

# تلفیق تصاویر SAR و اپتیک با استفاده از تبدیل کرولت

محمد شکری<sup>۱</sup>، محمود رضا صاحبی<sup>۲</sup>

۱. دانشجوی کارشناسی ارشد سنجش از دور، دانشکده مهندسی ژئودزی و ژئوماتیک، دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی

[m.shokri70@gmail.com](mailto:m.shokri70@gmail.com)

۲. استادیار گروه فتوگرامتری و سنجش از دور، دانشکده مهندسی ژئودزی و ژئوماتیک، دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی

[sahebi@kntu.ac.ir](mailto:sahebi@kntu.ac.ir)

## چکیده

تصاویر رادار روزنه مصنوعی (SAR) و اپتیک هرکدام دارای نقاط قوت و ضعفی هستند که باعث به کارگیری هم‌زمان این دو نوع داده برای بهره‌مندی از مزایا و پوشش ضعف‌های آنها شده است. تبدیل کرولت<sup>۱</sup> در آنالیز لبه‌های منحنی شکل و دقت بالا در تقریب جهت‌ها، مناسب‌تر از تبدیل‌های دیگر برای تلفیق تصاویر است. در این مقاله با استفاده از تبدیل کرولت، تصاویر SAR و اپتیک را به فضای کرولت انتقال می‌دهیم، سپس با میانگین وزن‌دار در فضای کرولت تلفیق را انجام می‌دهیم. در نهایت با اعمال تبدیل کرولت معکوس تصویر تلفیق شده بدست می‌آید. در نتایج بدست آمده میانگین انحراف معیار تصاویر آیکونوس و تلفیق شده به ترتیب برابر ۲۲۸,۷۶ و ۲۴۴,۴۹ است که مبین اطلاعات بیشتر در تصویر حاصل از ادغام است. از ضرورت‌های ادغام، ایجاد کمترین تغییرات در اطلاعات تصاویر ورودی است که روش پیشنهادی دارای میانگین ضریب همبستگی ۰,۷۵ است که نشان دهنده مناسب بودن الگوریتم پیشنهادی برای تلفیق تصاویر است.

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

## ۱- مقدمه

تصاویر سنسورهای مختلف به تنهایی اطلاعات غیر کاملی را ارائه می‌دهند. سیستم‌های اپتیک، نور بازتابی خورشید از سطح زمین را در طیف مرئی و مادون قرمز امواج الکترومغناطیس ثبت می‌کند. با وجود اینکه داده‌های چند طیفی<sup>۳</sup> اطلاعات غنی طیفی را از اشیا به ما می‌دهد، اما به طور قابل توجهی تحت تاثیر دود، مه، ابر و میزان نور خورشید قرار می‌گیرد. بر خلاف سنسورهای اپتیک، سنسورهای SAR در همه نوع شرایط آب و هوایی توانایی تصویربرداری دارند. داده‌های SAR می‌توانند اطلاعات غنی از بافت و ساختار ارائه داده و به مولفه‌های شکل، جهت، زبری و رطوبت از اشیا روی زمین حساس است. بنابراین ترکیب خصوصیات مختلف از تصاویر اپتیک و داده‌های SAR با استفاده از تکنیک‌های

<sup>1</sup>Synthetic aperture radar

<sup>2</sup>Curvelet transform

<sup>3</sup>Multispectral

تلفیق تصویر، می‌تواند یک دید کاملتر از تارگت مورد نظر به ما دهد و دقت و اعتمادپذیری بالاتری برای نتیجه‌های بدست آمده از این روش ارائه دهد [۳, ۱].

در سال‌های اخیر الگوریتم‌های ادغام بر اساس ابزار تجزیه و تحلیل چندمقیاسی اهمیت زیادی پیدا کرده است. تبدیل کرولت توسط Candès و همکاران در سال ۱۹۹۹ 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 موثرتر از تبدیل‌های سنتی ارائه می‌دهد. تبدیل کرولت، در آنالیز لبه‌های منحنی شکل و دقت بالا در تقریب و توصیف پراکنندگی‌ها و جهت‌ها، در مقایسه با تبدیل‌های دیگر برای تلفیق تصاویر مناسب‌تر است. تبدیل موجک گسسته<sup>۱</sup> (DWT) و تبدیل موجک "à trous"<sup>۲</sup> (ATWT) مناسب‌ترین ابزار برای تلفیق تصاویر است. تبدیل کرولت از این دو ابزار برای تلفیق تصاویر استفاده می‌کند [۳].

بر طبق تحقیقات انجام شده توسط محققان مختلف، این تبدیل نتایج بهتری را 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 اعتماد پذیری بالاتری هستند [۳].

هدف در این مقاله تلفیق تصاویر SAR و اپتیک با استفاده از میانگین وزن‌دار در فضای کرولت است. در بخش ۲ این مقاله توضیحاتی در مورد تبدیل کرولت و نحوه پیاده‌سازی آن آورده شده است. در بخش ۳ الگوریتم پیشنهادی توضیح داده شده است. در بخش ۴ داده‌های مورد استفاده و پیاده‌سازی روش پیشنهادی و نتایج الگوریتم بر روی داده‌های ورودی به صورت مقایسه‌ای آورده شده و در بخش آخر نیز نتیجه‌گیری کلی از روش پیشنهادی آورده شده است.

## ۲- تبدیل کرولت

تبدیل کرولت یک عضو جدید خانواده تبدیل چندمقیاسی<sup>۳</sup> است که در چند سال گذشته برای بهبود ضعف‌های نماینده‌های سنتی تبدیل چندمقیاسی مانند موجک توسعه یافته است. به صورت مفهومی تبدیل کرولت یک هرم چندمقیاسی با تعداد زیادی جهت و موقعیت‌ها در هر مقیاس طول و المان‌های سوزن شکل<sup>۴</sup> در مقیاس خوب است. اگرچه این هرم از نوع غیر استاندارد است [۴].

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 [۴-۸]:

- بهینه‌سازی نمایش اشیاء دارای لبه با کمترین خطا
- این تبدیل ضعف‌های تبدیل موجک، در توصیف خواص جهت از تصویر لبه را بر طرف کرده است و این تبدیل می‌تواند به طور مناسب با انواع ویژگی‌های تصویر سازگار شود.

---

<sup>۱</sup>discrete wavelet transform

<sup>۲</sup>à trous wavelet transform

<sup>۳</sup>Multiscale

<sup>۴</sup>needle-shaped

- 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  $\varphi$  و آنالیز سیگنال و تصویر از طریق انتقال، مقیاس و دوران کرولت پایه است. در فضای کرولت  $x$  متغیر مکان،  $\omega$  متغیر حیطه فرکانس و  $r$  و  $\theta$  مختصات قطبی در حیطه فرکانس است. فرآیند تبدیل با دو پنجره  $W(r)$  و  $V(t)$  آغاز می‌شود؛ که به ترتیب پنجره شعاعی و پنجره زاویه ای نامیده می‌شوند. این توابع نرم و نامنفی هستند که مقادیر حقیقی می‌گیرند. دامنه  $W$  مقادیر حقیقی مثبت در بازه  $r \in (\frac{1}{\sqrt{2}}, \sqrt{2})$  و دامنه  $V$  مقادیر حقیقی در بازه  $[-1, 1]$  است. این توابع همیشه در شرایط زیر صدق می‌کنند [۶]:

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

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

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

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

که  $\left[\frac{j}{\sqrt{2}}\right]$  قسمت عدد صحیح مقدار  $j/2$  است.  $U_j$  پنجره سوزنی شکل قطبی نامیده می‌شود. به منظور تولید کرولت های با مقادیر طبیعی از نمونه متقارن رابطه (۳-۳) 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.  $U_j(\omega_1, \omega_2)$  پنجره ای است که در سیستم مختصات قطبی به وسیله رابطه (۳-۳) تعریف می‌شود.  $\varphi_j$  کرولت مادر است و تمام کرولت ها در مقیاس  $2^{-j}$  به وسیله دوران و انتقال کرولت مادر به دست می‌آیند. زوایای دوران به صورت  $l = \theta_l = 2\pi \cdot 2^{-l}$  که  $l = \dots, 1, 0$  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  $\theta_l$  و مکان  $x_k^{(j,l)} = R_{\theta_l}^{-1}(k_1 2^{-j}, k_2 2^{-j})$  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  $R_{\theta}$  ماتریس دوران است و به صورت زیر تعریف می‌شود:

$$R_{\theta}^{-1} = R_{\theta}^T = R_{-\theta} R_{\theta} = \begin{pmatrix} \cos \theta & \sin \theta \\ -\sin \theta & \cos \theta \end{pmatrix} \quad (5)$$

ضرایب کرولت از ضرب داخلی یک تابع  $f \in L^2(R^2)$  و  $\varphi_{j,k,l}$  به دست می‌آید:

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

رابطه معکوس نیز به صورت زیر است:

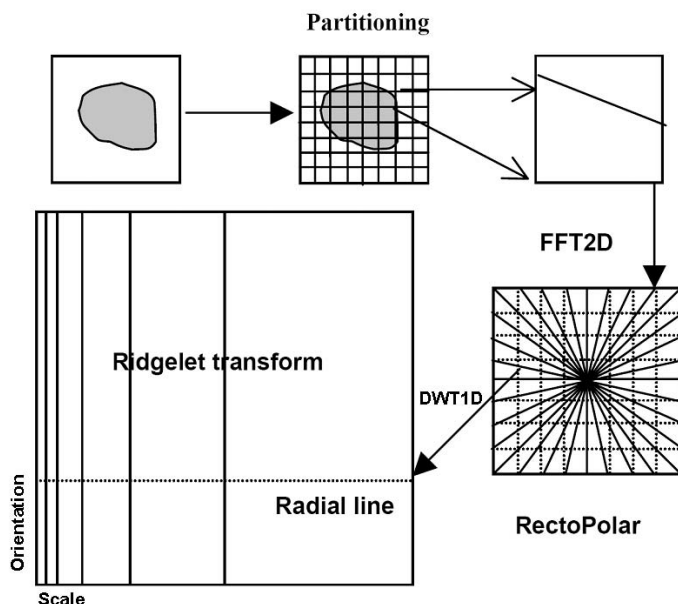
$$f = \sum_{j,k,l} \langle f, \varphi_{j,k,l} \rangle \varphi_{j,k,l} \quad (7)$$

## ۲-۲- تبدیل کرولت دیجیتال

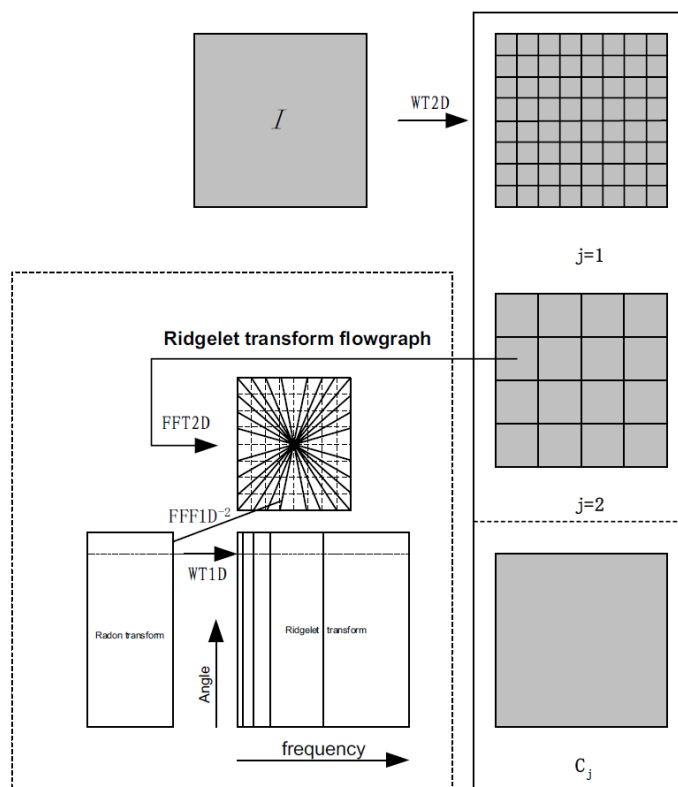
از ویژگی‌های اصلی تبدیل کرولت حساسیت آن به جهت و لبه‌ها و توانایی ارائه جزئیات بالاگذر از لبه‌های اشیا در مقیاس‌های مختلف از طریق ضرایب پراکنده غیر صفر است [۳]. بر روی تبدیل کرولت دو تجدید نظر کلی انجام شده است. در تبدیل کرولت اولیه از یک سری مراحل پیچیده شامل تجزیه و تحلیل تبدیل رجلت تصادفی از یک تصویر 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 نامسای 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 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 [۱۰]:

- اعمال الگوریتم ATWT با مقیاس  $z$ . این تبدیل یک تصویر  $f$  را در نسخه اصلی خود و  $Cz$  (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  $z$ ،  $d_z$  را به بلوک‌هایی که اندازه آنها داده شده تقسیم بندی می‌کنیم.
- اعمال تبدیل رجلت به هر بلوک.



شکل ۱. فلوجارت تبدیل گسسته رجلت اعمال شده به بلوک‌های مربعی از تصویر [۳]



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

### ۳- الگوریتم تلفیق با استفاده از تبدیل کرولت

#### ۳-۱- پیش پردازش داده‌ها

پیش از آنکه هر نوع داده ورودی در اجرای الگوریتم تلفیق تصاویر وارد شود، اعمال یکسری پیش پردازش‌ها، 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، هم‌بعد سازی پیکسل‌ها، انطباق هیستوگرام و حذف نویز می‌باشد. برای حذف نویز تصویر SAR از فیلتر میان‌ه با ابعاد پنجره  $5 \times 5$  استفاده شد. قبل از اعمال تبدیل کرولت بر روی تصاویر، عملیات تطبیق هیستوگرام بر روی تصویر SAR به مرجعیت تصویر اپتیک انجام شد.

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

پس از پیش‌پردازش‌های مورد نیاز تصویر را به فضای کرولت در مقیاس‌ها و جهت‌های مختلف انتقال می‌دهیم. در فضای کرولت از روش میانگین وزن‌دار برای تلفیق استفاده می‌کنیم. روش میانگین وزن‌دار به کار برده شده شامل سه 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. از واریانس برای محاسبه میزان اطلاعات مربوط

به پیکسل مرکزی در پنجره مورد نظر استفاده شده است. برای تعیین میزان انطباق دو پنجره متناظر از فرمول (۸) استفاده می‌شود [۹].

$$\rho(X, Y) = \frac{\frac{1}{MN} \cdot \sum_{i=1}^M \sum_{j=1}^N [g_{i,j}(X) - \bar{g}(X)] \cdot [g_{i,j}(Y) - \bar{g}(Y)]}{\sqrt{D(X) \cdot D(Y)}} \quad (8)$$

که  $\rho$  میزان انطباق دو پنجره  $X$  و  $Y$ ،  $M$  و  $N$  ابعاد پنجره 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 تعیین وزن پیکسل‌های مرکزی دو پنجره متناظر
- بدست آوردن وزن هر پیکسل با توجه به حد آستانه تعیین شده و محتوای اطلاعاتی آن پیکسل و محاسبه پیکسل حاصل از تلفیق با استفاده از رابطه (۹) در فضای کرولت را بدست می‌آوریم و در نهایت تبدیل کرولت معکوس را اعمال می‌کنیم [۱۱].

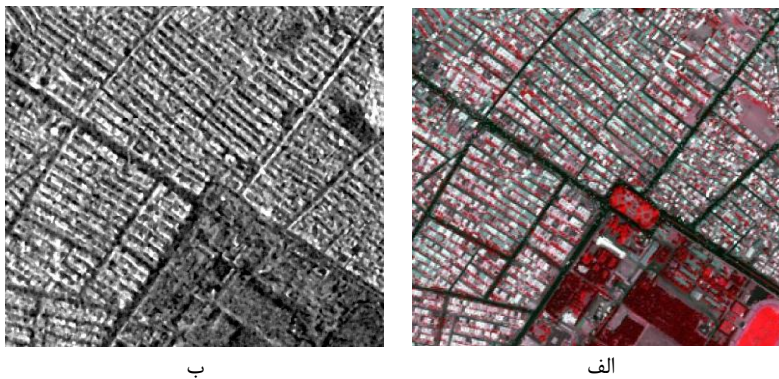
$$Dc(m) = W_{I1}(m)D_{I1}(m) + W_{I2}(m)D_{I2}(m) \quad (9)$$

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.

#### ۴- نتایج و بحث و بررسی

##### ۴-۱- منطقه مورد مطالعه و داده‌ها

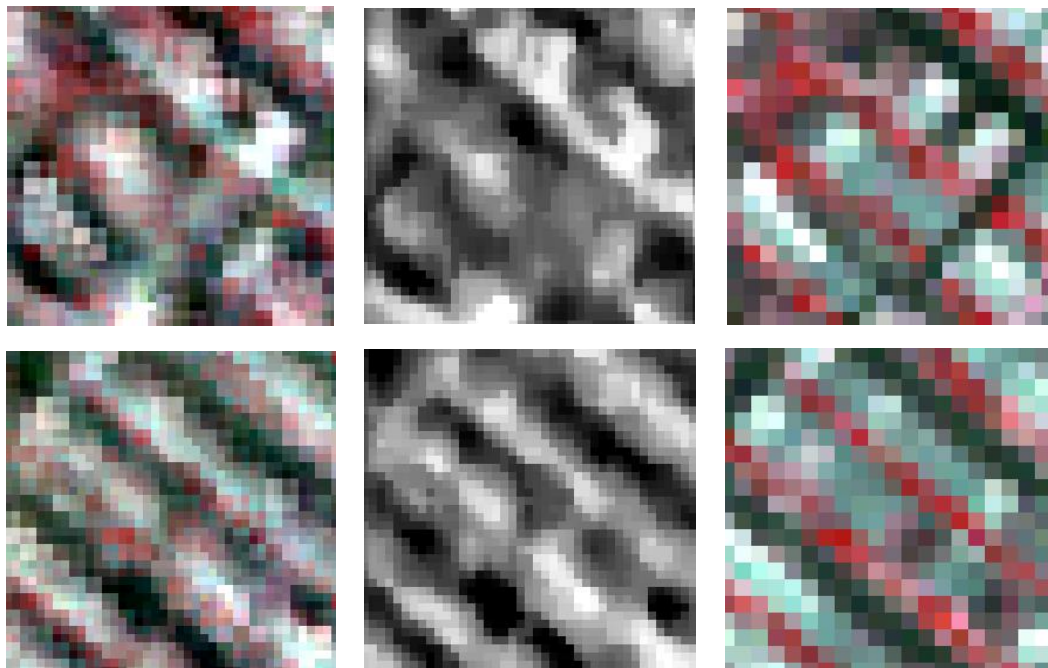
منطقه‌ای با مختصات جغرافیایی  $52^{\circ}31'25''N, 29^{\circ}36'27''N$  از شهر شیراز به عنوان منطقه مطالعاتی انتخاب شده است. در اینجا برای پیاده سازی الگوریتم از داده سنجنده Terra SAR-X برای داده SAR با قدرت تفکیک ۲ متر در پلاریزاسیون VV استفاده شده است. این داده به عنوان داده با رزولوشن مکانی بالا برای تلفیق به کار گرفته شده است. برای تصویر اپتیک از سه باند طیفی سنجنده آیکونوس با قدرت تفکیک ۴ متر استفاده شده است.



شکل ۳. الف تصویر چند طیفی آیکونوس ب) تصویر SAR

## ۴-۲- تلفیق با الگوریتم پیشنهادی

پس از پیش‌پردازش‌های مورد نیاز تصاویر ورودی را به فضای کرولت در مقیاس‌ها و جهت‌های مختلف انتقال می‌دهیم. سپس محتوای اطلاعاتی و انطباق دو پنجره متناظر را محاسبه و با استفاده از حد آستانه انتخابی در فضای کرولت از روش میانگین وزن‌دار، ضرایب کرولت را ادغام و سپس تبدیل کرولت معکوس را اعمال می‌کنیم. ابعاد پنجره برای محاسبه محتوای اطلاعاتی و انطباق،  $3 \times 3$  در نظر گرفته شد. برخی از قسمت‌های خروجی این روش در شکل ۴ نشان داده شده است. با مقایسه بصری دو تصویر ورودی و خروجی الگوریتم شاهد بهبود تصویر خروجی هستیم.



شکل ۴. الف) تصویر چندطیفی آیکونوس (ب) تصویر SAR (ج) تصویر حاصل از ادغام

## ۴-۳- ارزیابی نتایج

ضرورت تمام روش‌های مطرح در روش‌های ادغام تصاویر، حفظ یا ایجاد کمترین تغییر در الگوهای اطلاعاتی موجود در تصاویر ورودی است. روش‌های متفاوتی برای ارزیابی دقت کمی تلفیق وجود دارد که در اینجا از پارامترهای آماری انحراف معیار، ضریب همبستگی و انتروپی برای ارزیابی دقت استفاده شده است [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].

$$Std = \sqrt{\frac{1}{MN} \sum_{i=1}^{j=1} \sum_{i=1}^{j=1} [g_{i,j} - \bar{g}]^2} \quad (10)$$

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.

$$\rho(X, Y) = \frac{\frac{1}{MN} \cdot \sum_{i=1}^j \sum_{i=1}^j [g_{i,j}(X) - \bar{g}(X)] \cdot [g_{i,j}(Y) - \bar{g}(Y)]}{\sqrt{D(X) \cdot D(Y)}} \quad (11)$$

که  $\rho$  میزان انطباق دو تصویر و  $D$  واریانس در دو تصویر متناظر می‌باشد.

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

$$H(X) = - \sum_{i=0}^{A-1} p_i \cdot \log_2(p_i) \quad (12)$$

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

نتایج کمی حاصل از ادغام در دو روش IHS و الگوریتم پیشنهادی در جدول ۱ آمده است.

جدول ۱. نتایج حاصل از ادغام در روش IHS و الگوریتم پیشنهادی

		انحراف میار	اطلاعات انتروپی	ضریب همبستگی (SAR)	ضریب همبستگی (IKONOS)
تصویر SAR		4.57	4.21		
IKONOS	Band1	265.14	9.94		
	Band2	183.57	9.36		
	Band3	237.59	9.83		
IHS	Band1	242.80	9.88	0.9514	0.4930
	Band2	218.02	9.73	0.9401	0.2207
	Band3	237.01	9.88	0.8741	0.4355
FDCT	Band1	283.37	10.13	0.7879	0.7453
	Band2	198.86	9.59	0.7836	0.7374
	Band3	251.25	9.99	0.7122	0.7542

#### ۴-۴- بحث و بررسی

از روش تلفیق با استفاده از تبدیل IHS برای مقایسه نتایج روش تلفیق پیشنهادی استفاده شد. با توجه به جدول ۱ می‌توان دریافت که در روش پیشنهادی، اطلاعات خروجی بیشتری حاصل شده است. در اطلاعات انتروپی و انحراف معیار روش پیشنهادی بهتر از تبدیل IHS عمل کرده است. 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 آیکنوس همبستگی خیلی کمی دارد. در الگوریتم پیشنهادی ضریب همبستگی نسبتاً مناسبی با تصاویر SAR و آیکنوس وجود دارد که نشان دهنده عملکرد بهتر این الگوریتم نسبت به تبدیل IHS است. با توجه به جدول ۱ می‌توان دریافت که الگوریتم تلفیق به روش پیشنهادی، روش مناسبی برای ادغام تصاویر SAR و اپتیک است.



## ۵- نتیجه گیری

در این مقاله یک روش تلفیق تصاویر در فضای ضرایب کرولت با استفاده از میانگین وزن دار پیشنهاد داده شد. 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 وزن دار ضرایب کرولت را ادغام و با اعمال تبدیل کرولت معکوس تصویر حاصل از ادغام بدست آمد. نتایج تلفیق در شکل ۴ آورده شده است. با مقایسه تصاویر ورودی و نتایج حاصل شده از روش پیشنهادی می‌توان دریافت که به ازای حفظ اطلاعات طیفی، اطلاعات مکانی نیز بهبود یافته است. روش پیشنهادی با روش تلفیق با استفاده از تبدیل IHS مقایسه شد. با توجه به جدول ۱ مقدار انحراف معیار در تصاویر آیکونوس، IHS و الگوریتم پیشنهادی به ترتیب برابر ۲۲۸,۷۶، ۲۳۲,۶۱ و ۲۴۴,۴۹ است که نشان دهنده محتوای اطلاعاتی بالاتر تلفیق با استفاده از تبدیل کرولت است. در اطلاعات انترویی نیز روش پیشنهادی با میانگین انترویی ۹,۹ دارای نتیجه بهتری نسبت به روش تلفیق با استفاده از تبدیل IHS می‌باشد. یکی از ضرورت‌های ادغام، ایجاد کمترین تغییر در الگوهای اطلاعاتی تصاویر ورودی است که روش پیشنهادی در مقابل با تبدیل IHS به ترتیب دارای میانگین ضریب همبستگی ۰,۷۵ و ۰,۶۵ با تصاویر ورودی است. 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. با توجه به نتایج بدست آمده می‌توان گفت که روش پیشنهادی، روشی مناسب برای تلفیق تصاویر SAR و اپتیک است.

## مراجع

- [۱] صمدزادگان فرهاد، طبیب محمودی فاطمه، بیگدلی بهناز، ادغام داده‌ها در سنجش از دور مفاهیم و روش‌ها، چاپ دوم، ۱۳۹۳، انتشارات دانشگاه تهران.
- [۲] کاظمی فرناز، تشخیص تغییرات با استفاده از تصاویر سار و اپتیک به روش موجک، ۱۳۹۲، دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی، دانشکده مهندسی ژئودزی و ژئوماتیک.
- [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] E. Candes, L. Demanet, D. Donoho, and L. Ying, "Fast discrete curvelet transforms," *Multiscale Modeling & Simulation*, vol. 5, pp. 861-899, 2006.
- [5] 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.
- [6] E. J. Candès and D. L. Donoho, "Continuous curvelet transform: II. Discretization and frames," *Applied and Computational Harmonic Analysis*, vol. 19, pp. 198-222, 2005.
- [7] S. E. Jero, P. Ramu, and S. Ramakrishnan, "ECG steganography using curvelet transform," *Biomedical Signal Processing and Control*, vol. 22, pp. 161-169, 2015.
- [8] S. Li and B. Yang, "Multifocus image fusion by combining curvelet and wavelet transform," *Pattern Recognition Letters*, vol. 29, pp. 1295-1301, 2008.
- [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] 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.
- [11] 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.