

تلفیق شاخص‌های بزرگی و جهت تغییرات بمنظور تشخیص نظارت‌نشده تغییرات در تصاویر چندزمانه چندطیفی

وحید صادقی^{۱*}

^۱ استادیار گروه مهندسی نقشه‌برداری - دانشکده مهندسی عمران - دانشگاه تبریز
v.sadeghi@tabrizu.ac.ir

(تاریخ دریافت اسفند ۱۳۹۶، تاریخ تصویب مهر ۱۳۹۷)

چکیده

تشخیص نظارت‌نشده تغییرات در تصاویر سنجش از دور چندزمانه عموماً بر مبنای آنالیز شاخص بزرگی تغییرات می‌باشد. در تصاویر چندطیفی می‌توان علاوه بر شاخص بزرگی تغییرات، شاخص جهت تغییرات را نیز با روابطی از جمله نگارنده زاویه طیفی محاسبه نموده و بکار گرفت. بررسی‌ها نشان می‌دهد؛ اغلب، شاخص جهت تغییرات در تشخیص نظارت‌نشده تغییرات مغفول واقع شده و کاربرد شاخص بزرگی تغییرات عمومیت بالایی دارد. شاخص‌های بزرگی و جهت تغییرات با ماهیت‌های مختلف، پتانسیل متفاوت و البته محدودی در تشخیص انواع مختلف تغییرات سطح زمین دارند. بنابراین این دو شاخص مکمل همدیگر محسوب می‌شوند. در مقاله حاضر به منظور استفاده همزمان از قابلیت شاخص‌های بزرگی و جهت تغییرات، یک شاخص جدید که تلفیق خطی وزن‌دار از دو شاخص نامبرده است، معرفی و مورد ارزیابی قرار گرفته است. در روش پیشنهادی، وزن‌های تلفیق هر یک از شاخص‌ها، متناسب با قابلیت آن شاخص در تشخیص نظارت‌نشده تغییرات بوده و بطور خودکار تعیین می‌شود. معیار Xie-Beni که با خوشه‌بندی جداگانه هر یک از شاخص‌های بزرگی و جهت تغییرات به دو خوشه تغییرات و عدم تغییرات تعیین می‌شود، بیانگر قابلیت آن شاخص در تشخیص نظارت‌نشده تغییرات است. بعد از تولید شاخص تغییرات تلفیقی، با اعمال تکنیک حد‌آستانه‌گذاری Otsu، نقشه تغییرات باینری نهایی تولید می‌شود. برای ارزیابی روش پیشنهادی، از دو مجموعه داده مختلف مربوط به دو منطقه با خصوصیات متفاوت، استفاده شد. در مجموعه داده اول با بکارگیری یک جفت‌تصویر دوزمانه چندطیفی، تغییرات پوشش اراضی ناحیه جنوبی دریاچه ارومیه در بازه زمانی ۱۱ ساله (بین سالهای ۱۹۹۹ و ۲۰۱۰) مورد بررسی قرار گرفته و در مجموعه داده دوم با بکارگیری یک جفت‌تصویر دوزمانه چندطیفی دیگر، تغییرات پوششی و کاربری اراضی منطقه شهری مراغه (استان آذربایجان شرقی) و حاشیه آن در بازه زمانی ۹ ساله (بین سالهای ۱۹۸۹ و ۱۹۹۸) بررسی شد. تصاویر سنجش از دور بکار رفته در این تحقیق تصاویر چندطیفی است که توسط سنجنده‌های Landsat TM 4, 5, ETM+ از مناطق مورد مطالعه اخذ شده است. ارزیابی انجام گرفته از روش پیشنهادی در این دو مجموعه داده نشان داد؛ شاخص تغییرات تلفیقی با بهره‌مندی از پتانسیل متفاوت شاخص‌های بزرگی و جهت تغییرات، عملکرد بهتری نسبت به تک‌تک این شاخص‌ها داشته است. خطای کلی تشخیص تغییرات با شاخص تلفیقی در مجموعه داده اول برابر ۱۰/۱۷٪ می‌باشد که در مقایسه با شاخص‌های بزرگی و جهت تغییرات به ترتیب ۲۱/۷۸٪ و ۶/۱۱٪ کاهش یافته است و در مجموعه داده دوم نیز؛ خطای کلی تشخیص تغییرات با شاخص تلفیقی برابر ۱۲/۸۹٪ می‌باشد که نسبت به شاخص‌های بزرگی و جهت تغییرات به ترتیب کاهش ۵/۳۱ درصدی و ۱۶/۶۰ درصدی را به دنبال داشته است.

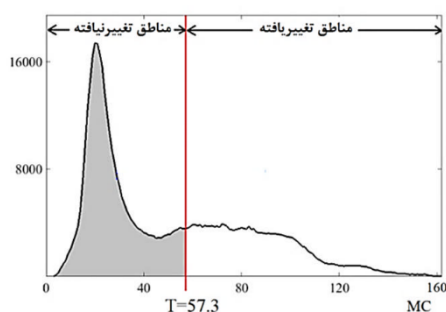
واژگان کلیدی: تشخیص تغییرات، شاخص بزرگی تغییرات، شاخص جهت تغییرات، نگارنده زاویه طیفی (SAM)، معیار Xie-Beni

۱- مقدمه

تعامل بشر با طبیعت و استفاده روز افزون از منابع طبیعی برای بهبود کیفیت زندگی و همچنین رخداد پدیده‌های طبیعی همچون زلزله، سیل و طوفان و موارد مشابه، همواره سبب تغییراتی مداوم در سطح زمین می‌شود. با توجه به پویا بودن اطلاعات مکانی خصوصاً نقشه پوششی/ کاربری اراضی، بهنگام‌رسانی این اطلاعات جهت حصول تصمیم‌گیری‌های صحیح و سریع در کاربردهای مختلف، امری ضروری است. در دهه‌های اخیر، تصاویر سنجنش از دور چندزمانه به منبع ارزشمندی برای تشخیص تغییرات سطح زمین تبدیل شده و تکنیک‌های بسیار متعددی در کاربردهای مختلف توسعه داده شده است. تشخیص تغییرات کاربری و پوششی اراضی و بهنگام‌رسانی نقشه‌های موضوعی [۴-۱]، پایش گسترش شهرها [۵-۷]، پایش کیفیت و کمیت پوشش گیاهی منطقه [۸، ۹]، پایش خطوط ساحلی [۱۰، ۱۱]، پایش کیفیت سطح آب دریاها [۱۲، ۱۳]، پایش آلودگی هوا [۱۴، ۱۵] و پایش یخچال‌های طبیعی [۱۶]، نمونه‌هایی از کاربرد موفقیت‌آمیز تصاویر سنجنش از دوری در تشخیص تغییرات و بهنگام‌رسانی طیف وسیعی از اطلاعات مکانی است.

تشخیص تغییرات مبتنی بر تصاویر سنجنش از دور چندزمانه در دو رویکرد نظارت‌شده و نظارت‌نشده قابل انجام است [۱۷]. در رویکرد نظارت‌شده، وجود الگوهای آموزشی برای هدایت و آموزش الگوریتم تشخیص تغییرات امری ضروری است. با وجود برخی مزایای رویکرد نظارت‌شده نسبت به رویکرد نظارت‌نشده که مهمترین آن؛ ارائه نقشه ماهیت تغییرات است، دشواری و هزینه بالای تهیه الگوهای آموزشی چندزمانه در روش‌های نظارت‌شده، سبب کاهش محبوبیت و عمومیت این روش‌ها شده است [۱۷]. تکنیک‌های نظارت‌نشده که به تکنیک‌های مبتنی بر بارزسازی^۱ نیز معروف هستند، به الگوهای آموزشی نیاز نداشته و عمده این تکنیک‌ها از اتوماسیون بالاتری نسبت به تکنیک‌های نظارت‌شده برخوردارند. عدم نیاز به نمونه‌های آموزشی و اتوماسیون بالا، سبب شده است که محبوبیت تکنیک‌های تشخیص تغییرات نظارت‌نشده در سالهای اخیر افزایش یابد [۱۸]. در اغلب تکنیک‌های نظارت‌نشده از جمله:

تکنیک‌های حدآستانه‌گذاری، طبقه‌بندی نظارت‌نشده (خوشه‌بندی) و غیره، ابتدا؛ با عملیات جبری روی تصاویر چندزمانه، یک تصویر ثانویه بنام «شاخص تغییرات» که در آن تغییرات سطح زمین بارزتر می‌شود، تولید می‌گردد. سپس با تحلیل شاخص تغییرات، مناطق تغییریافته و تغییرنیافته از یکدیگر تفکیک می‌شوند. فارغ از روش مورد استفاده برای تحلیل شاخص تغییرات که می‌تواند؛ حدآستانه‌گذاری، طبقه‌بندی نظارت‌نشده یا هر روش دیگری باشد [۱۷]، شاخص تغییرات نقش بسیار مهمی در تشخیص تغییرات دارد. شاخص تغییرات را می‌توان به روش‌های مختلفی تولید نمود. معمولاً پس از محاسبه تفاضل درجات خاکستری پیکسل‌های متناظر در تصاویر چندزمانه هم‌مرجع‌شده، شاخص بزرگی تغییرات (2MC) تولید می‌شود که پرکاربردترین شاخص تشخیص تغییرات در سنجنش از دور است [۱۹]. برای تحلیل شاخص بزرگی تغییرات بمنظور تشخیص نظارت‌نشده تغییرات، می‌توان از تکنیک‌های متعددی از جمله حدآستانه‌گذاری استفاده کرد. تکنیک‌های حدآستانه‌گذاری عمدتاً با تحلیل هیستوگرام شاخص تغییرات، مناطق تغییریافته و تغییرنیافته را تفکیک می‌نمایند. در هیستوگرام شاخص بزرگی تغییرات، مقادیر نزدیک به صفر (کوچکتر از حدآستانه) بیانگر عدم تغییرات بوده و مقادیر بزرگتر از حدآستانه (از نظر قدرمطلق) بیانگر تغییرات خواهند بود (شکل ۱).



شکل ۱- هیستوگرام شاخص بزرگی تغییرات. مقادیر نزدیک به صفر (کوچکتر از حدآستانه T)، بیانگر مناطق تغییرنیافته بوده و مقادیر بزرگتر از حدآستانه T، بیانگر مناطق تغییریافته می‌باشد

در صورتی که تصاویر مورد استفاده برای تشخیص تغییرات، چندطیفی باشند، می‌توان با تکنیک آنالیز بردار تغییرات (2CVA) که تفاضل درجات خاکستری

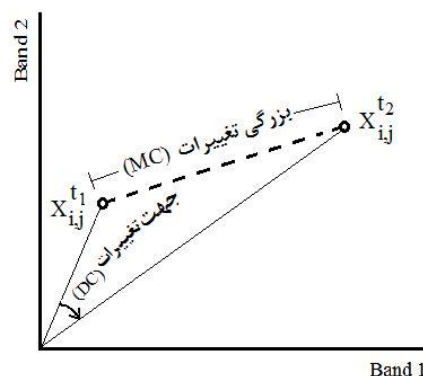
^۲ Magnitude of Change (MC)

^۳ Change-Vector Analysis (CVA)

^۱ Enhanced change detection techniques

رادیانس بوده و قابلیت محدودی در تعیین ماهیت تغییرات دارد. این در حالی است که با شاخص جهت تغییرات، می‌توان تا حدودی نوع تغییرات (ماهیت تغییرات) را مشخص کرد. با توجه به اینکه شاخص‌های بزرگی و جهت تغییرات مکمل یکدیگر بوده و هرکدام پتانسیل متفاوت و محدودی در بارسازی انواع مختلف تغییرات سطح زمین دارند، انتظار می‌رود، تلفیق این دو شاخص، سبب بهبود نتایج تشخیص تغییرات شود. در زمینه تلفیق معیارهای فاصله (بزرگی تغییرات) و شباهت (جهت تغییرات) در تشخیص تغییرات می‌توان به تحقیق انجام گرفته در [۲۴] اشاره کرد. در تحقیق نامبرده، تلفیق معیارهای فاصله‌مبنا و شباهت‌مبنا در تصاویر فراطیفی مورد بررسی قرار گرفته و شاخصی بنام $SAMZID_{tan}$ برای این منظور توسعه داده شده است. این شاخص با اعمال اپراتور ضرب روی نرمال‌شده معیارهای فاصله و شباهت، حاصل می‌شود. روند تولید شاخص نامبرده به اینصورت می‌باشد که ابتدا شاخص $SAMZID_{tan}$ اولیه، در فاز پیش‌بینی محاسبه شده و سپس در فاز آشکارساز، در یک فرآیند سلسله‌مراتبی و تکراری، گام‌به‌گام بهنگام می‌گردد. از آنجائیکه این شاخص برای تصاویر فراطیفی توسعه داده شده و میزان موفقیت این شاخص در تشخیص صحیح تغییرات، منوط به تعیین صحیح پارامترهای تنظیمی دارد که در فاز آشکارساز توسط کاربر بصورت تجربی انتخاب می‌شود؛ لذا کارآئی لازم را در تشخیص نظارت‌نشده تغییرات در تصاویر چندطیفی که سطح اتوماسیون بالایی مدنظر باشد، ندارد. این مسئله بصورت کمی در بخش پیاده‌سازی و ارزیابی نتایج، مشخص شده است. در مقاله حاضر به منظور استفاده همزمان از قابلیت‌های شاخص‌های بزرگی و جهت تغییرات در تصاویر چندزمانه چندطیفی، یک شاخص جدید که تلفیق خطی وزن‌دار از دو شاخص نامبرده است، معرفی شده و مورد ارزیابی قرار می‌گیرد. روند محاسبه شاخص تلفیقی و همچنین تشخیص نهایی تغییرات در روش پیشنهادی، کاملاً اتوماتیک و نظارت‌نشده بوده و نیازی به تعامل با عامل انسانی ندارد و از این نظر بسیار حائز اهمیت است. مقاله حاضر بدین شرح سازمان‌دهی شده است؛ بخش اول، مقدمه تحقیق می‌باشد که ارائه شد. در بخش دوم؛ بعد از تشریح ضرورت تحقیق، مبانی نظری و جزئیات روش پیشنهادی تشریح می‌شود. در بخش سوم؛ ابتدا منطقه مورد مطالعه و داده‌های مورد استفاده در دو مجموعه داده مختلف معرفی

پیکسل‌های متناظر در تمامی باندهای طیفی را محاسبه می‌کند، بردار تغییرات هر پیکسل را تعیین کرد. بعد از ایجاد بردار تغییرات، شاخص‌های بزرگی و جهت تغییرات (DC)^۱ برای هر پیکسل قابل محاسبه است [۲۰]. در شکل (۲)، بردار تغییرات یک پیکسل و شاخص‌های بزرگی و جهت تغییرات مستخرج از آن بردار، در فضای ویژگی دوبعدی نشان داده شده است.



شکل ۲- بزرگی و جهت بردار تغییرات برای یک پیکسل فرضی در فضای ویژگی دوبعدی از یک تصویر دوزمانه. $X_{ij}^{t_1}$ و $X_{ij}^{t_2}$ بیانگر موقعیت پیکسل (i,j) ام از یک جفت تصویر دوزمانه در فضای ویژگی، به ترتیب در دو زمان t_1 و t_2 می‌باشد (مرجع: [۱۹] با برخی تغییرات)

بررسی تحقیقات قبلی نشان می‌دهد که؛ عمدتاً در تشخیص نظارت‌نشده تغییرات در تصاویر سنجش‌ازدوری، شاخص بزرگی تغییرات مورد استفاده قرار گرفته و شاخص جهت تغییرات نادیده گرفته می‌شود. دلیل این مسئله مربوط به عدم برتری شاخص جهت تغییرات نسبت به شاخص بزرگی تغییرات است که در نتیجه آن، رغبت خاصی به استفاده از شاخص جهت تغییرات وجود ندارد. چرا که محاسبه و تفسیر شاخص جهت تغییرات در مقایسه با شاخص بزرگی تغییرات، دشوارتر است. هرچند در برخی از تحقیقات، قابلیت شاخص جهت تغییرات برای تشخیص تغییرات در تصاویر چندزمانه چندطیفی مورد بررسی قرار گرفته است [۱۹، ۲۱-۲۳] ولی این تحقیقات بیشتر به هدف مقایسه کارآئی شاخص‌های تغییرات صورت گرفته و راهکار مناسبی برای بکارگیری همزمان شاخص‌های بزرگی و جهت تغییرات در تصاویر چندطیفی ارائه نشده است. از نظر تئوری، شاخص بزرگی تغییرات؛ بیانگر درجه تغییرات

^۱ Direction of Change (DC)

شده و سپس نتایج پیاده‌سازی روش پیشنهادی در این دو مجموعه داده ارائه می‌شود. همچنین؛ ارزیابی کمی و کیفی از صحت تشخیص تغییرات با شاخص تلفیقی در انتهای بخش سوم ارائه شده و مورد بحث و بررسی قرار می‌گیرد. نهایتاً در بخش چهارم؛ مهمترین نتایج حاصل از تحقیق حاضر ارائه می‌شود.

۲- طرح مسئله و روش پیشنهادی

در مقاله حاضر به منظور بهره‌گیری از پتانسیل متفاوت و محدود هر یک از شاخص‌های بزرگی و جهت تغییرات در تشخیص نظارت‌نشده تغییرات، یک شاخص جدید که تلفیقی وزن‌دار از دو شاخص نامبرده است، معرفی می‌شود. در شاخص تلفیقی، وزن مشارکت هر یک از شاخص‌ها، متناسب با قابلیت آن شاخص در تشخیص نظارت‌نشده تغییرات می‌باشد که با معیار Xie-Beni تعیین می‌شود. بعد از تولید شاخص تغییرات تلفیقی، با استفاده از تکنیک حد‌آستانه‌گذاری Otsu [۲۵]، نقشه تغییرات باینری تولید می‌شود که در آن مناطق تغییر یافته و تغییر نیافته تفکیک شده‌اند. بمنظور تشریح روش پیشنهادی، ابتدا روابط ریاضی مورد استفاده برای تولید شاخص‌های بزرگی و جهت تغییرات ارائه شده و سپس ضرورت تحقیق حاضر بیان می‌شود. در ادامه؛ جزئیات طراحی شاخص تغییرات تلفیقی پیشنهاد شده در این تحقیق، تشریح می‌گردد.

۲-۱- شاخص‌های بزرگی و جهت تغییرات

اگر تصاویر چندطیفی اخذ شده در دو زمان t_1 و t_2 را به ترتیب با $X^{t_1} = \{X_{i,j}^{t_1} | 1 \leq i \leq R, 1 \leq j \leq C\}$ و $X^{t_2} = \{X_{i,j}^{t_2} | 1 \leq i \leq R, 1 \leq j \leq C\}$ نشان دهیم (R و C به ترتیب بیانگر تعداد سطرها و ستونهای تصویر رقومی است)، در اینصورت بردارهای طیفی دوزمانه یک پیکسل در موقعیت (i,j) از این تصاویر را می‌توان، بصورت $X_{i,j}^{t_1} = [x_1^{t_1}, x_2^{t_1}, \dots, x_N^{t_1}]$ و $X_{i,j}^{t_2} = [x_1^{t_2}, x_2^{t_2}, \dots, x_N^{t_2}]$ مشخص نمود که در آن، N بیانگر تعداد باندها در تصاویر چندطیفی است. برای تهیه شاخص بزرگی تغییرات از معیارهای مختلفی از جمله فاصله اقلیدسی و مایلانوبیس می‌توان استفاده کرد. با توجه به قابلیت بالای معیار فاصله اقلیدسی در مقایسه با معیار فاصله مایلانوبیس در

تشخیص نظارت‌نشده تغییرات [۱۹]، در تحقیق حاضر؛ شاخص بزرگی تغییرات (MC)، با محاسبه فاصله اقلیدسی بین دو بردار طیفی متناظر (X^{t_1} و X^{t_2}) طبق رابطه (۱) اندازه‌گیری شد.

$$MC = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{k=1}^N (x_k^{t_2} - x_k^{t_1})^2} \quad (1)$$

با اندازه‌گیری فاصله اقلیدسی طبق رابطه (۱)، بزرگی تغییرات برای هر پیکسل تصویری، مقداری بین صفر تا $2^n - 1$ خواهد بود (n بیانگر قدرت تفکیک رادیومتریکی تصاویر است). مقادیر کوچکتر (نزدیک به صفر) بیانگر تغییرات ضعیف بوده و مقادیر بزرگتر، بیانگر تغییرات شدید خواهد بود. با حد‌آستانه‌گذاری این شاخص می‌توان مناطق تغییر یافته و تغییر نیافته را تفکیک کرد (شکل ۱).

برای استخراج شاخص جهت تغییرات در تصاویر چندزمانه چندطیفی می‌توان از نگارنده زاویه طیفی (SAM)^۱ استفاده کرد [۱۹، ۲۲]. از دیگر روش‌های تولید شاخص جهت تغییرات می‌توان به تابع کسینوس در فضای هاپر-کروی^۲ [۲۳] و نگارنده کورلیشن طیفی (SCM)^۳ [۱۹] اشاره کرد. کارایی بالای معیار SAM در مقایسه با معیارهای نامبرده [۱۹] سبب شد تا در تحقیق حاضر از معیار SAM برای تولید شاخص جهت تغییرات استفاده شود. برای یک پیکسل با بردارهای طیفی دو زمانه X^{t_1} و X^{t_2} در فضای ویژگی، معیار SAM، جهت تغییرات بین این دو بردار طیفی را طبق رابطه (۲) اندازه‌گیری می‌کند.

$$DC = SAM = \cos^{-1} \left(\frac{\sum_{k=1}^N (x_k^{t_2} \times x_k^{t_1})}{\sqrt{\sum_{k=1}^N (x_k^{t_1})^2} \times \sqrt{\sum_{k=1}^N (x_k^{t_2})^2}} \right) \quad (2)$$

معیار SAM، جهت تغییرات برای هر پیکسل را با محاسبه عدم شباهت بین دو منحنی طیفی تعیین می‌کند که مقداری بین صفر تا نود درجه خواهد بود (شکل ۲). اگر منحنی‌های طیفی یک پیکسل تصویری در دو زمان متوالی عین هم یا شبیه به هم باشند، معیار SAM عددی نزدیک به صفر بوده و بیانگر تغییرات ضعیف است. اگر شکل منحنی‌های طیفی دوزمانه متفاوت باشد که بیانگر تغییرات شدید در آن پیکسل است، عدم شباهت بین دو بردار طیفی، بالا بوده و معیار SAM مقدار بزرگتری خواهد داشت.

^۱ Spectral Angle Mapper (SAM)

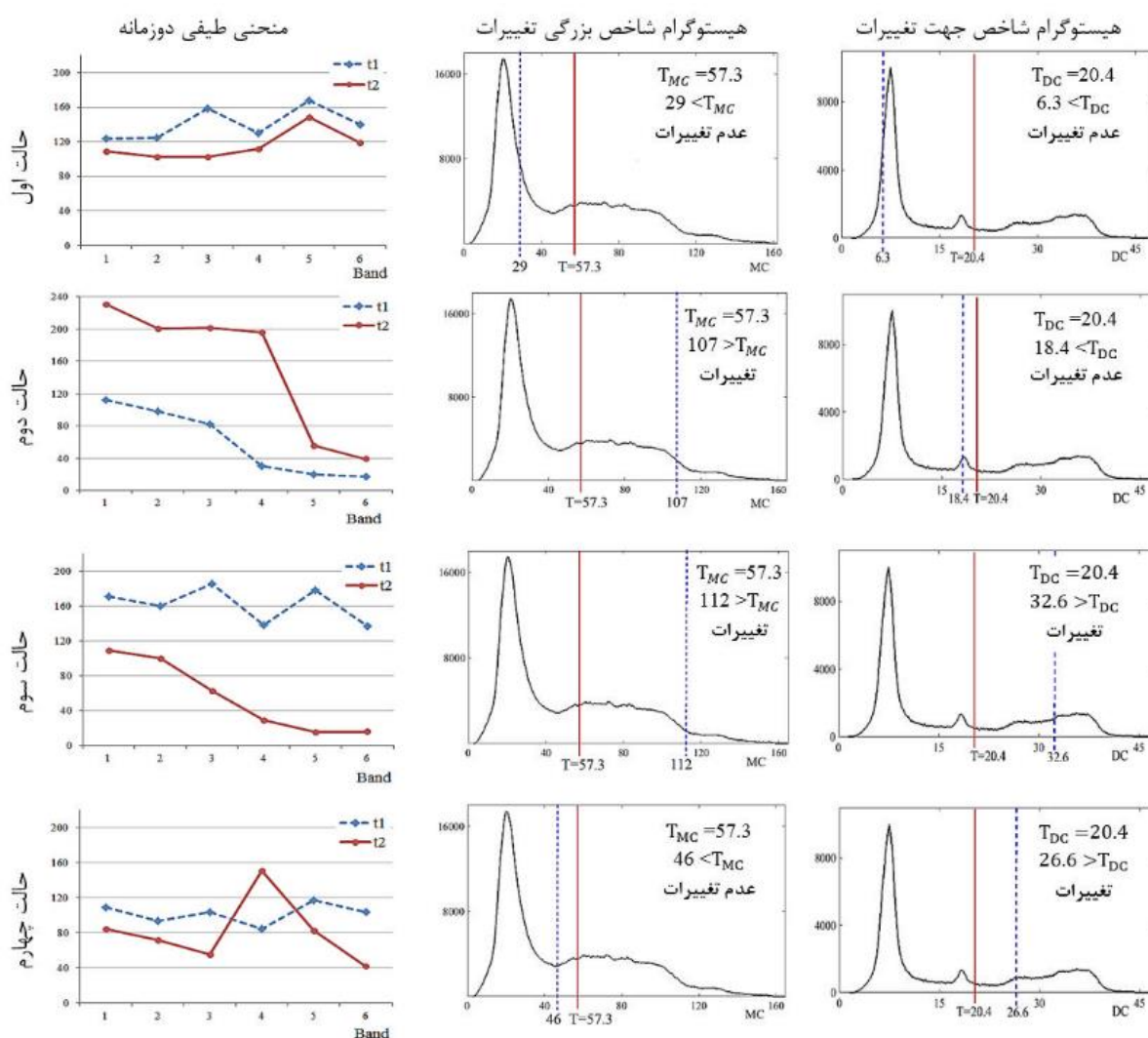
^۲ Hyperspherical direction cosine

^۳ Spectral Correlation Mapper (SCM)

۲-۲- ضرورت تلفیق شاخص‌های بزرگی و جهت تغییرات

در این بخش ابتدا قابلیت‌ها و محدودیت‌های هر یک از شاخص‌های بزرگی و جهت تغییرات مشخص شده و سپس شاخص تغییرات پیشنهادی تشریح می‌شود. از نظر تئوری، زمانی که یک عارضه در طول زمان؛ هیچگونه تغییر واقعی و معناداری در سطح زمین نداشته باشد، منحنی طیفی آن عارضه در زمان t_2 نسبت به زمان t_1 ، بدون تغییر باقی

می‌ماند. ولی در صورتی که عارضه مورد نظر، در طول زمان تغییر کرده باشد، متناسب با نوع و شدت تغییرات، منحنی طیفی آن عارضه با تغییرات متفاوتی همراه خواهد بود. این تغییرات را از نظر نحوه تغییر منحنی طیفی عارضه، می‌توان در ۴ حالت کلی خلاصه کرد. این چهار حالت در شکل (۳) ارائه شده است.



شکل ۳- چهار حالت ممکن برای تغییرات منحنی طیفی در تصاویر چندزمانه به همراه هیستوگرام شاخص‌های بزرگی و جهت تغییرات و تصمیم‌گیری در خصوص آنها. در هیستوگرام متناظر با هر حالت، حدآستانه بهینه تعیین شده در آن هیستوگرام (T) و اندازه شاخص‌های بزرگی و جهت تغییرات متناظر با آن منحنی‌های طیفی، ارائه شده است. همچنین، تصمیم‌گیری در خصوص تغییرات یا عدم تغییرات بودن آنها با مقایسه اندازه شاخص‌های بزرگی و جهت تغییرات آن پیکسل‌ها با حدآستانه‌های بهینه تعیین شده در آن شاخص‌ها (T_{MC} و T_{DC})، انجام گرفته و با تفسیر بصری تصاویر دوزمانه مورد بررسی و تأیید قرار گرفته است. حالت اول: منحنی طیفی در بازه زمانی t_1 به t_2 تقریباً تغییرشکل نداشته ولی یک شیفت جزئی بین آنها وجود دارد، حالت دوم؛ منحنی طیفی در بازه زمانی t_1 به t_2 تقریباً تغییرشکل نداشته و فقط یک شیفت قابل توجه بین آنها وجود دارد، حالت سوم؛ منحنی طیفی در بازه زمانی t_1 به t_2 تغییر شکل داشته و بین آنها فاصله زیادی ایجاد شده است و حالت چهارم؛ منحنی طیفی در بازه زمانی t_1 به t_2 تغییر شکل داشته ولی بین آنها فاصله اندکی وجود دارد. توجه شود که حدآستانه‌های T_{MC} و T_{DC} بطور اتوماتیک و نظارت‌نشده با تکنیک حدآستانه‌گذاری Otsu به ترتیب در شاخص‌های بزرگی و جهت تغییرات تعیین شده است

مطابق شکل ۳- حالت اول، گاهاً تغییرات به گونه‌ای است که شکل منحنی طیفی در زمان t_2 نسبت به t_1 تقریباً بدون تغییر بوده و تنها یک شیفت جزئی بین منحنی‌های طیفی رخ می‌دهد. در چنین حالتی، شاخص‌های بزرگی و جهت تغییرات با عملکردی مشابه، این نوع تغییرات ضعیف در منحنی طیفی را به عنوان عدم تغییرات واقعی در سطح زمین معرفی می‌نمایند. چرا که در چنین حالتی، اندازه شاخص‌های بزرگی و جهت تغییرات، کوچکتر از حدآستانه‌های $T_{MC}=57.3$ و $T_{DC}=20.4$ است که به عنوان معیار تفکیک نواحی تغییرات و عدم تغییرات در شاخص‌های بزرگی و جهت تغییرات در نظر گرفته شده است (در حالت اول؛ $T_{MC}<29$ و $T_{DC}<6.3$). توجه شود که حدآستانه‌های ارائه شده در شکل ۳ (T_{MC} و T_{DC})، بطور اتوماتیک و نظارت‌نشده با تکنیک حدآستانه‌گذاری Otsu [۲۵] تعیین شده است. با قدری تفاوت نسبت به حالت اول، اگر شیفت رخ داده در منحنی‌های طیفی قابل توجه باشد (حالت دوم در شکل ۳)، بسته به کیفیت انجام فرآیند تصحیح رادیومتریکی تصاویر چندزمانه، تفسیرهای مختلفی از این نوع تغییرات وجود داشته و عملکرد شاخص‌های بزرگی و جهت تغییرات نیز متفاوت خواهد بود. اگر تصحیح رادیومتریکی تصاویر چندزمانه قبل از تشخیص تغییرات انجام نگرفته باشد، این نوع تغییرات در منحنی طیفی (یک شیفت قابل توجه در منحنی طیفی بدون تغییر شکل آن) می‌تواند؛ (۱) مربوط به تفاوت شرایط نوردهی در تصاویر چندزمانه باشد که در آن عارضه مورد نظر بدون تغییر ماهیت، تنها با کاهش یا افزایش درجات خاکستری در تصاویر چندزمانه ظاهر شده است و یا (۲) مربوط به تغییرات معناداری در سطح زمین باشد. ولی در صورتی که تصحیح رادیومتریکی تصاویر چندزمانه انجام گرفته باشد؛ این نوع تغییر در منحنی طیفی متناظر با یک تغییر معنادار در سطح زمین بوده و عملکرد شاخص بزرگی تغییرات بهتر از شاخص جهت تغییرات خواهد بود. چرا که شاخص جهت تغییرات تنها به تغییر شکل در منحنی طیفی حساس بوده و نمی‌تواند تغییرات هرچند قابل توجه بصورت حالت دوم را تشخیص دهد (زاویه SAM در تغییرات حالت دوم بسیار ناچیز است). با توجه به شکل ۳-حالت دوم، مشخص می‌شود که شاخص بزرگی تغییرات، مناطق متناظر با چنین تغییراتی در منحنی طیفی را به عنوان مناطق

تغییریافته معرفی کرده ولی شاخص جهت تغییرات، این نواحی را به عنوان مناطق تغییرنیافته لحاظ می‌کند (در شاخص بزرگی تغییرات؛ $T_{MC}>107$ ولی در شاخص جهت تغییرات؛ $T_{DC}<18.4$). در حالت‌های سوم و چهارم؛ تغییرات به گونه‌ای است که شکل منحنی طیفی تغییر پیدا کرده و از یکدیگر فاصله دارند. این فاصله می‌تواند قابل توجه باشد (حالت سوم) یا جزئی (حالت چهارم). توجه شود که در حالت سوم و چهارم، فاصله بین منحنی‌های طیفی از نوع شیفت نبوده و همراه با تغییر شکل منحنی است. در چنین حالت‌هایی شاخص جهت تغییرات، عملکرد بهتری نسبت به شاخص بزرگی تغییرات دارد. چرا که کمترین تغییر در شکل منحنی طیفی، سبب افزایش زاویه SAM می‌شود. تنها در صورتی که فاصله بین منحنی‌های طیفی دو زمانه از همدیگر زیاد باشد (حالت سوم)؛ می‌توان انتظار داشت که شاخص بزرگی تغییرات موفق به کشف چنین تغییراتی شود. همانطوری که در شکل ۳ مشاهده می‌شود؛ در حالت سوم؛ اندازه شاخص جهت تغییرات بزرگتر از حدآستانه تعیین‌شده در آن شاخص بوده ($T_{DC}>32.6$) و همچنین اندازه شاخص بزرگی تغییرات نیز؛ بزرگتر از حدآستانه تعیین‌شده در آن شاخص است ($T_{MC}>112$). بنابراین هر دو شاخص بزرگی و جهت تغییرات؛ با عملکردی صحیح، عوارض متناظر با چنین تغییراتی در منحنی طیفی را به عنوان تغییرات معنادار معرفی می‌کنند. در حالت چهارم که منحنی‌های طیفی دوزمانه نسبت به یکدیگر تغییر شکل داشته ولی فاصله قابل توجهی بین آنها وجود ندارد، عملکرد متفاوتی بین دو شاخص بزرگی و جهت تغییرات مشاهده می‌شود. این نوع تغییرات در منحنی‌های طیفی، متناظر با تغییراتی ضعیف ولی معنادار در سطح زمین هستند. بعنوان مثال تغییرات بین دو کلاس پوشش گیاهی و زمین‌های بایر که معمولاً در چنین تغییراتی تنها بخشی از منحنی طیفی تغییر شکل داشته و معمولاً منحنی‌های طیفی دوزمانه فاصله زیادی از یکدیگر پیدا نمی‌کنند. چنانچه در شکل ۳-حالت چهارم مشخص است؛ اندازه شاخص بزرگی تغییرات کوچکتر از حدآستانه تعیین‌شده در آن شاخص بوده ($T_{MC}<46$) ولی اندازه شاخص جهت تغییرات بزرگتر از حدآستانه تعیین‌شده در آن شاخص است ($T_{DC}>26.6$). چنین می‌توان استنباط کرد که؛ شاخص جهت تغییرات به کوچکترین تغییرات در

شکل منحنی طیفی که غالباً متناظر با تغییرات معناداری در سطح زمین هستند حساس بوده و عملکرد بهتری نسبت به شاخص بزرگی تغییرات دارد.

۲-۳- شاخص تغییرات پیشنهادی

با بررسی قابلیت شاخص‌های بزرگی و جهت تغییرات در تشخیص تغییراتی در چهار حالت نامبرده؛ مشخص شد که از نظر تئوری، قابلیت شاخص بزرگی تغییرات در حالت دوم بالاتر از شاخص جهت تغییرات بوده و در مقابل؛ در حالت چهارم؛ شاخص جهت تغییرات قابلیت بالاتری نسبت به شاخص بزرگی تغییرات دارد. در حالت‌های اول و سوم، نیز این دو شاخص عملکرد مشابهی دارند. باید توجه نمود که عملکرد مشابه این دو شاخص در حالت‌های اول و سوم لزوماً به معنای یکسان بودن قابلیت آنها نیست. به عنوان یک نتیجه کلی چنین می‌توان ادعا کرد که؛ هیچ کدام از این دو شاخص به تنهایی پتانسیل کامل و ایده‌آلی برای تشخیص نظارت‌نشده تغییرات در تصاویر چندزمانه چندطیفی نداشته و تلفیق آنها می‌تواند منجر به صحت بالاتری در تشخیص تغییرات شود یا حداقل میزان اعتمادپذیری به نتایج را افزایش دهد. به همین دلیل در تحقیق حاضر شاخصی معرفی می‌شود که همزمان از قابلیت دو شاخص بزرگی و جهت تغییرات استفاده نماید.

شکل ۴، فلوجارت روش پیشنهادی را نشان می‌دهد. در مرحله پیش‌پردازش؛ تصحیحات هندسی و رادیومتریک نسبی تصاویر دوزمانه انجام می‌گیرد. برای تصحیح هندسی از روش هم‌مرجع‌سازی و برای تصحیح رادیومتریک نسبی، از روش رگرسیون خطی-قطعه‌ای [۲۶] استفاده شده است. در ادامه؛ شاخص بزرگی تغییرات با فاصله اقلیدسی (رابطه ۱) و شاخص جهت تغییرات با معیار SAM (رابطه ۲)، محاسبه می‌شود. سپس با حدآستانه‌گذاری مستقل هر یک از شاخص‌های بزرگی و جهت تغییرات به دو خوشه تغییرات و عدم تغییرات، نقشه تغییرات میانی متناظر با هریک از این شاخص‌ها تهیه می‌شود. سپس با محاسبه معیاری بنام Xie-Beni (XB)، وزن مشارکت هر یک از شاخص‌های بزرگی و جهت تغییرات در تولید شاخص تغییرات تلفیقی، تعیین و در نهایت طبق رابطه (۳)، با یکدیگر تلفیق می‌شوند. نتیجه این فرآیند؛ حصول شاخص تغییرات تلفیقی (FCI)^۱ با

قابلیت بالاتر نسبت به دو شاخص بزرگی و جهت تغییرات است. در مرحله آخر؛ نقشه تغییرات باینری نهایی با حدآستانه‌گذاری شاخص تغییرات تلفیقی به روش Otsu [۲۵]، حاصل می‌گردد. در ادامه جزئیات روش پیشنهادی تشریح می‌شود. در روش پیشنهادی تلفیق شاخص‌های بزرگی و جهت تغییرات با استفاده از یک رابطه خطی بفرم رابطه (۳) صورت می‌گیرد.

$$FCI = w_{MC} \times MC + w_{DC} \times DC \quad (3)$$

در رابطه (۳)، w_{MC} و w_{DC} به ترتیب بیانگر وزن مشارکت شاخص‌های بزرگی و جهت تغییرات در تولید شاخص تغییرات تلفیقی می‌باشد.



شکل ۴- فلوجارت روش پیشنهادی

با روش آزمون و خطا یا با بکارگیری نمونه‌های آموزشی می‌توان وزن مشارکت شاخص‌های بزرگی و جهت تغییرات را طوری تعیین کرد که با لحاظ یک تابع هدف مشخص،

^۱ Fused change index (FCI)

نتیجه مورد نظر حاصل شود [۲۱]. ولی در چنین رویکردی، بهره‌گیری از نمونه‌های آموزشی امری ضروری است که با ماهیت روش پیشنهادی که یک تکنیک نظارت‌نشده برای تشخیص تغییرات است، در تناقض خواهد بود. چون شاخص‌های بزرگی و جهت تغییرات پتانسیل‌های متفاوتی در تشخیص تغییرات دارند و این پتانسیل می‌تواند در تصاویر مختلف و مناطق مختلف، متفاوت باشد، لذا بهتر است این وزن‌ها طوری طراحی شود که متناسب با قابلیت هر یک از آن شاخص‌ها در تشخیص نظارت‌نشده تغییرات در آن تصاویر باشد.

در مقاله حاضر، یک روش کارآمد برای تعیین اتوماتیک و نظارت‌نشده وزن‌های w_{DC} و w_{MC} پیشنهاد می‌شود که متناسب با قابلیت هر یک از شاخص‌ها در تشخیص تغییرات است. یک شاخص زمانی قابلیت بالایی در تشخیص نظارت‌نشده تغییرات دارد که با استفاده از آن بتوان مناطق تغییریافته و تغییرنیافته سطح تصویر را به بهترین نحو ممکن از یکدیگر تفکیک نمود. اگر مناطق تغییریافته و تغییرنیافته در سطح هر یک از شاخص‌ها را به صورت دو خوشه بالقوه در نظر بگیریم، بعد از فرآیند خوشه‌بندی^۱ این خوشه‌ها به حالت بالفعل درآمد و در حالت ایده‌آل می‌توان انتظار داشت که؛ فشردگی داخل خوشه‌ها و جدائی مراکز خوشه‌ها، بیشترین مقدار ممکن باشد. این معیار شبیه معیار Xie-Beni (XB) در مسئله اعتبارسنجی خوشه‌بندی است که برای تعیین تعداد مناسب خوشه در فرآیند خوشه‌بندی استفاده می‌شود [۲۷، ۲۸]. در روش پیشنهادی قابلیت هر شاخص در تشخیص نظارت‌نشده تغییرات با معیار XB اندازه‌گیری می‌شود. متناسب با معیار XB محاسبه شده برای هر شاخص، وزن مشارکت آن شاخص در تولید شاخص تغییرات تلفیقی مشخص می‌گردد. معیار XB، بر دو ویژگی فشردگی^۲ و تفکیک^۳ استوار است. فشردگی، شاخصی برای ارزیابی پراکندگی داده‌های داخلی هر خوشه بوده و تفکیک نیز شاخصی برای اندازه‌گیری جدائی خوشه‌هاست. برای محاسبه معیار XB برای هر یک از شاخص‌ها؛ ابتدا شاخص مورد نظر با تکنیک حد‌آستانه‌گذاری Otsu [۲۵]،

به یک نقشه تغییرات باینری میانی (IBC_{MC}^{ϵ}) تبدیل می‌شود که در آن پیکسل‌های متعلق به خوشه عدم‌تغییرات با مقدار 0 و پیکسل‌های متعلق به خوشه تغییرات با مقدار 1 مشخص شده است. اگر در نقشه تغییرات باینری میانی حاصل از شاخص بزرگی تغییرات (IBC_{MC})؛ پیکسل‌های متعلق به خوشه عدم‌تغییرات با مجموعه M_0 نشان داده شود که در آن؛ $M_0 = \{(i, j) | IBC_{MC}(i, j) = 0\}$ و پیکسل‌های متعلق به خوشه تغییرات با مجموعه M_1 مشخص گردد که در آن $M_1 = \{(i, j) | IBC_{MC}(i, j) = 1\}$ و همچنین بطور مشابه، در نقشه تغییرات باینری میانی حاصل از شاخص جهت تغییرات (IBC_{DC})، پیکسل‌های متعلق به خوشه عدم‌تغییرات با مجموعه D_0 نشان داده شود که در آن؛ $D_0 = \{(i, j) | IBC_{DC}(i, j) = 0\}$ و پیکسل‌های متعلق به خوشه تغییرات با مجموعه D_1 مشخص شود که در آن؛ $D_1 = \{(i, j) | IBC_{DC}(i, j) = 1\}$ در اینصورت معیار XB برای هر یک از شاخص‌های بزرگی تغییرات و جهت تغییرات به ترتیب با روابط (۴) و (۵) محاسبه می‌شود. در رابطه (۴)، $\overline{MC}_{M_0}$ و $\overline{MC}_{M_1}$ بیانگر میانگین شاخص بزرگی تغییرات (MC) است که به ترتیب در محل پیکسل‌های تغییرنیافته (M_0) و تغییریافته (M_1) محاسبه شده است و بطور مشابه در رابطه (۵)، $\overline{DC}_{D_0}$ و $\overline{DC}_{D_1}$ بیانگر میانگین شاخص جهت تغییرات (DC) می‌باشد که به ترتیب در محل پیکسل‌های تغییرنیافته (D_0) و تغییریافته (D_1) محاسبه شده است. در روابط (۴) و (۵)، صورت کسر نشان‌دهنده فشردگی داخلی دو خوشه تغییرات و عدم‌تغییرات بوده و مخرج کسر نشان دهنده تفکیک بین این دو خوشه هاست. زمانی که خوشه‌های تغییرات و عدم‌تغییرات بطور مناسب از یکدیگر تفکیک شوند، معیار XB مقدار کوچکتری خواهد داشت که بیانگر قابلیت بالای شاخص مورد نظر در تشخیص نظارت‌نشده تغییرات است. بنابراین شاخصی که معیار XB کوچکتری دارد، باید وزن بیشتری در تولید شاخص تغییرات تلفیقی داشته باشد. پس از محاسبه XB_{MC} و XB_{DC} با روابط (۴) و (۵)، وزن‌های w_{MC} و w_{DC} با رابطه (۶) تعیین می‌شوند.

^۱ Clustering
^۲ Compactness
^۳ Separation

^۴ Intermediate binary change map

$$XB_{MC} = \frac{\sum_{(i,j) \in M_0} \sqrt{(MC(i,j) - \overline{MC}_{M_0})^2} + \sum_{(i,j) \in M_1} \sqrt{(MC(i,j) - \overline{MC}_{M_1})^2}}{\sqrt{(\overline{MC}_{M_0} - \overline{MC}_{M_1})^2}} \quad (4)$$

$$XB_{DC} = \frac{\sum_{(i,j) \in D_0} \sqrt{(DC(i,j) - \overline{DC}_{D_0})^2} + \sum_{(i,j) \in D_1} \sqrt{(DC(i,j) - \overline{DC}_{D_1})^2}}{\sqrt{(\overline{DC}_{D_0} - \overline{DC}_{D_1})^2}} \quad (5)$$

$$w_{MC} = \frac{XB_{DC}}{XB_{MC} + XB_{DC}}, \quad w_{DC} = \frac{XB_{MC}}{XB_{MC} + XB_{DC}} \quad (6)$$

دو استان آذربایجان شرقی و آذربایجان غربی در محدوده ۱۷' ۳۸°-۴۱' ۳۷° شمالی و ۴۶°-۴۵° شرقی در ارتفاع ۱۲۵۰ متری از سطح دریا، واقع شده است [۲۹]. دلیل انتخاب این منطقه، وقوع تغییرات چندگانه قابل توجه در سالهای اخیر در این ناحیه بوده است. تصاویر مورد استفاده در مجموعه داده اول، یک جفت تصویر چندطیفی با ابعاد مکانی ۵۳۴×۹۶۰ پیکسل می‌باشد که 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. شکل (۵) ترکیب رنگی کاذب تصاویر مورد استفاده در مجموعه داده اول را نشان می‌دهد.

۳-۱-۲- مجموعه داده دوم

در مجموعه داده دوم با بکارگیری یک جفت تصویر دوزمانه چندطیفی دیگر، تغییرات پوششی و کاربری اراضی (LU/LC) 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) مورد بررسی شد. دلیل انتخاب این منطقه، وقوع تغییرات چندگانه از جمله؛ گسترش و توسعه شهر مراغه، تغییرات پوشش گیاهی منطقه و آبیگری سد مصنوعی واقع در شمال شهر مراغه بوده است. تصاویر مورد استفاده در مجموعه داده دوم، یک جفت تصویر چندطیفی با ابعاد مکانی ۴۰۰×۴۰۰ پیکسل می‌باشد که 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. شکل (۶) ترکیب رنگی کاذب تصاویر مورد استفاده در مجموعه داده دوم را نشان می‌دهد.

شایان ذکر است که شاخص‌های بزرگی و جهت تغییرات یا هر شاخص دیگر، تنها به هدف متمایز کردن عوارض تغییر یافته سطح تصویر بکار گرفته شده و برای تفکیک پیکسل‌های سطح تصویر به دو کلاس تغییر یافته و تغییر نیافته باید از تکنیک‌های حدآستانه‌گذاری یا خوشه‌بندی یا سایر روش‌های مشابه استفاده شود [۱۷]. تکنیک‌های حدآستانه‌گذاری بسیار متنوعی در هر دو رویکرد نظارت‌شده و نظارت‌نشده توسعه داده شده‌اند. در تحقیق حاضر، از تکنیک حدآستانه‌گذاری Otsu که یک تکنیک بسیار کارآمد در تشخیص نظارت‌نشده تغییرات در تصاویر سنجنش از دوری است، استفاده شد [۲۵]. بعد از حدآستانه‌گذاری شاخص تلفیقی، نقشه تغییرات باینری نهایی حاصل می‌شود که مناطق تغییر یافته و تغییر نیافته در آن تفکیک شده است.

۳- پیاده‌سازی و ارزیابی نتایج

۳-۱- معرفی داده‌ها و منطقه مورد مطالعه

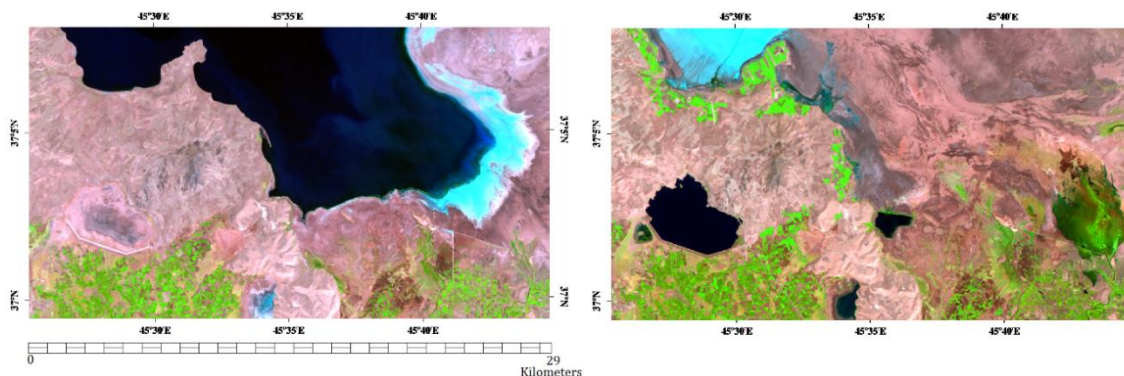
برای ارزیابی روش پیشنهادی، از دو مجموعه داده مختلف که مربوط به دو منطقه با خصوصیات متفاوتی هستند، استفاده شده است. این دو مجموعه داده در ادامه معرفی می‌شوند.

۳-۱-۱- مجموعه داده اول

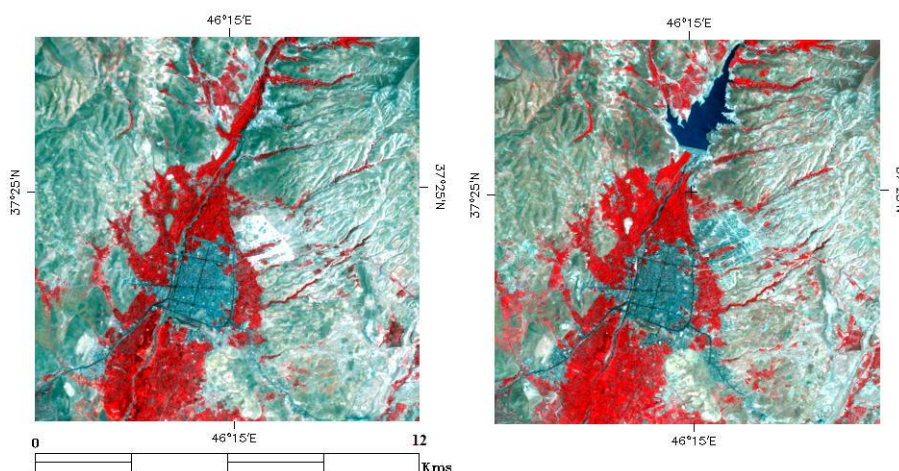
در مجموعه داده اول با بکارگیری یک جفت تصویر دوزمانه چندطیفی، تغییرات پوشش اراضی (LC) ناحیه جنوبی دریاچه ارومیه در بازه زمانی ۱۱ ساله (بین سالهای ۱۹۹۹ و ۲۰۱۰) مورد بررسی قرار گرفت. دریاچه ارومیه یکی از بزرگترین دریاچه‌های فوق‌شور^۲ دائمی دنیا است که بین

^۳ Land Use

^۱ Land Cover
^۲ Hyper saline



شکل ۵- ترکیب رنگی کاذب (R=SWIR1, G=NIR, B=Red) 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 TM 5 در تاریخ ۰۴/۰۹/۲۰۱۰



شکل ۶- 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

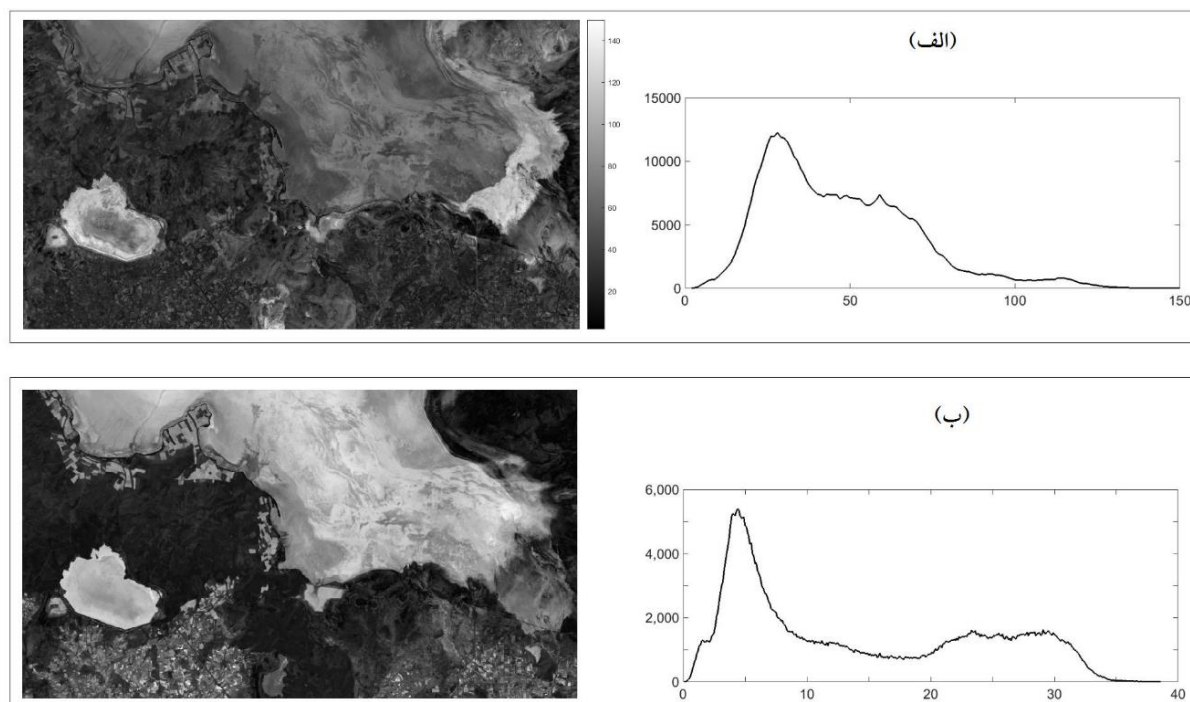
بزرگی و جهت تغییرات تولید شدند. شکل (۷)، شاخص‌های بزرگی و جهت تغییرات حاصل از تصاویر بکار رفته در مجموعه داده اول را نشان می‌دهد. پس از تهیه شاخص‌های بزرگی و جهت تغییرات، بمنظور تفکیک پیکسل‌های تغییریافته و تغییرنیافته در هر یک از این شاخص‌ها، از تکنیک حدآستانه‌گذاری Otsu [۲۵]، استفاده شده و نقشه تغییرات باینری میانی تهیه گردید. شکل (۸)، نقشه تغییرات باینری میانی حاصل از حدآستانه‌گذاری شاخص‌های بزرگی و جهت تغییرات در مجموعه داده اول را نشان می‌دهد. همانطور که در شکل (۸) مشخص است، نتایج تشخیص تغییرات با شاخص‌های بزرگی و جهت تغییرات، اختلاف قابل توجهی با یکدیگر دارند. طوریکه هر یک از این شاخص‌ها، قابلیت‌های خاص و البته محدودی در تشخیص انواع مختلف تغییرات داشته و عملاً مکمل یکدیگر هستند. در بخش ارزیابی بطور کمی پارامترهای ارزیابی صحت نقشه‌های مستخرج از این شاخص‌ها محاسبه شده و صحت این ادعا مورد بررسی قرار می‌گیرد.

۳-۲- پیاده‌سازی روش پیشنهادی

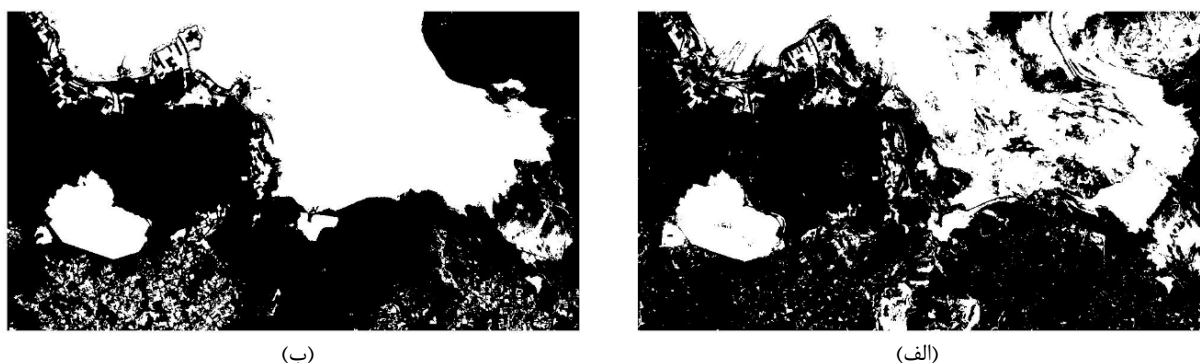
در این بخش جزئیات پیاده‌سازی روش پیشنهادی در دو مجموعه داده مورد استفاده، بطور مجزا تشریح می‌شود.

۳-۲-۱- پیاده‌سازی روش پیشنهادی در مجموعه داده اول

قبل از پیاده‌سازی تکنیک‌های تشخیص تغییرات؛ در مرحله پیش‌پردازش، ابتدا؛ تصحیح هندسی تصاویر دوزمانه به روش هم‌مرجع‌سازی هندسی انجام گرفته و سپس به سبب اهمیت و ضرورت فرآیند تصحیح رادیومتریکی در تشخیص نظارت‌نشده تغییرات، اختلافات رادیومتریکی جفت تصاویر بکار رفته با استفاده از روش رگرسیون خطی-قطعه‌ای [۲۶] که از جمله کارآمدترین تکنیک‌های تصحیح رادیومتریکی نسبی تصاویر سنجنش از دوری است، تصحیح شد. در ادامه با بکارگیری روابط (۱) و (۲)، شاخص‌های



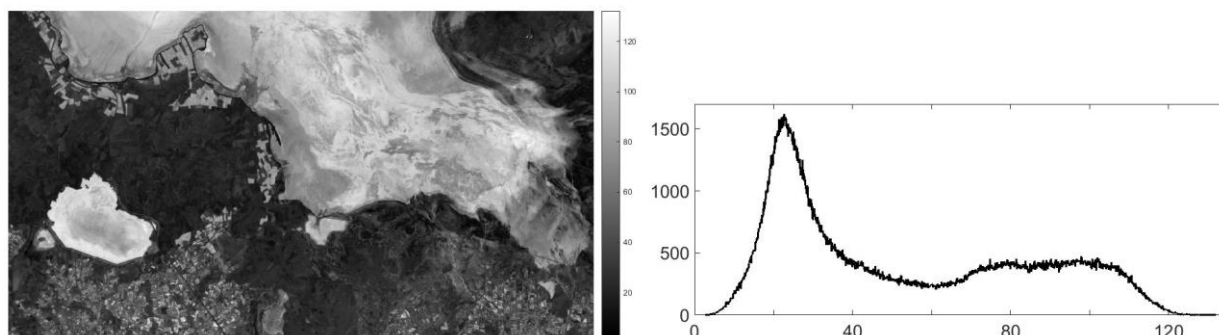
شکل ۷- شاخص‌های (الف) بزرگی تغییرات و (ب) جهت تغییرات به همراه هیستوگرام آنها در مجموعه داده اول.



شکل ۸- نقشه تغییرات باینری میانی (IBCM)، حاصل از حدآستانه‌گذاری شاخص‌های (الف) بزرگی تغییرات و (ب) شاخص جهت تغییرات با تکنیک حدآستانه‌گذاری Otsu در مجموعه داده اول. مناطقی که با رنگ مشکی در IBCM مشخص شده‌اند، بیانگر مناطق تغییرنیافته بوده و مناطقی با رنگ سفید، بیانگر مناطق تغییریافته است

تلفیق، شاخص تغییرات تلفیقی طبق رابطه (۳) تولید شد. شکل (۹)، شاخص تغییرات تلفیقی و هیستوگرام مربوط به آن را در مجموعه داده اول نشان می‌دهد. بعد از حدآستانه‌گذاری شاخص تلفیقی، نقشه تغییرات باینری نهایی حاصل شد که نتیجه آن در شکل (۱۰) برای مجموعه داده اول قابل مشاهده است.

با توجه به ضعف هر یک از شاخص‌های بزرگی و جهت تغییرات در تشخیص انواع مختلفی از تغییرات، در جهت تأمین صحت بالاتر یا حداقل تضمین اعتمادپذیری بیشتر به نتایج تشخیص تغییرات، در روش پیشنهادی، شاخص‌های بزرگی و جهت تغییرات با وزن‌های مشخص تعیین‌شده با یکدیگر تلفیق شدند. برای این منظور، ابتدا شاخص XB برای هر یک از شاخص‌های بزرگی و جهت تغییرات محاسبه و سپس وزن تلفیق هر یک از شاخص‌های بزرگی و جهت تغییرات تعیین شد. در مجموعه داده اول، وزن‌های w_{DC} و w_{MC} به ترتیب ۰/۲۹ و ۰/۷۱ برآورد گردید. در ادامه، با بکارگیری وزن‌های



شکل ۹- شاخص تغییرات تلفیقی و هیستوگرام آن در مجموعه داده اول.

بزرگی و جهت تغییرات تعیین شدند. در مجموعه داده دوم؛ وزن‌های W_{DC} و W_{MC} به ترتیب $0/59$ و $0/41$ برآورد شد. با بکارگیری وزن‌های تلفیق، شاخص تغییرات تلفیقی طبق رابطه (۳) تولید شد. شکل (۱۳)، شاخص تغییرات تلفیقی و هیستوگرام مربوط به آن را در مجموعه داده دوم نشان می‌دهد. بعد از حدآستانه‌گذاری شاخص تلفیقی، نقشه تغییرات باینری نهایی تهیه شد که نتیجه آن در شکل (۱۴) ارائه شده است.



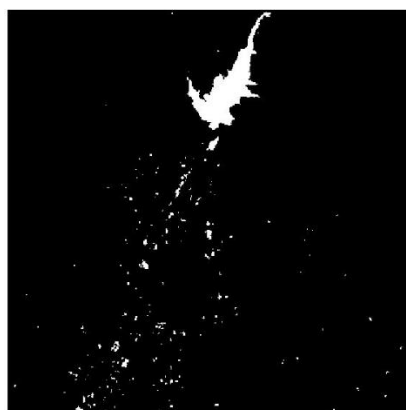
شکل ۱۰- نقشه تغییرات باینری نهایی حاصل از حدآستانه‌گذاری شاخص تغییرات تلفیقی با تکنیک حدآستانه‌گذاری Otsu در مجموعه داده اول

۲-۲-۳- پیاده‌سازی روش پیشنهادی در مجموعه داده دوم

در مجموعه داده دوم نیز، مراحل تصحیح هندسی و تصحیح رادیومتریکی، مشابه مجموعه داده اول انجام گرفته و سپس با بکارگیری روابط (۱) و (۲)، شاخص‌های بزرگی و جهت تغییرات تولید شدند. شکل (۱۱)، شاخص‌های بزرگی و جهت تغییرات حاصل از تصاویر بکار رفته در مجموعه داده دوم را نشان می‌دهد. در ادامه با حدآستانه‌گذاری شاخص‌های بزرگی و جهت تغییرات، نقشه تغییرات باینری میانی تهیه گردید. شکل (۱۲)، نقشه تغییرات باینری میانی حاصل از حدآستانه‌گذاری شاخص‌های بزرگی و جهت تغییرات را در مجموعه داده دوم نشان می‌دهد. مشابه نتایج حاصل از مجموعه داده اول، در مجموعه داده دوم نیز، نتایج تشخیص تغییرات با شاخص‌های بزرگی و جهت تغییرات، اختلاف قابل توجهی با یکدیگر داشته است. در واقع این شاخص‌ها، قابلیت‌های خاص و البته محدودی در تشخیص انواع مختلف تغییرات داشته و عملاً مکمل یکدیگر محسوب می‌شوند. در بخش ارزیابی بطور کمی این مسئله بررسی خواهد شد. در ادامه شاخص XB برای هر یک از شاخص‌های بزرگی و جهت تغییرات محاسبه و سپس وزن تلفیق هر یک از شاخص‌های

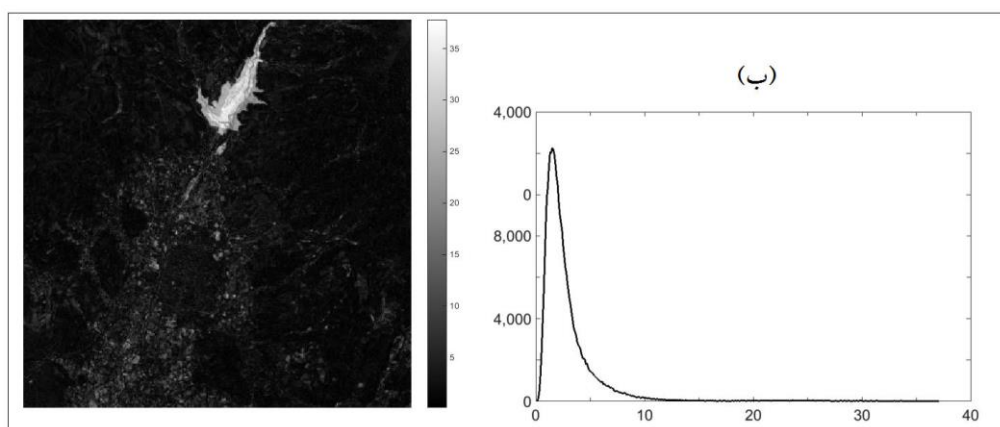
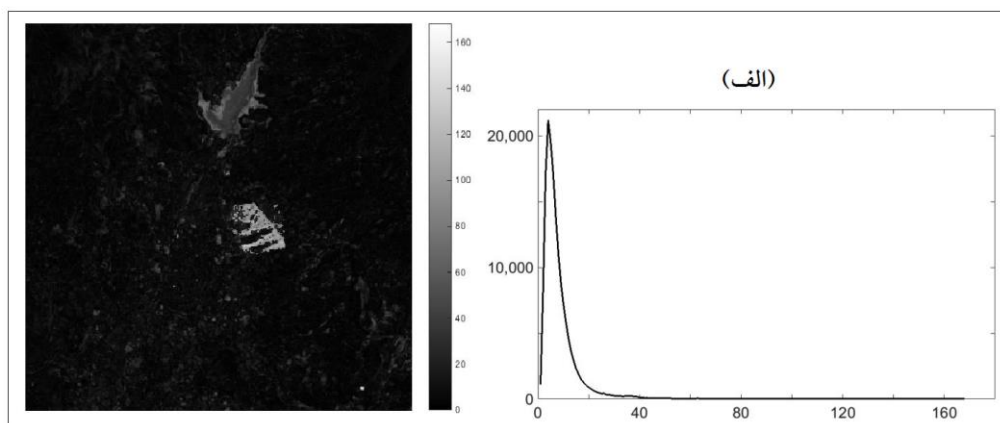


(الف)

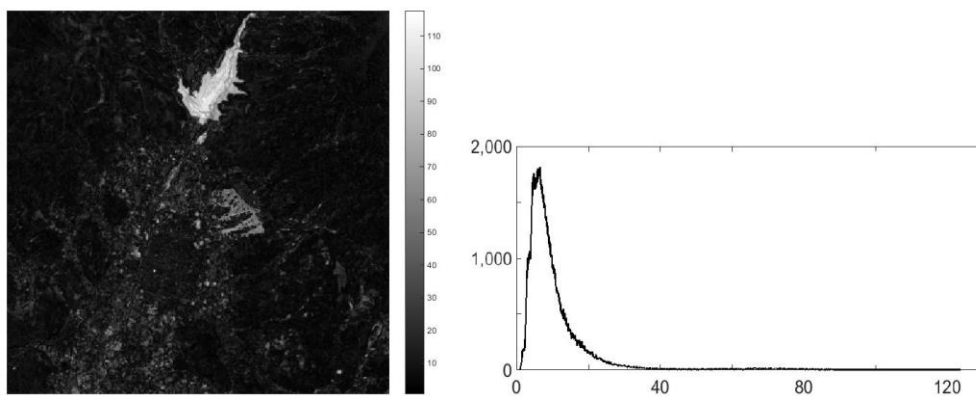


(ب)

شکل ۱۲- نقشه تغییرات باینری میانی (IBCM)، حاصل از حدآستانه‌گذاری شاخص‌های (الف) بزرگی تغییرات و (ب) شاخص جهت تغییرات با تکنیک حدآستانه‌گذاری Otsu در مجموعه داده دوم. مناطقی که با رنگ مشکی در IBCM مشخص شده‌اند، بیانگر مناطق تغییرنیافته بوده و مناطق با رنگ سفید، بیانگر مناطق تغییریافته است



شکل ۱۱- شاخص‌های؛ الف) بزرگی تغییرات و ب) جهت تغییرات به همراه هیستوگرام آنها در مجموعه داده دوم



شکل ۱۳- شاخص تغییرات تلفیقی و هیستوگرام آن در مجموعه داده دوم



شکل ۱۴- نقشه تغییرات باینری نهایی حاصل از حدآستانه‌گذاری شاخص تغییرات تلفیقی با تکنیک حدآستانه‌گذاری Otsu در مجموعه داده دوم

۳-۳- ارزیابی شاخص پیشنهادی

جهت ارزیابی روش پیشنهادی در این تحقیق، نقشه‌های تغییرات باینری حاصل از شاخص تغییرات تلفیقی، شاخص بزرگی تغییرات و شاخص جهت تغییرات با نقشه تغییرات باینری مرجع (واقعیت زمینی) مقایسه شد. در این تحقیق نقشه تغییرات باینری مرجع با تفسیر بصری تصاویر دوزمانه، حاصل شده است. در ادامه جزئیات ارزیابی شاخص پیشنهادی در دو مجموعه بکار رفته ارائه می‌شود.

۳-۳-۱- ارزیابی شاخص پیشنهادی در مجموعه داده اول

نقشه تغییرات باینری مرجع در مجموعه داده اول، شامل ۱۴۹۰۰ پیکسل ارزیابی از مناطق تغییریافته و ۷۴۰۰ پیکسل ارزیابی از مناطق تغییرنیافته می‌باشد. پس از مقایسه نقشه تغییرات باینری حاصل از تکنیک‌های مختلف با نقشه تغییرات باینری مرجع، پارامترهای ارزیابی صحت شامل؛ الف) هشدار اشتباه (FA)^۱؛ درصد پیکسل‌های تغییرنکرده‌ای که الگوریتم آنها را اشتباهاً به عنوان تغییرات شناسایی کرده است، ب) خطای از دست‌رفته (ME)^۲؛ درصد پیکسل‌های تغییرکرده‌ای که الگوریتم موفق به شناسایی آنها نشده است و پ) خطای کلی (TE)^۳؛ نسبت کل پیکسل‌های اشتباه شناسایی شده به تعداد کل پیکسل‌های داده‌های ارزیابی، محاسبه شد. نتایج ارزیابی صحت از تشخیص تغییرات مجموعه داده اول در جدول (۱) ارائه شده است. همچنین در جهت مقایسه کارآیی شاخص تغییرات پیشنهاد شده در این تحقیق با سایر شاخص‌هایی که بمنظور تلفیق معیارهای فاصله و شباهت توسعه داده شده‌اند، نتایج حاصل از حدآستانه‌گذاری شاخص SAMZID_{tan} با تکنیک Otsu در این جدول ارائه شده است.

جدول ۱- ارزیابی صحت شاخص پیشنهادی در تشخیص نظارت‌نشده تغییرات در مجموعه داده اول. ارائه پارامترهای ارزیابی صحت شامل؛ FA، ME و TE برای شاخص بزرگی تغییرات، شاخص جهت تغییرات، شاخص SAMZID_{tan} و شاخص تغییرات تلفیقی پیشنهادی.

شاخص	شاخص	شاخص	شاخص	
بزرگی	جهت	شاخص	تغییرات	
تغییرات	تغییرات	تغییرات	تغییرات	
۱۷/۲۵	۴/۰۳	۰/۰	۲/۷۸	%FA
۳۹/۱۹	۲۲/۳۱	۶۶/۰۲	۱۳/۸۱	%ME
۳۱/۹۵	۱۶/۲۸	۴۴/۲۳	۱۰/۱۷	%TE

با بررسی پارامترهای ارزیابی صحت ارائه شده در جدول (۱) مشخص می‌شود که خطای از دست‌رفته (ME) برای هر دو شاخص بزرگی و جهت تغییرات مقدار قابل توجهی است (۳۹/۱۹٪ برای شاخص بزرگی تغییرات و ۲۲/۳۱٪ برای شاخص جهت تغییرات). باید توجه داشت که هر چند اندازه خطای ME در این دو شاخص برابر است ولی محل وقوع آنها، متناظر نیست. بررسی نقشه‌های تغییرات باینری حاصل از این شاخص‌ها (شکل ۸) مؤید این ادعاست. عدم تطابق مکانی در وقوع خطای ME برای این دو شاخص، به این دلیل است که هر یک از این شاخص‌ها با عملکردی متفاوت، در شناسایی انواع مختلفی از تغییرات ضعف داشته‌اند. با تفسیر بصری تصاویر چندزمانه (شکل ۵) و نقشه‌های تغییرات باینری (شکل ۸) و البته بررسی منحنی طیفی دوزمانه در این مناطق، مشخص می‌گردد که خطای ME برای شاخص بزرگی تغییرات مربوط به تغییرات از نوع حالت چهارم و برای شاخص جهت تغییرات مربوط به حالت دوم می‌باشد. این مسئله از نظر تئوری نیز با استدلال‌های ارائه شده در شکل (۳) مطابقت دارد. همچنین جدول (۱) نشان می‌دهد که شاخص جهت تغییرات از نظر خطای FA در وضعیت بهتری نسبت به شاخص بزرگی تغییرات قرار دارد (خطای هشدار اشتباه ۴/۰۳٪ در مقابل ۱۷/۲۵٪). با تفسیر بصری تصاویر دوزمانه مورد استفاده (شکل ۵)، مشخص می‌شود که خطای FA شاخص بزرگی تغییرات مربوط به مناطقی است که در آن، سطح زمین بدون تغییر در ماهیت، تنها یک شیفت قابل توجه در درجات روشنایی تمام باندها پیدا کرده است. در کل پارامترهای ارزیابی صحت مندرج در جدول (۱)، نشان می‌دهد که هیچ‌یک از این دو شاخص پتانسیل کاملی برای تشخیص نظارت‌نشده تغییرات نداشته و شاخص جهت تغییرات در وضعیت بهتری نسبت به شاخص بزرگی تغییرات قرار دارد (خطای کلی ۳۱/۹۵٪ در نقشه تغییرات حاصل از

^۱ False Alarm^۲ Missed Error^۳ Total Error

شامل؛ الف) هشدار اشتباه (FA)، ب) خطای از دست‌رفته (ME) و پ) خطای کلی (TE) محاسبه شد. نتایج ارزیابی صحت از تشخیص تغییرات مجموعه داده دوم در جدول (۲) ارائه شده است.

جدول ۲- ارزیابی صحت شاخص پیشنهادی در تشخیص نظارت‌نشده تغییرات در مجموعه داده دوم. ارائه پارامترهای ارزیابی صحت شامل؛ FA، ME و TE برای شاخص بزرگی تغییرات، شاخص جهت تغییرات، شاخص SAMZID_{tan} و شاخص تغییرات تلفیقی پیشنهادی.

شاخص	شاخص	شاخص	شاخص	
بزرگی تغییرات	جهت تغییرات	SAMZID _{tan} [۲۴]	شاخص تغییرات پیشنهادی	
۰/۳۹	۱/۹۶	۰/۱۱	۳/۱۰	%FA
۳۶/۸۱	۵۹/۲۵	۶۱/۳۸	۲۳/۱۳	%ME
۱۸/۲۰	۲۹/۴۹	۳۰/۱۲	۱۲/۸۹	%TE

با بررسی پارامترهای ارزیابی صحت ارائه شده در جدول (۲) مشخص می‌شود که؛ مشابه نتایج حاصل از مجموعه داده اول، خطای از دست‌رفته (ME) برای هر دو شاخص بزرگی و جهت تغییرات مقدار بسیار قابل توجهی بوده و برای شاخص جهت تغییرات بیشتر از شاخص بزرگی تغییرات است (۳۶/۸۱٪ برای شاخص بزرگی تغییرات و ۵۹/۲۵٪ برای شاخص جهت تغییرات). باید توجه داشت که محل وقوع خطاهای ME در این دو شاخص، متناظر نیست که علت آن عملکرد متفاوت این دو شاخص در شناسایی انواع مختلفی تغییرات سطح زمین است. با تفسیر بصری تصاویر چندزمانه (شکل ۶) و نقشه‌های تغییرات باینری (شکل ۱۲) و البته بررسی منحنی طیفی دوزمانه در این مناطق، مشخص می‌گردد که خطای ME برای شاخص بزرگی تغییرات مربوط به تغییرات از نوع حالت چهارم بوده است که متناظر با تغییرات پوشش گیاهی به اراضی آبی (آبگیری سد در محل پوشش گیاهی) در شمال منطقه مورد مطالعه است و برای شاخص جهت تغییرات مربوط به حالت دوم می‌باشد که متناظر با تبدیل اراضی بایر روشن (تسطیح شده) به منطقه شهری در مرکز منطقه مورد مطالعه است. این مسئله از نظر تئوری نیز با استدلال‌های ارائه شده در شکل (۳) مطابقت دارد. همچنین با بررسی معیارهای ارزیابی کمی ارائه شده در جدول (۲) مشخص می‌شود که شاخص بزرگی تغییرات از نظر خطای FA در وضعیت مشابه با شاخص جهت تغییرات قرار داشته و مقدار ناچیزی است (خطای هشدار اشتباه ۰/۳۹٪ و ۱/۹۶٪ به ترتیب

بزرگی تغییرات و ۱۶/۲۸٪ خطای کلی تشخیص تغییرات با شاخص جهت تغییرات). این در حالی است که شاخص تغییرات تلفیقی با تلفیق وزن‌دار این دو شاخص، صحت بالاتری در تشخیص نظارت‌نشده تغییرات را فراهم نموده است. با تلفیق شاخص‌های بزرگی و جهت تغییرات با وزن‌های مشارکت تعیین‌شده، خطای FA در مقایسه با شاخص بزرگی تغییرات ۱۴/۴۷٪ کاهش و در مقایسه با شاخص جهت تغییرات حدود ۱/۲۵٪ کاهش پیدا کرده است. همچنین خطای ME به میزان قابل توجهی نسبت به هر دو شاخص کاهش پیدا کرده است (۲۵/۳۸٪ کاهش نسبت به شاخص بزرگی تغییرات و ۹/۵۰٪ کاهش نسبت به شاخص جهت تغییرات). در یک دید جامع، شاخص تغییرات تلفیقی سبب شده است تا خطای کلی حدود ۲۱/۷۸٪ و ۶/۱۱٪ به ترتیب نسبت به شاخص‌های بزرگی و جهت تغییرات کاهش یابد. مقایسه بصری نقشه‌های تغییرات باینری حاصل از شاخص‌های بزرگی و جهت تغییرات (شکل ۸) و نقشه تغییرات باینری حاصل از شاخص پیشنهادی (شکل ۱۰)، مؤید کارآئی بالای شاخص پیشنهادی و البته بیانگر ضرورت و اهمیت تلفیق شاخص‌های بزرگی و جهت تغییرات جهت حصول صحت بالاتر در تشخیص نظارت‌نشده تغییرات است. همانطور که در جدول (۱) مشخص است، ضعیف‌ترین نتایج تشخیص تغییرات در این مجموعه داده، مربوط به شاخص SAMZID_{tan} می‌باشد (خطای کلی ۴۴/۲۳٪). علت این مسئله؛ هم مربوط به عملکرد نامناسب اپراتور ضرب بکار رفته در این شاخص است که سبب تقویت بیش از حد تغییرات شدید و تضعیف بیش از حد تغییرات ضعیف در تصاویر شده و هم به دلیل متفاوت بودن ذات تصاویر چندطیفی در مقایسه با تصاویر فراطیفی است. چرا که شاخص SAMZID_{tan} برای تشخیص تغییرات در تصاویر فراطیفی توسعه داده شده و بکارگیری آن در تصاویر چندطیفی، مغایر با اهداف طراحان آن شاخص بوده است [۲۴].

۳-۳-۲- ارزیابی شاخص پیشنهادی در مجموعه داده دوم

در مجموعه دادم دوم، نقشه تغییرات باینری مرجع شامل ۲۰۰۰ پیکسل ارزیابی از مناطق تغییریافته و ۲۰۰۰ پیکسل ارزیابی از مناطق تغییرنیافته می‌باشد. با مقایسه نقشه تغییرات باینری حاصل از تکنیک‌های مختلف با نقشه تغییرات باینری مرجع، پارامترهای ارزیابی صحت

برای شاخص‌های بزرگی و جهت تغییرات). در کل پارامترهای ارزیابی صحت مندرج در جدول (۲)، نشان می‌دهد که هیچ‌کدام از این دو شاخص پتانسیل کاملی برای تشخیص نظارت‌نشده تغییرات نداشته و در این مجموعه داده، برخلاف مجموعه داده اول، شاخص بزرگی تغییرات در وضعیت بهتری نسبت به شاخص جهت تغییرات قرار دارد. در مقایسه با دو شاخص بزرگی و جهت تغییرات؛ شاخص تغییرات تلفیقی با تلفیق وزن‌دار این دو شاخص، صحت بالاتری در تشخیص نظارت‌نشده تغییرات را به همراه داشته است. با تلفیق شاخص‌های بزرگی و جهت تغییرات با وزن‌های مشارکت تعیین‌شده، کاهش قابل توجهی در خطای ME مشاهده می‌شود. طوری که خطای ME در مقایسه با شاخص‌های بزرگی و جهت تغییرات به ترتیب حدود $13/68\%$ و $36/12\%$ کاهش یافته است. هرچند در شاخص تلفیقی، خطای FA در مقایسه با شاخص بزرگی تغییرات و جهت تغییرات افزایش بسیار اندکی نیز داشته است ($2/71\%$ افزایش نسبت به شاخص بزرگی تغییرات و $1/14\%$ افزایش نسبت به شاخص جهت تغییرات). در مجموع، شاخص تغییرات تلفیقی سبب شده است تا خطای کلی (TE) حدود $5/31\%$ و $16/60\%$ به ترتیب نسبت به شاخص‌های بزرگی و جهت تغییرات کاهش یابد. مقایسه بصری نقشه‌های تغییرات باینری حاصل از شاخص‌های بزرگی و جهت تغییرات (شکل ۱۲) و نقشه تغییرات باینری حاصل از شاخص پیشنهادی (شکل ۱۴)، مؤید کارایی بالای شاخص پیشنهادی و البته بیانگر ضرورت و اهمیت تلفیق شاخص‌های بزرگی و جهت تغییرات جهت حصول صحت بالا در تشخیص نظارت‌نشده تغییرات است. مشابه نتایج حاصل از مجموعه داده اول، ضعیف‌ترین نتایج تشخیص تغییرات در این مجموعه داده، مربوط به شاخص $SAMZID_{tan}$ می‌باشد که البته بسیار نزدیک به نتایجی است که از شاخص جهت تغییرات حاصل شده است (خطای کلی $30/12\%$ برای شاخص $SAMZID_{tan}$ و خطای کلی $29/49\%$ برای شاخص جهت تغییرات).

۴- نتیجه‌گیری

در تشخیص نظارت‌نشده تغییرات با تصاویر سنجنش از دور چندزمانه، شاخص‌های تغییرات که با متریک‌های مختلفی تولید می‌شوند، نقش بسیار مهمی در تشخیص صحیح

تغییرات دارند. در تصاویر چندزمانه چندطیفی می‌توان؛ شاخص بزرگی تغییرات را با متریک‌های مختلف فاصله از جمله فاصله اقلیدسی و همچنین شاخص جهت تغییرات را با متریک‌های مختلف شباهت از جمله نگارنده زاویه طیفی (SAM) محاسبه کرد. در حالت کلی یک شاخص مشخصی که بهتر از سایر شاخص‌ها باشد، وجود نداشته و هر کدام از این شاخص‌ها، پتانسیل مخصوص و محدودی در تشخیص انواع مختلف تغییرات دارند. دلیل این مسئله، ماهیت متفاوت این شاخص‌هاست. عمده‌تاً در تشخیص نظارت‌نشده تغییرات از شاخص بزرگی تغییرات استفاده شده و شاخص جهت تغییرات نادیده گرفته می‌شود. در حالی که این دو شاخص مکمل یکدیگر بوده و تلفیق آنها می‌تواند منجر به نتایج بهتری در تشخیص صحیح تغییرات شود.

در مقاله حاضر به منظور بهره‌گیری از پتانسیل متفاوت و محدود شاخص‌های بزرگی و جهت تغییرات، یک شاخص جدید با تلفیق وزن‌دار شاخص‌های نامبرده پیشنهاد شده و مورد ارزیابی قرار گرفت. برای ارزیابی روش پیشنهادی، از دو مجموعه داده مختلف که مربوط به دو منطقه با خصوصیات متفاوتی هستند، استفاده شد. در مجموعه داده اول با بکارگیری یک جفت تصویر دوزمانه چندطیفی، تغییرات پوشش اراضی (LC) ناحیه جنوبی دریاچه ارومیه در بازه زمانی ۱۱ ساله (بین سالهای ۱۹۹۹ و ۲۰۱۰) و در مجموعه داده دوم با بکارگیری یک جفت تصویر دوزمانه چندطیفی دیگر، تغییرات پوششی و کاربری اراضی (LU/LC) منطقه شهری مراغه (استان آذربایجان شرقی) و حاشیه آن در بازه زمانی ۹ ساله (بین سالهای ۱۹۸۹ و ۱۹۹۸) مورد بررسی قرار گرفت.

نتایج پیاده‌سازی نشان داد که هر یک از شاخص‌های بزرگی و جهت تغییرات با ماهیت‌های متفاوت خود، قابلیت محدودی در تشخیص انواع مختلف تغییرات دارند. در چهار حالت ممکن و متصور برای تغییرات منحنی طیفی در طول زمان، هر کدام از شاخص‌های بزرگی و جهت تغییرات با عملکردی متفاوت در یکی از آن چهار حالت ممکن، موفق به تشخیص صحیح تغییرات نشده و گاه‌گاه خطای هشدار اشتباه (FA) نیز داشته‌اند. در حالتی که منحنی طیفی بدون تغییر شکل با افزایش درجه‌ت خاکستری در تصاویر چندزمانه روبرو شود (حالت دوم)، شاخص بزرگی تغییرات با محاسبه متریک فاصله اقلیدسی موفق به کشف صحیح آن تغییرات شده ولی شاخص جهت تغییرات عملکرد ضعیفی

دارد. در حالت دیگری که در آن منحنی با تغییر شکل جزئی همراه بوده و منحنی‌های طیفی فاصله زیادی از یکدیگر نداشته است (حالت چهارم)، شاخص جهت تغییرات با محاسبه متریک شباهت SAM، موفق به کشف صحیح آن تغییرات شده ولی شاخص بزرگی تغییرات با محاسبه متریک فاصله نتوانسته است آن تغییرات را تشخیص دهد. به همین دلیل در مجموعه داده اول، که تغییرات از نوع چهارم نسبت به تغییرات از نوع دوم بسیار بیشتر است، شاخص جهت تغییرات عملکرد بهتری نسبت به شاخص بزرگی تغییرات داشته و برعکس؛ در مجموعه داده دوم که تغییرات از نوع دوم، نسبت به تغییرات از نوع چهارم بیشتر است، شاخص بزرگی تغییرات عملکرد بهتری نسبت به شاخص جهت تغییرات داشته است. این در حالی است که شاخص تغییرات تلفیقی پیشنهاد شده در این تحقیق، با بهره‌مندی از پتانسیل متفاوت این دو شاخص، در تمامی موارد در هر دو مجموعه داده، موفق به کشف صحیح تغییرات سطح زمین شده و صحت بالاتری نسبت به هر یک از این دو شاخص داشته است. نتایج ارزیابی کمی نشان داد که تلفیق شاخص‌های بزرگی و جهت تغییرات به روش پیشنهادی در هر دو مجموعه داده بکار رفته، سبب کاهش قابل توجه خطای کلی (TE) تشخیص تغییرات شده است. در مجموعه داده اول، خطای کلی تشخیص تغییرات با شاخص تلفیقی برابر ۱۰/۱۷ درصد می‌باشد که در مقایسه با شاخص‌های بزرگی و جهت

تغییرات به ترتیب ۲۱/۷۸ درصد و ۶/۱۱ درصد کاهش یافته است. در مجموعه داده دوم نیز؛ تلفیق شاخص‌های بزرگی و جهت تغییرات سبب بهبود صحت تشخیص تغییرات شده است. طوریکه در این مجموعه داده، خطای کلی (TE) تشخیص تغییرات با شاخص تلفیقی حدود ۱۲/۸۹ درصد می‌باشد که در مقایسه با شاخص‌های بزرگی و جهت تغییرات به ترتیب کاهش ۵/۳۱ درصدی و ۱۶/۶۰ درصدی در خطای کلی را نشان می‌دهد. در هر دو مجموعه داده، ضعیف‌ترین نتایج از شاخص SAMZID_{tan} حاصل شده است که علت این مسئله؛ هم مربوط به عملکرد نامناسب اپراتور ضرب بکار رفته در این شاخص است که سبب تقویت بیش از حد تغییرات شدید و تضعیف بیش از حد تغییرات ضعیف در تصاویر شده و هم به دلیل متفاوت بودن ذات تصاویر چندطیفی در مقایسه با تصاویر فراطیفی است. البته لازم به ذکر است که در مجموعه داده دوم، شاخص SAMZID_{tan} نتایج بسیار نزدیکی با شاخص جهت تغییرات داشته است (خطای کلی ۳۰/۱۲٪ برای شاخص SAMZID_{tan} و خطای کلی ۲۹/۴۹٪ برای شاخص جهت تغییرات)

روش پیشنهادی در این تحقیق، تلفیق شاخص‌های بزرگی و جهت تغییرات در سطح ویژگی می‌باشد. در تحقیقات آتی سعی خواهد شد تا تلفیق این شاخص‌ها در سطوح دیگری نیز مورد بررسی قرار گیرد.

مراجع

- [1] A. B. Brink and H. D. Eva, "Monitoring 25 years of land cover change dynamics in Africa: A sample based remote sensing approach," *Applied Geography*, vol. 29, pp. 501-512, 2009.
- [2] L. Muñoz-Villers and J. López-Blanco, "Land use/cover changes using Landsat TM/ETM images in a tropical and biodiverse mountainous area of central-eastern Mexico," *International Journal of Remote Sensing*, vol. 29, pp. 71-93, 2008.
- [3] V. Sadeghi, F. F. Ahmadi, and H. Ebadi, "Design and implementation of an expert system for updating thematic maps using satellite imagery (case study: changes of Lake Urmia)," *Arabian Journal of Geosciences*, vol. 9, pp. 1-17, 2016.
- [4] P. Serra, X. Pons, and D. Sauri, "Land-cover and land-use change in a Mediterranean landscape: a spatial analysis of driving forces integrating biophysical and human factors," *Applied Geography*, vol. 28, pp. 189-209, 2008.
- [5] M. L. Imhoff, P. Zhang, R. E. Wolfe, and L. Bounoua, "Remote sensing of the urban heat island effect across biomes in the continental USA," *Remote Sensing of Environment*, vol. 114, pp. 504-513, 2010.
- [6] H. Taubenböck, M. Wegmann, A. Roth, M. Schmid, and S. Decha, "Urbanization in India - Spatiotemporal analysis using remote sensing data," *Computers, Environment and Urban Systems*, vol. 33, pp. 179-188, 2009.
- [7] M. Xie and M. Fu, "The temporal dynamics of urban heat islands derived from thermal remote sensing data by local indicator of spatial association in Shenzhen, China," in *International Conference on Photonics and Image in Agricultural Engineering (PIAGENG 2010)*, 2011, pp. 775217-775217-7.

- [8] R. Pullanagari, I. Yule, W. King, D. Dalley, and R. Dynes, "The use of optical sensors to estimate pasture quality," *International Journal on Smart Sensing and Intelligent Systems*, vol. 4, pp. 125-137, 2011.
- [9] M. A. Wulder, S. M. Ortlepp, J. C. White, and S. Maxwell, "Evaluation of Landsat-7 SLC-off image products for forest change detection," *Canadian Journal of Remote Sensing*, vol. 34, pp. 93-99, 2008.
- [10] D. Amozadeh and M. Kanani, "The Effect of Caspian Sea Water Fluctuations on Miankaleh Habitat Ecological Conditions Using Remote Sensing and Geographic Information System," *World Applied Sciences Journal*, vol. 3, pp. 34-38, 2008.
- [11] R. Gens, "Remote sensing of coastlines: detection ,extraction and monitoring," *International Journal of Remote Sensing*, vol. 31, pp. 1819-1836, 2010
- [12] D. M. Le Vine, G. S. Lagerloef, and S. E. Torrusio, "Aquarius and remote sensing of sea surface salinity from space," *Proceedings of the IEEE*, vol. 9, pp. 688-703, 2010
- [13] G. Moser and S. B. Serpico, "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*, vol. 47, pp. 909-921, 2009.
- [14] R. Garland, H. Yang, O. Schmid, D. Rose, A. Nowak, P. Achtert, et al., "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*, vol. 8, pp. 5161-5186, 2008.
- [15] R. V. Martin, "Satellite remote sensing of surface air quality," *Atmospheric Environment*, vol. 42, pp. 7823-7843, 2008.
- [16] M. Huss, R. Stockli, G. Kappenberger, and H. Blatter, "Temporal and spatial changes of Laika Glacier, Canadian Arctic, since 1959, inferred from satellite remote sensing and mass-balance modelling," *Journal of Glaciology*, vol. 54, pp. 857-866, 2008.
- [17] M. Hussain, Chen, D., Cheng, A., Wei, H., Stanley, D, "Change detection from remotely sensed images: From pixel-based to object-based approaches," *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, vol. 80, pp. 91-106, 2013.
- [18] T. Celik, "Change detection in satellite images using a genetic algorithm approach," *Geoscience and Remote Sensing Letters, IEEE*, vol. 7, pp. 386-390, 2010.
- [19] O. A. Carvalho Júnior, R. F. Guimarães, A. R. Gillespie, N. C. Silva, and R. A. Gomes, "A new approach to change vector analysis using distance and similarity measures ", *Remote Sensing*, vol. 3, pp. 2473-2493, 2011.
- [20] A. P. Tewkesbury, A. J. Comber, N. J. Tate, A. Lamb, and P. F. Fisher, "A critical synthesis of remotely sensed optical image change detection techniques," *Remote Sensing of Environment*, vol. 160, pp. 1-1, 2015.
- [21] F. Bovolo and L. Bruzzone, "A theoretical framework for unsupervised change detection based on change vector analysis in the polar domain," *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, vol. 45, pp. 218-236, 2007.
- [22] D. Renza, E. Martinez, and I. Molina, "Unsupervised change detection in a particular vegetation land cover type using spectral angle mapper," *Advances in Space Research*, vol. 59, pp. 2019-2031, 2017.
- [23] T. Warner, "Hyperspherical direction cosine change vector analysis ", *International Journal of Remote Sensing*, vol. 26, pp. 1201-1215, 2005.
- [24] S. Seydi and M. Hasanlou, "Fusion of Similarity and Distance based Methods for Landcover Change Detection using Hyperpsectral Imagey," *Journal of Geomatics Science and Technology*, vol. 7, pp. 111-126, 2017.
- [25] N. Otsu, "A threshold selection method from gray-level histograms," *Automatica*, vol. 11, pp. 23-27, 1975.
- [26] V. Sadeghi, F. F. Ahmadi, and H. Ebadi, "A new automatic regression-based approach for relative radiometric normalization of multitemporal satellite imagery," *Computational and Applied Mathematics*, pp. 1-18, 2015.
- [27] X. Xu, J. Li, C. Wu, and A. Plaza, "Regional clustering-based spatial preprocessing for hyperspectral unmixing," *Remote Sensing of Environment*, vol. 204, pp. 333-346, 2018.
- [28] X. L. B. Xie, G.A, "A validity measure for fuzzy clustering," *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, vol. 13, pp. 841-847, 1991.
- [29] M. Tourian, O. Elmi, Q. Chen, B. Devaraju, S. Roohi, and N. Sneeuw, "A spaceborne multisensor approach to monitor the desiccation of Lake Urmia in Iran," *Remote Sensing of Environment*, vol. 156, pp. 349-360, 2015.