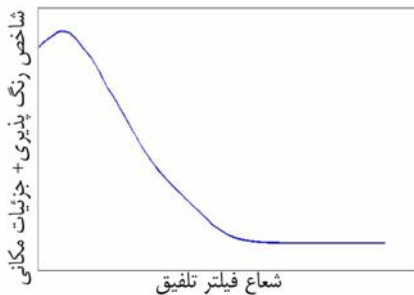
و محتوای منطقه‌ی تصویربرداری را می‌توان به‌عنوان عواملی در نظر داشت که منجر به تمایز اثرگذاری دو شاخص رنگ‌پذیری و جزئیات مکانی در نتایج تلفیق می‌شوند. به عبارت بهتر، در صورت عدم وجود جزئیات مکانی محسوس در پهنه‌ی تصویربرداری، انتظار می‌رود که نقش شاخص جزئیات مکانی کم‌رنگ‌تر بوده و سوق دادن نتایج تلفیق به تصاویر چندطیفی اثرات مخربی را به دنبال نداشته باشد. بالعکس در صحنه‌های تصویربرداری توأم با جزئیات مکانی بالا، نقش شاخص جزئیات مکانی به‌منظور صیانت از حفظ این محتوا محسوس‌تر خواهد بود. از سوی دیگر، عدم مشابهت بزرگی و دامنه‌ی نوسان دو شاخص F_1 و F_2 یکی از عواملی بوده که ضرورت تنظیم وزن و اثربخشی هریک از این دو شاخص را نمایان‌تر می‌سازد. در تحقیق حاضر، ضمن به‌کارگیری فیلترهای نرم بالاگذر و پایین‌گذر در روند تلفیق، تلاش شده تا با ارائه الگوریتمی میزان اثرگذاری هر یک از شاخص‌های مورد استفاده تنظیم شده و به‌تبع آن از شاخص بهینه‌گی بهتری در روند شناسایی فرکانس‌های تلفیق استفاده گردد.



الف- روند شماتیک تغییر شاخص رنگ پذیری به ازای تغییر در ابعاد فیلتر تلفیقی



ب- روند شماتیک تغییر شاخص جزئیات مکانی به ازای تغییر در ابعاد فیلتر تلفیقی



ج- روند شماتیک تغییر شاخص بهینه‌گی به ازای تغییر در ابعاد فیلتر تلفیقی

شکل ۶- نمایش روند شماتیک تغییر شاخص‌های رنگ‌پذیری، جزئیات مکانی و شاخص بهینه‌گی به ازای تغییر در ابعاد فیلترهای تلفیقی در فضای فرکانس

$$d_{i,j} = \sqrt{\left\| \vec{M}_{i,j} \right\|_2 - \left(\vec{M}_{i,j} \cdot \vec{P}_{i,j} \right)^2} \quad (4)$$

در رابطه (۴)، $\left\| \vec{M}_{i,j} \right\|_2$ نرم دوم بردار میانگین درجات خاکستری

بلوک تلفیق $\vec{P}_{i,j}$ بردار بیکه در راستای قطر اصلی فضای ویژگی و "

نماد ضرب داخلی دو بردار می‌باشند. شاخص رنگ‌پذیری در ازای تأثیرپذیری نتایج تلفیق از باندهای طیفی به‌سرعت افزایش یافته و بیشینه‌ی مقدار آن، در زمان جابجینی کامل فرکانس‌های تصاویر چندطیفی به‌جای فرکانس‌های تصویر پانکروماتیک خواهد بود. این شاخص به‌طور معمول بعد از رشد سریع به ازای به‌کارگیری فرکانس‌های پایین تصاویر چندطیفی، در هنگام استفاده از فرکانس‌های بالا از این تصاویر دچار اشباع‌شدگی می‌گردد. شکل (۶- الف)، روند شماتیک تغییر این شاخص را به ازای تغییر در ابعاد فیلترهای تلفیقی در فضای ویژگی نشان می‌دهد. در مقابل، شاخص جزئیات مکانی رفتاری متمایز با شاخص رنگ‌پذیری خواهد داشت. به عبارت بهتر، این شاخص در زمان عدم استفاده از فرکانس‌های تصاویر چندطیفی بیشترین مقدار را داشته و با افزایش اثرپذیری نتایج تلفیق از تصاویر چندطیفی به‌تدریج کاهش می‌یابد. شاخص جزئیات مکانی (F_2) نیز به‌صورت رابطه‌ی (۵) قابل محاسبه است.

$$F_2 = \frac{1}{r \times c} \sum_{i=1}^r \sum_{j=1}^c SD_{i,j} \quad (5)$$

در رابطه (۵)، $SD_{i,j}$ مبین میزان پراکندگی نمونه‌های واقع در

بلوک تلفیق i,j حول بردار میانگین بوده که به‌صورت رابطه‌ی (۶) قابل محاسبه می‌باشد.

$$SD_{i,j} = \frac{1}{b} \sum_{t=1}^b \sqrt{\frac{1}{n_b} \sum_{k=1}^{n_b} (x_{k,t} - \bar{x}_t)^2} \quad (6)$$

در رابطه‌ی (۶)، n_b تعداد نمونه‌های واقع در هر بلوک تلفیق، b تعداد

باندهای طیفی، $x_{k,t}$ نمونه‌ی k ام در باند t از بلوک تلفیق و \bar{x}_t بردار میانگین نمونه‌های بلوک تلفیق در باند t می‌باشند. روند شماتیک تغییرات شاخص F_2 به ازای افزایش ابعاد فیلترهای تلفیق را می‌توان در شکل (۶- ب) مشاهده نمود. در نهایت مجموع دو شاخص رنگ‌پذیری و جزئیات مکانی به‌عنوان شاخص بهینه‌گی جهت انجام فرایند تلفیق مورد استفاده قرار می‌گیرد شکل (۶- ج). شعاع فیلتر تلفیق به ازای بیشینه‌ی این شاخص به‌عنوان ابعاد بهینه در برش فرکانسی تصاویر پانکروماتیک و چندطیفی شناخته می‌شود.

از محدودیت‌های شاخص بهینه‌گی، عدم تنظیم میزان اثربخشی هر یک از شاخص‌های رنگ‌پذیری و جزئیات مکانی بوده و عملاً این دو شاخص با تأثیرگذاری برابری شاخص بهینه‌گی را تولید می‌کنند. وجود تفاوت در حد تفکیک رادیومتریکی تصاویر مورد استفاده و همچنین جزئیات

روش‌های ارزیابی دقت و کیفیت تلفیق تصاویر

به‌طور کلی دو روش ارزیابی کیفی (بصری) و همچنین راهکار استفاده از شاخص‌های کمی برای ارزیابی نتایج تلفیق استفاده می‌شود. ارزیابی بصری وابسته به تخصص و تجربه‌ی عامل انسانی بوده اما استفاده از روش‌های کمی امکان قضاوت عادلانه‌تری را فراهم می‌آورد. شاخص‌های کمی متعددی به‌منظور ارزیابی کیفیت و دقت فرایند تلفیق توسعه یافته که در این مقاله از ۴ شاخص: ۱- مجذور میانگین مربعات خطاها (RMSE^{۱۷})، ۲- نسبت سیگنال به نویز (SNR^{۱۸})، ۳- شاخص شباهت ساختاری (SSIM^{۱۹}) و ۴- نگاشت زاویه طیفی (SAM^{۲۰}) برای ارزیابی کیفیت و دقت فرایند تلفیق استفاده شده است. در تمامی این شاخص‌ها، تصویر تلفیق شده با یک تصویر مرجع پیکسل به پیکسل مقایسه می‌شوند. این شاخص‌ها به ترتیب در ادامه معرفی شده‌اند.

- خطای کمترین مربعات (RMSE)

این شاخص به‌عنوان یک شاخص سنتی در اندازه‌گیری اختلاف میان کمیت‌های محاسباتی و مشاهداتی شناخته می‌شود. در صورت به‌کارگیری این شاخص برای تصاویر تلفیق شده، میزان اختلافات در برآورد مقادیر واقعی درجات خاکستری تصاویر تلفیق شده نسبت به تصاویر مرجع به ازای هر باند طیفی محاسبه می‌شود (رابطه‌ی ۷).

$$RMSE_k = \sqrt{\frac{1}{M \times N} \sum_{i=1}^M \sum_{j=1}^N (\hat{x}_{i,j,k} - x_{i,j,k})^2} \quad (7)$$

$k = 1, 2, \dots, b$

در رابطه‌ی (۷)، M و N ابعاد تصویر، b تعداد باندهای تصویربرداری، $\hat{x}_{i,j,k}$ درجه خاکستری تصویر تلفیق شده مربوط به مختصات i, j در باند طیفی k ام و $x_{i,j,k}$ پیکسل متناظر در تصویر مرجع می‌باشند [۱۸ و ۱۹ و ۲۰].

- نسبت سیگنال به نویز (SNR)

این معیار نیز به ازای هر باند طیفی قابل محاسبه بوده و بزرگ بودن آن نشان از حفظ بیشتر محتوای اطلاعاتی در تصویر تلفیق شده خواهد بود (رابطه‌ی ۸).

$$SNR_k = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^M \sum_{j=1}^N \hat{x}_{i,j,k}^2}{\sum_{i=1}^M \sum_{j=1}^N (\hat{x}_{i,j,k} - x_{i,j,k})^2}} \quad (8)$$

$k = 1, 2, \dots, b$

نمادگذاری در رابطه‌ی (۸) مشابه با نمادگذاری در رابطه‌ی (۷) می‌باشد [۲۱].

- شباهت ساختاری (SSIM)

شاخص شباهت ساختاری یک شاخص آماری مبتنی بر روشی و کنتراست تصویر بوده که الهام گرفته شده از توانایی‌های درک بصری انسان در مقایسه‌ی شباهت دو تصویر است. در محاسبه‌ی این شاخص از میانگین و انحراف استاندارد تصویر مرجع و تلفیق شده استفاده می‌شود. بزرگی این شاخص حاکی از شباهت ساختاری بیشتر دو تصویر می‌باشد. این شاخص در رابطه‌ی (۹) معرفی شده است.

$$SSIM_k = \frac{(2\hat{\mu}_k \mu_k + C_1) \times (2\hat{\sigma}_k \sigma_k + C_2)}{(\hat{\mu}_k^2 + \mu_k^2 + C_1) \times (\hat{\sigma}_k^2 + \sigma_k^2 + C_2)} \quad (9)$$

$k = 1, 2, \dots, b$

در این رابطه، (σ_k, μ_k) به ترتیب میانگین و انحراف معیار باند k ام تصویر مرجع و $(\hat{\sigma}_k, \hat{\mu}_k)$ نیز به ترتیب میانگین و انحراف معیار باند طیفی متناظر از تصویر تلفیق شده می‌باشند. در این رابطه از مقادیر C_1 و C_2 به‌صورت ثابت و برای جلوگیری از نزدیک شدن شاخص به مجانب‌های ریاضی استفاده می‌شود. این مقادیر به‌طور تجربی از رابطه‌ی (۱۰) محاسبه می‌شوند.

$$C_1 = (K_1 L) \quad (10)$$

$$C_2 = (K_2 L)$$

پارامتر L معرف محدوده تغییرات ارزش‌های پیکسل تصویر بوده و مقدار آن متناسب با ماکسیمم ارزش پیکسل‌های تصویر مرجع تعیین می‌گردد. در این رابطه مقادیر $K_1=0.1$ و $K_2=0.3$ به‌صورت تجربی انتخاب می‌شوند [۲۲ و ۲۳].

- شاخص نگاشت زاویه طیفی (SAM)

این شاخص کسینوس زاویه‌ی میان دو بردار را از طریق ضرب داخلی آن‌ها برآورد می‌سازد. محدوده‌ی تغییرات این شاخص در بازه‌ی [1~ -1] قرار داشته و نزدیک شدن این شاخص به مقدار عددی یک نشان از شباهت بالای دو بردار خواهد بود. هنگام به‌کارگیری این رابطه در حوزه ارزیابی تصاویر تلفیق شده، هر باند از تصویر مرجع و تصویر تلفیق شده به‌مثابه دو بردار در محاسبه‌ی این شاخص استفاده می‌شوند. فرم ریاضی این شاخص در رابطه (۱۱) ارائه شده است.

$$SAM_k = \frac{\langle \hat{B}_k, B_k \rangle}{\sqrt{\|\hat{B}_k\|_2 \times \|B_k\|_2}} \quad k = 1, 2, \dots, b \quad (11)$$

در رابطه‌ی (۱۱)، B_k باند طیفی k ام از تصویر مرجع و \hat{B}_k باند طیفی متناظر از تصویر تلفیق شده بوده که به‌صورت برداری درآمده‌اند [۲۲].

17. Root Mean Square Error

18. Signal to Noise Ratio

19. Structure Similarity Index Metric

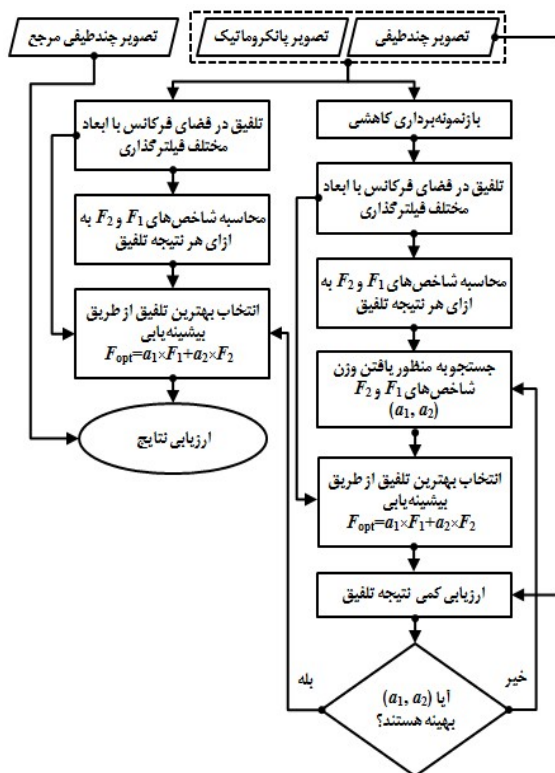
20. Spectral Angle Mapper

"مبانی نظری تحقیق" بوده با این تمایز که یافتن بهترین ابعاد فیلترگذاری به کمک بیشینه‌یابی از مجموع وزن‌دار شاخص‌های F_1 و F_2 صورت می‌گیرد (رابطه‌ی ۱۲).

$$F_{opt} = a_1 \times F_1 + a_2 \times F_2 \quad (12)$$

$$s.t \quad a_1 + a_2 = 1$$

در رابطه‌ی (۱۲)، a_1 و a_2 به ترتیب وزن‌های دو شاخص F_1 و F_2 بوده که در بازه‌ی [0~1] قرار دارند. مجموع این دو وزن معادل با واحد است.



شکل ۷- روندنمای الگوریتم پیشنهادی

با توجه به واحد شدن مجموع اوزان a_1 و a_2 ، روند جستجو به منظور شناسایی وزن شاخص‌های F_1 و F_2 یک فرایند تکراری بوده و محدود به یافتن صرفاً یکی از دو وزن خواهد شد. چرا که به راحتی وزن دوم از طریق $a_2 = 1 - a_1$ قابل محاسبه است. در این الگوریتم وزن a_1 با گام‌های ۰/۰۱ واحدی در بازه‌ی صفر تا یک تولید شده و با این حساب، فرایند یافتن وزن‌های بهینه ۱۰۰ بار تکرار می‌گردد.

شناسایی وزن‌های بهینه یک فرایند تکراری بوده که در هر تکرار کفایت وزن‌های انتخاب شده با مقایسه‌ی تصویر تلفیق شده با یک تصویر مرجع انجام می‌پذیرد. به همین دلیل تصاویر ورودی در روند شناسایی وزن طی فرایند باز نمونه‌برداری کاهشی به یک سطح مقیاسی پایین‌تر انتقال می‌یابند (شکل ۸). با این اقدام، تصاویر

در ادامه و به منظور ارزیابی کمی تصاویر تلفیق شده، میانگین شاخص‌های مذکور به ازای باندهای تصاویر تلفیق شده مورد استفاده قرار گرفته است.

روش‌شناسی تحقیق

همان‌طور که در بخش "مبانی نظری تحقیق" بدان اشاره شد، یافتن ابعاد بهینه فیلترهای بالاگذر و پایین‌گذر به منظور تلفیق تصاویر در فضای فرکانس، به‌طور مؤثری نتایج را تحت تأثیر قرار می‌دهد. در [۹] صرفاً با به‌کارگیری فیلترهای قطعی از مجموع شاخص‌های رنگ‌پذیری (رابطه‌ی ۳) و جزئیات مکانی (رابطه‌ی ۵) در روند شناسایی ابعاد بهینه‌ی فیلترگذاری استفاده شده است. دامنه‌ی تغییر این دو شاخص متفاوت و متأثر از محتوای تصویری و توان تفکیک رادیو متریکی تصاویر است. از آنجایی که هر تصویر سنجش‌ازدوری از محتوای متمایزی برخوردار است؛ اهمیت حفظ محتوای طیفی یا مکانی در روند تلفیق برای هر تصویر متمایز خواهد بود. به همین جهت در این مقاله ایده‌ی به‌کارگیری مجموع وزن‌دار دو شاخص رنگ‌پذیری و جزئیات مکانی به منظور یافتن فیلترهای بهینه‌ی تلفیق پیشنهاد شده است. در الگوریتم پیشنهاد شده، این اوزان به صورت خودکار و برای هر تصویر شناسایی می‌گردد.

بر این اساس در این تحقیق دو اقدام جدید جایگزین روش تشریح شده در بخش "مبانی نظری تحقیق" شده است. نخست از فیلترگذاری نرم به جای فیلترهای قطعی استفاده شده و دوم آنکه تلاش شده تا میزان اثرگذاری شاخص‌های رنگ‌پذیری و جزئیات مکانی طی الگوریتم پیشنهادی تنظیم گردد. روند اجرای روش پیشنهادی در سه گام اصلی صورت می‌پذیرد. در گام نخست پس از اعمال پیش‌پردازش‌ها، تصاویر پانکروماتیک و چند طیفی به فضای فرکانس فوریه انتقال می‌یابند. در گام دوم اوزان بهینه کمیت‌های شاخص بهینه‌گی طی روندی تکراری شناسایی شده و در گام سوم فرایند تلفیق تصاویر بر مبنای شناسایی ابعاد فیلتر بهینه متناسب با شاخص بهینه‌گی وزن‌دار صورت می‌پذیرد. سازوکار روش پیشنهادی در این مقاله در فلوجارت شکل ۷ ارائه و در ادامه هر یک از بخش‌های مربوط به فلوجارت به تفصیل تشریح شده است.

مطابق با فلوجارت شکل ۷، روند تلفیق تصویر در دو مسیر موازی دنبال می‌شود. در ستون سمت راست از فلوجارت، فرایند شناسایی وزن بهینه برای شاخص‌های رنگ‌پذیری (F_1) و جزئیات مکانی (F_2) به اجرا رسیده که در نهایت بعد از یافتن اوزان بهینه، از آن‌ها در روند تلفیق تصاویر ورودی استفاده می‌شود. سازوکار تلفیق تصویر در فضای فرکانس کاملاً منطبق بر موارد ذکر شده در بخش

ایجاد شرایط ارزیابی نهایی وجود ندارد. به عبارت بهتر، روش پیشنهادی بدون نیاز به وجود تصویر چندطیفی مرجع قادر به یافتن پارامترهای تنظیمی فرایند تلفیق در فضای فرکانس بوده و عملاً به کارگیری تصاویر چندطیفی مرجع صرفاً با هدف اثبات کفایت عملکرد روش پیشنهادی استفاده شده است.

در بررسی‌های صورت گرفته این تحقیق، علاوه بر فیلترهای قطعی در فضای فرکانس شکل (۳- الف و ب)، از فیلترهای نرم گوسی، هنینگ و بارلت نیز استفاده شده است. روابط (۱۳)، (۱۵)، (۱۶) و (۱۷) به ترتیب روابط تولید فیلترهای پایین‌گذر قطعی [۱۴ و ۲۶]، گوسی [۱۴ و ۲۷]، هنینگ و بارلت می‌باشند [۲۸].

$$H(u, v) = \begin{cases} 1 & \text{if } D(u, v) \leq D_0 \\ 0 & \text{if } D(u, v) > D_0 \end{cases} \quad (13)$$

در رابطه‌ی (۱۳)، D_0 معرف شعاع برش فرکانس و D فاصله‌ی شعاعی تصویر نسبت به درایه‌ی مرکزی از ماتریس تبدیل در فضای فرکانس بوده که به صورت رابطه (۱۴) محاسبه خواهد شد.

$$D(u, v) = \sqrt{(u-p)^2 + (v-q)^2} \quad (14)$$

در رابطه (۱۴) p و q مختصات پیکسل مرکزی تصویر طیف در فضای فرکانس است.

رابطه‌ی تولید فیلترهای گوسی پایین‌گذر بصورت رابطه‌ی (۱۵) می‌باشد.

$$H(u, v) = e^{-\frac{D^2(u, v)}{2D_0^2}} \quad (15)$$

در این روش، از توابع نمایی برای وزن‌دهی فرکانس‌ها در موقعیت‌های مختلف فیلتر استفاده می‌شود. رابطه‌ی (۱۶)، نحوه‌ی تولید فیلترهای نرم پایین‌گذر به روش هنینگ را نشان می‌دهد.

$$H(u, v) = \begin{cases} 0.5 + \left(0.5 \cos \left(\frac{D\pi}{D_0} \right) \right) & \text{if } D \leq D_0 \\ 0 & \text{if } D > D_0 \end{cases} \quad (16)$$

رابطه‌ی (۱۷) نیز رابطه‌ی تولید فیلترهای نرم پایین‌گذر به روش بارلت را نشان می‌دهد.

$$H(u, v) = \frac{-1}{D_0} D(u, v) + 1 \quad (17)$$

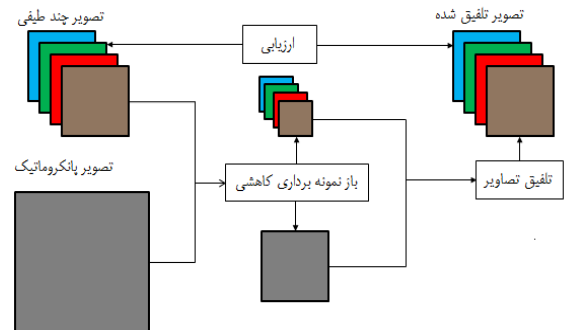
در روابط (۱۸) تا (۲۱) به ترتیب روابط تولید فیلترهای بالاگذر قطعی، گوسی، هنینگ و بارلت ارائه شده است.

$$H(u, v) = \begin{cases} 0 & \text{if } D(u, v) \leq D_0 \\ 1 & \text{if } D(u, v) > D_0 \end{cases} \quad (18)$$

$$H(u, v) = 1 - e^{-\frac{D^2(u, v)}{2D_0^2}} \quad (19)$$

$$H(u, v) = \begin{cases} 0.5 - \left(0.5 \cos \left(\frac{D\pi}{D_0} \right) \right) & \text{if } D \leq D_0 \\ 0 & \text{if } D > D_0 \end{cases} \quad (20)$$

تلفیق شده در فرایند شناسایی وزن‌های بهینه، هم‌اندازه با تصویر چندطیفی ورودی بوده و به راحتی می‌توان نتایج تلفیق را با آن مقایسه کرد.



شکل ۸- روند باز نمونه برداری کاهشی تصاویر به منظور امکان انجام ارزیابی به کمک تصاویر مرجع

ارزیابی بهینه بودن انتخاب وزن شاخص‌های F_1 و F_2 از طریق محاسبه‌ی شاخص RMSE (رابطه‌ی ۷) بین تصویر تلفیق شده و تصویر چندطیفی ورودی انجام می‌پذیرد.

همان‌طور که در روندنمای روش پیشنهادی مشاهده می‌شود، فرایند تخصیص وزن به شاخص‌های رنگ‌پذیری و جزئیات مکانی در هر تصویر به صورت مستقل انجام شده و این موضوع بدون نیاز به کنترل کاربر و به صورت خودکار قابل اجرا است.

بعد از شناسایی اوزان بهینه‌ی شاخص‌های F_1 و F_2 برای هر تصویر، بهترین ابعاد فیلترگذاری به کمک یافتن آرگومان بیشینه کننده رابطه‌ی (۱۲) شناسایی می‌گردد. به عبارت بهتر، ابعاد فیلترگذاری که قادر به بیشینه ساختن رابطه‌ی (۱۲) باشد؛ به عنوان فیلترگذاری بهینه شناسایی می‌گردد.

شایان ذکر است که ارزیابی نهایی الگوریتم پیشنهادی نیز مبتنی بر به کارگیری تصاویر مرجع بوده که برای آن از روندی مشابه با شکل (۸) استفاده شده است. بدین ترتیب که داده‌های مورد استفاده در این تحقیق، در بدو امر، طی فرایند باز نمونه برداری کاهشی به یک سطح مقیاسی پایین‌تر انتقال یافته تا نتیجه‌ی اجرای الگوریتم پیشنهادی تلفیق تصاویر در این سطح، هم‌اندازه با تصاویر چندطیفی ورودی باشد. این راهکار ارزیابی با نام والد^{۲۱} در مراجع مختلفی به منظور ارزیابی کفایت روش‌های تلفیق استفاده شده است [۲۴ و ۲۵]. بدیهی است که این اقدام صرفاً با هدف بررسی کفایت روش پیشنهادی در یافتن فیلترگذاری بهینه‌ی تلفیق انجام شده و در آزمون‌های اجرایی نیازی به باز نمونه برداری کاهشی به منظور

جدول ۱- معرفی باندهای طیفی سنجنده WorldView-2

باندها	طول موج (nm)	توان تفکیک مکانی (m)
باند پانکروماتیک	۴۵۰-۸۰۰	۰٫۵
باند ساحلی	۴۰۰-۴۵۰	۲
باند آبی	۴۵۰-۵۱۰	۲
باند سبز	۵۱۰-۵۸۰	۲
باند زرد	۵۹۰-۶۳۰	۲
باند قرمز	۶۳۰-۶۹۰	۲
باند لیه قرمز	۷۱۰-۷۵۰	۲
باند مادون قرمز نزدیک-۱	۷۷۰-۹۰۰	۲
باند مادون قرمز نزدیک-۲	۸۶۰-۱۰۴۰	۲

جدول ۲- معرفی باندهای طیفی سنجنده GeoEye

باندها	طول موج (nm)	توان تفکیک مکانی (m)
باند پانکروماتیک	۴۵۰-۹۰۰	۰٫۴۱
باند آبی	۴۵۰-۵۲۰	۱٫۶۵
باند سبز	۵۲۰-۶۰۰	۱٫۶۵
باند قرمز	۶۲۵-۶۹۵	۱٫۶۵
باند مادون قرمز نزدیک	۷۶۰-۹۰۰	۱٫۶۵

ارزیابی نتایج و بحث

به منظور ارزیابی نتایج روش پیشنهادی چند رویکرد مختلف اتخاذ شده است. در رویکرد نخست ترکیبات مختلفی از انواع فیلترهای تلفیق و چگونگی به کارگیری شاخص‌های تلفیق به منظور ارزیابی قابلیت روش پیشنهادی به اجرا رسیده است. در این اقدام از چهار نوع فیلتر بالاگذر و پایین‌گذر: ۱- قطعی، ۲- گوسی، ۳- هنینگ و ۴- بارلت در فضای فرکانس و از دو ترکیب مجموع ساده و وزن‌دار شاخص‌های تلفیق (روش پیشنهادی) استفاده شده است. بر این اساس، برای این رویکرد ۵ آزمایش ترتیب داده شده است. در آزمایش نخست، فیلتر قطعی به همراه جمع بدون وزن دو شاخص رنگ‌پذیری و جزئیات مکانی به عنوان تابع شایستگی استفاده شده است. این آزمایش پیاده‌سازی مستقیم روش ارائه شده در [۹] است. در آزمایش دوم، بدون تغییر در ماهیت فیلترگذاری، روند یافتن ابعاد بهینه‌ی فیلترگذاری مبتنی بر شاخص شایستگی وزن‌دار دنبال شده است. آزمایش سوم تا پنجم نیز به ترتیب شامل به کارگیری هم‌زمان فیلترهای نرم گوسی، هنینگ و بارلت به همراه شاخص شایستگی وزن‌دار می‌باشند. لازم به ذکر است که به منظور ارزیابی نتایج تلفیق، رویکرد به کارگیری تصاویر مرجع در دستور کار قرار دارد.

$$H(u, v) = \frac{1}{D_0} D(u, v) \quad (21)$$

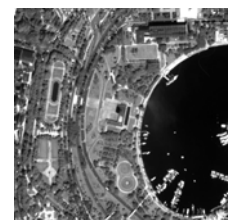
نمادگذاری در روابط (۱۵) تا (۲۱) مشابه با نمادگذاری در رابطه‌ی (۱۳) می‌باشند. در تمامی روابط فوق پارامتر D_0 به عنوان پارامتر تنظیم شونده به منظور یافتن فیلترگذاری بهینه شناخته می‌شود.

داده‌های مورد مطالعه

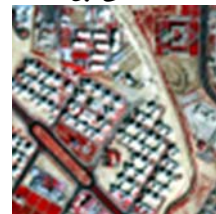
در این مقاله از دو مجموعه داده متعلق به دو سنجنده متفاوت استفاده شده است. تصویر اول مربوط به سنجنده World View-2 و تصویر دوم مربوط به سنجنده‌ی GeoEye می‌باشد. تصاویر ماهواره‌ای سنجنده‌ی World View-2 متشکل از ۸ باند طیفی با توان تفکیک مکانی ۲ متر و یک باند پانکروماتیک با توان تفکیک مکانی ۰٫۵ متر می‌باشند. تصاویر سنجنده‌ی فضایی GeoEye نیز متشکل از ۴ باند طیفی با توان تفکیک مکانی ۱٫۶۵ متر و یک باند پانکروماتیک با توان تفکیک مکانی ۰٫۴۱ متر می‌باشند. منطقه مطالعاتی در این دو تصویر در شکل (۹) نمایش یافته است. در تولید تصاویر رنگی از ترکیب رنگی کاذب NIR-R-G استفاده شده است. به طور کلی نسبت یک به چهار میان توان تفکیک مکانی تصاویر مورد استفاده وجود داشته و با توجه به هم مرجع بودن تصاویر چند-طیفی و پانکروماتیک، بعد از باز نمونه‌برداری تصاویر چندطیفی هر بلوک تلفیق از $16=4 \times 4$ پیکسل تشکیل خواهد شد. برای انجام فرایند باز نمونه‌برداری از روش درون‌یابی مکعبی^{۲۲} استفاده شده است. جداول (۱) و (۲) به ترتیب مشخصات باندهای طیفی و پانکروماتیک این دو تصویر را نشان می‌دهند.



ب- تصویر چندطیفی منطقه مطالعاتی اول



الف- تصویر پانکروماتیک منطقه مطالعاتی اول



د- تصویر چندطیفی منطقه مطالعاتی دوم



ج- تصویر پانکروماتیک منطقه مطالعاتی دوم

شکل ۹- تصاویر پانکروماتیک و چندطیفی مناطق مطالعاتی

تبدیل موجک از تکنیک تجزیه‌ی هار استفاده شده است. جداول (۵) و (۶) نتایج چهار شاخص SSIM، SNR، SAM، RMSE برای این ۴ روش تلفیق و بهترین نتایج کسب شده از روش پیشنهادی (آزمایش سوم) نشان می‌دهند.

جدول ۵ - نتایج معیارهای آماری روش‌های تلفیق متعلق به تصویر WorldView-2

روش تلفیق	RMSE	SAM	SNR	SSIM
بهترین نتیجه روش پیشنهادی	۳۸,۵۳	۰,۱۱۶	۹,۷۱	۰,۹۹۷
تبدیل موجک	۲۶۳/۲۹	۰,۰۸۳	۰,۳۳	۰,۲۳۹
گرام-اشمیت	۴۳,۷۹	۰,۱۳۰	۹,۱۸	۰,۹۹۶
نرمال‌سازی رنگی	۵۸,۴۶	۰,۱۴۶	۵,۴۲	۰,۹۷۰
تحلیل مؤلفه‌های اساسی	۹۳,۶۰	۰,۲۶۲	۷,۷۴	۰,۹۸۸

جدول ۶ - نتایج معیارهای آماری روش‌های تلفیق متعلق به تصویر GeoEye

روش تلفیق	RMSE	SAM	SNR	SSIM
بهترین نتیجه روش پیشنهادی	۶۳,۹۳	۰,۱۱۱	۹,۰۱۹	۰,۹۹۱
تبدیل موجک	۴۲۸/۴۶	۰,۱۳۷	۰,۳۴	۰,۲۷۴
گرام-اشمیت	۷۰,۶۷	۰,۱۲۰	۸,۵۶	۰,۹۸۴
نرمال‌سازی رنگی	۸۶,۶۳	۰,۱۴۱	۷,۰۰	۰,۹۷۸
تحلیل مؤلفه‌های اساسی	۷۳,۵۷	۰,۱۲۵	۸,۲۶	۰,۹۸۶

همان‌طور که در نتایج جداول (۵) و (۶) مشاهده می‌شود، رویکرد پیشنهادی توانسته نتایج دقیق‌تری را در مقایسه با روش‌های مقایسه‌ای کسب نماید. به عبارتی دیگر، رویکرد پیشنهادی توانسته به‌طور متوسط افزایش دقت ۵۵ درصدی در تصاویر GeoEye و ۶۱ درصدی در تصاویر WorldView-2 را به دنبال داشته باشد. این درصدها مربوط به صرفاً شاخص RMSE بوده ولیکن سایر شاخص‌ها نیز روندی نسبتاً مشابه را برخوردارند.

از نکات قابل توجه در نتایج گزارش شده‌ی جداول (۵) و (۶) اختلاف معنادار مقدار شاخص‌های RMSE، SNR و SSIM در روش موجک نسبت به سایر روش‌های مقایسه‌ای است. به نظر می‌رسد این اتفاق ناشی از تمایز توان تفکیک رادیومتریکی تصاویر پانکروماتیک و چندطیفی باشد. به عبارت بهتر، به دلیل استخراج لبه‌های جهت‌دار در تصاویر پانکروماتیک و تلفیق آن با تصاویر چندطیفی، کنتراست بیشتری در محل لبه‌ها حادث شده که این موضوع منجر به ایجاد تمایز معناداری با تصاویر مرجع شده است.

در روند ارزیابی نتایج تلفیق از چهار شاخص معرفی شده در بخش «روش‌های ارزیابی دقت و کیفیت تصاویر» به‌منظور اندازه‌گیری کفایت نتایج استفاده شده است. جدول‌های (۳) و (۴) نتایج کسب شده از این ۵ آزمایش به ترتیب برای تصاویر WorldView-2 و GeoEye را نشان می‌دهند.

جدول ۳ - نتایج معیارهای آماری کفایت تلفیق در فضای فرکانس متعلق به تصویر WorldView-2

آزمایش‌ها	RMSE	SAM	SNR	SSIM
آزمایش اول	۴۱,۰۵	۰,۱۲۶	۸,۸۷	۰,۹۹۴
آزمایش دوم	۴۰,۹۲	۰,۱۲۵	۸,۸۹	۰,۹۹۵
آزمایش سوم	۳۸,۵۳	۰,۱۱۶	۹,۷۱	۰,۹۹۷
آزمایش چهارم	۳۹,۲۷	۰,۱۱۹	۹,۴۱	۰,۹۹۶
آزمایش پنجم	۳۹,۵۴	۰,۱۱۹	۹,۴۶	۰,۹۹۶

جدول ۴ - نتایج معیارهای آماری کفایت تلفیق در فضای فرکانس متعلق به تصویر GeoEye

آزمایش‌ها	RMSE	SAM	SNR	SSIM
آزمایش اول	۷۳,۰۸	۰,۱۳۵	۸,۱۱	۰,۹۶۴
آزمایش دوم	۶۸,۶۰	۰,۱۲۸	۸,۴۲	۰,۹۷۷
آزمایش سوم	۶۳,۹۳	۰,۱۱۱	۹,۰۱	۰,۹۹۱
آزمایش چهارم	۶۴,۷۳	۰,۱۱۶	۸,۷۹	۰,۹۸۸
آزمایش پنجم	۶۳,۸۲	۰,۱۱۴	۸,۹۸	۰,۹۸۵

مقایسه‌ی نتایج حاصل از محاسبه‌ی معیارهای آماری در آزمایش‌های اول و دوم، نقش وزن‌دهی در کمیت‌های شاخص به‌پهینگی به‌منظور تولید تصویر تلفیقی با کیفیت مطلوب را نشان می‌دهند. از سوی دیگر، ارزیابی نتایج حاصل از آزمایش‌های سوم تا پنجم نیز بر موفقیت به‌کارگیری فیلترهای نرم به‌جای فیلترهای قطعی دلالت دارد. شایان ذکر است که این موضوع در تحقیقات قبلی نیز به اثبات رسیده است. با مقایسه نتایج عددی گزارش شده در جداول (۳) و (۴) می‌توان ادعا داشت که به‌کارگیری هم‌زمان فیلترهای نرم گوسی و شاخص شایستگی وزن‌دار (آزمایش سوم) بهترین نتایج را در رقابتی تنگاتنگ نسبت به سایر فیلترهای نرم کسب کرده‌اند. به عبارت بهتر، به‌کارگیری فیلترهای نرم بهتری را نسبت به فیلتر قطعی ایجاد می‌کنند.

در دومین رویکرد ارزیابی نتایج، بهترین نتایج کسب شده از روش پیشنهادی (آزمایش سوم) با روش‌های تلفیق رایج در فضای فرکانس و مکان مورد مقایسه قرار گرفته‌اند. تبدیل موجک [۲۹] و [۳۰] به‌عنوان نماینده‌ی دیگری از روش‌های مبتنی بر فضای فرکانس و روش گرام-اشمیت [۳۱]، نرمال‌سازی رنگی [۳۲] و روش تحلیل مؤلفه‌های اساسی [۳۱] از جمله روش‌های مرسوم در حوزه مکان، برای این مقایسه انتخاب شده‌اند. شایان ذکر است که در

در آخرین رویکرد ارزیابی نتایج، مقایسه‌ی بصری نتایج صورت گرفته است. در این رویکرد، تصاویر تلفیق شده در روش‌های مقایسه‌ای و نتایج کسب شده از روش پیشنهادی در کنار هم نمایش داده شده‌اند. این کار به درک بصری تمایز روش‌های تلفیق کمک کرده و کیفیت بهتر نتایج روش پیشنهادی را نشان می‌دهد. شکل‌های (۱۰) و (۱۱) به ترتیب ترکیب رنگی کاذب تصاویر تلفیق شده در GeoEye و WorldView-2 را نشان می‌دهد.

ناگفته نماند که روش تبدیل موجک به کار گرفته شده صرفاً یک روش استاندارد و پایه بوده و نسخه‌های به‌روزتری از این روش در تحقیقات جدید توسعه یافته است. با این حال شاخص ارزیابی SAM گواه موفقیت‌آمیز بودن نتایج تلفیق به کمک تبدیل موجک است. این شاخص نشان می‌دهد که به‌رغم وجود اختلاف در لبه‌های تصویری، کماکان انحراف جدی در باندهای طیفی ایجاد نشده است.



الف- تصویر پانکروماتیک
ب- تصویر چند طیفی
ت- تصویر چند طیفی مرجع
ث- تصویر تلفیق شده به روش تبدیل موجک
ج- تصویر تلفیق شده به روش گرام اشمیت

الف- تصویر تلفیق شده به روش پانکروماتیک
ب- تصویر تلفیق شده مبتنی بر تحلیل مؤلفه‌های اساسی
ت- تصویر تلفیق شده به روش پیشنهادی با فیلتر گوس
ث- تصویر تلفیق شده به روش پیشنهادی با فیلتر هنینگ
ج- تصویر تلفیق شده به روش پیشنهادی با فیلتر بارلت

شکل ۱۰- تصاویر تلفیق شده منطقه مطالعاتی اول



الف- تصویر پانکروماتیک
ب- تصویر چند طیفی
ت- تصویر چند طیفی مرجع
ث- تصویر تلفیق شده به روش تبدیل موجک
ج- تصویر تلفیق شده به روش گرام اشمیت

الف- تصویر تلفیق شده به روش پانکروماتیک
ب- تصویر تلفیق شده مبتنی بر تحلیل مؤلفه‌های اساسی
ت- تصویر تلفیق شده به روش پیشنهادی با فیلتر گوس
ث- تصویر تلفیق شده به روش پیشنهادی با فیلتر هنینگ
ج- تصویر تلفیق شده به روش پیشنهادی با فیلتر بارلت

شکل ۱۱- تصاویر تلفیق شده منطقه مطالعاتی دوم

بصری حاکی از قابلیت روش پیشنهادی در کاهش اعوجاج مکانی در مرز عوارض بوده و همچنین مشابهت طیفی تصویر تلفیق شده

در اشکال ارائه شده، نحوه‌ی عملکرد هریک از روش‌های مذکور در تلفیق تصاویر به نمایش گذاشته شده است. ارزیابی

با تصویر مرجع بیانگر توانایی روش پیشنهادی در حفظ اطلاعات طیفی است.

نتیجه گیری

در این مقاله یک شاخص شایستگی وزن دار به منظور یافتن ابعاد فیلترگذاری در فضای فرکانس به منظور تلفیق تصاویر پیشنهاد شد. به کارگیری همزمان این الگوریتم پیشنهادی و فیلترگذاری نرم گوسی توانست بهترین نتایج تلفیق در فضای فرکانس را تأمین سازد. مقایسه کمی نتایج به دست آمده از روش پیشنهادی با روش های مرسوم تلفیق داده، به طور متوسط بهبود دقت (RMSE) نزدیک به ۵۸ درصدی را در دو مجموعه داده این تحقیق به دنبال داشته و سایر پارامترهای ارزیابی نیز بهبود را از خود نشان داده اند. در روش پیشنهاد شده با تنظیم وزن دو شاخص رنگ پذیری و جزئیات مکانی تلاش شد تا اثرات مربوط به تمایز محتوای تحت پوشش تصاویر و توان تفکیک رادیومتریکی تنظیم شده و نتایج بهتری در مقایسه با حالت بدون وزن کسب گردد. از سوی دیگر، نتایج نشان داد که استفاده از فیلترگذاری نرم می تواند در بهبود دقت نتایج اثرگذار باشد. مواردی همچون: ۱- ارائه راهکاری جهت توسعه شاخص بهینه گی در جهت شناسایی ابعاد فیلتر بهینه برای هر باند به طور مجزا، ۲- استفاده از الگوریتم های فرابینکاری به منظور محاسبه وزن بهینه پارامترهای دخیل در شاخص بهینه گی و ۳- افزودن شاخص های دیگر به ساختار تابع شایستگی را می توان به عنوان افق تحقیقاتی آتی در این حوزه برشمرد.

مراجع

- [6] H. Li, L. Jing, Y. Tang, and L. Wang, "An image Fusion method based on image segmentation for high-resolution remotely-sensed imagery," *Remote Sensing*, vol.10, no.5, pp.790, 2018
- [7] Y. Ling, M. Ehlers, E.L. Usery and M. Madden, "FFT-enhanced IHS transform method for fusing high-resolution satellite images," *ISPRS Journal of photogrammetry and Remote Sensing*, vol. 61, no.6, pp.381-392, 2018
- [8] Denipote, J.G. and Paiva, M.S.V., "A Fourier transform-based approach to fusion high spatial resolution remote sensing images," *Sixth Indian Conference on Computer Vision, Graphics & Image Processing, IEEE*, pp.179-186, 2008
- [9] A. Safdarinezhad, A. Rahmanizadeh, M. Valadan Zoej, M. Mokhtarzade and M. Jannati, "Robust method for ikonos imagery fusion in frequency domain," *International Conference on Advancements in Electronics and Power Engineering*, pp.103-108, 2011.
- [10] L. Hu, B. Xiangli, L. Su and Y. Yuan, "Fusion of multispectral and panchromatic images using lab transform based on Fourier filtering," *International Geoscience and Remote Sensing Symposium, IEEE*, pp.3384-2287, 2012.
- [11] M. Bashirpur, M. Valadan Zoej and Y. Maqsoodi, "FFT-PCA method for fusing remote sensing imagery," *Engineering Journal of Geospatial Information Technology*, vol.5, no.2, pp.123-140, 2017, (in persian).
- [12] V.P.S. Naidu, "Multi-resolution image fusion by FFT," *International Conference on Image Information Processing, IEEE*, pp.1-6, 2011.
- [13] G.G. Kumar, S.K. Sahoo, and P.K. Meher, "50 years of fft algorithms and applications," *Circuits, Systems, and Signal Processing*, pp.1-34, 2019.
- [14] M.S. Shaikh, A. Choudhry and R. Wadhvani, "Analysis of digital image filters in frequency domain," *International Journal of Computer Applications*, vol.140, no. 6, pp.12-19, 2016.
- [15] S. Sonnad, "A survey on fusion of multi spectral and panchromatic images for high spatial and spectral information," In *2016 International Conference on Wireless Communications, Signal Processing and Networking (WiSPNET) IEEE*, pp.177-180, 2016.
- [16] B. Trstenjak, S. Mikac and J. Trstenjak, "The framework for fast skew angle detection and auto correction of scanned documents," *Annals of DAAAM & Proceedings vol. 29*, pp.0486-494, 2018.
- [17] 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, 2008.
- [18] J. Zhong, B. Yang, G. Huang, F. Zhong and Z. Chen, "Remote sensing image fusion with convolutional neural network," *Sensing and Imaging*, vol.17, no.1, p.10, 2016.
- [19] P. Jagalingam and A.V. Hegde, "A review of quality metrics for fused image," *International Conference on Water Resources, Coastal and Ocean Engineering (ICWRCOE)*, pp.133-142, 2015.
- [20] H. Boztoprak, "An alternative image quality assessment method for blurred images," *Balkan Journal of Electrical and Computer Engineering*, vol. 4, no.1, pp.46-50, 2016.
- [1] Y. Ma, H. Wu, L. Wang, B. Huang, R. Ranjan, A. Zomaya, et al., "Remote sensing big data computing: Challenges and opportunities," *Future Generation Computer Systems*, vol. 51, pp. 47-60, 2015.
- [2] K. Zhang, F. Zhang, and S. Yang, "Fusion of multispectral and panchromatic images via spatial weighted neighbor embedding," *Remote Sensing*, vol. 11, p. 557, 2019.
- [3] F. Hellweger, P. Schlosser, U. Lall, and J. Weissel, "Use of satellite imagery for water quality studies in New York Harbor," *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, vol. 61, pp. 437-448, 2004
- [4] V. Kaur and J. Kaur, "Comparison of image fusion techniques: spatial and transform domain based techniques," *International Journal of Engineering And Computer Science*, vol. 4, pp. 12109-12112, 2015.
- [5] M. Manchanda, "Fusion of Multispectral and Panchromatic Images based on Fourier Filtering in HSV Color Space". *International Journal of Trend in Scientific Research and Development*, vol.1, no.4, pp.632-635, 2017

- Journal of Advanced Biological and Biomedical Research*, Vol. 3, No.1, pp. 93-96, 2015.
- [28] V. Patanavijit, "performance analysis of digital fir lp filter implementation based on 5 window techniques: rectangular, barlett, hann, hamming and blackman," *International Journal of Simulation-Systems, Science & Technology*, Vol. 20, No. 3, pp.11.1-11.6, 2019.
- [29] S. Jadhav, "image fusion based on wavelet transform," *International Journal of Engineering Research*, vol.3, no.7, pp.442-445, 2014.
- [30] V.R. Pandit and R. J. Bhiwani, "Image fusion in remote sensing applications: A review," *International journal of computer applications*, vol.120, no.10, pp. 22-32, 2015.
- [31] R.Welch and W, Ahlers, "Merging multiresolution SPOT HRV and Landsat TM data," *Photogrammetric Engineering & Remote Sensing*, vol.53, no.3, pp.301-303, 1987.
- [32] J. Vrabel, P. Doraiswamy and A. Stern, "Application of hyperspectral imagery resolution improvement for site-specific farming," *In ASPRS 2002 Conference Proceedings*, 2002.
- [21] F.A. Al-Wassai, N.V. Kalyankar, "A novel metric approach evaluation for the spatial enhancement of pansharpened images," *arXiv preprint arXiv: 1207.5064*, 2012.
- [22] C. Pohl and J. Van Genderen, *Remote Sensing Image Fusion: A Practical Guide*, Crc Press, p.158-159, 2016.
- [23] S. Pistonesi, J.Martinez, S. Ojeda and R.Vallejos, "Structural similarity metrics for quality image fusion assessment: Algorithms," *Image Processing on Line*, pp. 345-368, 2018.
- [24] L. Alparone, B. Aiazzi, S. Baronti and A. Garzelli, *Remote sensing image fusion*, ser. Signal and Image Processing of Earth Observations. Boca Raton, FL: CRC Press, 2015.
- [25] W. Dou, "Image degradation for quality assessment of pan-sharpening methods," *Remote Sensing*, vol.10, no.1, p. 154, 2018.
- [26] A. Makandar and B. Halalli, "Image enhancement techniques using highpass and lowpass filters," *International Journal of Computer Applications*, vol.109, no.14, pp.12-15, 2015.
- [27] A. Dogra and D. Ayush, "Performance comparison of gaussian and elliptic high pass filter," *International*