

تلفیق تصاویر رادار با روزنه مجازی و اپتیک با استفاده از تبدیل کرولت

محمد شکری^{۱*}، محمود رضا صاحبی^۲

^۱ دانشجوی کارشناسی ارشد سنجش از دور - دانشکده مهندسی نقشه‌برداری - دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی
m.shokri70@gmail.com

^۲ دانشیار دانشکده مهندسی نقشه‌برداری - دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی
sahebi@kntu.ac.ir

(تاریخ دریافت مرداد ۱۳۹۵، تاریخ تصویب تیر ۱۳۹۶)

چکیده

ماهواره‌های سنجش از دور، داده‌هایی با خصوصیات طیفی و مکانی مختلفی از سطح زمین جمع‌آوری می‌کنند که هرکدام بخشی از خصوصیات عوارض را نمایان می‌سازند. گاهی اطلاعات بدست آمده از یک سنجنده به تنهایی پاسخگوی نیازهای مورد نظر ما نیست. با وجود اینکه داده‌های چند طیفی^۱ اطلاعات غنی طیفی را از عوارض مختلف به ما می‌دهد، اما به‌طور قابل توجهی تحت تأثیر عوامل محیطی مانند دود، مه، ابر و میزان نور خورشید قرار می‌گیرد. برخلاف سنجنده‌های اپتیک، سنجنده‌های رادار با روزنه مجازی^۲ (SAR) در همه نوع شرایط آب و هوایی و شبانه‌روز توانایی اخذ داده را دارند. داده‌های SAR می‌توانند اطلاعات غنی از بافت و ساختار ارائه داده و به مؤلفه‌های شکل، جهت، زبری و رطوبت از عوارض روی زمین حساس است. اما تصاویر SAR نمی‌توانند جزئیات و لبه اشیاء را به‌وضوح مشخص کنند. بنابراین ترکیب خصوصیات مختلف از تصاویر اپتیک و داده‌های SAR با استفاده از تکنیک‌های تلفیق تصویر، می‌تواند یک دید کامل‌تر از تارگت موردنظر به ما دهد و دقت و اعتمادپذیری بالاتری برای نتیجه‌های بدست آمده از این روش ارائه دهد. تبدیل کرولت، در تجزیه و تحلیل لبه‌های منحنی شکل و دقت بالای آن برای تقریب و توصیف پراکندگی‌ها و جهت‌ها، در مقایسه با بسیاری از تبدیل‌های دیگر در زمینه تجزیه و تحلیل اطلاعات تصویر و تلفیق تصاویر مناسب‌تر است. با توجه به محدودیت قدرت تفکیک مکانی و زمانی برای تصاویر چندطیفی و محدودیت داده‌های SAR برای کاربردهای شهری و طبقه‌بندی و مناسب بودن تبدیل کرولت برای تلفیق این دو نوع داده، تلفیق این تصاویر باعث بهبود ضعف‌های آن‌ها می‌شود. در این مقاله با استفاده از تبدیل کرولت^۳، تصاویر SAR و اپتیک را به فضای کرولت انتقال می‌دهیم، سپس با روش میانگین وزن‌دار در فضای کرولت تلفیق انجام می‌گردد و در نهایت با اعمال تبدیل کرولت معکوس تصویر تلفیق شده بدست می‌آید. بدین منظور داده‌های منطقه‌ای از شهر شیراز برای پیاده‌سازی روش پیشنهادی استفاده شد. دو روش آماری و طبقه‌بندی برای ارزیابی تصاویر تلفیق شده مورد استفاده قرار گرفت. برای مقایسه، روش پیشنهادی با دو روش تلفیق با استفاده از تبدیل IHS و wavelet استفاده شد. با استفاده از پارامترهای آماری انحراف معیار، آنتروپی، معیار فرکانس مکانی، ضریب همبستگی و اندکس کیفیت تصویر شاهد بهبود تصویر تلفیقی نسبت به روش‌های دیگر هستیم. با توجه به اینکه دقت طبقه‌بندی به میزان اطلاعات طیفی و مکانی تصویر بستگی دارد، به منظور ارزیابی تأثیر تلفیق در توان تفکیک طیفی و مکانی، تصاویر را طبقه‌بندی می‌کنیم. با طبقه‌بندی تصویر اپتیک ورودی و تصویر تلفیقی، بهبود ۴ درصدی دقت کلی طبقه‌بندی و افزایش ۰.۰۵ ضریب کاپا نسبت به تصویر ورودی مشاهده شده است. نتایج بدست آمده نشان دهنده مناسب بودن الگوریتم پیشنهادی برای تلفیق تصاویر SAR و اپتیک است.

واژگان کلیدی: داده SAR، تلفیق تصاویر، تبدیل چندمقیاسی، تبدیل موجک، تبدیل کرولت

* نویسنده رابط

^۱ Multispectral
^۲ Synthetic Aperture Radar
^۳ Curvelet Transformation

۱- مقدمه

در سنجش از دور دارای سنجنده‌های متنوعی با کاربردهای متفاوت می‌باشیم که هر کدام از این سنجنده‌ها دارای مزایا و محدودیت‌هایی می‌باشند. دو نمونه از پرکاربردترین این سنجنده‌ها، سنجنده‌های اپتیک و SAR می‌باشند.

داده‌های اپتیک از حد تفکیک رادیومتریکی مناسبی برخوردار می‌باشند که آن‌ها را جهت تهیه نقشه کاربری اراضی، نقشه تغییرات، شناسایی اهداف و کاربردهای متنوع دیگر مناسب می‌سازد. اما با توجه به رابطه معکوس بین حد تفکیک رادیومتریکی و حد تفکیک مکانی، داده‌های چندطیفی از حد تفکیک مکانی مطلوبی برخوردار نمی‌باشند. همچنین این نوع داده‌ها به طور قابل توجهی تحت تأثیر عوامل محیطی مانند دود، مه، ابر، ریزگردها و میزان نور خورشید قرار می‌گیرند [۱].

داده‌های SAR برخلاف داده‌های اپتیک، توانایی اخذ در تمامی شرایط آب و هوایی را دارند. این نوع داده‌ها می‌توانند اطلاعات غنی از بافت و ساختار ارائه داده و به مؤلفه‌های شکل، جهت، زبری و رطوبت از عوارض روی زمین حساس هستند. از طرفی استفاده صرف از این نوع داده‌ها در کاربردهای شهری، طبقه‌بندی، تفسیری و ... کارایی مطلوبی ندارند. همچنین وجود نویز و عدم آشکارسازی مناسب لبه‌ها از جمله ضعف‌های موجود در این نوع داده‌ها می‌باشد [۲، ۳].

از این رو بکارگیری روش‌های تلفیق در بهره‌گیری از مزایا و فائق آمدن بر محدودیت و معایب هر کدام از این داده‌ها مؤثر می‌باشد. مینیمم کردن نویز در داده SAR، افزایش کیفیت این داده و همچنین بهبود دقت مکانی و افزایش کنتراست در داده‌های اپتیک از ویژگی‌های تصویر تلفیق شده می‌باشد. بنابراین تلفیق این دو نوع داده یک دید کامل‌تر از تارگت مورد نظر ارائه می‌دهد و دقت و اعتمادپذیری بالاتری برای نتایج حاصله می‌توان متصور بود [۳، ۴].

تکنیک تلفیق تصاویر سنجش از دور به سه دسته کلی تلفیق در سطح پیکسل (در سطح داده)، در سطح ویژگی و در سطح تصمیم‌گیری تقسیم می‌شود [۱]. تلفیق در سطح پیکسل عمدتاً به منظور بهبود در قدرت تفکیک مکانی، افزایش جزئیات بافت و ساختار و حفظ خصوصیات

طیفی از داده‌های چندطیفی به صورت هم‌زمان انجام می‌شود [۵]. از دیگر مزایای تلفیق در سطح پیکسل این است که به صورت مستقیم تأثیر ضریب پراکنش^۱ را از داده SAR در تصویر تلفیقی وارد می‌کند ولی در سطوح دیگر تلفیق، تأثیر مستقیم پراکنش وجود ندارد و در عوض مکانیسم پراکنش در آن‌ها وارد می‌شود.

در سال‌های اخیر الگوریتم‌های ادغام بر اساس ابزار تجزیه و تحلیل چندمقیاسی^۲ اهمیت زیادی پیدا کرده است. تبدیل کرولت توسط Candès و همکاران در سال ۱۹۹۹ [۶] ارائه شد که به طور مستقیم لبه تصاویر را مشخص می‌کند و می‌تواند بهتر با خصوصیات تصویر متناسب شود. این تبدیل، لبه و دیگر خصوصیات در امتداد منحنی‌ها را خیلی مؤثرتر از تبدیل‌های سنتی ارائه می‌دهد. تبدیل کرولت، در آنالیز لبه‌های منحنی شکل و دقت بالا در تقریب و توصیف پراکندگی‌ها و جهت‌ها، در مقایسه با تبدیل‌های دیگر برای تلفیق تصاویر مناسب‌تر است. تبدیل موجک گسسته^۳ (DWT) و تبدیل موجک ایستای^۴ (ATWT) مناسب‌ترین ابزار برای تلفیق تصاویر است. تبدیل کرولت از این دو ابزار برای تلفیق تصاویر استفاده می‌کند [۳].

در سال‌های اخیر تحقیقات زیادی در زمینه تلفیق داده‌های سنجش از دوری در فضای کرولت و در سطح داده انجام شده است که در ادامه به برخی از این موارد پرداخته خواهد شد.

Xinzheng Zhang در سال ۲۰۰۷ با استفاده از تبدیل کرولت و میانگین‌گیری در فضای کرولت از داده‌های پلاریمتری باعث افزایش جزئیات و کاهش نویز شد [۷]. Limin Dong و همکاران در سال ۲۰۱۵ ابتدا تبدیل IHS را بر روی تصویر چندطیفی اعمال کردند و سپس بر روی تصویر پانکروماتیک و شدت از تبدیل IHS، تبدیل کرولت را اعمال کرده و در فضای کرولت دو باند پانکروماتیک و شدت را با استفاده از انحراف معیار ادغام کردند که باعث افزایش دقت اطلاعات مکانی شد [۸]. Ying Li و همکاران در سال ۲۰۰۸ با استفاده از تبدیل IHS تصویر چندطیفی را به فضای IHS برده و سپس تصویر شدت^۵ از تصویر

^۱ Backscatter

^۲ Multiscale

^۳ Discrete Wavelet Transform

^۴ a'trous Wavelet Transform

^۵ Intensity

مطالعه و داده‌ها و الگوریتم پیشنهادی توضیح داده شده است. در بخش ۴ نتایج الگوریتم بر روی داده‌های ورودی به صورت مقایسه‌ای آورده شده و در بخش آخر نیز نتیجه-گیری کلی از روش پیشنهادی آورده شده است.

۲- تبدیل کرولت

تبدیل کرولت یک عضو جدید خانواده تبدیل چند مقیاسی است که در چند سال گذشته برای بهبود ضعف‌های نماینده‌های سنتی تبدیل چند مقیاسی مانند موجک توسعه یافته است. به صورت مفهومی تبدیل کرولت یک هرم چند مقیاسی با تعداد زیادی جهت و موقعیت‌ها در هر مقیاس طول و المان‌های سوزن شکل^۲ در مقیاس خوب است که این هرم از نوع غیر استاندارد است [۶].

در واقع کرولت دارای ویژگی‌های خوب هندسی است که آن را از موجک و تبدیل‌های مانند آن جدا می‌کند. در اینجا دلایل توجه به این تبدیل جدید و گسترش آن و چرا توسعه کرولت گسسته مهم است بیان می‌شود [۶، ۱۲-۱۵]:

- بهینه‌سازی نمایش اشیاء دارای لبه با کمترین خطا
- این تبدیل ضعف‌های تبدیل موجک، در توصیف خواص جهت از تصویر لبه را برطرف کرده است و این تبدیل می‌تواند به طور مناسب با انواع ویژگی‌های تصویر سازگار شود.
- این تبدیل به دلیل ساختار غیربایاس دارای حساسیت کمتری نسبت به نویز است.

۲-۱- تبدیل کرولت پیوسته

در تبدیل کرولت هدف تولید کرولت پایه φ و آنالیز سیگنال و تصویر از طریق انتقال، مقیاس و دوران کرولت پایه است. در فضای کرولت x متغیر مکان، ω متغیر حیطه فرکانس و r و θ مختصات قطبی در حیطه فرکانس هستند. فرآیند تبدیل با دو پنجره $W(r)$ و $V(t)$ آغاز می‌شود؛ که به ترتیب پنجره شعاعی و پنجره زاویه‌ای نامیده می‌شوند. این توابع نرم و نامنفی هستند که مقادیر حقیقی می‌گیرند. دامنه W مقادیر حقیقی مثبت در بازه $r \in (\frac{1}{2}, 2)$ و دامنه V مقادیر حقیقی در بازه $[-1, 1]$ است. این توابع همیشه در شرایط زیر صدق می‌کنند [۱۳]:

چندطیفی در فضای IHS با تصویر SAR را انطباق هیستوگرام داده و این دو مؤلفه را ادغام کردند [۹]. Xiao و همکاران در سال ۲۰۰۷ تصاویر چندطیفی، پانکروماتیک و SAR را در فضای IHS و جایگذاری ضرایب موجک از تصویر پانکروماتیک و ضرایب کرولت از تصویر SAR باند شدت تلفیق را انجام دادند [۳]. استفاده از تبدیل IHS باعث افزایش دقت مکانی می‌شود و سرعت بالایی دارد اما باعث اعوجاج طیفی بالا و محدودیت کار با تنها سه باند است [۸، ۹].

Pappas و همکاران در سال ۲۰۱۳ از روش میانگین وزن‌دار در فضای کرولت برای تلفیق تصاویر پانکروماتیک و SAR استفاده کردند که باعث افزایش اطلاعات مکانی در تصویر شد [۴]. Xaefeng و همکاران در سال ۲۰۱۲ تصاویر چندفوکوسی^۱ را در فضای کرولت با استفاده از ضرایب موجک تلفیق کردند که دارای دقت بالا و زمان نسبتاً زیادی بود [۱۰]. Golibagh و همکاران در سال ۲۰۰۹ ابتدا تصاویر را به فضای کرولت انتقال داده و سپس با استفاده از یک آزمون وابستگی خطی، وجود اطلاعات با ارزش برای تلفیق را مورد بررسی قرار داده و در نهایت تلفیق را انجام دادند که باعث افزایش اطلاعات مکانی در تصویر شد [۱۱].

بر طبق تحقیقات انجام‌شده، تبدیل کرولت نتایج بهتری در تلفیق تصاویر نسبت به روش‌های دیگر بدست می‌آورد. تلفیق تصاویر اپتیک و SAR با استفاده از تبدیل کرولت به دلیل خصوصیات این تبدیل، دارای دقت بهتر و اعتمادپذیری بالاتری هستند [۳]. روشی که در این تحقیق موردبحث قرار گرفته است استفاده از تبدیل چند مقیاسه کرولت برای تلفیق تصاویر SAR و اپتیک است.

با توجه به محدودیت قدرت تفکیک مکانی برای تصاویر چندطیفی و همچنین محدودیت داده‌های SAR برای کاربردهای شهری و طبقه‌بندی، هدف از این مقاله استفاده از تبدیل کرولت در تلفیق داده‌های SAR و اپتیک به منظور قوی کردن عملیات تلفیق می‌باشد. بر این اساس تصویر تلفیق شده قابلیت‌های بیشتری از تصاویر اپتیک و SAR را دارا خواهد بود. در بخش ۲ این مقاله توضیحاتی در مورد تبدیل کرولت، ضرایب کرولت و نحوه پیاده‌سازی آن آورده شده است. در بخش ۳ مواد و روش‌ها که شامل منطقه مورد

^۲ Needle-shape

^۱ Multi-Focus

$$c(j, l, k) = \langle f, \varphi_{j,k,l} \rangle = \int_{R^2} f(x) \bar{\varphi}_{j,k,l}(x) dx \quad (6)$$

رابطه معکوس نیز به صورت زیر است:

$$f = \sum_{j,k,l} \langle f, \varphi_{j,k,l} \rangle \varphi_{j,k,l} \quad (7)$$

۲-۲- تبدیل کرولت دیجیتال

از ویژگی‌های اصلی تبدیل کرولت حساسیت آن به جهت و لبه‌ها و توانایی ارائه جزئیات بالاگذر از لبه‌های اشیاء در مقیاس‌های مختلف از طریق ضرایب پراکنده غیر صفر است [۳]. بر روی تبدیل کرولت دو تجدیدنظر کلی انجام شده است. در تبدیل کرولت اولیه از یک سری مراحل پیچیده شامل تجزیه و تحلیل تبدیل رجلت تصادفی از یک تصویر استفاده می‌شد. کارایی این تبدیل بیش از حد آهسته بود. نسل دوم تبدیل کرولت از تبدیل رجلت به صورت گسسته استفاده شده و در نتیجه میزان افزونگی محاسبات در تبدیل کاهش یافته و سرعت پردازش به صورت قابل توجهی بالا رفته است. الگوریتم اول بر اساس فاصله نامساوی تبدیل سریع فوریه و الگوریتم دوم بر اساس تقسیم‌بندی نمونه‌های انتخابی تبدیل سریع فوریه، 'wrapping' بود [۹].

تبدیل کرولت بر اساس تبدیل رجلت چندمقیاسی با یک فیلتر میان‌گذر^۱ است و یک تصویر را در مقیاس‌های متفاوت از هم جدا می‌کند. طول ضلع هر پنجره محلی (بلوک) دو برابر زیرباند آن پنجره است. در عمل، تبدیل کرولت، اعمال بلوک تبدیل رجلت نشان داده شده در شکل ۲ با فریم جزئیات از ATWT در شکل ۱ است. الگوریتم پیاده‌سازی تبدیل کرولت دیجیتال به صورت زیر است [۱۶]:

- اعمال الگوریتم ATWT با مقیاس z . این تبدیل یک تصویر f را در نسخه اصلی خود و C_j (ضرایب کرولت) در مقیاس 2^{j-1} تجزیه می‌کند.
- انتخاب کوچک‌ترین اندازه بلوک، Q_{min} ، در بهترین سطح مقیاس d_1 .
- برای مقیاس داده شده z ، d_j را به بلوک‌هایی که اندازه آن‌ها داده شده تقسیم‌بندی می‌کنیم.
- اعمال تبدیل رجلت به هر بلوک.

$$\sum_{j=-\infty}^{\infty} W^2(2^j r) = 1, \quad r \in \left(\frac{3}{4}, \frac{3}{2}\right) \quad (1)$$

$$\sum_{l=-\infty}^{\infty} V^2(t-l) = 1 \quad t \in \left(-\frac{1}{2}, \frac{1}{2}\right) \quad (2)$$

برای هر $j > j_0$ (که j پارامتر مقیاس است) پنجره فرکانس U_j در فضای فوریه به صورت رابطه (۳) تعریف می‌شود:

$$U_j(r, \theta) = 2^{-\frac{3j}{4}} W(2^{-j} r) V\left(\frac{2^{\frac{j}{2}} \theta}{2\pi}\right) \quad (3)$$

که $\left|\frac{j}{2}\right|$ قسمت عدد صحیح مقدار $j/2$ است. U_j پنجره سوزنی شکل قطبی نامیده می‌شود. به منظور تولید کرولت‌های با مقادیر طبیعی از نمونه متقارن رابطه (۳) استفاده می‌شود، یعنی از عبارت $U_j(r, \theta) + U_j(r, \theta + \pi)$ استفاده می‌شود.

شکل موج $\varphi_j(x)$ به وسیله تبدیل فوریه آن $\hat{\varphi}_j(\omega) = U_j(\omega)$ تعریف می‌شود. $U_j(\omega_1, \omega_2)$ پنجره‌ای است که در سیستم مختصات قطبی به وسیله رابطه (۲) تعریف می‌شود. φ_j کرولت مادر است و تمام کرولت‌ها در مقیاس 2^{-j} به وسیله دوران و انتقال کرولت مادر به دست می‌آیند. زوایای دوران به صورت $\theta_l = 2\pi \cdot 2^{-\frac{l}{2}}$ که $l = 0, 1, \dots$ و $0 < \theta_l < 2\pi$ تعریف می‌شوند و فاصله بین زوایای متوالی به مقیاس وابسته است. پارامتر انتقال نیز به صورت $k = (k_1, k_2) \in Z^2$ تعریف می‌شود. در نهایت کرولت در مقیاس 2^{-j} ، دوران θ_l و مکان $x_k^{(j,l)} = R_{\theta_l}^{-1}(k_1 2^{-j}, k_2 2^{-\frac{j}{2}})$ به صورت زیر تعریف می‌شود:

$$\varphi_{j,k,l}(x) = \varphi_j\left(R_{\theta_l}\left(x - x_k^{(j,l)}\right)\right) \quad (4)$$

که R_{θ} ماتریس دوران است و به صورت زیر تعریف می‌شود:

$$R_{\theta} = \begin{pmatrix} \cos \theta & \sin \theta \\ -\sin \theta & \cos \theta \end{pmatrix} \quad (5)$$

$$R_{\theta}^{-1} = R_{\theta}^T = R_{-\theta}$$

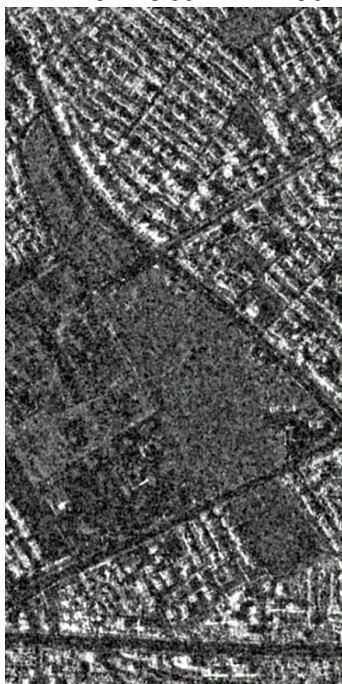
که R_{θ}^T ترانپوز ماتریس R_{θ} است. ضرایب کرولت از ضرب داخلی یک تابع $f \in L^2(R^2)$ و $\varphi_{j,k,l}$ به دست می‌آید:

^۱ Bandpass

در اینجا برای پیاده‌سازی الگوریتم از داده سنجنده Terra SAR-X برای داده SAR با قدرت تفکیک ۱ متر در پلاریزاسیون HH استفاده شده است. همچنین زمان اخذ این داده در ۳۱ دسامبر ۲۰۱۱ است. این داده به عنوان داده با رزولوشن مکانی بالا برای تلفیق به کار گرفته شده است. برای تصویر اپتیک از سه باند طیفی سنجنده آیکونوس با قدرت تفکیک ۴ متر استفاده شده است. زمان اخذ داده آیکونوس در ۲۰۱۱/۴/۱۸ است.



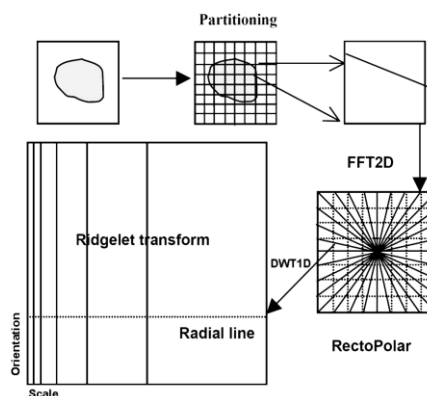
الف) تصویر سنجنده آیکونوس با قدرت تفکیک ۴ متر



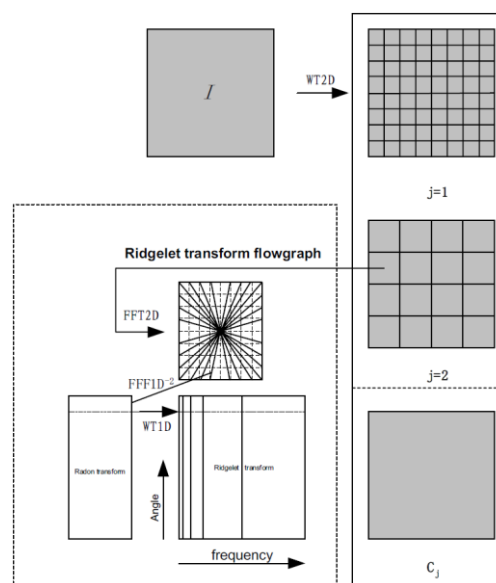
ب) تصویر سنجنده Terra SAR-X با قدرت تفکیک ۱ متر در

پلاریزاسیون HH

شکل ۳- منطقه مورد مطالعه



شکل ۱- الگوریتم تبدیل گسسته رجلت اعمال شده به بلوک‌های مربعی از تصویر [۱۶]



شکل ۲- الگوریتم اعمال تبدیل کرولت بر روی تصویر [۳]

۲-۳- ضرایب کرولت

بعد از اعمال تبدیل کرولت بر روی تصویر، ضرایب را می‌توان به سه سطح تقسیم کرد: Coarse، Detail و Fine. ضرایب فرکانس پایین به Coarse نسبت داده می‌شوند که درونی‌ترین سطح است. ضرایب فرکانس بالا به Fine نسبت داده می‌شوند که بیرونی‌ترین سطح است. ضرایب فرکانس متوسط هم به Detail نسبت داده می‌شوند [۱۷].

۳- مواد و روش‌ها

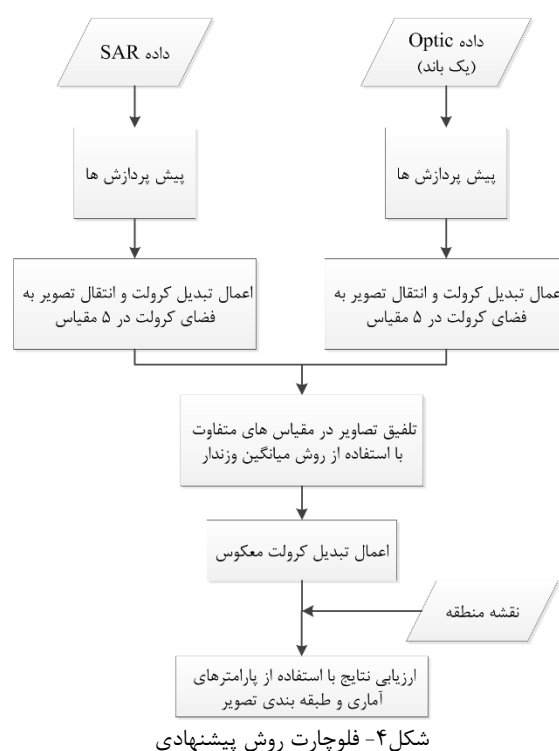
۳-۱- منطقه مورد مطالعه و داده‌ها

منطقه‌ای با مختصات جغرافیایی $52^{\circ}29'51''E$ ، $29^{\circ}37'00''N$ و $29^{\circ}37'47''N$ از شهر شیراز به عنوان منطقه مطالعاتی انتخاب شده است (شکل ۳).

۳-۲- روش و الگوریتم تلفیق پیشنهادی

در روش پیشنهادی ابتدا با استفاده از تبدیل کرولت، تصاویر SAR و اپتیک را به فضای کرولت انتقال می‌دهیم، سپس با استفاده از روش میانگین وزن‌دار در فضای کرولت تلفیق انجام می‌گردد، سپس با اعمال تبدیل کرولت معکوس تصویر تلفیق شده بدست می‌آید. برای ارزیابی نتایج از دو روش استفاده می‌کنیم. در روش اول از پارامترهای آماری برای مقایسه نتایج روش پیشنهادی با روش‌های دیگر استفاده می‌شود. در روش دوم تصویر چندطیفی و تصویر تلفیقی را طبقه‌بندی می‌کنیم تا تاثیر تلفیق به روش پیشنهادی بر میزان بهبود قدرت تفکیک مکانی بررسی شود.

فلوچارت تلفیق به روش پیشنهادی در شکل ۴ نشان داده شده است.



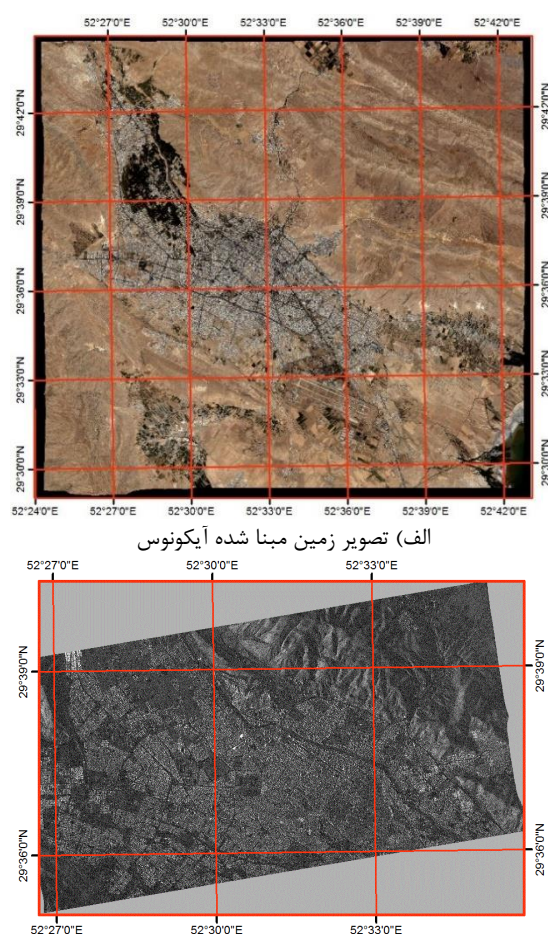
۳-۲-۱- پیش پردازش داده‌ها

پیش از آنکه هر نوع داده ورودی در اجرای الگوریتم تلفیق تصاویر وارد شود، اعمال یکسری پیش‌پردازش‌ها، به دلیل اخذ داده‌های مورد نظر در زمان‌ها و سنجنده‌های متفاوت و اختلافات تصاویر از نظر قدرت تفکیک رادیومتریکی و مکانی با یکدیگر بر روی آن‌ها ضروری است. این پیش‌پردازش‌ها

شامل هم‌مرجع‌سازی، هم‌بعدسازی پیکسل‌ها، انطباق هیستوگرام و حذف نویز می‌باشد.

انطباق هیستوگرام عمل انتقال هیستوگرام تصویر مورد نظر به بازه هیستوگرام تصویر مرجع می‌باشد. در اینجا با توجه به اینکه دو تصویر اپتیک و SAR دارای اختلاف در میزان درجات خاکستری و شدت هستند و از نظر ساختار داده متفاوت هستند، به منظور مقایسه دو تصویر در مراحل بعدی از عملیات انطباق هیستوگرام استفاده می‌شود.

یکی از مهم‌ترین مراحل پیش‌پردازش هم‌مرجع‌سازی تصاویر است. هم‌مرجع‌سازی تصاویر به این معنی است که یک پیکسل در یکی از تصاویر با مختصات تصویری مشخص دقیقاً همان عارضه زمینی را نشان دهد که تصویر متناظر نشان می‌دهد. این پردازش برای تصاویر زمین مبنا شده نیز ضروری است. با توجه به اینکه الگوریتم تلفیق مورد نظر به صورت پیکسل مبنا عمل می‌کند لازم است ابعاد پیکسل‌ها در دو تصویر یکسان باشد. در شکل ۵ تصاویر پس از پیش‌پردازش نشان داده شده است.



شکل ۵- تصاویر اپتیک و SAR پس از پیش‌پردازش

۳-۲-۲- اعمال تبدیل کرولت و ادغام در فضای کرولت

پس از پیش‌پردازش‌های مورد نیاز تصاویر ورودی را با استفاده از تبدیل کرولت به فضای کرولت در مقیاس‌ها و جهت‌های مختلف انتقال می‌دهیم. در فضای کرولت از روش میانگین وزن‌دار برای تلفیق اطلاعات تصویر در مقیاس‌ها و جهت‌های مختلف استفاده شده است. روش میانگین وزن‌دار به کار برده شده در تلفیق تصاویر به روش پیشنهادی شامل چهار مرحله کلی است [۲]:

- بدست آوردن محتوای اطلاعاتی هر پیکسل با توجه به همسایگی آن در مقیاس‌های مختلف کرولت و میزان انطباق دو پنجره متناظر در دو زیرباند متناظر در فضای کرولت. از پارامتر انرژی^۱ (رابطه ۸) برای محاسبه میزان اطلاعات مربوط به پیکسل مرکزی در پنجره مورد نظر استفاده شده است. برای تعیین میزان انطباق دو پنجره متناظر از رابطه (۹) استفاده می‌شود [۹].

$$E = \sum_{i=1}^{j=M} \sum_{i=1}^{j=N} [g_{i,j}(X)]^2 \quad (8)$$

$$\rho(X,Y) = \frac{1}{MN} \cdot \frac{\sum_{i=1}^{j=M} \sum_{i=1}^{j=N} [g_{i,j}(X) - \bar{g}(X)] \cdot [g_{i,j}(Y) - \bar{g}(Y)]}{\sqrt{D(X) \cdot D(Y)}} \quad (9)$$

که ρ میزان انطباق دو پنجره X و Y ، M و N ابعاد پنجره مورد نظر، i و j مختصات پیکسل مورد نظر، $g_{i,j}$ درجه خاکستری پیکسل‌های موجود در پنجره، $\bar{g}$ میانگین درجات خاکستری و D واریانس دو پنجره متناظر در دو مقیاس متفاوت می‌باشد.

- تعیین حد آستانه مناسب برای بدست آوردن وزن پیکسل‌های مرکزی دو پنجره متناظر

- بدست آوردن وزن هر پیکسل با توجه به حد آستانه تعیین شده و محتوای اطلاعاتی آن پیکسل. در اینجا با توجه به محتوای اطلاعاتی پیکسل مرکزی در دو زیرباند متناظر و میزان انطباق دو پیکسل متناظر در دو زیرباند از دو تصویر ورودی، وزن زیرباند اپتیک و SAR مشخص می‌شود که در اینجا دو حالت داریم:

اگر میزان انطباق دو پنجره متناظر از حد آستانه تعیین شده بیشتر بود با توجه به میزان اطلاعات دو پنجره متناظر وزن‌ها به صورت زیر بدست می‌آید:

$$W_{min} = \frac{1}{2} - 0.5 \times \left(\frac{1 - M_{I1,I2}}{1 - T} \right) \quad (10)$$

$$W_{max} = 1 - W_{min}$$

اگر میزان انطباق دو پنجره متناظر از حد آستانه تعیین شده کمتر بود داریم:

$$\begin{aligned} \text{if } S_{I1} > S_{I2} &\rightarrow W_{I1} = 1 \text{ \& } W_{I2} = 0 \\ \text{if } S_{I1} < S_{I2} &\rightarrow W_{I1} = 0 \text{ \& } W_{I2} = 1 \end{aligned} \quad (11)$$

که W_{I1} و W_{I2} به ترتیب وزن‌های پیکسل مورد نظر در تصویر اول و دوم، $M_{I1,I2}$ میزان انطباق دو پنجره متناظر و S_{I1} و S_{I2} به ترتیب میزان اطلاعات تصویر SAR و اپتیک در دو زیرباند متناظر است.

- پیکسل حاصل از تلفیق را با استفاده از رابطه (۱۲) در فضای کرولت بدست می‌آوریم و در نهایت تبدیل کرولت معکوس را اعمال می‌کنیم [۱۸].

$$Dc(m) = W_{I1}(m)D_{I1}(m) + W_{I2}(m)D_{I2}(m) \quad (12)$$

که Dc ضرایب کرولت تلفیق شده، W_{I1} و W_{I2} به ترتیب وزن‌های بدست آمده از دو تصویر با توجه به محتوای اطلاعاتی و انطباق آن‌ها، D ضرایب کرولت در تصاویر و m مختصات پیکسل مرکزی پنجره مورد نظر در مقیاس و جهت تبدیل کرولت می‌باشد. پس از بدست آوردن ضرایب تلفیق شده در فضای کرولت، تبدیل کرولت معکوس را اعمال می‌کنیم تا تصویر تلفیق شده بدست آید. از آنجائیکه اطلاعات مربوط به طیف در تصویر اپتیک مربوط به ضرایب کوچک‌تر بوده و ضرایب بزرگ‌تر شامل اطلاعات لبه و اطلاعات مکانی هستند، برای حفظ اطلاعات طیفی در تلفیق برای ضرایب خروجی در مقیاس‌های ۱ و ۲ و ۳ از اطلاعات تصویر اپتیک استفاده می‌کنیم و در مقیاس‌های ۴ و ۵ به منظور افزایش قدرت تفکیک مکانی از روش میانگین وزن‌دار برای تلفیق ضرایب استفاده می‌کنیم. در اینجا از حد آستانه ۰.۵ برای مقایسه میزان اطلاعات خروجی استفاده شده است.

^۱ Energy

۳-۲-۳- ارزیابی نتایج

ضرورت تمام روش‌های مطرح در ادغام تصاویر، حفظ یا ایجاد کمترین تغییر در الگوهای اطلاعاتی موجود در تصاویر ورودی است. در اینجا از داده چندطیفی به منظور بهره‌گیری از اطلاعات طیفی و از داده SAR به منظور بهره‌گیری از اطلاعات مکانی استفاده شد. روش‌های متفاوتی برای ارزیابی دقت کمی تلفیق وجود دارد. برای ارزیابی میزان اطلاعات موجود در تصویر تلفیق شده و میزان بهبود این تصویر نسبت به تصاویر ورودی، روش پیشنهادی به دو صورت آماری و طبقه‌بندی مورد ارزیابی و مقایسه قرار گرفت که در ادامه به آن‌ها پرداخته می‌شود. در اینجا از پارامترهای آماری انحراف معیار، ضریب همبستگی، آنتروپی، اندکس کیفیت تصویر^۱ و معیار فرکانس مکانی برای ارزیابی دقت استفاده شده است که به صورت خلاصه در ادامه توضیح داده می‌شود [۹].

- انحراف معیار: انحراف معیار میزان پراکندگی درجات خاکستری تصویر نسبت به میانگین را نشان می‌دهد. انحراف معیار بزرگ‌تر نشان دهنده اطلاعات بیشتر است [۹].

$$Std = \sqrt{\frac{1}{MN} \sum_{i=1}^M \sum_{j=1}^N [g_{i,j} - \bar{g}]^2} \quad (13)$$

که $g_{i,j}$ درجه خاکستری پیکسل (i,j) از تصویر g و $\bar{g}$ مقدار میانگین تصویر می‌باشد.

- ضریب همبستگی: ضریب همبستگی نشان دهنده رابطه (نزدیکی) تصویر X و Y می‌باشد.

$$\rho(X,Y) = \frac{\frac{1}{MN} \cdot \sum_{i=1}^M \sum_{j=1}^N [g_{i,j}(X) - \bar{g}(X)] \cdot [g_{i,j}(Y) - \bar{g}(Y)]}{\sqrt{D(X) \cdot D(Y)}} \quad (14)$$

که ρ میزان انطباق دو تصویر و D واریانس در دو تصویر متناظر می‌باشد.

- اطلاعات آنتروپی: آنتروپی میزان اطلاعات در تصویر را به ما می‌دهد و به صورت زیر بدست می‌آید [۹]:

$$H(X) = - \sum_{i=0}^{A-1} p_i \cdot \log_2(p_i) \quad (15)$$

که p_i احتمال پیکسل با درجه خاکستری i در تصویر و A درجات خاکستری تصویر می‌باشد.

- معیار فرکانس مکانی: این معیار در فضای مکانی نشان دهنده سطح محتوای کلی تصویر حاصل از ادغام است. معیار فرکانس مکانی با رابطه زیر تعریف می‌شود [۱۹].

$$SF = [RF^2 + CF^2]^{\frac{1}{2}} \quad (16)$$

در این رابطه RF و CF به ترتیب نشان دهنده فرکانس در جهت ردیف و فرکانس در جهت ستون‌هاست که با روابط ۱۷ و ۱۸ نشان داده می‌شود.

$$RF = \sqrt{\frac{1}{MN} \sum_{i=1}^M \sum_{j=2}^N [I_f(i,j) - I_f(i,j-1)]^2} \quad (17)$$

$$CF = \sqrt{\frac{1}{MN} \sum_{j=1}^M \sum_{i=2}^N [I_f(i,j) - I_f(i-1,j)]^2} \quad (18)$$

- اندکس کیفیت تصویر: اگر A و B تصویر ورودی و تلفیق شده در نظر بگیریم اندکس کیفیت تصویر از رابطه (۱۹) قابل محاسبه است [۱۱].

$$Q = \frac{\sigma_{AB}}{\sigma_A \sigma_B} \times \frac{2 \times m_A m_B}{m_A^2 + m_B^2} \times \frac{2 \times \sigma_A \sigma_B}{\sigma_A^2 + \sigma_B^2} \quad (19)$$

که σ_A و σ_B به ترتیب واریانس تصویر A و B می‌باشند و m_A و m_B به ترتیب میانگین درجات خاکستری تصاویر A و B می‌باشد.

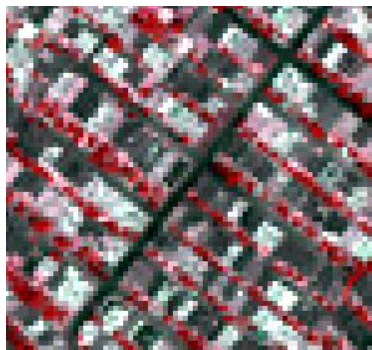
با توجه به اینکه دقت طبقه‌بندی به میزان اطلاعات طیفی و مکانی تصویر بستگی دارد و هرچه این دو پارامتر بهتر باشد، دقت طبقه‌بندی افزایش می‌یابد، به منظور ارزیابی تأثیر تلفیق در توان تفکیک طیفی و مکانی، تصویر خروجی را طبقه‌بندی می‌کنیم و دقت طبقه‌بندی را مورد ارزیابی قرار می‌دهیم. با استفاده از داده‌های تست ماتریس خطا تشکیل داده می‌شود و دقت طبقه‌بندی بر مبنای دو معیار ارزیابی، ضریب کاپا^۲ و دقت کلی مطابق با روابط زیر محاسبه می‌شود.

$$\text{Kappa Coefficient} = \frac{N \sum_{k=1}^q n_{kk} - \sum_{k=1}^q n_{k+n+k}}{n^2 - \sum_{k=1}^q n_{k+n+k}} \quad (20)$$

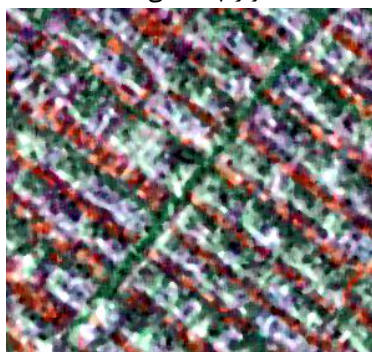
^۲ Kappa Coefficient

^۱ Universal Image Quality Index

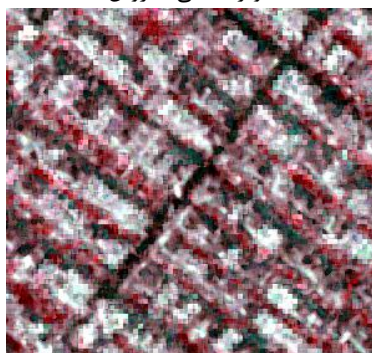
در این بخش دو روش IHS و موجک پیاده سازی و اجرا شد و نتایج آن ها با روش پیشنهادی، جهت ارزیابی روش پیشنهادی مقایسه شد. نتایج آماری حاصل از ادغام در روش IHS، موجک و الگوریتم پیشنهادی در جدول ۱ آمده است.



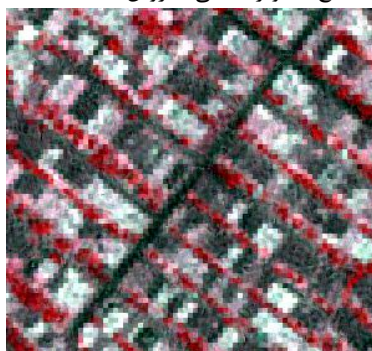
الف) تصویر چندطیفی IKONOS



ب) تصویر تلفیقی به روش IHS



ج) تصویر تلفیقی به روش wavelet



د) تصویر تلفیقی به روش پیشنهادی

شکل ۶- تصاویر ورودی و ادغام شده به روش های مختلف

$$\text{Overall Accuracy} = \frac{\sum_{k=1}^q n_{kk}}{N} \times 100 \quad (21)$$

که در اینجا N تعداد کل داده های تست، q تعداد کلاس ها، n_{k+} تعداد پیکسل هایی که متعلق به کلاس K بوده و به کلاس های دیگر تعلق گرفته است. n_{+k} تعداد پیکسل هایی که متعلق به کلاس های غیر k بوده و به کلاس k تعلق گرفته است. n_{kk} تعداد پیکسل هایی که درست طبقه بندی شده است.

۴- نتایج و بحث

در ابتدا تصویر چندطیفی آیکونوس با قدرت تفکیک ۴ متر را با استفاده از نرم افزار ENVI به تصویر با قدرت تفکیک یک متر تبدیل می کنیم. برای حذف اسپیکل^۱ تصویر SAR از فیلتر میانه با ابعاد پنجره 5×5 در نرم افزار NEST استفاده شد. همچنین برای هم مرجع سازی تصاویر SAR و اپتیک از نرم افزار ENVI با شش نقطه متناظر در سطح تصویر با دقت ۱،۲ پیکسل استفاده شد. قبل از اعمال تبدیل کرولت بر روی تصاویر، هیستوگرام تصویر SAR بر تصویر چندطیفی منطبق شده است.

پس از پیش پردازش های مورد نیاز تصاویر ورودی را به فضای کرولت در مقیاس ها و جهت های مختلف انتقال می دهیم. سپس محتوای اطلاعاتی و انطباق دو پنجره متناظر را محاسبه و با استفاده از حد آستانه انتخابی (که در اینجا ۰،۵ در نظر گرفته شده) در فضای کرولت از روش میانگین وزن دار، ضرایب کرولت را ادغام و سپس تبدیل کرولت معکوس را اعمال می کنیم. ابعاد پنجره برای محاسبه محتوای اطلاعاتی و انطباق، 3×3 در نظر گرفته شد. برخی از قسمت های خروجی این روش در شکل ۶ نشان داده شده است. با مقایسه بصری دو تصویر ورودی و خروجی الگوریتم شاهد بهبود تصویر خروجی هستیم.

در این تحقیق روش پیشنهادی به دو صورت مورد ارزیابی قرار گرفته است. در حالت اول تصویر تلفیقی بر اساس محاسبه معیارهای کمی مورد ارزیابی قرار گرفت. در حالت دوم، به منظور ارزیابی تأثیر تلفیق بر دقت طبقه بندی، تصویر تلفیقی به روش پیشنهادی با داده SAR و چندطیفی و همچنین، تصویر آیکونوس، طبقه بندی شدند و تغییرات دقت طبقه بندی مورد بررسی قرار گرفت. از روش SVM^۲ برای طبقه بندی تصاویر و مقایسه نتایج استفاده شد.

^۱ Speckle

^۲ Support Vector Machine

جدول ۱- نتایج بدست آمده حاصل از تلفیق به روش پیشنهادی و روش های مقایسه ای

ضریب همبستگی	کیفیت تصویر	فیلتر مکان	اطلاعات آنتروپی	انحراف معیار	
-	-	2.006853	4.013372	4.29362	SAR
-	-	104.1871	9.723795	252.5217	IKONS
-	-	66.81476	9.08735	165.6126	
-	-	111.501	9.636838	206.1534	
0.529172	0.524027	96.23738	9.702248	219.5403	IHS
0.231751	0.228279	96.57163	9.574979	196.4156	
0.417911	0.417627	108.7144	9.758669	212.0609	
0.745142	0.735998	122.9668	9.778584	225.7522	WAVELET
0.748617	0.74132	79.66332	9.157621	149.5198	
0.676444	0.650131	111.9993	9.30855	157.2819	
0.882293	0.881264	124.8054	10.0248	265.0171	CURVELET
0.882946	0.881837	80.39332	9.40869	174.129	
0.898	0.897703	123.7665	9.738201	211.5193	

IHS و wavelet است. با توجه به معیارهای آماری برای ارزیابی نتایج تلفیق، شاهد افزایش دقت مکانی و حفظ حداکثری اطلاعات طیفی در تصویر تلفیقی به روش پیشنهادی نسبت به داده های ورودی و روش های دیگر تلفیق هستیم.

با طبقه بندی تصویر اپتیک ورودی و تصویر تلفیقی شاهد بهبود ۴ درصدی دقت کلی طبقه بندی و افزایش ۰,۰۵ ضریب کاپا نسبت به تصویر ورودی است. برای طبقه بندی از سه کلاس راه، ساختمان و فضای سبز به عنوان عوارض موجود در تصویر استفاده شد. به منظور ارزیابی دقت طبقه بندی، از ۱۵۰۰ پیکسل به عنوان نقاط چک استفاده شد. بدین ترتیب که این پیکسل ها با نقشه ی $\frac{1}{2000}$ منطقه مقایسه و نتایج حاصل از طبقه بندی دو تصویر اولیه و تلفیقی در جدول ۲ و شکل ۷ نشان داده شده است.

جدول ۲- الف) دقت کلی طبقه بندی تصویر چندطیفی

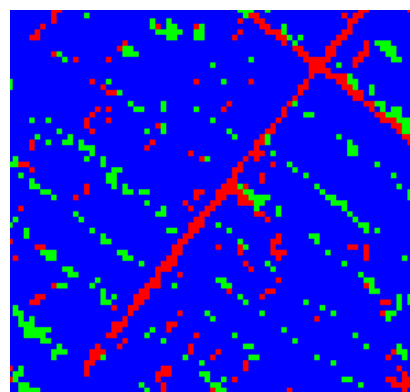
پوشش گیاهی	ساختمان	راه	کلاس
16.6	2.4	58.27	راه
0	82.58	0.24	ساختمان
83.4	15.2	41.49	پوشش گیاهی
74.76			دقت کلی
0.6106			ضریب کاپا

جدول ۲- ب) دقت کلی طبقه بندی تصویر تلفیقی به روش پیشنهادی

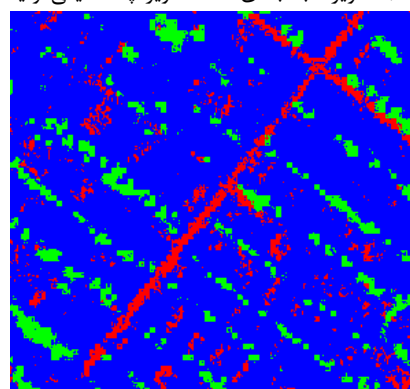
پوشش گیاهی	ساختمان	راه	کلاس
11.54	4.5	61.39	راه
0	85.59	0	ساختمان
88.46	9.91	38.61	پوشش گیاهی
78.62			دقت کلی
0.6705			ضریب کاپا

با توجه به جدول ۱ پارامترهای انحراف معیار و آنتروپی به صورت نسبی نشان از برتری روش پیشنهادی نسبت به روش تلفیق IHS و wavelet دارد. مقدار میانگین انحراف معیار در تصاویر آیکونوس، IHS، wavelet و الگوریتم پیشنهادی به ترتیب برابر ۲۰۸، ۲۰۹، ۱۷۷ و ۲۱۶ است که نشان دهنده محتوای اطلاعاتی بالاتر تلفیق با استفاده از تبدیل کرولت است. در پارامتر آنتروپی نیز روش پیشنهادی با میانگین آنتروپی ۹,۷ دارای نتیجه بهتری نسبت به روش تلفیق با استفاده از روش های دیگر می باشد. در معیار فرکانس مکانی تصویر چندطیفی اولیه و تلفیقی به روش های IHS، wavelet و کرولت به ترتیب دارای مقادیر ۹۴,۱، ۱۰۰,۵، ۱۰۴,۸ و ۱۰۹,۶ می باشد که نشان دهنده سطح اطلاعات مکانی بالاتر تصویر تلفیقی به روش پیشنهادی می باشد. در دو معیار کیفیت تصویر و ضریب همبستگی نیز شاهد بهبود نتایج حاصل از روش پیشنهادی هستیم. میانگین معیار کیفیت تصویر ۰,۸۸ برای تبدیل کرولت در مقابل ۰,۳۸ و ۰,۷ به ترتیب برای روش های IHS و wavelet نشان از کارایی تلفیق به روش کرولت از منظر این معیار می باشد. در ضریب همبستگی با توجه به اینکه تصویر شدت تبدیل IHS با تصویر SAR جایگزین شده است، تشابه زیادی در باندهای تصویر خروجی و تصویر SAR وجود دارد اما با باندهای تصویر آیکونوس همبستگی خیلی کمی دارد که با توجه شکل ۶ تصویر تلفیقی به روش IHS طیف را به شدت تحت تأثیر نامطلوب قرار داده است. در الگوریتم پیشنهادی ضریب همبستگی نسبتاً مناسبی با تصویر آیکونوس وجود دارد که نشان دهنده عملکرد بهتر این الگوریتم نسبت به تبدیل

طیفی از تصویر چندطیفی و افزایش اطلاعات مکانی در تصویر تلفیقی با استفاده از تصویر SAR است. روش پیشنهادی بر روی داده‌هایی از تصاویر سنجنده‌های Terra SAR-X و آیکونوس برای منطقه‌ای از شیراز پیاده‌سازی شد. در روش پیشنهادی پس از پیش‌پردازش‌های مورد نیاز تصاویر را به فضای کرولت انتقال داده و سپس با استفاده از میانگین وزن‌دار ضرایب کرولت را ادغام و با اعمال تبدیل کرولت معکوس، تصویر حاصل از ادغام بدست آمد. با مقایسه تصاویر ورودی و نتایج حاصل‌شده از روش پیشنهادی می‌توان دریافت که به ازای حفظ اطلاعات طیفی، اطلاعات مکانی نیز بهبود یافته است. از دو روش آماری و طبقه‌بندی برای ارزیابی نتایج تلفیق روش پیشنهادی مورد استفاده قرار گرفت. از روش تلفیق با استفاده از تبدیل IHS و wavelet برای مقایسه نتایج روش تلفیق پیشنهادی استفاده شد. با مقایسه بصری تصویر خروجی حاصل از روش پیشنهادی و دو روش IHS و wavelet می‌توان مشاهده کرد که روش پیشنهادی دارای اعوجاج طیفی بسیار کمتری نسبت به دو روش دیگر است. با توجه به نتایج آماری تلفیق و مقایسه روش پیشنهادی با روش‌های دیگر، می‌توان دریافت که در روش پیشنهادی، اطلاعات خروجی بیشتری حاصل شده است. دقت طبقه‌بندی به میزان اطلاعات طیفی و مکانی تصویر بستگی دارد و هرچه این دو پارامتر بهتر باشد، دقت طبقه‌بندی افزایش می‌یابد. به منظور بررسی تأثیر تلفیق به روش پیشنهادی بر روی قدرت تفکیک طیفی و مکانی، از طبقه‌بندی تصویر تلفیقی استفاده شد و از طبقه‌بندی کننده SVM استفاده شد که شاهد بهبود ۴ درصدی در دقت طبقه‌بندی و ۰,۰۵ در ضریب کاپا نسبت به تصویر ورودی هستیم. با توجه به نتایج بدست آمده می‌توان گفت که روش پیشنهادی، روشی مناسب برای تلفیق تصاویر SAR و اپتیک است.



الف) تصویر طبقه‌بندی شده تصویر چند طیفی اولیه



ب) تصویر طبقه‌بندی شده با روش تلفیق پیشنهادی

شکل ۷- نتایج حاصل از طبقه‌بندی تصویر چندطیفی ورودی و تلفیق شده به روش پیشنهادی

با توجه به اینکه دقت طبقه‌بندی به میزان اطلاعات طیفی و مکانی تصویر بستگی دارد و مقایسه نتایج بدست آمده از طبقه‌بندی تصویر چندطیفی و تصویر تلفیقی به روش پیشنهادی می‌توان دریافت در روش ارائه شده اطلاعات مکانی افزایش یافته و همچنین اطلاعات طیفی نیز دارای اعوجاج کمی بوده است.

۵- نتیجه‌گیری

در این مقاله الگوریتم تلفیق تصاویر SAR و اپتیک در فضای ضرایب کرولت با استفاده از روش میانگین وزن‌دار پیشنهاد داده شد. هدف از تلفیق حفظ حداکثری اطلاعات

مراجع

- [1] C. Pohl and J. L. Van Genderen, "Review article multisensor image fusion in remote sensing: concepts, methods and applications," International journal of remote sensing, vol. 19, pp. 823-854, 1998.
- [2] F. Kazemi, "Change Detection Approaches by Using Optical and SAR Images," Faculty of Geodesy and Geomatics, K.N.TOOSI UNIVERSITY OF TECHNOLOGY 2013.
- [3] M. Xiao, Z. He, and Y. Jia, "Fusion of multisensor images based on the curvelet transform," in Geoinformatics 2007, 2007, pp. 675200-675200-9.

- [4] O. A. Pappas, A. M. Achim, and D. R. Bull, "Curvelet fusion of panchromatic and SAR satellite imagery using fractional lower order moments," in *Advanced Video and Signal Based Surveillance (AVSS)*, 2013 10th IEEE International Conference on, 2013, pp. 342-346.
- [5] J. Zhang, "Multi-source remote sensing data fusion: status and trends," *International Journal of Image and Data Fusion*, vol. 1, pp. 5-24, 2010.
- [6] E. Candes, L. Demanet, D. Donoho, and L. Ying, "Fast discrete curvelet transforms," *Multiscale Modeling & Simulation*, vol. 5, pp. 861-899, 2006.
- [7] X. Zhanga, P. Huang, and P. Zhou, "Data fusion of multiple polarimetric SAR images based on combined curvelet and wavelet transform," in *Synthetic Aperture Radar, 2007. APSAR 2007. 1st Asian and Pacific Conference on*, 2007, pp. 225-228.
- [8] L. Dong, Q. Yang, H. Wu, H. Xiao, and M. Xu, "High quality multi-spectral and panchromatic image fusion technologies based on Curvelet transform," *Neurocomputing*, vol. 159, pp. 268-274, 2015.
- [9] L. Ying, X. Xing, B. Ben-Du, and Z. Yan-ning, "Remote sensing image fusion based on fast discrete curvelet transform," in *Machine Learning and Cybernetics, 2008 International Conference on*, 2008, pp. 106-109.
- [10] C. Xuefeng and N. Lei, "Study on the Multi-Focus Image Fusion Based on Combined Opportunity Curvelet and Wavelet Transform," *Journal of Convergence Information Technology*, vol. 7, 2012.
- [11] A. G. Mahyari and M. Yazdi, "A novel image fusion method using curvelet transform based on linear dependency test," in *Digital Image Processing, 2009 International Conference on*, 2009, pp. 351-354.
- [12] E. J. Candès and D. L. Donoho, "Continuous curvelet transform: I. Resolution of the wavefront set," *Applied and Computational Harmonic Analysis*, vol. 19, pp. 162-197, 9// 2005.
- [13] E. J. Candes and D. L. Donoho, "Continuous curvelet transform: II. Discretization and frames," *Applied and Computational Harmonic Analysis*, vol. 19, pp. 198-222, 2005.
- [14] S. E. Jero, P. Ramu, and S. Ramakrishnan, "ECG steganography using curvelet transform," *Biomedical Signal Processing and Control*, vol. 22, pp. 161-169, 2015.
- [15] S. Li and B. Yang, "Multifocus image fusion by combining curvelet and wavelet transform," *Pattern Recognition Letters*, vol. 29, pp. 1295-1301, 2008.
- [16] F. Nencini, A. Garzelli, S. Baronti, and L. Alparone, "Remote sensing image fusion using the curvelet transform," *Information Fusion*, vol. 8, pp. 143-156, 2007.
- [17] Y. Li, Q. Yang, and R. Jiao, "Image compression scheme based on curvelet transform and support vector machine," *Expert Systems with Applications*, vol. 37, pp. 3063-3069, 2010.
- [18] P. J. Burt and R. J. Kolczynski, "Enhanced image capture through fusion," in *Computer Vision, 1993. Proceedings., Fourth International Conference on*, 1993, pp. 173-182.
- [19] F. Samazadegan, F. Tabib Mahmoudi, and B. Bigdeli, *Data Fusion In Remot Sensing concept & techniques*: University of Tehran Press, 2014.