



ارائه یک روش بدون نظارت در شناسایی تغییرات تصاویر SAR با استفاده از الگوریتم ژنتیک

بهشید خدایی*^۱، جلال امینی^۲، مهدی مؤمنی^۳

۱. دانشجوی کارشناسی ارشد سنجش از دور، دانشکده فنی، دانشگاه اصفهان

۲. دانشیار دانشکده مهندسی نقشه‌برداری، دانشگاه تهران

۳. دانشیار دانشکده مهندسی نقشه‌برداری، دانشگاه اصفهان

تاریخ پذیرش مقاله: ۱۳۹۱/۵/۱۱

تاریخ دریافت مقاله: ۱۳۹۰/۷/۳۰

چکیده

در مقاله حاضر یک روش بدون نظارت برای آشکارسازی تغییرات در تصاویر ماهواره‌ای رادار با روزه ترکیبی (SAR) معرفی می‌شود. اساس این روش جست‌وجوی بهینه در فضای جواب‌های ممکن با اتکا بر الگوریتم ژنتیک است. برای این منظور یک تابع هزینه براساس معیار کمترین میانگین مربعات خطا و با در نظر گرفتن تصویر نسبت به دست‌آمده از تصاویر مشاهده‌شده غیرهم‌زمان از ناحیه جغرافیایی یکسان، معرفی می‌شود. به منظور کاهش مدت زمان همگرایی الگوریتم به جواب بهینه، از پنجره متحرک با ابعاد مناسب به منظور انتخاب نواحی مختلف از تصویر نسبت با احتمال وجود پیکسل‌های تغییر یافته، استفاده می‌شود. این کار افزون بر ایجاد امکان مدیریت حجم محاسباتی و زمان اجرای الگوریتم، توانایی مدیریت نویز لکه‌ای را نیز فراهم می‌کند. به این ترتیب که می‌توان نواحی یکنواخت نویزی محصور در یک پنجره انتخاب را تشخیص داد و آن را از فرایند آشکارسازی حذف کرد. علاوه بر این، استفاده از روش‌های پیش‌پردازشی کاهش نویز مانند اعمال فیلتر تطبیقی وینر، برای بهبود روند آشکارسازی استفاده شده است. نتایج به دست‌آمده از پیاده‌سازی الگوریتم توسعه‌یافته، حاکی از کاهش زمان اجرای الگوریتم و مدیریت آن با حفظ دقت مطلوب، در مقایسه با روش پیشین آشکارسازی تغییرات به کمک الگوریتم ژنتیک است. به منظور بررسی عملکرد الگوریتم از دو مجموعه داده استفاده می‌شود. مجموعه اول شامل تصاویر شبیه‌سازی شده با در نظر گرفتن نویز لکه‌ای و مجموعه دوم شامل تصاویر سنجنده ASAR ماهواره Envisat، دریافت‌شده از منطقه تأثیر گرفته از سونامی اخیر کشور ژاپن است. استفاده از روش پیشنهادی در آشکارسازی تغییرات به روش پیکسل‌مبنا و بر روی مجموعه داده فوق، دقت آشکارسازی در حدود ۹۴ درصد در مقایسه با کل پیکسل‌های تصویر را به دست داد.

کلیدواژه‌ها: آشکارسازی تغییرات، الگوریتم ژنتیک، تصاویر ماهواره‌ای رادار با روزه ترکیبی.

* نویسنده مکاتبه‌کننده: اصفهان، خیابان هزارجریب، دانشکده فنی، گروه مهندسی نقشه‌برداری، دانشگاه اصفهان. تلفن: ۰۹۱۶۳۹۹۰۸۴۱

۱- مقدمه

به طور کلی تکنیک‌های آشکارسازی تغییرات به دو گروه عمده با نظارت و بدون نظارت تقسیم می‌شوند. روش با نظارت که بر پایه طبقه‌بندی‌های نظارت‌شده است، به مجموعه آموزشی مناسبی برای فرایند آموزش طبقه‌بندی نیاز دارد. این روش مزایایی بر روش بدون نظارت دارد که از آن جمله می‌توان به قابلیت تشخیص واضح نوع پوششی که در آن تغییر رخ داده، استحکام در برابر شرایط مختلف اتمسفری و نوری در دو زمان مختلف دریافت تصاویر و مواد دیگر اشاره کرد. با وجود ضعف روش‌های بدون نظارت در تشخیص نوع تغییرات کاربری و پوشش زمین و همچنین وابستگی عملکرد این روش‌ها به عوامل مختلفی چون اختلاف روشنایی و شرایط اتمسفری و کالیبراسیون در دو زمان مختلف دریافت تصاویر، از آنجا که ایجاد مجموعه آموزشی مناسب معمولاً سخت و پرهزینه است، علاقه به کاربرد روش‌های بدون نظارت و بهبود عملکرد آنها بیشتر است. از جمله الگوریتم‌های بدون نظارت آشکارسازی تغییرات، می‌توان به روش‌های مبتنی بر آستانه‌گذاری، روش آنالیز تصویر تفاضل، روش مبتنی بر تکنیک $NDVI^1$ ، روش آنالیز بردار تغییرات، روش‌های برمبنای آنالیز مؤلفه‌های اصلی، الگوریتم نسبت‌گیری از تصاویر، روش‌های آماری و تکنیک‌های استفاده از ویژگی‌های بافت تصویر به منظور آشکارسازی تغییرات اشاره کرد (Singh, 1989).

روش‌های مبتنی بر آستانه‌گذاری روی تصویر به دو دسته سراسری و محلی تقسیم می‌شوند. در دسته نخست، یک مقدار آستانه برای کل تصویر در نظر گرفته می‌شود در حالی که در روش‌های دسته دوم، بسته به تغییرات شرایط آماری، نوری و کالیبراسیون بین تصاویر، مقدار آستانه انتخابی به صورت متغیر انتخاب می‌شود (Rosin, 1998). در الگوریتم تفاضل تصاویر^۲، با انجام تفاضل روی تصاویر دریافت‌شده در دو زمان متفاوت در سطح پیکسلی و ایجاد یک تصویر جدید، تغییرات بررسی می‌شوند. تغییرات با آنالیزهایی

چون آستانه‌گذاری روی تصویر تفاضل، تشخیص داده می‌شوند. در روش الگوریتم نسبت تصاویر^۳، قواعد محاسباتی مشابه الگوریتم تفاضل تصاویر است و در آن مقایسه بین باندهای طیفی بین دو زمان مختلف، به جای تفاضل بین پیکسل‌های دو تصویر، با استفاده از نسبت بین شدت‌های پیکسلی انجام می‌گیرد (Shaoqing & Lu, 2008). تکنیک $NDVI$ همین نوع مقایسه را با در نظر گرفتن ایندکس‌های گیاهی یا دیگر ترکیبات خطی یا غیرخطی باندهای طیفی انجام می‌دهد (Nelson, 1983). در روش آنالیز بردار تغییرات^۴، پیکسل‌ها در هر زمان با بردارهای شان در فضای ویژگی، بیان می‌شوند. در این روش برای هر زوج پیکسل، بردار تغییر طیفی به عنوان اختلاف بین بردارهای ویژگی در دو زمان، محاسبه می‌شود و با آنالیز آماری بردارهای تغییر طیفی، وجود تغییرات تشخیص داده می‌شود. همچنین جهت این بردارها، انواع مختلف تغییر را مشخص می‌کند (Singh, 1989). دو روش اخیر، در آشکارسازی تغییرات به کمک تصاویر چندطیفی، مورد استفاده قرار می‌گیرند. از دیگر روش‌های موجود، می‌توان به روش‌های مبتنی بر آنالیز ویژگی‌های بافتی تصاویر اشاره کرد (OE & Yushimura, 1996). در این روش‌ها برخلاف روش‌های پیکسل - مبنا، تصویر به عنوان مجموعه‌ای از ویژگی‌ها در نظر گرفته می‌شود و تغییرات موجود بین تصاویر با استفاده از تغییرات این ویژگی‌ها بررسی می‌شوند.

در روش‌های مبتنی بر PCA^5 بررسی تغییرات با آنالیز مؤلفه‌های اصلی صورت می‌گیرد. از تلفیق روش‌های براساس PCA با روش‌های مبتنی بر ویژگی‌های بافتی می‌توان در بخش‌بندی تصاویر به منظور آشکارسازی تغییرات استفاده کرد

1. Normalized Difference Vegetation Index
2. Image Differencing Algorithm
3. Image Ratioing
4. Change Vector Analysis
5. Principal Component Analysis

۴. یکپارچه‌سازی تغییرات آشکارسازی‌شده در نواحی مختلف و تشکیل تصویر نهایی تغییرات. در ادامه مقاله، در بخش دوم، روش کار برای شناسایی تغییرات در تصاویر ماهواره‌ای بیان می‌شود. نتایج پیاده‌سازی الگوریتم پیشنهادی و مقایسه آن با برخی از روش‌های شناخته‌شده برای شناسایی تغییرات در بخش سوم ارائه خواهد شد و در پایان در بخش چهارم بحث و نتیجه‌گیری ارائه می‌شود.

۲- مواد و روش‌ها

۲-۱- داده‌های مورد استفاده

در پژوهش حاضر به‌منظور پیاده‌سازی و ارزیابی الگوریتم ارائه‌شده، از دو مجموعه داده، شامل تصاویر شبیه‌سازی‌شده و تصاویر ماهواره‌ای رادار با روزنه ترکیبی - دریافت‌شده از سنجنده ASAR ماهواره Envisal - استفاده شده است. مجموعه اول شامل دو تصویر شبیه‌سازی‌شده با افزودن نویز لکه‌ای با واریانس $0/01$ است. تصاویر شبیه‌سازی‌شده شامل دو تصویر درجات خاکستری به ابعاد 200×200 پیکسل است. در تصویر نخست که بافت غیریکنواخت دارد، تفاوت بین درجات خاکستری اشیا و پس‌زمینه، از قسمت بالای تصویر به سمت پایین آن افزایش می‌یابد (شکل ۲-الف). تصویر دوم، تصویر درجه خاکستری یکنواخت، آلوده‌شده به نویز لکه‌ای با مقدار واریانس ثابت $0/01$ است (شکل ۲-ب). علت استفاده از این مجموعه داده، ارزیابی عملکرد الگوریتم پیشنهادی برای آشکارسازی تغییرات در شرایط استاندارد و تحت کنترل است. مجموعه داده دیگری که مورد آزمایش قرار گرفت، تصاویر واقعی از یک سنجنده SAR با روزنه ترکیبی است. با وجود نویزهای ذاتی موجود در تصاویر حاصل از سنجنده‌های فعال مایکروویو، به دلیل استقلال از

(Chamundeeswari et al., 2009). بسیاری از روش‌های شناسایی تغییرات براساس آنالیز تصویر تفاضل، حاصل مقایسه دو تصویر ورودی است. دو روش برمبنای آنالیز تصویر تفاضل و با تکیه بر تئوری بیز پیشنهاد شده است (Bruzzone & Prieto, 2000). یکی از این روش‌ها با فرض استقلال مکانی بین پیکسل‌ها و روش دیگر با فرض وابستگی مکانی بین پیکسل‌های همسایگی و براساس میدان‌های تصادفی مارکف^۱ است. در سال‌های اخیر با وجود پیشرفت‌های روزافزون در زمینه تکنولوژی و امکان انجام محاسبات با حجم بالا در کمترین زمان ممکن، استفاده از الگوریتم ژنتیک به‌عنوان تکنیک مهم آشکارسازی تغییرات مورد توجه قرار گرفته است. علت این امر سادگی، کاربرد آسان، پیش‌نیازهای اندک و انجام محاسبات به‌صورت موازی و فراگیر است (Melanie, 1998).

روش آشکارسازی تغییرات با استفاده از تصویر تفاضل و برمبنای الگوریتم ژنتیک و بدون نیاز به فرضیات اولیه، نیز در این زمینه معرفی شده است (Celik, 2010). برای این منظور از تابع برازش^۲ براساس معیار کمترین میانگین مربعات خطا^۳، بین مقادیر پیکسل‌های تصویر تفاضل و متوسط این مقادیر در نواحی تغییریافته و بدون تغییر، استفاده شد. در انتها از میان نتایج حاصل از الگوریتم، آنکه کمترین هزینه را دارد، به عنوان جواب بهینه انتخاب می‌شود. یکی از مشکلات روش مذکور، صرف مدت زمان طولانی برای هم‌گرایی الگوریتم و رسیدن به ماسک نهایی مطلوب است. در نوشتار حاضر و به منظور غلبه بر این مشکل، روشی برمبنای الگوریتم ژنتیک پیشنهاد می‌شود که شامل چهار مرحله اصلی است:

۱. محاسبه تصویر نسبت با استفاده از دو تصویر ورودی اولیه.

۲. انتخاب زیرناحیه‌ای از تصویر نسبت به کمک پنجره متحرک.

۳. آشکارسازی تغییرات ناحیه انتخاب‌شده به کمک الگوریتم ژنتیک.

1. Markov Random Field
2. Fitness Function
3. Minimum Mean Square Error (MMSE)

در برابر این نویز است (Rignot & Van Zyle, 1993).

در شکل ۱، فلوچارت الگوریتم پیشنهادی آمده است. مطابق این فلوچارت پس از ورود تصاویر SAR و محاسبه تصویر نسبت، پیش‌پردازش‌های مورد نیاز به منظور کاهش نویز و برجسته‌سازی تمایز بین نواحی بدون تغییر و تغییر یافته انجام می‌شود. از جمله پیش‌پردازش‌های مناسب برای این منظور اعمال فیلترهای مناسب کاهش نویز است. تاکنون فیلترهای متعددی برای کاهش نویز لکه‌ای همراه با حفظ اطلاعات رادیومتریک تصویر شناخته شده‌اند (Khodaei & Amini, 2011). از جمله می‌توان به فیلترهای تطبیقی در حوزه فرکانس و در حوزه مکان اشاره کرد. فیلتر وینر^۲ به عنوان فیلتر تطبیقی پایین‌گذر در حوزه فرکانس مطرح می‌شود. فیلترهای لی^۳، فراست^۴ و گاما^۵ نیز از جمله فیلترهای پرکاربرد در حوزه مکان هستند (Falahati Bagherabadi & Amini, 2010). در این کار از فیلتر تطبیقی وینر به منظور کاهش اثر نویز لکه‌ای موجود در تصاویر SAR و افزایش کیفیت رادیومتریک تصویر استفاده می‌شود. یکی از راه‌های کاهش اثر نویز در الگوریتم‌های آشکارسازی بر مبنای تحلیل تصویر حاصل از مقایسه تصاویر ورودی، انتخاب اپراتور نسبت به جای تفاضل ساده است. به علت ماهیت ضرب‌شونده^{۱۱} نویز لکه‌ای استفاده از اپراتور نسبت، مؤثرتر از اپراتور تفاضل است. در اینجا تصویر

شرایط اتمسفری و نیز تابش خورشید، استفاده از این نوع سنجنده‌ها در بررسی تغییرات سطح زمین به ویژه در شرایط ناپایدار جوی مانند وقوع بحران‌های طبیعی، مورد توجه است (Oliver & Quegan, 1998). تصاویر مورد آزمایش شامل دو تصویر دامنه حاصل از سنجنده ASAR ماهواره Envisat در مُد تصویر دقیق^۱ و با پلاریزاسیون افقی - افقی است که در تاریخ ۲۱ نوامبر ۲۰۱۰ و ۲۱ مارس ۲۰۱۱ از نواحی ساحلی می‌یگی^۲ - تأثیر گرفته از سونامی مارس ۲۰۱۱ در کشور ژاپن - دریافت شده‌اند (شکل ۳-الف و ۳-ب). این تصاویر درجه خاکستری که محصول سطح یکم سنجنده ASAR محسوب می‌شوند، خود از داده سطح صفر، به‌دست‌آمده از سنجنده در مُد تصویر حاصل شده‌اند که شامل تصحیحاتی از قبیل تصحیح فاصله مایل هستند^۳. داده‌های حاصل از مُد تصویر دقیق این سنجنده، تصاویر چند دیدگاهی^۴ با قدرت تفکیک مکانی ۳۰ متر هستند (Desnos & Buck, 2000). از آنجا که روش مورد استفاده در این کار، در دسته روش‌های پیکسل‌مبنا قرار می‌گیرد، لازم است پیش از ورود به فرآیند آشکارسازی، فرایند ثبت تصاویر به‌طور دقیق انجام پذیرد. برای این منظور از روش تصویر به تصویر^۵ ثبت تصاویر استفاده می‌شود.

۲-۲- تشریح الگوریتم پیشنهادی

روش کار در پژوهش حاضر بدین صورت است که ابتدا دو تصویر غیرهم‌زمان X_1 و X_2 دریافت‌شده از منطقه جغرافیایی یکسان در نظر گرفته می‌شود. هدف از این کار، شناسایی تغییرات رخ داده در منطقه تحت پوشش این تصاویر است. مبنای کار براساس تحلیل تصویر تفاضل است؛ که تصویری حاصل از تفاضل مقادیر شدت پیکسل‌های متناظر دو تصویر دریافت‌شده از منطقه است. آشکارسازی تغییرات تصاویر SAR به دلیل وجود نویز لکه‌ای^۶، بهتر است به جای تفاضل دو تصویر، از الگوریتم نسبت مقادیر پیکسل‌های متناظر آنها استفاده شود. علت این امر مقاومت تصویر نسبت

1. Precision Image Mode
2. Miyagi
3. Available online at: http://ew.eo.int/web/guest/events/Journal-Content/56-INSTANCE-Qcx4/10122/19805?show_full=true&Sarea=Earthquakes
4. Multi Look
5. Image to Image Registration
6. Speckle Noise
7. Wiener Filter
8. Lee Filter
9. Frost Filter
10. Gamma Filter
11. Multiplicative

تغییریافته تصویر نسبت با توجه به ماسک باینری در نظر گرفته شده هستند، به صورت روابط (۵) و (۶) تعریف می‌شوند:

$$\mu_0 = \frac{1}{N_0} \sum_{\forall (i,j) \in R_0} X_d(i,j) \quad \text{رابطه (۵)}$$

$$\mu_1 = \frac{1}{N_1} \sum_{\forall (i,j) \in R_1} X_d(i,j) \quad \text{رابطه (۶)}$$

در تابع برازش معرفی شده در رابطه (۲)، برای هر ناحیه R_3 ، مجموع مربعات اختلاف بین مقادیر تصویر نسبت و میانگین این مقادیر با توجه به ناحیه‌بندی ماسک باینری حاصل از الگوریتم ژنتیک، محاسبه می‌شود. مجموع وزن دار مقادیر حاصل، هزینه نهایی ماسک پیشنهادی را به دست می‌دهد. ماسک با کمترین مقدار هزینه به عنوان تصویر نهایی تغییرات در نظر گرفته می‌شود. به منظور جست‌وجوی بهترین تصویر متناظر با تغییرات موجود بین دو پنجره انتخابی از تصاویر، به کمک الگوریتم ژنتیک، نیاز به معرفی برخی پارامترهای مورد نیاز برای ورود به حلقه بهینه‌سازی ژنتیک است. این پارامترها شامل تعداد جمعیت اولیه در هر حلقه تکرار الگوریتم ژنتیک و نرخ عملگرهای ژنتیکی مؤثر شامل عملگرهای انتخاب^۱، تقاطع^۲ و جهش^۳ است. معرفی این پارامترها با توجه به ابعاد پنجره انتخاب صورت می‌گیرد. لازم به ذکر است که کلیت عملکرد الگوریتم پیشنهادی و دقت نهایی، وابستگی چندانی به پارامترهای معرفی شده به الگوریتم ندارد. این انتخاب می‌تواند در برقراری تعادل بین زمان هم‌گرایی الگوریتم و دقت نهایی تشخیص تغییرات مؤثر باشد. در حالت ایده‌آل، زمانی که تصویر باینری در نظر گرفته شده، به درستی نواحی تغییر یافته و بدون تغییر را برای زیرتصویر انتخابی مشخص سازد، مقدار هزینه تابع نزدیک به صفر خواهد شد، ابعاد پنجره انتخاب و

نسبت، از لگاریتم نسبت مقادیر پیکسل‌های متناظر دو تصویر به صورت رابطه (۱) محاسبه می‌شود.

$$X_d = \left| \log \frac{X_2}{X_1} \right| = |\log X_2 - \log X_1| \quad \text{رابطه (۱)}$$

مقادیر پیکسلی این تصویر روی بازه $[0, 1]$ نرمالیزه می‌شوند. به منظور کاهش مدت زمان هم‌گرایی الگوریتم به جواب بهینه و نیز مدیریت زمان، پنجره‌ای با ابعاد $H \times W$ برای حرکت روی تصویر نسبت و انتخاب نواحی مختلف به منظور آشکارسازی تغییرات، در نظر گرفته می‌شود. هدف این پژوهش، معرفی روش بهینه‌سازی به منظور یافتن بهترین جواب ممکن از بین همه جواب‌های موجود است. فضای جواب در مسئله پیش رو شامل $2^{H \times W}$ ماسک باینری $H \times W$ است که با توجه به گسترده بودن این فضا، الگوریتم ژنتیک می‌تواند گزینه‌ای مناسب برای انجام جست‌وجوی بهینه باشد. عملیات بهینه‌سازی به کمک معرفی تابع برازش متناسب با ماهیت مسئله مورد نظر انجام می‌پذیرد. تابع برازش مورد استفاده در این مقاله، براساس معیار کمترین میانگین مربعات خطا تعریف می‌شود (Celik, 2010). در صورتی که $X_d(i,j)$ مقدار پیکسلی تصویر نسبت در موقعیت (i,j) ، از پنجره انتخابی به ابعاد $H \times W$ باشد، تابع برازش برای هر ماسک باینری حاصل از الگوریتم ژنتیک مطابق رابطه (۲) تعریف می‌شود.

رابطه (۲)

$$f = \sum_{r=0}^1 \frac{N_r}{H \times W} \sum_{\forall (i,j) \in R_r} (X_d(i,j) - \mu_r)^2$$

در رابطه (۲)، R_0 معرف پیکسل‌های نواحی بدون تغییر و R_1 معرف پیکسل‌های نواحی تغییر یافته است. همچنین N_0 و N_1 تعداد پیکسل‌های موجود در نواحی بدون تغییر و تغییر یافته با در نظر گرفتن ماسک باینری ایجاد شده به وسیله الگوریتم ژنتیک هستند:

$$N_0 = \sum_{\forall (i,j) \in R_0} 1 \quad \text{رابطه (۳)}$$

$$N_1 = \sum_{\forall (i,j) \in R_1} 1 \quad \text{رابطه (۴)}$$

مقادیر μ_r که میانگین نواحی بدون تغییر و

1. Election
2. Cross Over
3. Multation

۳- نتایج

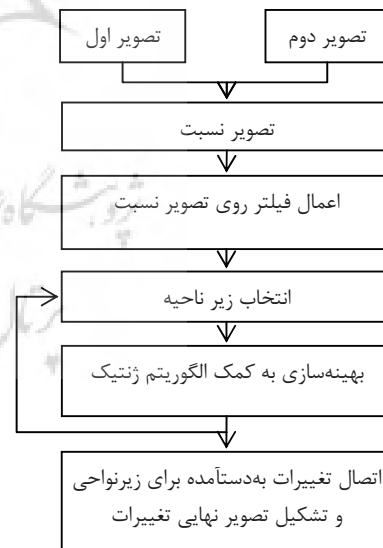
همان‌طور که در بخش ۱-۲ اشاره شد، به‌منظور پیاده‌سازی و ارزیابی الگوریتم ارائه‌شده، از دو مجموعه داده، شامل تصاویر شبیه‌سازی شده و تصاویر ماهواره‌ای SAR دریافت شده از سنجنده ASAR ماهواره ENVISAT استفاده شده است. مجموعه نخست، تصاویر شبیه‌سازی شده با درجات خاکستری به ابعاد 200×200 پیکسل است که با افزودن نویز لکه‌ای با واریانس $0/01$ تشکیل شده‌اند (شکل ۲-الف و ۲-ب). از آنجا که نویز موجود در این مجموعه داده مشابه نویزهای لکه‌ای موجود در تصاویر SAR است. از لگاریتم نسبت مقادیر پیکسل‌های تصاویر ورودی به جای تصویر تفاضل، به‌منظور ورود به فرآیند آشکارسازی تغییرات استفاده می‌کنیم (شکل ۲-ج) برای بررسی دقیق نتایج به‌دست‌آمده از اعمال الگوریتم آشکارسازی تغییرات، از تصویر تغییرات واقعی، متناظر با تصاویر شبیه‌سازی شده استفاده می‌شود (شکل ۲-د) با مقایسه پیکسل به پیکسل نتایج حاصل از الگوریتم، با تصویر تغییرات واقعی، تعداد پیکسل‌های اشتباه و از دست رفته قابل محاسبه خواهد بود. شاخص‌های اندازه‌گیری مورد استفاده به شکل زیر تعریف می‌شوند:

۱. پیکسل‌های اشتباه^۱: پیکسل‌هایی از تصویر که بدون تغییر هستند، ولی به اشتباه به‌وسیله الگوریتم به عنوان پیکسل‌های تغییر یافته تشخیص داده شده‌اند.
۲. پیکسل‌های از دست رفته^۲: پیکسل‌هایی از تصویر هستند که تغییر یافته‌اند، ولی به‌وسیله الگوریتم شناسایی نشده‌اند.
۳. خطای کل^۳: مجموع پیکسل‌های اشتباه و پیکسل‌های از دست رفته، خطای کل را مشخص می‌کند.

با محاسبه درصد اندازه‌گیری‌های فوق، معیاری برای بررسی دقت الگوریتم به دست خواهد آمد.

نرخ‌های مناسب برای عملگرهای ژنتیکی که از طریق روش‌های تجربی و انجام آزمون و خطا قابل تعیین است، به شرح زیر به الگوریتم معرفی می‌شود:

پنجره انتخاب به ابعاد ۲۰ پیکسل در ۲۰ پیکسل، ۲۰ عضو به عنوان جمعیت اولیه، نرخ انتخاب ۱۰ درصد، نرخ تقاطع ۸۰ درصد و نرخ جهش ۱۰ درصد. لازم به تذکر است که انتخاب نرخ عملگرهای ژنتیکی بستگی به ابعاد پنجره انتخاب و تعداد اعضای جمعیت اولیه دارد. سرانجام با اتصال ماسک‌های تغییرات به‌دست‌آمده برای هر قطعه انتخابی از تصاویر، تصویر نهایی تغییرات حاصل می‌شود. از آنجا که طی فرآیند آشکارسازی تغییرات هر یک از زیرتصاویر انتخابی، تغییرات به صورت پیکسل به پیکسل و بدون از دست رفتن اطلاعات ناحیه محصور درون پنجره انجام می‌شود، در پایان نیازی به بررسی نواحی مرزی زیر تصاویر و وضعیت هم‌پوشانی مرزها نیست. صرفاً با کنار هم قراردادن زیرتصاویر و یکپارچه‌سازی آنها تصویر نهایی تغییرات حاصل می‌شود (شکل ۱).

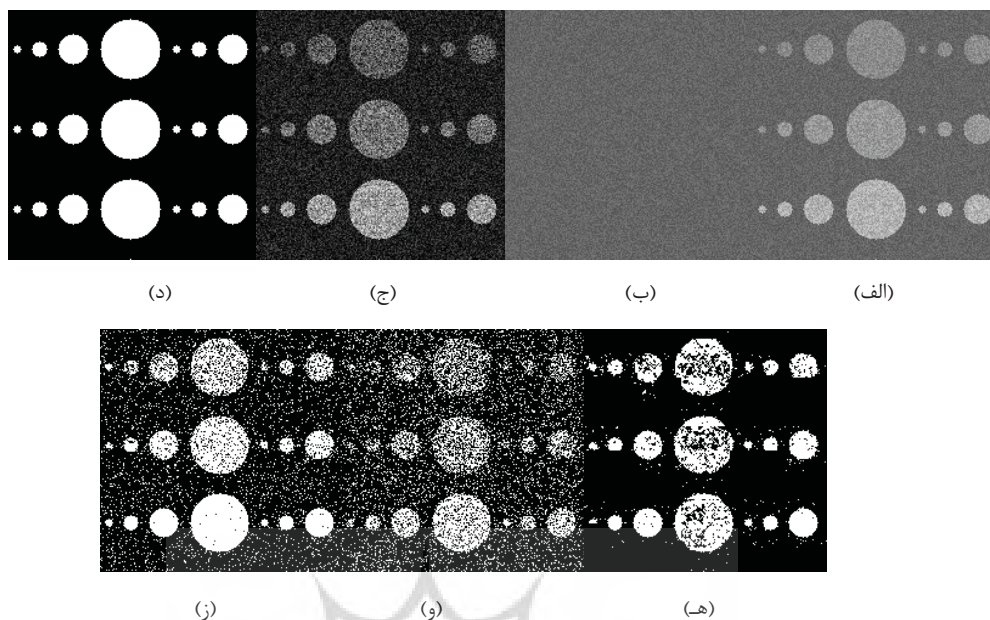


شکل ۱. فلوچارت روش پیشنهادی برای آشکارسازی تغییرات بین دو تصویر

1. False Pixels
2. Missed Pixels
3. Total Erros

تا حدی تأثیر آلودگی لکه‌ای موجود در تصویر نسبت را کاهش دهد و عملکرد الگوریتم را در آشکارسازی پیکسل‌ها با تغییرات واقعی بهبود بخشد. تصویر نهایی تغییرات حاصل از اجرای الگوریتم بر روی مجموعه تصاویر شبیه‌سازی شده در مدت زمان ۲۵ دقیقه و با خطای ۶ درصد کل پیکسل‌های موجود در تصویر به دست آمد (شکل ۲-ه). از مقایسه کیفی بافت‌های آشکارسازی شده در تصویر نهایی تغییرات (شکل ۲-ه) و مقایسه آنها با تصویر تغییرات واقعی (شکل ۲-د)، می‌توان به عملکرد خوب الگوریتم در آشکارسازی جزئیات تغییرات پی برد. این عملکرد در نواحی پایین تصویر که اختلاف شدت درجات خاکستری بین اشیاء پس‌زمینه بیشتر است، به طور مشهودی بهبود یافته است. علت این امر وابستگی عملکرد الگوریتم به دامنه تغییرات پیکسل‌ها در ناحیه انتخاب شده است. به عبارتی در قسمت بالای تصویر که جدایی بین درجات خاکستری واضح‌تر است، پیکسل‌های اشتباه بیشتری به عنوان پیکسل‌های تغییر یافته شناسایی شده‌اند (تصویر ۲-ه). همچنین مرز بافت‌های تغییر یافته در قسمت‌های پایین تصویر بهتر تشخیص داده شده‌اند. به منظور بررسی کارایی الگوریتم، نتایج حاصل از الگوریتم را با نتایج آشکارسازی تغییرات به روش خوشه‌بندی K-MEANS مقایسه می‌کنیم (Hartigan & Wong, 1979). مقایسه نتایج کیفی (شکل ۲-ه) و کمی (جدول ۱) تصویر تغییرات به دست آمده از روش پیشنهادی با تصاویر حاصل از روش خوشه‌بندی K-MEANS (شکل ۲-و) و (۲-ز)، نشان‌دهنده برتری روش پیشنهادی است. مرزهای نواحی تغییر در تصویر حاصل از روش پیشنهادی - به ویژه در قسمت‌های بالای تصویر - بهتر تشخیص داده شده است. از طرفی مطابق جدول ۱، تعداد پیکسل‌های اشتباه تصویر تغییرات حاصل از روش پیشنهاد شده، در مقایسه با روش دیگر کمتر است و دقت به دست آمده در این مرحله ۹۴ درصد کل پیکسل‌های موجود در تصویر بوده است.

معیار دیگری که به عنوان یکی از مشخصه‌های بهبود روش، پس از اعمال الگوریتم روی مجموعه داده مورد بررسی قرار می‌گیرد، زمان لازم برای اجرای الگوریتم و رسیدن به جواب بهینه است. با در نظر گرفتن پنجره متحرک به ابعاد 20×20 پیکسل و انتخاب زیر نواحی و تخمین زمان و دقت حاصل از اجرای الگوریتم برای هر قطعه انتخاب شده، می‌توان زمان مورد نیاز برای اجرای الگوریتم تصویر 200×200 پیکسل را تخمین زد. از طرفی با حذف نواحی بدون تغییر و یا با تغییرات کم از فرایند بهینه‌سازی، سرعت همگرایی الگوریتم به تصویر نهایی تغییرات افزایش می‌یابد. این عمل به کمک آستانه‌گذاری روی تصویر نسبت بر مبنای هیستوگرام این تصویر و با تکیه بر روش OTSU انجام می‌گیرد. در این روش بدون نظارت و غیر پارامتریک، مقدار آستانه بهینه به طور اتوماتیک و به کمک یک معیار جداسازی تعیین می‌شود. این معیار سعی در بهینه‌سازی جدایی بین کلاس‌های حاصل از قطعه‌بندی تصویر درجه خاکستری دارد. فرایند جست‌وجوی آستانه به وسیله ممان‌های تجمعی مرتبه صفر و یک هیستوگرام درجات خاکستری تصویر انجام می‌شود (Otsu, 1979). از ویژگی‌های مهم الگوریتم پیشنهادی، حساسیت بالای آن به آشکارسازی پیکسل‌های تغییر یافته است. این ویژگی می‌تواند به علت وجود نویز لکه‌ای موجود در تصاویر SAR، موجب تشخیص پیکسل‌های آلوده به نویز به عنوان پیکسل‌های نماینده تغییرات واقعی شود. از این رو پیش از ورود به فرایند بهینه‌سازی الگوریتم ژنتیک به منظور آشکارسازی تغییرات ناحیه انتخاب شده از تصویر نسبت، استفاده از فیلتر تطبیق وینر برای کاهش نویز تصویر نسبت پیشنهاد می‌شود. این فیلتر به عنوان فیلتر پایین‌گذر با استفاده از مشخصات آماری تصویر شامل میانگین و واریانس در پنجره همسایگی از هر پیکسل تصویر نسبت محاسبه شده، تصویری با شدت‌های پیکسلی تصحیح شده به دست می‌دهد (Schirrinzi, 1996 & Lim, 1990). این روش می‌تواند



شکل ۲. (الف) و (ب) تصاویر درجه خاکستری شبیه‌سازی شده به ابعاد 200×200 آلوده شده به نویز لکه‌ای با واریانس $0.1/0.1$ ، (ج) تصویر نسبت فیلتر شده (د) تصویر تغییرات واقعی؛ (هـ) تصویر تغییرات حاصل از روش پیشنهاد شده؛ (و) تصویر تغییرات حاصل از روش خوشه‌بندی $K-Means$ بر روی تصویر تفاضل؛ (ز) تصویر تغییرات حاصل از روش خوشه‌بندی $K-Means$ بر روی تصویر نسبت

جدول ۱. نتایج کمی حاصل از پیاده‌سازی الگوریتم پیشنهادی روی تصویر درجه خاکستری نویزی شبیه‌سازی شده به ابعاد 200×200

روش آشکارسازی تغییرات	پیکسل‌های اشتباه		پیکسل‌های از دست‌رفته		خطای کل		زمان کل (ثانیه)	بیشینه تعداد تکرار
	تعداد	درصد	تعداد	درصد	تعداد	درصد		
روش پیشنهادی	۴۳۲	۱	۱۹۱۷	۵	۲۳۴۹	۶	۱۵۲۴	۱۰۰۰۰
خوشه‌بندی به روش $K-Means$	۴۳۰۹	۱۱	۳۶۵۲	۹	۷۹۶۱	۲۰	-	۱۰
روی تصویر تفاضل خوشه‌بندی به روش $K-Means$	۲۶۶۶	۷	۱۳۵۸	۳	۴۰۲۴	۱۰	-	۵

پیشنهاد شده در این مقاله، درجات خاکستری پیکسل‌های تصویر به صورت آرایه‌های دوبعدی به الگوریتم وارد می‌شوند. تصویر دامنه به‌طور مستقیم به وسیله نرم‌افزار محاسباتی MATLAB خوانده می‌شود و هر تصویر به شکل یک آرایه دوبعدی از اعداد به

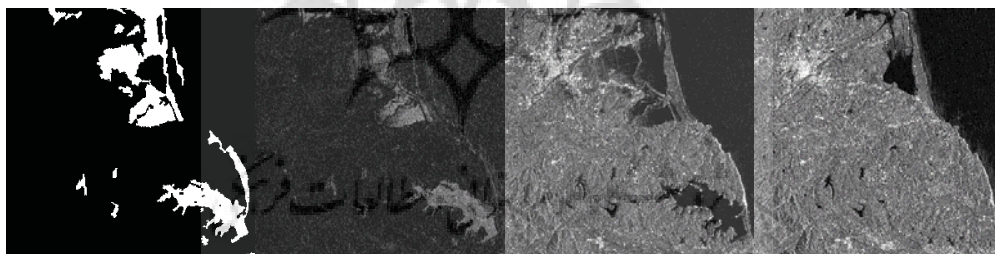
مجموعه داده دیگری که مورد آزمایش قرار گرفت، شامل دو تصویر دامنه حاصل از سنجنده ASAR ماهواره Envisat است که در تاریخ ۲۱ نوامبر ۲۰۱۰ و ۲۱ مارس ۲۰۱۱ از نواحی ساحلی می‌یگی^۱، تأثیر گرفته از سونامی مارس ۲۰۱۱ در کشور ژاپن دریافت شده‌اند. هدف، آشکارسازی تغییرات بخشی از نواحی ساحلی در اثر سونامی مذکور است. در روش

1. Miyagi

ارائه یک روش بدون نظارت در شناسایی تغییرات تصاویر SAR با استفاده از الگوریتم ژنتیک

بین دو زمان مورد نظر هستیم. در اینجا به علت عدم دسترسی به منطقه تحت بررسی و نیز نقشه‌های تغییرات و یا تصاویر کمکی از منطقه، داده صحت از طریق مقایسه بصری دو تصویر ورودی به‌وسیله کاربر متخصص حاصل شد (شکل ۳-د). پس از اعمال الگوریتم، نتایج به‌دست‌آمده به خوبی مرز نواحی تغییر شکل یافته را با درصد کمی از پیکسل‌های اشتباه که به صورت نویز در تصویر قابل مشاهده‌اند، نشان می‌دهد (شکل ۳-ه). با حذف نواحی با تغییرات کم به کمک آستانه‌گذاری بر مبنای هیستوگرام تصویر نسبت، علاوه بر کاهش زمان اجرای الگوریتم، بخش عمده‌ای از نواحی یکنواخت با آلودگی لکه‌ای از فرایند بهینه‌سازی حذف شدند و به این ترتیب عملکرد الگوریتم در آشکار سازی نواحی با تغییرات واقعی بهبود پیدا می‌کند. شکل ۳ و جدول ۳ نتایج کمی و کیفی حاصل از پیاده‌سازی مذکور و مقایسه آن را با روش آشکار سازی تغییرات به کمک الگوریتم خوشه‌بندی K-Means ارائه می‌کنند.

الگوریتم معرفی می‌گردد. پس از انجام فرایند ثبت تصاویر، ناحیه مربوط به محدوده مورد نظر از دو تصویر را انتخاب و به الگوریتم وارد می‌کنیم. به‌علت پایداری بیشتر در برابر نویز، تصویر حاصل از لگاریتم نسبت‌های دو تصویر ثبت‌شده را برای شناسایی تغییرات موجود بین تصاویر به الگوریتم معرفی می‌کنیم. در این آزمایش ناحیه‌ای با ابعاد 300×300 ، از منطقه شامل تغییرات انتخاب شد (شکل ۳-الف و ۳-ب) برای کاهش نویز تصویر نسبت و بهبود عملکرد الگوریتم، پیش از ورود به فرایند بهینه‌سازی از فیلتر تطبیق وینر استفاده شده است. از آنجا که نویز لکه‌ای موجود در تصاویر SAR، از ویژگی‌های فرکانس بالای تصویر به حساب می‌آید، فیلتر پایین‌گذر وینر می‌تواند تا حدی موجب کاهش تأثیرات این نویز و در نتیجه بهبود کیفیت رادیومتریک تصویر شود. از سویی به‌منظور حفظ بیشتر اطلاعات تصاویر ورودی، اعمال فیلتر وینر بر روی تصویر نسبت حاصل انجام می‌گیرد. لازم به تذکر است که در این بخش به‌منظور بررسی کیفی و کمی عملکرد الگوریتم، ناچار به تهیه تصویر تغییرات واقعی منطقه



شکل ۳. (الف) و (ب) تصاویر با ابعاد 300×300 از نواحی ساحلی می‌یابی. (ج) تصویر نسبت فیلتر شده. (د) تصویر تغییرات واقعی. (ه) تصویر تغییرات نهایی حاصل از اعمال الگوریتم پیشنهادی. (و) تصویر تغییرات حاصل از الگوریتم خوشه‌بندی K-Means با استفاده از تصویر تفاضل. (ز) تصویر تغییرات حاصل از الگوریتم خوشه‌بندی K-Means با استفاده از تصویر نسبت.



شکل ۳. (الف) و (ب) تصاویر با ابعاد 300×300 از نواحی ساحلی می‌یابی. (ج) تصویر نسبت فیلتر شده. (د) تصویر تغییرات واقعی. (ه) تصویر تغییرات نهایی حاصل از اعمال الگوریتم پیشنهادی. (و) تصویر تغییرات حاصل از الگوریتم خوشه‌بندی K-Means با استفاده از تصویر تفاضل. (ز) تصویر تغییرات حاصل از الگوریتم خوشه‌بندی K-Means با استفاده از تصویر نسبت.

شکل ۳. (الف) و (ب) تصاویر با ابعاد 300×300 از نواحی ساحلی می‌یابی. (ج) تصویر نسبت فیلتر شده. (د) تصویر تغییرات واقعی. (ه) تصویر تغییرات نهایی حاصل از اعمال الگوریتم پیشنهادی. (و) تصویر تغییرات حاصل از الگوریتم خوشه‌بندی K-Means با استفاده از تصویر تفاضل. (ز) تصویر تغییرات حاصل از الگوریتم خوشه‌بندی K-Means با استفاده از تصویر نسبت.

جدول ۲. نتایج کمی حاصل از پیاده‌سازی الگوریتم پیشنهادی روی تصویر ماهواره‌ای به ابعاد ۳۰۰ × ۳۰۰

روش آشکارسازی تغییرات	پیکسل‌های اشتباه		پیکسل‌های از دست رفته		خطای کل		زمان کل (ثانیه)	بیشینه تعداد تکرار
	تعداد	درصد	تعداد	درصد	تعداد	درصد		
روش پیشنهادی	۳۲۸۶	۴	۲۳۲۶	۳	۵۶۱۲	۶	۲۳۴۲	۱۰۰۰۰
خوشه‌بندی به روش <i>K-Means</i> روی تصویر تفاضل	۵۵۳۹۵	۶۱	۷۱۴	۱	۵۶۱۰۹	۶۲	—	۱۰
خوشه‌بندی به روش <i>K-Means</i> روی تصویر نسبت	۱۱۷۹۰	۱۳	۱۳۸۸	۲	۱۳۱۷۸	۱۵	—	۵

تصویر تفاضل تا حد زیادی در کاهش اثر نویز و بهبود نتایج مؤثر است (شکل ۳-و و ۳-ز). حذف نواحی یکنواخت نویزی فاقد تغییرات واقعی به کمک روش آستانه‌گذاری و نیز کاهش نویز به کمک فیلتر وینر دقت روش را در آشکارسازی تغییرات و کاهش مدت زمان اجرای الگوریتم بهبود بخشیده است.

۴- بحث و نتیجه‌گیری

در این مقاله یک روش بدون نظارت برای آشکارسازی تغییرات بین تصاویر ماهواره‌ای رادار با روزه ترکیب با استفاده از روش بهینه‌سازی مبتنی بر الگوریتم ژنتیک معرفی گردید. تابع هزینه مورد استفاده براساس معیار خطای کمترین مربعات بین تصویر نسبت حاصل از دو تصویر ورودی و میانگین مقادیر این تصویر با در نظر گرفتن ماسک‌های تغییرات ایجاد شده به وسیله الگوریتم ژنتیک، تعریف شده است. برای بهبود دقت در تعداد تکرارهای کمتر الگوریتم و نیز مدیریت حجم و زمان مورد نیاز، به جای در نظر گرفتن کل تصویر نسبت، با حرکت دادن پنجره‌ای با ابعاد مناسب و کوچک‌تر از ابعاد تصویر اصلی، نواحی شامل پیکسل‌های تغییر یافته مشخص شدند و وارد الگوریتم بهینه‌سازی گردیدند. با انجام این عمل بخشی از تصویر که شامل تغییرات واقعی نبود، به کمک آستانه‌گذاری بر مبنای هیستوگرام

اعمال فیلتر کاهش نویز پیش از ورود به فرآیند آشکارسازی تغییرات می‌تواند منجر به کاهش بافت دانه‌ای ناشی از نویز لکه‌ای و جداپذیری بیشتر بین پیکسل‌های نویزی و پیکسل‌های بافت تغییر شود. از آنجا که روش مورد استفاده در این مقاله تا حدی به خصوصیات آماری ناحیه انتخاب شده بستگی دارد، افزایش میزان جداپذیری منجر به بهبود عملکرد روش و افزایش دقت آشکارسازی پیکسل‌های بافت تغییر یافته خواهد شد. از طرفی اعمال فیلتر کاهش نویز بر روی تصویر موجب از دست رفتن بخشی از اطلاعات مفید فرکانس بالا شامل لبه‌ها و جزئیات می‌شود؛ که امری نامطلوب قلمداد می‌شود. به همین علت پیشنهاد می‌شود به منظور حفظ بیشتر این اطلاعات، فیلتر مورد نظر به جای اعمال بر روی هر یک از تصاویر ورودی، بر روی تصویر نسبت حاصل اعمال گردد. در این پیاده‌سازی، تصویر نهایی تغییرات برای دو تصویر غیر هم‌زمان ماهواره‌ای با دقت مطلوب ۹۴ درصد کل پیکسل‌های موجود در تصویر و با حفظ مرزها و جزئیات نواحی تغییر یافته در مدت زمان مناسب، به دست آمد. با توجه به نتایج ارائه شده در جدول ۲، خطای کل تصویر تغییرات حاصل از الگوریتم پیشنهادی آشکارا کمتر از خطای نتایج حاصل از الگوریتم خوشه‌بندی *K-Means* است. از طرفی استفاده از تصویر نسبت به جای

موجب اختلال در فرایند آشکارسازی تغییرات در سطح پیکسلی می‌شود و از سویی این تمایل وجود دارد که تا حد امکان اطلاعات مفید تصویر حفظ شود، استفاده از اطلاعات بافتی تصویر و به‌کارگیری این اطلاعات در قالب مدل آماری مناسب می‌تواند منجر به ارائه روشی برای حل مسئله آشکارسازی تغییرات شود. مدل آماری مارکف گزینه‌ای مناسب برای مدل کردن وابستگی‌های بین پیکسلی و استخراج اطلاعات بافتی تصویر است. همچنین استفاده از روش‌های پس‌پردازشی مانند استفاده از فیلتر میانه می‌تواند به حذف تک‌پیکسل‌های نویزی و بهبود نتیجه روش آشکارسازی کمک کند.

۵- منابع

- Bruzzone, L., Prieto, D. F., 2000, **Automatic Analysis of the Difference Image for Unsupervised Change Detection**, Trans. Geosci. Remote Sensing, Vol. 38, No. 3, 1170-1182.
- Celik, T., 2010, **Change Detection in Satellite Images Using a Genetic Algorithm Approach**, IEEE Trans. Geosci. Remote Sensing, Vol. 7, No. 2, 386 - 390.
- Chamundeeswari, V.V., Singh, D., Singh, K., 2009, **An Analysis of Texture Measures in PCA-Based Unsupervised Classification of SAR Images**, IEEE Geosci. Remote Sens. Lett., Vol. 6, Issue. 2, 214-218.
- Desnos, Y. L., Buck, C., 2000, **ASAR - Envisat's Advanced Synthetic Aperture Radar**, ESA Bulletin, No. 102, 91-100.
- Falahati Bagherabadi, M., Amini, J., 2010, **Investigation of De-speckling Filters in SAR Images for Forest Areas in North of Iran**, Geospatial Engineering Journal, Vol. 1, No. 4, 1-12.

تصویر نسبت از فرایند بهینه‌سازی حذف شد. یکی از مشکلاتی که در کاربرد تصاویر حاصل از سنجنده رادار با روزه ترکیبی مطرح است، وجود الگوی ذاتی مخربی موسوم به نویز لکه‌ای است. این نویز می‌تواند منجر به کاهش کیفیت رادیومتریک تصویر و در نتیجه خطای تفسیر شود. به‌طور خاص در مورد فرایند آشکارسازی تغییرات، وجود نویز لکه‌ای می‌تواند موجب خطا در تشخیص نهایی بافت‌های واقعی تغییر یافته گردد. در این مقاله با ارائه روشی مبتنی بر الگوریتم ژنتیک، تغییرات بین دو تصویر با تکیه بر تحلیل تصویر نسبت، حاصل از مقایسه تصاویر مشاهده‌شده، در واحدهای پیکسلی و با حفظ مناسب جزئیات و لبه‌های اجزا و در مدت زمان مناسب استخراج گردید. از جمله معایب روش ارائه‌شده، وابستگی عملکرد آن به خصوصیات منظره است؛ بدین معنی که در نواحی نویزی با تعداد اندک پیکسل‌های با تغییر واقعی، پیکسل‌های نویزی به عنوان پیکسل‌های تغییر یافته تشخیص داده می‌شوند. این خاصیت سبب می‌شود که در نهایت، تصویر تغییرات متشکل از اتصال زیرنواحی، شامل نویزهای شناسایی‌شده به عنوان تغییرات باشد. برای غلبه بر این مشکل، آستانه‌گذاری بدون نظارت، با در نظر گرفتن هیستوگرام تصویر نسبت و با تکیه بر روش OTSU به منظور حذف نواحی با تغییرات اندک و نویزی شکل، پیشنهاد گردید. در این مقاله به منظور کاهش تأثیر آلودگی نویزی بر روی عملکرد الگوریتم آشکارسازی تغییرات، فیلتر تطبیق وینر بر روی تصویر نسبت اعمال شد. عدم نیاز به حدسیات اولیه و تنظیمات پارامتری همراه با حفظ دقت مطلوب و جزئیات نواحی تغییر یافته در مدت زمان مورد قبول، از مهم‌ترین مزایای روش معرفی‌شده برای آشکارسازی تغییرات برشمرده می‌شود. در نهایت، دقت آشکارسازی پیکسل‌های تغییر یافته در روش پیشنهادی و با استفاده از دو مجموعه داده شبیه‌سازی‌شده و ماهواره‌ای، حدود ۹۴ درصد در مقیاس کل پیکسل‌های تصویر به دست آمده است. از آنجا که آلودگی لکه‌ای به عنوان عاملی مزاحم،

- Hartigan, J. A., Wong, M.A., 1979, **A K-Means Clustering Algorithm**, Journal of the Royal Statistical Society. Series C (Applied Statistics), Vol. 28, No. 1, 100-108.
- Khodaei, B., Amini, J., 2011, **Change Detection in SAR Images Using a Modified Genetic Algorithm**, MVIP 2011 The 7th Iranian Conf, on Machine Vision and Image Processing. Tehran, Iran.
- Lim, J. S., 1990, **Two-Dimensional Signal and Image Processing**, Englewood Cliffs, NJ, Prentice Hall.
- Melanie, M., 1998, **An Introduction to Genetic Algorithms**, Massachusetts Institute of Technology.
- Nelson, R. F., 1983, **Detecting Forest Canopy Change Due to Insect Activity Using Landsat MSS**, Photogrammetric Engineering and Remote Sensing, Vol. 49, 1303-1314.
- OE, S., Yushimura, M., 1996, **Texture Image Segmentation by Genetic Algorithm**, Evolutionary Computation. Proceedings of IEEE International Conferenc, May 1996, 125-130.
- Oliver, C., Quegan, S., 1998, **Understanding Synthetic Aperture Radar Images**, Boston/London: Artech House.
- Otsu, N., 1979, **A Threshold Selection Method from Gray-Level Histograms**, IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics, Vol. 9, No. 1, 62-66.
- Rignot, E. J. M., Van Zyle J.J., 1993, **Change Detection Techniques for ERS-1 SAR Data**, IEEE Trans. Geosci. Remote Sensing, Vol. 31, 896-906.
- Rosin, P., 1998, **Thresholding for Change Detection**, Computer Vision, 1998. Sixth International Conference, 274-279.
- Schirinzi, V. P., 1996, **Reduction of Multiplicative Noise in SAR Imaging by Wiener Filtering**, Geoscience and Remote Sensing Symposium, 1577-1579.
- Shaoqing, Z., Lu, X., 2008., **The Comparative Study of Three Methods of Remote Sensing Image Change Detection**, International archives of Photogrammetry Remote Sensing and Spatial Information Sciences, 37 (B7), 1595-1598.
- Singh, A., 1989, **Digital Change Detection Techniques Using Remotely-Sensed Data**, International Journal of Remote Sensing, Vol. 10, No. 6, 989-1003.