

ارزیابی عملکرد شاخص‌های تغییرات مستخرج از تصاویر سنجش از دور چندزمانه در تشخیص تغییرات کاربری و پوشش اراضی

یونس نعیمی^{۱*}، رامین نوروزی^۲، وحید صادقی^۳

^۱ عضو هیات علمی گروه مهندسی عمران، دانشگاه آزاد اسلامی واحد بناب

unaimi@mail.kntu.ac.ir

^۲ دانشجوی کارشناسی ارشد سنجش از دور، گروه مهندسی نقشه‌برداری، دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه تبریز

nourozi.tu@gmail.com

^۳ دانشیار گروه مهندسی نقشه‌برداری، دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه تبریز

v.sadeghi@tabrizu.ac.ir

(تاریخ دریافت: آبان‌ماه ۱۴۰۱، تاریخ تصویب: دی‌ماه ۱۴۰۱)

چکیده

در تحقیق حاضر، کارایی ۸ شاخص تغییرات شامل؛ بزرگی تغییرات، SAM، SCM، رگرسیون تصاویر، ERGAS، کورولیشن طیفی- مکانی، اطلاعات متقابل (MI) و فاصله JM از نظر صحت تشخیص تغییرات و زمان محاسبات روی دو مجموعه داده مختلف مورد ارزیابی قرار گرفته‌است. مجموعه داده اول شامل یک جفت تصویر دوزمانه اخذشده توسط سنسورهای TM5 و ETM+ از سواحل جنوبی دریاچه ارومیه بوده و مجموعه داده دوم توسط سنسورهای TM4 و TM5 از شهر مراغه اخذ شده‌است. نتایج پیاده‌سازی در مجموعه داده اول برتری شاخص SAM نسبت به سایر شاخص‌ها را مشخص نمود. هشدار اشتباه (FA)، خطای از دست‌رفته (ME) و خطای کلی (TE) نقشه تغییرات حاصل از این شاخص به ترتیب ۳/۴۰٪، ۱۳/۹۱٪ و ۸/۸۶٪ است. در مرتبه دوم شاخص SCM قرار دارد که مقادیر FA، ME و TE این شاخص حدوداً دو برابر مقادیر متناظر در شاخص SAM است. در مراتب بعدی و با نتایج تقریباً مشابه، به ترتیب شاخص‌های JM، رگرسیون، اطلاعات متقابل، بزرگی تغییرات و ERGAS قرار دارند. ضعیف‌ترین نتایج متعلق به شاخص کورولیشن با خطای کلی ۲۷/۸۰٪ است. در مجموعه داده دوم، بهترین نتایج ابتدا از شاخص ERGAS و در مرتبه بعدی از شاخص بزرگی تغییرات حاصل شد. مقادیر FA، ME و TE نقشه تغییرات حاصل از شاخص ERGAS به ترتیب ۰/۶۳٪، ۲۶/۵۴٪ و ۷/۵٪ بوده و برای شاخص بزرگی تغییرات به ترتیب برابر ۰/۶۳٪، ۳۲/۲۳٪ و ۹/۰۱٪ است. در مراتب بعدی به ترتیب شاخص‌های SAM، SCM، رگرسیون، کورولیشن طیفی- مکانی و JM قرار دارند. ضعیف‌ترین نتایج متعلق به شاخص اطلاعات متقابل با خطای کلی ۲۶/۵۶٪ است. جهت بررسی وابستگی شاخص‌های تغییرات از آزمون مک-نمار استفاده شد. در مجموعه داده دوم؛ اختلاف بین تمامی شاخص‌ها معنادار بوده ولی در مجموعه داده اول، برخی از شاخص‌ها تفاوت معناداری با یکدیگر نداشتند. از نظر پارامتر زمان، بزرگی تغییرات سریع‌ترین شاخص و اطلاعات متقابل، کندترین شاخص در بین سایرین است.

واژگان کلیدی: تشخیص تغییرات، تصاویر سنجش از دور چندزمانه، شاخص‌های تغییرات.

* نویسنده رابط

۱- مقدمه

بهره‌برداری روزافزون انسان از منابع طبیعی برای تامین نیازهای زندگی و توسعه صنایع از یک سو و وقوع پدیده‌های طبیعی همچون زلزله، سیل و طوفان و موارد مشابه از سوی دیگر، همواره سبب بروز تغییراتی در کاربری و پوشش سطح زمین می‌شود [۱]. بهنگام‌رسانی اطلاعات مکانی جهت اخذ تصمیمات سریع و صحیح امری ضروری بوده و از ارکان توسعه پایدار در مهندسی عمران است. با توجه به هزینه بالای تولید داده‌های مکانی سعی بر آن است تا از تکنیک‌های سریع و کم‌هزینه‌تر برای تشخیص تغییرات سطح زمین و به‌روزرسانی داده‌های مکانی استفاده شود. آنالیز تصاویر سنجش از دور چندزمانه، یکی از تکنیک‌های رایج در این زمینه است. آشکارسازی تغییرات مبتنی بر تصاویر سنجش از دور چندزمانه در رویکرد نظارت‌شده و نظارت‌نشده قابل انجام است. با وجود برخی مزایای رویکرد نظارت‌شده نسبت به رویکرد نظارت‌نشده (نمونه: امکان ارائه ماهیت تغییرات از-به)، تهیه الگوهای آموزشی معمولاً فرآیندی دشوار و پرهزینه است، به ویژه در مواقعی که از تصاویر آرشیو برای شناسایی تغییرات استفاده شود. در نتیجه، در طیف گسترده‌ای از کاربردها که در آن‌ها الگوهای آموزشی مناسبی موجود نباشد، توسعه و بکارگیری تکنیک‌های نظارت‌نشده، امری ضروری است. عمده تکنیک‌های تشخیص تغییرات نظارت‌نشده، مبتنی بر آنالیز شاخص‌های تغییرات مستخرج از تصاویر چندزمانه است. شاخص‌های تغییرات تصاویری هستند که به طرق مختلف، مناطق تغییریافته را نسبت به سایر مناطق متمایز می‌کنند. تلاش‌های صورت گرفته در این زمینه سبب توسعه شاخص‌های تغییرات متنوعی همچون؛ تفاضل، نسبت، قدرمطلق تفاضل^۱، بزرگی تغییرات^۲ (فاصله اقلیدسی)، نگاشت زاویه طیفی^۳ (SAM)، نگاشت کورولیشن طیفی^۴ SCM، رگرسیون تصاویر^۵، ERGAS، کورولیشن طیفی^۶، کورولیشن مکانی^۷، کورولیشن طیفی-مکانی^۸، واگرایی

کولبک-لایبلر^۹ (KLD)، اطلاعات متقابل^{۱۰} (MI)، فاصله جفریس-ماتوسیتا^{۱۱} (JMD) و موارد دیگر شده‌است. هر یک از این شاخص‌ها، خصوصیات، پتانسیل‌ها و محدودیت‌های خاص خود را دارند. صادقی [۲]، با بررسی تئوری و عملی قابلیت شاخص‌های بزرگی تغییرات و جهت تغییرات (SAM)، در تشخیص تغییرات مختلف محتمل در منحنی طیفی تصاویر چندطیفی، به این نتیجه رسید که شاخص‌های بزرگی و جهت تغییرات مکمل یکدیگر بوده و هرکدام پتانسیل متفاوت و محدودی در بارسازی انواع مختلف تغییرات سطح زمین دارند. ایشان به منظور استفاده همزمان از قابلیت شاخص‌های بزرگی و جهت تغییرات، یک شاخص جدید که تلفیق خطی وزن‌دار از دو شاخص نامبرده بود، معرفی نموده و مورد ارزیابی قرار دادند. برای ارزیابی از دو مجموعه داده مختلف که مربوط به دو منطقه با خصوصیات متفاوت بود، استفاده شد. نتایج ارزیابی نشان داد که شاخص تغییرات تلفیقی با بهره‌مندی از پتانسیل متفاوت شاخص‌های بزرگی و جهت تغییرات، عملکرد بهتری نسبت به تک‌تک این شاخص‌ها داشته‌است. محسنی‌فر و همکاران [۳] به منظور بهبود تشخیص تغییرات جنگل‌ها، شاخص‌های گیاهی NDVI و GNDVI را برای تصاویر دوزمانه تهیه کرده و سپس با محاسبه تفاضل آن‌ها، دو شاخص تفاضل بنام‌های «DN» و «DG» ایجاد کردند. در ادامه هر یک از دو شاخص تفاضل بوسیله تبدیل موجک گسسته غیرکاهشی^{۱۲} (UDWT) به چهار زیرتصویر LL، LH، HL و HH که ضرایب موجک نام دارند، تجزیه شدند. در اینجا LL زیرتصویر همگن و متناظر با تصویر با فرکانس پایین است و بقیه ضرایب، زیرتصاویر جزئیات هستند که فرکانسهای بالا از شاخص‌های تفاضل می‌باشند. در گام بعدی هر یک از ضرایب موجک با یکدیگر تلفیق شدند و در گام نهایی، شاخص تلفیقی بوسیله تبدیل موجک گسسته غیرکاهشی معکوس^{۱۳} (IUDWT) تولید شد. نتایج حاصل از مقایسه شاخص تغییرات تلفیقی با دو شاخص منفرد دیگر نشان داد که رویکرد پیشنهادی برای تلفیق شاخص‌های تفاضل، منجر

۸ Spectral-Spatial Correlation

۹ Kullback-Leibler Divergence

۱۰ Mutual Information

۱۱ Jeffries-Matusita Distance

۱۲ Undecimated Discrete Wavelet Transformation

۱۳ Inverse Undecimated Discrete Wavelet Transformation

۱ Absolute Difference Image

۲ Magnitude of Change

۳ Spectral Angle Mapper

۴ Spectral Correlation Mapper

۵ Image Regression

۶ Spectral Correlation

۷ Spatial Correlation

دادند. نتایج این تحقیق نشان داد که در مجموعه داده اول (تصاویر SPOT)، شاخص SAM با صحت کلی (۹۱/۰۶٪) بهترین نتایج را به همراه داشته و با اختلاف اندکی (حدود ۱٪)، به ترتیب شاخص‌های SCM و تفاضل NDVI نتایج مشابهی را فراهم نموده‌اند. شاخص ERGAS با اختلاف حدود ۱۷٪ ضعیف‌ترین نتایج را داشته است. در مجموعه داده مربوط به سنجده Quickbird، بهترین نتایج ابتدا از تفاضل NDVI حاصل شده (صحت کلی ۹۳/۰۹٪) و با اختلاف اندکی، ابتدا شاخص SAM با صحت کلی ۹۲/۷۳٪ و سپس شاخص‌های ERGAS و SCM به ترتیب با صحت‌های کلی ۹۱/۷۲٪ و ۹۱/۲۱٪ در مراتب بعدی قرار داشته‌اند. با توجه به ارزیابی ارائه شده در این تحقیق، برای تصاویر با توان تفکیک مکانی متوسط/پایین، استفاده از شاخص‌های مبتنی بر فاصله طیفی توصیه می‌شود. برای تصاویر با توان تفکیک مکانی بالا، هم شاخص‌های مبتنی بر فاصله و هم شاخص‌های مبتنی بر شباهت طیفی، نتایج مناسبی دارند. سینگ [۸]، با مقایسه شاخص‌های طیفی و آماری، تلفیق این شاخص‌ها با تبدیل موجک را پیشنهاد کردند. در این تحقیق، شاخص بزرگی تغییرات و وگرایی کولبک-لایبلر (KLD) به ترتیب به عنوان شاخص‌های طیفی و آماری انتخاب شده و با تبدیل UDWT به فرکانس‌های پایین و بالا تجزیه شدند. سپس فرکانس‌های پایین با یکدیگر تلفیق شد. به طریق مشابه، فرکانس‌های بالا نیز با یکدیگر تلفیق شدند. سپس با اعمال تبدیل موجک معکوس شاخص تلفیقی تولیدشده و مورد آنالیز قرار گرفت. نتایج نشان داد که شاخص تلفیقی حاوی اطلاعات بسیار دقیق‌تری در مقایسه با شاخص‌های منفرد بزرگی تغییرات و کولبک-لایبلر بوده است. با توجه به محدودیت KLD یک‌بعدی که تنها از یک باند طیفی استفاده می‌کند، اخیراً شاخص جدیدی بنام KLD چندمتغیره (MVKLD)^۳ توسط جباری و همکاران [۹] پیشنهاد شده است. در این روش، ابتدا با قطعه‌بندی تصاویر چندزمانه، اشیاء تصویری حاصل شده و سپس شاخص MVKLD برای پیکسل‌های متعلق به هر شیء، تصویری دوزمانه محاسبه می‌شود. شاخص پیشنهادی با شاخص‌های متداول بزرگی تغییرات، کورولیشن، SAM و میانگین KLDهای یک‌بعدی مقایسه شد. در بین آزمایشات انجام گرفته، در ۲ مورد، MVKLD در رتبه نخست قرار

به افزایش صحت تشخیص تغییرات در اراضی جنگلی شده است. در سال ۲۰۲۰ محسنی‌فر و همکاران با ادغام باندهای طیفی و شاخص‌های پوشش گیاهی و بهبود مدل سنتی میدان تصادفی مارکوف، شاخص جدیدی بنام FFDI^۱ برای تشخیص تغییرات جنگل‌ها معرفی کردند [۵]. این روش از ویژگی‌های دست‌ساز و از پیش طراحی شده برای استخراج مناطق خاص تغییر یافته به طور موثر استفاده می‌کند فلذا ویژگی‌ها و الگوریتم‌ها برای هر سناریو، کاربرد یا منطقه جغرافیایی باید بطور متفاوت تنظیم شوند. علاوه بر این روش نسبت به نویز پس‌زمینه حساس است که می‌تواند منجر به تشخیص نادرست نواحی تغییر یافته شود. در جهت رفع محدودیت‌های نامبرده، خانکشی‌زاده و همکاران در سال ۲۰۲۲ با استفاده از پتانسیل فیلتر سریع محلی لاپلاسین؛ شاخص FFDI را بهبود داده و شاخص جدیدی بنام FLLF^۲ برای تشخیص تغییرات مناطق جنگلی پیشنهاد نمودند. با بررسی‌های انجام گرفته مشخص شد که این شاخص می‌تواند نسبت به شاخص قبلی نتایج بهتری را فراهم نماید و مناطق تغییر یافته و جزئیات آن‌ها را به خوبی با حداقل کسری از نویز پس‌زمینه مشخص کند [۶].

کاروالیو جونیور و همکاران [۶]، چهار شاخص؛ ۱) فاصله اقلیدسی، ۲) فاصله ماهالانوبیس، ۳) SAM و ۴) SCM را روی یک جفت تصویر دوزمانه چندطیفی مورد مقایسه و ارزیابی قرار دادند. هرچند بین فاصله‌های اقلیدسی و ماهالانوبیس، اقلیدسی نتایج بهتری را تولید کرده بود ولی آن‌ها به این نتیجه رسیدند که هیچ نوع شاخصی (فاصله یا شباهت) وجود ندارد که در هر موقعیتی بهتر از سایرین باشد. این مسئله بدین دلیل است که شاخص‌های مختلف دارای ویژگی‌های منحصربفردی هستند که برخی از آن‌ها ممکن است برای کاربردهای خاص مطلوب باشند اما موارد دیگر مطلوب نباشند. لذا شاخص‌های فاصله‌منا (فواصل اقلیدسی و ماهالانوبیس) و شباهت‌منا (SAM و SCM) حاوی اطلاعات مکمل بوده و استفاده از همه آنها، در صورت لزوم، احتمال انجام تحلیل‌های دقیق تغییرات را افزایش می‌دهد. راموس و همکاران [۷]، تفاضل شاخص گیاهی NDVI و شاخص‌های ERGAS محلی، SAM و SCM را روی دو مجموعه داده مختلف مورد مقایسه و ارزیابی قرار

^۱ Forest fused difference image

^۲ Fast local laplacian filter: FLLF

^۳ MultiVariate Kullback-Leibler Distance: MVKLD

داشته و در دو مورد دیگر، پایین‌تر از شاخص‌های SAM و/یا میانگین KLDهای یک‌بعدی قرار گرفته‌است. لازم به ذکر است شاخص نامبرده مختص آنالیز شی‌مبنای تصاویر بوده و در روشهای پیکسل‌مبنا کارایی ندارد.

با وجود اهمیت ویژه و تاثیرگذاری بالای شاخص‌های تغییرات در نتایج تشخیص تغییرات، تا به امروز مطالعه جامعی در این خصوص صورت نگرفته‌است. در معدود مطالعات انجام‌گرفته نیز، تنها تعداد محدودی از این شاخص‌ها از نظر صحت تشخیص تغییرات بررسی شده‌اند. به همین دلیل، در مقاله حاضر برای اولین بار تعداد قابل توجهی از شاخص تغییرات شامل؛ بزرگی تغییرات، SAM، SCM، رگرسیون تصاویر، ERGAS، کورولیشن طیفی- مکانی، اطلاعات متقابل (MI) و فاصله JM از جنبه‌های؛ (۱) صحت تشخیص تغییرات، (۲) زمان محاسبات و (۳) استقلال شاخص‌های تغییرات در دو مجموعه داده مختلف مورد بررسی قرار گرفته‌است.

۲- شاخص‌های تغییرات

برای شناسایی تغییرات در تصاویر سنجش از دور چندزمانه لازم است تا محتوای اطلاعاتی این تصاویر با یکدیگر مقایسه شوند. این مقایسه می‌تواند به صورت مستقیم یا مبتنی بر طبقه‌بندی باشد. در روش‌های مقایسه مستقیم^۱، داده‌های طیفی تصاویر چندزمانه به طور مستقیم، بدون انجام طبقه‌بندی، با یکدیگر مقایسه می‌شوند. به منظور تشخیص صحیح تغییرات در روش‌های مقایسه مستقیم، لازم است تا اختلافات بین تصاویر به شیوه‌های مختلف، متمایز گردند. برای متمایز کردن اختلافات تصاویر چندزمانه، شاخص‌های متعددی توسعه داده شده‌است. یک راهکار ساده برای این منظور، محاسبه تفاضل (اختلاف) بین تصاویر است. برای مناطقی که تغییراتی در آن‌ها رخ نداده باشد، مقادیر طیفی در تصاویر زمان ۱ و زمان ۲، مشابه بوده و در نتیجه در تصویر تفاضل، مقادیر صفر یا نزدیک به آن خواهند داشت. ولی برای مناطق تغییر یافته با توجه به شدت تغییرات، تصویر تفاضل می‌تواند مقادیر بزرگتر یا کوچکتر از صفر داشته باشد. شاخص‌های تغییرات تأثیرات قابل توجهی در نتیجه شناسایی تغییرات دارند. به سبب اهمیت موضوع، تحقیقات

متعددی جهت توسعه شاخص‌های تغییرات انجام گرفته‌است. در ادامه برخی از مهمترین شاخص‌های تغییرات معرفی شده و سپس کارایی آن‌ها در دو مجموعه داده واقعی مختلف مورد بررسی و ارزیابی قرار خواهند گرفت.

۲-۱- شاخص بزرگی تغییرات (فاصله اقلیدسی)

اگر تصاویر زمان ۱ و زمان ۲ اخذ شده از یک منطقه جغرافیایی که نسبت به یکدیگر از لحاظ مکانی تصحیح شده‌اند را به ترتیب با دو بردار I^1 و I^2 به فرم روابط (۱) و (۲) نشان دهیم، بردار قدرمطلق تفاضل به صورت رابطه (۳) و شاخص بزرگی تغییرات بصورت رابطه (۴) محاسبه می‌شود. در این روابط، $I^1(r, c)$ ، درجه خاکستری پیکسلی در موقعیت مکانی سطر r ام و ستون c ام از تصویر زمان $i, (i = 1, 2)$ است، R و C بیانگر ابعاد مکانی تصویر بوده و k نیز معرف شماره باند طیفی تصاویر است.

$$I^1 = \{I^1(r, c) | r = 1, 2, \dots, R, c = 1, 2, \dots, C\} \quad (1)$$

$$I^2 = \{I^2(r, c) | r = 1, 2, \dots, R, c = 1, 2, \dots, C\} \quad (2)$$

$$I^{ADI} = |I^2 - I^1| \quad (3)$$

$$MC = \sqrt{\frac{1}{K} \sum_{k=1}^K (I_k^{ADI}(r, c))^2} \quad (4)$$

تفسیر شاخص بزرگی تغییرات (MC) به این صورت است که اگر منطقه‌ای در طول زمان تغییر نکرده باشد؛ مقادیر طیفی آن در تصاویر زمان ۱ و زمان ۲، عین هم یا مشابه هم بوده و اندازه آن در شاخص MC، برابر یا نزدیک صفر می‌باشد، ولی برای مناطق تغییر یافته، مقدار این شاخص بزرگتر از صفر خواهد بود. در ادامه می‌توان با حد‌آستانه‌گذاری این شاخص، مناطق تغییر یافته را از سایر مناطق تفکیک نمود. تفاوت شاخص بزرگی تغییرات با شاخص قدرمطلق تفاضل در این مسأله است که در محاسبه شاخص بزرگی تغییرات، همه باندهای طیفی شرکت نموده‌اند؛ ولی شاخص قدرمطلق تفاضل، به طور جداگانه برای هر یک از باندهای طیفی محاسبه می‌گردد. در واقع، شاخص بزرگی تغییرات، یک شاخص تلفیقی است که از تلفیق شاخص‌های قدرمطلق تفاضل باندهای طیفی مختلف حاصل می‌شود. حسن دیگر این شاخص نسبت به شاخص

^۱ Direct comparison

همبستگی کسینوس، معادل نسخه بدون مرکز همبستگی پیرسون است؛ با فرض اینکه میانگین جمعیت صفر باشد. این نرمال سازی، باعث می شود SCM در تشخیص شکل های طیفی بهتر از SAM عمل کند. تغییرناپذیری تحت تبدیل خطی داده ها یعنی اینکه این شاخص نسبت به اثرات نوردهی (اختلافات رادیومتریکی) حساس نیست.

$$SCM = \cos^{-1} \left(\frac{\sum_{k=1}^K (I_k^1 - \bar{I}^1, I_k^2 - \bar{I}^2)}{\sqrt{\sum_{k=1}^K (I_k^1 - \bar{I}^1)^2} \sqrt{\sum_{k=1}^K (I_k^2 - \bar{I}^2)^2}} \right) \quad (6)$$

۲-۴- شاخص رگرسیون تصاویر

شاخص رگرسیون تصاویر بر این فرض اساسی توسعه پیدا کرده است که درجات خاکستری تصویر زمان دوم (t_2) از یک منطقه ($v_{i,j}$) تابع خطی از درجات خاکستری تصویر زمان اول ($x_{i,j}$) از همان منطقه است که در آن پارامترهای رگرسیون با بکارگیری درجات خاکستری تمامی پیکسل های تصاویر t_1 و t_2 به روش کمترین مربعات قابل محاسبه است. لذا مقدار پیکسل در زمان t_1 به عنوان متغیر مستقل لحاظ شده و مقدار همان پیکسل در زمان t_2 به عنوان متغیر وابسته پیش بینی می شود و سپس از اختلاف بین مقادیر واقعی و پیش بینی شده، مناطق تغییر یافته متمایز می شوند. تصویر تغییرات در واقع باقیمانده های رگرسیون است که این باقیمانده ها حاصل از تفاضل مقدار پیکسل در تصویر زمان t_2 با مقدار پیش بینی شده آن می باشد. پیکسل هایی با باقیمانده های بزرگ (بزرگتر از حد آستانه معین)، معرف مناطق تغییر یافته خواهند بود [۱۲]. تشخیص تغییرات با شاخص رگرسیون از ۵ مرحله اصلی تشکیل شده است. در مرحله اول، پارامترهای رگرسیون خطی (k و c) به روش کمترین مربعات برآورد می گردد، در مرحله دوم؛ تصویر زمان دوم ($\hat{v}_{i,j}$) بصورت $\hat{v}_{i,j} = kx_{i,j} + c$ تخمین زده می شود، در مرحله سوم؛ باقیمانده رگرسیون برای هر پیکسل بصورت $re_{i,j} = v_{i,j} - \hat{v}_{i,j}$ برآورد می گردد، در مرحله چهارم؛ میانگین و انحراف معیار تصویر باقیمانده ها محاسبه می شود و در مرحله نهایی، مقادیر هر پیکسل در تصویر باقیمانده ها بررسی می شود تا مشخص گردد آیا پیکسل مورد بررسی، تغییرات واقعی داشته است یا نه! به اینصورت که؛ یک پیکسل با مقدار $re_{i,j}$ در تصویر باقیمانده ها، تغییر نیافته خواهد بود اگر $re_{i,j}$ در بازه

قدرمطلق تفاضل، تسهیل و تسریع فرآیند حد آستانه گذاری با تعیین تنها یک حد آستانه برای کل تصویر چندطیفی است.

۲-۲- شاخص SAM

در تصاویر چندطیفی می توان جهت بردار تغییرات را برای هر پیکسل محاسبه کرد [۲]. برای محاسبه شاخص جهت تغییرات معمولا از نگارنده زاویه طیفی (SAM) استفاده می شود [۴]. برای پیکسلی با بردارهای طیفی دوزمانه I^1 و I^2 ، معیار SAM با رابطه (۵) اندازه گیری می شود. در رابطه (۵) صورت کسر ضرب داخلی دو بردار طیفی بوده و مخرج کسر، اندازه بردارهای طیفی دوزمانه است. معیار SAM، جهت تغییرات هر پیکسل را با محاسبه عدم شباهت بین منحنی های طیفی در تصاویر دوزمانه اندازه گیری می کند که مقداری بین صفر تا نود درجه خواهد بود. اگر منحنی های طیفی یک پیکسل در دو زمان متوالی عین هم یا مشابه باشند؛ معیار SAM عددی نزدیک به صفر بوده و بیانگر تغییرات ضعیف است و اگر شکل منحنی های طیفی دوزمانه تغییر کرده باشد که بیانگر تغییرات شدید در آن پیکسل است، عدم شباهت بین دو بردار طیفی، بالا بوده و SAM مقدار قابل توجهی خواهد بود.

$$SAM = \cos^{-1} \left(\frac{\sum_{k=1}^K (I_k^1 \cdot I_k^2)}{\sqrt{\sum_{k=1}^K (I_k^1)^2} \times \sqrt{\sum_{k=1}^K (I_k^2)^2}} \right) \quad (5)$$

۲-۳- شاخص SCM

از نظر تئوری، شاخص SAM قادر به تشخیص داده های همبسته منفی نیست. برای رفع این محدودیت، شاخص دیگری بنام SCM پیشنهاد شده است که از همبستگی پیرسون استفاده می کند. برای پیکسلی با بردارهای طیفی دوزمانه I^1 و I^2 ، معیار SCM، جهت تغییرات بین این دو بردار طیفی را با رابطه (۶) اندازه گیری می کند [۱۱]. مقادیر شاخص SCM بین +1 و -1 متغیر است؛ مقدار ۱ به این معنی است که دو سری داده، کاملا مشابه هستند، مقدار صفر نیز به این معنی است که آن ها کاملاً نامرتب هستند و مقدار -1 به معنای تضاد کامل (همبستگی کامل منفی) بین داده ها است. تفاوت عمده بین دو شاخص اخیر این است که SAM از مقادیر I^1 و I^2 استفاده می کند در حالی که SCM از داده های متمرکز به ترتیب با پارامترهای \bar{I}^1 و \bar{I}^2 که میانگین کل باندهای طیفی هستند، استفاده می کند. بنابراین،

تغییریافته خواهد بود. روش رگرسیون تصاویر از نظر تئوری، از مزایای ارزشمندی برخوردار است به این شرح که اثرات زوایای تابش متفاوت خورشید و شرایط متفاوت اتمسفر در روش رگرسیون کاهش یافته [۱۳] و تا حدودی می‌تواند اختلافات رادیومتریکی بین تصاویر را مدل نماید. لازم به ذکر است؛ چون در این روش مناطق تغییر یافته از تحلیل باقیمانده‌های رگرسیون تعیین می‌شوند؛ بنابراین در تصاویری که نسبت عوارض تغییر یافته به کل عوارض تصویر زیاد باشد، نتایج ضعیف خواهد بود.

۲-۵- شاخص ERGAS

یکی از شاخص‌هایی که اخیراً در کاربرد شناسایی تغییرات مورد توجه قرار گرفته است، شاخص ERGAS می‌باشد. این شاخص اولین بار توسط Wald [۱۴] برای تخمین کیفیت طیفی تصاویر ادغام شده پیشنهاد شد [۱۴] و بعدها توسط Renza و همکاران به کاربرد تشخیص تغییرات ورود پیدا کرد [۱۵]. این شاخص، ۱) مستقل از واحد بوده و با توجه به ضرایب کالیبراسیون و gain سنجنده، می‌تواند برای کمیت‌های بدون واحد یا رادیانس مورد استفاده قرار گیرد، ۲) مستقل از تعداد باندهای طیفی است و ۳) مستقل از توان تفکیک مکانی تصاویر است. شاخص ERGAS بین دو تصویر با رابطه (۷) محاسبه می‌شود. در این رابطه؛ h و l به ترتیب بیانگر توان تفکیک مکانی تصاویر ادغام شده و مرجع بوده و K بیانگر تعداد باندهای طیفی است. همچنین $RMSE(B_k)$ نیز ریشه میانگین مربع خطا برای باند k بین تصاویر ادغامی و مرجع است و $\mu(k)$ معرف میانگین باند k از تصویر مرجع است. این شاخص قادر به اندازه‌گیری اعوجاجات رادیومتریکی کلی بین دو تصویر است. با افزایش کیفیت تصویر ادغام شده، این شاخص رو به کاهش می‌یابد. هرچه این عدد به صفر نزدیکتر باشد، کیفیت طیفی محصول نهایی بهتر است، بنابراین این شاخص یک معیار کلی از شباهت طیفی بین دو تصویر را ارائه می‌دهد.

$$ERGAS = 100 \frac{h}{l} \sqrt{\frac{1}{K} \sum_{k=1}^K \left(\frac{RMSE(B_k)}{\mu(k)} \right)^2} \quad (7)$$

شاخص ERGAS توانایی پردازش همزمان هر تعداد باند طیفی برای تولید یک شاخص تغییرات واحد را دارد.

هر چند شاخص ERGAS اولیه یک ارزیابی کلی از کیفیت محصول ادغام شده را ارائه می‌دهد ولی با این حال، برای تهیه تصویر تغییرات مناسب نیست چرا که برای کل تصویر تنها یک کمیت واحد محاسبه می‌شود. برای رفع این مسئله، Renza و همکاران شاخص ERGAS محلی را توسعه داده‌اند که با همسایگی هر پیکسل بطور محلی محاسبه می‌گردد. در ارزیابی محلی که به معنای پاسخ در نقطه (x,y) است، RMSE و میانگین تنها پارامترهایی هستند که بهنگام تغییر x و y در کل محدوده تغییر می‌کنند. اگر $f_k(x,y)$ و $g_k(x,y)$ بیانگر RMSE و میانگین هر باند طیفی در پنجره مکانی مورد نظر باشند، ERGAS محلی برای هر پنجره مکانی از تصویر بصورت رابطه (۸) محاسبه می‌گردد.

$$ERGAS(x,y) = 100 \sqrt{\frac{1}{K} \sum_{k=1}^K \left(\frac{f_k(x,y)}{g_k(x,y)} \right)^2} \quad (8)$$

مقدار میانگین در هر موقعیت (x,y) ، یعنی $g_k(x,y)$ می‌تواند بین مناطق روشن و تاریک تصویر بسیار متفاوت باشد. به عنوان مثال، میانگین در مناطق روشن در مقایسه با مناطق تاریک بیشتر است. این مسئله سبب می‌شود تا مقدار ERGAS محاسبه شده بیشتر از مقدار ERGAS در منطقه متناظر تاریک باشد. برای به حداقل رساندن این اثر، از میانگین همه باندها بصورت $g(x,y) = \frac{1}{K} \sum_{k=1}^K \mu(k)$ استفاده می‌شود. برای تصاویر I^1 و I^2 در یک پنجره مکانی با ابعاد $a \times b$ ، معیار RMSE محلی در باند k یعنی $f_k(x,y)$ بصورت رابطه (۹) محاسبه می‌شود [۱۵].

مسئله مهم در برآورد این شاخص، ابعاد پنجره همسایگی است. هیچ روش دقیقی برای تعیین بهترین اندازه پنجره وجود ندارد؛ طوری که بتواند در تمام مناطق و در تمام موارد، بهترین نتیجه را فراهم نماید. متداول‌ترین راهکار برای حل این مسئله، آزمودن ابعاد مختلف برای پنجره همسایگی است که در تحقیق حاضر از این روش استفاده شد. به این شرح که با آزمودن مقادیر مختلف برای مجموعه داده‌های مختلف، ابعاد 3×3 مناسب تشخیص داده شد.

۲-۶- کورولیشن (همبستگی) طیفی-مکانی

کورولیشن (همبستگی) مکانی نرمال شده بطور گسترده برای تطبیق الگو بین صحنه‌های تصویر استفاده می‌شود. اصل استفاده از همبستگی متقاطع برای تطبیق الگو این

تغییرات در منحنی‌های طیفی دوزمانه است. مقدار ضریب همبستگی از منفی یک تا مثبت یک متغیر است. کاربردهای موفقی از این معیار در تشخیص تغییرات قبلاً گزارش شده است [۱۶] و [۱۷]. همبستگی طیفی به طور قابل ملاحظه‌ای اثرات رادیومتریکی ناشی از اختلافات رادیومتریکی تصویربرداری در تصاویر چندزمانه را کاهش می‌دهد. هر چه اندازه پنجره مکانی بزرگتر باشد، اندازه

است که ضریب همبستگی متقاطع، معیاری از شباهت بین الگو و ناحیه تصویر هدف در حوزه مکانی را فراهم می‌کند. برای دو تصویر I^1 و I^2 با لحاظ پنجره همسایگی W ، کورولیشن متقاطع نرمال شده (ضریب کورولیشن) برای موقعیت (x,y) بصورت رابطه (۱۰) محاسبه می‌شود که در آن میانگین‌های $\bar{I}^1(x,y)$ و $\bar{I}^2(x,y)$ با روابط (۱۱) و (۱۲) محاسبه می‌شوند.

$$f_k(x,y) = \sqrt{\frac{1}{ab} \sum_{i=-a}^{+a} \sum_{j=-b}^b (I_k^2(x+i,y+j) - I_k^1(x+i,y+j))^2} \quad (9)$$

$$c(x,y) = \frac{\sum_{i \in W} \sum_{j \in W} [I^1(x+i,y+j) - \bar{I}^1(x,y)][I^2(x+i,y+j) - \bar{I}^2(x,y)]}{\sqrt{\sum_{i \in W} \sum_{j \in W} [I^1(x+i,y+j) - \bar{I}^1(x,y)]^2} \sqrt{\sum_{i \in W} \sum_{j \in W} [I^2(x+i,y+j) - \bar{I}^2(x,y)]^2}} \quad (10)$$

$$\bar{I}^1(x,y) = \frac{1}{W^2} \sum_{i \in W} \sum_{j \in W} I^1(x,y) \quad (11)$$

$$\bar{I}^2(x,y) = \frac{1}{W^2} \sum_{i \in W} \sum_{j \in W} I^2(x,y) \quad (12)$$

$$c(x,y) = \frac{\sum_{i \in W} \sum_{j \in W} [I^1(x+i,y+j) - \bar{I}^1(x,y)]^T [I^2(x+i,y+j) - \bar{I}^2(x,y)]}{\sqrt{\sum_{i \in W} \sum_{j \in W} \|I^1(x+i,y+j) - \bar{I}^1(x,y)\|^2} \sqrt{\sum_{i \in W} \sum_{j \in W} \|I^2(x+i,y+j) - \bar{I}^2(x,y)\|^2}} \quad (13)$$

$$\bar{I}^1(x,y) = \frac{1}{W^2 K} \sum_{i \in W} \sum_{j \in W} \sum_{k=1}^K I^1(x+i,y+j,k) \quad (14)$$

$$\bar{I}^2(x,y) = \frac{1}{W^2 K} \sum_{i \in W} \sum_{j \in W} \sum_{k=1}^K I^2(x+i,y+j,k) \quad (15)$$

شباهت محاسبه شده توسط ضریب همبستگی منطقه‌ای تر بوده و لذا ضریب همبستگی طیفی-مکانی نسبت به نویز پیکسل‌های منفرد نسبتاً پایدار است. البته این ویژگی برای اغلب شاخص‌هایی که در آنها از پیکسل‌های مجاور استفاده می‌شود، برقرار است. اندازه پنجره مکانی در محاسبه این شاخص مسئله مهمی بوده و باید مقدار مناسبی برای آن لحاظ شود. در مقاله حاضر، پس از بررسی‌های متعدد، ابعاد 3×3 و 5×5 مناسب تشخیص داده شد.

۲-۷- اطلاعات متقابل (MI)

بر اساس مفهوم آنتروپی که توسط شانون معرفی شده است [۱۸]؛ شاخص اطلاعات متقابل (MI) برای دو متغیر تصادفی X و Y بصورت رابطه (۱۶) اندازه‌گیری می‌گردد [۱۷]:

$$MI(X,Y) = \sum_{x \in X} \sum_{y \in Y} p(x,y) \log \left(\frac{p(x,y)}{p(x)p(y)} \right) \quad (16)$$

ضریب همبستگی مکانی فقط شباهت پیکسل‌های مجاور را در حوزه مکان مدلسازی کرده و از فضای طیفی موجود در تصاویر چندطیفی بطور جامع استفاده نمی‌کند. از سوی دیگر، معیار همبستگی طیفی نرمال شده، شباهت منحنی‌های طیفی دو پیکسل در تصاویر چندطیفی مختلف را منعکس می‌کند، اگرچه شباهت مکانی بین دو تصویر را نشان نمی‌دهد. محدودیت‌های مذکور سبب شد تا یانگ و مولر [۱۶]، همبستگی مکانی را به فضای چندطیفی تعمیم داده و معیار جدیدی به نام «کورولیشن طیفی-مکانی» را معرفی نمایند.

برای دو تصویر چندطیفی (با تعداد K باند) کورولیشن طیفی-مکانی با لحاظ پنجره W به مرکزیت پیکسلی در موقعیت (x,y) با رابطه (۱۳) محاسبه می‌گردد که پارامترهای مربوط به آن در روابط (۱۴) و (۱۵) معرفی شده‌اند. کورولیشن طیفی-مکانی؛ بیانگر شباهت منحنی طیفی بین دو تصویر چندطیفی است. شبیه‌ترین منحنی‌های طیفی، بیشترین همبستگی را خواهند داشت، در حالی که کمترین همبستگی نشان‌دهنده بزرگترین

در رابطه (۱۶)، $p(x, y)$ ، $p(x)$ و $p(y)$ به ترتیب توابع توزیع احتمال مشترک و حاشیه‌های X و Y هستند. معیار MI بین دو متغیر در صورتی که آن‌ها مستقل از یکدیگر باشند (دو منطقه متفاوت در تصاویر دوزمانه که نماینده مناطق تغییر یافته است)؛ صفر و نزدیک به آن بوده و اگر مشابه باشند؛ مقدار بزرگتری خواهد بود. چنانچه مشخص است؛ معیار MI برای توابع توزیع احتمال مشترک و حاشیه‌ای محاسبه می‌شود. فلذا برای محاسبه آن، ابتدا برای هر پیکسل از تصویر، باید یک پنجره مکانی لحاظ گردد و در داخل آن پنجره، توابع توزیع تعریف شوند. در تحقیق حاضر، پنجره‌های مکانی با ابعاد مختلف برای تعریف و محاسبه شاخص MI مورد بررسی قرار گرفت و نهایتاً ابعاد 3×3 و 5×5 مناسب تشخیص داده شد.

۲-۸- فاصله جفریس-ماتوسیتا (JMD)

فاصله JM^۱ یک از معیارهای پارامتریک متداول و پرکاربرد در مبحث انتخاب ویژگی است. این معیار تفکیک‌پذیری کلاسها را در ویژگی‌های مختلف بررسی و کمی‌سازی می‌کند. بهترین ویژگی برای تفکیک‌پذیری کلاسهای مختلف، آن موردی خواهد بود که مقدار JM متناظر با آن بیشترین مقدار در بین سایرین باشد. در سالهای اخیر، از این معیار برای تولید شاخص تغییرات استفاده شده است [۲۰]. در واقع بجای اینکه معیار JM برای دو کلاس مختلف در یک ویژگی خاص محاسبه گردد، این معیار برای دو پنجره مکانی متناظر در تصاویر دوزمانه برآورد می‌شود. اگر آن بخش از تصویر در دو تصویر متوالی تغییر معناداری نداشته باشد، اندازه این معیار باید نزدیک به صفر باشد و در غیراینصورت، مقادیر بزرگتری خواهد داشت. در [۲۱] از فاصله JM برای انتخاب بهترین ویژگی‌ها در یک طبقه‌بندی شیء‌مبنا استفاده شده و به این ترتیب یک روش بانظارت خودکار برای انتخاب ویژگی توسعه داده شده‌است. همچنین در [۲۲] از معیار فاصله JM برای انتخاب ویژگی‌های بهینه از بین ویژگی‌های مکانی و چندین شاخص طیفی استفاده شده و اهمیت بالای انتخاب ویژگی‌های بهینه در فرآیند

طبقه‌بندی تأکید و روش مذکور به عنوان یک روش کارآمد برای انتخاب ویژگی‌های بهینه توصیه شده‌است. بر اساس داده‌های آموزشی نماینده هر کلاس موضوعی، توزیع احتمال برای کلاس متناظر برآورد شده و برای محاسبه تفکیک‌پذیری بین دو کلاس استفاده می‌شود. با فرض توزیع‌های احتمال نرمال، فاصله باتاچاریا (B)، می‌تواند به‌عنوان یک معیار تفکیک‌پذیری مناسب مورد استفاده قرار گیرد که از قانون تصمیم‌گیری بی‌زین^۲ برای احتمال طبقه‌بندی اشتباه استفاده می‌کند [۲۲]. فاصله B برای بررسی تفکیک‌پذیری دو کلاس C_1 و C_2 با رابطه (۱۷) محاسبه می‌شود.

$$B = \frac{1}{8}(m_1 - m_2)^2 \frac{2}{\sigma_1^2 + \sigma_2^2} + \frac{1}{2} \ln \left[\frac{\sigma_1^2 + \sigma_2^2}{2\sigma_1\sigma_2} \right] \quad (17)$$

$$JM = 2(1 - e^{-B}) \quad (18)$$

در رابطه (۱۷)، m_1 و σ_1^2 به ترتیب میانگین و واریانس کلاس C_1 بوده و m_2 و σ_2^2 نیز به ترتیب میانگین و واریانس کلاس C_2 می‌باشد که در باند (ویژگی) مورد نظر برآورد شده‌اند. بجای فاصله B، اغلب از معیار دیگری بنام فاصله JM استفاده می‌شود که برخلاف فاصله B، دامنه دینامیکی محدودی دارد. این خصوصیت منحصربه‌فرد، امکان مقایسه بهتر ویژگی‌ها را فراهم می‌کند. فاصله JM، با استفاده از فاصله B، تفکیک‌پذیری بین دو کلاس را در مقیاس [۰-۲] مطابق رابطه (۱۸) اندازه‌گیری می‌کند.

در تحقیق حاضر طبق پیشنهاد جعفرزاده و حسنلو [۲۰]، معیار JM برای دو ناحیه متناظر در تصاویر دوزمانه محاسبه می‌شود. این دو ناحیه، با پنجره‌های همسایگی با ابعاد مختلف قابل تعریف است. اگر در تصاویر دوزمانه آن بخش از تصاویر، تفکیک‌پذیری کامل داشته باشند، یعنی کاملاً تغییر پیدا کرده و متفاوت از یکدیگر باشند؛ $JM=2$ خواهد بود و اگر تشابه کامل داشته باشند، یعنی هیچ تغییری در تصاویر دوزمانه نداشته باشند، فاصله JM صفر خواهد بود. با توجه به نوع و شدت تغییرات، تغییرات ضعیف تا شدید بین مقادیر صفر تا ۲ کمی‌سازی می‌شود. این معیار برای تمامی پیکسل‌های موجود در سطح تصاویر محاسبه می‌گردد. در تحقیق حاضر با بهره‌گیری از اطلاعات طیفی تمام باندهای تصویر، یک شاخص JM کلی برای کل تصویر

^۲ Bayesian decision theory

^۱ Jeffries-Matusita: JM

محاسبه شد. اندازه پنجره مکانی در محاسبه این شاخص مسئله مهمی بوده و باید مقدار مناسبی برای آن لحاظ شود. در مقاله حاضر، پس از بررسی‌های متعدد، اندازه 3×3 مناسب تشخیص داده شد.

۳- پیاده‌سازی و ارزیابی نتایج

در این بخش ابتدا مناطق مورد مطالعه و داده‌های مورد استفاده معرفی می‌شوند. سپس شاخص‌های تغییرات از نظر؛ صحت نقشه‌های تغییرات، معنادار بودن تفاوت نقشه‌های تغییرات و زمان لازم برای محاسبه این شاخص‌ها مورد مقایسه و بررسی قرار خواهند گرفت.

۳-۱- داده‌ها و مناطق مورد مطالعه

۳-۱-۱- مجموعه داده اول

مجموعه داده اول شامل یک جفت تصویر دوزمانه چندطیفی با اختلاف زمانی ۱۱ ساله (۱۹۹۹-۲۰۱۰) از سواحل جنوبی دریاچه ارومیه است. دریاچه ارومیه یکی از بزرگترین دریاچه‌های فوق‌شور دائمی دنیا است که بین دو استان آذربایجان شرقی و آذربایجان غربی واقع شده است. دلیل انتخاب این منطقه، وقوع تغییرات چندگانه قابل توجه در سالهای اخیر در این ناحیه بوده است. ابعاد مکانی تصاویر مورد استفاده 400×420 پیکسل بوده و توسط سنجنده‌های Landsat ETM+ و Landsat TM5 به ترتیب در تاریخ‌های ۱۳/۰۸/۱۹۹۹ و ۰۴/۰۹/۲۰۱۰ از جنوب دریاچه ارومیه اخذ شده است. لازم به ذکر است تنها از ۶ باند طیفی محدوده نور مرئی (R,G,B) و مادون قرمز (NIR, SWIR-1) و (SWIR-2) که توان تفکیک ۳۰ متر داشتند، استفاده شده است. شکل (۱) ترکیب رنگی کاذب تصاویر مجموعه داده اول را نشان می‌دهد. در مرحله پیش‌پردازش، بعد از تصحیح هندسی و هم‌مرجع‌سازی تصاویر، اختلافات رادیومتریکی بین تصاویر با روش کمینه-بیشینه و رگرسیون خطی-قطعه‌ای کاهش داده شد تا برای برآورد شاخص‌های تغییرات آماده شوند [۲۳ و ۲۴].

۳-۱-۲- مجموعه داده دوم

در مجموعه داده دوم با بکارگیری یک جفت تصویر دوزمانه چندطیفی دیگر، تغییرات پوششی و کاربری

منطقه شهری مراغه و حاشیه آن که یکی از بزرگترین شهرهای استان آذربایجان شرقی است، در بازه زمانی ۹ ساله (بین سالهای ۱۹۸۹ و ۱۹۹۸) بررسی شد. دلیل انتخاب این منطقه، وقوع تغییرات چندگانه از جمله؛ گسترش و توسعه شهر مراغه، تغییرات پوشش گیاهی منطقه و آبرگیری سد مصنوعی واقع در شمال شهر مراغه بوده است. تصاویر توسط سنجنده‌های Landsat TM4 و Landsat TM5 به ترتیب در تاریخ‌های ۳۰/۰۶/۱۹۸۹ و ۱۵/۰۶/۱۹۹۸ از شهر مراغه و اطراف آن اخذ شده است. ابعاد مکانی تصاویر 400×400 پیکسل بوده و از نظر طیفی نیز شامل ۶ باند طیفی محدوده نور مرئی و مادون قرمز هستند (R, G, B, NIR, SWIR-1 و SWIR-2). شکل (۲) ترکیب رنگی کاذب تصاویر مورد استفاده در مجموعه داده دوم را نشان می‌دهد.

۳-۲- ارزیابی عملکرد شاخص‌های تغییرات

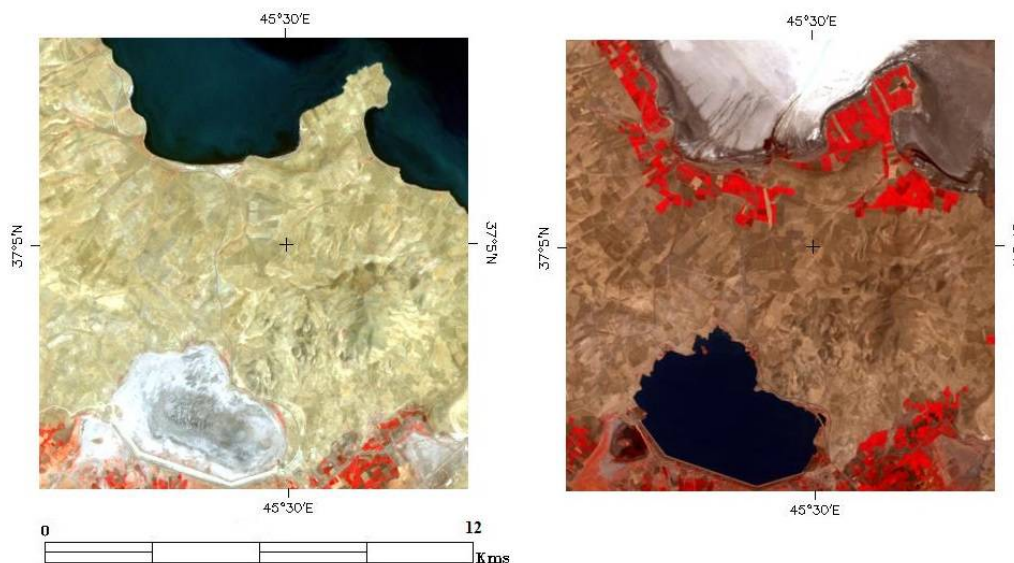
در این بخش نتایج حاصل از پیاده‌سازی شاخص‌های تغییرات در دو مجموعه داده معرفی شده ارائه می‌شوند و مورد بررسی قرار می‌گیرند. با تعیین تجربی پارامترهای دخیل در محاسبه هر یک از شاخص‌های تغییرات (بزرگی تغییرات، SAM، SCM، رگرسیون تصاویر، ERGAS، کورولیشن طیفی-مکانی، اطلاعات متقابل (MI) و فاصله (JM) شاخص‌های مذکور برای تصاویر معرفی شده در این مقاله برآورد شدند. در ادامه، با استفاده از تکنیک حدآستانه‌گذاری اتسو (OTSU) نواحی تغییریافته و تغییرنیافته در شاخص‌های مذکور تفکیک شده و نقشه تغییرات باینری که محل وقوع تغییرات را نشان می‌دهد، فراهم گردید.

شکل (۳) شاخص‌های تغییرات مستخرج از تصاویر مجموعه داده اول را نشان می‌دهد. بعد از تحلیل این تصاویر با تکنیک اتسو، نقشه‌های تغییرات باینری تهیه شدند که در شکل (۴) قابل مشاهده هستند.

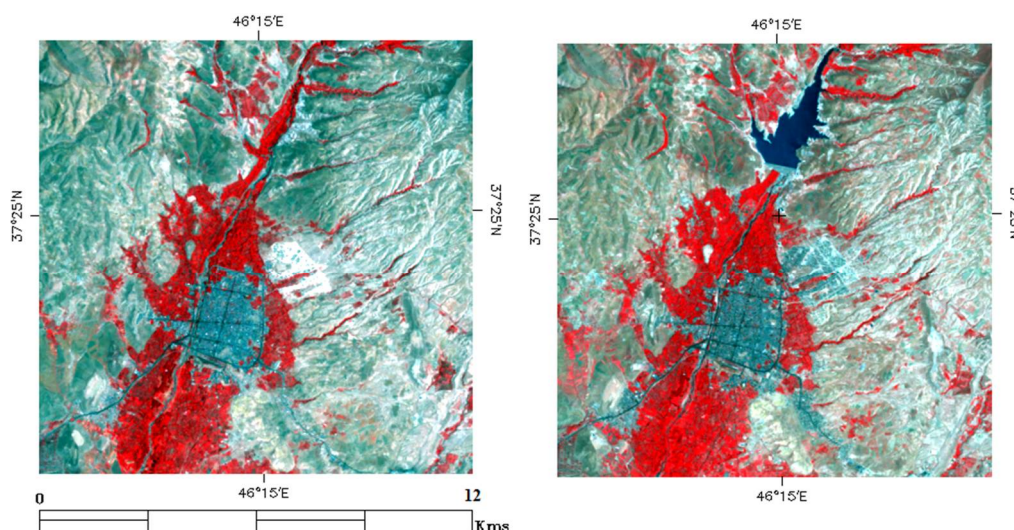
فرآیندهای مذکور در مورد مجموعه داده دوم نیز انجام گرفت. نتایج منجر به تهیه شاخص‌های تغییرات و نقشه تغییرات باینری برای هر یک از آن شاخص‌ها شد که به ترتیب در شکل‌های (۵) و (۶) ارائه شده‌اند.

۳-۲-۱- ارزیابی صحت

هر چند مقایسه‌ی بصری نقشه‌های تغییرات با تصاویر دوزمانه‌ی مورد استفاده می‌تواند کارآیی شاخص‌های تغییر



شکل ۱- ترکیب رنگی کاذب (R=NIR, G=Red, B=Green) از تصاویر مورد استفاده در مجموعه داده اول؛ سمت چپ: تصویر اخذ شده توسط سنجنده Landsat ETM+ در تاریخ ۱۳/۰۸/۱۹۹۹ و سمت راست: تصویر اخذ شده توسط سنجنده Landsat TM5 در تاریخ ۰۴/۰۹/۲۰۱۰ (جنوب دریاچه ارومیه)



شکل ۲- ترکیب رنگی کاذب (R=NIR, G=Red, B=Green) از تصاویر مورد استفاده در مجموعه داده دوم؛ سمت چپ: تصویر اخذ شده توسط سنجنده Landsat TM4 در تاریخ ۳۰/۰۶/۱۹۸۹ و سمت راست: تصویر اخذ شده توسط سنجنده Landsat TM5 در تاریخ ۱۵/۰۶/۱۹۹۸ (شهر مراغه)

(^۱FA): پیکسل‌های تغییر نکرده‌ای که اشتباهاً به عنوان تغییرات شناسایی شده‌اند، (۲) خطای از دست‌رفته (^۲ME): پیکسل‌های تغییر کرده‌ای که شناسایی نشده‌اند و (۳) خطای کلی (^۳TE): نسبت کل پیکسل‌های اشتباه شناسایی شده به تعداد کل پیکسل‌های داده‌های ارزیابی. جدول (۱) و شکل (۷) نتایج ارزیابی صحت نقشه‌های تغییرات حاصل از تحلیل شاخص‌های تغییرات در

را مشخص می‌کند، ولی جهت بررسی دقیق و کمی این نقشه‌ها، از معیارهای ارزیابی کمی استفاده شد. بدین صورت که هر یک از نقشه‌های تغییرات باینری منتج از شاخص‌های تغییرات با داده‌های واقعیت زمینی (داده‌های ارزیابی) که با تفسیر بصری تصاویر دوزمانه توسط افراد خبره تهیه شده بود، مقایسه شدند. این مقایسه منجر به تولید ماتریس خطا (ابهام) و نهایتاً پارامترهای ارزیابی کمی شد که مهمترین آن‌ها عبارتند از: (۱) هشدار اشتباه

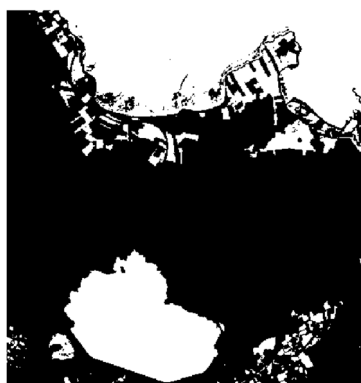
۱ False Alarm
۲ Missed Error
۳ Total Error

جدول ۲- نتایج ارزیابی صحت نقشه تغییرات باینری منتج از حدآستانه‌گذاری شاخص‌های تغییرات در مجموعه‌داده دوم. بهترین نتایج با قلم پررنگ مشخص شده‌است.

| بزرگی تغییرات | SAM | SCM | رگرسیون تصاویر (باند ۵) | ERGAS | کورولیشن طیفی-مکانی | اطلاعات متقابل (باند ۵) | JMD | |
|---------------|-------|-------|-------------------------|-------|---------------------|-------------------------|-------|------------------------|
| ۰/۶۳ | ۰/۴۶ | ۰/۵۷ | ۱۴/۲۵ | ۰/۶۳ | ۰/۵۲ | ۲۲/۸۴ | ۰/۱۸ | هشدار اشتباه (FA%) |
| ۳۲/۲۳ | ۴۶/۳۵ | ۴۱/۴۷ | ۱۵/۰۰ | ۲۶/۵۴ | ۶۴/۰۰ | ۳۶/۸۷ | ۶۷/۵۳ | خطای از دست رفته (ME%) |
| ۹/۰۱ | ۱۲/۶۲ | ۱۱/۴۱ | ۱۴/۴۵ | ۷/۵۰ | ۱۷/۳۴ | ۲۶/۵۶ | ۱۸/۰۳ | خطای کلی (TE%) |



SCM: (ج)



SAM: (ب)



بزرگی تغییرات: (الف)



کورولیشن طیفی-مکانی: (و)



ERGAS: (ه)



رگرسیون تصاویر: (د)

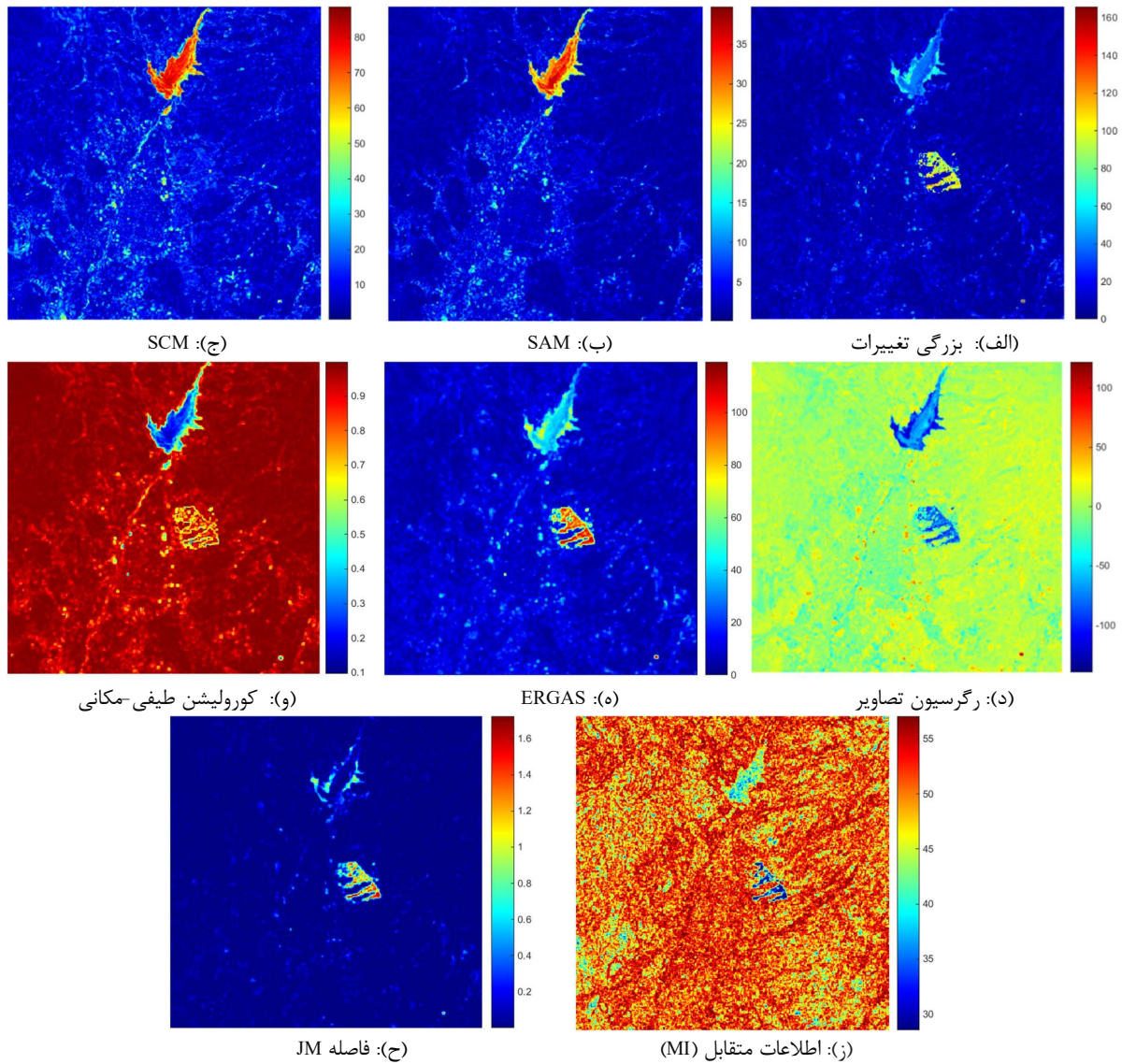


فاصله JM: (ح)



اطلاعات متقابل (MI): (ز)

شکل ۴- نقشه تغییرات باینری حاصل از حدآستانه‌گذاری شاخص‌های تغییرات مورد بررسی در مجموعه‌داده اول. مناطق سفیدرنگ بیانگر مناطق تغییر یافته بوده و مناطق مشکی‌رنگ؛ معرف مناطق تغییر نیافته است.



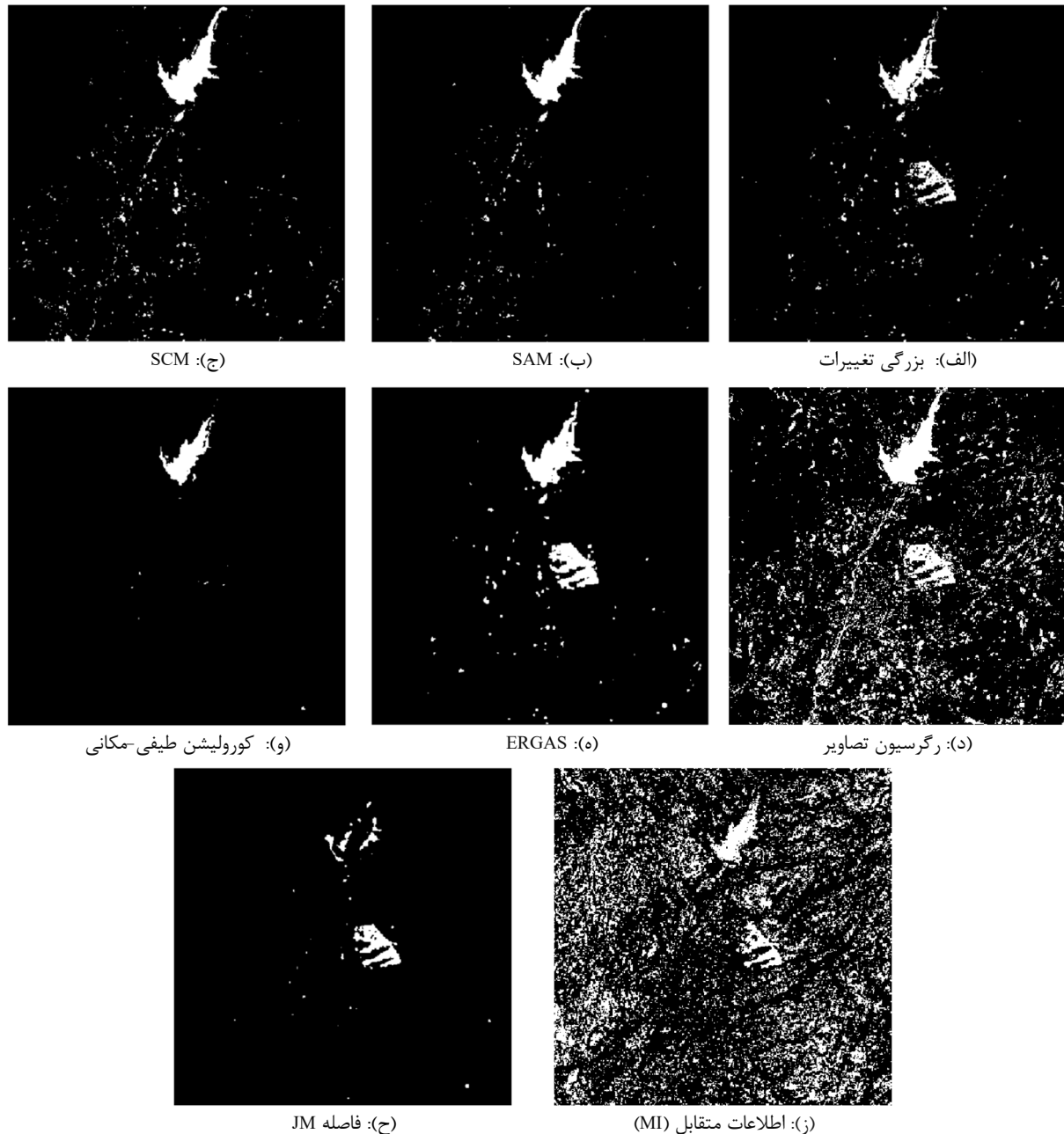
شکل ۵- شاخص‌های تغییرات مستخرج از تصاویر دوزمانه مجموعه‌داده دوم

۲۰/۶۱٪، ۲۰/۸۴٪، ۲۱/۲۲٪ و ۲۱/۴۷٪ می‌باشد. ضعیف‌ترین نتایج در مجموعه‌داده اول متعلق به شاخص کورولیشن است که خطای کلی نقشه تغییرات حاصل از آن برابر ۲۷/۸۰٪ است. نتایج پیاده‌سازی شاخص‌های تغییرات در مجموعه‌داده دوم، در برخی موارد با مجموعه‌داده اول تفاوت دارد. چنانچه در جدول (۲) و شکل (۸) مشخص است؛ بهترین نتایج ابتدا از شاخص ERGAS و سپس از شاخص بزرگی تغییرات حاصل شده‌است. معیارهای FA، ME و TE نقشه تغییرات حاصل از شاخص ERGAS به ترتیب برابر ۰/۶۳٪، ۲۶/۵۴٪ و ۷/۵٪ بوده و FA، ME و TE نقشه تغییرات حاصل از شاخص بزرگی تغییرات به ترتیب برابر ۰/۶۳٪، ۳۲/۲۳٪ و

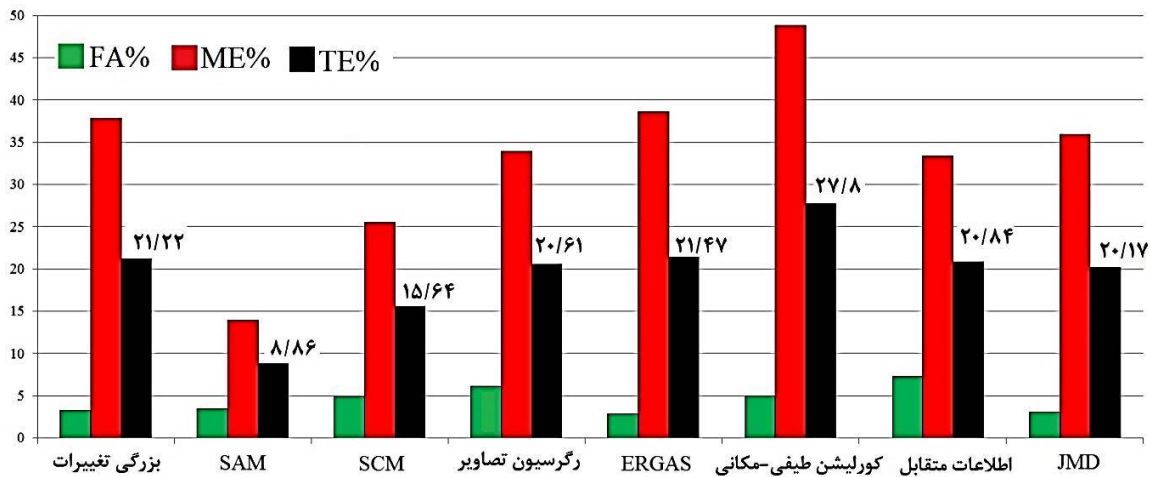
چنانچه در جدول (۱) و شکل (۷) مشخص است، شاخص SAM با اختلاف قابل توجهی با سایرین در صدر قرار داشته و بهترین نتایج تشخیص تغییرات را فراهم نموده است. هشدار اشتباه (FA)، خطای از دست‌رفته (ME) و خطای کلی (TE) نقشه تغییرات حاصل از این شاخص به ترتیب ۳/۴۰٪، ۱۳/۹۱٪ و ۸/۸۶٪ می‌باشد. در مرتبه دوم شاخص SCM قرار دارد که مقادیر FA، ME و TE این شاخص حدوداً دو برابر مقادیر متناظر در شاخص SAM است. در مراتب بعدی و تقریباً با نتایج مشابه، ترتیب شاخص‌های JM، رگرسیون، اطلاعات متقابل، بزرگی تغییرات، ERGAS قرار دارند که خطای کلی نقشه تغییرات حاصل از این شاخص‌ها به ترتیب برابر ۲۰/۱۷٪،

نقشه تغییرات حاصل از این شاخص‌ها به ترتیب برابر ۱۲/۶۲٪، ۱۴/۴۵٪، ۱۷/۳۴٪ و ۱۸/۰۳٪ می‌باشد. ضعیف‌ترین نتایج در مجموعه داده دوم، متعلق به شاخص اطلاعات متقابل است که خطای کلی ۲۶/۵۶٪ در نقشه تغییرات را رقم زده است.

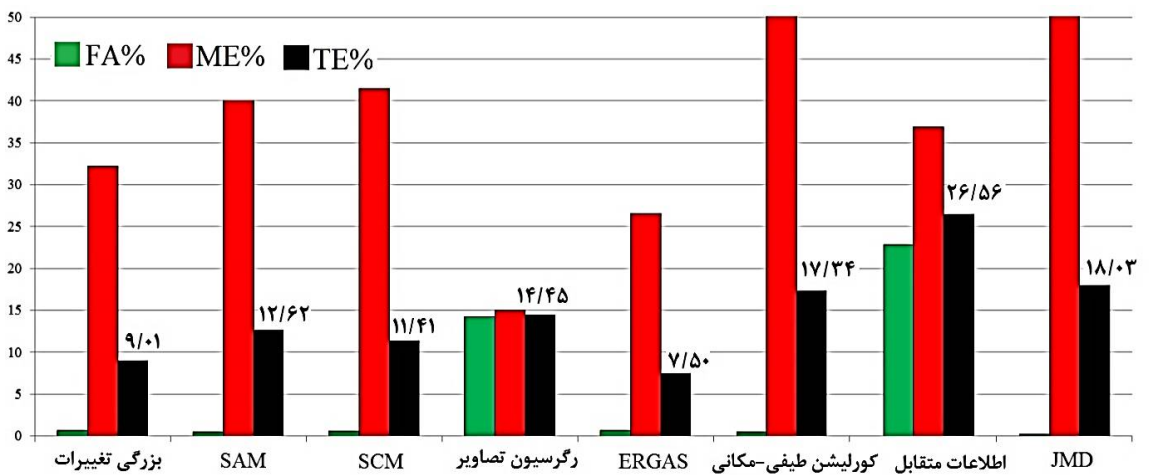
۹/۰۱٪ می‌باشد. در مرتبه سوم شاخص SCM قرار دارد که مقادیر FA، ME و TE این شاخص به ترتیب برابر ۰/۵۷٪، ۴۱/۴۷٪ و ۱۱/۴۱٪ می‌باشد. در مراتب بعدی و تقریباً با نتایج مشابه، به ترتیب شاخص‌های SAM، رگرسیون، کورولیشن طیفی-مکانی و JM قرار دارند که خطای کلی



شکل ۶- نقشه تغییرات باینری حاصل از حدآستانه‌گذاری شاخص‌های تغییرات مورد بررسی در مجموعه داده دوم. مناطق سفیدرنگ بیانگر مناطق تغییر یافته بوده و مناطق مشکی‌رنگ، معرف مناطق تغییر نیافته است.



شکل ۷- ارزیابی صحت نقشه‌های تغییرات حاصل از شاخص‌های تغییرات در مجموعه داده اول با معیارهای FA، ME و TE



شکل ۸- ارزیابی صحت نقشه‌های تغییرات حاصل از شاخص‌های تغییرات در مجموعه داده دوم با معیارهای FA، ME و TE

بررسی در سطح معنی‌داری ۰.۰۵٪ مستقل از یکدیگر محسوب می‌شوند [۲۵].

جدول ۳- مقایسه دو شاخص تغییرات با آزمون مک-نمار

| | | شاخص i | |
|--------------|----------|--------------|------------|
| | | تشخیص اشتباه | تشخیص صحیح |
| تشخیص صحیح | f_{11} | f_{12} | |
| | f_{21} | f_{22} | |
| تشخیص اشتباه | | | |

$$Z_b = \frac{|f_{12} - f_{21}|}{\sqrt{f_{12} - f_{21}}} \quad (19)$$

جداول (۴) و (۵) مقادیر Z_b آزمون‌های مک-نمار انجام گرفته بین شاخص‌های تغییرات در مجموعه داده‌های

۳-۲-۲-۳- ارزیابی شاخص‌ها با آزمون McNemar

هر چند ارزیابی صحت نقشه‌های تغییرات حاصل از تحلیل شاخص‌ها معیار مناسبی برای ارزیابی عملکرد هر یک از آنهاست، ولی بررسی معنادار بودن تفاوت نقشه‌های تغییرات حاصل از این شاخص‌ها می‌تواند این ارزیابی را تکمیل نماید تا مشخص گردد که آیا تفاوت معناداری بین شاخص‌های تغییرات وجود دارد یا نه! یکی از آزمون‌های رایج در این زمینه، آزمون مک-نمار^۱ است که در جدول (۳) معرفی شده است [۲۵].

بعد از محاسبه آماره Z_b با رابطه (۱۹) برای دو نقشه تغییرات منتج از دو شاخص تغییرات مختلف، چنانچه این آماره بزرگتر از ۱/۹۶ باشد، در اینصورت دو شاخص مورد

^۱ McNemar

اول و دوم را نشان می‌دهد. با بررسی جداول (۴) و (۵) مشخص می‌شود که اغلب شاخص‌های تغییرات از نظر آزمون مک-نمار در سطح معنی‌داری ۰.۹۵٪ مستقل از یکدیگر بوده و تفاوت آن‌ها معنادار است.

البته در مجموعه داده اول، تفاوت برخی از شاخص‌ها معنادار نیست. به این شرح که بین دو شاخص بزرگی تغییرات و ERGAS و همچنین بین دو شاخص بزرگی تغییرات و اطلاعات متقابل، اختلاف معناداری وجود ندارد. چرا که آماره آزمون مک-نمار کوچکتر از ۱/۹۶ است. همچنین دو شاخص ERGAS و اطلاعات متقابل نیز تفاوت معناداری با یکدیگر ندارند. تفاوت بین شاخص‌های

اطلاعات متقابل و JMD نیز معنادار نیست. نتایج مذکور را می‌توان بطور بصری در نقشه‌های تغییرات حاصل از این شاخص‌ها در شکل (۴) مشاهده کرد. در این شکل، شباهت مکانی بالایی بین نقشه‌های تغییرات حاصل از جفت-شاخص‌های نامبرده مشهود است.

در مجموعه داده دوم، نتایج متفاوتی مشاهده گردید. در این مجموعه داده؛ آماره آزمون مک-نمار برای تمامی موارد بزرگتر از ۱/۹۶ است که به مفهوم معنادار بودن تفاوت بین شاخص‌های تغییرات در سطح اطمینان ۰.۹۵٪ است. در نتیجه این بررسی‌ها می‌توان تمامی شاخص‌های مذکور را مستقل از یکدیگر در نظر گرفت.

جدول ۴- نتایج بررسی تفاوت شاخص‌های تغییرات با آزمون مک-نمار در مجموعه داده اول. موارد مردودی با قلم پررنگ مشخص شده‌اند.

| آماره آزمون مک-نمار | | | | | | | | |
|---------------------|---------------------|----------------------|-------|----------------|-------|-------|---------------|----------------------|
| JMD | اطلاعات متقابل (MI) | کورولیشن طیفی- مکانی | ERGAS | رگرسیون تصاویر | SCM | SAM | بزرگی تغییرات | |
| ۴/۰۸ | ۱/۰۶ | ۸/۷۳ | ۱/۵۸ | ۱۴/۲ | ۸/۲۷ | ۲۰/۷۷ | | بزرگی تغییرات |
| ۲۰/۱ | ۱۹/۲۷ | ۳۰/۱۳ | ۲۰/۹۱ | ۳۳/۶۷ | ۱۴/۴۸ | | | SAM |
| ۶/۷۲ | ۶/۷۷ | ۲۴/۰۷ | ۸/۴۹ | ۲۴/۴۹ | | | | SCM |
| ۱۵/۷۷ | ۱۴/۷۷ | ۸/۶۷ | ۱۴ | | | | | رگرسیون تصاویر |
| ۵/۵۷ | ۱/۵۸ | ۸/۳ | | | | | | ERGAS |
| ۹/۷۸ | ۸/۴۱ | | | | | | | کورولیشن طیفی- مکانی |
| ۱/۲۴ | | | | | | | | اطلاعات متقابل (MI) |
| | | | | | | | | JMD |

جدول ۵- نتایج بررسی تفاوت شاخص‌های تغییرات با آزمون مک-نمار در مجموعه داده دوم.

| آماره آزمون مک-نمار | | | | | | | | |
|---------------------|---------------------|----------------------|-------|----------------|-------|-------|---------------|----------------------|
| JMD | اطلاعات متقابل (MI) | کورولیشن طیفی- مکانی | ERGAS | رگرسیون تصاویر | SCM | SAM | بزرگی تغییرات | |
| ۳۵/۵۱ | ۴۴/۶۹ | ۳۳/۲۲ | ۱۲/۴۲ | ۱۷/۹۶ | ۱۰/۵۲ | ۱۶/۱۷ | | بزرگی تغییرات |
| ۱۶/۷۵ | ۳۳/۵۰ | ۲۵/۳۷ | ۲۳/۳۸ | ۵/۳۱ | ۱۱/۹۲ | | | SAM |
| ۱۹/۸۰ | ۳۵/۹۰ | ۲۸/۷۷ | ۱۷/۱۴ | ۹/۰۳ | | | | SCM |
| ۹/۲۰ | ۲۶/۸۷ | ۷/۵۶ | ۲۳/۵۱ | | | | | رگرسیون تصاویر |
| ۴۰/۱۱ | ۴۹/۲۰ | ۳۸/۱۱ | | | | | | ERGAS |
| ۲/۲۵ | ۲۲/۵۴ | | | | | | | کورولیشن طیفی- مکانی |
| ۲۰/۲۹ | | | | | | | | اطلاعات متقابل (MI) |
| | | | | | | | | JMD |

۳-۲-۳- ارزیابی زمانی شاخص‌های تغییرات

جهت ارزیابی جامع شاخص‌های تغییرات لازم است تا این شاخص‌ها از نظر زمانی نیز مقایسه شوند. چرا که

علاوه بر صحت تشخیص تغییرات، پارامتر زمان نیز از فاکتورهای مهم و تاثیرگذار در کارایی شاخص‌های تغییرات است. هر یک از شاخص‌های تغییرات به تناسب ماهیت خود، حجم محاسباتی متفاوتی دارند. جدول (۶)

در محیط برنامه‌نویسی MATLAB R2014b و با سخت‌افزار CPU= 3.6 GHz Intel i3 و RAM=8 GB انجام گرفته‌است.

زمان لازم برای محاسبات هر یک از شاخص‌های تغییرات برای مجموعه‌داده‌های اول و دوم را نشان می‌دهد. لازم به ذکر است؛ محاسبات لازم برای تولید شاخص‌های تغییرات

جدول ۶- مقایسه زمان محاسبه شاخص‌های تغییرات در مجموعه‌داده اول و دوم

| زمان محاسبات (ثانیه) | | | | | | | | |
|----------------------|----------------|--------------------|-------|----------------|------|-------|---------------|-----------------|
| JMD | اطلاعات متقابل | کورویشن طیفی-مکانی | ERGAS | رگرسیون تصاویر | SCM | SAM | بزرگی تغییرات | |
| ۱۰/۰۳ | ۸۴۰ | ۸/۱۹ | ۴/۶۲ | ۱/۱۴ | ۵/۷۷ | ۱/۹۵ | ۰/۰۳ | مجموعه‌داده اول |
| ۹/۴۷ | ۷۸۰ | ۷/۷۵ | ۴/۴۰ | ۱/۰۸ | ۵/۵۱ | ۱/۹۴ | ۰/۰۳ | مجموعه‌داده دوم |
| ۹/۷۵ | ۸۱۰ | ۷/۹۷ | ۴/۵۱ | ۱/۱۱ | ۵/۶۴ | ۱/۹۴۵ | ۰/۰۳ | میانگین |

متنوعی در بازه زمانی ۱۱ ساله (۲۰۱۰-۱۹۹۹) در آن رخ داده است. تشخیص تغییرات رخ داده در این منطقه، آزمون مناسبی برای بررسی شاخص‌های تغییرات است. نتایج حاصل از پیاده‌سازی شاخص‌های نامبرده در این مجموعه‌داده نشان داد که هرچند هیچکدام از شاخص‌های تغییرات توانایی تشخیص دقیق و کامل تغییرات رخ داده در منطقه را ندارد، ولی شاخص SAM از کارایی بهتری نسبت به سایرین برخوردار است. خطای کلی تشخیص تغییرات با شاخص SAM تنها ۸/۸۶٪ بود. شاخص SCM در رتبه دوم قرار داشت که خطای کلی تشخیص تغییرات با این شاخص ۱۵/۶۴٪ بوده و حدوداً دو برابر SAM بود. سایر شاخص‌ها به جز، کورویشن طیفی-مکانی، نتایج تقریباً مشابهی داشته و خطای کلی آن‌ها بین ۲۰٪ تا ۲۱/۴۷٪ بود. کورویشن طیفی-مکانی، به سبب ماهیت خود، نسبت به آن دسته از تغییرات واقعی که بصورت افزایش/کاهش یکنواخت در منحنی‌های طیفی دوزمانه است، حساس نبوده و به همین دلیل توانایی تشخیص آن نوع از تغییرات را نداشت. به عنوان نمونه، با مقایسه شکل‌های (۱) و (۴) مشخص می‌شود که قسمت اعظم تغییرات رخ داده در سطوح آبی که شامل بخش‌هایی از دریاچه و سد مصنوعی است، در این شاخص به درستی تشخیص داده نشده‌است.

در مجموعه‌داده دوم که مربوط به شهر مراغه و اطراف آن بود، بهترین نتایج ابتدا از شاخص ERGAS و سپس از شاخص بزرگی تغییرات حاصل شد. خطای کلی نقشه تغییرات حاصل از شاخص‌های ERGAS و بزرگی تغییرات برابر ۷/۵٪ و ۹/۰۱٪ بود. در رتبه سوم شاخص SCM قرار داشت که خطای کلی ۱۱/۴۱٪ در نقشه تغییرات حاصل از آن مشاهده گردید. در مراتب بعدی و تقریباً با نتایج مشابه، به ترتیب شاخص‌های SAM، رگرسیون،

با بررسی جدول (۶) مشخص می‌شود که در بین شاخص‌های مورد بررسی، شاخص بزرگی تغییرات سریعترین شاخص بوده و به زمان بسیار کمتری نیاز دارد (حدود ۰/۰۳ ثانیه). در مراتب بعدی به ترتیب شاخص‌های؛ رگرسیون، SAM، ERGAS، SCM، کورویشن طیفی-مکانی و JMD قرار دارند که زمان لازم برای محاسبه آن‌ها بطور میانگین به ترتیب برابر ۱/۱۱، ۱/۹۴۵، ۴/۵۱، ۵/۶۴، ۷/۹۷ و ۹/۷۵ ثانیه می‌باشد. در بین این شاخص‌ها، «اطلاعات متقابل» به زمان بسیار بالایی برای محاسبه نیاز دارد و این اختلاف قابل توجه است (بطور میانگین ۸۱۰ ثانیه).

بطور کلی شاخص‌هایی که مبتنی بر پنجره‌های همسایگی هستند (شاخص‌های کورویشن طیفی-مکانی، اطلاعات متقابل، ERGAS و JMD) نسبت به شاخص‌های مبتنی بر پیکسل‌های منفرد هستند، به زمان بیشتری نیاز دارند البته در بین این شاخص‌ها، ERGAS استثناء بوده و نسبت به SCM به زمان کمتری نیاز دارد که علت آن پیچیدگی محاسباتی بالای SCM نسبت به ERGAS است.

۴- نتیجه‌گیری و پیشنهادات

در مقاله حاضر برای اولین بار تعداد قابل توجهی از شاخص تغییرات شامل؛ بزرگی تغییرات، SAM، SCM، رگرسیون تصاویر، ERGAS، کورویشن طیفی-مکانی، اطلاعات متقابل (MI) و فاصله JM از جنبه‌های؛ (۱) صحت تشخیص تغییرات، (۲) زمان محاسبات و (۳) استقلال شاخص‌های تغییرات در دو مجموعه‌داده مختلف مورد بررسی قرار گرفت. منطقه مورد مطالعه در مجموعه‌داده اول، ساحل جنوبی دریاچه ارومیه بود که تغییرات چندگانه

کورولیشن طیفی-مکانی و JM قرار داشتند که خطای کلی نقشه تغییرات حاصل از این شاخص‌ها به ترتیب برابر ۱۲/۶۲٪، ۱۴/۴۵٪، ۱۷/۳۴٪ و ۱۸/۰۳٪ بود. ضعیف‌ترین نتایج در این مجموعه داده مربوط به شاخص اطلاعات متقابل بود که خطای کلی ۲۶/۵۶٪ در نقشه تغییرات را به همراه داشت.

از نظر پارامتر زمان؛ «بزرگی تغییرات» سریع‌ترین شاخص بوده و به زمان بسیار کمتری نیاز داشت (حدود ۰/۰۳ ثانیه). در مراتب بعدی به ترتیب شاخص‌های؛ رگرسیون، SAM، ERGAS، SCM، کورولیشن طیفی- مکانی و JMD قرار داشتند که زمان لازم برای محاسبه آن‌ها بطور میانگین کمتر از ۱۰ ثانیه بود و در بین

شاخص‌های مورد بررسی؛ «اطلاعات متقابل» کندترین شاخص بوده و بطور میانگین ۸۱۰ ثانیه زمان برای محاسبه نیاز داشت.

با توجه به تعدد و تنوع شاخص‌های تغییرات، نتایج تحقیق حاضر می‌تواند تا حدودی چالش‌های مرتبط با انتخاب شاخص تغییرات را برای مهندسين عمران و سایر متخصصین علوم مکانی مرتفع نموده و سبب تدقیق و تسهیل تولید نقشه‌های تغییرات شود. با توجه به اینکه شاخص‌های برتر معرفی شده در این مقاله در عمل مکمل یکدیگر بوده و هیچیک به تنهایی قادر به تشخیص کامل تغییرات سطح زمین نیستند، در تحقیقات آتی ادغام شاخص‌های تغییرات مورد بررسی قرار خواهد گرفت.

مراجع

- [1] Ebadi, H., Sadeghi, V., Farnood Ahmadi, F. (2020). "Change Detection in Multi-temporal Remote Sensing Images" KNT University Press. Tehran, (In Persian).
- [2] Sadeghi, V. (2019). "Combining of magnitude and direction of change indices to unsupervised change detection in multitemporal multispectral remote sensing images" *Journal of Geomatics Science And Technology*. 8 (4): 91-108, (In Persian).
- [3] Mohsenifar A, Mohammadzadeh A, Moghimi A. (2021). "An Integrated Unsupervised Change Detection Method Based on the Discrete Wavelet Transform Fusion and An Improved Markov Random Field Model" *Journal of Geomatics Science And Technology*. 10 (3): 165-182, (In Persian).
- [4] Carvalho Júnior, O.A., et al. (2011). "A new approach to change vector analysis using distance and similarity measures" *Remote Sensing*. 3(11): 2473-2493.
- [5] Mohsenifar, A., Mohammadzadeh, A., Moghimi, A., Salehi, B. (2021) "A novel unsupervised forest change detection method based on the integration of a multiresolution singular value decomposition fusion and an edge-aware Markov Random Field algorithm" *International Journal of Remote Sensing*. 42(24): 9376-9404.
- [6] Khankeshizadeh, E., Mohammadzadeh, A., Moghimi, A., Mohsenifar, A. (2022) "FCD-R2U-net: Forest change detection in bi-temporal satellite images using the recurrent residual-based U-net" *Earth Science Informatics*. 15, 2335-2347.
- [7] Ramos, J.F., D. Renza, and D.M. Ballesteros L. (2018). "Evaluation of spectral similarity indices in unsupervised change detection approaches" *Dyna*. 85(204): 117-126.
- [8] Singh, A. and Singh, K.K. (2018). "Unsupervised change detection in remote sensing images using fusion of spectral and statistical indices" *The Egyptian Journal of Remote Sensing and Space Science*. (3): 345-351.
- [9] Jabari, S., et al. (2019). "Multispectral change detection using multivariate Kullback-Leibler distance" *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote sensing*. 147: 163-177.
- [10] Sadeghi, V., Ebadi, H., Mohammadzadeh, A. Farnood Ahmadi, F. (2016). "Change detection in multitemporal remote sensing imagery with thresholding of PSO-based fused change index" *Journal of Geomatics Science And Technology*. 5 (3):175-192, (In Persian).
- [11] Carvalho Jr, O. and Menezes, P. (2000). "Spectral correlation mapper (SCM): An improving spectral angle mapper". in Ninth JPL Airborne Earth Science Workshop. Pasadena: JPL Publication.
- [12] Hussain, M., et al. (2013). "Change detection from remotely sensed images: From pixel-based to object-based approaches" *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*. 80: 91-106.
- [13] Coppin, P.R. and Bauer M.E. (1994). "Processing of multitemporal Landsat TM imagery to optimize extraction of forest cover change features" *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*. 32(4): 918-927.
- [14] Wald, L. (2002). "Data fusion: definitions and architectures: fusion of images of different spatial resolutions" *Presses des MINES*.
- [15] Renza, D., Martinez, E. and Arquero, A. (2012). "A new approach to change detection in multispectral images by means of ERGAS index" *IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters*. 10(1): 76-80.

- [16] Yang, Z. and Mueller, R (2007). "Spatial-spectral cross-correlation for change detection- A case study for Citrus coverage change detection" ASPRS 2007 Annual conference. Citeseer.
- [17] Yasuoka, Y., et al. (1988). "Land-cover change from remotely sensed images using spectral signature similarity" 9th Asian Conference on Remote Sensing. Bangkok, Thailand.
- [18] Shannon, C.E. (1948). "A mathematical theory of communication" The Bell system technical journal. 27(3): 379-423.
- [19] Hossain, M.A., Jia, X., and Pickering, M. (2013). "Subspace detection using a mutual information measure for hyperspectral image classification" IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters. 11(2): 424-428.
- [20] Jafarzadeh, H. and Hasanlou, M. (2019). "Probability estimation of change maps using spectral similarity" Multidisciplinary Digital Publishing Institute Proceedings.
- [21] Nussbaum, S., Niemeyer, I., and Canty, M. (2006). "SEATH-a new tool for automated feature extraction in the context of object-based image analysis" 1st International Conference on Object-based Image Analysis (OBIA). Salzburg: Austria.
- [22] Mhangara, P. and Odindi, J. (2013). "Potential of texture-based classification in urban landscapes using multispectral aerial photos" South African Journal of Science. 109(3): 1-8.
- [23] Sadeghi, V., Ebadi, H., Farnood Ahmadi, F. (2013). "Automatic Normalization of Multi-temporal Satellite Images using Artificial Neural Network and mathematical methods" Applied Mathematical Modelling. 37(9):6437-6445.
- [24] Sadeghi, V., Farnood Ahmadi, F., and Ebadi, H. (2015). "A new automatic regression-based approach for relative radiometric normalization of multitemporal satellite imagery" Computational and Applied Mathematics: 1-18.
- [25] Kiani, A., Farnood Ahmadi, F., Ebadi, H. (2020). "Developing an Interpretation System for High-Resolution Remotely Sensed Images Based on Hybrid Decision-Making Process in a Multi-scale Manner" Journal of the Indian Society of Remote Sensing: 48, 197-214.