

ارائه‌ی روشی جدید برای کاهش پدیده Speckle با استفاده از خوشه‌بندی در تصویر تک کاناله رادار

میلاذ جانعلی پور^۱، علی محمدزاده^{۲*}، یاسر مقصودی^۲

^۱ دانشجوی دکتری سنجش از دور - دانشکده نقشه برداری - دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی
m_janalipour89@yahoo.com

^۲ استادیار گروه فتوگرامتری و سنجش از دور - دانشکده نقشه برداری - دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی
almoh2@gmail.com
ymaghsoudi@kntu.ac.ir

(تاریخ دریافت مهر ۱۳۹۳، تاریخ تصویب دی ۱۳۹۳)

چکیده

پدیده Speckle جزء طبیعت تصاویر رادار می‌باشد که باعث کاهش دقت تفسیر، طبقه‌بندی، قطعه‌بندی و ... در این تصاویر می‌شود. محققین توسط روش‌های مختلف سعی در کاهش این پدیده در تصاویر رادار داشته‌اند. یکی از روش‌های کاهش پدیده Speckle در تصاویر رادار فیلترهای حیطه مکان می‌باشند. عمده روش‌های فیلتر حیطه مکان از حدآستانه‌هایی برای طبقه‌بندی انواع اهداف استفاده می‌کنند، سپس بر مبنای نوع هدف پدیده Speckle را کاهش می‌دهند. استفاده حدآستانه بر روی تصاویر برای طبقه‌بندی هدف یک روش با خطا بالا است. بنابراین، روش خوشه‌بندی برای طبقه‌بندی هدف در این پژوهش استفاده می‌شود. در روش پیشنهادی، ابتدا پدیده Speckle تصویر خام رادار با استفاده از فیلتر میانگین کاهش یافت، سپس روش خوشه‌بندی K-Means با تعداد خوشه‌های متفاوت بر روی تصویر پیاده‌سازی شد. تعداد خوشه بهینه برای منطقه مورد مطالعه با استفاده از شاخص دیویس-بولدین تعیین گردید. در نهایت، تصویر فیلتر شده در یک سطح تصمیم‌گیری با تصاویر خوشه‌بندی و خام رادار تولید شد. نتایج روش پیشنهادی با روش‌های دیگر شامل فیلتر میانگین، فیلتر Lee، فیلتر Enhance Lee، فیلتر گاما و فیلتر میانه با استفاده از شاخص‌های حفظ اطلاعات رادیومتریکی و حفظ لبه مقایسه شد. نتایج نشان می‌دهد که روش پیشنهادی نسبت به روش‌های دیگر بر اساس شاخص‌های حفظ لبه و اطلاعات رادیومتریکی صحت بالاتری دارد.

واژگان کلیدی: پدیده Speckle، فیلترهای حیطه مکان، خوشه‌بندی، تصاویر تک کاناله رادار

* نویسنده رابط

۱- مقدمه

مشاهدات از سطح زمین توسط تصاویر ماهواره‌ای رو به افزایش است، این تصاویر اطلاعات ضروری برای مطالعات محیطی و پایش منابع زمین را محیا می‌کنند [۱]. عمده تصاویری که از سطح زمین توسط ماهواره‌ها اخذ می‌شوند به وسیله ثبت بازتابندگی نور خورشید از سطح اشیاء یا بازتابش-های اجسام در طول موج‌های حرارتی یا مایکروویو حاصل می‌شوند. سنجنده‌هایی نظیر Landsat Thematic Mapper(TM)، SPOT، the advanced very high resolution radiometer(AVHRR) the special sensor microwave imager(SSM/I) از این دست از سنجنده‌ها می‌باشند که این سنجنده‌ها از نوع سنجنده‌های غیرفعال ناهمدوس^۱ هستند. در چندین دهه اخیر تکنولوژی SAR در حوزه سنجش از دور مورد استفاده قرار گرفته است. این سنجنده‌ها دارای قابلیت‌های متفاوتی از سنجنده‌های غیرفعال هستند. سنجنده‌های مایکروویو فعال از نوع سنجنده‌های همدوس^۲ هستند. امواج این سنجنده‌ها توانایی نفوذ در ابرها و شاخه و برگ درختان را دارند، همچنین یکی از مهم‌ترین ویژگی‌های این سنجنده‌ها، توانایی برداشتشان در شب و روز و با هر وضعیت آب و هوایی می‌باشد [۱].

بر خلاف سنجنده‌های غیرفعال ناهمدوس، تصاویر SAR با یک فرآیند همدوس از سیگنال‌های بازگشتی ایجاد می‌شوند که این موضوع باعث پدیده‌ای به نام Speckle در تصاویر می‌شود [۲]. پدیده Speckle در هر سیستم که به صورت همدوس عمل می‌کند، مشاهده می‌شود. به عنوان مثال پدیده Speckle در داده‌های سیستم‌های لیزر، SAR و Ultrasound مشاهده می‌شود [۳]. پدیده Speckle به علت تارگت‌های موجود در یک پیکسل، که دارای فواصل متفاوت از سنجنده هستند، به وجود می‌آید. به عبارت دیگر اختلاف فاصله تارگت‌ها نسبت به سنجنده باعث ایجاد اختلاف فازهای مختلف شده که این امر موجب یک جمع شدن سازنده، غیر سازنده یا مابین این دو می‌شود که در یک منطقه هموزن این جمع شدن از پیکسلی به پیکسل دیگر متفاوت است به همین دلیل تغییرات در مقادیر ثبت شده توسط سنجنده در این مناطق زیاد است که به پدیده Speckle شناخته می‌شود [۴، ۵].

پدیده Speckle در تصاویر شبیه به یک فرم دانه‌ای ظاهر می‌شود و تفسیر تصویر را با مشکل همراه می‌کند. همچنین باعث کاهش دقت قطعه‌بندی [۶]، طبقه‌بندی و استخراج اطلاعات از تصاویر SAR می‌شود. به همین دلیل محققین به دنبال ارائه‌ی روش‌های کاهش این پدیده در تصاویر SAR هستند.

معمولاً روش‌های کاهش پدیده Speckle در سه گروه کلی دسته‌بندی می‌شوند. در گروه نخست، کاهش این پدیده در تصاویر با استفاده از میانگین‌گیری از چندین منظر^۳ در تصاویر رادار انجام می‌گیرد [۷، ۸]. به علت کاهش اندکی که این روش بر روی پدیده Speckle دارد، معمولاً از روش‌های دیگر در تصاویر SAR برای کاهش بیشتر این پدیده استفاده می‌شوند. تکنیک‌های گروه دوم، شامل روش‌های کاهش پدیده Speckle با استفاده از فیلترهای در حیطه مکان، فرکانس یا تلفیقی از این دو می‌باشند [۹-۱۹]. گروه سوم روش‌های کاهش این پدیده، شامل روش‌های کاهش Speckle بر مبنای تصاویر پلاریزاسیون‌های مختلف، تصاویر فرکانس‌های مختلف یا تصاویر برداشت شده در چند زمان از یک منطقه استوار است [۲۰-۲۲].

در این تحقیق به دنبال ارائه یک روش فیلترینگ جدید در حیطه مکان (دسته دوم روش‌ها) برای کاهش پدیده Speckle در تصاویر تک کاناله رادار هستیم. در ادامه ابتدا چند روش فیلترینگ موجود در حیطه مکان بیان خواهد شد. سپس بر اساس نقطه ضعف روش‌های موجود ایده‌ای که مبنای این مقاله است بیان خواهد شد. فیلتر میانگین یک فیلتر میانگین‌گیری ساده است که مقدار فیلتر شده با میانگین‌گیری از مقادیر پیکسل‌های اطراف پیکسل مورد نظر حول یک پنجره برآورد می‌شود. این روش توانایی خوبی در کاهش نویز دارد. مقدار انحراف معیار نویز در این روش به اندازه جذر تعداد پیکسل‌های یک پنجره در مناطق هموزن کاهش می‌یابد. با این حال این روش توان تفکیک مکانی را به دلیل نرم کردن لبه‌ها از میان می‌برد [۱]. در روش فیلتر میانه، مقدار نهایی تصویر فیلتر شده در یک پیکسل از میانه پیکسل‌های یک پنجره حول آن پیکسل محاسبه می‌شود. حسن این فیلتر در استفاده از درجات خاکستری مشابه با درجات خاکستری موجود در تصویر است بر خلاف روش فیلتر میانگین مقادیر جدیدی برای پیکسل‌ها تولید نمی‌شوند،

^۱ Incoherent

^۲ Coherent

^۳ Look

مشابه روش Enhanced Lee فیلتر می‌شوند اما مقدار فیلتر شده پیکسل در کلاس دوم از رابطه ۳ بدست می‌آید [۲۵].

$$x = \frac{(\alpha - L - 1)\bar{X}(t) + \sqrt{\bar{X}^2(\alpha - L - 1)^2 + 4\alpha L\bar{X}(t)}}{2\alpha} \quad (3)$$

در رابطه فوق L تعداد منظرهای تصویر و α مقدار پارامتر تابع گاما است. همچنین مقدار میانگین (\bar{X}) در یک پنجره حول پیکسل مرکزی محاسبه می‌شود.

در سال ۲۰۱۲ یک فیلتر مکانی به نام (UNSW) adaptive filter (UAF) توسط Shamasoddini و Trinder ارائه شد [۲۶]. این فیلتر در دسته فیلترهای حیطه مکان قرار می‌گیرد و بر اساس طبقه‌بندی پیکسل‌ها به کلاس‌ها با استفاده از حدآستانه و سپس اعمال فیلترینگ بر روی هر کلاس عمل می‌کند. روش فیلترینگ آن‌ها بر اساس استخراج معیار بافت و طبقه‌بندی آن به کلاس‌های مختلف و اعمال سناریوهای مختلف بر روی هر کلاس خلاصه می‌شود.

همان‌طور که در پیشینه تحقیق مشاهده شد، یکی از روش‌های پرکاربرد جهت کاهش پدیده Speckle استفاده از فیلترهای مکانی است. به دلیل ضعف‌هایی که فیلترهای حیطه مکان تاکنون داشته‌اند، محققین به دنبال ارائه فیلترهای جدید در حیطه مکان با کارایی بالاتر می‌باشند. از طرف دیگر روش‌های بیان شده معمولاً بر اساس طبقه‌بندی پیکسل‌ها با استفاده از حدآستانه عمل می‌کردند، که روش حدآستانه اگرچه روشی سریع برای طبقه‌بندی است اما دارای دقت کم می‌باشد. بنابراین ارائه روش‌هایی جهت بهبود این موضوع ضروری به نظر می‌رسد. در این پژوهش به دنبال استفاده از روش خوشه‌بندی به جای حدآستانه‌گذاری جهت کاهش پدیده Speckle در تصاویر تک کاناله SAR هستیم. در این پژوهش روشی ارائه می‌شود که دارای کارایی بالا در مناطق همگن، ناهمگن و پراکنش‌کننده‌های نقطه‌ای باشد و برای مقایسه نتایج روش پیشنهادی از چند روش فیلترینگ استفاده خواهد شد. در ادامه این پژوهش، در بخش ۲ به روش مورد استفاده در این تحقیق اشاره می‌شود. منطقه مورد مطالعه و داده‌های مورد استفاده در بخش ۳ معرفی خواهند شد. در بخش ۴ نتایج حاصل از پیاده‌سازی مورد بحث قرار خواهند گرفت. در نهایت در بخش نتیجه‌گیری، نتایج و دستاوردهای این پژوهش بیان خواهد شد.

۲- روش تحقیق

همان‌طور که در مقدمه بیان شد، روش این پژوهش بر روی تصویر تک کاناله پیاده‌سازی می‌شود. مطابق شکل ۱ ابتدا تصویر تک‌کاناله با استفاده برخی از روش‌های فیلترینگ

همچنین این روش کارایی بالایی در حذف نویزهای ایزوله دارد. این روش معایب روش میانگین را به همراه دارد [۱].

در روش فیلترینگ Lee هدف برآورد یک مقدار \hat{x} برای مقدار x (مقداری که یک پیکسل در صورت نبود پدیده Speckle باید اختیار می‌کرد) است که از رابطه ۱ بدست می‌آید.

$$\hat{x} = \bar{y} + b(y - \bar{y}) \quad (1)$$

در رابطه فوق y مقدار ثبت شده یک پیکسل و \bar{y} میانگین پیکسل‌ها حول یک پنجره به مرکز y است. پارامتر b از رابطه ۲ بدست می‌آید.

$$b = \frac{\text{var}(x)}{\text{var}(y)} \quad (2)$$

پارامتر b به گونه‌ای یک وزن میان میانگین محلی و مقدار اصلی پیکسل است. برای یک منطقه هموزن که $0 \approx \text{Var}(x)$ است مقدار برآورد شده از رابطه ۱ همان میانگین پیکسل‌ها است. برای یک منطقه ناهمگن $\text{Var}(x) \approx \text{Var}(y)$ است که در این صورت مقدار برآورد شده همان مقدار خام پیکسل است [۱، ۴، ۲۳].

روش فیلتر Enhanced Lee توسط Lopes و همکاران ارائه شد [۲۴]. آن‌ها ابتدا هر پیکسل را به یکی از سه کلاس مناطق هموزن، مناطق غیرهموزن و تارگت‌های ایزوله تقسیم نمودند. کلاس نخست متناظر مناطق هموزن بود، در این مناطق آن‌ها پیشنهاد نمودند که با یک فیلتر پایین گذر نظیر میانگین‌گیری ساده پدیده Speckle کاهش یابد. کلاس دوم مربوط به مناطق غیر هموزن (ناهمگن) بود، در این کلاس علاوه بر اینکه باید پدیده Speckle کاهش یابد بافت منطقه حفظ شود به همین دلیل از یک فیلتر تطابقی برای این مناطق، مشابه رابطه فیلتر Lee، استفاده می‌شود. در نهایت کلاس سوم مربوط به نقاط و تارگت‌های ایزوله در طبیعت می‌باشد که این تارگت‌ها دارای رفتاری شبیه به Speckle هستند اما ذات پراکنش بالای آن‌ها باعث ایجاد تغییرات نسبت به پیکسل‌های اطراف می‌شود. مقادیر پیکسل‌های این کلاس نباید با پیکسل‌های اطراف میانگین‌گیری شود و خود مقدار پیکسل بدون تغییر باقی خواهد ماند.

فیلتر گاما یکی از فیلترهای مدل مبنا در کاهش پدیده Speckle است. در فیلترهای مدل مبنا، برای متغیرها توزیع در نظر گرفته می‌شود. در فیلتر گاما ابتدا پیکسل‌ها، مشابه روش enhanced Lee، به ۳ دسته تقسیم می‌شوند، حدآستانه بالا (C_{\max}) در این روش متفاوت با روش Enhanced Lee می‌باشد، دسته اول و دوم در این روش

ها با توجه به فاصله‌ای که در فضای ویژگی دارند به نزدیک-ترین خوشه اختصاص می‌یابند. این فاصله معمولاً فاصله اقلیدسی یا ماهالانویس است. پس از این مرحله، مرکز خوشه‌ها از میانگین‌گیری از پیکسل‌های موجود در آن خوشه محاسبه می‌شود، سپس پیکسل‌ها با توجه به مرکز خوشه-های جدید کلاسه‌بندی می‌شوند. این روند تا تحقق شرط اتمام، که می‌تواند تعداد حداکثر تکرار یا حدآستانه برای تغییرات اندک مرکز خوشه‌ها یا حداقل تعداد پیکسل‌هایی که تغییر کلاس می‌یابند باشد، ادامه می‌یابد [۳۰].

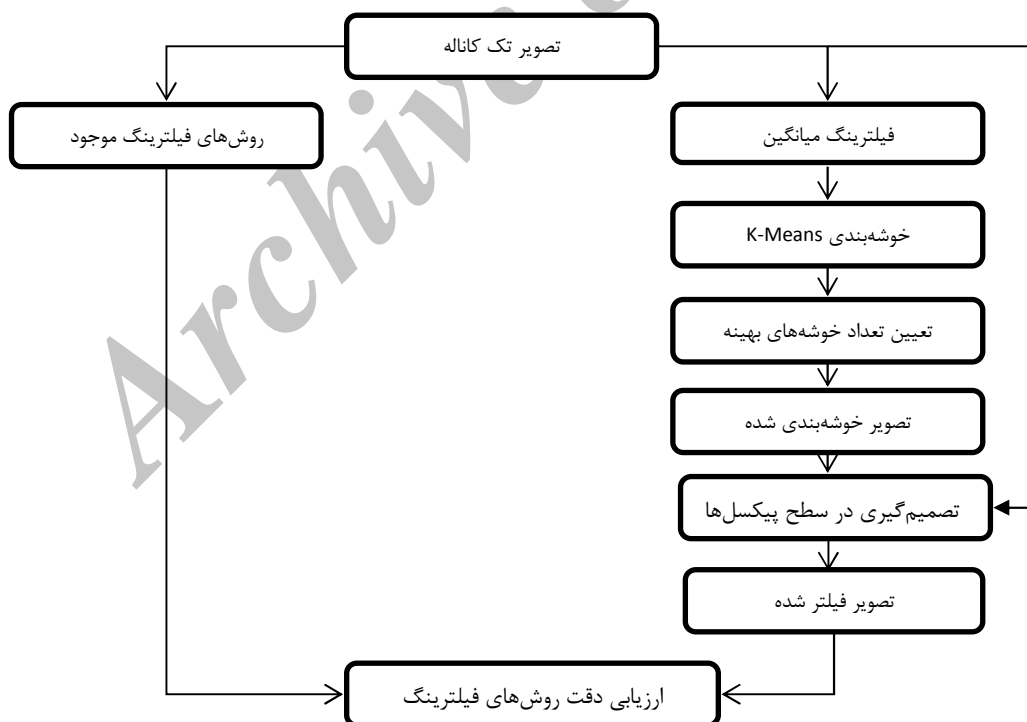
۲-۲- تعیین تعداد خوشه‌های بهینه

برای تعیین تعداد خوشه‌های بهینه، یکی از روش‌ها استفاده از معیارها و شاخص‌هایی نظیر عرض متوسط سیلوهیت^۱، کالینسکی هاراباس^۲، معیار دان^۳ و دیویس بولدین^۴ است [۳۱، ۳۲]. این شاخص‌ها بر اساس تراکم خوشه‌ها و فواصلی که میان خوشه‌ها وجود دارد توانایی تشخیص تعداد خوشه‌های بهینه را دارند. با توجه به تئوری مشابه که در مفاهیم این روش‌ها قرار گرفته است، در این تحقیق از شاخص دیویس بولدین برای یافتن تعداد خوش‌های بهینه استفاده می‌شود.

موجود شامل Lee، میانگین، میانه، Gamma و Enhance Lee فیلتر می‌شود تا نتایج این روش‌ها با روش پیشنهادی مقایسه شوند. سپس برای پیاده‌سازی روش پیشنهادی ابتدا برای کاهش پدیده Speckle از یک فیلتر میانگین استفاده می‌شود. این مرحله برای بهبود نتایج خوشه‌بندی در مرحله بعد انجام می‌شود. پس از کاهش پدیده Speckle، از روش خوشه‌بندی K-Means برای خوشه‌بندی تصویر فیلتر شده استفاده می‌شود. بهترین تعداد خوشه با استفاده از معیارهای خوشه‌بندی بهینه تعیین خواهد شد. پس از تولید تصویر خوشه‌بندی شده، تصویر فیلتر شده نهایی با استفاده از تصویر خام و تصویر خوشه‌بندی شده در مرحله تصمیم‌گیری در سطح پیکسل تعیین خواهد شد. در نهایت روش پیشنهادی و روش‌های فیلترینگ موجود با استفاده از معیارهای ارزیابی مورد مقایسه قرار خواهند گرفت.

۲-۱- خوشه‌بندی K-Means

خوشه‌بندی K-Means یکی از محبوب‌ترین روش‌های قطعه‌بندی تصاویر سنجش از دور می‌باشد [۲۷-۲۹]. در این روش، مرکز خوشه‌ها و تصویر خوشه‌بندی شده پس از یک عملیات تکراری محاسبه می‌شوند. ابتدا به تعداد خوشه‌ها، مرکز خوشه به صورت اتفاقی تعیین می‌گردد. سپس پیکسل-



شکل ۱- مدل مفهومی روش پیشنهادی در این پژوهش

- ۱ Average Silhouette Width Index
- ۲ Calinski-Harabasz Index
- ۳ Dunn
- ۴ Davis Bouldian

می‌شود. سپس در این پنجره شماره خوشه پیکسل مرکزی با استفاده از تصویر خوشه‌بندی مشخص می‌شود (به عبارت دیگر خوشه متناظر پیکسل مرکزی تعیین می‌شود)، بعد از این مرحله در پنجره مورد نظر پیکسل‌هایی که دارای شماره خوشه برابر با پیکسل مرکزی می‌باشند (خوشه‌های متناظر با خوشه پیکسل مرکزی دارا هستند) مشخص می‌شوند. در نهایت مقدار فیلتر شده از میانگین‌گیری از درجات خاکستری خام پیکسل‌های دارای خوشه مشابه با پیکسل مرکزی بدست می‌آید. بنابراین روش پیشنهادی دارای دو مزیت عمده است که مزیت اول مربوط به میانگین‌گیری از پیکسل‌های موجود در مناطق هموزن که باعث کاهش Speckle می‌شود، همچنین عدم میانگین‌گیری در پیکسل‌های ایزوله که باعث باقی ماندن مقادیر درجه خاکستری آنها خواهد شد. مزیت دوم این روش نسبت به روش‌های موجود این است که با تعداد کلاس‌های بیشتر، عملیات فیلترینگ در سطح کلاس‌ها انجام خواهد شد. در شکل مقدار فیلتر شده برای ۳ منطقه هموزن، نزدیک لبه و اهداف ایزوله توسط روش پیشنهادی نمایش داده شده است.

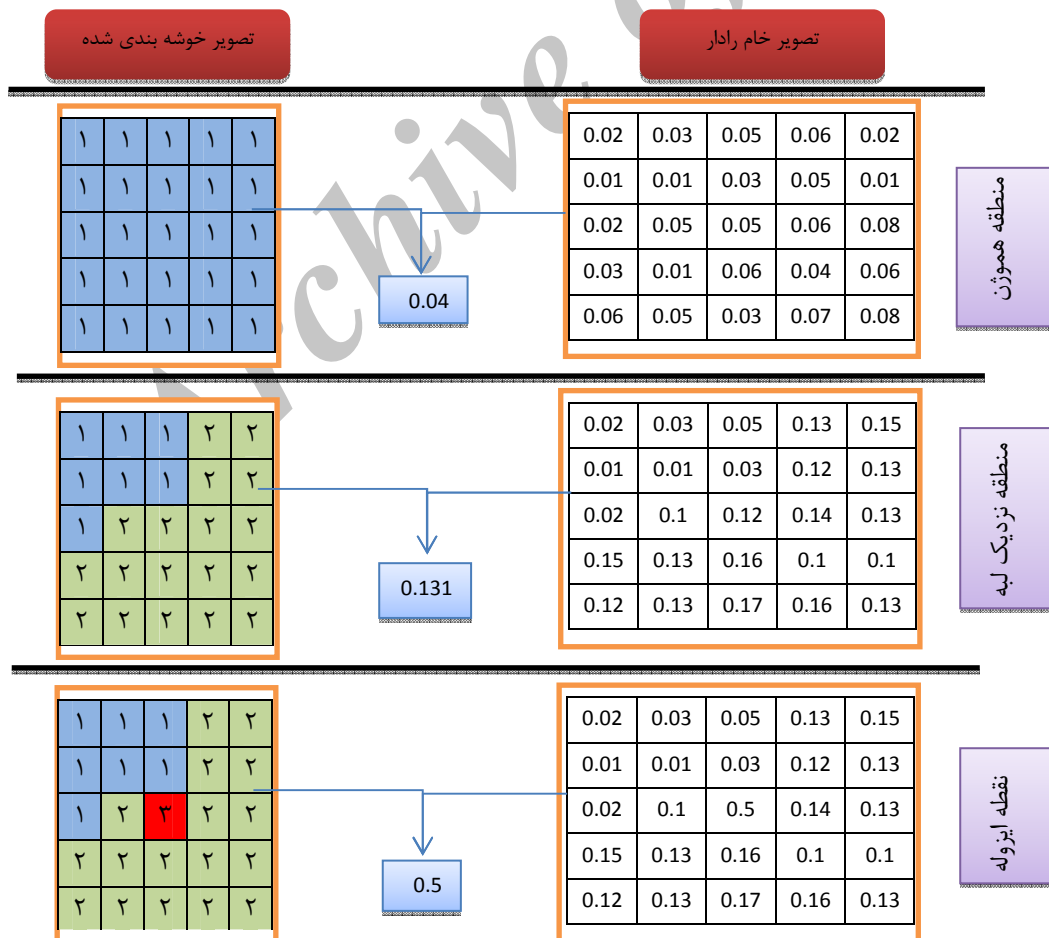
برای محاسبه شاخص دیویس بولدین، ابتدا، مجموع فاصله تمام پیکسل‌ها از مرکز خوشه‌شان (δ_k) بدست آورده می‌شود (خوشه k ام)، سپس فاصله میان مرکز خوشه‌ها ($\Delta_{k'k}$) محاسبه می‌شود. در نهایت مقدار این شاخص از رابطه ۴ محاسبه خواهد شد. مقدار کمتر این شاخص نشان‌دهنده تراکم بیشتر خوشه‌ها و فاصله بیشتر میان مراکز خوشه‌ها می‌باشد. بنابراین با تغییر تعداد خوشه‌ها کوچک‌ترین مقدار این شاخص نشان‌دهنده تعداد خوشه بهینه می‌باشد [۳۱].

$$C = \frac{1}{k} \sum_{k=1}^K \max_{k \neq k'} \left(\frac{\delta_k + \delta_{k'}}{\Delta_{k'k}} \right) \quad (4)$$

در رابطه ۴، K تعداد خوشه‌ها و k و k' متناظر شماره خوشه‌های هستند.

۲-۳- تصمیم‌گیری در سطح پیکسل

در این مرحله، تصویر خوشه‌بندی شده و تصویر خام در یک مرحله تصمیم‌گیری وارد می‌شوند. تصمیم‌گیری در سطح یک پنجره انجام خواهد گرفت. در این بخش یک پنجره مشابه پنجره‌های فیلترهای مرسوم در نظر گرفته



شکل ۲- نمایش شماتیک نتیجه حاصل از فیلترینگ در ۳ ناحیه توسط روش پیشنهادی

۲-۳- ارزیابی دقت روش‌های فیلترینگ

در رابطه فوق I_f مقدار فیلتر شده تصویر نویزی I_0 است. کمتر بودن این معیار نشان دهنده کارایی بالای فیلتر است [۳۳]. در رابطه ۶، $mean$ و Var نشان‌دهنده عملگرهای میانگین و واریانس هستند.

پس از اعمال یک فیلتر کاهش پدیده Speckle باید میزان کاهش توان تفکیک مکانی در اثر فیلتر بر روی لبه بررسی شود. معیارهای حفظ لبه میزان کارایی روش‌ها در حفظ لبه را به صورت کمی بررسی می‌کنند. به عنوان مثال EEI یک شاخص برای ارزیابی میزان حفظ لبه است که از رابطه ۷ محاسبه می‌شود. این معیار در لبه‌ها نظیر لبه‌های مشترک میان مناطق دریاچه با خشکی یا لبه‌های مشترک میان رودخانه با خشکی محاسبه می‌شود [۳۳].

$$EEI = \frac{\sum |DN_{1f} - DN_{2f}|}{\sum |DN_{10} - DN_{20}|} \quad (7)$$

در رابطه فوق، DN_{1f} و DN_{2f} مقادیر فیلتر شده پیکسل‌های دو طرف لبه و DN_{10} و DN_{20} مقادیر درجات خاکستری خام برای پیکسل‌های دو طرف لبه می‌باشند. این معیار معمولاً کمتر از یک است و مقدار بزرگتر و نزدیک به یک نشان دهنده حفظ بیشتر لبه است.

۳- منطقه مورد مطالعه

منطقه مطالعاتی مربوط به یک جنگل تحقیقاتی به نام Petawava واقع در کنار رودخانه Chalk، Ontario با طول و عرض جغرافیایی ($45^{\circ}57'N, 77^{\circ}47'W$) در یکی از ایالت‌های شرقی کشور کانادا می‌باشد. در این پژوهش از تصویر Radarsat-1، که در تاریخ ۲۸ آگوست سال ۲۰۰۸ و مد f5 اخذ شده است، استفاده خواهد شد. این سنجنده در طول موج C و پلاریزاسیون HH تصویر اخذ می‌کند. در شکل ۲ تصویر Radarsat-1 از منطقه Petawava نمایش داده شده است که روش‌های فیلترینگ این پژوهش بر روی این تصویر پیاده‌سازی خواهند شد.

پس از ارائه یک فیلتر جدید و پیاده‌سازی آن در مناطق مختلف، باید کارایی روش به صورت کمی و کیفی ارزیابی شود. فیلترهای ارائه شده از جهات مختلف نظیر میزان کارایی در کاهش نویز، حفظ لبه، حفظ اطلاعات عوارض (بافت) بررسی می‌شوند، علاوه بر آن فیلترهای ارائه شده باید با فرض‌های منطقی و درست ارائه شوند [۲۶، ۳۳]. بررسی معیارهای مختلف در فیلترهای موجود ممکن است دارای نتایج مختلف و متناقض باشند [۳۴] به عبارت دیگر ممکن است یک روش، توانایی بالایی در کاهش پدیده Speckle در مناطق هموزن دارا باشد اما نتواند لبه‌ها را به خوبی حفظ کند. به طور کلی روش‌های ارزیابی فیلترها به دو دسته کلی روش‌های ارزیابی کمی و کیفی تقسیم می‌شوند. در روش‌های کیفی، از مشاهده بصری نتایج حاصل از روش فیلترینگ نتایج مورد ارزیابی قرار خواهند گرفت. در روش‌های کمی، از معیارهای حفظ اطلاعات رادیومتریکی و حفظ اطلاعات لبه برای ارزیابی روش فیلترینگ استفاده می‌شود. در این پژوهش از دو معیار Equivalent Number of Looks (ENL) و Speckle Suppression Index (SSI) برای ارزیابی حفظ اطلاعات رادیومتریکی و معیار Edge-Enhanced Index (EEI) برای ارزیابی حفظ اطلاعات لبه استفاده می‌شود.

شاخص ENL یکی از معیارهای پرکاربرد در ارزیابی فیلترها می‌باشد که در یک منطقه هموزن محاسبه می‌شود که از رابطه ۵ محاسبه می‌شود [۳۵].

$$ENL = \left(\frac{mean}{Standard\ deviation} \right)^2 \quad (5)$$

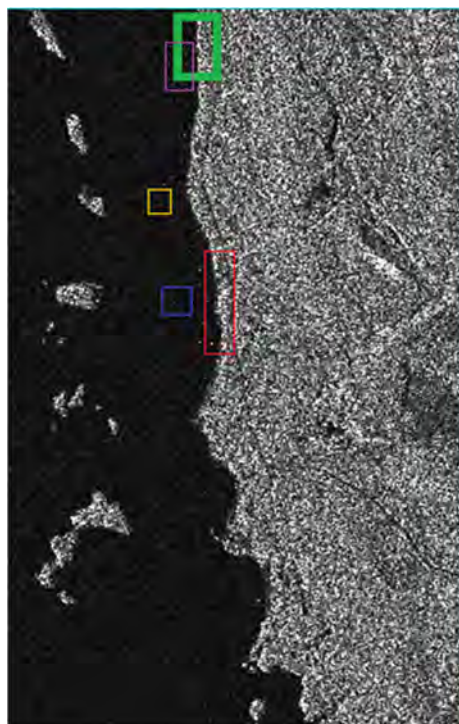
هر چقدر مقدار شاخص ENL در یک منطقه هموزن بیشتر باشد نشان از توانایی بالای روش در کاهش پدیده Speckle در مناطق هموزن دارد. در رابطه ۵، $mean$ و $Standard\ deviation$ به ترتیب میانگین و انحراف معیار مقادیر تصویر SAR در منطقه هموزن می‌باشند.

یکی دیگر از شاخص‌های اندازه‌گیری میزان کاهش پدیده Speckle، شاخص SSI است که از رابطه ۶ و در مناطق هموزن محاسبه می‌شود.

$$SSI = \frac{\sqrt{Var(I_f)} \cdot mean(I_0)}{mean(I_f) \cdot \sqrt{Var(I_0)}} \quad (6)$$

۴- پیاده‌سازی و بحث

برای پیاده‌سازی روش پیشنهادی، ابتدا منطقه‌ای به ابعاد ۵۰۲ در ۷۸۹ پیکسل در منطقه مطالعاتی Petawava انتخاب گردید. سپس برای کاهش پدیده Speckle و بهبود خوشه‌بندی از فیلتر میانگین با ابعاد ۳ در ۳ استفاده شد. پس از کاهش پدیده Speckle، روش خوشه‌بندی K-Means بر روی تصویر پیاده‌سازی شد. روش خوشه‌بندی صرفاً با تعداد تکرار ۲۰۰ در منطقه اجرا گردید و شرط دیگری برای اتمام فرآیند تعیین نشد. در مرحله تعیین تعداد خوشه‌های بهینه از شاخص دیویس بولدین استفاده شد. در جدول ۱، مقدار این شاخص برای منطقه مطالعاتی و تعداد خوشه‌های مختلف نمایش داده شده است. بر اساس جدول ۱، مقدار کمتر شاخص دیویس بولدین نشان‌دهنده بهتر بودن خوشه‌بندی می‌باشد، بنابراین در تعداد خوشه برابر ۳ در منطقه مطالعاتی بهترین نتیجه حاصل شده است. در نهایت تصویر خوشه‌بندی با تعداد خوشه‌های برابر ۳ به مرحله بعدی روش پیشنهادی وارد خواهد شد.



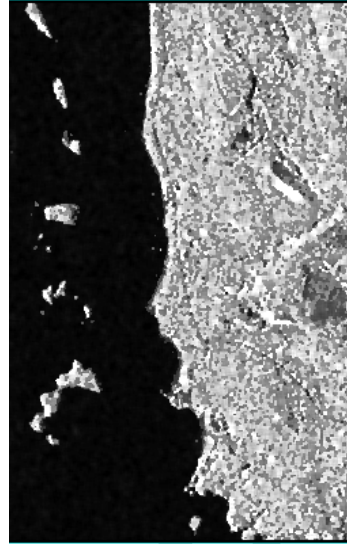
شکل ۲- تصویر منطقه مورد مطالعه بدون اعمال فیلترهای کاهش پدیده Speckle به همراه مناطق هموزن و لبه برای ارزیابی نتایج

جدول ۱- مقدار شاخص دیویس بولدین برای تعداد خوشه‌های مختلف حاصل از خوشه‌بندی تصویر مورد مطالعه

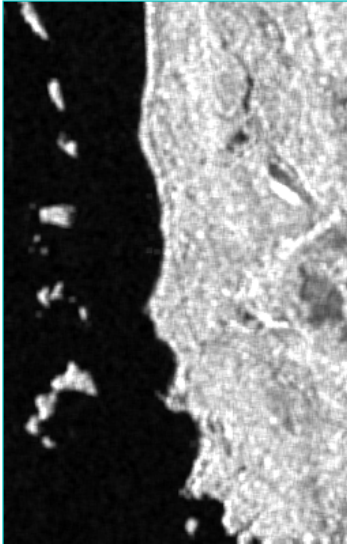
تعداد خوشه	۳	۴	۵	۶	۷
مقدار شاخص دیویس بولدین	۰/۲۸۸۷	۰/۳۴۵۲	۰/۳۷۷۸	۰/۴۰۱	۰/۴۱۷۱

تحقیق پیاده‌سازی شده‌اند، در ابعاد پنجره ۹ در ۹ نمایش داده شده است. از نظر بررسی بصری، روش Lee در مناطق تیره، که مناطق هموزن هستند، کمترین کاهش را نسبت به روش‌های دیگر داشته است به طوری که پدیده Speckle به وضوح در آن دیده می‌شود. نتیجه حاصل از بررسی روش میانگین نشان دهنده کاهش اطلاعات در لبه عوارض است. در مناطق تیره، که رودخانه است، مقدار کاهش پدیده Speckle در روش پیشنهادی و میانگین بیشتر از روش‌های دیگر بوده است. روش پیشنهادی در حفظ عوارض نقطه‌ای نسبت به روش‌های دیگر بهتر عمل کرده است به طوری که در این عوارض فیلتر میانگین و میانه کمترین دقت را از نظر بصری داشته‌اند.

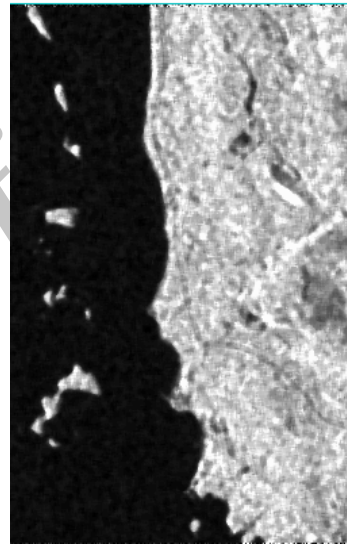
در مرحله تصمیم‌گیری نیاز است تا در یک پنجره ابتدا خوشه پیکسل مرکزی مشخص گردد و سپس در پنجره ذکر شده پیکسل‌هایی که خوشه مشابه با پیکسل مرکزی دارند مشخص شوند. در نهایت مقدار فیلتر شده از میانگین پیکسل‌های تصویر خام که دارای یک خوشه در پنجره هستند، تعیین شود. در این تحقیق نتایج روش پیشنهادی در ابعاد پنجره ۳، ۵، ۷ و ۹ تعیین گردید. پس از پیاده‌سازی روش پیشنهادی، برای مقایسه نتایج روش از روش‌های فیلترینگ میانگین، میانه، Lee، Enhance Lee و Gamma استفاده شد. بنابراین روش‌های ذکر شده در ابعاد پنجره ۳، ۵، ۷ و ۹ در نرم افزار ENVI 4.7 پیاده‌سازی شدند. در شکل ۲، تصویر حاصل از روش ۶، که در این



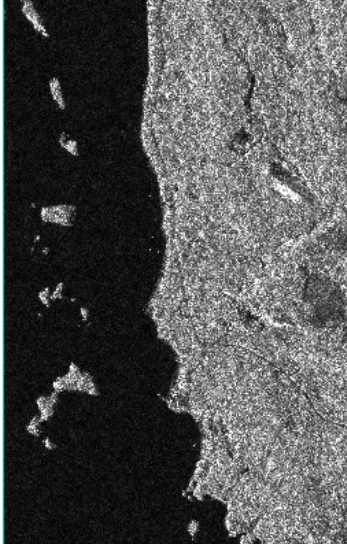
الف) روش پیشنهادی



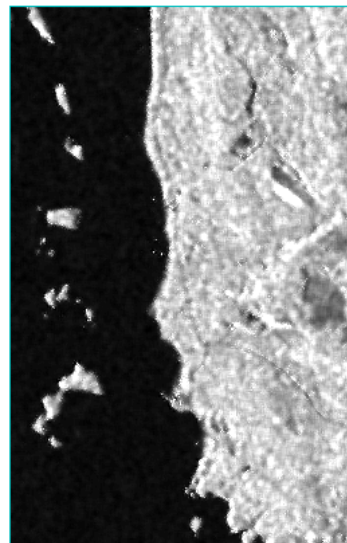
ب) روش میانگین



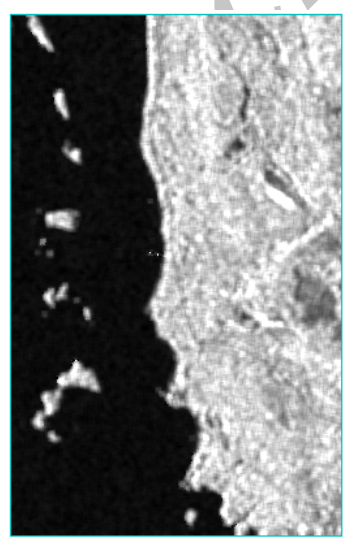
ج) روش میانه



د) روش Lee



ه) روش Enhance Lee



و) روش Gamma

شکل ۴- نتایج روش‌های فیلترینگ مختلف در ابعاد پنجره ۹ در ۹

در مرز عارضه است که به علت استفاده از مقادیر پیکسل - های عارضه مجاور در میانگین گیری ایجاد می شود. روش پیشنهادی به علت استفاده از تصویر خوشه بندی شده برای فیلتر کردن، نتایج به مراتب بهتر نسبت به روش های دیگر داشته است که نشان دهنده کارایی بالای این روش در مناطق هموزن نزدیک مرز عوارض می باشد. افزایش کمتر مقدار ENL در منطقه ۳ نسبت به منطقه ۱ و ۲ در روش پیشنهادی به علت در نظر نگرفتن بعضی پیکسل ها در پنجره مورد نظر به علت عدم تناظر خوشه این پیکسل ها با پیکسل مرکزی است که باعث در نظر نگرفتن این پیکسل ها در فرآیند میانگین گیری می شود. این امر باعث کم شدن تعداد پیکسل های موجود در یک پنجره برای میانگین گیری می شود که این موضوع باعث افزایش کمتر ENL خواهد شد. تمامی بحث های فوق برای شاخص SSI نیز صدق می کند. به عنوان نتیجه گیری می توان بیان کرد که همواره میانگین گیری باعث افزایش مقدار ENL یا کاهش SSI نخواهد شد که این موضوع در مناطق هموزن نزدیک به مرز عارضه مشهود است یا به عبارت دیگر میانگین گیری در مناطق هموزن نزدیک لبه ها باعث خطا خواهد شد.

در منطقه ۳ با افزایش ابعاد پنجره، روش های تطابقی نظیر Enhanced Lee نتایج به مراتب بهتر نسبت به روش میانگین داشته است که به علت خاصیت تطابقی این روش می باشد. نتیجه روش پیشنهادی نسبت به روش های تطابقی از نظر معیار ENL و SSI بهتر بوده است. از نظر معیار SSI و ENL روش Lee دارای کمترین کاهش پدیده Speckle در منطقه مطالعاتی بوده است.

برای ارزیابی نتایج روش های فیلترینگ در حفظ لبه، دو منطقه (این دو منطقه کاملاً متفاوت از مناطق هموزن هستند و رنگ این مناطق در جدول ۲ متناظر رنگ مناطق در شکل ۲ است) لبه برای آزمایش نتایج روش های فیلترینگ انتخاب شدند. مطابق جدول ۲ با افزایش ابعاد پنجره ها مقدار شاخص EEI در روش ها کاهش می یابد که نشان دهنده حذف اطلاعات لبه با افزایش پنجره می باشد. کاهش اطلاعات لبه در روش ها به صورت خطی و یکسان برای تمامی روش ها نمی باشد به طوری که روش میانگین با افزایش ابعاد پنجره نزول بیشتری در این شاخص دارد. مقدار EEI روش Lee به علت کاهش اندک پدیده Speckle توسط این روش نسبت به روش های دیگر بهتر

برای ارزیابی کمی نتایج از ۳ معیار ENL، SSI و EEI استفاده شد. برای اجرای دو معیار ENL و SSI نیاز به مناطق هموزن است. برای این منظور ۳ منطقه در تصویر مطالعاتی انتخاب گردید که منطقه ۱ و منطقه ۲ در میان منطقه هموزن و منطقه ۳ در نزدیکی مرز منطقه هموزن با مناطق دیگر (رنگ این مناطق در جدول ۲ متناظر رنگ مناطق در شکل ۲ است) در انتخاب شد. انتخاب منطقه ۳ به علت بررسی تأثیر فیلترینگ ها در مناطق هموزن نزدیک لبه می باشد. در جدول ۲ مقدار ENL و SSI برای ۳ منطقه و روش های پیاده سازی شده، نمایش داده شده است. مقدار ENL برای این ۳ منطقه در تصویر خام برابر ۳/۳۳، ۳/۲۵ و ۳/۰۴ است. مطابق جدول ۲، مقدار ENL و SSI در ۳ منطقه با افزایش ابعاد پنجره در تمامی روش ها به ترتیب افزایش و کاهش می یابد. در منطقه ۱ و ۲، که مناطق هموزن دور از مرز عارضه هستند، بیشترین مقدار ENL مربوط به روش میانگین و روش پیشنهادی در تمامی پنجره ها بوده است. به عبارت دیگر از نظر شاخص ENL در این منطقه این دو روش بهترین نتیجه را داشته اند. علت این موضوع برای روش پیشنهادی صحت خوشه بندی در مناطق هموزن بوده است به عبارت دیگر خوشه بندی تمامی یک منطقه هموزن به یک خوشه باعث می شود که روش پیشنهادی مشابه روش میانگین عمل کند. روش فیلتر Gamma نیز در برخی از پنجره ها نتایج مشابه روش میانگین و روش پیشنهادی داشته است. از نظر معیار SSI نیز در منطقه ۱ و ۲ روش میانگین و پیشنهادی بهترین نتیجه را نسبت به روش های دیگر داشته اند. بهترین نتایج در جدول ۲ به صورت پررنگ نمایش داده شده است. به عنوان یک نتیجه می توان بیان کرد که در مناطق هموزن دور مرز عارضه، روش میانگین یک روش کارآمد جهت کاهش پدیده Speckle است.

در منطقه ۳ که یک منطقه هموزن واقع در مرز عارضه است، مطابق جدول ۲، با افزایش ابعاد پنجره روش پیشنهادی بهترین نتیجه را نسبت به روش های دیگر دارا می باشد، به طوری که در مقایسه با منطقه ۱ و ۲، که روش های میانگین و Gamma نتایج مشابه روش پیشنهادی داشتند، مقدار ENL این منطقه با ابعاد پنجره ۹ در ۹ برای روش های پیشنهادی، میانگین و Gamma به ترتیب برابر ۱۱۹/۴۰، ۴۰/۵۷ و ۳۵/۲۲ بوده است. این موضوع نشان دهنده کاهش مقدار ENL با میانگین گیری

بوده است. مقدار شاخص EEI برای روش پیشنهادی بسیار خوب ارزیابی می‌شود به طوری که بهترین نتایج برای روش پیشنهادی و Lee بوده است. بنابراین روش

جدول ۲- مقدار شاخص‌های ENL، SSI و EEI برای روش‌های مختلف این تحقیق در مناطق هموزن و لبه

		ENL			SSI			EEI	
		منطقه ۱	منطقه ۲	منطقه ۳	منطقه ۱	منطقه ۲	منطقه ۳	منطقه ۱	منطقه ۲
	تصویر خام	۳/۳۲۷۳	۳/۲۵۳۵	۳/۰۴۴۹	-	-	-	-	-
پنجره ۲ در ۲	روش پیشنهادی	۱۹/۸۷۵۹	۱۶/۷۶۴۹	۱۵/۶۷۸۴	۰/۱۲۲۸	۰/۱۳۵۴	۰/۱۴۴۷	۰/۹۸۰۵	۰/۹۹۴۷
	روش Enhance Lee	۱۸/۷۶۹۳	۱۶/۰۵۴۸	۱۴/۸۶۶۰	۰/۱۲۶۳	۰/۱۳۸۴	۰/۱۴۸۶	۰/۹۵۱۹	۰/۹۵۹۶
	روش Gamma	۱۹/۸۷۵۹	۱۶/۷۷۰۰	۱۵/۶۷۰۱	۰/۱۲۲۸	۰/۱۳۵۴	۰/۱۴۴۸	۰/۹۴۸۴	۰/۹۶۵۲
	روش Lee	۶/۴۵۷۴	۶/۱۲۹۰	۵/۵۷۳۱	۰/۲۱۵۴	۰/۲۲۲۹	۰/۲۴۲۷	۰/۹۷۲۸	۰/۹۷۵۹
	روش میانه	۱۲/۱۶۹۲	۱۱/۸۵۱۹	۱۱/۵۲۵۵	۰/۱۵۶۹	۰/۱۶۱۰	۰/۱۶۸۸	۰/۹۰۸۳	۰/۸۹۲۷
	روش میانگین	۱۹/۸۷۵۹	۱۶/۷۶۴۹	۱۵/۶۷۸۴	۰/۱۲۲۸	۰/۱۳۵۴	۰/۱۴۴۷	۰/۹۴۹۰	۰/۹۶۴۴
پنجره ۵ در ۵	روش پیشنهادی	۵۳/۶۳۵۲	۴۰/۴۴۴۰	۴۰/۳۲۹۰	۰/۰۷۴۷	۰/۰۸۷۲	۰/۰۹۰۲	۰/۹۶۹۳	۰/۹۶۵۶
	روش Enhance Lee	۵۱/۲۷۱۶	۳۵/۳۲۲۹	۳۳/۹۰۳۶	۰/۰۷۶۴	۰/۰۹۳۳	۰/۰۹۸۴	۰/۹۱۶۵	۰/۹۴۶۳
	روش Gamma	۵۳/۶۳۵۲	۴۰/۴۴۴۰	۴۰/۱۵۵۷	۰/۰۷۴۷	۰/۰۸۷۲	۰/۰۹۰۴	۰/۸۸۹۹	۰/۹۵۰۶
	روش Lee	۷/۵۷۱۲	۶/۹۳۰۸	۶/۳۵۸۴	۰/۱۹۸۹	۰/۲۱۰۶	۰/۲۲۷۲	۰/۹۶۱۳	۰/۹۷۰۵
	روش میانه	۳۱/۶۰۱۷	۳۲/۳۸۴۸	۳۰/۷۰۴۴	۰/۰۹۷۴	۰/۰۹۷۴	۰/۱۰۳۴	۰/۸۵۹۳	۰/۸۱۹۲
	روش میانگین	۵۳/۶۳۵۲	۴۰/۴۴۴۰	۴۰/۱۵۵۷	۰/۰۷۴۷	۰/۰۸۷۲	۰/۰۹۰۴	۰/۸۹۲۹	۰/۹۴۸۱
پنجره ۷ در ۷	روش پیشنهادی	۱۱۱/۷۷۱۸	۸۱/۴۲۸۲	۷۵/۷۹۳۶	۰/۰۵۱۸	۰/۰۶۱۴	۰/۰۶۵۸	۰/۹۵۶۸	۰/۹۵۴۵
	روش Enhance Lee	۱۰۴/۴۱۲۴	۶۷/۳۹۴۰	۵۴/۹۲۸۱	۰/۰۵۳۶	۰/۰۶۷۵	۰/۰۷۷۳	۰/۸۸۷۱	۰/۹۲۲۵
	روش Gamma	۱۱۱/۷۷۱۸	۸۱/۴۲۸۲	۶۴/۶۳۷۵	۰/۰۵۱۸	۰/۰۶۱۴	۰/۰۷۱۳	۰/۸۲۰۱	۰/۹۲۹۲
	روش Lee	۷/۹۴۷۹	۷/۳۲۷۳	۶/۷۱۴۳	۰/۱۹۴۲	۰/۲۰۴۸	۰/۲۲۱۱	۰/۹۵۰۲	۰/۹۶۲۴
	روش میانه	۵۹/۶۲۲۸	۶۲/۰۳۱۹	۵۹/۶۰۲۰	۰/۰۷۰۹	۰/۰۷۰۴	۰/۰۷۴۲	۰/۸۱۵۰	۰/۷۶۴۱
	روش میانگین	۱۱۱/۷۷۱۸	۸۱/۴۲۸۲	۶۴/۶۳۷۵	۰/۰۵۱۸	۰/۰۶۱۴	۰/۰۷۱۳	۰/۸۲۷۲	۰/۹۲۳۴
پنجره ۹ در ۹	روش پیشنهادی	۱۶۴/۶۳۳۹	۱۵۰/۲۹۱۴	۱۱۹/۴۰۲۶	۰/۰۴۲۷	۰/۰۴۵۲	۰/۰۵۲۴	۰/۹۴۵۴	۰/۹۴۹۲
	روش Enhance Lee	۱۵۲/۰۶۱۳	۱۱۳/۵۱۸۰	۵۷/۷۷۴۶	۰/۰۴۴۴	۰/۰۵۲۰	۰/۰۷۵۴	۰/۸۶۶۱	۰/۸۹۳۶
	روش Gamma	۱۶۴/۶۳۳۹	۱۵۰/۲۹۱۴	۳۵/۲۲۴۹	۰/۰۴۲۷	۰/۰۴۵۲	۰/۰۹۶۵	۰/۷۵۴۳	۰/۸۹۶۸
	روش Lee	۸/۱۱۲۲	۷/۵۹۱۷	۶/۷۸۴۵	۰/۱۹۲۲	۰/۲۰۱۲	۰/۲۲۰۰	۰/۹۴۱۹	۰/۹۵۳۴
	روش میانه	۸۸/۳۸۷۷	۱۱۰/۹۶۵۲	۸۷/۰۹۳۱	۰/۰۵۸۲	۰/۰۵۲۶	۰/۰۶۱۴	۰/۷۶۲۸	۰/۷۱۲۲
	روش میانگین	۱۶۴/۶۳۳۹	۱۵۰/۲۹۱۴	۴۰/۵۷۲۴	۰/۰۴۲۷	۰/۰۴۵۲	۰/۰۹۰۰	۰/۷۶۴۶	۰/۸۹۱۰

۵- نتیجه‌گیری

اطلاعات رادیومتریکی در مناطق هموزن نزدیک مرز عوارض نشان دهنده کارایی بالای روش پیشنهادی است. مقدار ENL با افزایش ابعاد پنجره برای فیلترینگ افزایش می‌یابد اما این افزایش در مناطق نزدیک لبه عوارض بسیار کم است. نتایج حاصل از معیار حفظ لبه در دو منطقه برای روش‌های مختلف نشان‌دهنده کاهش اطلاعات لبه با افزایش ابعاد پنجره در تمام روش‌های فیلترینگ می‌باشد. نتایج معیار EEI نشان‌دهنده این است که روش پیشنهادی نسبت به روش‌های دیگر اطلاعات لبه را بیشتر حفظ می‌کند که این موضوع در مشاهدات بصری نیز مشخص است.

در این تحقیق از روش خوشه‌بندی K-Means برای خوشه‌بندی تصویر استفاده شده است، که پیشنهاد می‌شود سایر روش‌های خوشه‌بندی برای ارزیابی میزان اثرگذاری در

در این پژوهش یک روش جدید برای کاهش پدیده Speckle در تصاویر تک کاناله رادار با استفاده از روش‌های خوشه‌بندی ارائه گردید. در روش پیشنهادی با استفاده از تصویر خوشه‌بندی شده و یک پنجره مقدار فیلتر شده پیکسل‌ها محاسبه گردید. نتایج حاصل از تفسیر بصری حاصل از روش پیشنهادی و روش‌های فیلترینگ دیگر نشان دهنده کاهش بیشتر پدیده Speckle و حفظ لبه در روش پیشنهادی نسبت به روش‌های دیگر بوده است. نتایج کمی معیارهای حفظ اطلاعات رادیومتریکی در مناطق درون منطقه هموزن نشان‌دهنده کارایی بالا میانگین‌گیری جهت کاهش پدیده Speckle است. نتایج کمی معیارهای حفظ

در تحقیقات گذشته [۲۲، ۳۶] دقت طبقه‌بندی با روش‌های مختلف بر روی تصویر Radarsat-1 بین ۵۰ تا ۷۰ درصد بوده است، توصیه می‌شود در تحقیقات آینده برای بهبود دقت خوشه‌بندی از ویژگی‌های دیگر نظیر بافت یا ویژگی‌های بهینه یا تصاویر پلاریمتری برای بهبود نتایج استفاده گردد. در تحقیقات آینده به توسعه این روش برای تصاویر پلاریمتری خواهیم پرداخت.

نتایج بررسی شوند. در روش پیشنهادی از شاخص دیویس بولدین برای تعیین تعداد خوشه‌های بهینه استفاده گردید، توصیه می‌شود سایر روش‌های تعیین تعداد خوشه‌های بهینه در تحقیقات آتی مورد استفاده قرار گیرند. روش این پژوهش یک ارتباط مستقیم با نتیجه خوشه‌بندی دارد، به عبارت دیگر خطا در خوشه‌بندی باعث ایجاد خطا در نتایج نهایی روش فیلترینگ خواهد شد. در منطقه مورد مطالعه و

مراجع

- [1] J.-S. Lee, L. Jurkevich, P. Dewaele, P. Wambacq, and A. Oosterlinck, "Speckle filtering of synthetic aperture radar images: A review," *Remote Sensing Reviews*, vol. 8, pp. 313-340, 1994.
- [2] J. W. Goodman, "Some fundamental properties of speckle," *JOSA*, vol. 66, pp. 1145-1150, 1976.
- [3] A. Rafiee, M. H. Moradi, and M. R. Farzaneh, "Novel genetic-neuro-fuzzy filter for speckle reduction from sonography images," *Journal of Digital Imaging*, vol. 17, pp. 292-300, 2004.
- [4] J.-S. Lee and E. Pottier, *Polarimetric radar imaging: from basics to applications*: CRC press, 2009.
- [5] J. A. Richards, *Remote sensing with imaging radar*: Springer, 2009.
- [6] J.-S. Lee and I. Jurkevich, "Segmentation of SAR images," *Geoscience and Remote Sensing, IEEE Transactions on*, vol. 27, pp. 674-680, 1989.
- [7] C. Elachi, "Spaceborne radar remote sensing: applications and techniques," New York, IEEE Press, 1988, 285 p., vol. 1, 1988.
- [8] L. J. Porcello, N. G. Massey, R. B. Innes, and J. M. Marks, "Speckle reduction in synthetic-aperture radars," *JOSA*, vol. 66, pp. 1305-1311, 1976.
- [9] J.-S. Lee, "Speckle analysis and smoothing of synthetic aperture radar images," *Computer graphics and image processing*, vol. 17, pp. 24-32, 1981.
- [10] J.-S. Lee, "A simple speckle smoothing algorithm for synthetic aperture radar images," *Systems, Man and Cybernetics, IEEE Transactions on*, pp. 85-89, 1983.
- [11] A. Achim, E. E. Kuruoglu, and J. Zerubia, "SAR image filtering based on the heavy-tailed Rayleigh model," *Image Processing, IEEE Transactions on*, vol. 15, pp. 2686-2693, 2006.
- [12] A. Baraldi and F. Parmiggiani, "A refined Gamma MAP SAR speckle filter with improved geometrical adaptivity," *Geoscience and Remote Sensing, IEEE Transactions on*, vol. 33, pp. 1245-1257, 1995.
- [13] J.-S. Lee, J.-H. Wen, T. L. Ainsworth, K.-S. Chen, and A. J. Chen, "Improved sigma filter for speckle filtering of SAR imagery," *Geoscience and Remote Sensing, IEEE Transactions on*, vol. 47, pp. 202-213, 2009.
- [14] T. Bianchi, F. Argenti, and L. Alparone, "Segmentation-based MAP despeckling of SAR images in the undecimated wavelet domain," *Geoscience and Remote Sensing, IEEE Transactions on*, vol. 46, pp. 2728-2742, 2008.
- [15] S. Solbo and T. Eltoft, "Homomorphic wavelet-based statistical despeckling of SAR images," *Geoscience and Remote Sensing, IEEE Transactions on*, vol. 42, pp. 711-721, 2004.
- [16] B. B. Saevarsson, J. R. Sveinsson, and J. A. Benediktsson, "Combined wavelet and curvelet denoising of SAR images," in *Geoscience and Remote Sensing Symposium, 2004. IGARSS'04. Proceedings. 2004 IEEE International*, 2004, pp. 4235-4238.

- [17] J. R. Sveinsson and J. A. Benediktsson, "Combined wavelet and contourlet denoising of SAR images," in *Geoscience and Remote Sensing Symposium*, 2008. IGARSS 2008. IEEE International, 2008, pp. III-1150-III-1153.
- [18] K. K. Gupta and R. Gupta, "Despeckle and geographical feature extraction in SAR images by wavelet transform," *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, vol. 62, pp. 473-484, 2007.
- [19] S. M. Ali, M. Y. Javed, N. S. Khattak, and A. Mohsin, "Despeckling of synthetic aperture radar images using inner product spaces in undecimated wavelet domain," 2008.
- [20] L. M. Novak and M. C. Burl, "Optimal speckle reduction in polarimetric SAR imagery," *Aerospace and Electronic Systems*, IEEE Transactions on, vol. 26, pp. 293-305, 1990.
- [21] J.-S. Lee, M. Grunes, and S. A. Mango, "Speckle reduction in multipolarization, multifrequency SAR imagery," *Geoscience and Remote Sensing*, IEEE Transactions on, vol. 29, pp. 535-544, 1991.
- [22] Y. Maghsoudi, M. J. Collins, and D. Leckie, "Speckle reduction for the forest mapping analysis of multi-temporal Radarsat-1 images," *International Journal of Remote Sensing*, vol. 33, pp. 1349-1359, 2012.
- [23] J.-S. Lee, "Digital image enhancement and noise filtering by use of local statistics," *Pattern Analysis and Machine Intelligence*, IEEE Transactions on, pp. 165-168, 1980.
- [24] A. Lopes, R. Touzi, and E. Nezry, "Adaptive speckle filters and scene heterogeneity," *Geoscience and Remote Sensing*, IEEE Transactions on, vol. 28, pp. 992-1000, 1990.
- [25] A. Lopes, E. Nezry, R. Touzi, and H. Laur, "Maximum a posteriori speckle filtering and first order texture models in SAR images," in *Geoscience and Remote Sensing Symposium*, 1990. IGARSS'90. 'Remote Sensing Science for the Nineties', 10th Annual International, 1990, pp. 2409-2412.
- [26] A. Shamsoddini and J. C. Trinder, "Edge-detection-based filter for SAR speckle noise reduction," *International Journal of Remote Sensing*, vol. 33, pp. 2296-2320, 2012.
- [27] G. H. Ball and D. J. Hall, "A clustering technique for summarizing multivariate data," *Behavioral science*, vol. 12, pp. 153-155, 1967.
- [28] P. M. Mather, *Computational methods of multivariate analysis in physical geography*: Wiley London, 1976.
- [29] P. Mather and M. Koch, *Computer processing of remotely-sensed images: an introduction*: John Wiley and Sons, 2010.
- [30] P. Mather and B. Tso, *Classification methods for remotely sensed data*: CRC press, 2003.
- [31] B. Desgraupes, "Clustering Indices," *University Paris Ovest Lab Modal'X*, 2013.
- [32] M. Halkidi, Y. Batistakis, and M. Vazirgiannis, "On clustering validation techniques," *Journal of Intelligent Information Systems*, vol. 17, pp. 107-145, 2001.
- [33] Y. Sheng and Z.-G. Xia, "A comprehensive evaluation of filters for radar speckle suppression," in *Geoscience and Remote Sensing Symposium*, 1996. IGARSS'96. 'Remote Sensing for a Sustainable Future.', International, 1996, pp. 1559-1561.
- [34] F. Qiu, J. Berglund, J. R. Jensen, P. Thakkar, and D. Ren, "Speckle noise reduction in SAR imagery using a local adaptive median filter," *GIScience & Remote Sensing*, vol. 41, pp. 244-266, 2004.
- [35] L. Gagnon and A. Jouan, "Speckle filtering of SAR images—a comparative study between complex-wavelet-based and standard filters," in *Proc. SPIE*, 1997, pp. 80-91.
- [36] Y. Maghsoudi, M. J. Collins, and D. Leckie, "On the Use of Feature Selection for Classifying Multitemporal Radarsat-1 Images for Forest Mapping," *Geoscience and Remote Sensing Letters*, IEEE, vol. 8, pp. 904-908, 2011.