



بهبود توان تفکیک مکانی باندهای حرارتی ماهواره لندست ۸ به کمک باندهای مرئی

فریناز فرهنگ^۱، مهدی آخوندزاده^۲

- ۱- دانشجوی کارشناسی ارشد، دانشکده مهندسی نقشه برداری و اطلاعات مکانی، پردیس دانشکده های فنی، دانشگاه تهران
۲- استادیار دانشکده مهندسی نقشه برداری و اطلاعات مکانی، پردیس دانشکده های فنی، دانشگاه تهران

چکیده:

علیرغم اهمیت باندهای حرارتی در کاربردهای مختلف و به خصوص محاسبه دمای سطح، آنها رزولوشن مکانی پایینی داشته و تشخیص عوارض در آنها با ابهام همراه است. هدف این مقاله بهبود توان تفکیک مکانی باندهای حرارتی است. یکی از روش های موثر برای بهبود کیفیت تصاویر با رزولوشن پایین ادغام این نوع باندها با باندهایی با توان تفکیک مکانی بالاتر است. ما در این مقاله اقدام به تلفیق باندهای حرارتی و مرئی می نماییم. به دلیل اهمیت آنالیزهای چند ریزمساز همانند موجک، لاپلاسین پرمایم، کانتورلت، کرولت، ... در تلفیق تصاویر در سطح پیکسل، ما برخی از این روش ها را برگزیده و نتایج آنها را با هم مقایسه می نماییم. از تبدیل کانتورلت به دلیل دارا بودن مزیت هایی نظیر خاصیت ناهمسانگرد توابع پایه، تشخیص جهت های مختلف و انحنای های هموار بهره برده و به دلیل وجود نمونه برداری در مراحل این تبدیل و امکان نشت فرکانسی و ایجاد صنوعات، از انواع دیگر آن به نام های کانتورلت بدون کاهش بعد و کانتورلت با محلی سازی فرکانس های شارپ نیز استفاده کرده و نتایج را با تبدیل های موجک گستته و موجک ایستا مقایسه می نماییم. پس از بررسی نتایج ادغام به کمک پارامترهای ارزیابی طیفی و مکانی نظیر CC, HPCC, RMSE, ... مشاهده خواهیم کرد که باند ادغام شده توسط روش های موجک ایستا و کانتورلت با محلی سازی فرکانس های شارپ در حالی که جزئیات بصری و مکانی باند حرارتی را بهبود داده اند، ماهیت حرارتی آن را نیز در حد خوبی حفظ کرده اند. به عنوان مثال جذر میانگین مربعات خطای محاسبه شده میان دمای تابشی باند حرارتی و ادغام شده در حدود ۱ کلوین بوده و این بیانگر این است که با وجود فقدان پوشش طیفی میان باندهای مرئی و حرارتی به نتایج موفقیت آمیزی دست یافته ایم.

واژه های کلیدی ادغام باندها، آنالیزهای چند ریزه ساز، کانتورلت، آنالیز کیفیت طیفی، آنالیز کیفیت مکانی

۱- مقدمه

سنجهش از دور در حالت کلی به دو دسته‌های سنجش از دور حرارتی و انعکاسی تقسیم‌بندی می‌شود. بیشتر تصاویر مادون قرمز حرارتی در طول موجی میان ۸ تا ۱۴ میکرومتر گرفته می‌شوند. در تصویربرداری ماهواره‌ای وجود یک حد قابل قبول برای ضریب نسبت سیگنال به نویز^۱ (SNR) وجود دارد که لازمست مقدار فوتون (انرژی نوری) اخذ شده توسط سلول سنجنده زیاد باشد. انرژی اخذ شده توسط هر سلول، رابطه‌ی مستقیم با سطح پیکسل (دقیق مکانی) و پهنه‌ی باند (دقیق طیفی) دارد. بزرگ نمودن سطح پیکسل‌های نمونه‌برداری سبب می‌شود که میدان دید لحظه‌ای^۲ (IFOV) سنجنده زیاد شده و در نتیجه دقت مکانی تصویر حاصله کم گردد. برای ثابت نگه داشتن ضریب SNR در باندهای طیف الکترومغناطیس با طول موج بالا (باندهای مادون قرمز حرارتی) سطح سلول و در نتیجه میدان دید لحظه‌ای سنجنده را زیاد می‌کنند که این سبب کاهش قدرت تفکیک مکانی در باندهای مذکور می‌گردد. بنابراین در باندهای حرارتی امکان دستیابی دقیق به جزئیات و محل دقیق تارگت‌ها وجود ندارد [۱]. یک روش موثر برای تهیه تصاویر با دقت مکانی بالا، استفاده از فرآیند ادغام تصاویر^۳ می‌باشد. ادغام تصاویر به مجموعه عملیاتی اطلاق می‌شود که تصاویر اخذ شده از سنسورهای مختلف و یا تصاویر اخذ شده در طول موج‌های مختلف را در یک تصویر به نمایش درآوریم. در این فرآیند، اطلاعات مکانی از تصاویر با قدرت تفکیک مکانی بالا استخراج و به تصویر با قدرت تفکیک مکانی پایین‌تر، منتقل می‌شود [۲ و ۳]. بنابراین هدف اصلی ما در این مقاله ادغام باندهای مادون قرمز حرارتی و داده‌های مرئی به منظور بهبود رزولوشن مکانی در این باندهاست.

ادغام اطلاعات در سطوح مختلف نظریه ادغام در سطح پیکسل، سطح ویژگی‌ها (عوارض) و در سطح تصمیم انجام می‌شود [۴]. روش‌های متنوعی برای ادغام تصاویر در سطح پیکسل موجود است، همانند تبدیل شدت-رنگ-اشباع (IHS)، تبدیل براوی، آنالیز مولفه‌های اصلی، ترکیبات ریاضی و روش‌های مبتنی بر تجزیه‌های چندریزه‌ساز همانند موجک گسسته^۴ (DWT)، موجک ایستا^۵ (SWT)، کرولت، هرم لاپلاسی، کانتورلت^۶ (CT)، کانتورلت بدون کاهش بعد^۷ (NSCT) و کانتورلت با محلی سازی فرکانس‌های بالا^۸ (SFLCT) و ... به دلیل اهمیت تجزیه‌های چندریزه‌ساز و امکان تحلیل سیگنال در مقیاس‌ها و فرکانس‌های مختلف، ما در این مقاله از این روش‌ها همانند موجک و کانتورلت استفاده خواهیم کرد [۵].

عزیزی و همکاران در سال ۲۰۰۵ تصاویر مادون قرمز حرارتی ماهواره ASTER با رزولوشن ۹۰ متر را با تصویر مرئی - مادون قرمز نزدیک با رزولوشن ۱۵ متر، با روش لاپلاسین پیرامید تعمیم یافته ادغام نمودند. آنها نتیجه گرفتند که علیرغم فقدان اشتراک طیفی میان باندهای VNIR و TIR، تصویر ادغام شده مشخصه‌های طیفی خود را در عین حال بهبود قدرت تفکیک مکانی حفظ نموده است. آن‌ها با بررسی همبستگی و بایاس میان باندهای منبع و ادغام شده کارامد بودن نتیجه خود را بررسی نمودند [۶]. Han و همکاران در سال ۲۰۱۴ داده‌های مرئی با رزولوشن یک کیلومتر و داده‌های مادون قرمز در چهار باند طیفی با رزولوشن چهار کیلومتر، جمع‌آوری شده توسط ماهواره‌ای زمین‌آهنگ را ادغام نمودند. هدف آن‌ها از تلفیق این تصاویر افزایش رزولوشن مکانی تصاویر حرارتی برای استفاده‌ی هر چه بهتر از آن در کاربردهای هواشناسی و پیش‌بینی وضعیت هوا بود. آنها از روش ویولت گسسته برای تلفیق استفاده کردند. پس از آن یک تصحیح فیزیکی بر مبنای قانون استفن بولتزمن برای کاستن از اعوجاج طیفی ایجاد شده روی تصویر

¹Signal to Noise Ratio

²Instantaneous Field of View

³Image Fusion

⁴Discrete Wavelet Transform

⁵Stationary Wavelet Transform

⁶Contourlet Transform

⁷Nonsubsampled Contourlet Transform

⁸Sharp Frequency Localization Contourlet Transform

تلفیق شده اعمال کردند. آنها نتیجه گرفتند که با اعمال این تصحیح علاوه برافزایش قدرت تفکیک مکانی، طیف نیز حفظ می‌گردد [۷].

تمامی این روش‌ها به بهبود ویژگی‌های بصری تصویر می‌انجامد، در مورد ادغام باندهای حرارتی با مرئی روشی ارجح است که علاوه بر بهبود جزئیات مکانی، اعوجاجات طیفی کمی حین اضافه نمودن ساختارهای مکانی داشته باشد. تبدیل کانتورلت بر خلاف تبدیل موجک، محدود به تجزیه در سه جهت افقی، عمودی و قطری نیست، بلکه می‌تواند در هر مقیاس، تصویر را به تعداد جهت‌های بیشتری تجزیه کند. این تبدیل به طور ذاتی دو بعدی است و بر خلاف تبدیل موجک، قادر به تشخیص بهتر ناهمواری‌ها و انحنایها در تصویر می‌باشد [۸]. بنابراین ما در این مقاله ادغام با روش‌های مختلف تبدیل کانتورلت را با DWT و SWT مقایسه می‌نماییم. در بخش دوم به بیان کلی روش‌های کانتورلت خواهیم پرداخت. در بخش سوم به مراحل ادغام و در بخش چهارم به داده‌های مورد مطالعه پرداخته و در بخش پنجم نتایج بصری و آنالیزهای طیفی و مکانی را مشاهده می‌کنیم.

۲- روش‌های تجزیه چندرزوشی به کمک تبدیل کانتورلت

۱-۱- تبدیل کانتورلت

این تبدیل از دو مرحله‌ی اصلی شامل هرم لاپلاسی و بانک فیلترهای جهت‌دار تشکیل شده است. هرم لاپلاسی بدین صورت است که ابتدا روی تصویر، فیلتر پایین‌گذری اعمال کرده، سپس از تصویر اصلی کم می‌نماییم، بنابراین جزئیات و اجزای فرکانس بالا در تصویر تفاضلی باقی می‌ماند. آن‌گاه زیرباند پایین‌گذر با فاکتور (۰,۲) به صورت کم نمونه^۱، نمونه‌برداری می‌شود و این فرآیند تا چند مرحله تکرار می‌گردد. در هر مرحله از تجزیه روی تصویر تفاضلی با فرکانس بالا فیلتر بانک جهت‌دار اعمال شده تا زیرباند بالاگذر به جهت‌های مختلف تجزیه گردد [۹].

تبدیل کانتورلت به دلیل وجود مرحله‌ی نمونه‌برداری نسبت به تغییر مکان حساس است، بنابراین با تغییر مکانی کمی در سیگنال ورودی، تغییرات زیادی در توزیع انرژی میان ضرایب مختلف در سطوح مختلف مقیاس ایجاد می‌شود [۱۰]. این مسئله هنگام عدم انطباق^۲ دو باند نسبت به هم، ایجاد خطای قابل توجه در نتیجه‌ی ادغام می‌کند. در نتیجه با اجرای این تبدیل پدیده‌ی نشت فرکانسی^۳ رخ داده و ممکن است هنگام بازسازی سیگنال به مشکل برخورد کرده و مصنوعاتی مشبک^۴ وارد تصویر ادغام شده‌مان گردد [۱۱]. بنابراین برای رفع این مشکل، نوع بدون مرحله‌ی نمونه‌برداری آن را که تغییر ناپذیر با جابجایی^۵ هست را نیز اجرا می‌نماییم.

۲-۲- تبدیل کانتورلت بدون کاهش بعد

در این نوع تبدیل کانتورلت، در مرحله‌ی تجزیه‌ی مقیاسی از ساختار هرمی بدون کاهش بعد و در مرحله‌ی تجزیه‌ی جهتی از ساختار فیلتر بانک‌های جهتی بدون کاهش بعد استفاده می‌شود [۹].

مشکل بعدی این تبدیلات این است که فیلتر بانک‌های جهت دار غیر ایده آل بوده و امکان نشت فرکانسی در تجزیه‌ی جهتی زیر باندهای بالاگذر است. این نوع از پدیده‌ی نشت فرکانسی مورد دلخواه نبوده و سبب می‌شود که مصنوعات فازی در تصویر پدید آید. با معرفی ساختار جدیدی، این مشکل کانتورلت برطرف شده است [۹ و ۱۲].

¹ Downsample

² Register

³ Aliasing

⁴ Blocking Artifact

⁵ Shift Invariant

۲-۳- تبدیل کانتورلت با محلی سازی فرکانس‌های شارپ

مهم‌ترین برتری این تبدیل با کانتورلت اصلی این است که در این تبدیل به جای استفاده از هرم لاپلاسی برای تجزیه چند مقیاسی از ساختار هرمی جدیدی متشكل از فیلترهای باند گذر استفاده می‌شود. در مرحله‌ی اول تجزیه توسط این تبدیل، قسمت پایین گنر سیگنال با فاکتور (d,d) کم نمونه برداری می‌گردد، در حالی که در مراحل بعدی با همان فاکتور (۲,۲) نمونه برداری انجام می‌شود. ساختار جدید فیلتر بانک استفاده شده در این تبدیل به نوعی است که با محصور کردن ناحیه‌ی عبور باندی فیلتر پایین گذر بین^۲ $\left[\frac{\pi}{2}, \frac{\pi}{2}\right]$ پدیده‌ی نشت فرکانسی ذاتی را بر طرف می‌کند [۱۲]. با در نظر گرفتن مقادیر ۱ و ۲ برای d تبدیل‌های SFLCT با نسبت افزونگی ۰.۳۳ و ۰.۳۳ به‌دست آمده که به‌ترتیب آن‌ها را CT ۲.۳۳ و CT ۱.۳۳ می‌نامیم [۱۳].

۳- روش ترکیب باندها

۳-۱- پیش‌پردازش

در این مرحله اقدام به登یسترن نمودن باندهای حرارتی و مرئی نسبت به هم و انجام تصحیحات اتمسفری می‌کنیم. بنابراین انعکاس سطحی^۱ باندهای مرئی و دمای تابشی^۲ باندهای حرارتی در دسترس قرار می‌گیرد.

۳-۲- تجزیه باندها

نتیجه‌ی اعمال تبدیل‌های ذکر شده در بخش ۲ بر روی دو باند مرئی و حرارتی ایجاد یک زیرباند پایین گذر شامل اجزای تقریب و زیرباندهای بالاگذر در مقیاس‌های مختلف شامل اجزای جزئیات است. ادغام تصاویر با ترکیب ضرایب به‌دست آمده از تجزیه‌ی تصاویر منبع امکان‌پذیر می‌شود.

۳-۳- ادغام باندها

ضرایب تقریب را بدون هیچ تغییری از تصویر حرارتی می‌گیریم، با این کار به نوعی ماهیت اصلی تصویر حرارتیمان را حفظ می‌نماییم [۹]. اجزای فرکانس بالا را به صورت محلی از تصویر مرئی اخذ نموده و در یک فاکتور وزن بر اساس مدل آماری تعریف شده ضرب کرده و انتخاب نماییم. مدل آماری را بر اساس میزان شباهت باند پایین گذر حرارتی و مرئی در هر سطح تجزیه تشکیل می‌دهیم. $\rho(m, n)$ و $\sigma_{TIR}(m, n)$ و $\sigma_{VIS}(m, n)$ را به ترتیب انحراف استاندارد باند پایین گذر در هر مرحله تجزیه باند حرارتی و مرئی و ضریب همبستگی‌شان (CC)^۳ می‌نامیم. $1 < \theta < 0$ را حدآستانه‌ای ثابت در هر سطح تجزیه در نظر می‌گیریم. ضریب وزن‌دهی α در ضرایب فرکانس بالا در هر سطح تجزیه ضرب شده و به عنوان ضریب فرکانس بالای تصویر ادغام شده مان در نظر گرفته می‌شود [۱۴]. داریم:

$$\theta = 1 - CC \quad \text{رابطه (۱)}$$

$$\alpha = \min \left[\frac{\sigma_{TIR}}{(1 + \sigma_{VIS})}, 2 \right] \text{ if } \rho \geq \theta \quad \text{رابطه (۲)}$$

$$\alpha = 0 \quad \text{if } \rho < \theta \quad \text{رابطه (۳)}$$

در نهایت با داشتن ضرایب تصویر ادغام شده با معکوس تبدیلات ذکر شده تصویر نهایی به‌دست می‌آید.

۴- روش‌های ارزیابی کیفیت نتایج تصویر ادغام شده:

برای ارزیابی کیفیت مکانی و طیفی نتایج ادغام از شاخص‌های گفته شده در این بخش استفاده می‌نماییم.

^۱ At Surface Reflectance

^۲ Brightness Temperature

^۳Correlation Coefficient

۳-۴-۱ آنالیز طیفی:

- CC مقداری میان ۱ تا ۱ دارد. هرچه مقدار ضریب همبستگی میان باند حرارتی و ادغام شده بیشتر باشد، بیانگر حفظ بیشتر اطلاعات طیفی است.

- نگاشت زاویه‌ای طیفی (SAM)^۱: با استفاده از ضرب داخلی، زاویه‌ای طیفی میان دو بردار پیکسل باند حرارتی و ادغام شده را محاسبه می‌کند. هر چه مقدار این پارامتر کوچک باشد، اعوجاجات طیفی حداقل رخ داده و دو تصویر به هم شبیه‌تر خواهد بود.

- جذر میانگین مربعات خطأ (RMSE)^۲: میزان اعوجاج طیفی را در باند ادغام شده در مقایسه با باند حرارتی نشان می‌دهد هرچه این مقدار به صفر نزدیک‌تر باشد، یعنی اعوجاج کمتری صورت گرفته است.

۳-۴-۲ آنالیز مکانی:

- SNR: این پارامتر تاثیر نویز بر روی تصویر را بیان می‌کند. هر چه مقدار آن بزرگ‌تر باشد، کیفیت مکانی باند ادغام شده مطلوب‌تر خواهد بود.

- میانگین گرادیانت (AG): میانگین گرادیانت میزان وضوح تصویر را مشخص می‌نماید.

- ضریب همبستگی میان باندهای بالاگذر (HPCC)^۳: برای استخراج داده‌های فرکانس بالا، تصاویر را از فیلتر لاپلاسین عبور داده، سپس ضریب همبستگی میان تصاویر فیلتر شده را برای باند مرئی و ادغام شده محاسبه می‌نماییم. مقدار بالای این همبستگی بیانگر انتقال میزان بیشتری از اطلاعات مکانی خواهد بود.

۴- داده‌های مورد مطالعه:

از داده‌های ماهواره لندست ۸ در این مقاله استفاده می‌نماییم. لندست ۸ دارای دو سنسور عملیاتی تصویرساز زمینی (OLI)^۴ و مادون قرمز حرارتی (TIRS)^۵ است، سنسور OLI آن دارای ۹ باند طیفی با رزولوشن ۳۰ متر برای باندهای ۱ تا ۷ و ۹ می باشد. رزولوشن باند شماره ۸ (پانکروماتیک) ۱۵ متر است. سنسور TIRS آن مجهز به دو باند در محدوده مادون قرمز حرارتی (باندهای شماره ۱۰ و ۱۱) است که با رزولوشن ۱۰۰ متر جمع آوری شده، ولی در سایت USGS برای هم مختصات بودن با باندهای OLI به ۳۰ متر نمونه برداری و عرضه شده است. داده‌های مورد استفاده در این مقاله از منطقه‌ای در جنوب غربی ایران گرفته شده است. در این مقاله به منظور ارزیابی عملکرد دهای روش‌های ادغام، قسمتی از تصویر (۵۱۲ در ۵۱۲ پیکسل) را انتخاب می‌نماییم. در شکل (۱) باند شماره ۴ و ۱۰ را با اعمال تصحیح اتمسفری مشاهده می‌نماییم.

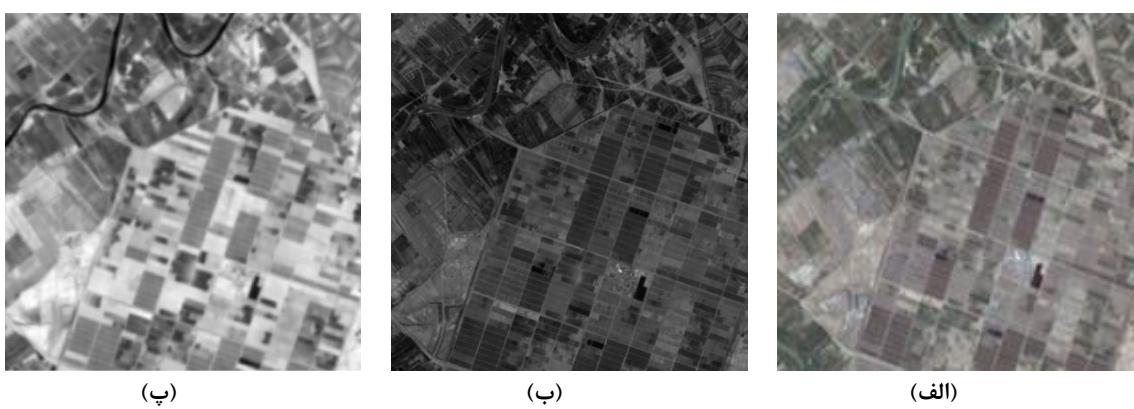
¹Spectral Angle Mapper

²Root Mean Squared Error

³High-Pass Correlation Coefficient

⁴Operational Land Imager

⁵Thermal Infrared Sensor



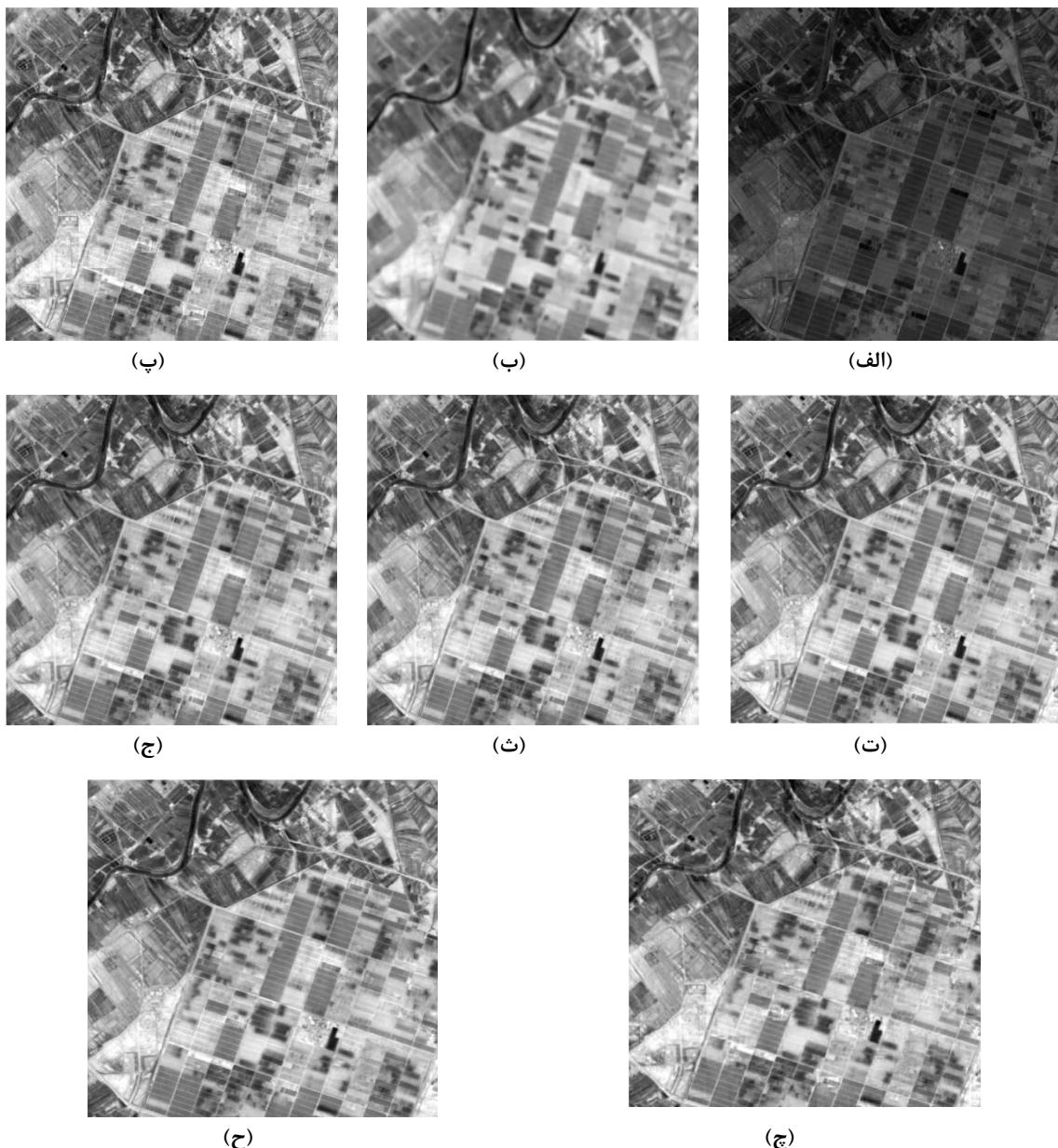
شکل ۱: (الف) تصویر رنگی (RGB) منطقه مورد نظر (ب) باند مرئی شماره ۴ (قرمز) (پ) باند حرارتی شماره ۱۰

۵- پیاده‌سازی و ارزیابی نتایج:

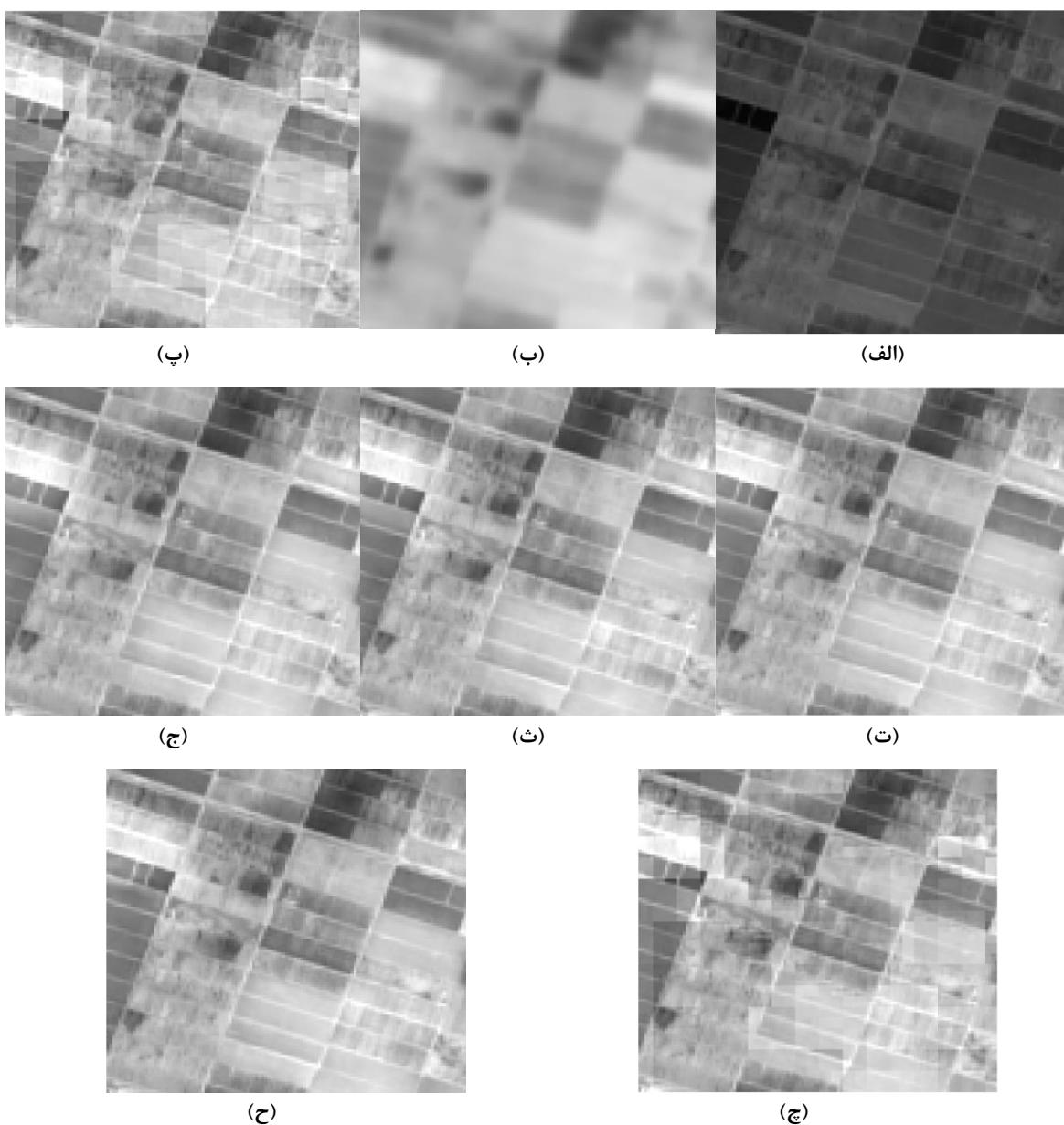
در این مقاله سه روش کانتورلت را با پارامترهای تجزیه‌ی جهتی به صورت [۲،۳،۴] انجام می‌دهیم، به نحوی که مرحله تجزیه پیرامیدی و در هر سطح تجزیه (از مقیاس کوچک به بزرگ) به ترتیب 2^3 ، 2^2 و 2^1 تجزیه جهتی خواهیم داشت. فیلترهای استفاده شده در تبدیل CT، NSCT و SFLCT به ترتیب برای تجزیه پیرامیدی فیلترهای خواهیم cosine function و برای تجزیه جهتی از فیلتر $pkva$ استفاده خواهیم کرد. در نهایت نتایج تبدیل‌های pyr.haar کانتورلت را با روش‌های DWT و SWT با استفاده از فیلتر Haar با ۴ مرحله تجزیه مقایسه می‌نماییم. تصاویر منبع ما باند مرئی شماره ۴ (قرمز) و باند حرارتی شماره ۱۰ خواهد بود. در بخش ۱-۵ نتایج ادغام به روش‌های مختلف در شکل (۲) و بزرگنمایی روی قسمتی از نتایج برای بررسی دقیق‌تر در شکل (۳) آورده شده است. برای ارزیابی نتایج ادغام از شاخص‌های آنالیز گفته شده در بخش ۴-۳ کمک گرفته و این ارزیابی را در جدول (۲) ملاحظه می‌نماییم.

^{۱-۵}- پرسی نتایج ادغام یا روش‌های ذکر شده

در شکل (۳) بخشی از نتیجه‌ی ادغام شده را با بزرگنمایی مشاهده می‌نماییم. در قسمت (پ) و (ج) شکل (۳) Blocking Artifact هایی بهوضوح دیده می‌شود. وجود این مصنوعات را می‌توان بهدلیل Shift Invariant نبودن تبدیلهای CT و DWT و رخ دادن پدیده نشت فرکانسی توجیه کرد. همان طوری که در قسمت (ت) و (ح) شکل (۳) مشاهده می‌کنیم، تبدیلهای NSCT و SWT از این نوع مصنوعات مبرا بوده چون تبدیلهایی Shift Invariant هستند. تبدیلهای CT1.33 و CT2.33 به دلیل وجود مرحله نمونه برداری در تجزیه‌ی مقیاسی Shift Invariant نیستند اما همان طور که در قسمت (ث) و (ج) پیداست، مصنوعات ذکر شده در نتیجه‌ی ادغام توسط آن دو دیده نمی‌شود، بنابراین این دو تبدیل با وجود مرحله نمونه برداری بهتر از تبدیل CT عمل نموده‌اند، چون در ساختار آن‌ها از بدیدهی Aliasing ذاتی، در ساختار فیلتر بانک‌های جهت‌داد، حلوگری شده است.



شکل ۲: نتایج ادغام شده: (الف) باند مرئی. (ب) باند حرارتی شماره ۱۰. (پ) باند ادغام شده با CT. (ت) باند ادغام شده با NSCT. (ث) باند ادغام شده با DWT. (ج) باند ادغام شده با CT 1.33. (ح) باند ادغام شده با SWT.



شکل ۳: نتایج ادغام شده: (الف) باند مرئی، (ب) باند حرارتی شماره ۱۰، (پ) باند ادغام شده با CT، (ت) باند ادغام شده با NSCT، (ث) باند ادغام شده با CT ۱.33، (ج) باند ادغام شده با CT ۲.33، (چ) باند ادغام شده با DWT، (ح) باند ادغام شده با .SWT

با بررسی پارامترهای ارزیابی طیفی CC و RMSE در جدول (۲) پیداست که به ترتیب سه روش DWT، CT ۲.33 و NSCT ماهیت باند حرارتی را بیشتر حفظ نموده‌اند. پس از آن روش‌های CT، CT ۱.33، .SWT و NSCT از لحاظ مکانی بیشترین کیفیت را ایجاد کرده و میزان مصنوعات کمتری را وارد نتایج ادغام کرده‌اند. با بررسی AG، می‌بینیم که CT و DWT بیشترین میزان گرادیانت را دارند. این دلیل را می‌توان با وارد نمودن مصنوعات به دلیل Shift Invariant نبودن این تبدیلات توجیه کرد. پس بالا بودن میزان گرادیانت مبنایی برای درست منتقل شدن جزئیات از تصویر با رزولوشن مکانی بالاتر به تصویر با رزولوشن پایین‌تر نیست. با بررسی پارامتر HPCC می‌توان به قضاوت درست‌تری مبنی بر همبستگی مکانی میان باند مرئی و ادغام شده رسید. می‌بینیم که باز هم سه تبدیل NSCT و CT ۲.33 بیشترین میزان اطلاعات مکانی را وارد تصویر ادغام شده نموده‌اند.

جدول ۲: پارامترهای ارزیابی طیفی و مکانی

پارامتر	روش	CT	NSCT	CT 1.33	CT 2.33	DWT	SWT
	CC	0.9085	0.9165	0.9122	0.9162	0.8999	0.9186
(رادیان)	SAM	0.0049	0.0047	0.0048	0.0047	0.0052	0.0047
	RMSE	1.4972	1.4389	1.4708	1.4273	1.5794	1.4181
	SNR	6.5737	6.9796	6.7889	7.0496	6.1699	7.1057
	AG	0.7305	0.7136	0.7007	0.6999	0.7532	0.7024
	HPCC	0.9491	0.9599	0.9597	0.9598	0.9493	0.9598

۶- نتیجه گیری

به دلیل اهمیت باندهای حرارتی و پایین بودن رزولوشن مکانی آنها اقدام به افزایش اطلاعات مکانی آنها با روش ادغام این باندها با باندهای مرئی با رزولوشن بالاتر در سطح پیکسل با روش‌های مبتنی بر آنالیزهای چند رزولوشنی **SWT**, **DWT**, **SFLCT**, **NSCT**, **CT** و **CT 2.33** کرد و روش‌ها را با هم مقایسه نمودیم. با بررسی شاخص‌های طیفی و مکانی دیدیم که انواع جدید تبدیل کانتورلت یعنی **SFLCT** (CT ۱.۳۳) و **NSCT** (CT ۲.۳۳) هم از لحاظ طیفی و هم مکانی بهتر از تبدیل کانتورلت اصلی عمل نموده‌اند. با جمع‌بندی کلی پارامترهای ارزیابی به این نتیجه رسیدیم که سه تبدیل **NSCT** و **CT 2.33** و **SWT** در هر دو زمینه حفظ طیف و افروzen جزئیات مکانی که هدف اصلی هر ادغامیست، عملکرد بهتری داشته‌اند.

مراجع

- [1] Liu, Zheng, et al. "Objective assessment of multiresolution image fusion algorithms for context enhancement in night vision: a comparative study." *Pattern Analysis and Machine Intelligence, IEEE Transactions on* 34.1 (2012): 94-109.
- [2] Zhang, Zhong, and Rick S. Blum. "A categorization of multiscale-decomposition-based image fusion schemes with a performance study for a digital camera application." *Proceedings of the IEEE* 87.8 (1999): 1315-1326.
- [3] Liao, Wenzhi, et al. "Processing of multiresolution thermal hyperspectral and digital color data: Outcome of the 2014 IEEE GRSS data fusion contest." *IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing* 8.6 (2015): 2984-2996.
- [4] Wang, Hai-Hui. "A new multiwavelet-based approach to image fusion." *Journal of Mathematical Imaging and Vision* 21.2 (2004): 177-192.
- [5] Li, Shutao, Bin Yang, and Jianwen Hu. "Performance comparison of different multi-resolution transforms for image fusion." *Information Fusion* 12.2 (2011): 74-84.
- [6] Aiazzi, Bruno, et al. "Spatial Enhancement of TIR ASTER data via VNIR images and Generalized Laplacian Decomposition." *Proceedings of 4th EARSeL Workshop on Imaging Spectroscopy*. 2005.
- [7] Han, Lei, et al. "Thermal physical property-based fusion of geostationary meteorological satellite visible and infrared channel images." *Sensors* 14.6 (2014): 10187-10202.
- [8] Do, Minh N., and Martin Vetterli. "The contourlet transform: an efficient directional multiresolution image representation." *IEEE Transactions on image processing* 14.12 (2005): 2091-2106.
- [9] Choi, Yoonsuk, Ershad Sharafahmadian, and Shahram Latifi. "Performance analysis of contourlet-based hyperspectral image fusion methods." *International Journal on Information Theory* 2.1 (2013): 1-14.
- [10] Pollock, D. S. G. "Two-Channel Filter Banks and Dyadic Decompositions."
- [11] Zhang, Yun, and Gang Hong. "An IHS and wavelet integrated approach to improve pan-sharpening visual quality of natural colour IKONOS and QuickBird images." *Information Fusion* 6.3 (2005): 225-234.

- [12] Nikolov, Stavri, et al. "Wavelets for image fusion." *Wavelets in signal and image analysis*. Springer Netherlands, 2001. 213-241.
- [13] Lu, Yue, and Minh N. Do. "A new contourlet transform with sharp frequency localization." *2006 International Conference on Image Processing*. IEEE, 2006.
- [14] Aiazzi, Bruno, et al. "Spatial resolution enhancement of ASTER thermal bands." *Remote Sensing*. International Society for Optics and Photonics, 2005.