

بهبود توان تفکیک مکانی باندهای حرارتی در تصاویر چند طیفی با استفاده از روش کانتورلت

فریناز فرهنج^{۱*}، مهدی آخوندزاده^۲

^۱ دانشجوی کارشناسی ارشد سنجش از دور - دانشکده مهندسی نقشه برداری و اطلاعات مکانی - پردیس

دانشکده های فنی - دانشگاه تهران

farinaz.farhanj@ut.ac.ir

^۲ استادیار دانشکده مهندسی نقشه برداری و اطلاعات مکانی - پردیس دانشکده های فنی - دانشگاه تهران

makhonz@ut.ac.ir

(تاریخ دریافت خرداد ۱۳۹۵، تاریخ تصویب اردیبهشت ۱۳۹۶)

چکیده

باندهای مادون قرمز حرارتی در کاربردهای مختلف به خصوص محاسبه دمای سطح اهمیت فراوانی دارند. این باندها توان تفکیک مکانی پایینی داشته و تشخیص عوارض در آن‌ها به سختی همراه است. هدف این مقاله بهبود توان تفکیک مکانی باندهای حرارتی است. یکی از روش‌های کارا برای تولید باندهای حرارتی با توان تفکیک مکانی بهینه، ادغام این باندها با باندهایی با رزولوشن مکانی بالاتر نظیر باندهای مرئی می باشد. ادغام تصاویر در حقیقت برای تلفیق اطلاعات با رزولوشن‌های مکانی مختلف برای ایجاد تصویری با جزئیات ساختاری و بافتی بیشتر نسبت به تصاویر منبع استفاده می‌گردد، به طوری که این تصویر برای درک هر چه بهتر محیط توسط انسان و فرآیندهای مختلف پردازش تصویر همانند طبقه‌بندی، قطعه‌بندی، استخراج ویژگی و تشخیص اشیا مناسب‌تر گردد. آنالیزهای چند ریزه ساز همانند موجک، هرم لاپلاسی، کانتورلت، کرولت و ... از روش‌های موثر برای ادغام تصاویر در سطح پیکسل است. ما در این مقاله از تبدیل کانتورلت به دلیل دارا بودن مزیت‌هایی نظیر خاصیت ناهمسانگرد توابع پایه، تشخیص جهت‌های مختلف و انحنای هموار استفاده خواهیم کرد. این تبدیل به دلیل وجود مرحله نمونه‌برداری امکان نشت فرکانس داشته، در نتیجه در باند ادغام شده شاهد مصنوعاتی خواهیم بود. برای رفع این مشکل از انواع دیگر این تبدیل به نام‌های کانتورلت بدون کاهش بعد و کانتورلت با محلی‌سازی فرکانس‌های شارپ استفاده کرده و نتایج را با تبدیل‌های موجک گسسته، موجک ایستا و هرم لاپلاسی مقایسه می‌نماییم. از باندهای مرئی و حرارتی ماهواره لندست ۸ استفاده خواهیم کرد. با وجود فقدان پوشش طیفی میان باندهای مرئی و حرارتی، پارامترهای ارزیابی طیفی و مکانی نظیر CC، RMSE، AG، UIQI و ... نشان می‌دهد که باند ادغام شده‌ی حرارتی توسط روش کانتورلت با محلی‌سازی فرکانس‌های شارپ در حالی که جزئیات بصری و مکانی آن را بهبود داده‌اند، مقادیر طیف تابندگی را نیز در حد خوبی حفظ کرده‌اند.

واژگان کلیدی: ادغام باندها، آنالیزهای چند ریزه ساز، کانتورلت، آنالیز کیفیت طیفی، آنالیز کیفیت مکانی

* نویسنده رابط

۱- مقدمه

داده های مادون قرمز حرارتی یک منبع داده ای خیلی مهم با قابلیت های بالاست. در تحقیقات و کاربردهای گوناگون نظیر هواشناسی و بررسی کیفیت هوا، آب شناسی، تغییرات رطوبت خاک، شناسایی منابع گرمایی غیر معمول همانند مواد قابل اشتعال، فعالیت های آتشفشانی و... از داده های این ناحیه طیف الکترومغناطیس استفاده می شود. توسط اطلاعات بدست آمده از آن، می توان به مطالعه ای هر چه دقیق تر پدیده ها پرداخت، زیرا تغییرات دما نقش مهمی در شناسایی برخی پدیده ها به عنوان مثال انرژی زمین گرمایی و پیش بینی زلزله دارد [۱][۲][۳]. از آنجا که رفتارهای تابشی مواد، اطلاعات مهمی درباره ی ویژگی های آنها ارائه می کند و هم چنین میزان انرژی تابش شده از هر ماده تابعی از دمای سطحی آن است، بنابراین مطالعه ی دمای سطح اجسام با استفاده از تصاویر مادون قرمز حرارتی می تواند اطلاعات بسیار سودمندی از وضعیت پدیده ها ارائه کند که دستیابی به این امر از طریق تصاویر ماهواره ای با طول موج های پایین تر و غیر حرارتی امکان پذیر نیست [۴]. بنابراین به نظر می رسد که این ناحیه در تشخیص هر چه بهتر پدیده ها و مواد و در نتیجه طبقه بندی پوشش های زمینی با دقت بالاتر کمک شایانی می کند. یکی از محدودیت های داده های مادون قرمز حرارتی توان تفکیک مکانی نسبتا پایین آن هاست. در مقابل داده های مرئی به صورت قابل توجهی رزولوشن مکانی بالاتری دارند. بنابراین اگر بتوان با روشی تصاویر ماهواره ای در ناحیه ی طول موج های حرارتی با قدرت تفکیک مکانی بالاتر فراهم نمود، امکان مطالعه ی دقیق تر بسیاری از پدیده ها ایجاد می شود و در نتیجه می توان با اطمینان بیشتری از نتایج برای بسیاری از تصمیم های اجرایی در بخش های مختلف بهره مند گردید [۵]. بنابراین هدف اصلی ما در این مقاله ادغام باندهای مادون قرمز حرارتی و داده های مرئی به منظور بهبود قدرت تفکیک مکانی در این باندهاست. یعنی می خواهیم داده های مرئی و حرارتی را که به نوعی مکمل هم هستند، را ادغام نماییم.

در باندهای حرارتی امکان دستیابی دقیق به جزئیات و محل دقیق تارگت ها وجود ندارد. بنابراین یکی از مهم ترین دلایل برای ادغام باندهای حرارتی و مرئی این

است که با بهبود بافت ها و ویژگی های ساختاری در تصویر ادغام شده، امکان تشخیص اشیا و محل پدیده ها در شرایط بهتری فراهم گردد [۶].

روش های متنوعی برای ادغام تصاویر در سطح پیکسل موجود است، همانند تبدیل شدت - رنگ - اشباع^۱ (IHS)، آنالیز مولفه های اصلی^۲ (PCA)، روش های مبتنی بر تجزیه ی چند ریزه ساز همانند: کرولت^۳، موجک گسسته^۴ (DWT)، موجک ایستا^۵ (SWT)، کانتورلت^۶ (CT)، کانتورلت بدون کاهش بعد^۷ (NSCT)، هرم لاپلاسی^۸ (LP). روش های مبتنی بر آنالیزهای چند ریزه ساز به دلیل تجزیه ی سیگنال در مقیاس های مختلف با فرکانس های متفاوت، امکان تحلیل آن را که شامل اطلاعات منحصر به فردی در فرکانس های مختلف می باشد، فراهم می کند. بنابراین ما در این مقاله از روش های ادغام مبتنی بر تجزیه ی چند ریزه ساز همانند کانتورلت و موجک و هرم لاپلاسی استفاده خواهیم کرد [۷].

Namratha و همکاران در سال ۲۰۱۳ تصاویر ماهواره ی LISS با توان تفکیک مکانی ۵٫۸ متر و تصاویر پانکروماتیک Cartosat1 با رزولوشن مکانی ۲٫۵ متر را با هم ادغام نمودند. هدف آن ها افزایش توان تفکیک مکانی در تصاویر چند طیفی LISS بود. آن ها ادغام را به کمک روش کرولت انجام دادند. آن ها نتایجشان را با روش های موجک، آنالیز مولفه های اصلی و تبدیل IHS مقایسه کرده و به این نتیجه رسیدند که تبدیل کرولت عملکرد بهتری داشته است. در نمای آینده ی این مقاله آمده است که برای بهبود نتایج در کار آتی و برای تفسیر ویژگی ها به طور موثرتر از روش کانتورلت استفاده می نماییم. کانتورلت بدون کاهش بعد در نمایش اطلاعات جهتی و ساختار هندسی ذاتی اشیا تواناست. علاوه بر این، تبدیلی تغییرناپذیر با جابجایی^۹ بوده و تصویر را به تعداد جهت بیشتری تجزیه می نماید. آن ها اظهار داشتند که روش کانتورلت بدون کاهش بعد در برابر روش آنها به دلیل توانایی های ذکر شده، هر دو بعد مکان و طیف را بهتر حفظ خواهد کرد [۸].

^۱ Intensity - Hue - Saturation

^۲ Principal Component Analysis

^۳ Curvelet Transform

^۴ Discrete Wavelet Transform

^۵ Stationary Wavelet Transform

^۶ Contourlet Transform

^۷ Nonsubsampled Contourlet Transform

^۸ Laplacian Pyramid

^۹ Shift Invariant

Li و همکاران در سال ۲۰۱۱ تصاویر مرئی و مادون قرمز، تصاویر با وضوح^۱ مختلف و تصاویر پزشکی را با هم ادغام نمودند. آن‌ها برای تلفیق از روش‌های تبدیل موجک گسسته، کرولت، کانتورلت و کانتورلت بدون کاهش بعد استفاده کرده و نتایج را با هم مقایسه نمودند. طبق نظریه‌ی آن‌ها روش کانتورلت بدون کاهش بعد نتایج بهتری را ارائه داده است [۷].

Choi و همکاران در سال ۲۰۱۳ تصاویر فراطیفی و پانکروماتیک را با هم ادغام نمودند. هدف آن‌ها افزایش توان تفکیک مکانی و جزئیات در تصاویر فراطیفی بود. آن‌ها تلفیق را به کمک تبدیل کانتورلت اصلی، کانتورلت بدون کاهش بعد و کانتورلت با محلی‌سازی فرکانس‌های شارپ^۲ (LCTSF) انجام دادند. آن‌ها نتیجه گرفتند که تبدیل کانتورلت بدون کاهش بعد جزئیات را بهتر نشان می‌دهد، در حالی‌که تبدیل با محلی‌سازی فرکانس‌های شارپ طیف را بیشتر حفظ می‌نماید [۹].

Aiazzi و همکاران در سال ۲۰۰۵ داده‌های مادون قرمز حرارتی ASTER با توان تفکیک مکانی ۹۰ متر را با داده‌های مرئی این ماهواره با توان تفکیک مکانی ۱۵ متر ادغام نمودند. داده‌های مورد پردازش، طیف تابندگی زمین مرجع شده بود. آن‌ها از میان باندهای مرئی آن باندی را که بیشترین همبستگی با باند حرارتی داشته را انتخاب نموده و آن را در فرآیند ادغام شرکت دادند. ادغام بر اساس یکی از روش‌های آنالیز چند ریزه‌ساز به نام هرم لاپلاسی انجام گرفت. آن‌ها برای بررسی میزان اعوجاج طیف تابندگی باند حرارتی هنگام ادغام، به دلیل عدم دسترسی به داده‌های حرارتی واقعی با توان تفکیک مکانی ۱۵ متر، باند تلفیق یافته را به ۹۰ متر بازنمونه‌برداری کرده و آن را با داده‌های حرارتی با توان تفکیک ۹۰ متر مقایسه نمودند. آن‌ها این مقایسه را با شاخص‌های همبستگی، میانگین مربعات خطا و اختلاف میانگین میان باندهای منبع و ادغام شده انجام دادند. نتیجه‌گیری آنان این بود که علیرغم فقدان اشتراک طیفی میان باندهای مرئی و حرارتی، تصویر ادغام شده مشخصه‌های طیفی تابندگی خود را در عین بهبود قدرت تفکیک مکانی حفظ نموده است [۱۰].

تمامی این روش‌ها به بهبود ویژگی‌های بصری می‌انجامد، در مورد ادغام باندهای حرارتی با مرئی روشی ارجح است که علاوه بر بهبود جزئیات مکانی میزان تابندگی باند حرارتی را نیز تا حد زیادی حفظ نماید، یعنی میزان اعوجاج و اختلاف تابندگی باند حرارتی ادغام شده از میزان تابندگی باند منبع حرارتی حین اضافه نمودن ساختارهای مکانی کوچک باشد [۱]. در مطالعات متعدد نشان داده شده است که موجک دو بعدی جدایی‌پذیر عملکرد قابل قبولی برای تشخیص ناپیوستگی‌ها در نقاط لبه ارائه می‌دهد، اما توانایی این تبدیل در تشخیص و مشاهده‌ی انحناهای هموار^۳ بسیار محدود است است و به علاوه موجک‌ها تنها به استخراج تعداد محدودی جهت می‌پردازند که این یک نقطه ضعف برای کار با سیگنال‌های چند بعدی محسوب می‌شود [۱۱]. این محدودیت‌های گفته شده برای موجک حاکی از آن است که از یک تبدیل برتر به نام کانتورلت در این تحقیق استفاده کرده و نتایج را با موجک مقایسه نماییم.

تبدیل کانتورلت به خوبی می‌تواند مشخصات هندسی ذاتی تصویر را که از اهمیت بسزایی در ساختار بصری انسان^۴ برخوردار است را استخراج نماید [۱۱]. بر خلاف تبدیل موجک که ابتدا در یک حوزه‌ی پیوسته ساخته شده و سپس با نمونه برداری داده گسسته می‌شود، تبدیل کانتورلت با کمک هرم لاپلاسی از یک حوزه‌ی گسسته شروع شده و سپس از طریق فیلتر بانک‌های جهت‌دار به یک حوزه‌ی پیوسته همگرا می‌شود. این تبدیل بر خلاف تبدیل موجک، محدود به تجزیه در سه جهت افقی، عمودی و قطری نبوده، بلکه می‌تواند در هر مقیاس، تصویر را به تعداد جهت‌های دل‌خواه تجزیه نموده و ضرایب بیشتری بدست آورد که این خود باعث تجزیه و در نتیجه ادغام دقیق‌تر می‌شود. این تبدیل به طور ذاتی دو بعدی است و بر خلاف تبدیل موجک که ذاتا یک بعدی است، قادر به تشخیص بهتر منحنی‌ها، خطوط و لبه‌ها در تصویر می‌باشد [۹].

هدف از این مقاله مقایسه‌ی روش‌های جدید گرفته شده از تبدیل کانتورلت با روش پیشین کانتورلت، موجک گسسته، موجک ایستا و هرم لاپلاسی می‌باشد. بخش دوم به بیان کلی روش‌های کانتورلت، بخش سوم به مراحل ادغام و بخش چهارم به داده‌های مورد مطالعه پرداخته و در بخش پنجم نتایج بصری و آنالیزهای طیفی و مکانی مشاهده می‌گردد.

^۳ Contours
^۴ Human Visual System

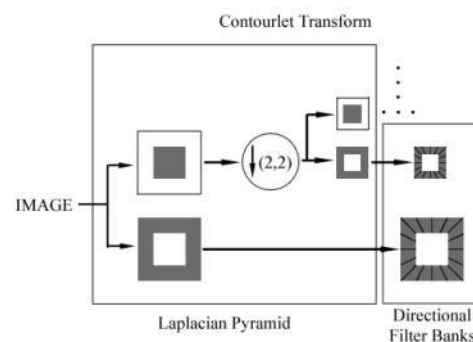
^۱ Focus
^۲ Sharp Frequency Localization Contourlet Transform

۲- روش‌های تجزیه

۲-۱- کانتورلت

۲-۱-۱- کانتورلت اصلی

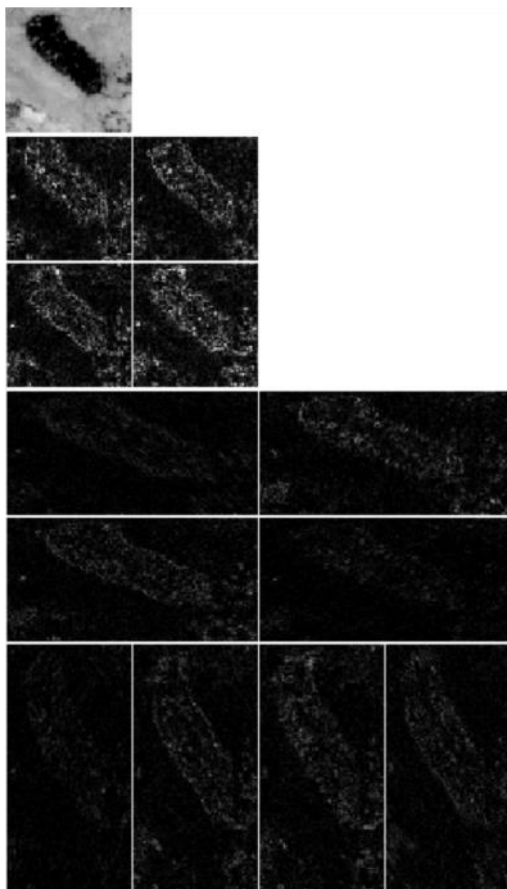
همان‌طور که در شکل ۱ ملاحظه می‌شود، این تبدیل از دو مرحله‌ی اصلی تشکیل شده، مرحله‌ی اول شامل هرم لاپلاسی^۱ (LP) برای تجزیه‌ی مقیاسی و تشخیص لبه‌ها و نقاط ناپیوستگی و مرحله‌ی دوم اعمال بانک فیلترهای جهت دار^۲ (DFB) برای پیوند دادن نقاط ناپیوستگی و ایجاد ساختارهای خطی است. هرم لاپلاسی بدین صورت است که 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 (۲،۲) زیر نمونه برداری می‌شود و این فرآیند تا چند مرحله تکرار می‌گردد. در هر مرحله از تجزیه روی تصویر تفاضلی با فرکانس بالا فیلتر بانک جهت‌دار برای ایجاد ارتباط میان ضرایبی که در یک مقیاس قرار دارند، اعمال شده تا زیرباند بالاگذر به جهت‌های مختلف تجزیه گردد. نتیجه‌ی اعمال این تبدیل ایجاد یک سری ضرایب با فرکانس پایین شامل اجزای تقریب در بالاترین سطح تجزیه (تفکیک مکانی کوچک‌تر) و آرایه‌ای از ضرایب با فرکانس بالا شامل اجزای جزئیات و لبه‌های شارپ در مقیاس‌های مختلف می‌باشد [۹].



شکل ۱- چهارچوب تجزیه ی کانتورلت [۹]

برای بررسی نحوه‌ی توزیع ضرایب تبدیل کانتورلت فرض می‌نماییم که J مرحله تجزیه‌ی هرمی ($j=2,1,\dots,J$) صورت گرفته است. برای مشخص نمودن تعداد جهت‌ها در مرحله‌ی تجزیه جهت‌ی توسط DFB، لازمست برداری تک

بعدی به نام $nlevels$ تعریف کرده و در آن سطح تجزیه‌ی جهت‌ی دل‌خواه در هر مقیاس هرم، تعریف نماییم. اگر پارامتر مربوط به سطح تجزیه‌ی جهت‌ی را ۰ بگذاریم، DFB موجک را برای پردازش زیر باندگذر آن مرحله از هرم اجرا می‌کند، در نتیجه ۳ جهت افقی، عمودی و قطری در آن سطح از هرم خواهیم داشت. اگر این پارامتر را ۱ در نظر بگیریم، بدین معنی است که زیر باند مورد نظر به ۲ جهت تقسیم‌بندی می‌شود. ضرایب کانتورلت نیز به صورت برداری به نام Y ذخیره می‌گردد، طوری که طول آن برابر است با طول بردار $nlevels$ به علاوه ۱. $Y\{1\}$ ضرایب مربوط به زیر باند پایین‌گذر با فرکانس پایین در سطح تجزیه آخر را مشخص می‌نماید. $Y\{i\}$ ($i=2,\dots$) نیز ضرایب مربوط به تجزیه‌ی جهت‌ی توسط DFB است، طوری که n ، آمین سطح تجزیه‌ی هرمی است [۹][۱۱]. نمونه‌ای از اعمال تبدیل کانتورلت بر روی باند حرارتی ماهواره‌ی لندست ۸ رادر دو سطح تجزیه‌ی هرمی با بردار $nlevels = \{2,3\}$ در شکل ۲ مشاهده می‌نماییم.



شکل ۲- نمونه‌ای از اعمال تبدیل کانتورلت بر روی باند حرارتی

^۱ Laplacian Pyramid

^۲ Directional Filter Banks

دو دلیل برای رخ دادن پدیده‌ی نشت فرکانسی در تبدیل کانتورلت وجود دارد. اولین دلیل مربوط به بخش نمونه‌برداری در مرحله هرم لاپلاسی بوده و دلیل دوم این است که فیلتر بانک‌های جهت‌دار غیر ایده آل بوده و امکان نشت فرکانسی در تجزیه‌ی جهتی زیر باندهای بالاگذر رخ می‌دهد. اگرچه اکثریت فرکانس عبوری از این فیلتر بانک‌ها مربوط به منطقه‌ی عبور باند می‌شود، ولی مقداری از اجزای فرکانسی بیرون از منطقه‌ی عبور نیز به اطلاعات جهتی نشت پیدا می‌کند. این نوع از پدیده‌ی نشت فرکانسی مورد دل‌خواه نبوده و سبب می‌شود که خط الراس‌ها در حوزه‌ی مکان نمایشی هموار نداشته و مصنوعات فازی در تصویر پدید آید، مثلاً لبه‌ها حالت دندان‌دانه پیدا کند. با معرفی ساختار جدیدی، این مشکل کانتورلت برطرف شده است. بر این اساس که سیگنال به خوبی بازسازی خواهد شد، اگر در تجزیه جهتی زیر باند بالا گذر اجزایی که برایشان پدیده‌ی نشت فرکانسی به صورت ذاتی رخ می‌دهد خارج از منطقه‌ی مورد نظر برای فرکانس عبوریمان باشد [۱۵] [۱۶].

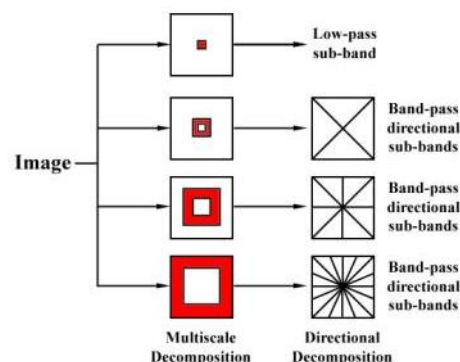
۲-۱-۳- کانتورلت با محلی‌سازی فرکانس‌های شارپ

به دلیل غیر ایده‌آل بودن فیلترهای جهتی به صورت اجتناب ناپذیر نشت فرکانسی در اطلاعات جهتی رخ می‌دهد. در دومین سطح تجزیه مقیاسی، ساختار فیلتر بانک‌های جهتی به گونه‌ایست که در $\pi/2$ و $-\pi/2$ پدیده‌ی نشت فرکانسی اتفاق می‌افتد و فرکانس‌های خارج از محدوده‌ی مورد نظر به اطلاعات جهتی نشت می‌کند. 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 متشکل از فیلترهای باند گذر استفاده می‌شود. در شکل ۴ ساختار این نوع تبدیل را مشاهده می‌نماییم. منظور از $L_i(w)$ فیلتر پایین‌گذر و $D_i(w)$ فیلتر بالاگذر است. در مرحله‌ی اول تجزیه توسط این تبدیل، قسمت پایین‌گذر سیگنال با فاکتور (d,d) نمونه‌برداری می‌گردد، در حالی‌که در مراحل بعدی با همان فاکتور (۲,۲) نمونه‌برداری انجام می‌شود. DFB به فیلتر بالاگذر در اولین سطح تجزیه و به تمامی باندگذرها در سایر مقیاس‌ها اعمال می‌شود. این ساختار جدید فیلتر بانکی با محصور کردن ناحیه‌ی عبور باندهی فیلتر پایین‌گذر بین $[\pi/2, -\pi/2]^2$ پدیده‌ی نشت فرکانسی ذاتی فیلتر بانک‌های جهتی را بر طرف می‌کند [۱۵].

تبدیل کانتورلت به دلیل وجود مرحله‌ی کم نمونه‌برداری دارای یک مشکل اساسی است، این‌که 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 [۱۲]. این مسئله هنگام عدم انطباق^۱ دو باند نسبت به هم، ایجاد خطایی قابل توجه در نتیجه‌ی ادغام می‌کند [۱۳]. در نتیجه با اجرای این تبدیل پدیده‌ی نشت فرکانسی^۲ رخ داده و ممکن است هنگام بازسازی سیگنال به مشکل برخورد کرده و مصنوعات^۳ مشبک^۴ و حلقوی^۵ وارد تصویر ادغام شده شود. بنابراین برای رفع این مشکل، نوع بدون مرحله‌ی کم نمونه‌برداری کانتورلت را که تغییر ناپذیر با جابه‌جایی است را نیز اجرا می‌نماییم.

۲-۱-۲- کانتورلت بدون کاهش بعد

در این نوع تبدیل کانتورلت بدون کاهش بعد (NSCT)، در مرحله‌ی تجزیه‌ی مقیاسی از ساختار هرمی بدون کاهش بعد^۵ و در مرحله‌ی تجزیه‌ی جهتی از ساختار فیلتر بانک‌های جهتی بدون کاهش بعد^۶ استفاده می‌شود. در شکل ۳، سه سطح تجزیه‌ی مقیاسی توسط این تبدیل دیده می‌شود. همان‌طور که می‌بینیم هیچ‌گونه کم نمونه‌برداری در تجزیه‌ی مقیاسی دیده نمی‌شود، بنابراین زیر باند پایین‌گذر نشت فرکانسی ناشی از نمونه‌برداری را نداشته، بنابراین این نوع تبدیل، مشخصه‌های فرکانسی را بهتر از تبدیل کانتورلت پیشین تحلیل می‌کند [۹].



شکل ۳- سه مرحله تجزیه‌ی مقیاسی توسط کانتورلت بدون کاهش بعد [۱۴]

- ^۱ Register
- ^۲ Aliasing
- ^۳ Blocking Artifact
- ^۴ Ringing Artifacts
- ^۵ Nonsubsampled Pyramid Structure
- ^۶ Nonsubsampled Directional Filter Bank

از نرم‌افزار ENVI 5.1 اقدام به ثبت متقابل^۵ باند حرارتی و مرئی می‌نماییم. با استفاده از همین نرم‌افزار مقادیر شماره رقومی داده‌ها را تبدیل به تابندگی^۶ می‌کنیم.

۳-۲- تجزیه‌ی باندها

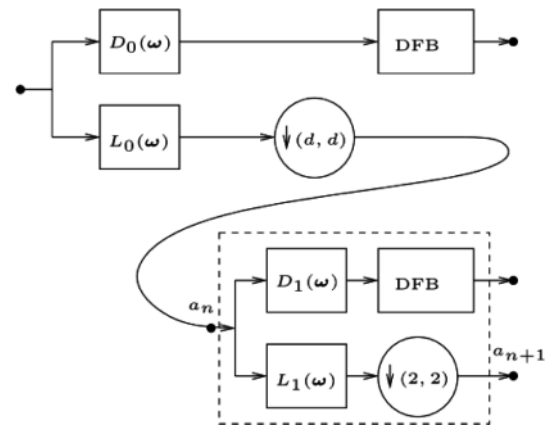
نتیجه‌ی اعمال تبدیل‌های ذکر شده در بخش ۲ بر روی دو باند مرئی و حرارتی ایجاد یک زیر باند پایین‌گذر شامل اجزای تقریب و اطلاعات زمینه‌ای و زیرباندهای بالاگذر در مقیاس‌های مختلف شامل اجزای جزئیات و اطلاعات لبه‌های شارپ و بافت‌های تصویر است. ادغام تصاویر با ترکیب ضرایب به دست آمده از تجزیه‌ی تصاویر منبع امکان‌پذیر می‌شود. دو بخش پایین‌گذر و بالاگذر را بر اساس ویژگی‌هایشان با قوانین ادغام متفاوتی تلفیق می‌نماییم [۱۸].

۳-۳- ترکیب ضرایب

ضرایب تبدیل باند مرئی، حرارتی و ادغام شده را Y_F ، Y_{TIR} و Y_{VIS} می‌نامیم. تقریب یک تصویر مربوط به بخش فرکانس‌های پایین تصویر است. برای کم‌تر شدن میزان اعوجاج تابندگی باند ادغام شده در مقایسه با باند حرارتی، ضرایب تقریب باند ادغام شده را بدون هیچ تغییری از تصویر حرارتی انتخاب می‌نماییم. با این کار به نوعی ماهیت اصلی تصویر حرارتیمان حفظ می‌شود، زیرا عمده‌ی انرژی سیگنال در فرکانس‌های پایین تصویر نهفته است [۱]. ضرایب تقریب حاصل از اعمال تبدیل‌های چند ریزه‌ساز ذکر شده را برای باندهای مرئی، حرارتی و ادغام شده به ترتیب با $Y_{VIS}\{1\}$ ، $Y_{TIR}\{1\}$ و $Y_F\{1\}$ نشان می‌دهیم. بدین ترتیب اجزای فرکانس پایین تصویر ادغام شده برابر می‌شود با [۹] [۱]:

$$Y_F\{1\} = Y_{TIR}\{1\} \quad (2)$$

اجزای فرکانس بالا را از تصویر مرئی و یا حرارتی انتخاب می‌نماییم، بسته به این که کدام ضریب جزئیات ساختاری محلی بیشتری را نشان می‌دهد. ترکیب ضرایب فرکانس بالا را با مقایسه‌ی انرژی ناحیه‌ای^۷ محاسبه شده در زیر ذکر می‌نماییم [۱۹].



شکل ۴- ساختار فیلتر بانک‌های مقیاسی و جهتی در کانتورلت با محلی‌سازی فرکانس‌های شارپ [۹]

$L_i(w)$ با فرکانس عبور باند^۱ w_{ip} و توقف^۲ w_{is} و ناحیه‌ی گذری^۳ با تابع کسینوسی به صورت زیر تعریف می‌گردد [۱۷].

$$L_i(w) = \begin{cases} 1 & \text{for } |w| \leq w_{p,i} \\ \frac{1}{2} + \frac{1}{2} \cos \frac{(|w| - w_{p,i})\pi}{w_{s,i} - w_{p,i}} & \text{for } w_{p,i} < |w| < w_{s,i} \\ 0 & \text{for } w_{s,i} \leq |w| \leq \pi \end{cases} \quad (1)$$

با در نظر گرفتن مقادیر ۱ و ۲ برای d و مقادیر فرکانس عبور و توقف ذکر شده در جدول ۱ پدیده‌ی نشت فرکانسی ذاتی فیلتر بانک‌های جهتی برطرف شده است [۱۷].

جدول ۱- پارامترها و نسبت افزونگی انواع SFLCT

d	$w_{0,p}$	$w_{0,s}$	$w_{1,p}$	$w_{1,s}$	Redundancy
1	$\pi/3$	$2\pi/3$	$\pi/6$	$\pi/3$	۲,۳۳
2	$4\pi/21$	$10\pi/21$	$4\pi/21$	$10\pi/21$	۱,۳۳

از این پس کانتورلت با محلی‌سازی فرکانس‌های شارپ با نسبت افزونگی ۲,۳۳ و ۱,۳۳ را به ترتیب CT 2.33 و CT1.33 می‌نامیم [۱۷].

۳- روش ترکیب باندها

۳-۱- پیش پردازش

در این مرحله لازمست باند حرارتی به توان تفکیک مکانی برابر با توان تفکیک مکانی باند مرئی با روش نزدیک‌ترین همسایه^۴ بازنمونه‌برداری شود. سپس با استفاده

^۵ Co-registration
^۶ Spectral Radiance
^۷ Regional Energy

^۱ Pass Band
^۲ Stop Band
^۳ Transition Band
^۴ Nearest Neighbor

$$Y_F^{s,d} = \begin{cases} Y_{TIR}^{s,d}(i,j), E_{TIR}(i,j) \geq E_{VIS}(i,j) \\ Y_{VIS}^{s,d}(i,j), otherwise \end{cases} \quad (5)$$

$Y_{TIR}^{s,d}$ و $Y_{VIS}^{s,d}$ به ترتیب ضرایب زیرباندی بالاگذر در مقیاس s و جهت d تجزیه‌ی باند حرارتی و مرئی است. $E_{TIR}(j,i)$ و $E_{VIS}(j,i)$ نیز انرژی ناحیه‌ای محاسبه شده برای باندهای حرارتی و مرئی است. در نهایت با داشتن $Y_F^{s,d}$ باند ادغام شده با تبدیل معکوس بدست می‌آید [۹].

۳-۴- روش‌های ارزیابی کیفیت نتایج ادغام تصویر

به دلیل نداشتن تصویر مرجع حرارتی با توان تفکیک مکانی برابر با تصویر مرئی، برای انجام مقایسه با نتیجه ادغام، تصویر ادغام یافته را با روش نزدیک‌ترین همسایه به توان تفکیک کمتر بازنمونه‌برداری نموده و آن را با تصویر حرارتی منبع مقایسه می‌نماییم [۱۰]. برای ارزیابی کیفیت مکانی و طیفی نتایج ادغام از شاخص‌های آنالیز ذکر شده در جدول ۲ استفاده می‌نماییم [۱۱][۲۱].

برای ترکیب ضرایب با فرکانس بالا با استفاده از فرمول زیر انرژی ناحیه‌ای (به صورت پنجره‌ای ۵*۵) را برای هر پیکسل تصویر محاسبه می‌نماییم [۱۹].

$$E_k(i,j) = \sum_{m=-2}^2 \sum_{n=-2}^2 W(m+3,n+3) \cdot (Y_k^{s,d}(i+m,j+n))^2 \quad (3)$$

$E_k(j,i)$ انرژی ناحیه‌ای محاسبه شده حول پیکسل در موقعیت (j,i) و $Y_k^{s,d}$ ضرایب کانترولت در مقیاس s و جهت d در مکان (j,i) برای تصویر k ام است. W ماتریسی با مقادیر وزن‌دار می‌باشد، به طوری که به ضریب مرکزی وزن بیشتری اختصاص می‌دهد و به صورت زیر تعریف می‌گردد [۱۹].

$$W = \frac{1}{256} \begin{bmatrix} 4 & 4 & 4 & 4 & 4 \\ 4 & 16 & 16 & 16 & 4 \\ 4 & 16 & 64 & 16 & 4 \\ 4 & 16 & 16 & 16 & 4 \\ 4 & 4 & 4 & 4 & 4 \end{bmatrix} \quad (4)$$

انرژی ناحیه‌ای در نقاطی که ویژگی‌های تصویر بیشتر است، بزرگ‌تر می‌باشد. بنابراین ضریب تصویر ادغام شده طبق قانون زیر از تصویری اخذ می‌گردد که انرژی محلی مربوط به آن ضریب مرکزی بیشینه باشد. در این صورت است که اطلاعات بافت و ویژگی و لبه‌های تصویر حفظ می‌گردد [۲۰].

جدول ۲- شاخص‌های آنالیز طیفی و مکانی

توضیحات	فرمول	نام کامل	شاخص
شاخص‌های آنالیز طیفی			
با استفاده از ضرب داخلی، زاویه‌ی طیفی میان دو بردار پیکسل باند حرارتی و ادغام شده را محاسبه می‌کند. هر چه مقدار این پارامتر کوچک باشد، اعوجاج تابندگی حداقل رخ داده و دو تصویر به هم شبیه تر خواهند بود [۹]. یکی از محدودیت‌های این پارامتر آماری این است که امکان تمییز میان همبستگی‌های منفی و مثبت برقرار نیست، زیرا تنها مقادیر مطلق در نظر گرفته می‌شود [۲۲]. به دلیل محدودیت ذکر شده ضریب همبستگی را نیز محاسبه می‌کنیم.	$SAM(v,w) = \cos^{-1} \left(\frac{\sum v_i w_i}{\sqrt{\sum v_i^2} \sqrt{\sum w_i^2}} \right)$ منحنی طیفی مربوط به دو بردار پیکسل v_i و w_i	Spectral Angle Mapper	SAM
هر چه این مقدار به ۱ نزدیک‌تر باشد، درجه‌ی همبستگی میان دو تصویر بیشتر خواهد بود [۹]. این شاخص با همگون‌سازی داده‌ها با میانگین، تخمین بهتری را برای مقایسه نتیجه ادغام فراهم می‌آورد [۲۲].	$CC \left(\frac{R}{F} \right) = \frac{\sum_{j=1}^N \sum_{i=1}^M (R(i,j) - \mu(R))(F(i,j) - \mu(F))}{\sqrt{\sum_{j=1}^N \sum_{i=1}^M (R(i,j) - \mu(R))^2 (F(i,j) - \mu(F))^2}}$ R و F تصویرهای منبع (اینجا حرارتی) و ادغام شده $\mu(F)$ و $\mu(R)$ میانگین دو تصویر	Correlation Coefficient	CC

ERGAS	Relative Global Dimensional Synthesis Error	$ERGAS = 100 \frac{h}{l} \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (RMSE^2 / l^2)}$ h توان تفکیک مکانی باند مرئی و l توان تفکیک باند حرارتی N تعداد باندهای طیفی، که در کار ما ۱ گذارده می‌شود. L میانگین تابندگی	به میانگین جابجایی و تغییر نرخ دینامیکی حساس است. اگر مقداری کوچک‌تر از ۳ داشته باشد، یعنی نتیجه ادغام رضایت‌بخش بوده و تصویر ادغام شده کیفیت مناسبی دارد [۲۳]. به دلیل این‌که این شاخص مستقل از واحد بوده و به نوعی قدرت تفکیک مکانی تصاویر منبع را دخیل می‌کند، مورد بحث قرار می‌گیرد [۲۴].
RMSE	Root Mean Squared Error	$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^M \sum_{j=1}^N (R(i,j) - F(i,j))^2}{M \times N}}$ پیکسل N در M ابعاد تصویر	هر چه این مقدار به ۰ نزدیک‌تر باشد، ادغام عملکرد بهتر و خطای کمتری داشته است [۲۱]. به‌دلیل مرسوم بودن این پارامتر در سنجش میزان خطای ادغام و امکان مقایسه با نتایج دیگر تحقیقات آن را مورد بررسی قرار می‌دهیم.
شاخص‌های آنالیز مکانی			
SNR	Signal to Noise Ratio	$SNR = 10 \log_{10} \frac{\sum_{i=1}^M \sum_{j=1}^N R(i,j)^2}{\sum_{i=1}^M \sum_{j=1}^N [F(i,j) - R(i,j)]^2}$	این پارامتر تاثیر نویز بر روی تصویر را بیان می‌کند. هر چه مقدار آن بزرگ‌تر باشد، کیفیت مکانی باند ادغام شده مطلوب‌تر خواهد بود [۹].
AG	Average Gradient	$AG = \frac{1}{M \times N} \sum_{i=1}^M \sum_{j=1}^N \sqrt{\frac{(\frac{\partial F(i,j)}{\partial x})^2 + (\frac{\partial F(i,j)}{\partial y})^2}{2}}$	میانگین گرادیانت میزان وضوح تصویر را مشخص می‌نماید. می‌تواند معیاری برای مشخص نمودن جزئیات مکانی باند ادغام شده باشد، طوری‌که مقدار بزرگ این پارامتر، بیانگر بیشتر بودن بافت و ویژگی‌های تصویر است. برخی از روش‌های ادغام مصنوعاتی ناشی از نشت فرکانسی را وارد باند ادغام شده می‌نمایند [۲۱]. این پارامتر در اثر ورود این مصنوعات نیز مقدار بالایی پیدا می‌کند، در نتیجه معیار دقیقی برای سنجش میزان جزئیات نبوده و با مقایسه میانگین گرادیانت تصویر ادغام شده و میانگین گرادیانت باند مرئی می‌توان به وجود مصنوعات پی برد.
HPF	High Pass Filtering	$Mask = \begin{bmatrix} -1 & -1 & -1 \\ -1 & 8 & -1 \\ -1 & -1 & -1 \end{bmatrix}$	داده‌های فرکانس بالای باند مرئی را با باند ادغام شده مقایسه می‌نماییم. برای استخراج داده‌های فرکانس بالا، تصاویر را از فیلتر لاپلاسی عبور داده، سپس ضریب همبستگی میان تصاویر فیلتر شده را محاسبه می‌نماییم. مقدار بالای این همبستگی بیانگر انتقال میزان بیشتری از اطلاعات مکانی از باند مرئی به ادغام شده خواهد بود [۲۱].
شاخص‌های آنالیز طیفی و مکانی			
UIQI	Universal Image Quality Index	$UIQI = \frac{\sigma_{FR}}{\sigma_F \sigma_R} \cdot \frac{2\mu(F)\mu(R)}{(\mu(F))^2 + \mu(R)^2} \cdot \frac{2\sigma_F \sigma_R}{\sigma_F^2 + \sigma_R^2}$ σ_F و σ_R انحراف استاندارد تصاویر ادغام شده و منبع (حرارتی و مرئی) است.	این پارامتر اعوجاج را به صورت ترکیبی از سه فاکتور کاهش همبستگی، اعوجاج رادیومتریکی و اعوجاج کنتراست بیان می‌کند. مقداری میان ۱- تا ۱ دارد. هر چه به ۱ نزدیک‌تر باشد، یعنی آن تصویر منبع (حرارتی یا مرئی) به ادغام شده شبیه‌تر است [۹]. منظور از واژه جهانی در این شاخص این است که کیفیت اندازه‌گیری شده به شرایط دید و یا شرایط مشاهده کننده تصاویر منبع اخذ شده بستگی ندارد. بنابراین این شاخص برای کاربردهای پردازش تصاویر کارا بوده و شرایط بررسی تفاوت را در انواع مختلف اعوجاجات تصویر فراهم می‌آورد [۲۵].

۴- داده‌های مورد مطالعه

از داده‌های ماهواره لندست ۸ در این مقاله استفاده می‌نماییم که دارای دو حسگر عملیاتی تصویرساز زمین^۱ (OLI) و مادون قرمز حرارتی^۲ (TIRS) است، حسگر OLI آن دارای ۹ باند طیفی با توان تفکیک مکانی ۳۰ متر برای باندهای ۱ تا ۷ و ۹ می‌باشد. باند شماره ۱ (فرا آبی) برای مطالعات هواویزها و خطوط ساحلی و باند شماره ۹ برای تشخیص ابرهای سیرس به کار می‌رود. توان تفکیک مکانی باند شماره ۸ (پانکروماتیک) ۱۵ متر است. سنسور TIRS آن مجهز به دو باند در محدوده‌ی مادون قرمز حرارتی (باندهای شماره ۱۰ و ۱۱) با توان تفکیک مکانی ۱۰۰ متر است. طول و عرض برداشتی تقریبی توسط این ماهواره ۱۷۰ کیلومتر شمالی-جنوبی و ۱۸۳ کیلومتر شرقی-غربی می‌باشد. اطلاعات تکمیلی در مورد باندهای این ماهواره در جدول ۳ ارائه شده است.

جدول ۳- اطلاعات تکمیلی باندهای ماهواره لندست ۸

باند	طول موج (میکرومتر)	قدرت تفکیک مکانی (متر)
باند ۱ فرا آبی	۰,۴۳ - ۰,۴۵	۳۰
باند ۲ آبی	۰,۴۵ - ۰,۵۱	۳۰
باند ۳ سبز	۰,۵۳ - ۰,۵۹	۳۰
باند ۴ قرمز	۰,۶۴ - ۰,۶۷	۳۰
باند ۵ مادون قرمز نزدیک	۰,۸۵ - ۰,۸۸	۳۰
باند ۶ مادون قرمز با طول موج کوتاه	۱,۵۷ - ۱,۶۵	۳۰
باند ۷ مادون قرمز با طول موج کوتاه	۲,۱۱ - ۲,۲۹	۳۰
باند ۸ پانکروماتیک	۰,۵ - ۰,۶۸	۱۵
باند ۹ سیرس	۱,۳۶ - ۱,۳۸	۳۰
باند ۱۰ مادون قرمز حرارتی ۱	۱۰,۶ - ۱۱,۱۹	۱۰۰* (۳۰)
باند ۱۱ مادون قرمز حرارتی ۲	۱۱,۵۰ - ۱۲,۵۱	۱۰۰* (۳۰)

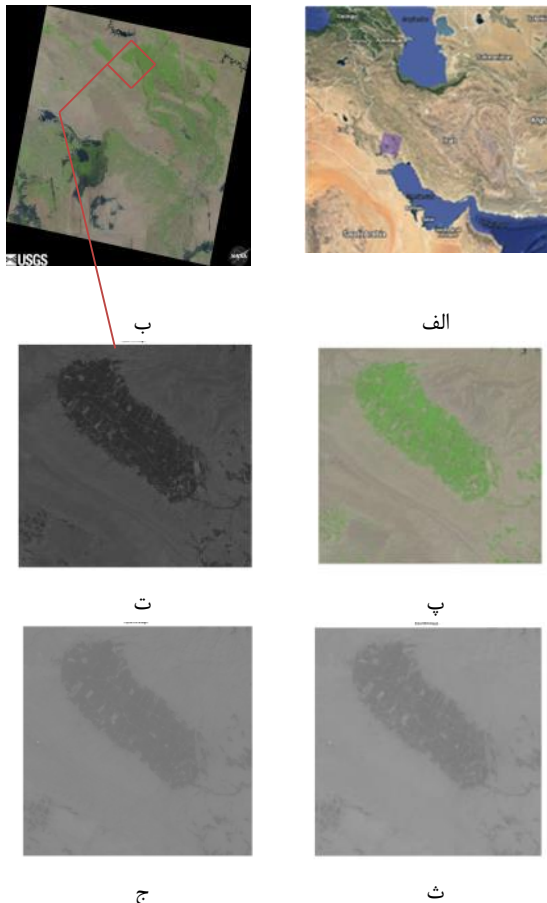
* باندهای حرارتی با توان تفکیک مکانی ۱۰۰ متر جمع‌آوری شده، ولی در سایت USGS با روش مکعبی^۳ به ۳۰ متر باز نمونه‌برداری و عرضه شده است.

^۱ Operational Land Imager

^۲ Thermal Infrared Sensor

^۳ Bicubic

داده‌های مورد استفاده در این مقاله از منطقه‌ای در جنوب غربی ایران گرفته شده (شکل ۵) و زمان اخذ داده‌ها ۲۹ مارچ ۲۰۱۳ بوده است. در این مقاله به منظور ارزیابی عملکردهای روش‌های ادغام، قسمتی از تصویر (۱۰۲۴ در ۱۰۲۴ پیکسل) را انتخاب می‌نماییم.



شکل ۵- (الف) موقعیت منطقه مورد مطالعه. (ب) منطقه مورد نظر. (پ) بخشی از منطقه برای اعمال روش‌های ادغام. (ت) باند مرئی شماره ۴ (قرمز). (ث) باند حرارتی شماره ۱۰. (ج) باند حرارتی شماره ۱۱

۱-۴- پیش پردازش داده‌ها

تصاویر لندست ۸ به کار برده شده در این تحقیق در سطح 1T بوده که این تصاویر با مقدار ۱۲ متر خطای دایره‌ای با سطح اطمینان ۹۰ درصد تصحیح هندسی گشته و زمین مرجع شده‌اند. یکی از مهم‌ترین حساسیت مدل‌های ادغام به خطاهای سنجنده مربوط به خطای ثبت متقابل دو تصویر منبع برای ادغام است. Zhukov همکاران در سال ۱۹۹۹ نشان داده‌اند که خطای ثبت متقابل دو تصویر نباید بیشتر از حدود ۰/۲ پیکسل تصویر با قدرت تفکیک مکانی پایین باشد [۲۶][۲۷]. باندهای

۵- پیاده‌سازی و ارزیابی نتایج

در این مقاله سه روش کانتورلت با پارامترهای تجزیه‌ی جهتی به صورت [۲،۳،۴] اجرا می‌شود، به نحوی که ۴ مرحله تجزیه هرمی و در هر سطح تجزیه (از مقیاس کوچک به بزرگ) به ترتیب ۲^۲، ۲^۳، ۲^۳ و ۲^۴ تجزیه‌ی جهتی خواهیم داشت. فیلترهای استفاده شده در تمامی تبدیل‌ها pkva برای تجزیه مقیاسی و ۹/۷ برای تجزیه جهتی خواهد بود. تصاویر منبع باند مرئی شماره ۴ (قرمز) و باند حرارتی شماره ۱۰ انتخاب شد. در بخش ۱-۵، برای دید کلی و بررسی بصری، نتایج ادغام با روش‌های مختلف در شکل ۶ و بزرگ‌نمایی روی قسمتی از نتایج برای بررسی دقیق‌تر در شکل ۷ آورده شده است. ارزیابی نتایج ادغام با شاخص‌های آنالیز گفته شده در بخش ۳-۴ در شکل‌های ۸ و ۹ و ۱۰ نشان داده شده است. پس از بررسی کیفیت نتایج ادغام توسط شاخص‌ها، در بخش ۵-۲ برترین تبدیل از لحاظ حفظ مقدار طیف تابندگی را مشخص نموده و برای آن، تعداد سطوح تجزیه‌ای مختلف را به کار برده و نتایج را مقایسه می‌نماییم.

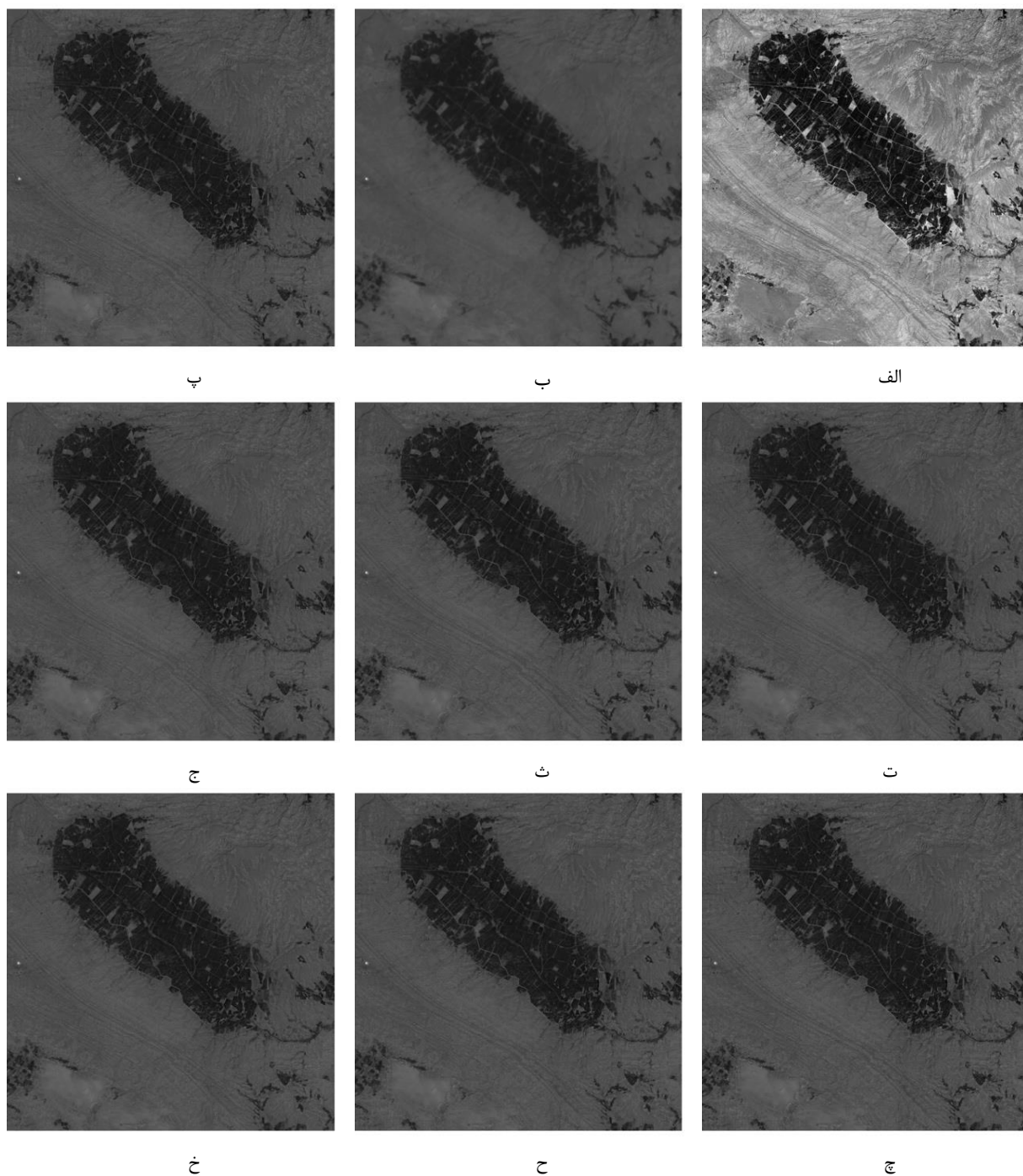
حرارتی این ماهواره برای ثبت متقابل با داده‌های مرئی به ۳۰ بازنمونه‌برداری شده است. برای بالا بردن دقت این ثبت، با روش باز نمونه‌برداری نزدیک‌ترین همسایه در نرم‌افزار ENVI 5.1 با چندجمله‌ای درجه دو باندها را بار دیگر با دقت ۰/۲۲ پیکسل ثبت متقابل نمودیم. به دلیل اهمیت حفظ مقدار پیکسل در این تحقیق از روش بازنمونه‌برداری نزدیک‌ترین همسایه استفاده کردیم. تصحیح رادیومتریکی برای باندهای مرئی با نرم‌افزار FLAASH در نرم‌افزار ENVI 5.1 انجام گردید. پارامترهای لازم برای تصحیحات جوی از پرونده فراداده^۱ تصاویر اخذ شد. برای تصحیح جوی باندهای حرارتی، روش مبتنی بر انتقال معادله تابشی استفاده شد [۲۸]. مرجع [۲۹] ابزاری برای تصحیح جوی باندهای حرارتی لندست ۵، لندست ۷ و لندست ۸ فراهم آورده است که دستیابی به این ابزار از طریق وب‌گاه [۳۰] امکان‌پذیر است. ابتدا توسط نرم‌افزار ENVI 5.1 شماره‌های رقومی باندهای مرئی و حرارتی به تابندگی بالای جو^۲ (TOA) تبدیل شد. سپس به کمک وب‌گاه ذکر شده، پارامترهای جوی (تابندگی رو به بالا^۳، تابندگی رو به پایین^۴ و ضریب عبوری جو^۵) تهیه شد. با داشتن این اطلاعات و با استفاده از معادله (۶) به تابندگی سطح می‌رسیم [۳۱].

$$L_{TOA} = \tau \varepsilon L_T + L_u + \tau(1 - \varepsilon)L_d \quad (6)$$

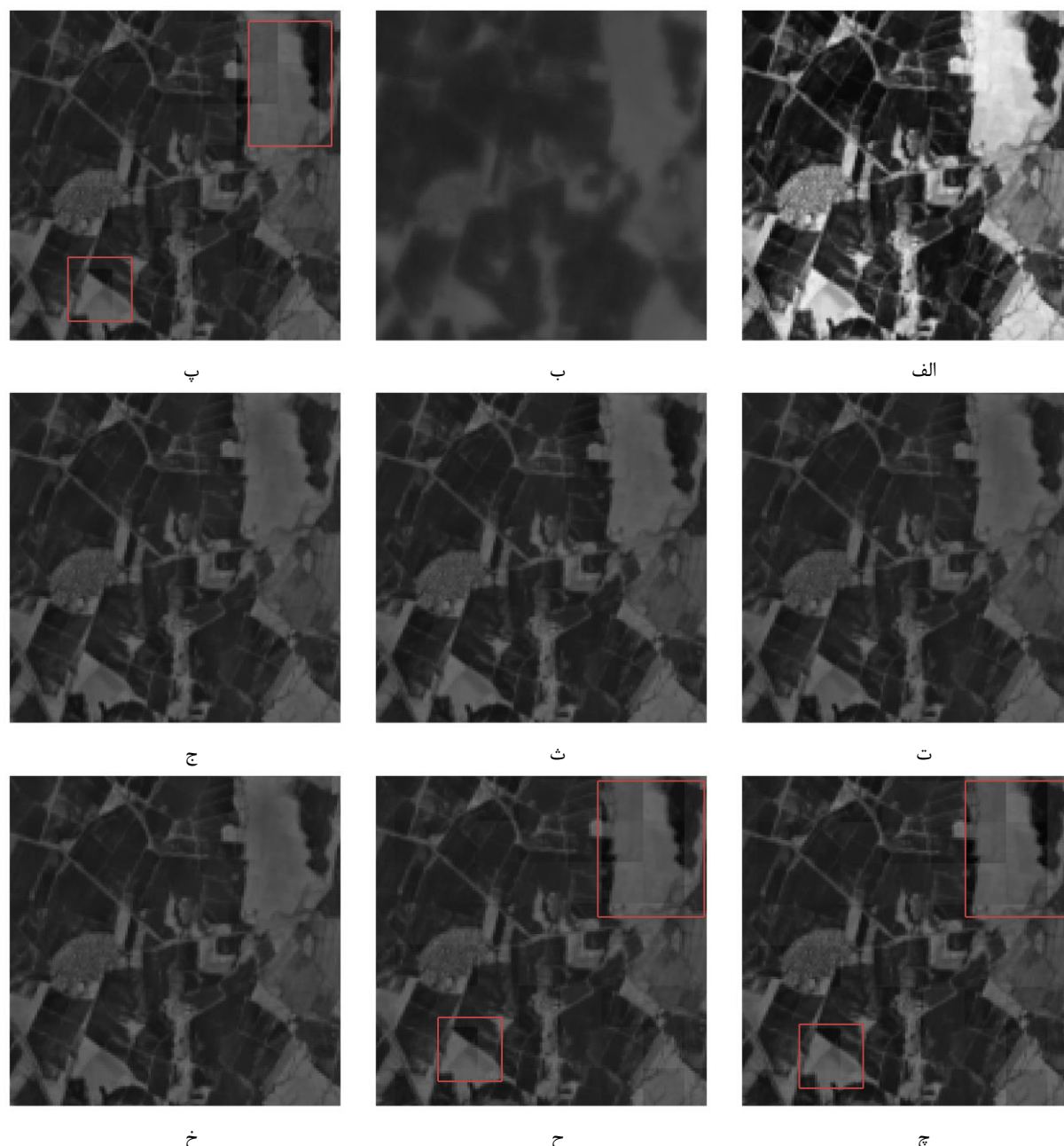
$$\begin{cases} NDVI < -0.185 : \varepsilon = 0.995 \\ -0.185 \leq NDVI < 0.157 : \varepsilon = 0.97 \\ 0.157 \leq NDVI < 0.727 : \varepsilon = 1.0098 + 0.047 \times \ln(NDVI) \\ NDVI \geq 0.727 : \varepsilon = 0.99 \end{cases} \quad (7)$$

در معادله بالا τ ضریب عبور جو، ε ضریب گسیل سطح، L_T تابندگی سطح، L_u تابندگی رو به بالا، L_d تابندگی رو به پایین و L_{TOA} تابندگی بالای جو می‌باشد [۳۲]. واحد تابندگی‌های ذکر شده $w/(m^2 \cdot sr \cdot \mu m)$ بوده و ضریب‌های عبور جو و گسیل بدون واحد هستند. طبق معادلات ۷ برای تخمین ضریب گسیل سطح، از رابطه خطی آن با شاخص تفاضلی نرمال شده پوشش گیاهی^۶ (NDVI) استفاده کردیم [۳۱].

^۱ Metadata File
^۲ Top of Atmosphere Radiance
^۳ Upwelling Radiance
^۴ Downwelling Radiance
^۵ Atmospheric Transmission
^۶ Normalized Difference Vegetation Index



شکل ۶- 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 SFLCT با فاکتور افزونگی ۱،۳۳. ج) باند ادغام شده با SFLCT با فاکتور افزونگی ۲،۳۳. چ) باند ادغام شده با LP. ح) باند ادغام شده با DWT. خ) باند ادغام شده با SWT



شکل ۷- بزرگنمایی قسمتی از 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 SFLCT با فاکتور افزونگی ۱،۳۳ ج) باند ادغام شده با SFLCT با فاکتور افزونگی ۲،۳۳. چ) باند ادغام شده با LP. ح) باند ادغام شده با DWT. خ) باند ادغام شده با SWT

۵-۱- بررسی نتایج ادغام

تبدیل‌های موجک به دلیل تشخیص جهات محدود قادر به تشخیص مرزهای عوارض در تصویر نمی‌باشد و این سبب ایجاد مصنوعاتی در طول لبه‌ها می‌گردد. تبدیل کانتورلت به دلیل تشخیص جهات‌های بیشتر در تصاویر تبدیلی سودمند است ولی به دلیل نمونه‌برداری‌های مکرر و در نتیجه Invariance Shift نبودن، نشت فرکانسی در نتایج حاصل از آن رخ می‌دهد. تبدیل NSCT با داشتن

ویژگی‌هایی نظیر فراهم آوردن تجزیه‌ای چند مقیاسی، چند جهتی و Shift Invariant می‌تواند اطلاعات منحصر به فرد تصاویر هم‌چون لبه‌ها، خطوط، منحنی‌ها و مرزهایی که توسط موجک نمایش داده نمی‌شود، را تشخیص داده و از پدیده نشت فرکانسی تبدیل کانتورلت نیز اجتناب نماید [۳۳]. Shift Invariant بودن این تبدیل تاثیر عدم ثبت متقابل بدون خطای دو تصویر منبع را روی نتیجه ادغام کاهش می‌دهد [۳۴] [۳۵]. با این وجود یکی از نقاط

ضعف NSCT، میزان افزونگی^۱ بالای آن است. بنابراین مدت زمان اجرای برنامه طولانی‌تر از سایر روش‌ها بوده و حجم بیشتری را نیز نیازمند است. مزیت تبدیل‌های SFLCT (CT 1.33 و CT 2.33) میزان افزونگی کمتر در عین کنترل پدیده نشت فرکانسی است.

همان‌طور که در شکل ۷ پیداست، تبدیل‌های DWT، LP و CT تبدیل‌هایی Shift Invariant نبوده و به دلیل نشت فرکانسی مصنوعاتی را به نتیجه ادغام وارد نموده‌اند. این Artifact Blocking ها در بلوک‌های قرمز رنگ در شکل ۷ نشان داده شده است. تبدیل‌های NSCT و SWT تبدیل‌هایی Shift Invariant بوده و به این علت مصنوعات بیان شده در نتیجه ادغام به واسطه آن‌دو دیده نمی‌شود. تبدیل‌های CT 1.33 و CT 2.33 به دلیل وجود مرحله نمونه‌برداری در تجزیه‌ی مقیاسی Shift Invariant نبوده اما همان‌طور که در قسمت (ث) و (ج) شکل ۷ مشخص است، باند ادغامی از مصنوعات مبراست، بنابراین این دو تبدیل با وجود مرحله نمونه‌برداری بهتر از تبدیل CT عمل نموده‌اند، چون در ساختار آن‌ها از پدیده‌ی Aliasing ذاتی در ساختار فیلتر بانک‌های جهت‌دار جلوگیری شده است.

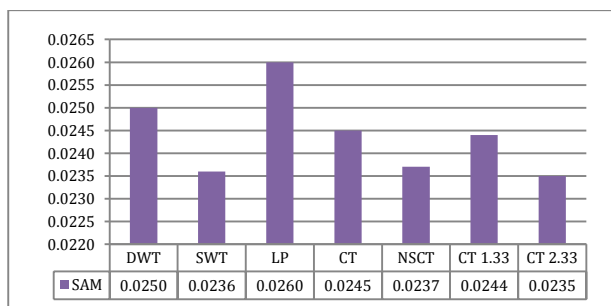
در شکل ۸ شاخص‌های آنالیز طیفی، مکانی و طیفی- مکانی را مشاهده می‌نماییم. محور عمودی مقدار شاخص‌ها را نشان می‌دهد که این مقادیر در جدولی زیر نمودار نیز آمده است. همان‌طور که از قسمت‌های (الف)، (ب)، (پ) و (ت) پیداست، به ترتیب سه روش کانتورلت با محلی سازی فرکانس‌های شارپ با فاکتور افزونگی ۲،۳۳، موجک ایستا و کانتورلت بدون کاهش بعد بالاترین ضریب همبستگی میان باند ادغام شده با باند حرارتی، کوچکترین SAM، کوچکترین RMSE و کوچکترین ERGAS را پدید آورده‌اند. بنابراین این سه روش مشخصات تابندگی باند حرارتی را بیشتر از سایر روش‌ها حفظ نموده‌اند. Shift Invariant این تبدیل‌ها گواهی بر این نتیجه است. پس از این سه روش به ترتیب کانتورلت با محلی سازی فرکانس‌های شارپ با افزونگی ۱،۳۳، کانتورلت، موجک گسسته و هرم لاپلاسی کوچک‌ترین خطای طیفی تابندگی را ایجاد کرده‌اند.

در قسمت (ث) بالاترین میزان SNR به‌ترتیب با روش‌های CT 2.33، SWT و NSCT بدست آمده است، که بدین معنی است که این سه روش از لحاظ مکانی

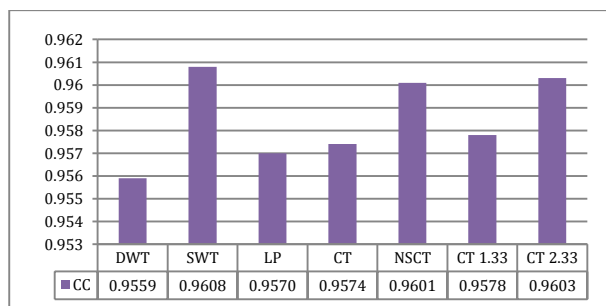
بیشترین کیفیت را ایجاد کرده و میزان مصنوعات کمتری را وارد نتایج ادغام کرده‌اند. در قسمت (ج) میانگین گرادیانت باند ادغام شده با روش‌های مختلف را می‌بینیم. بیشترین میزان گرادیانت ایجاد شده با اختلاف کمی توسط روش‌های LP، DWT و CT ایجاد شده است. همان‌طور که مشاهده می‌شود، میانگین گرادیانت ایجاد شده توسط این دو روش از میانگین گرادیانت باند منبع مرئی بیشتر است، می‌توان نتیجه گرفت که این دو تبدیل به اشتباه اجزایی با فرکانس بالا را در اثر وارد نمودن مصنوعات در باند ادغام شده ایجاد کرده و در نتیجه میانگین گرادیانت بالایی پدید آورده‌اند. در قسمت (چ) بالاترین ضریب همبستگی میان اطلاعات با فرکانس بالا میان باند ادغام شده با باند مرئی به ترتیب توسط روش‌های NSCT، SWT، CT 1.33 و CT 2.33 به‌دست آمده است، بنابراین این چهار روش بیشترین میزان اطلاعات مکانی را وارد باند ادغام شده کرده‌اند.

در قسمت (ح) شاخص جهانی کیفیت تصویر که شاخصی برای ارزیابی هر دو حوزه مکان و طیف است، مقایسه شده است. تبدیل CT 2.33 شباهت بیشتری با هر دو باندهای منبع حرارتی و مرئی ایجاد کرده است. با جمع‌بندی کلی در مورد بررسی شاخص‌های طیفی و مکانی می‌توان به این نتیجه رسید که به ترتیب سه تبدیل CT 2.33، NSCT و SWT در حوزه‌ی حفظ طیف و سه تبدیل NSCT، CT 2.33 و SWT در حوزه‌ی انتقال اطلاعات مکانی و جزئیات عملکرد بهتری داشته‌اند. بنابراین می‌توان گفت این سه تبدیل علاوه بر اضافه نمودن جزئیات، طیف تابندگی را نیز دچار اعوجاج کمتری نموده است.

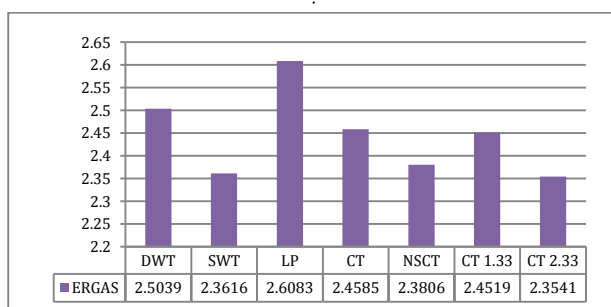
^۱ Redundancy



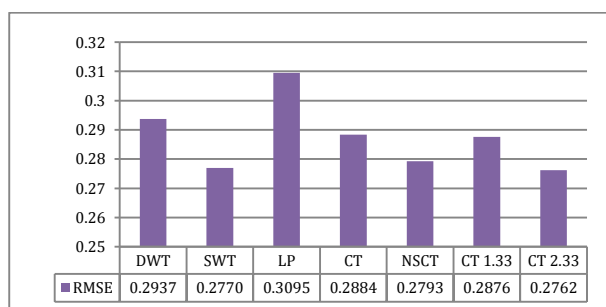
ب



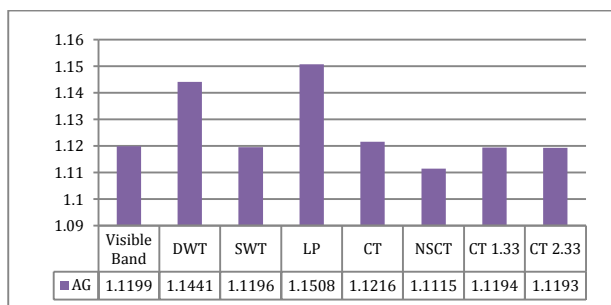
الف



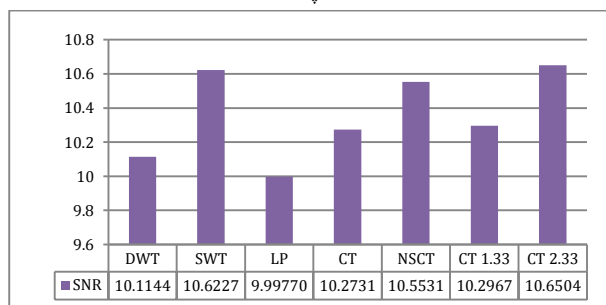
ت



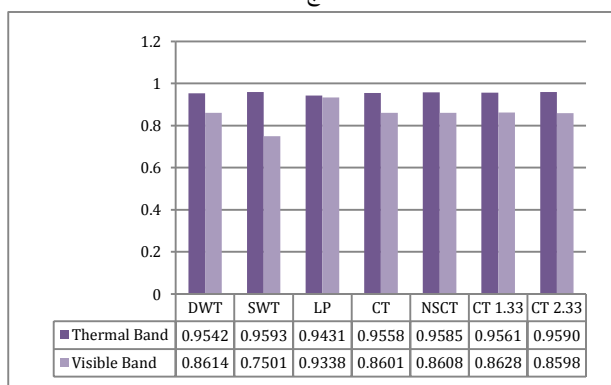
پ



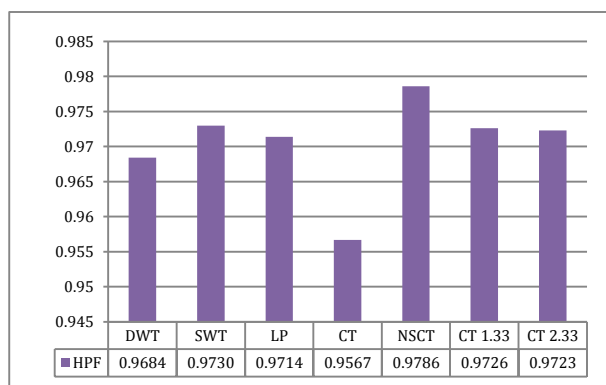
ج



ث



ح



چ

شکل ۸- شاخص‌های آنالیز طیفی و مکانی میان باند حرارتی و باند ادغام شده: الف) CC (ب) SAM (پ) RMSE (ت) ERGAS (ث) SNR باند ادغام شده. ج) AG باند ادغام شده. چ) ضریب همبستگی میان تصویر حاصل از اعمال فیلتر بالاگذر لاپلاسی بر روی باندهای مرئی و ادغام شده. ح) شاخص جهانی کیفیت تصویر UIQI

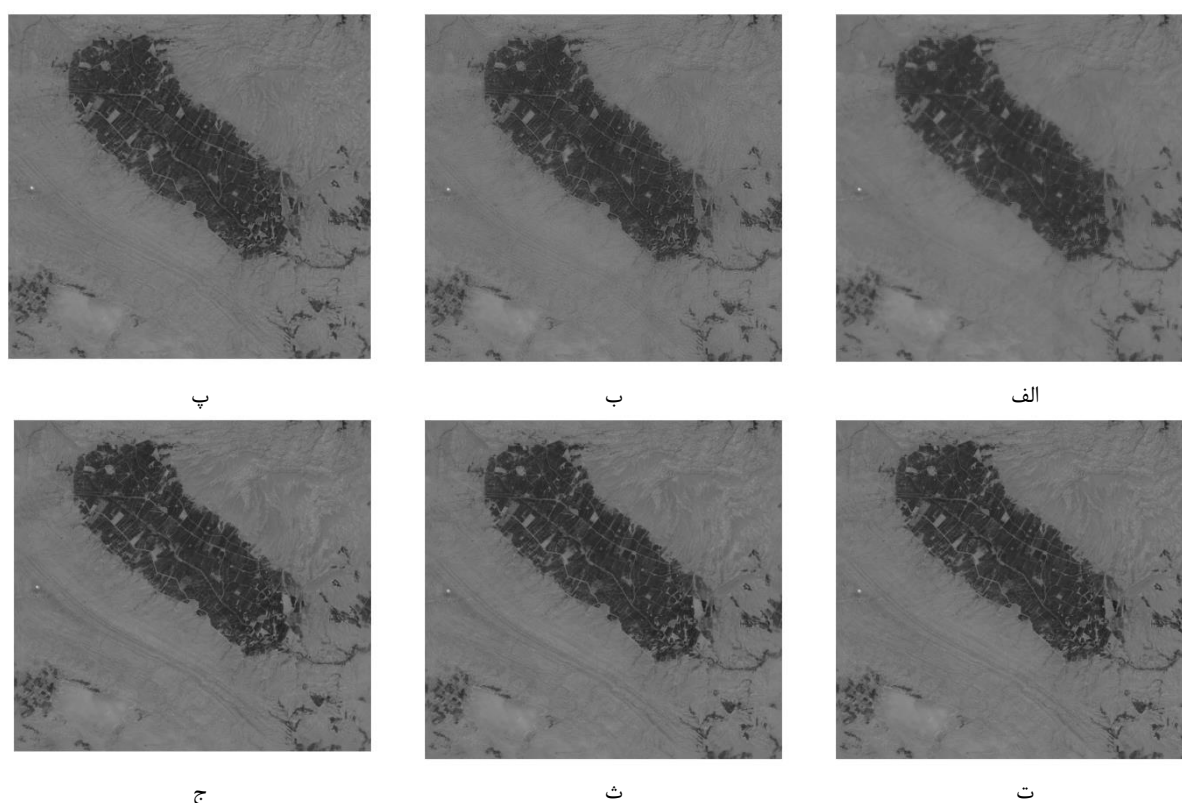
۵-۲- بررسی نتایج ادغام با روش CT 2.33 با استفاده از سطوح تجزیه‌ای مختلف

اکنون ادغام را توسط روش CT 2.33 که بیش از سایر روش‌ها طیف تابندگی را حفظ کرده بود، با تعداد سطوح تجزیه‌ای مختلف تکرار می‌نماییم. در شکل ۹ نتایج ادغام

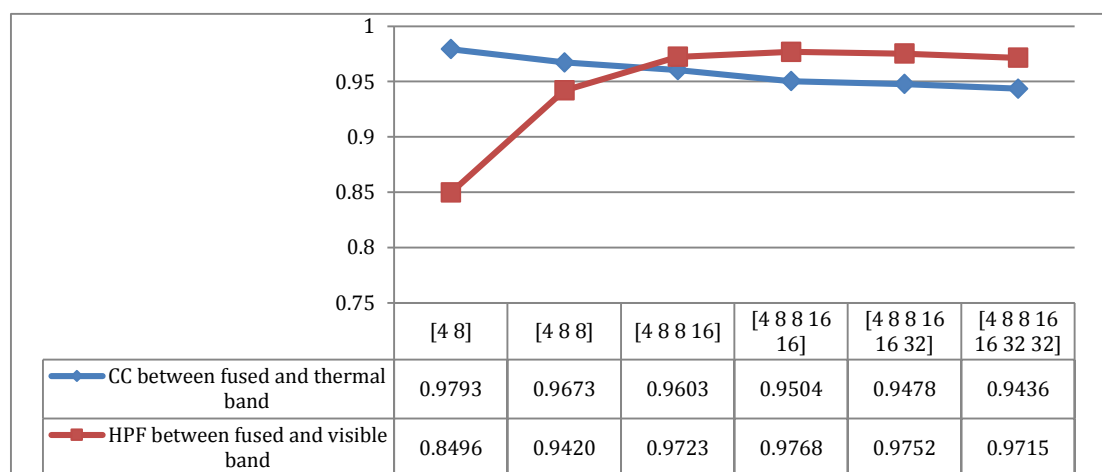
بدست آمده با این تبدیل را با ۲ تا ۷ سطح تجزیه‌ای پیرامیدی با پارامترهای جهتی [۲، ۳، ۳، ۴]، [۲، ۳، ۳، ۴]، [۲، ۳، ۳، ۴]، [۲، ۳، ۳، ۴]، [۲، ۳، ۳، ۴]، [۲، ۳، ۳، ۴] و [۲، ۳، ۳، ۴] مشاهده می‌نماییم. در مورد انتخاب تعداد مراحل تجزیه یک توازی میان تشخیص جزئیات مکانی با ایجاد مصنوعات و حساسیت به نویز وجود دارد. هر چه تعداد مراحل تجزیه‌ای مقیاسی

بنابراین باید توازنی در حفظ هر دوی اطلاعات مکانی و طیفی در نظر بگیریم. در شکل ۱۰ با در نظر گرفتن سطوح تجزیه‌ای مختلف ضریب همبستگی میان باند ادغام شده با باندهای حرارتی و مرئی را مشاهده می‌نماییم. همان‌طوری که در شکل پیداست، با ۴ مرحله تجزیه‌ی مقیاسی با پارامترهای جهت‌ی [۲،۳،۳،۴] ضریب همبستگی باند ادغام شده با باندهای با توان تفکیک مکانی بالا (مرئی) و توان تفکیک پایین (حرارتی) در تعادل بوده و این یعنی علاوه بر اضافه شدن بافت و جزئیات مکانی، طیف تابندگی نیز تا حد خوبی حفظ شده است.

بیشتر باشد، یک ضریب در زیر باند با توان تفکیک مکانی پایین (مقیاس کوچک‌تر)، به گروه بزرگ‌تری از پیکسل‌ها در تصویر ادغام شده مرتبط می‌شود. در این صورت است که خطایی کوچک در مرحله با توان تفکیک پایین، تاثیر بزرگی روی نتیجه‌ی ادغام گذاشته و اعوجاجات طیفی بزرگ‌تری را سبب می‌شود. علاوه بر این تعداد مراحل تجزیه بالا مدت زمان و حافظه‌ی بیشتری را می‌طلبد. اگر هم تعداد مراحل تجزیه را کم در نظر بگیریم (قسمت الف) و (ب) شکل ۹، جزئیات و اطلاعات مکانی به خوبی وارد باند ادغام شده نمی‌گردد [۷].



شکل ۹- نتایج ادغام بدست آمده با CT2.33 با سطوح تجزیه‌ای الف) [۲، ۳] ب) [۲، ۳، ۳] پ) [۲، ۳، ۳، ۴] ت) [۲، ۳، ۳، ۴، ۴] ث) [۲، ۳، ۳، ۴، ۴، ۵] ج) [۲، ۳، ۳، ۴، ۴، ۵، ۵]



شکل ۱۰- ضریب همبستگی (CC) میان باند ادغام شده با حرارتی و باند ادغام شده با مرئی برای تعداد سطوح تجزیه‌ای مختلف

۶- نتیجه گیری

باندهای حرارتی نقش مهمی در کاربردهای مختلف دارند. با این وجود، این باندها توان تفکیک مکانی پایینی داشته و امکان دستیابی به جزئیات و محل دقیق عوارض در آنها وجود ندارد. بنابراین لازمست که با روشی اقدام به بهبود توان تفکیک در آنها نماییم. برای بهبود قدرت تفکیک مکانی در باندهای حرارتی، ادغام این باندها با باندهایی با رزولوشن بالاتر (مرئی) در سطح پیکسل را انتخاب نمودیم. به دلیل محدودیت‌های ذکر شده برای تبدیل موجک گسسته برای استخراج منحنی‌ها و خطوط و لبه‌ها در تصویر از تبدیل کانتورل که تبدیلی ذاتا دو بعدی بوده و توابع پایه‌ای ناهمسانگرد دارد و در نتیجه ویژگی‌های هندسی تصویر را به خوبی استخراج می‌نماید، استفاده نمودیم. در این مقاله عملکرد ادغام باند حرارتی و مرئی را با ۷ تبدیل چند ریزه‌ساز مقایسه کردیم. تبدیل کانتورل اصلی را با انواع دیگر آن به کار برده و نتایج حاصل از آنها را با تبدیل‌های موجک گسسته، ایستا و هرم لاپلاسی مقایسه نمودیم. با بررسی شاخص‌های طیفی و مکانی دیدیم که انواع جدید تبدیل کانتورل یعنی NSCT و SFLCT (CT 1.33 و CT 2.33) هم از لحاظ حفظ طیفی و هم مکانی بهتر از تبدیل کانتورل اصلی عمل می‌نماید. دیدیم که به ترتیب تبدیل‌های CT 2.33، NSCT و SWT در حوزه‌ی حفظ طیف تابندگی و

تبدیل‌های NSCT، CT 2.33 و SWT در حوزه‌ی مکان عملکرد بهتری داشته‌اند. در مورد ادغام باندهای حرارتی و مرئی حفظ طیف تابندگی حرارتی اهمیت فراوانی دارد، پس بهترین تبدیل برای ادغام در سطح پیکسل را CT 2.33 برگزیده و برای آن تعداد سطوح تجزیه‌ای مختلف را بررسی کرده و با آنالیز ضریب همبستگی (CC) و برقراری تعادل در حفظ هر دو حوزه‌ی طیف و مکان ۴ مرحله تجزیه‌ی مقیاسی را بهترین تعداد مرحله انتخاب نمودیم. دیدیم که ویژگی Shift Invariant نه تنها برای ادغام تصاویر register نشده، بلکه برای تصاویری که ثبت متقابل شده‌اند، نیز خاصیت قابل توجهی است، زیرا تبدیل‌های Shift Variant به وضوح مصنوعات بلوکه شده‌ای در نتایج ادغام ایجاد کرده‌اند. بنابراین خطای ثبت متقابل دو تصویر منبع، عامل موثری در نتیجه نهایی ادغام محسوب می‌شود.

یافتن روشی برای افزایش دقت ثبت متقابل دو تصویر، استفاده از قانون‌های دیگر برای ترکیب ضرایب زیر باندهای حاصل از تجزیه‌های چندریزه‌ساز برای بهبود حفظ هر چه بیشتر طیف تابندگی، بررسی تبدیل‌های دیگر چندریزه‌ساز برای تجزیه و استفاده از فیلترهای مختلف برای تجزیه چند مقیاسی و چند جهتی از موضوعاتی است که در تحقیقات آینده می‌توان به آنها پرداخت.

مراجع

- [1] Han, L., Shi, L., Yang, Y., & Song, D. (2014). Thermal physical property-based fusion of geostationary meteorological satellite visible and infrared channel images. *Sensors*, 14(6), 10187-10202.
- [2] Prakash, Anupma. (2000). "Thermal remote sensing: concepts, issues and applications." *International Archives of Photogrammetry and Remote Sensing* 33.B1; PART 1: 239-243.
- [3] Wei, C., Zhang, Y., Guo, X., Hui, S., Qin, M., & Zhang, Y. (2013). Thermal infrared anomalies of several strong earthquakes. *The Scientific World Journal*, 2013.
- [4] Liu, Z., Blasch, E., Xue, Z., Zhao, J., Laganier, R., & Wu, W. (2012). Objective assessment of multiresolution image fusion algorithms for context enhancement in night vision: a comparative study. *IEEE transactions on pattern analysis and machine intelligence*, 34(1), 94-109.
- [5] Liao, W., Huang, X., Van Coillie, F., Gautama, S., Pižurica, A., Philips, W., Liu, H., Zhu, T., Shimon, M., Moser, G. and Tuia, D. (2015). 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), pp.2984-2996.
- [6] Chen, Yanfei, and Nong Sang. (2015). "Attention-based hierarchical fusion of visible and infrared images." *Optik-International Journal for Light and Electron Optics* 126.23: 4243-4248.
- [7] Li, Shutao, Bin Yang, and Jianwen Hu. (2011). "Performance comparison of different multi-resolution transforms for image fusion." *Information Fusion* 12.2: 74-84.
- [8] Namratha, H. N., and M. T. Raghu. (2013). "Remote Sensing Satellite Image Fusion Using Fast Curvelet Transforms." *International Journal of Science and Research (IJSR) ISSN (Online): 2319-7064 Index Copernicus Value (2013): 6.14 | Impact Factor: 4.438*

- [9] Choi, Yoonsuk, ErshadSharifahmadian, and ShahramLatifi. (2013). "Performance analysis of contourlet-based hyperspectral image fusion methods." *International Journal on Information Theory* 2.1: 1-14.
- [10] Aiazzi, B., Baronti, S., Garzelli, A., Santurri, L., & Selva, M. (2005, December). Spatial enhancement of tIR aSTER data via vNIR images and generalized laplacian decomposition. In *Proceedings of 4th EARSeL Workshop on Imaging Spectroscopy* (pp. 489-500).
- [11] Do, Minh N., and Martin Vetterli. (2005). "The contourlet transform: an efficient directional multiresolution image representation." *Image Processing, IEEE Transactions on* 14.12: 2091-2106.
- [12] Narang, S. K., & Ortega, A. (2012). Perfect reconstruction two-channel wavelet filter banks for graph structured data. *IEEE Transactions on Signal Processing*, 60(6), 2786-2799.
- [13] Zhang, Zhong, and Rick S. Blum. (1999). "A categorization of multiscale-decomposition-based image fusion schemes with a performance study for a digital camera application." *Proceedings of the IEEE* 87.8: 1315-1326.
- [14] Da Cunha, Arthur L., Jianping Zhou, and Minh N. Do. (2006). "The nonsubsampling contourlet transform: theory, design, and applications." *IEEE transactions on image processing* 15.10: 3089-3101.
- [15] Nguyen, T. T., Liu, Y., Chauris, H., & Orintara, S. (2008). Implementational aspects of the contourlet filter bank and application in image coding. *EURASIP Journal on Advances in Signal Processing*, 2008, 186.
- [16] Choi, Yoonsuk, ErshadSharifahmadian, and ShahramLatifi. (2014). "Remote sensing image fusion using contourlet transform with sharp frequency localization." *International Journal of Information Technology, Modeling and Computing, (IJITMC)* 2.1: 23-35.
- [17] Lu, Yang, and Minh N. Do. (2006). "A new contourlet transform with sharp frequency localization." *Image Processing, 2006 IEEE International Conference on*. IEEE, 2006.
- [18] Wang, J., Lai, S., & Li, M. (2012). Improved image fusion method based on NSCT and accelerated NMF. *Sensors*, 12(5), 5872-5887.
- [19] Yang, Bin, Shutao Li, and Fengmei Sun. (2007) "Image fusion using nonsubsampling contourlet transform." *Image and Graphics, 2007. ICG 2007. Fourth International Conference on*. IEEE, 2007.
- [20] Simon, Philomina. (2012). "A novel statistical fusion rule for image fusion and its comparison in non subsampled contourlet transform domain and wavelet domain." *arXiv preprint arXiv:1205.1648*.
- [21] Yakhdani, Mohammad Fallah, and Ali Azizi. (2010). Quality assessment of image fusion techniques for multisensorhigh resolution satellite images (case study: IRS-P5 and IRS-P6 satellite images). *na*, 2010.
- [22] De Carvalho, O. Abilio, and Paulo Roberto Meneses. (2000). "Spectral correlation mapper (SCM): an improvement on the spectral angle mapper (SAM)." *Summaries of the 9th JPL Airborne Earth Science Workshop, JPL Publication 00-18. Vol. 9. Pasadena, CA: JPL Publication*, 2000.
- [23] Alparone, L., Baronti, S., Garzelli, A., & Nencini, F. (2004). A global quality measurement of pan-sharpened multispectral imagery. *IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters*, 1(4), 313-317.
- [24] Milla, R. Z., Climent, R. G., Clevers, J. G. P. W., & Schaepman, M. E. (2006). Unmixing-based Landsat TM and MERIS image fusion for land cover mapping over the Netherlands.
- [25] Wang, Z., Bovik, A. C., Sheikh, H. R., & Simoncelli, E. P. (2004). Image quality assessment: from error visibility to structural similarity. *IEEE transactions on image processing*, 13(4), 600-612.
- [26] Zhukov, B., Oertel, D., Lanzl, F., & Reinhackel, G. (1999). Unmixing-based multisensor multiresolution image fusion. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 37(3), 1212-1226.
- [27] Alidoost, F., Mobasheri, M. R., & Abkar, A. A. (2013). Introducing a Method for Spectral Enrichment of the High Spatial Resolution Images. *Photogrammetrie-Fernerkundung-Geoinformation*, 2013(1), 31-41.
- [28] Barsi, Julia A., John L. Barker, and John R. Schott. (2003). "An atmospheric correction parameter calculator for a single thermal band earth-sensing instrument." *Geoscience and Remote Sensing Symposium, 2003. IGARSS'03. Proceedings. 2003 IEEE International. Vol. 5. IEEE*, 2003.
- [29] Barsi, J. A., Schott, J. R., Palluconi, F. D., & Hook, S. J. (2005, August). Validation of a web-based atmospheric correction tool for single thermal band instruments. In *Optics & Photonics 2005* (pp. 58820E-58820E). *International Society for Optics and Photonics*.
- [30] <http://atmcorr.gsfc.nasa.gov>
- [31] Mobasheri, M. R., & Amani, M. (2016). Soil moisture content assessment based on Landsat 8 red, near-infrared, and thermal channels. *Journal of Applied Remote Sensing*, 10(2), 026011-026011.
- [32] Yu, Xiaolei, Xulin Guo, and Zhaocong Wu. (2014). "Land surface temperature retrieval from Landsat 8 TIRS—Comparison between radiative transfer equation-based method, split window algorithm and single channel method." *Remote Sensing* 6.10: 9829-9852.

- [33] Leavline, E. J., & Sutha, S. (2014). Design of FIR Filters for Fast Multiscale Directional Filter Banks. *International Journal of u-and e-Service, Science and Technology*, 7(5), 221-234.
- [34] Yang, G., Li, M., Chen, L., & Yu, J. (2015). The nonsubsamped contourlet transform based statistical medical image fusion using generalized Gaussian density. *Computational and mathematical methods in medicine*, 2015.
- [35] Li, Huafeng, Yi Chai, and Zhaofei Li. (2013). "Multi-focus image fusion based on nonsubsamped contourlet transform and focused regions detection." *Optik-International Journal for Light and Electron Optics* 124.1. 40-51.