



## آشکارسازی خودکار تغییرات در تصاویر ماهواره‌ای چندزمانه مبتنی بر حد آستانه‌گذاری با الگوریتم بهینه‌سازی توده ذرات

وحید صادقی<sup>۱\*</sup>، حمید عبادی<sup>۲</sup>، محمودرضا صاحبی<sup>۳</sup>، یاسر مقصودی<sup>۴</sup>، فرشید فرنود احمدی<sup>۵</sup>

۱. دانشجوی دکتری فتوگرامتری، دانشکده نقشه‌برداری، دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی
۲. دانشیار دانشکده نقشه‌برداری، عضو قطب علمی فناوری اطلاعات مکانی، دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی
- ۳ و ۴. استادیار گروه فتوگرامتری و سنجش از دور، دانشکده نقشه‌برداری، دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی
۵. استادیار گروه نقشه‌برداری، دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه تبریز

تاریخ پذیرش مقاله: ۱۳۹۳/۲/۶

تاریخ دریافت مقاله: ۱۳۹۲/۴/۲۵

### چکیده

آشکارسازی صحیح و آنی تغییرات پوشش و کاربری اراضی از موضوعات مهم حوزه برنامه‌ریزی و مدیریت اراضی به‌شمار می‌آید. یکی از روش‌های متداول شناسایی تغییرات، آنالیز تصاویر سنجش از دوری با تکنیک‌هایی نظیر حد آستانه‌گذاری تصویر اختلاف است. روش‌های متداول حد آستانه‌گذاری، عموماً مبتنی بر جست‌وجوی فراگیر و مستلزم صرف هزینه‌های محاسباتی بالایی هستند. از طرفی، ماهیت تک‌بعدی آنها سبب می‌شود تا در حل مسائل چندبعدی - همچون حد آستانه‌گذاری تصاویر چندطیفی سنجش از دوری - زمان محاسبات به‌طور نمایی افزایش یابد. راهکار پیشنهادی این پژوهش برای کاهش زمان محاسبات تکنیک‌های متداول حد آستانه‌گذاری، استفاده از الگوریتم بهینه‌سازی توده ذرات است که تکنیک سریع و کارآمدی را برای شناسایی تغییرات معرفی می‌کند. روش پیشنهادی همراه با چندین روش متداول حد آستانه‌گذاری روی دو سری داده تصاویر دوزمانه سنجنده TM پیاده‌سازی شد. برای ارزیابی قابلیت تکنیک ارائه‌شده در این پژوهش از سه پارامتر زمان محاسبات، صحت آشکارسازی تغییرات و پایداری الگوریتم در برآورد حد آستانه بهینه استفاده شد. نتایج ارزیابی نشان می‌دهند که الگوریتم پیشنهادی ضمن حفظ صحت آشکارسازی تغییرات، سبب کاهش زمان محاسبات در حدود ۱۵ درصد و ۹۸ درصد در مقایسه با دو تکنیک حد آستانه‌گذاری OTSU و کمینه‌سازی مجموع واریانس داخل‌کلاسی شده است. همچنین با مقایسه مقادیر جدول توزیع نرمال استاندارد با آماره آزمون برآوردشده، ثبات الگوریتم پیشنهادی در برآورد حد آستانه بهینه در سطح اطمینان ۹۰ درصد پذیرفته شد. نتایج حاصل از تحقیق بیانگر قابلیت بالای تکنیک پیشنهادی در حد آستانه‌گذاری سریع، پایدار و کارآمد تصویر اختلاف به‌منظور آشکارسازی خودکار و نظارت‌نشده تغییرات در تصاویر ماهواره‌ای چندزمانه است.

**کلیدواژه‌ها:** آشکارسازی تغییرات، حد آستانه‌گذاری، تصاویر ماهواره‌ای چندزمانه، الگوریتم بهینه‌سازی توده ذرات.

## ۱- مقدمه

آشکارسازی تغییرات ایجادشده در محیط، از موضوعات کاربردی و چالش برانگیز در بسیاری از شاخه‌ها از جمله برنامه‌ریزی شهری، محیط‌زیست و سایر علوم مربوط به زمین است. قابلیت سنجنده‌های ماهواره‌ای برای ثبت پرتوهای تابشی یا بازتابی از سطح عوارض در طول موج‌های مختلف و امکان شناسایی بخش عمده‌ای از خصوصیات عوارض از طریق انجام آنالیزهای طیفی، امکان استفاده از این تصاویر را برای استخراج اطلاعات موضوعی فراهم می‌آورد. سنجنده‌های ماهواره‌ای قادرند به‌آسانی تصاویر مربوط به منطقه موردنظر را در دوره‌های زمانی منظم دریافت کنند و آنها را در اختیار کاربران قرار دهند. لذا استفاده از تصاویر سنجش از دور به‌عنوان روش مناسبی برای آشکارسازی تغییرات مربوط به پدیده‌ها کاربرد دارد، که از جمله می‌توان به این موارد اشاره کرد: پایش گسترش شهرها (Xie and Fu, 2011; Imhoff et al., 2010)، آشکارسازی تغییرات کاربری و پوششی اراضی (Brink and Eva, 2009; Serrà et al., 2008)، پایش خطوط ساحلی (Gens, 2008; Amozadeh and Kanani, 2010)، پایش کیفیت سطح آب دریاها (Moser and Serpico, 2009; Le Vine et al., 2010)، پایش آلودگی هوا و گرد و غبار معلق در هوا (Martin, 2008; Garland et al., 2008) و پایش یخچال‌های طبیعی (Huss et al., 2008). با توجه به اینکه در اکثر زمینه‌های یادشده معمولاً به آنالیز مناطق وسیع و از همه مهم‌تر آنالیز آبی و سریع داده‌ها نیاز است، پیشنهاد یک روش آشکارسازی تغییرات کاملاً خودکار و نظارت‌نشده می‌تواند باعث تسریع و تسهیل در آنالیز داده‌ها و کاهش هزینه تولید اطلاعات لازم و بهنگام شود.

تکنیک‌های آشکارسازی تغییرات مبتنی بر تصاویر چندزمانه ماهواره‌ای را می‌توان به دو دسته کلی مقایسه پس از طبقه‌بندی<sup>۱</sup> و آشکارسازی تغییرات مبتنی بر بارزسازی<sup>۲</sup> تقسیم کرد (Chan et al., 2001). در تکنیک‌های مقایسه پس از طبقه‌بندی که به روش‌های

نظارت‌شده نیز شهرت دارند، نیاز به مجموعه الگوهای آموزشی برای یادگیری طبقه‌بندی‌کننده سبب غیرخودکار بودن این دسته الگوریتم‌ها شده و کارایی آنها را در بسیاری از کاربردهایی که الگوی آموزشی به‌دلایلی در دسترس نیست، از بین می‌برد. در مقابل، روش‌های آشکارسازی تغییرات مبتنی بر بارزسازی، نیازمند طبقه‌بندی نظارت‌شده تصاویر چندزمانه نیستند و فقط به آنالیز تصویر اختلاف می‌پردازند. در این روش‌ها معمولاً در مرحله نخست تصویر اختلاف با استفاده از عملیات جبری روی تصاویر دوزمانه به‌دست می‌آید و سپس این تصویر بررسی می‌شود تا در نهایت یک نقشه باینری تغییرات با دو کلاس که معرف مناطق تغییر یافته و تغییر نیافته است تهیه گردد. به دلیل قابلیت بالای اتوماسیون تکنیک آشکارسازی تغییرات مبتنی بر بارزسازی در مقایسه با تکنیک مقایسه پس از طبقه‌بندی، این تکنیک محبوبیت زیادی در سال‌های اخیر پیدا کرده است. حد آستانه‌گذاری تصویر اختلاف برای تفکیک مناطق تغییر یافته و تغییر نیافته از متداول‌ترین و ساده‌ترین روش‌های آشکارسازی تغییرات مبتنی بر بارزسازی در سنجش از دور است، که به تکنیک‌های حد آستانه‌گذاری شناخته می‌شوند. مشکل اصلی تکنیک‌های حد آستانه‌گذاری، تعیین حد آستانه بهینه است. حد آستانه بهینه معمولاً به روش سعی و خطا تعیین می‌شود و مبتنی بر تجربیات فرد خبره مفسر تصاویر است (Im et al., 2008). با این حال، روش‌هایی که مستقل از کاربر و به صورت خودکار عمل می‌کنند نیز برای تعیین حد آستانه بهینه پیشنهاد شده‌اند (Sezgin, 2004).

به‌عنوان نمونه می‌توان به حد آستانه‌گذاری OTSU اشاره کرد که بدون هیچ‌گونه فرضی در مورد داده‌ها، اقدام به حد آستانه‌گذاری هیستوگرام تصویر اختلاف می‌کند (Otsu 1975) ولی به جست‌وجوی تمامی

1. Post-classification change detection techniques  
2. Enhancement change detection techniques

هزینه بیشتری برای وارینس بین کلاسی و کمینه‌سازی جمع وارینس داخل کلاسی برشمرده می‌شود. ساختار مقاله حاضر بدین شرح است: در بخش «مواد و روش‌ها» تکنیک آشکارسازی تغییرات مبتنی بر بارزسازی و تکنیک‌های حد آستانه‌گذاری به کار گرفته شده در تحقیق شرح داده می‌شود، و روش پیشنهادی برای حد آستانه‌گذاری تصویر اختلاف مبتنی بر الگوریتم بهینه‌سازی توده ذرات و معیارهای ارزیابی معرفی می‌گردد. در بخش نتایج، مهم‌ترین یافته‌های تحقیق بیان می‌شوند و نتایج حاصل از پیاده‌سازی روش پیشنهادی تشریح می‌گردد. در خاتمه در بخش بحث و نتیجه‌گیری، مهم‌ترین نتایج تحقیق حاضر و پیشنهادهایی برای تحقیقات آتی ارائه می‌شوند.

## ۲- مواد و روش‌ها

در این بخش ابتدا کلیاتی درخصوص تکنیک آشکارسازی تغییرات مبتنی بر بارزسازی و تکنیک‌های حد آستانه‌گذاری در تصاویر ماهواره‌ای چندزمانه مطرح می‌شود و سپس روش پیشنهادی برای آشکارسازی خودکار و نظارت‌نشده تغییرات در تصاویر ماهواره‌ای بیان می‌گردد. در ادامه، داده‌های مورد استفاده و منطقه مطالعه شده معرفی و مهم‌ترین معیارهای ارزیابی تکنیک پیشنهادی به منظور مقایسه با تکنیک‌های حد آستانه‌گذاری متداول تشریح می‌شود.

## ۲-۱- آشکارسازی تغییرات مبتنی بر بارزسازی

همان‌طور که در مقدمه بیان شد، از آنجا که تکنیک آشکارسازی تغییرات مبتنی بر بارزسازی به نمونه‌های آموزشی نیاز ندارد، کارایی آن بیش از روش مقایسه پس از طبقه‌بندی است و روش‌های زیادی بر مبنای آن شرح و بسط داده شده‌اند. مراحل کلی الگوریتم

مقادیر ممکن برای حد آستانه می‌پردازد. این روش، روش جست‌وجوی فراگیر<sup>۱</sup> (ES) نامیده می‌شود. روش ES با اینکه همواره به جواب بهینه همگرا می‌شود ولی مستلزم بررسی تمام فضای مسئله است و لذا زمان و هزینه بالایی را می‌طلبد. یک راهکار برای کاهش هزینه محاسباتی، استفاده از الگوریتم‌های بهینه‌سازی است. ایم و همکاران (Im et al., 2008)، روش جست‌وجوی ابتکاری‌ای برای تعیین حد آستانه بهینه پیشنهاد کرده‌اند. روش آنها مبتنی بر بهینه‌سازی الگوریتم جست‌وجوی تپه‌نوردی<sup>۲</sup> است ولی برای رسیدن به اکستریم مطلق و گریز از افتادن در دام اکستریم‌های محلی - که اتفاقی رایج در جست‌وجو به روش تپه‌نوردی است - استفاده از توابع پرش<sup>۳</sup> را پیشنهاد کردند. روش آنها اگرچه کارآمد است، این سه نقطه ضعف را دارد: نخست، تابع هزینه به کار رفته ضریب کاپاست که با مقایسه نقشه تغییرات باینری حاصل از الگوریتم با نقشه تغییرات باینری مرجع محاسبه شده است. این مسئله باعث می‌شود که نتایج حاصل از الگوریتم به داده‌های مرجع بستگی داشته باشد و جواب بهینه در قبال داده‌های مرجع مناسب حاصل شود. دوم، با تعریف چنین تابع هزینه‌ای، الگوریتم آشکارسازی تغییرات به دست آمده به صورت خودکار ولی نظارت‌شده عمل می‌کند و مهم‌ترین مزیت روش آشکارسازی تغییرات مبتنی بر بارزسازی که همان بی‌نیاز بودن آن از داده‌های آموزشی است، از بین می‌رود. سوم، وابسته بودن نتایج به توابع پرشی است که می‌بایست به صورت تجربی تعیین شوند. برای رفع مشکلات حد آستانه‌گذاری تصویر اختلاف، روشی کارآمد برای آشکارسازی خودکار و نظارت‌نشده تغییرات در تصاویر ماهواره‌ای چندزمانه پیشنهاد می‌شود. روش پیشنهادی حد آستانه‌گذاری مبتنی بر الگوریتم بهینه‌سازی توده ذرات<sup>۴</sup> (PSO) است که بهترین حد آستانه برای تفکیک پیکسل‌های تغییر یافته و تغییر نیافته، با بهینه‌کردن تابع

1. Exhaustive Search
2. Hill climbing
3. Jump function
4. Particle swarm optimization

(Deng et al., 2009).

رابطه (۱)

$$X^1 = [X_1^1, X_2^1, X_3^1, \dots, X_n^1],$$

$$X^2 = [X_1^2, X_2^2, X_3^2, \dots, X_n^2]$$

رابطه (۲)

$$X_{Dif} = [X_1^2 - X_1^1, X_2^2 - X_2^1, \dots, X_n^2 - X_n^1]$$

جهت و اندازه بردار  $X_{Dif}$ ، ماهیت تغییرات ایجاد شده را نشان می‌دهد. در ادامه، هیستوگرام تصویر اختلاف آنالیز می‌شود و دو روش متداول حد آستانه‌گذاری برای آنالیز تصویر اختلاف معرفی می‌گردد.

## ۲-۲-۲- حد آستانه‌گذاری تصویر اختلاف

### ۲-۲-۱- حد آستانه‌گذاری OTSU

یکی از پرکاربردترین روش‌های حد آستانه‌گذاری، روش Otus است که جدایی‌پذیری پیکسل‌های تغییرنیافته (کلاس  $C_0$ ) و پیکسل‌های تغییریافته (کلاس  $C_1$ ) را با توجه به واریانس کلاس‌های مربوط به آنها ماکزیمم می‌کند. در این روش، حد آستانه بهینه زمانی انتخاب می‌شود که جمع واریانس داخل کلاس‌ها مینیمم شود، که در واقع متناظر است با اینکه واریانس بین کلاس‌ها ماکزیمم گردد (Liao et al., 2001; Otsu 1975). در ادامه، نحوه تعیین حد آستانه بهینه در این روش بیان می‌گردد.

تصویر اختلاف را می‌توان به‌عنوان تابع شدت در نظر گرفت که شامل  $N$  پیکسل با درجات خاکستری ۱ تا  $L-1$  است. در صورتی که تعداد پیکسل‌هایی با درجه خاکستری  $i$  را با  $f_i$  نشان دهیم، احتمال درجه خاکستری  $i$  در تصویر اختلاف حاصل از تصاویر مرجع و هدف به‌صورت رابطه (۳) است.

$$p_i = \frac{f_i}{N} \quad \text{رابطه (۳)}$$

هدف الگوریتم، پیدا کردن حد آستانه بهینه است.

آشکارسازی تغییرات به‌روش نظارت‌نشده چنین است:

۱- هم مرجع‌سازی تصاویر چندزمانه که از یک منطقه جغرافیایی و در زمان‌های متفاوت دریافت شده است،  
 ۲- تصحیح رادیومتریک تصاویر چندزمانه، ۳- مقایسه پیکسل به پیکسل تصاویر چندزمانه و تهیه یک تصویر به نام تصویر اختلاف<sup>۱</sup> (DI) معمولاً به روش  $CVA^2$  و  
 ۴- آنالیز تصویر اختلاف. مهم‌ترین قسمت فرایند آنالیز تغییرات که در حوزه پژوهش حاضر قرار می‌گیرد، بخش چهارم یعنی آنالیز تصویر اختلاف است. یکی از روش‌هایی که معمولاً برای آنالیز تصویر اختلاف به‌کار گرفته می‌شود، تکنیک حد آستانه‌گذاری است. برخلاف ساده‌بودن تکنیک فوق، تعیین حد آستانه بهینه با دشواری همراه است. حد آستانه بهینه معمولاً به‌روش سعی و خطا تعیین می‌شود بر تجربیات فرد خبیره مفسر تصاویر تکیه دارد. در برخی از این روش‌ها با این فرض که هیستوگرام تصویر اختلاف گوسی‌شکل است و انحراف معیار آن توزیع  $\sigma$  است، پیکسل‌هایی که مقدار آنها در قدر مطلق تصویر اختلاف در بازه  $[0, k\sigma]$  قرار دارند، به‌عنوان پیکسل‌های تغییرنیافته معرفی می‌شوند (Otsu, 1975). اما مشکل در اینجاست که هیستوگرام تصویر اختلاف همواره گوسی‌شکل نیست. ضعف بعدی در روش‌های مذکور نحوه انتخاب ضریب  $k$  (یک عدد حقیقی مثبت) است، زیرا کمترین اشتباه در تعیین  $k$  باعث تخریب نتایج آشکارسازی تغییرات می‌شود و اصولاً به‌صورت تجربی (سعی و خطا) تعیین می‌شود. روش‌هایی نیز برای تعیین حد آستانه بهینه پیشنهاد شده است که مستقل از کاربرند و به‌صورت خودکار عمل می‌کنند؛ از جمله روش جست‌وجوی فراگیر (ES) که منوط به جست‌وجوی تمام فضای مسئله است و زمان محاسبات بالایی را می‌طلبد.

اگر دو تصویر زمان اول و زمان دوم دریافت شده از یک منطقه جغرافیایی به‌ترتیب با دو بردار  $X^1$  و  $X^2$  به‌صورت رابطه (۱) نشان داده شوند، که در آن،  $n$  تعداد باندهای تصاویر چندزمانه است؛ تصویر اختلاف معمولاً به‌روش تفاضل به‌صورت رابطه (۲) محاسبه می‌شود

1. Difference Image

2. Change Vector Analysis

حد آستانه‌گذاری مبتنی بر واریانس داخل کلاسی<sup>۲</sup> یکی دیگر از پرکاربردترین روش‌های حد آستانه‌گذاری، کمینه‌سازی جمع واریانس داخل کلاسی (ICV) در دو کلاس تغییرنیافته (کلاس  $C_0$ ) و پیکسل‌های تغییر یافته (کلاس  $C_1$ ) است، که در آن حد آستانه بهینه زمانی انتخاب می‌شود که جمع واریانس داخل کلاس‌ها کمینه شود. جمع واریانس داخل کلاسی در تصویر حد آستانه‌گذاری شده به صورت رابطه (۹) برآورد می‌شود.

$$\sigma_{IC}^2 = \frac{\sum_{\forall(i) \in C_0} (X(i) - \bar{X}_{C_0})^2}{N_{C_0} - 1} + \frac{\sum_{\forall(i) \in C_1} (X(i) - \bar{X}_{C_1})^2}{N_{C_1} - 1}$$

رابطه (۹)

که در آن،

$$\bar{X}_{C_0} = \frac{\sum_{\forall(i) \in C_0} X(i)}{N_{C_0}} \quad \bar{X}_{C_1} = \frac{\sum_{\forall(i) \in C_1} X(i)}{N_{C_1}} \quad (10)$$

در این رابطه،  $N_{C_0}$  و  $N_{C_1}$  به ترتیب معرف تعداد کل پیکسل‌های تغییرنیافته و تغییر یافته‌ای است که با استفاده از حد آستانه  $t$  تفکیک شده‌اند. الگوریتم حد آستانه‌گذاری واریانس داخل کلاسی دنبال حد آستانه بهینه  $i$  می‌گردد که واریانس داخل کلاسی  $\sigma_{IC}^2$  را کمینه کند.

رابطه (۱۱)

$$t^* = \text{Arg MIN}\{\sigma_{IC}^2(t)\}, \quad 1 \leq t \leq L-1$$

## ۲-۳- روش پیشنهادی مبتنی بر حد آستانه‌گذاری خودکار و نظارت نشده مبتنی بر الگوریتم توده ذرات

برای یافتن بهترین حد آستانه در تکنیک‌های متداول حد آستانه در تکنیک‌های متداول حد آستانه‌گذاری لازم

اگر این حد آستانه را با  $t$  نشان دهیم، کلاس  $C_0$  شامل جمع احتمالات درجه خاکستری  $[1, t]$  و کلاس  $C_1$  شامل جمع احتمالات درجات خاکستری  $[t+1, L-1]$  است، و توزیع احتمال درجات خاکستری دو کلاس ذکر شده به شکل رابطه (۴) است

$$w_0(t) = \frac{P_1}{w_0(t)}, \frac{P_2}{w_0(t)}, \dots, \frac{P_t}{w_0(t)},$$

$$w_1(t) = \frac{P_{t+1}}{w_1(t)}, \frac{P_{t+2}}{w_1(t)}, \dots, \frac{P_L}{w_1(t)}$$

در صورتی که  $w_0(t) = \sum_{i=1}^t P_i$  و  $w_1(t) = \sum_{i=t+1}^L P_i$

باشد، میانگین دو کلاس  $C_0$  و  $C_1$  به صورت رابطه (۵) برآورد می‌شود.

رابطه (۵)

$$\mu_0(t) = \sum_{i=1}^t i \frac{P_i}{w_0(t)}, \quad \mu_1(t) = \sum_{i=t+1}^L i \frac{P_i}{w_1(t)}$$

Otsu واریانس بین کلاسی<sup>۱</sup> در تصویر حد آستانه‌گذاری شده را به صورت رابطه (۶) معرفی می‌کند.

رابطه (۶)

$$\sigma_{BC}^2(t) = w_0(t)(\mu_0(t) - \mu_T)^2 +$$

$$w_1(t)(\mu_1(t) - \mu_T)^2$$

الگوریتم Otsu دنبال حد آستانه بهینه  $t^*$  می‌گردد که واریانس بین کلاسی  $\sigma_B^2$  را بیشینه کند.

رابطه (۷)

$$t^* = \text{Arg MAX}\{\sigma_{BC}^2(t)\}, \quad 1 \leq t \leq L-1$$

برای تعیین حد آستانه بهینه نیاز است تمامی پارامترهای فوق برای هر نماینده  $t$  ( $1 \leq t \leq L-1$ ) تعیین شوند، لذا با حجم محاسباتی بالایی روبه‌رو خواهیم شد. لیو و همکاران (Liao et al., 2001) برای رفع این مشکل با ساده‌سازی روابط پیشین، واریانس بین کلاسی  $\sigma_{BC}^2$  را به صورت رابطه (۸) معرفی کردند.

رابطه (۸)

$$t^* = \text{Arg MAX}\{w_0(t)\mu_0^2(t) +$$

$$w_1(t)\mu_1^2(t)\}, \quad 1 \leq t \leq L-1$$

1. Between Class variance  
2. Inter Class variance

این روش به عنوان روشی خودکار و نظارت نشده برای آشکارسازی تغییرات در تصاویر هوایی و ماهواره‌ای چندزمانه استفاده کرد.

در این بخش به منظور بررسی روش پیشنهادی، ابتدا نحوه کار الگوریتم بهینه‌سازی توده ذرات بیان شده است و در ادامه روند حل مسئله حد آستانه‌گذاری به صورت مسئله بهینه‌سازی تشریح می‌گردد.

### ۲-۳-۱- الگوریتم توده ذرات

الگوریتم بهینه‌سازی مبتنی بر حرکت توده ذرات (PSO)، روش بهینه‌سازی جمعیت‌مبنایی است که از رفتار جمعی پرندگان یا ماهی‌ها الهام گرفته شده است و انگلبرت (Engelbercht, 2007) و پلی و همکاران (Poli et al., 2007) آن را تدوین کرده‌اند. در الگوریتم بهینه‌سازی توده ذرات، جمعیت از تعدادی ذره تشکیل شده که بیانگر نماینده‌های مختلف حل مسئله است. فضای راه‌حل مسئله به عنوان فضای جست‌وجو به گونه‌ای تعریف می‌شود که هر موقعیت در فضای جست‌وجو، راه‌حلی برای مسئله باشد و پتانسیل کامل حل مسئله را داشته باشد. ذرات برای پیدا کردن بهترین موقعیت در فضای جست‌وجو با هم تعامل می‌کنند تا در نهایت براساس تابع هزینه تعریف شوند و به بهترین جواب دست یابند. در این الگوریتم هر ذره مطابق با معادلات سرعت و موقعیت اشاره شده در روابط (۱۴) و (۱۵)، در فضای جست‌وجو حرکت می‌کند.

رابطه (۱۴)

$$v_{ij}(t+1) = w_{ij}(t) \times v_{ij}(t) + c_1 r_{1j}(t) [pbest(t) - x_{ij}(t)] + c_2 r_{2j}(t) [gbest(t) - x_{ij}(t)]$$

رابطه (۱۵)

$$x_{ij}(t+1) = x_{ij}(t) + v_i(t+1)$$

در این روابط،  $v_{ij}(t)$  سرعت ذره  $i$  در بعد  $j$  ( $j=1, \dots, n$ ) در گام زمانی  $t$  و  $w_{ij}(t)$  وزن اینرسی ذره  $i$  در بعد  $j$  است که گشتاور ذره را به وسیله وزن دار کردن

است تا تمام حد آستانه‌های محتمل  $t$  برای  $(1 \leq t \leq L)$  بررسی شوند، از این رو حجم محاسبات بسیار بالاست. مشکل هزینه محاسباتی زمانی آشکارتر می‌شود که ابعاد فضای جست‌وجو بزرگ باشد. در صورتی که ابعاد فضای جست‌وجو (تعداد باندهای تصویر) برابر  $n$  باشد و دامنه درجات روشنایی قدرمطلق تصویر اختلاف (D) که در آن  $D=2^f$  باشد،  $r$  بیانگر قدرت تفکیک رادیومتریکی تصاویر اصلی است. در این صورت تعداد جست‌وجوی لازم برای یافتن بهترین حد آستانه با رابطه (۱۲) تعیین می‌شود.

$$T = (2^r)^n \quad \text{رابطه (۱۲)}$$

با فرض تصویر ۶ باندهای با قدرت تفکیک رادیومتریکی ۸ بیتی، تعداد جست‌وجو از رابطه (۱۳) مشخص می‌شود.

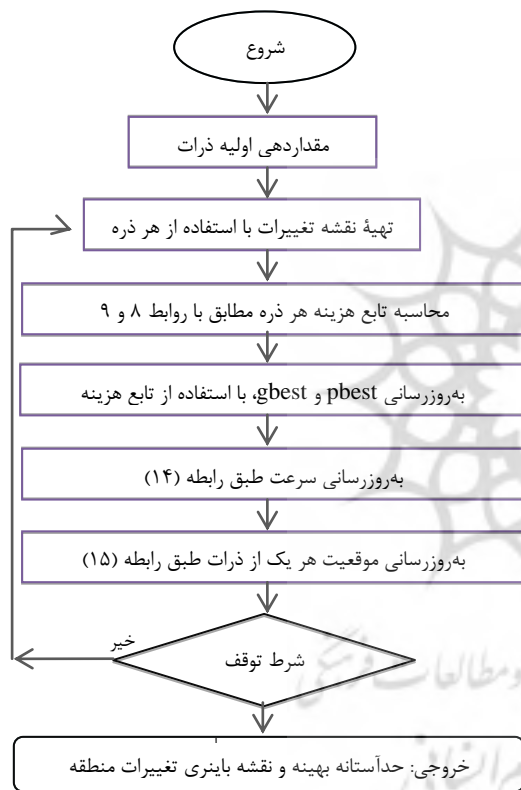
$$T = (2^8)^6 = 2/8 \times 10^{14} \quad \text{رابطه (۱۳)}$$

انجام جست‌وجوی فراگیر برای یافتن حد آستانه بهینه در این نوع مواقع منوط به آزمودن  $2/8 \times 10^{14}$  حد آستانه خواهد بود. البته برحسب تجربه کاربر، امکان کاهش فضای جست‌وجو وجود دارد ولی باز هم مستلزم صرف هزینه محاسباتی بالایی است. بدین ترتیب نقش الگوریتم‌های جست‌وجوی فراابتکاری برای کاهش فضای جست‌وجو روشن‌تر می‌شود، به این صورت که می‌توان مسئله حد آستانه‌گذاری را نوعی مسئله بهینه‌سازی در نظر گرفت. اخیراً الگوریتم‌های تکاملی مانند الگوریتم ژنتیک، الگوریتم ممتیک و الگوریتم‌های فراابتکاری مانند الگوریتم کلونی مورچه‌ها، زنبورها، قورباغه‌ها و الگوریتم بهینه‌سازی توده ذرات<sup>۱</sup> (PSO) به طور موفقیت‌آمیزی در مسائل بهینه‌سازی به کار گرفته شده‌اند (Elbeltagi et al., 2005). در این مطالعه از بین روش‌های گفته شده، الگوریتم بهینه‌سازی توده ذرات به دلیل توانایی بالایی آن در جست‌وجوی سراسری و محلی فضای مسئله و ساده بودن آن انتخاب شد. روش پیشنهادی با به کارگیری الگوریتم بهینه‌سازی توده ذرات، حد آستانه بهینه برای تفکیک پیکسل‌های تغییرنیافته و تغییر یافته را برآورد می‌کند و می‌توان از

1. Particle swarm optimization

## آشکارسازی خودکار تغییرات در تصاویر ماهواره‌ای چندزمانه مبتنی بر حد آستانه‌گذاری با الگوریتم بهینه‌سازی توده ذرات

از توابع هزینه متنوعی می‌توان استفاده کرد. با توجه به توضیحات ارائه‌شده در بخش ۲-۲ در مورد دو روش متداول حد آستانه‌گذاری از دو تابع هزینه بهینه‌سازی واریانس بین کلاسی OTSU (رابطه ۸) و کمینه‌سازی واریانس داخل کلاسی (رابطه ۱۱) در مسئله بهینه‌سازی استفاده شد. روند الگوریتم حد آستانه‌گذاری پیشنهادی مبتنی بر الگوریتم توده ذرات در شکل ۱ نشان داده شده است.



شکل ۱. روند الگوریتم حد آستانه‌گذاری پیشنهادی مبتنی بر الگوریتم بهینه‌سازی توده ذرات

### ۲-۴- داده‌های استفاده‌شده

روش پیشنهادی برای حد آستانه‌گذاری خودکار و نظارت‌نشده تصویر اختلاف روی دو جفت تصویر دوزمانه دریافت‌شده به وسیله سنجنده TM پیاده‌سازی شد. تصاویر استفاده‌شده در جفت تصویر اول، دو تصویر با ابعاد  $950 \times 820$  از جزایر جنوبی دریایچه ارومیه در

سرعت اولیه ذره کنترل می‌کند. این شاخص، تأثیر میزان حافظه قبلی از حرکت ذره بر سرعت جدید را تنظیم می‌کند.  $x_{ij}(t)$  موقعیت ذره  $i$  در بعد  $j$  در گام زمانی  $t$  است.  $pbest(t)$  بهترین موقعیت ذره را تا رسیدن به موقعیت فعلی نشان می‌دهد؛ که به جزء شناختی معروف است  $gbest(t)$  بهترین موقعیت ذره را تا رسیدن به موقعیت فعلی نشان می‌دهد؛ که به جزء شناختی معروف است.  $gbest(t)$  بهترین موقعیت حاصل از سایر ذرات را تا رسیدن به موقعیت فعلی نشان می‌دهد (جزء اجتماعی).  $c_1$  و  $c_2$  ثابت‌های مثبت شتاب‌دهنده که به ترتیب برای مقیاس‌گذاری اجزای شناختی و اجتماعی به کار می‌روند.  $r_{1j}(t)$  و  $r_{2j}(t)$  مقادیر تصادفی در بازه  $[0,1]$  هستند که از توزیع یکنواختی نمونه‌برداری شده‌اند. این مقادیر تصادفی، مؤلفه تصادفی بودن الگوریتم را تعیین می‌کنند.

### ۲-۳-۲- حد آستانه‌گذاری تصویر اختلاف مبتنی بر الگوریتم توده ذرات

در مسائل بهینه‌سازی مبتنی بر الگوریتم توده ذرات دو جزء اساسی با نام‌های جمعیت و تابع هزینه وجود دارد. جمعیت شامل تعدادی ذره است که هر یک از آنها پتانسیل کامل حل مسئله را دارد. تابع هزینه، میزان مطلوبیت هر ذره را مشخص می‌کند و برای هر مسئله، نوع تابع هزینه و ماهیت ذرات متفاوت است. در مفهوم حد آستانه‌گذاری تصویر اختلاف مبتنی بر الگوریتم بهینه‌سازی توده ذرات، هر ذره دربردارنده حد آستانه تصویر اختلاف در هر یک از باندهای طیفی است. بدین ترتیب هر ذره را می‌توان به صورت رابطه (۱۶) نمایش داد.

$$T_i = (T_{i,1}, T_{i,2}, \dots, T_{i,n}) \quad \text{رابطه (۱۶)}$$

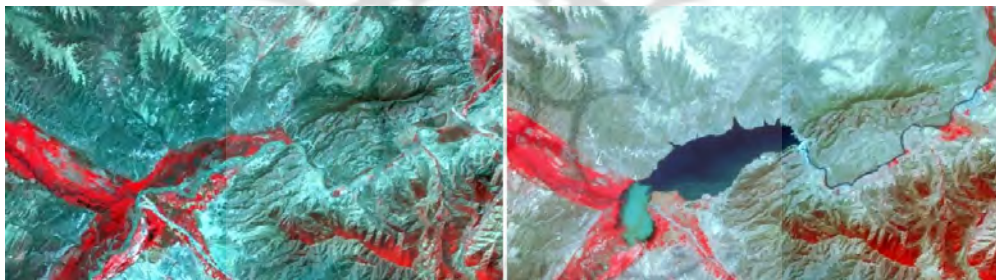
که در آن  $T_{i,1}$  تا  $T_{i,n}$  نشان‌دهنده حد آستانه تصویر اختلاف در باندهای ۱ تا  $n$  در آمین ذره است. بنابراین هر جمعیت بیانگر تعدادی از نماینده‌های حد آستانه بهینه برای تفکیک پیکسل‌های تغییرنیافته و تغییریافته در تصویر اختلاف است. برای ارزیابی مطلوبیت هر ذره

در تاریخ‌های ۲۰۰۰/۰۷/۲۲ و ۲۰۰۹/۰۷/۱۵ از این منطقه دریافت شده‌اند. شکل‌های ۲ و ۳ به ترتیب ترکیب رنگی ۵، ۴ و ۳، ۲ و تصاویر استفاده‌شده در جفت تصویر اول و دوم را نشان می‌دهند.

استان آذربایجان شرقی هستند. تصویر اول در تاریخ ۱۹۸۴/۰۶/۲۴ و تصویر دوم در تاریخ ۲۰۱۰/۰۷/۰۲ با سنجنده لندست TM5 از منطقه مورد نظر دریافت شده است. تصاویر استفاده‌شده در جفت تصویر دوم، دو تصویر با ابعاد ۴۷۰ × ۸۳۰ از سد خدآفرین استان آذربایجان شرقی هستند که با سنجنده لندست TM5



شکل ۲. جفت تصویر اول، تصویر سال ۲۰۱۰ (راست)، تصویر سال ۱۹۸۴ (چپ)



شکل ۳. جفت تصویر دوم، تصویر سال ۲۰۰۹ (راست)، تصویر سال ۲۰۰۰ (چپ)

## ۲-۵- معیارهای ارزیابی

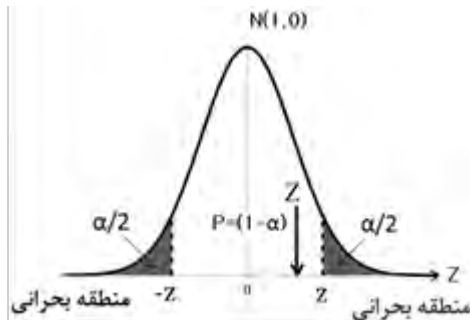
ارزیابی قابلیت روش پیشنهادی به کار گرفته شود، ثبات الگوریتم در برآورد حد آستانه بهینه است. چنانچه هدف مقایسه ثبات چند روش بهینه‌سازی باشد، ساده‌ترین راهکار مقایسه واریانس حد آستانه‌های برآوردشده است، به طوری که هرچه قدر واریانس حد آستانه‌های برآوردشده در تکرارهای متوالی کمتر باشد، معرف ثبات بالای الگوریتم متناظر است. ولی زمانی که هدف، بررسی کارایی و ثبات الگوریتم بهینه‌سازی در مقایسه با الگوریتم جست‌وجوی فراگیر باشد، راهکار مناسب انجام آزمون آماری میانگین جامعه است. با فرض اینکه میانگین جامعه (بهترین حد آستانه T)

با توجه به هدف تحقیق حاضر که بهینه‌سازی روش‌های حد آستانه‌گذاری به منظور کاهش هزینه محاسباتی است، مهم‌ترین معیاری که می‌تواند برای ارزیابی روش پیشنهادی به کار گرفته شود، زمان محاسبات لازم برای برآورد حد آستانه بهینه است. با توجه به وجود مؤلفه‌های تصادفی در الگوریتم بهینه‌سازی توده ذرات، پاسخ الگوریتم در اجراهای مختلف متفاوت است و موفقیت الگوریتم در برآورد مقدار بهینه (حد آستانه‌ای حاصل از الگوریتم‌های جست‌وجوی فراگیر) در تمامی اجراها قطعی نیست. معیار دیگری که می‌تواند برای



آشکارسازی خودکار تغییرات در تصاویر ماهواره‌ای چندزمانه مبتنی بر حد آستانه‌گذاری با الگوریتم بهینه‌سازی توده ذرات

به‌اشتباه به‌عنوان تغییرات شناسایی کرده (FA)<sup>۱</sup>، درصد پیکسل‌های تغییر کرده‌ای که الگوریتم موفق به شناسایی آنها نشده (ME)<sup>۲</sup> و خطای کلی آشکارسازی تغییرات که حاصل تقسیم کل پیکسل‌های اشتباه شناسایی شده به تعداد کل پیکسل‌های داده‌های ارزیابی (TE)<sup>۳</sup> است.



شکل ۴. توزیع نرمال استاندارد و نمایش سطح اطمینان 1- و منطقه بحرانی/2

### ۳- نتایج

روش پیشنهادی برای حد آستانه‌گذاری خودکار و نظارت نشده تصویر اختلاف، به‌همراه دو روش حد آستانه‌گذاری متداول: ۱- مبتنی بر جست‌وجوی فراگیر OTSU و ۲- مبتنی بر واریانس داخل کلاسی روی دو جفت تصویر دوزمانه معرفی شده پیاده‌سازی شد. با توجه به اهمیت و ضرورت دو فرایند هم‌مرجع‌سازی تصاویر چندزمانه و تصحیح رادیومتریک آنها در نتایج آشکارسازی تغییرات، معمولاً این دو مرحله به‌عنوان پیش‌پردازش قبل از اعمال الگوریتم‌های آشکارسازی تغییرات مبتنی بر تصاویر چندزمانه انجام می‌شوند (Im et al., 2008). ابتدا در هر دو سری داده مورد استفاده، تصاویر هدف با انتخاب تعداد کافی نقطه کنترل که دارای توزیع مناسبی در سطح منطقه بودند، با خطای RMSE کمتر از نیم‌پیکسل نسبت به تصاویر مرجع از لحاظ مکانی منطبق شدند. سپس از روش نرمالیزاسیون

مجهول باشد، بررسی می‌شود که آیا می‌توان مقدار مفروض  $T_0$  را با احتمال  $p$ ، میانگین این جامعه دانست یا نه. فرضیه‌های آماری به‌صورت رابطه (۱۷) در نظر گرفته می‌شوند.

$$H_0: T = T_0 \quad \text{رابطه (۱۷)}$$

$$H_1: T \neq T_0$$

آماره آزمون با فرض اینکه تعداد تکرارها بیشتر از ۳۰ بار باشد، به‌صورت رابطه (۱۸) تعریف می‌شود (Cooper, 1987).

$$\text{رابطه (۱۸)}$$

$$Z = \frac{\bar{X} - T}{\sigma / \sqrt{N}}$$

در این رابطه،  $T$  حد آستانه بهینه‌ای است که به‌وسیله الگوریتم جست‌وجوی سراسری به‌فرض الگوریتم OTSU برآورد شده است.  $\bar{X}$  و  $\sigma$  نیز به ترتیب میانگین و انحراف معیار حد آستانه‌های برآورد شده به‌وسیله الگوریتم حد آستانه‌گذاری پیشنهادی مبتنی بر PSO در تکرارهای مختلف و  $N$  تعداد کل تکرار الگوریتم حد آستانه‌گذاری پیشنهادی است.

با توجه به احتمال  $p$  مقدار  $Z$  بحرانی از جدول توزیع نرمال استاندارد محاسبه می‌شود و منطقه بحرانی تعیین می‌گردد (شکل ۴). اگر آماره آزمون در منطقه بحرانی قرار گیرد فرضیه  $H_0$  رد می‌شود و فرضیه  $H_1$  پذیرفته می‌شود؛ یعنی با احتمال  $p$  مقدار  $T_0$  را نمی‌توان به‌عنوان بهترین حد آستانه پذیرفت. اگر آماره آزمون در منطقه بحرانی قرار نگیرد فرضیه  $H_0$  رد نمی‌شود یعنی دلیلی برای رد مقدار  $H_0$  به‌عنوان بهترین حد آستانه وجود ندارد. معمولاً فاصله اطمینان ۹۰ درصدی در نظر گرفته می‌شود که در این صورت مرزهای منطقه بحرانی  $\pm 1/645$  خواهند بود.

معیار سومی که برای ارزیابی نتایج از آن استفاده شد، پارامترهای کمی رایج در ارزیابی نتایج دقت آشکارسازی تغییرات بود که به ترتیب اینها هستند: درصد پیکسل‌های تغییر نکرده‌ای که الگوریتم آنها را

1. False Alarm
2. Missed Error
3. Total Error

کاهش غیرخطی استفاده شد که در آن میزان وزن اینرسی ذره در تکرار  $i$ ام از رابطه (۲۰) برآورد می‌شود.

رابطه (۲۰)

$$W_i = (W_{Start} - W_{End}) \times \tan\left(\frac{\gamma}{\lambda} \times \left(1 - \left(\frac{i}{Itrn}\right)^k\right)\right) + W_{End}$$

که در آن  $W_{Start}$  و  $W_{End}$  به ترتیب بیانگر وزن اینرسی در شروع و پایان نسل است که معمولاً ۱ و ۰/۴ در نظر گرفته می‌شود. پارامتر  $k$  مقدار ثابتی است که معمولاً ۰/۴ در نظر گرفته می‌شود و پارامترهای  $i$  و  $Itrn$  شماره نسل (تکرار) و تعداد کل تکرار هستند.

پارامتر مهم و تأثیرگذار دیگر در الگوریتم‌های بهینه‌سازی، معیار توقف الگوریتم است. معمولاً «تعداد تکرار مجاز» به عنوان معیار توقف برای الگوریتم در نظر گرفته می‌شود. تعداد تکرار مجاز به طور تجربی و در فرایند سعی و خطا انتخاب می‌شود و سبب تحمیل تکرارهای بیش از حد به الگوریتم می‌گردد. اگر همگرایی الگوریتم به نحوی با استفاده از برخی پارامترها کنترل شود، می‌توان تعداد تکرار الگوریتم را به طور مؤثری کاهش داد و زمان محاسبات را پایین آورد. پارامترهایی که برای کنترل همگرایی الگوریتم استفاده می‌شوند، وابسته به مسئله و کاربرد مورد نظر هستند (Zielinski and Laur, 2007). در این تحقیق، یک معیار توقف جدید مبتنی بر همگرایی الگوریتم برای مسئله آشکارسازی تغییرات نظارت‌نشده با تکنیک حد آستانه‌گذاری تصاویر اختلاف شرح و بسط داده شد. «معیار توقف مبتنی بر همگرایی» ارائه شده در پژوهش حاضر، تعداد تکرار الگوریتم را براساس دو پارامتر ثابت حد آستانه برآوردی یا عدم تغییر حد آستانه برآورد شده در چندین تکرار متوالی؛ و میزان اختلاف حد آستانه برآورد شده در دوره همگرایی با حد آستانه برآورد شده در مراحل قبل، کنترل می‌کند. شرط توقف الگوریتم براساس معیار معرفی شده در تکرار شماره  $m$ ام به این شرح است: اگر حد آستانه برآورد شده در  $m$  تکرار متوالی قبلی (تکرار شماره  $n-m$  تا  $n$ )، تغییر نکند ( $T_m - T_n = 0$ )، و به طور هم‌زمان حد آستانه برآورد شده در

خودکار مبتنی بر شبکه‌های عصبی (Sadeghi et al., 2013) برای تصحیح رادیومتریک نسبی هر جفت تصویر مرجع - هدف استفاده شد. با بررسی بصری تصاویر سری زمانی مشخص می‌شود که تغییرات رخ داده در منطقه عمدتاً مربوط به تغییرات پوشش گیاهی و سطوح آبی هستند. با توجه به خصوصیات بیوفیزیکی این نوع سطوح، بهتر است از باندهای قرمز و مادون قرمز برای آشکارسازی تغییرات استفاده شود. لذا دو باند طیفی ۴ و ۵ از جفت تصویر اول و باندهای طیفی ۳ و ۴ از جفت تصویر دوم برای آشکارسازی تغییرات به کار گرفته شدند. بعد از پیش پردازش تصاویر استفاده شده، روش پیشنهادی مبتنی بر توده ذرات برای برآورد حد آستانه بهینه پیاده‌سازی شد. برای این منظور ۵ ذره و در ۳۰ تکرار برای حد آستانه‌گذاری تصویر اختلاف در نظر گرفته شده و مقادیر دو پارامتر  $C_1$  و  $C_2$  طوری تنظیم شد که ذرات در تکرارهای اول بتوانند با تکیه بیشتر بر مؤلفه شناختی به جست‌وجوی فراگیر فضای جست‌وجو بپردازند و در دام اکستریم‌های محلی گرفتار نشوند. سپس به مرور زمان در تکرارهای بالاتری باید از میزان مؤلفه شناختی کاسته شود و در عوض مؤلفه اجتماعی وزن بیشتری بیابد تا با این ترفند همه ذرات دارای دقت بالاتر اطراف نقطه اکستریم را جست‌وجو کنند. برای رسیدن به این نوع جست‌وجوی هدفمند، مقادیر دو پارامتر  $C_1$  و  $C_2$  به ترتیب از توابع معرفی شده در رابطه (۱۹) محاسبه شدند.

رابطه (۱۹)

$$C_1 = 2 \times \frac{Itrn - i}{Itrn} + 0.5 \quad C_2 = 2 \times \frac{i}{Itrn} + 0.5$$

که در آن  $i$  معرف شماره تکرار و  $Itrn$  معرف تعداد کل تکرار الگوریتم بهینه‌سازی توده ذرات است.

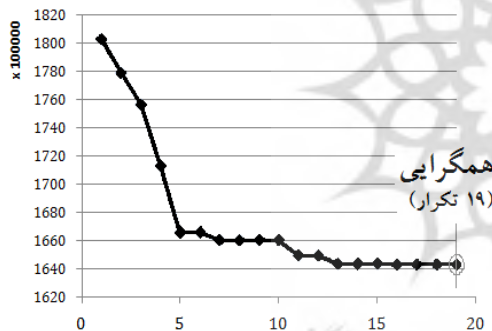
نقش وزن اینرسی، کنترل مؤلفه سرعت قبلی ذره به منظور برقراری تعادل بین جست‌وجوی سراسری و محلی است. روش‌های مختلفی برای تنظیم وزن اینرسی پیشنهاد شده است. در این تحقیق از روش کاهش غیرخطی استفاده شد که در آن میزان وزن اینرسی پیشنهاد شده است. در این تحقیق از روش

## آشکارسازی خودکار تغییرات در تصاویر ماهواره‌ای چندزمانه مبتنی بر حد آستانه‌گذاری با الگوریتم بهینه‌سازی توده ذرات

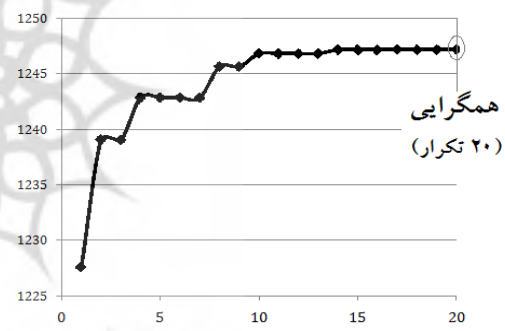
پیشنهادی OTSU (رابطه ۸) و کمینه‌سازی واریانس داخل کلاسی (رابطه ۹) برای سری داده اول نشان می‌دهند. همان‌طور که مشاهده می‌شود، الگوریتم توده ذرات با اعمال دو شرط مذکور، در تکرارهای ۲۰ و ۱۹ به ترتیب برای دو تابع هزینه رابطه (۸) و رابطه (۹) متوقف شده است. شکل‌های ۷ و ۸ نیز روند همگرایی الگوریتم و محل برقراری شرط توقف آن را در برآورد بهترین حد آستانه به ترتیب با بهره‌گیری از دو تابع هزینه رابطه (۸) و رابطه (۹) برای سری داده دوم نشان می‌دهد. همان‌طور که در شکل‌های ۷ و ۸ مشاهده می‌شود، الگوریتم توده ذرات در تکرارهای ۲۱ و ۲۴ به ترتیب برای دو تابع هزینه رابطه (۸) و رابطه (۹) متوقف شده است. در نهایت حد آستانه برآوردشده در آخرین تکرارها به عنوان حد آستانه بهینه منظور شد.

تکرار شماره  $n-m$ ، با حد آستانه برآوردشده از تکرار قبل آن کمتر از مقدار ازپیش تعیین‌شده  $\in$  باشد  $(T_{n-m} - T_{n-m-1} = \in)$ ، ادعا می‌شود که الگوریتم به حد آستانه مناسبی همگرا شده است و تکرار بیش از آن توصیه نمی‌شود. در معیار مذکور، پارامتر  $\in$ ، یک واحد در نظر گرفته شد.

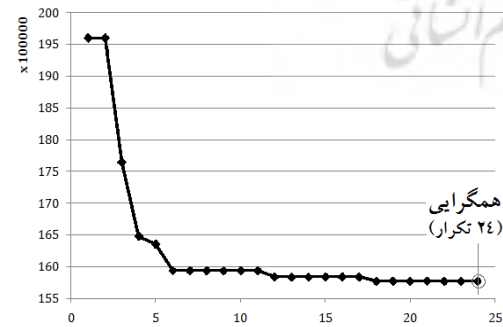
در مرحله پیاده‌سازی از دو شرط توقف: «تعداد تکرار بیشینه مجاز» (۳۰ تکرار)؛ و معیار جدید «توقف مبتنی بر همگرایی» که در این مقاله پیشنهاد شد، به‌طور هم‌زمان استفاده شد و کاهش تعداد تکرار الگوریتم و متعاقباً کاهش زمان محاسبات را به دنبال داشت. شکل‌های ۵ و ۶ روند همگرایی الگوریتم بهینه‌سازی توده ذرات و محل برقراری شرط توقف آن را در برآورد بهترین حد آستانه به ترتیب با بهره‌گیری از دو تابع هزینه بیشینه‌سازی واریانس بین کلاسی



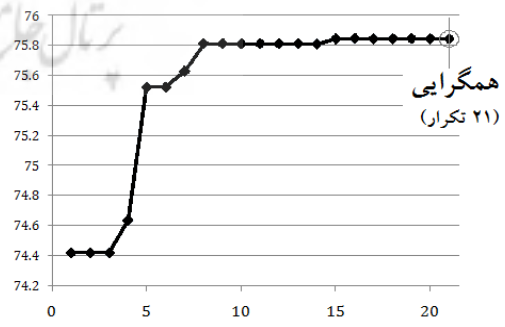
شکل ۶. نمودار همگرایی الگوریتم توده ذرات برای حد آستانه‌گذاری تصویر اختلاف با تابع هزینه کمینه‌سازی واریانس داخل کلاسی در سری داده اول



شکل ۵. نمودار همگرایی الگوریتم توده ذرات برای حد آستانه‌گذاری تصویر اختلاف با تابع هزینه بیشینه‌سازی واریانس بین کلاسی پیشنهادی OTSU در سری داده اول



شکل ۸. نمودار همگرایی الگوریتم توده ذرات برای حد آستانه‌گذاری تصویر اختلاف با تابع هزینه کمینه‌سازی واریانس داخل کلاسی در سری داده دوم



شکل ۷. نمودار همگرایی الگوریتم توده ذرات برای حد آستانه‌گذاری تصویر اختلاف با تابع هزینه بیشینه‌سازی واریانس بین کلاسی OTSU در سری داده دوم

پیکسل‌های داده‌های ارزیابی است (TE)<sup>۳</sup>. جدول‌های ۱ و ۲ حد آستانه بهینه برآوردشده، زمان محاسبات و سه پارامتر متداول ارزیابی دقت آشکارسازی تغییرات را به ترتیب برای دو روش حد آستانه‌گذاری OTSU و ICV به ترتیب در سری داده اول و دوم نشان می‌دهند. با مقایسه نتایج ارائه‌شده در جدول‌های ۱ و ۲ مشخص می‌شود که دقت آشکارسازی تغییرات حد آستانه‌گذاری ICV در مقایسه با تکنیک OTSU در سری اول بالاتر است (خطای کلی ۱/۵۳۳ درصد در مقابل ۵/۵۹۱ درصد) و در سری دوم تقریباً نتایج مشابهی تولید کردند؛ ولی زمان محاسبات حد آستانه‌گذاری ICV به مراتب بالاتر و تقریباً برابر تکنیک OTSU است.

به‌منظور بررسی کارایی و قابلیت تکنیک پیشنهادی، ابتدا حد آستانه بهینه با تکنیک‌های متداول حد آستانه‌گذاری OTSU و ICV برآورد شد. سپس نقشه باینری تغییرات متناظر با هر یک از حد آستانه‌ها تولید شد و با داده‌های واقعیت زمینی حاصل از تفسیر بصری تصاویر دوزمانه استفاده‌شده مقایسه گردید. سه پارامتر متداول ارزیابی برآورد شدند که به ترتیب اینها هستند: درصد پیکسل‌های تغییرنکرده‌ای که الگوریتم آنها را اشتباهی به عنوان تغییرات شناسایی کرده (FA)<sup>۱</sup>، درصد پیکسل‌های تغییرکرده‌ای که الگوریتم موفق به شناسایی آنها نشده (ME)<sup>۲</sup> و خطای کلی آشکارسازی تغییرات که حاصل تقسیم کل پیکسل‌های اشتباه شناسایی‌شده به تعداد کل

جدول ۱. حد آستانه بهینه برآوردشده، زمان محاسبات و دقت آشکارسازی تغییرات، به دو روش حد آستانه‌گذاری OTSU و ICV در سری داده اول.

روش حد آستانه‌گذاری	حد آستانه بهینه		زمان محاسبات (ثانیه)	FA%	ME%	TE%
	باند ۴	باند ۵				
بیشینه‌سازی واریانس بین‌کلاسی (OTSU)	۱۲۴	۳۱	۵۹۴	۲/۶۸۳	۹/۲۸۵	۵/۵۹۱
کمینه‌سازی واریانس داخل‌کلاسی (ICV)	۵۷	۵۰	۳۱۱۰	۲/۴۲۶	۰/۴۴۰	۱/۵۳۳

جدول ۲. حد آستانه بهینه برآوردشده، زمان محاسبات و دقت آشکارسازی تغییرات، به دو روش حد آستانه‌گذاری OTSU و ICV در سری داده دوم

روش حد آستانه‌گذاری	حد آستانه بهینه		زمان محاسبات (ثانیه)	FA%	ME%	TE%
	باند ۳	باند ۴				
بیشینه‌سازی واریانس بین‌کلاسی (OTSU)	۱۹	۲۱	۸۲	۷/۰۲۰	۵/۳۵۹	۶/۵۰۱
کمینه‌سازی واریانس داخل‌کلاسی (ICV)	۱۵	۲۱	۵۰۰	۷/۰۲۰	۵/۳۵۹	۶/۵۰۱

1. False Alarm
2. Missed Error
3. Total Error

آشکارسازی خودکار تغییرات در تصاویر ماهواره‌ای چندزمانه مبتنی بر حد آستانه‌گذاری با الگوریتم بهینه‌سازی توده ذرات

جدول ۳. زمان محاسبات الگوریتم حد آستانه‌گذاری به روش پیشنهادی و مقایسه آن با روش‌های حد آستانه‌گذاری OTSU و ICV در سری داده اول

روش حد آستانه‌گذاری	حد آستانه برآورد شده		زمان محاسبات (ثانیه)	نسبت زمان محاسبات روش پیشنهادی در مقایسه با روش جست‌وجوی فراگیر: $\frac{PSO \& ES}{ES}$	FA%	ME%	TE%
	باند ۴	باند ۵					
روش پیشنهادی PSO+OTSU	۱۲۴	۳۱	۵۰۲	۰/۸۴۰	۲/۶۸۳	۹/۲۸۵	۵/۵۹۱
روش پیشنهادی PSO+ICV	۵۷	۵۰	۲۶	۰/۰۰۸۳	۲/۴۲۶	۰/۴۴۰	۱/۵۳۳

جدول ۴. زمان محاسبات الگوریتم حد آستانه‌گذاری به روش پیشنهادی و مقایسه آن با روش‌های حد آستانه‌گذاری OTSU و ICV در سری داده دوم

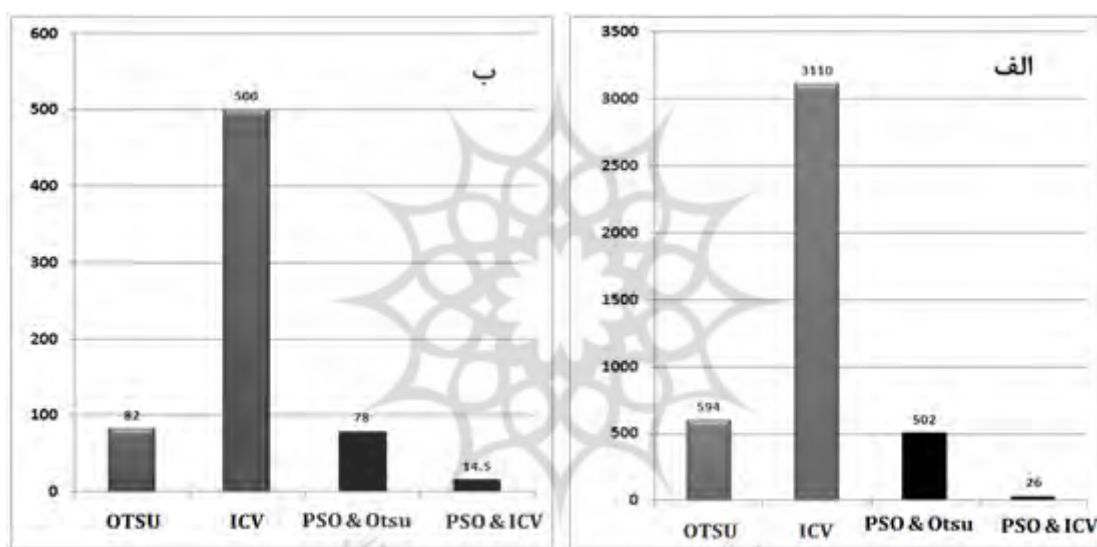
روش حد آستانه‌گذاری	حد آستانه برآورد شده		زمان محاسبات (ثانیه)	نسبت زمان محاسبات روش پیشنهادی در مقایسه با روش جست‌وجوی فراگیر: $\frac{PSO \& ES}{ES}$	FA%	ME%	TE%
	باند ۴	باند ۳					
روش پیشنهادی PSO+OTSU	۱۹	۲۱	۷۸	۰/۹۵	۷/۰۲۰	۵/۳۵۹	۶/۵۰۱
روش پیشنهادی PSO+ICV	۱۵	۲۱	۱۴/۵	۰/۰۲۹	۷/۰۲۰	۵/۳۵۹	۶/۵۰۱

جدول‌های ۳ و ۴ به ترتیب زمان محاسبات لازم برای برآورد حد آستانه بهینه با تکنیک پیشنهادی و نسبت آن با زمان محاسبات تکنیک‌های حد آستانه‌گذاری متداول و همچنین سه پارامتر ارزیابی صحت آشکارسازی تغییرات (FA%، ME%، TE%) را به ترتیب برای سری داده اول و دوم نشان می‌دهند. شکل‌های (۹-الف) و (۹-ب)، زمان محاسبات آشکارا کاهش یابد. استفاده از روش پیشنهادی در این تحقیق سبب شده است تا زمان محاسبات در مقایسه با الگوریتم حد آستانه‌گذاری OTSU برای دو سری داده اول و دوم، به ترتیب ۱۶ درصد و ۵ درصد کاهش یابد. بیشترین کاهش زمان در روش پیشنهادی مربوط به استفاده از تابع هزینه ICV است، چراکه در این روش برخلاف تکنیک OTSU نیازی به پیش‌محاسبات ساده‌سازی - که حجم محاسبات زیادی را به الگوریتم تحمیل می‌کند - وجود ندارد. استفاده از روش پیشنهادی برای حد آستانه‌گذاری سبب شد تا زمان محاسبات در مقایسه با

جدول‌های ۳ و ۴ به ترتیب زمان محاسبات لازم برای برآورد حد آستانه بهینه با تکنیک پیشنهادی و نسبت آن با زمان محاسبات تکنیک‌های حد آستانه‌گذاری متداول و همچنین سه پارامتر ارزیابی صحت آشکارسازی تغییرات (FA%، ME%، TE%) را به ترتیب برای سری داده اول و دوم نشان می‌دهند. شکل‌های (۹-الف) و (۹-ب)، زمان محاسبات چهار روش حد آستانه‌گذاری: ICV، OTSU، الگوریتم PSO+Otsu و الگوریتم پیشنهادی PSO+ICV را به ترتیب برای دو سری داده اول و دوم نشان می‌دهد. با توجه به شکل‌های (۹-الف) و (۹-ب)، مشخص می‌شود که زمان محاسبات دو روش حد آستانه‌گذاری پیشنهادی از دو روش جست‌وجوی فراگیر کمتر است. زمان محاسبات روش حد آستانه‌گذاری پیشنهادی مبتنی بر توده ذرات ICV در مقایسه با بقیه روش‌ها سریع‌ترین تکنیک است و در رتبه بعدی روش حد آستانه‌گذاری مبتنی بر تابع هزینه

داده اول با استفاده از توابع هزینه OTSU و ICV به ترتیب برابر ۱/۵۸۵ و ۱/۶۱۹ و در سری داده دوم برابر ۱/۰۲۴ و ۱/۱۳۱ هستند؛ که با توجه به جدول توزیع نرمال مشخص می‌شود در سطح اطمینان ۹۰ درصد فرض صفر مورد قبول است و تمامی مقادیر آماره‌ها کوچک‌تر از مقدار ۱/۶۴۵ (منطقه بحرانی) هستند. در صورتی که الگوریتم پیشنهادی ثبات پایینی می‌داشت، فرض صفر در سطح اطمینان ۹۰ درصد و در سطوح بالاتر پذیرفته می‌شد.

تکنیک متداول ICV برای دو سری داده اول و دوم، به ترتیب ۹۹/۱۶ درصد و ۹۷/۰۱ درصد کاهش یابد. همان‌طور که قبلاً در بخش ۲-۵ بیان شد، برای ارزیابی ثبات الگوریتم پیشنهادی در برآورد حد آستانه بهینه از آزمون آماری استفاده شد. هر دو الگوریتم پیشنهادی PSO+ICV و PSO+Otsu به‌طور مستقل ۱۰۰ بار اجرا شدند و سپس با استفاده از حد آستانه‌های برآوردشده در این ۱۰۰ بار اجرا، آزمون آماری معرفی شده در سطح اطمینان ۹۰ درصد انجام گرفت. مقادیر برآوردشده برای آماره آزمون در سری



شکل ۹. زمان محاسبات چهار روش حد آستانه‌گذاری: OTSU، ICV، الگوریتم پیشنهادی PSO+Otsu؛ و الگوریتم پیشنهادی PSO+ICV. برای سری داده اول (الف) و برای سری داده دوم (ب). محور عمودی، زمان محاسبات روش حد آستانه‌گذاری را بر حسب ثانیه نشان می‌دهد.

آشکارسازی تغییرات مشابه زمان استفاده از تکنیک‌های حد آستانه‌گذاری متداول باشد. شکل‌های ۱۰ و ۱۱ به ترتیب نقشه تغییرات باینری تولیدشده با حد آستانه‌های برآوردشده با تکنیک پیشنهادی PSO+ICV و PSO+Otsu را برای سری داده اول نشان می‌دهند. شکل‌های ۱۲ و ۱۳ نقشه تغییرات باینری ذکرشده را برای سری داده دوم نشان می‌دهند. در این نقشه‌ها مناطق تغییر یافته با رنگ سفید و مناطق تغییر نیافته با رنگ مشکی مشخص شده است. افزون بر ارزیابی کمی صحت آشکارسازی تغییرات که در

بعد از برآورد حد آستانه‌های بهینه از طریق الگوریتم پیشنهادی، با اعمال حد آستانه‌های مذکور روی تصاویر اختلاف، نقشه تغییرات رخ داده در مناطق تولید شد. با توجه به اینکه توابع هزینه به کار رفته در روش پیشنهادی در هر دو حالت همان روابط استفاده شده در تکنیک‌های متداول حد آستانه‌گذاری است (توابع Otsu و ICV)، منطقاً باید حد آستانه‌های برآوردشده در روش پیشنهادی، در بهترین حالت منطبق با حد آستانه‌های برآوردشده با تکنیک‌های مذکور باشد (ولی با صرف زمان خیلی کمتر) و صحت

آشکارسازی خودکار تغییرات در تصاویر ماهواره‌ای چندزمانه مبتنی بر حد آستانه‌گذاری با الگوریتم بهینه‌سازی توده ذرات

میانگین صحت کلی ۹۴/۵ درصد برای سری داده اول و ۹۳/۵ درصد برای سری داده دوم) تغییرات رخ داده در این مناطق مطالعاتی را تشخیص دهد.

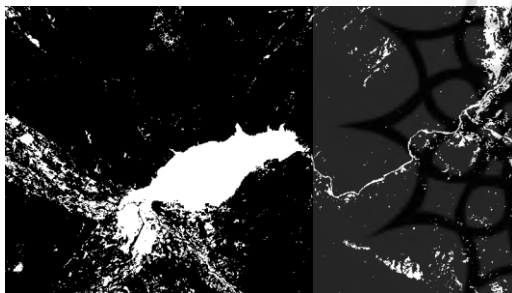
جدول‌های ۳ و ۴ ارائه شده است، به‌طور بصری نیز مشخصات است که تکنیک پیشنهادی توانسته است با حد آستانه‌گذاری بهینه، با صحت بالایی (به‌طور



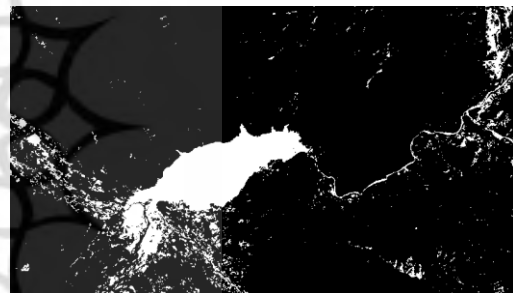
شکل ۱۱. نقشه تغییرات باینری تولیدشده با تکنیک پیشنهادی PSO&ICV در سری داده اول



شکل ۱۰. نقشه تغییرات باینری تولیدشده با تکنیک پیشنهادی PSO&Otsu در سری داده اول



شکل ۱۳. نقشه تغییرات باینری تولیدشده با تکنیک پیشنهادی PSO&ICV در سری داده دوم



شکل ۱۲. نقشه تغییرات باینری تولیدشده با تکنیک پیشنهادی PSO&Otsu در سری داده دوم

ICV در مقایسه با روش OTSU اندکی بهتر است، ولی زمان محاسبات بسیار بالایی دارد. علت این اختلاف هزینه محاسباتی، ساده‌سازی‌هایی است که OTSU در محاسبه واریانس بین‌کلاسی پیشنهاد کرده است. بنابراین، چنانچه از الگوریتم‌های بهینه‌سازی برای حد آستانه‌گذاری استفاده نشود، بین این دو روش حد آستانه‌گذاری، روش OTSU برای حد آستانه‌گذاری تصویر اختلاف در آشکارسازی تغییرات بین تصاویر ماهواره‌ای چندزمانه کارآمدتر است. نتایج ارزیابی نشان دادند که استفاده از روش پیشنهادی در مقایسه با روش حد آستانه‌گذاری OTSU، زمان محاسبات را به‌ترتیب در سری داده اول و دوم تقریباً ۱۶ درصد و ۵ درصد

#### ۴- بحث و نتیجه‌گیری

در این پژوهش روشی نوین به‌منظور حد آستانه‌گذاری خودکار و نظارت‌نشده تصویر اختلاف با به‌کارگیری الگوریتم بهینه‌سازی توده ذرات ارائه شد. روش پیشنهادی برای حد آستانه‌گذاری تصویر اختلاف به‌همراه دو روش متداول حد آستانه‌گذاری خودکار OTSU و مبتنی بر واریانس داخل کلاسی (ICV) - که هر دو مبتنی بر جست‌وجوی فراگیر هستند - روی دو سری تصویر دوزمانه سنجنده لندست با تنوع پوششی متفاوت و با ابعاد  $۸۲۰ \times ۹۵۰$  و  $۴۷۰ \times ۸۳۰$  ارزیابی شد. نتایج نشان می‌دهند که بین دو روش حد آستانه‌گذاری OTSU و ICV، دقت نتایج روش حد آستانه‌گذاری

می تواند به عنوان روشی خودکار و نظارت نشده سریع در آشکارسازی تغییرات مبتنی بر تصاویر ماهواره ای چندزمانه استفاده شود. تحقیقات آتی به بهینه سازی پارامترهای مؤثر در الگوریتم بهینه سازی توده ذرات می پردازد و ضمن بررسی توابع هزینه با قابلیت بالاتر، توابع هزینه کارآمدتری برای این کاربرد ارائه می شود.

#### ۵- منابع

Amozadeh, D. and M. Kanani, 2008, **The Effect of Caspian Sea Water Fluctuations on Miankaleh Habitat Ecological Conditions Using Remote Sensing and Geographic Information System**, World Applied Sciences Journal, 3(1), PP. 34-38.

Brink, A.B. and H.D. Eva, 2009, **Monitoring 25 Years of Land Cover Change Dynamics in Africa: A Sample Based Remote Sensing Approach**, Applied Geography 29(4), PP. 501-512.

Chan, J. C.W., K.P. Chan and A. G.O. Yeh, 2001, **Detecting the Nature of Change in an Urban Environment: A Comparison of Machine Learning Algorithms**, Photogrammetric Engineering and Remote Sensing 67(2), PP. 213-226.

Cooper, M.A. R., 1987, **Control Surveys in Civil Engineering**, Collins London.

Deng, J.S., K. Wang, J. Li and Y.H. Deng, 2009, **Urban Land use Change Detection Using Multisensor Satellite Images**, Pedosphere 19(1), PP. 96-103.

Elbeltagi, E., T. Hegazy and D. Grierson, 2005, **Comparison Among Five Evolutionary-based Optimization Algorithms**, Advanced engineering informatics, 19(1), PP. 43-53.

کاهش داد. استفاده از الگوریتم بهینه سازی توده ذرات در حد آستانه گذاری تصویر اختلاف با استفاده از واریانس داخل کلاسی (ICV)، سبب شد تا زمان محاسبات به ترتیب در حدود ۹۹/۱۶ درصد و ۹۷/۰۱ درصد در دو سری داده اول و دوم کاهش یابد. لذا در الگوریتم بهینه سازی توده ذرات، تکنیک حد آستانه گذاری مبتنی بر ICV کارایی بسیار بالاتری در مقایسه با روش حد آستانه گذاری OTSU دارد؛ چراکه با صرف زمان کمتر، دقت بالاتری را نتیجه می دهد.

نتایج تحقیق نشان دادند که تکنیک پیشنهادی می تواند با کاهش چشم گیر هزینه محاسباتی، در مدت زمان خیلی کمتر (در مقایسه با تکنیک های حد آستانه گذاری متداول)، با صحت بالایی (میانگین صحت کلی ۹۴/۵ درصد برای سری داده اول و ۹۳/۵ درصد برای سری داده دوم)، تغییرات رخ داده در این مناطق مطالعاتی را تشخیص دهد. در سری داده اول، که جزایر اشک داغی دریاچه ارومیه را نشان می دهد، تغییرات خطوط ساحلی به علت پس رفت آب دریاچه ناشی از سوءمدیریت منابع آبی منطقه کاملاً مشهود است (شکل های ۱۰ و ۱۱). احداث غیراصولی چندین سد در مسیر رودخانه های منتهی به دریاچه ارومیه از مهم ترین دلایل کاهش بحرانی سطح آب دریاچه است؛ به طوری که با پس رفت آب دریاچه، سطوح وسیعی از دریاچه به شوره زار تبدیل شده است (مناطق سفیدرنگ در شکل های ۱۰ و ۱۱). تغییرات رخ داده در سری داده دوم مربوط به تغییرات پوشش اراضی ناشی از آبیگری سد خداآفرین است. این سد همراه با چندین سد دیگر به طور غیراصولی در مسیر رودخانه های منتهی به دریاچه ارومیه احداث شده و سبب شده اند تا دریاچه در وضعیت بحرانی قرار گیرد. طبق برآورد کارشناسان در صورتی که روند کاهش سطح آب دریاچه ارومیه با سرعت فعلی ادامه یابد، به احتمال زیاد تا ۱۵ سال آینده، دیگر دریاچه ای به نام ارومیه وجود نخواهد داشت (Karbassi et al., 2010).

نتایج ارزیابی نشان می دهند که تکنیک پیشنهادی



- Engelbrecht, A.P., 2007, **Computational Intelligence: an introduction**, Wiley. com.
- Garland, R., H. Yang, O. Schmid, D. Rose, A. Nowak, P. Achtert, A. Wiedensohler, N. Takegawa, K. Kita and Y. Miyazaki, 2008, **Aerosol Optical Properties in a Rural Environment Near the Mega-city Guangzhou**, China: implications for regional air pollution, radiative forcing and remote sensing, *Atmospheric Chemistry and Physics*, 8(17), PP. 5161-5186.
- Gens, R., 2010, **Remote Sensing of Coastlines: Detection, Extraction and Monitoring**, *International Journal of Remote Sensing*, 31(7), PP. 1819-1836.
- Huss, M., R. Stockli, G. Kappenberger and H. Blatter, 2008, **Temporal and Spatial Changes of Laika Glacier, Canadian Arctic, Since 1959, Inferred from Satellite Remote Sensing and Mass-balance Modelling**, *Journal of Glaciology* 54(188), PP. 857-866.
- Im, J., J.R., Jensen and M.E., Hodgson, 2008, **Optimizing the Binary Discriminant Function in Change Detection Applications**, *Remote Sensing of Environment*, 112(6), PP. 2761-2776.
- Imhoff, M.L., P. Zhang, R.E. Wolfe and L. Bounoua, 2010, **Remote Sensing of the Urban Heat Island Effect Across Biomes in the Continental USA**, *Remote Sensing of Environment*, 114(3), PP. 504-513.
- Karbassi, A., G. N. Bidhendi, A. Pejman and M. E. Bidhendi, 2010, **Environmental Impacts of Desalination on the Ecology of Lake Urmia**, *Journal of Great Lakes Research*, 36(3), PP. 419-424.
- Le Vine, D.M., G.S. Lagerloef and S. E. Torrusio, 2010, **Aquarius and Remote Sensing of Sea Surface Salinity from Space**, *Proceedings of the IEEE*, 98(5), PP. 688-703.
- Liao, P.S., T.S. Chen and P.C. Chung, 2001, **A Fast Algorithm for Multilevel Thresholding**, *J. Inf. Sci. Eng.* 17(5), PP. 713-727.
- Martin, R.V., 2008, **Satellite Remote Sensing of Surface Air Quality**, *Atmospheric Environment*, 42(34), PP. 7823-7843.
- Moser, G. and S.B. Serpico, 2009, **Automatic Parameter Optimization for Support Vector Regression for Land and Sea Surface Temperature Estimation from Remote Sensing Data**, *Geoscience and Remote Sensing, IEEE Transactions on* 47(3), PP. 909-921.
- Otsu, N., 1975, **A Threshold Selection Method from Gray-level Histograms**, *Automatica*, 11(285-296), PP. 23-27.
- Poli, R., J. Kennedy and T. Blackwell, 2007, **Particle Swarm Optimization**, *Swarm intelligence*, 1(1), PP. 33-57.
- Pullanagari, R., I. Yule, W. King, D. Dalley and R. Dynes, 2011, **The Use of Optical Sensors to Estimate Pasture Quality**, *International Journal on Smart Sensing and Intelligent Systems*, 4(1), PP. 125-137.

- Sadeghi, V., H. Ebadi and F.F. Ahmadi, 2013, **A new Model for Automatic Normalization of Multitemporal Satellite Images Using Artificial Neural Network and Mathematical Methods**, Applied Mathematical Modelling.
- Serra, P., X. Pons and D. Sauri, 2008, **Land-cover and Land-use Change in a Mediterranean Landscape: A Spatial Analysis of Driving Forces Integrating Biophysical and Human Factors**, Applied Geography, 28(3), PP. 189-209.
- Sezgin, M. 2004, **Survey Over Image Thresholding Techniques and Quantitative Performance Evaluation**, Journal of Electronic imaging , 13(1), PP. 146-168.
- Wulder, M.A., S.M. Ortlepp, J.C. White and S. Maxwell, 2008, **Evaluation of Landsat-7 SLC-off Image Products for Forest Change Detection**, Canadian Journal of Remote Sensing, 34(2), PP. 93-99.
- Xie, M. and M. Fu, 2011, **The Temporal Dynamics of Urban Heat Islands Derived from Thermal Remote Sensing Data by Local Indicator of Spatial Association in Shenzhen, China**, International Conference on Photonics and Image in Agricultural Engineering (PIAGENG 2010), International Society for Optics and Photonics.
- Zielinski, K. and R. Laur, 2007, **Stopping Criteria For a Constrained Single-objective Particle Swarm Optimization Algorithm**, Informatica (Slovenia), 31(1), PP. 51-59.

