

# کاهش نویز لکه تصاویر رادار با روزنه ترکیبی بر اساس آستانه‌گذاری نرم ضرایب تبدیل کرولت

فاطمه ذاکری<sup>\*</sup>، محمدجواد ولدانزوج<sup>۲</sup>، محمودرضا صاحبی<sup>۳</sup>

<sup>۱</sup> کارشناس ارشد فتوگرامتری و سنجش از دور - دانشکده مهندسی نقشه‌برداری - دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی  
fatemeh.zakeri@ut.ac.ir

<sup>۲</sup> دانشیار گروه سنجش از دور و فتوگرامتری - دانشکده مهندسی نقشه برداری - دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی  
valadanzouj@kntu.ac.ir

<sup>۳</sup> استادیار گروه سنجش از دور و فتوگرامتری - دانشکده مهندسی نقشه‌برداری - دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی  
sahebi@kntu.ac.ir

(تاریخ دریافت تیر ۱۳۹۲، تاریخ تصویب مرداد ۱۳۹۳)

## چکیده

نویز لکه در تصاویر راداری منجر به کاهش کسب اطلاعات از این تصاویر می‌شود. هدف این مطالعه کاهش نویز لکه تصاویر رادار به وسیله‌ی آستانه‌گذاری نرم ضرایب کرولت با تاکید بر حفظ لبه است. در الگوریتم پیشنهادی ابتدا نویز ضریبی لکه با استفاده از تبدیل لگاریتمی به نویز افزایشی تبدیل شده و سپس تصویر حاصل با استفاده از تبدیل کرولت به فضای کرولت منتقل و ضرایب کرولت بر اساس آستانه‌گذاری نرم و حد آستانه تطبیقی معرفی شده فیلتر می‌شوند. آستانه‌گذاری نرم ضرایب کرولت در قیاس با فیلترهای موجود مانند Frost، Gamma و Kuan، فیلترهای مبتنی بر آستانه‌گذاری نرم تبدیل موجک و آستانه‌گذاری سخت ضرایب کرولت نتایج تجربی بهتری را نشان داده (شاخص‌های میانگین مربع خطا، میانگین مربع خطای نرمال شده و میانگین قدرمطلق خطا به ترتیب ۰.۲۷٪، ۰.۲۷٪ و ۰.۱۵٪ کاهش یافته‌اند، بعلاوه معیار Equivalent Number of Looks (ENL) افزایش یافته و به ترتیب برای تصاویر RADARSAT1 و ENVISAT ۳/۴۱ و ۲۷/۳۴ است). نتایج حاکی از آن است که آستانه‌گذاری نرم ضرایب کرولت افزون بر توان بالا حذف نویز از تصاویر راداری در حفظ لبه و خصوصیات رادیومتریکی نیز بسیار قدرتمند است.

**واژگان کلیدی:** تبدیل کرولت، تصاویر رادار، نویز لکه، آستانه‌گذاری سخت و نرم

\* نویسنده رابط

## ۱- مقدمه

تصاویر رادار با روزنه ترکیبی<sup>۱</sup> در موضوعاتی مانند مانیتورینگ، آشکارسازی معادن و آشکارسازی خودکار اهداف و غیره کاربرد چشم‌گیری دارند. این تصاویر به دلیل استفاده از امواج مایکروویو بر مشکلات متداولی که تصاویر اپتیکی مانند شرایط آب و هوایی، ابر و غیره با آن مواجه هستند غلبه می‌کنند. اما بر خلاف مزیت‌های یادشده تصاویر راداری دارای نویز ضرب‌شونده<sup>۲</sup> لکه<sup>۳</sup> می‌باشند. وجود نویز لکه توان تفکیک رادیومتریکی را تحت تأثیر قرار داده و آنالیز و تفسیر تصاویر راداری را دچار مشکل می‌کند. در نتیجه کاهش نویز لکه تصاویر راداری هم‌زمان با حفظ لبه و خصوصیات رادیومتریکی به منظور اخذ اطلاعات بیشتر از این تصاویر همیشه مورد توجه بوده‌است [۱].

فرآیند کاهش نویز می‌تواند در طی آرایش تصویر صورت گیرد که از آن به عنوان پردازش‌های Multilook یاد می‌شود یا می‌توان از فیلترهای پس‌پردازش مانند Frost [۲]، Lee [۳]، Gamma [۴] و غیره استفاده کرد که مشکل این روش‌ها کاهش مقداری توان تفکیک مکانی و نرم کردن لبه‌ها است [۵]. در پردازش تصاویر، کاهش نویز همراه با حفظ لبه و عوارض تصویر مورد توجه است که به منظور بهبود نتایج و رفع نقص‌های موجود، فیلترهای مبتنی بر روش‌های چند مقیاسی مانند تبدیل موجک<sup>۴</sup> ارائه شدند. تبدیل موجک تبدیل چندمقیاسی است که به دلیل توانایی نمایش بیشتر انرژی سیگنال در تعداد ضرایب محدود، در حذف نویز یکی از روش‌های موفق است [۶]، [۷] و [۸]. اما تبدیل موجک در نمایش ناپیوستگی‌های در امتداد یک منحنی ناتوان است و تنها می‌تواند اطلاعات در جهات خاصی را حفظ کند درحالی‌که تبدیل کرولت<sup>۵</sup> تبدیل چندمقیاسی جدیدی است که توانایی نمایش لبه‌ها با تعداد ضرایب کم را دارد [۹]، که این توانایی، این تبدیل را در حفظ لبه‌ها توانمند ساخته است.

به طور کلی روش‌های کاهش نویز تصاویر رادار با روزنه ترکیبی مبتنی بر تبدیل کرولت می‌تواند به دو دسته‌ی کلی تقسیم شود:

(۱) روش تخمین Bayesian: در این روش یک توزیع اولیه برای ضرایب کرولت تصویر بدون نویز در نظر گرفته می‌شود و سپس از این تخمین‌گر برای تخمین ضرایب بدون نویز استفاده می‌شود [۵]. این‌گونه روش‌ها مبتنی بر پیش‌فرض‌هایی در مورد توزیع ضرایب است که برای برخی از تصاویر قابل قبول نیست و انعطاف‌پذیری این روش‌ها را در مواجهه با تصاویر مختلف کاهش می‌دهد. در نتیجه در این مطالعه روش آستانه‌گذاری مورد مطالعه قرار گرفت.

(۲) روش آستانه‌گذاری: به دلیل خاصیت فشرده‌سازی انرژی تبدیل کرولت با استفاده از فن حد‌آستانه گذاری می‌توان ضرایب نویزی کرولت را حذف کرد. در این روش یک حد آستانه به منظور کاهش ضرایب نویزدار، تعیین شده و تصویر فیلتر شده توسط یک تابع آستانه گذار حاصل می‌شود. Ulfarsson [۱۰] و Zhiyu [۱۱] به منظور تعیین حد آستانه از انحراف‌معیار زیرباند با فرکانس بالا سطح اول تبدیل موجک و کرولت استفاده نمود. Saevarsson [۱۲] و Sveinsson [۱۳] از روش ترکیبی تبدیل کرولت و موجک به منظور کاهش نویز تصاویر راداری بهره جستند. Li و همکاران [۱۴] نیز از تابع gain به منظور آستانه‌گذاری ضرایب کرولت استفاده کرده‌اند. هرچند برخی از روش‌های اشاره‌شده نتایج نسبتاً قابل قبولی داشته‌اند. ولی با توجه به این که برخی از این روش‌ها از نظر محاسباتی زمان‌بر بوده و در بسیاری از این مطالعات از شاخص‌های کمی و کیفی محدودی برای مقایسه روش‌های پیشنهادی و فیلترهای متداول استفاده شده و با توجه به ساختار پیچیده زیرباندهای ضرایب کرولت ارائه روشی جهت تعیین حد آستانه تطبیقی که بتواند خود را با زیر باندهای مختلف تطبیق داده و نویز را به صورت موثر حذف کند به وضوح به چشم می‌خورد. همچنین در این مطالعه از دیدگاه‌های متفاوت کاهش نویز و حفظ لبه با استفاده از معیارهای کمی و کیفی متداول در زمینه کاهش نویز جهت ارزیابی روش پیشنهادی و روش‌های موجود استفاده شده است.

در روش آستانه‌گذاری ابتدا تبدیل کرولت بر روی تصاویر راداری اعمال و ضرایب کرولت بدون نویز توسط تابع

۱ Synthetic Aperture Radar

۲ Multiplicative

۳ Speckle

۴ Wavelet

۵ Curvelet

اساس کار آقای Xie و همکاران نویز لکه پس از اعمال تبدیل لگاریتمی تقریباً مانند نویز افزایشی گوسین است [۱۷]. با فرض گوسینی بودن نویز تصویر تبدیل لگاریتمی یافته، حال می‌توان از روش‌های کاهش نویز افزایشی بهره جست.

$$\log(y) = \log(x) + \log(n_{mul}) \quad (2)$$

در رابطه (۲)،  $x$  مشاهدات بدون نویز و  $y$  مشاهدات نویزدار تصویر رادار با روزه ترکیبی می‌باشند و  $n_{mul}$  نمایش گر نویز لکه است.

اکنون باید تصویر بدون نویز تبدیل لگاریتمی یافته را بتوان از تصویر نویزدار تبدیل لگاریتمی یافته تخمین زد. به جهت اینکه تخمین تصویر بدون نویز از تصویر نویزدار در فضای تک مقیاسی مشکل است، تصویر توسط تبدیل‌های چند مقیاسی به حیطه فرکانس برده می‌شود؛ پس از اعمال تبدیل کرولت بیشتر انرژی سیگنال در تعداد ضرایب محدودی نهفته است، پس انتظار می‌رود که آستانه‌گذاری بتواند انرژی سیگنال را از انرژی نویز جدا کند. در این مرحله پس از تعیین تابع آستانه‌گذار و حد آستانه، انرژی سیگنال تخمین زده می‌شوند. در انتها نیز بعد از اعمال تبدیل معکوس کرولت و تبدیل نمایی تصویر فیلترشده حاصل می‌شود. در این مطالعه از تابع آستانه‌گذار نرم که به فرم زیر تعریف می‌شود استفاده شده است:

$$\hat{y} = \begin{cases} \text{sign}(y)(|y| - K\sigma'_n) & |y|/\sigma'_n \geq K\sigma'_n \\ 0 & \text{در غیر این صورت} \end{cases} \quad (3)$$

متد آستانه‌گذاری سخت [۱۶] نیز به صورت زیر تعریف می‌گردد:

$$\begin{cases} y' = y & |y|/\sigma'_n \geq K\sigma'_n \\ y' = 0 & \text{در غیر این صورت} \end{cases} \quad (4)$$

در رابطه (۳) و (۴)،  $y$  ضرایب نویزدار کرولت،  $y'$  تخمینی از ضرایب بدون نویز کرولت،  $\sigma'^2_n$  واریانس نویز و  $\sigma'_n$  متوسط توزیع انرژی نویز در هر زیرباند یا همان انحراف معیار ضرایب نویزدار است، که توسط روش Monte-Carlo تخمین زده می‌شود.  $K$  برای مقیاس اول برابر ۴ و برای دیگر مقیاس‌ها برابر ۳ است.

آستانه‌گذاری تخمین زده شده و سپس تبدیل معکوس کرولت اعمال می‌شود. آستانه‌گذاری در فضای کرولت می‌تواند به روش نرم<sup>۱</sup> [۱۵] یا سخت<sup>۲</sup> [۱۶] انجام پذیرد. در روش آستانه‌گذاری سخت ضرایب بدون نویز بدون تغییر باقی می‌ماند. بر خلاف آستانه‌گذاری سخت در آستانه‌گذاری نرم ضرایب بدون نویز به اندازه قدرمطلق مرز تغییر می‌یابند. در تحقیق پیش‌رو روش آستانه‌گذاری نرم ضرایب کرولت مورد بررسی قرار گرفت و نتایج این روش با فیلترهای متداول مانند Frost, Gamma, Kuan و همچنین آستانه‌گذاری نرم تبدیل موجک و آستانه‌گذاری سخت تبدیل کرولت مقایسه گردید.

سامان‌دهی بقیه مقاله به این صورت است که، پس از بررسی روش پیشنهادی و نظریه کرولت و خصوصیات آن در بخش دوم، در بخش سوم به معرفی روش‌های ارزیابی و نتایج آن و مقایسه با سایر روش‌های متداول پرداخته می‌شود. نهایتاً بخش چهارم با عنوان نتیجه‌گیری، پایان بخش مقاله خواهد بود.

## ۲- مواد و روش‌ها

از نویز لکه به عنوان نویز ضرب شونده نیز یاد می‌شود. به بیان دیگر روشی هر پیکسل در تصویر در نویز لکه مربوط به آن پیکسل ضرب می‌شود.

$$y = x * n_{mul} \quad (1)$$

در رابطه (۱)،  $y$  مقدار پیکسل همراه با نویز،  $x$  مقدار پیکسل بدون نویز و  $n_{mul}$  نویز لکه است.

در ادامه به معرفی روش پیشنهادی و نظریه کرولت و خصوصیات ضرایب آن در کاهش نویز پرداخته می‌شود.

### ۲-۱- الگوریتم کاهش نویز

با توجه به مطالب ذکرشده، مشخص گردید که نویز لکه ضربی بوده و به نوعی قسمتی از تصویر به حساب می‌آید. پس در ابتدا احتیاج است که نویز به نوعی به صورت جمع شونده با تصویر تبدیل شود. این کار با اعمال تابع لگاریتم قبل از اعمال تبدیل کرولت انجام می‌شود. بر

۱ Soft  
۲ Hard

$$\sum_{j=-\infty}^{\infty} V^2(t-1) = 1 \quad t \in (-1/2, 1/2) \quad (6)$$

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

$$U_j(r, \theta) = 2^{-3j/4} W(2^{-j} r) V\left(\frac{2^{\lfloor j/2 \rfloor}}{2\pi} \theta\right) \quad (7)$$

جهت تولید کرولت با مقادیر طبیعی از نمونه متقارن فرمول (7) استفاده می‌شود، یعنی از عبارت  $U_j(r, \theta + \pi)$  فرمول  $U_j(r, \theta)$  استفاده می‌شود [9].

شکل موج<sup>۲</sup>  $\varphi_j(x)$  به وسیله تبدیل فوریه آن  $\varphi'_j(\omega) = U_j(\omega)$  تعریف می‌شود. پنجره‌ای است که در سیستم مختصات قطبی به وسیله فرمول (7) تعریف می‌گردد.  $\varphi_j$  کرولت مادر است و تمام کرولت‌ها در مقیاس  $2^j$  به وسیله دوران و انتقال کرولت مادر به دست می‌آیند. زوایای دوران به صورت  $\theta_l = 2\pi \cdot 2^{-l/2}$  که  $l=0, 1, \dots$  و  $0 \leq \theta_l < 2\pi$  تعریف می‌شوند و فاصله بین زوایای متوالی به مقیاس وابسته است. پارامتر انتقال نیز به صورت  $k = (k_1, k_2) \in \mathbb{Z}^2$  تعریف می‌شود. در نهایت کرولت در مقیاس  $2^j$  دوران  $\theta_l$  و مکان  $R_{\theta_l}^{-1}(k_1 2^j, k_2 2^{j/2})$   $x_k^{(j,l)}$  به صورت زیر تعریف می‌شود [9]:

$$\varphi_{j,l,k}(x) = \varphi_j(R_{\theta_l}(x - x_k^{(j,l)})) \quad (8)$$

که  $R_{\theta}$  ماتریس دوران است.

$$R_{\theta} = \begin{pmatrix} \cos\theta & \sin\theta \\ -\sin\theta & \cos\theta \end{pmatrix} \quad R_{\theta}^{-1} = R_{\theta}^T = R_{-\theta} \quad (9)$$

ضرایب کرولت از ضرب داخلی  $f$  و  $\varphi_{j,l,k}$  به دست می‌آید:

$$c(j, l, k) := \langle f, \varphi_{j,l,k} \rangle = \int_{\mathbb{R}^2} f(x) \overline{\varphi_{j,l,k}(x)} dx \quad (10)$$

فرمول معکوس نیز به صورت زیر است:

$$f = \sum_{j,l,k} \langle f, \varphi_{j,l,k} \rangle \varphi_{j,l,k} \quad (11)$$

بعد از جداسازی ضرایب بدون نویز از ضرایب نویزدار توسط آستانه‌ی تعیین‌شده، تبدیل معکوس کرولت و تبدیل نمایی اعمال‌شده و تصویر نویز کاهش‌یافته به دست می‌آید. الگوریتم مراحل کاهش نویز تصاویر رادار با روزه ترکیبی در شکل (1) نمایش داده شده است:



شکل ۱- الگوریتم کاهش نویز لکه تصاویر رادار با روزه ترکیبی

## ۲-۲- نظریه کرولت

در تبدیل کرولت، هدف تولید کرولت پایه  $\varphi$  و آنالیز سیگنال و تصویر از طریق انتقال، مقیاس<sup>۱</sup> و دوران کرولت پایه است.

در فضای کرولت،  $x$  متغیر مکانی،  $\omega$  متغیر حیطة فرکانس و  $r$  و  $\theta$  مختصات قطبی در حیطة فرکانس می‌باشند. فرآیند تبدیل با دو پنجره  $W(r)$  و  $V(\theta)$  آغاز می‌گردد که توابعی نرم و نامنفی هستند و مقادیر حقیقی می‌گیرند.  $W$  و  $V$  به ترتیب پنجره شعاعی و پنجره زاویه‌ای نامیده می‌شوند. دامنه  $W$  مقادیر حقیقی مثبت در بازه  $(0, 2/\sqrt{5})$  و دامنه  $V$  مقادیر حقیقی در بازه  $[-1, 1]$  است که در شرایط زیر صدق می‌کنند [9]:

$$\sum_{j=-\infty}^{\infty} w^2(2^j r) = 1 \quad r \in (3/4, 3/2) \quad (5)$$

<sup>۲</sup> Wave form

<sup>۱</sup> Scale

- کمینه مقدار ضرایب در سطح آخر متمرکز شده است.
- با افزایش شماره سطوح، تعداد ضرایب نزدیک به صفر افزایش می‌یابد.
- انرژی نوین پخش شده در ضرایب با افزایش سطح، افزایش می‌یابد.

با توجه به خصوصیات ضرایب کرولت مشخص است که بیشتر انرژی تصویر در سطح اول انباشته شده و با افزایش سطح انرژی نوین افزایش می‌یابد، در نتیجه باید حد آستانه مورد نظر خود را بتواند با خصوصیات ضرایب کرولت تطبیق دهد که این مهم از طریق ضریب  $K$  و انحراف معیار نوین و ضرایب حاوی نوین کرولت حاصل می‌شود.

### ۳- نتایج و ارزیابی

برخلاف نوین افزایشی که در ارزیابی روش‌های کاهش آن، معمولاً تصویر بدون نوین در اختیار است، در حذف نوین لکه، تصویر بدون نوین عمده‌تاً موجود نیست. لذا در مطالعات مختلف سعی بر حل این مشکل به دو طریق نموده‌اند. در روش اول نوین لکه مصنوعی به تصویر طبیعی اضافه کرده و کارایی روش را بررسی می‌نمایند. در دسته دوم بدون دانستن تصویر بدون نوین و با تعریف معیارهای نسبی و تقریبی، کارایی روش را بررسی و با روش‌های دیگر مقایسه می‌کنند.

به منظور ارزیابی نتایج حاصل، الگوریتم آستانه‌گذاری نرم ضرایب کرولت با آستانه‌گذاری سخت ضرایب کرولت و فیلترهای Frost، Gamma، Kuan، فیلترهای آستانه‌گذاری نرم موجک سیمپلت مرتبه ۴ و سطح تجزیه ۲۱ و موجک دابیچی مرتبه ۱۵ و سطح تجزیه ۳۱ مقایسه گردید. در این مطالعه از کرنل  $3 \times 3$  و ضریب تعدیل ۴ برابر با یک در فیلترهای Frost، Gamma و Kuan استفاده شده است.

به منظور سازگاری این تبدیل با آرایه‌های کارتین الگوریتم تبدیل کرولت گسسته ارائه شده است که توضیح آن از حوصله این مطالعه خارج است. پارامترهای روابط (۳) و (۴) که روابط آستانه‌گذاری می‌باشند به صورت زیر با پارامترهای تبدیل کرولت ارتباط پیدا می‌کنند:

$\gamma$  همان ضرایب نوین‌دار کرولت و یا همان  $c(j,l,k)$  پارامتر مقیاس،  $l$  پارامتر دوران و  $k$  پارامتر انتقال است.  $\gamma'$  ضرایب کرولت آستانه‌گذاری است.  $\sigma^2_n$  واریانس نوین تصویر است.  $\sigma'$  متوسط توزیع انرژی نوین در هر زیرباند است که توسط میانه قدرمطلق انحراف<sup>۱</sup> در هر زیرباند محاسبه می‌شود:

$$\sigma = \frac{\text{median}(|c - \text{median}(c)|)}{0.6745} \quad (12)$$

که  $c$  مجموعه ضرایب کرولت در هر زیرباند است.

### ۳-۲- ویژگی‌های ضرایب کرولت

تبدیل کرولت تصویر را به حوزه‌ی فرکانس می‌برد. تعداد سطح‌هایی که بعد از اعمال تبدیل کرولت با توجه به ابعاد تصویر حاصل می‌شود، از رابطه زیر محاسبه می‌شود که  $m$  و  $n$  ابعاد تصویر است [۹].

$$n_{scales} = \log_2 \min(n, m) - 3 \quad (13)$$

بعد از اعمال تبدیل به تصویر، ضرایب را می‌توان به سه سطح تقسیم کرد [۱۸]: 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. از نقطه‌نظر آماری، مشخصه‌های ضرایب کرولت را می‌توان در موارد زیر خلاصه کرد [۱۹]:

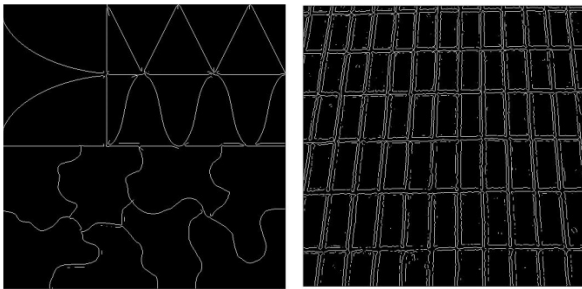
- بیشتر انرژی تصویر در پایین‌ترین سطح یا همان سطح coarse انباشته شده است. باقی‌مانده انرژی در سایر باندها پخش شده که از فرکانس‌های پایین به بالا کاهش می‌یابند.
- بیشینه مقدار ضرایب در سطح اول متمرکز شده است.

۱ Symlet Wavelet basis 4 and 1 levele of decomposition (w-sym-4-1)

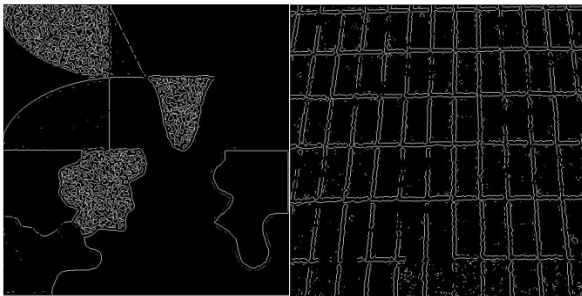
۲ Daubechies Wavelet basis 15 and 1 level of decomposition (w-db-15-1)

۳ Damping Factor.

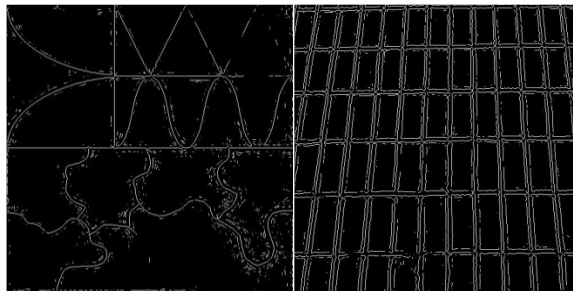
۱ median absolute deviation



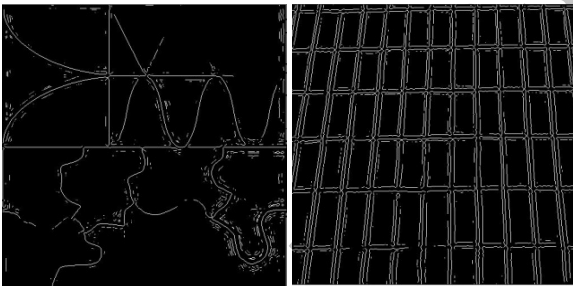
الف



ب



ج



د

شکل ۳- بررسی لبه‌های خروجی از تصاویر فیلتر شده: الف) لبه تصاویر بدون نویز، ب) Frost، ج) کرولت-سخت و د) پیشنهادی

با توجه به شکل ۳ فیلترهای مورد قیاس با روش پیشنهادی در مورد لبه‌های افقی و قائم ضعیف قادر به حفظ لبه نبوده و همچنین در حفظ لبه‌های منحنی شکل بسیار ضعیف عمل نموده‌اند.

با توجه به مباحث ذکر شده درباره توانایی این تبدیل در حفظ و نمایش لبه در تعداد ضرایب کم، نتایج کسب‌شده در مورد حفظ لبه قابل پیش‌بینی بود.

- حفظ خصوصیات رادیومتریکی

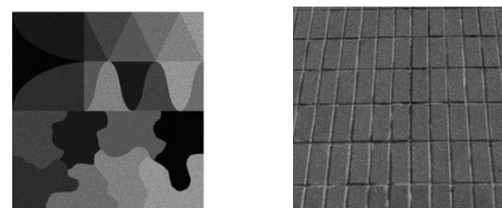
در قسمت بعد پس از مروری بر معیارهای حذف نویز لکه، به نتایج حاصل از اعمال روش پیشنهادی در حذف این نوع نویز در تصاویر راداری پرداخته می‌شود.

### ۳-۱- تصاویر شبیه‌سازی شده

استفاده از تصاویر شبیه‌سازی شده امکان بررسی کاهش نویز هم‌زمان و حفظ خصوصیات رادیومتریکی و لبه را فراهم می‌کند. در این مطالعه برای تولید نویز لکه، از نویز ضربی با توزیع لگ-نرمال<sup>۱</sup> استفاده شده است [۲۰]. در این مقاله در بررسی کارایی روش‌های حذف نویز، از معیارهای حفظ لبه و حفظ خصوصیات رادیومتریکی استفاده شده است که در ادامه معرفی می‌شوند.

- حفظ لبه

وظایف فیلتر را می‌توان در دو مورد خلاصه کرد: (۱) تخمین مقادیر درجه خاکستری فاقد نویز، (۲) حفظ لبه‌ها و جلوگیری از نرم شدن لبه‌ها و بافت تصویر. به منظور غیر نویز بودن لبه‌ها، در روش بررسی فیلتر در حفظ لبه از تصاویر شبیه‌سازی شده استفاده می‌شود. برای استخراج لبه از روش *Laplacian Of Gaussian (LOG)* استفاده گردید [۲۱]. جهت بررسی توانایی الگوریتم در حفظ لبه‌های مختلف از دو تصویر شبیه‌سازی شده که یکی دارای لبه‌های افقی و عمودی و دیگری دارای لبه‌های منحنی شکل است استفاده شد. در شکل ۲ تصاویر نویزدار شده ضربی با توزیع لگ-نرمال نمایش داده شده‌اند:



الف

ب

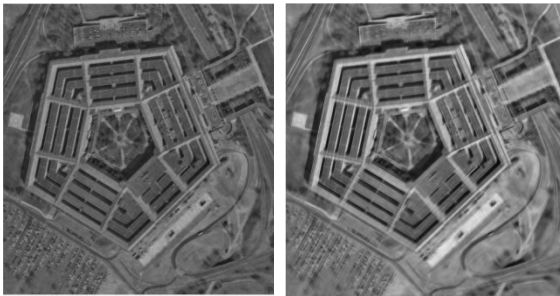
شکل ۲- الف) و ب) تصاویر نویزدار شده ضربی با توزیع لگ-نرمال به منظور اختصار تنها لبه‌های حاصل از اعمال فیلترهای کرولت و Frost در شکل ۳ نمایش داده شده است (فیلترهای *Gamma*، *Kuan* و موجک به نتایج بهتری در حفظ لبه‌ها دست نیافتند). استخراج لبه به روش *LOG* انجام گرفت (نتایج بهتری در دیگر روش‌های استخراج لبه مشاهده نشد):

<sup>۱</sup> Log-Normal



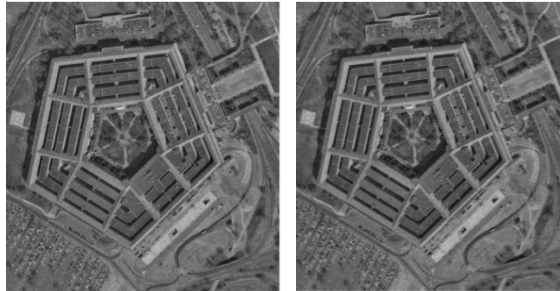
الف

ب



ج

د



و

ه

شکل ۴- تصویر رادار با روزه ترکیبی شبیه‌سازی شده و نتایج فیلترهای موجک و کرولت: الف) تصویر اصلی، ب) تصویر نویزدار شده، ج) کرولت سخت، د) پیشنهادی، و) w-db-15-1 و ه) w-sym-4-1

همان‌گونه که از جدول ۱ مشخص است شاخص‌های میانگین مربع خطا، میانگین مربع خطای نرمال شده و میانگین قدرمطلق خطا به ترتیب ۰.۲۷٪، ۰.۲۷٪ و ۰.۱۵٪ کاهش یافته‌اند. به دلیل خاصیت فشرده‌سازی انرژی یعنی نمایش بیشتر انرژی در تعداد ضرایب محدود تبدیل کرولت و تطبیق‌پذیری روش تعیین آستانه با شرایط ضرایب کرولت در هر زیرباند، روش پیشنهادی در حفظ خصوصیات رادیومتریکی بهتر از فیلترهای دیگر عمل نموده است.

### ۳-۲- تصاویر راداری

دو تصویر راداری مختلف برای ارزیابی روش‌های کاهش نویز مختلف در این مقاله مورد استفاده قرار گرفتند: (۱) داده‌های ماهواره ENVISAT باند C قطبش

در بررسی حفظ خصوصیات رادیومتریکی هر فیلتری که دارای نتایج شبیه‌تر به تصاویر اولیه باشد، موفق‌تر عمل کرده است. به جهت اطمینان از اینکه فیلترهای ضعیف و ناتوان‌تر در حذف نویزهای موجود در تصویر اولیه به عنوان فیلترهای شبیه‌تر به آن معرفی نشوند از تصاویر شبیه‌سازی شده استفاده شده است. معیارهای میانگین مربع خطا<sup>۱</sup> (MSE)، میانگین مربع خطای نرمال شده<sup>۲</sup> (NMSE) و میانگین قدرمطلق خطا<sup>۳</sup> (MAE) به منظور بررسی حفظ خصوصیات رادیومتریکی در این مقاله مورد ارزیابی قرار گرفتند [۲۲]:

$$MSE = \frac{1}{M \times N} \sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^M [c(i, j) - c'(i, j)]^2 \quad (14)$$

$$NMSE = \frac{\sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^M [c(i, j) - c'(i, j)]^2}{\sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^M [c(i, j)]^2} \quad (15)$$

$$MAE = \frac{1}{N \times M} \sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^M |c(i, j) - c'(i, j)| \quad (16)$$

در این روابط  $c(i, j)$  و  $c'(i, j)$  به ترتیب پیکسل‌های تصویر ایده‌آل و فیلترشده است که در سطر  $i$ ام و ستون  $j$ ام واقع‌اند و مقادیر  $M$  و  $N$  به ترتیب تعداد سطرها و ستون‌های تصویر می‌باشند.

نتایج معیارهای  $MSE$  و  $NMSE$ ،  $MAE$  در جدول ۱ خلاصه گردیده است:

جدول ۱- معیارهای  $MSE$  و  $NMSE$ ،  $MAE$  بر روی تصویر شبیه‌سازی شده

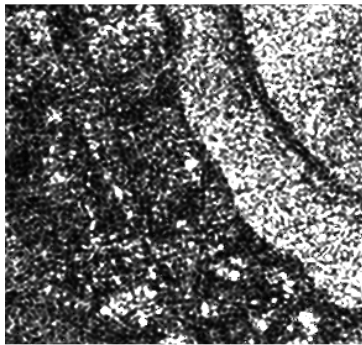
	MSE	NMSE	MAE
Hard Curvelet	$1.8183 \times 10^4$	0.9135	132.3720
Proposed	$1.7655 \times 10^4$	0.8870	131.1953
Frost	$2.4317 \times 10^4$	1.2217	154.9799
Gamma	$2.4231 \times 10^4$	1.2174	154.6984
Kuan	$2.4231 \times 10^4$	1.2174	154.6984
w-db-15-1	$1.8939 \times 10^4$	0.9515	134.4970
w-sym-4-1	$1.8892 \times 10^4$	0.9492	134.4970

تصویر شبیه‌سازی شده و نتایج فیلترهای کرولت و موجک که با توجه به جدول ۱ دارای شباهت بیشتری به تصویر اولیه می‌باشند در شکل ۴ آمده است:

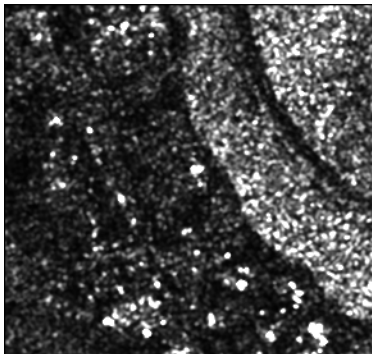
۱ Mean Square Error

۲ Normalized MSE

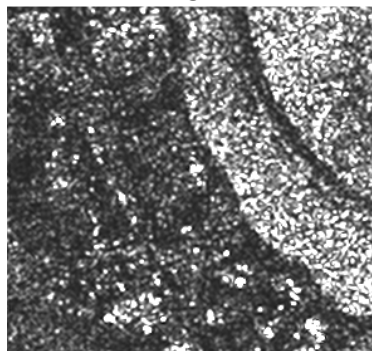
۳ Mean Absolute Error



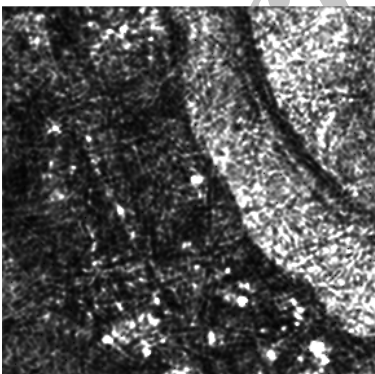
ب



ج



د



ه

شکل ۵. قسمتی از تصویر ENVISAT و نتیجه‌ی فیلترهای مختلف: الف) تصویر اصلی، ب) کرولت سخت، ج) Frost، د) w-sym-4-1، ه) پیشنهادی

۷۷ از شهر مونترآل کانادا. ۲) RADARSAT1 باند C قطبش HH از شهر کبک کانادا.

بر خلاف روش‌های ارزیابی داده‌های شبیه‌سازی شده، که تاکید بر روی تشخیص عوارض خاص در نقاط مختلف تصویر و حفظ خصوصیات رادیومتریکی است، در آنالیزهای داده‌های راداری تاکید بر حذف نویز است. در این مقاله از معیار  $ENL$  (Equivalent Number of Looks) برای بررسی کاهش نویز تصاویر راداری استفاده شده است. معیار  $ENL$  به صورت زیر تعریف می‌شود [۲۳]:

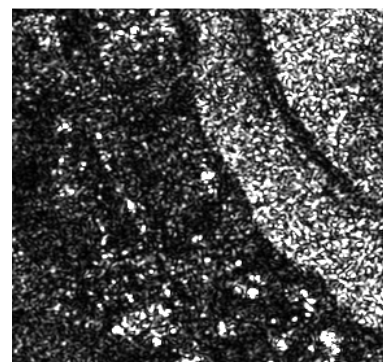
$$ENL = \frac{E^2}{\sigma^2} \quad (17)$$

که  $E$  میانگین تصویر و  $\sigma^2$  واریانس تصویر است.  $ENL$  باید در قسمت همگنی از تصویر محاسبه شود. به این جهت یک زیر تصویر همگن از کل تصویر انتخاب شده و برای اطمینان از همگن بودن، این زیر تصویر به بلاک‌های  $25 \times 25$  تقسیم شده و  $ENL$  های محاسبه شده میانگین‌گیری گردیدند که در جدول شماره ۲ نتایج آن خلاصه گردیده است:

جدول ۲- مقادیر  $ENL$  تصاویر با اعمال فیلترهای مختلف

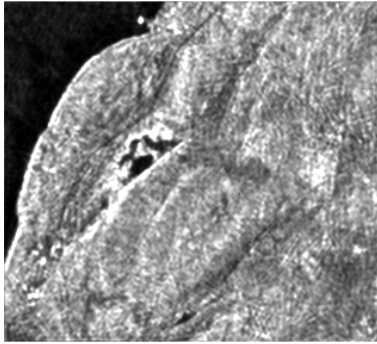
	ENVISAT	RADARSAT1
original	1.2853	8.4588
Hard Curvelet	1.3589	11.8656
Proposed	3.6192	27.3472
Frost	2.3700	14.7318
Gamma	2.1104	18.1438
Kuan	1.6339	17.4069
w-db-15-1	1.7591	10.9291
w-sym-4-1	1.9026	11.8011

در شکل‌های ۵ و ۶ قسمتی از تصاویر ENVISAT و RADARSAT و نتیجه‌ی فیلترهای با  $ENL$  بیشتر نشان داده شده است:



الف



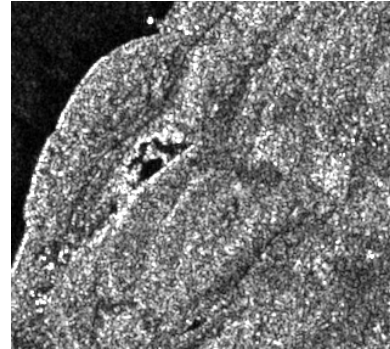


شکل ۶- قسمتی از تصویر RADARSAT1 و نتیجه‌ی فیلترهای مختلف: الف) تصویر اصلی، ب) کرولت سخت، ج) Gamma، د) w-sym-4-1، ه) پیشنهادی

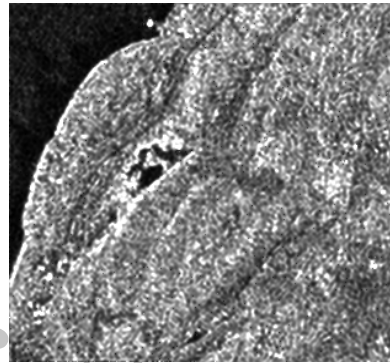
به دلیل توانایی فشرده‌سازی انرژی در تبدیل کرولت، می‌توان نویز را در حیطه فرکانس بسیار موثرتر از روش‌های موجود با تاکید بر حفظ عوارض کاهش داد. از نتایج جدول ۲ و اشکال ۵ و ۶ نیز می‌توان صحت این موضوع را تحقیق کرد.

#### ۴- نتیجه‌گیری

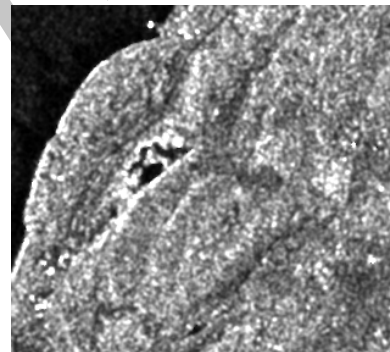
در این مطالعه، الگوریتم کاهش نویز تصاویر رادار با روزنه ترکیبی مبتنی بر آستانه‌گذاری نرم ضرایب کرولت مورد بررسی قرار گرفت و با فیلترهای متداول مانند Frost، Gamma و Kuan، فیلترهای مبتنی بر آستانه‌گذاری نرم تبدیل موجک و آستانه‌گذاری سخت ضرایب کرولت مورد مقایسه قرار گرفت. به دلیل توانایی تبدیل کرولت در فشرده‌سازی انرژی و حفظ لبه، نتایج تجربی کارایی الگوریتم مورد پیشنهادی را مورد تأیید قرار داده است (شاخص‌های میانگین مربع خطا، میانگین مربع خطای نرمال شده و میانگین قدر مطلق خطا به ترتیب  $0.27\%$ ،  $0.27\%$  و  $0.15\%$  کاهش یافته‌اند، بعلاوه معیار Equivalent Number of Looks (ENL) افزایش یافته و به ترتیب برای تصاویر RADARSAT1 و ENVISAT  $27/34$  و  $3/61$  است). افزون بر این، روش پیشنهادی در مواجهه با لبه‌ها و حفظ لبه در مقایسه با فیلترهای متداول مانند Frost، Gamma، Kuan و فیلترهای مبتنی بر آستانه‌گذاری نرم ضرایب موجک بهتر عمل کرده است. این موضوع در کاربردهای سنجش از دور بسیار حائز اهمیت است و فیلتری توانمند شناخته می‌شود که بتواند همراه با حذف نویز به حفظ لبه‌ها بپردازد. استفاده از توابع آستانه‌گذار دیگر و مقایسه آن‌ها با یکدیگر و معرفی روش‌های تعیین حدآستانه کارا تر و مقایسه آن‌ها با یکدیگر می‌تواند در کارهای آتی مورد بررسی قرار گیرد.



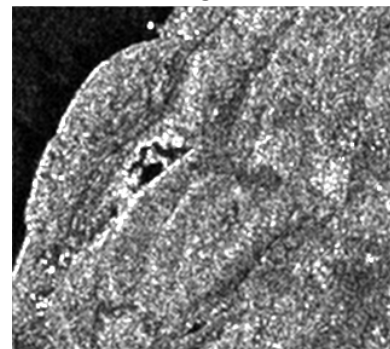
الف



ب



ج



د

- [1] D. Gnanadurai and V. Sadasivam, (2005). "Undecimated wavelet based speckle reduction for SAR images," *Pattern Recognition Letters*, vol. 26, pp. 793–800 ,
- [2] V. S. Frost, J. A. Stiles, K. S. Shanmugan, and J. C. Holtzman, (1982). "A model for radar images and its application to adaptive digital filtering of multiplicative noise," *IEEE Trans. Pattern Anal. Mach. Intell.*, vol. PAMI-4, pp. 157–166 ,
- [3] J. S. Lee, (1980). "Digital image enhancement and noise filtering by use of local statistics," *IEEE Trans. Pattern Anal. Mach. Intell.*, vol. PAMI-2, pp. 165–177 ,
- [4] A. Baraldi and F. Parmigiani, (1991). "A refined Gamma MAP SAR speckle filter with improved geometrical adaptivity," *IEEE Trans. Geosci. Remote Sens.*, vol. 29, pp. 742–753 ,
- [5] M. Amirmazlaghani and H. Amindavar, (2010). "Two Novel Bayesian Multiscale Approaches for Speckle Suppression in SAR Images," *IEEE Transaction on Geoscience and Remote Sensing*, vol. 48, pp. 2980-2993 ,
- [6] A. Achim, A. Bezerianos, and P. Tsakalides, (2003). "SAR image denoising via Bayesian wavelet shrinkage based on heavy tailed modeling," *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, vol. 41, pp. 1773-1784 ,
- [7] H. Xie, L. E. Pierce, and F. T. Ulaby, (2002). "SAR speckle reduction using wavelet denoising and Markov random field modeling," *IEEE Trans. Geosci. Remote Sens.*, vol. 40, pp. 2196–2212 ,
- [8] S. Solbo and T. Eltoft, (2008). "A stationary wavelet-domain Wiener filter for correlated speckle," *IEEE Trans. Geosci. Remote Sens.*, vol. 46, pp. 1219–1230 ,
- [9] E. Candès, L. Demanet, D. Donoho, and L. Ying, (2006). "Fast Discrete Curvelet Transforms," *Multiscale Model. Simul.*, vol. 5, pp. 861-899 ,
- [10] M. O. Ulfarsson, J. R. Sveinsson, and J. A. Benediktsson, (2002). "Speckle Reduction of SAR Images in The Curvelet Domain," presented at the IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium (IGARSS).
- [11] Z. Zhiyu, Z. Xiaodan, and Z. Jiulong, (2009). "SAR Image Processing based on Fast Discrete Curvelet Transform," presented at the International Forum on Information Technology and Applications.
- [12] B. B. Saevarsson, J. R. Sveinsson, and J. A. Benediktsson, (2004). "Combined Wavelet and Curvelet Denoising of SAR Images," presented at the IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium (IGARSS).
- [13] J. R. Sveinsson and J. A. Benediktsson, (2007). "Combined Wavelet and Curvelet Denoising of SAR Images using TV segmentation," presented at the IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium (IGARSS).
- [14] Y. Li, H. Gong, D. Hongli, and Y. Zhang, (2011). "An Adaptive Method of Speckle Reduction and Feature Enhancement for SAR Images Based on Curvelet Transform and Particle Swarm Optimization," *IEEE Transaction on geoscience and remote sensing*, vol. 49, pp. 3105-3116 ,
- [15] D.L. Donoho, (1995) "De-Noising by Soft-Thresholding," *IEEE Trans. On Information Theory*, vol. 41, pp. 613-627 ,
- [16] J.-L. Starck, E. J. Candès, and D. L. Donoho, (2002). "The curvelet transform for image denoising," *IEEE Transaction Image Processing*, vol. 11, pp. 67.684-0 ,

- [17] H. Xie, L. E. Pierce, and F. T. Ulaby, (2002). "Statistical properties of logarithmically transformed speckle," *IEEE Trans. Geosci. Remote Sens.*, vol. 40, pp. 721–727 ,
- [18] Y. Li, Q. Yang, and R. Jiao, (2010). "Image compression scheme based on curvelet transform and support vector machine," *Expert Systems with Applications*, vol. 37, pp. 3063–3069 ,
- [19] F. Zakeri, "Evaluation of Speckle Reduction in SAR images Based on The Curvelet Transform," M.Sc., Faculty of Geodesy and Geomatics, K.N. Toosi University of Technology, 2013.
- [20] L. Gagnon and A. Jouan, (1997). "Speckle filtering of SAR images—A comparative study between complex-wavelet based and standard filters," presented at the Proc. SPIE.
- [21] M. Juneja and P. S. Sandhu, (2009). "Performance Evaluation of Edge Detection Techniques for Images in Spatial Domain," *International Journal of Computer Theory and Engineering*, pp. 1793-8201 ,
- [22] I. Avcıbaşı, B. Sankur, and K. Sayood, (2002). "Statistical evaluation of image quality measures ",*Journal of Electronic Imaging*, vol. 11 ,
- [23] M. Mastriani and A. E. Giraldez, (2004). "Enhanced Directional Smoothing Algorithm for Edge-Preserving Smoothing of Synthetic-Aperture Radar Images," *Measurement Science Review*, vol. 4 ,