

تشخیص بدون نظارت تغییرات آب، خاک و پوشش گیاهی با تحلیل تصاویر سنجنش از دور اپتیک چندسنسوری مبتنی بر تبدیل تسلدکپ

عطیه قربانی^۱، وحید صادقی^{۲*}

۱. کارشناس ارشد سنجنش از دور، دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه تبریز

۲. استادیار، گروه مهندسی نقشه‌برداری، دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه تبریز

(تاریخ دریافت ۱۴۰۰/۰۵/۱۸؛ تاریخ تصویب ۱۴۰۰/۰۹/۰۷)

چکیده

طی دو قرن اخیر، مداخله گسترده انسان در طبیعت منجر به بروز تغییرات قابل توجهی در منابع آب، خاک و پوشش گیاهی سطح زمین شده است. هرچند تحلیل تصاویر سنجنش از دور چندزمانه پایش مداوم این تغییرات را فراهم کرده است، ولی یکی از چالش‌های مهم در این حوزه، شیوه استفاده از تصاویر چندسنسوری است. هدف پژوهش حاضر، ارائه روشی برای شناسایی تغییرات آب، خاک و پوشش گیاهی سطح زمین با تصاویر سنجنش از دور چندسنسوری است. در این راستا، مؤلفه‌های بیوفیزیکی جدیدی برای سنجنده Sentinel2B تعریف شده و یک روش نوین بدون نظارت برای تشخیص تغییرات باینری و چندگانه توسعه داده شده است. برای ارزیابی روش پیشنهادی از تصاویر سنجنده‌های Landsat8 OLI و Sentinel2B حاشیه جنوب غربی دریای ارومیه استفاده شد. در روش پیشنهادی؛ ابتدا تعمیم‌پذیری پارامترهای تبدیل Tasseled Cap (TC) بررسی شده و تبدیل TC جدیدی برای سنجنده Sentinel2B برآورد شد. بعد از اعمال TC، تصاویر از فضای چندطیفی به فضای بیوفیزیکی انتقال یافته و با روش پیرایش تکراری چندمتغیره پیشنهادی، نقشه باینری تغییرات منطقه تولید شد. در ادامه با استفاده از تکنیک خوشه‌بندی FCM نمونه‌های تغییر یافته به تعداد مشخصی خوشه که تعداد آنها با معیار WSJI تعیین می‌شود و یکی از نوآوری‌های پژوهش حاضر است، تفکیک شدند. معیارهای صحت کلی، خطای از دست‌رفته و هشدار اشتباه در روش پیشنهادی به ترتیب برابر ۹۲/۰۶، ۹/۶۲ و ۶/۲۷ است که بیانگر کارایی زیاد روش پیشنهادی است. روش ارائه شده در این مقاله می‌تواند به عنوان یک تکنیک بدون نظارت، دقیق و قابل اعتماد برای تشخیص تغییرات آب، خاک و پوشش گیاهی سطح زمین مورد استفاده قرار گیرد.

کلیدواژگان: شناسایی بدون نظارت تغییرات، تصاویر چندسنسوری، تبدیل Tasseled Cap، خوشه‌بندی FCM، معیار WSJI.

مقدمه

در عصر حاضر، اطلاعات مکانی چنان اهمیتی دارد که ادامه حیات نوع بشر در این کره خاکی، بدون دسترسی به اطلاعات مکانی جامع، صحیح و بهنگام بسیار سخت و گاه غیرممکن به نظر می‌رسد. داده‌های مکانی از آن جهت بسیار مهم و حیاتی هستند که مبنای تصمیم‌گیری و برنامه‌ریزی‌های مدیران و کارشناسان در حوزه‌های مختلف نظامی و غیرنظامی هستند. از طرفی، در دو قرن اخیر، مخاطرات طبیعی و مداخله گسترده انسان در طبیعت منجر به بروز تغییرات قابل توجه و گاه جبران ناپذیری در محیط زیست شده است. این تغییرات بیشتر در جهت نابودی و یا تخریب منابع آب، خاک و پوشش گیاهی بوده است که به دلیل اهمیت ویژه این منابع، باید تغییرات آنها به طور مداوم و دقیق مورد پایش قرار گیرد. به دلیل پویا بودن این اطلاعات مکانی، باید بهنگام رسانی آنها به طور مداوم مد نظر قرار گیرد تا اطلاعات مکانی به مرور زمان ارزش و اعتبار خود را از دست ندهد. به همین دلیل، یکی از مسائل مهمی که نظر متخصصان حوزه ژئوماتیک و علوم زمین را به خود معطوف کرده است، بررسی و شناسایی تغییرات عوارض طی زمان و بهنگام رسانی پایگاه اطلاعات مکانی است. شناسایی تغییرات کاربردهای فراوانی دارد که از آن جمله می‌توان به شناسایی تغییرات کاربری و پوششی اراضی و بهنگام‌رسانی نقشه‌های موضوعی، پایش گسترش شهرها، پایش کیفیت و کمیت پوشش گیاهی، پایش خطوط ساحلی، پایش کیفیت سطح آب دریاها، پایش آلودگی هوا، پایش یخچال‌های طبیعی و غیره اشاره کرد [۱-۳].

فرایند شناسایی تغییرات طی زمان همواره با چالش‌های مختلفی نظیر تقابل تکنیک‌های پیکسل‌مبنا و شیء‌مبنا، تلفیق و مدیریت داده‌های سنجنش‌ازدوری در شناسایی تغییرات و همچنین، شناسایی تغییرات با تصاویر چندسنسوری مواجه بوده است. هدف این پژوهش، بررسی مسئله شناسایی بدون نظارت تغییرات با استفاده از تصاویر اپتیک چندسنسوری است. تصاویری که از سنجنده‌های مختلف اخذ می‌شوند، اغلب خصوصیات طیفی، مکانی، رادیومتریکی و هندسی متفاوتی دارند که از چالش‌های اصلی شناسایی تغییرات با تصاویر چندسنسوری است، به طوری که معمولاً شناسایی تغییرات بدون توجه به این موارد، به نتایج ضعیفی منجر می‌شود. جهت گیری تحقیق

حاضر در راستای بررسی قابلیت‌ها و محدودیت‌ها و مسائل مطرح در شناسایی بدون نظارت تغییرات در تصاویر اپتیک چندسنسوری با خصوصیات طیفی، مکانی و رادیومتریکی متفاوت است. در پژوهش حاضر، یک روش نوین، کارآمد و بدون نظارت برای تشخیص تغییرات در تصاویر سنجنش از دور چندسنسوری پیشنهاد شده و به طور کمی مورد ارزیابی قرار گرفته است. در ادامه بعد از مروری بر پیشینه تحقیق، روش پیشنهادی تشریح شده و سپس جزئیات پیاده‌سازی و نتایج حاصل از آن ارائه می‌شود.

پیشینه تحقیق

موضوع شناسایی تغییرات با استفاده از تصاویر چندسنسوری از مباحث نوپا در بحث شناسایی تغییرات بوده و تحقیقات محدودی در این حوزه صورت گرفته است. با این وجود، سعی شده است با توجه به چالش‌های موجود در این زمینه، پژوهش‌های انجام‌گرفته در این حوزه مورد بررسی قرار گیرند. بررسی تحقیقات پیشین به دو بخش تقسیم می‌شود: الف) تحقیقات صورت‌گرفته در حوزه شناسایی تغییرات مبتنی بر تصاویر اپتیک چندسنسوری و ب) تحقیقات انجام‌گرفته در زمینه استخراج ویژگی‌های بیوفیزیکی از تصاویر اپتیک.

در حوزه روش‌های ارائه‌شده برای شناسایی تغییرات در تصاویر اپتیک چندسنسوری، Cifuentes و همکاران (۲۰۰۸)، روشی مبتنی بر مقایسه پس از طبقه‌بندی برای شناسایی تغییرات بین دو تصویر چندطیفی اخذشده با دو سنسور متفاوت SPOT-5 و FORMOSAT-2 از شهر مادرید اسپانیا معرفی کردند. هدف این مقاله، مطالعه ترکیب مناسب باندها برای تفسیر بصری و آنالیز با دو تصویر ماهواره‌ای با توان تفکیک زیاد بود [۴]. Deng و همکاران (۲۰۰۹) با ترکیب تکنیک آنالیز مؤلفه اصلی (PCA) و طبقه‌بندی با نظارت، پویایی تغییرات کاربری اراضی را با استفاده از تصویر پانکروماتیک Landsat-7 (ETM+) و تصویر چندطیفی SPOT5 (XS) در شهر هانگژوی چین شناسایی و آنالیز کردند [۵]. Correa و همکاران (۲۰۱۴) پژوهشی را با هدف همگن‌سازی داده‌های چندسنسوری و توسعه رویکردی برای تشخیص تغییرات در تصاویر اپتیک با توان تفکیک مکانی بالای چندزمانه چندسنسوری انجام دادند. در این پژوهش از

پوشش‌های گیاهی سطح زمین طراحی شده بود [۱۱]، ولی به سبب قابلیت زیاد مؤلفه‌های مستخرج از این تبدیل، در کاربردهای بسیار متنوع‌تری به منظور بررسی پوشش‌های مختلف سطح زمین (شامل خاک و آب) مورد استفاده قرار گرفت [۱۲-۱۵]. نتایج حاصل از این تحقیقات مؤید این مسئله است که تبدیل TC ضمن طبقه‌بندی و تشخیص پوشش‌های گیاهی، می‌تواند در تشخیص سایر پوشش‌های سطح زمین از جمله آب و خاک نیز مورد استفاده قرار گیرد [۱۲-۱۵]. بنابراین، به سبب قابلیت زیاد مؤلفه‌های مستخرج از تبدیل TC در تشخیص پوشش‌های مختلف سطح زمین، در مقاله حاضر از این تبدیل برای تشخیص تغییرات آب و خاک و پوشش گیاهی استفاده شده است.

بررسی تحقیقات پیشین نشان می‌دهد مطالعات محدودی در زمینه به‌کارگیری شاخص‌های بیوفیزیکی نظیر پارامترهای تبدیل Cap Tasseled [۱۱ و ۱۶]. در شناسایی تغییرات انجام‌شده و همچنین، در اغلب تحقیقات صورت گرفته، تعمیم‌پذیری پارامترهای بیوفیزیکی برای مناطق جغرافیایی مختلف بررسی نشده است. از سوی دیگر، بررسی‌ها نشان می‌دهد پژوهش‌های انجام‌شده در حوزه شناسایی بدون نظارت تغییرات تصاویر چندسنسوری با روش مقایسه مستقیم مقادیر طیفی، بسیار محدودتر از سایر روش‌ها بوده و از این نظر باید مورد بررسی بیشتر قرار گیرند. در پژوهش حاضر، نوعی روش نوین، کارآمد و بدون نظارت برای تشخیص تغییرات در تصاویر سنجش از دور چندسنسوری پیشنهاد می‌شود و به طور کمی مورد ارزیابی قرار می‌گیرد.

روش تحقیق

منطقه مطالعه شده و داده‌های استفاده شده

دریاچه ارومیه از بزرگ‌ترین دریاچه‌های فوق‌شور^۲ دائمی دنیا محسوب می‌شود. این دریاچه بین استان‌های آذربایجان شرقی و آذربایجان غربی در ارتفاع ۱۲۵۰ متری از سطح دریا، واقع شده است. میزان شوری آب دریاچه بین ۲۱۷ تا بیش از ۳۰۰ گرم بر لیتر متغیر است که این میزان غلظت، تقریباً ۸ برابر مقدار متوسط آب دریاهاست. عمق متوسط و بیشینه دریاچه به ترتیب، ۶ و ۱۶ متر است.

مجموعه داده‌های متشکل از تصاویر QuickBird و WorldView-2 به ترتیب در سال‌های ۲۰۰۶ و ۲۰۱۰ روی ناحیه‌ای واقع در منطقه Trentino ایتالیا استفاده شد [۶]. Liu و همکاران (۲۰۱۶) یک چارچوب جدید بدون نظارت برای شناسایی تغییرات بین دو تصویر سنجش‌از‌دور با توان تفکیک بالا ارائه دادند. این روش با استفاده از توصیف‌کننده‌های محلی، نیازی به هم‌مرجع‌سازی تصویر ندارد و قادر است تغییرات را حتی با تصاویر اخذشده از زوایای دید مختلف و با سنسورهای مختلف شناسایی کند. در این پژوهش از SIFT به عنوان توصیف‌کننده محلی استفاده شده است. از آنجا که این توصیف‌کننده‌ها با ساختارهای هندسی سازگار هستند، این روش به طور ویژه با صحنه‌های شهری با توان تفکیک بالا سازگار است [۷].

در حوزه بررسی و توسعه ویژگی‌های بیوفیزیکی از سنجنده‌های اپتیک، تحقیقاتی هرچند محدود ولی ارزنده صورت گرفته است که در ادامه به چند مورد از مهم‌ترین آنها اشاره می‌شود. در تحقیقی، Ali Baig و همکاران (۲۰۱۴) پارامترهای تبدیل TC^۱ را برای سنجنده Landsat8 OLI که در سال ۲۰۱۳ شروع به جمع‌آوری اطلاعات از سطح زمین کرده است، محاسبه کرده‌اند. در این تحقیق نه تنها از مناطقی که توسط محققان پیشین مورد استفاده قرار گرفته بود استفاده شد، بلکه مناطق جدیدی نیز برای بررسی تبدیل TC در طیف گسترده‌ای از انواع پوشش‌های زمینی به کار گرفته شد [۸]. Nedkov (۲۰۱۷)، یک مدل برای تبدیل متعامد TC برای تصاویر Sentinel2 توسعه داده است که در آن ماتریس واحد برای تعامد تصاویر سنجنده MSI از Sentinel2 ساخته می‌شود.

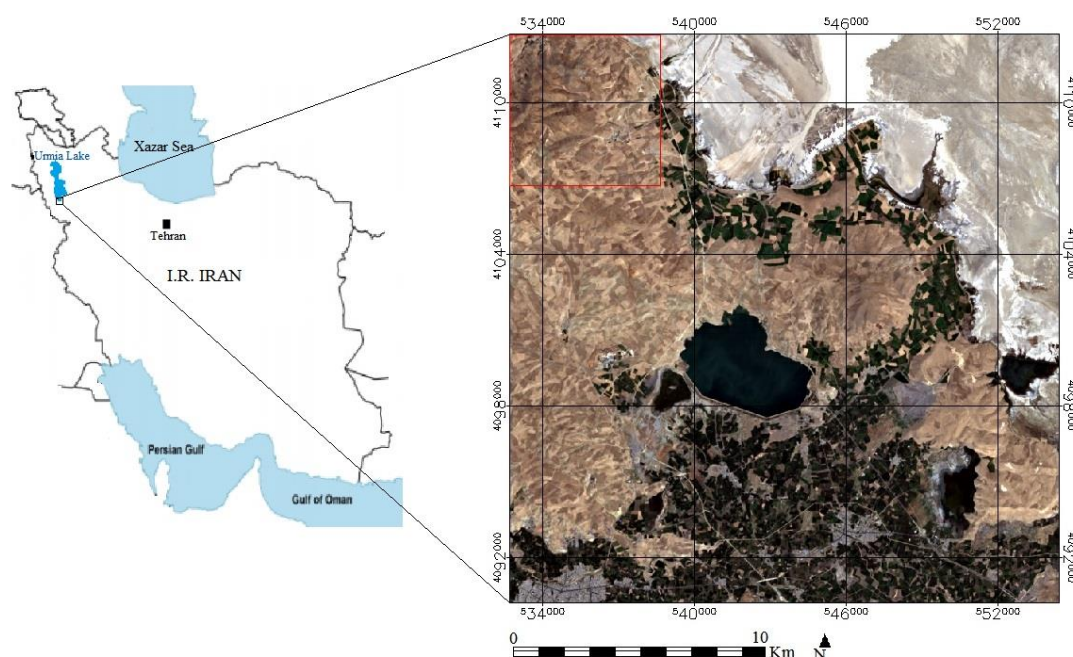
آنالیز نتایج به دست آمده نشان می‌دهد اعمال تبدیل TC تصاویر Sentinel2 امکان طبقه‌بندی با دقت بیشتر و پایش تغییرات وضعیت فعلی خاک و پوشش گیاهی اجزای زمین را فراهم می‌کند [۹]. Huang و همکاران (۲۰۰۲) طی تحقیقی پارامترهای تبدیل TC را برای سنجنده ETM+ ماهواره Landsat7 توسعه داده‌اند. این تبدیل‌ها برای استفاده از تصاویر سنجش‌از‌دور زمانی که تصحیح اتمسفری آنها امکان‌پذیر نیست، راهکار مناسبی است [۱۰]. تبدیل TC در کاربرد اولیه خود به هدف بررسی

2. Hyper saline

1. Tasseled Cap

۱/۲۷" - ۴۵° ۳۶' ۴۵/۴۴" شمالی و ۳۶° ۵۷' ۲۷/۲۴" شرقی) به دلیل داشتن انواع پوشش زمین شامل سطوح آبی (دریاچه، سد طبیعی و مصنوعی)، زمین‌های کشاورزی، اراضی بایر و شورزار، مناطق مسکونی و همچنین، وقوع تغییرات متنوع و متعدد طی سال‌های اخیر، منطقه‌ای مناسب برای بررسی تغییرات آب، خاک و پوشش گیاهی منطقه (پوشش و کاربری اراضی) است. موقعیت منطقه مطالعه‌شده در شکل ۱ ارائه شده است.

دریاچه ارومیه توسط کنوانسیون رامسر در سال ۱۳۴۹ به عنوان تالابی با اهمیت بین‌المللی اعلام شده و به دلیل اهمیت اکولوژیکی، به عنوان پارک ملی و ذخیره گاه بین‌المللی زیست کره تعریف شده است. در سال‌های اخیر، دریاچه ارومیه دستخوش تغییرات محیطی آسفاکی شده که بیشترین تغییرات در بخش جنوبی آن به دلیل کم بودن عمق این بخش از دریاچه مشهود است. حاشیه جنوب غربی دریاچه ارومیه (محدوده ۳۷° ۹' ۴۸/۸۶" -



شکل ۱. موقعیت منطقه مطالعه‌شده (حاشیه جنوب غربی دریاچه ارومیه، استان آذربایجان غربی، ایران)

روش پیشنهادی

در این پژوهش تلاش شده است تا با استفاده از تصاویر سنجش از دور چندسنسوری، تغییرات آب، خاک و پوشش گیاهی سطح زمین با روش بدون نظارت شناسایی شود که در این راستا، مؤلفه‌های بیوفیزیکی جدیدی برای سنجنده Sentinel2B تعریف شده و همچنین، یک روش نوین بدون نظارت برای تشخیص تغییرات باینری و تشخیص تغییرات چندگانه توسعه داده شده است. شکل ۲ فلوجارت روش پیشنهادی را نشان می‌دهد.

طبق فلوجارت ارائه‌شده در شکل ۲، روش پیشنهادی این تحقیق از دو بخش کلی تشکیل شده است. در مرحله پیش‌پردازش ابتدا از تصحیح رادیومتریک مطلق برای

در تحقیق حاضر از دو مجموعه داده تصویری برای پیاده‌سازی و ارزیابی روش پیشنهادی استفاده شده است. در مجموعه داده اول، از تصاویر دوزمانه سنجنده‌های Landsat8 OLI و Sentinel2B که از سایت USGS¹ به ترتیب در تاریخ‌های ۲۰۱۳/۰۸/۲۷ و ۲۰۱۸/۰۸/۲۷ اخذ شدند، برای ارزیابی روش پیشنهادی به عنوان یک مطالعه موردی استفاده شد. مجموعه داده دوم نیز شامل یک جفت تصویر هم‌زمان سنجنده‌های Landsat8 OLI و Sentinel2B است که هر دو در تاریخ ۲۰۱۸/۰۷/۳۱ از منطقه مطالعه‌شده از سایت USGS تهیه شده‌اند. از مجموعه داده دوم به منظور تصحیح پارامترهای تبدیل TC سنجنده Sentinel2B استفاده شده است.

1. United States Geological Survey

تحقیق حاضر از این باندها استفاده نشد. سپس، تصحیح هندسی برای هم‌مرجع‌سازی تصاویر انجام گرفت. در بخش پردازش، تبدیل خطی TC مختص هر یک از سنجنده‌ها که از مقالات موجود استخراج شده است، به هر یک از تصاویر دو زمانه اعمال شد که در نتیجه آن، هر یک از تصاویر از فضای ویژگی چندطیفی به فضای ویژگی سه بعدی بیوفیزیکی تبدیلات TC منتقل شدند. تبدیل TC یک ارتباط خطی بین مقادیر طیفی باندهای چندطیفی یک سنجنده و شاخص‌های بیوفیزیکی Brightness, Greenness و Wetness برقرار می‌کند. این تبدیل برای سنجنده‌های مختلف به طور مجزا محاسبه می‌شود. تبدیل TC سنجنده Landsat8 OLI در رابطه ۱ ارائه شده است. چنانچه مشخص است، یک رابطه خطی، مقادیر طیفی را به شاخص‌های بیوفیزیکی تبدیل می‌کند. در مقاله حاضر از رابطه ۱ برای محاسبه تبدیل TC تصاویر سنجنده Landsat8 OLI و از رابطه ۲ برای محاسبه TC تصویر سنجنده Sentinel2B استفاده شده و سپس، در ادامه همین تبدیل خطی اصلاح شده است. در روابط ۱ و ۲، B_n بیانگر باندهای سنجنده است.

در این مرحله، هر یک از تصاویر به مؤلفه‌های $Brightness^d$ ، $Greenness^e$ و $Wetness^v$ تبدیل شده‌اند. مؤلفه $Brightness$ به معنای درخشندگی است و در تشخیص تغییرات خصوصیات خاک از جمله شوری خاک بسیار مؤثر است. مؤلفه $Greenness$ در ارتباط با سبزی‌نگی و پوشش گیاهی است و نقش مؤثری در تشخیص تغییرات این پوشش‌ها (باغ‌ها، مزارع، مراتع و موارد مشابه) دارد. مؤلفه $Wetness$ هم به پوشش آب و رطوبت خاک و گیاهان ارتباط دارد و می‌تواند در تشخیص تغییرات رطوبت سطح زمین به خصوص تشخیص تغییرات سطوح آبی (دریاچه، سدها، تالاب و مرداب و غیره) مؤثر واقع شود. در ادامه، برای مقایسه مستقیم تصاویر دو زمانه به منظور متمایز کردن مناطق تغییرات، شاخص تفاضل^۸ [۱۷] و [۱۸] مؤلفه‌های $Brightness$ ، $Greenness$ و $Wetness$ محاسبه شدند.

تبدیل درجات خاکستری تصاویر به بازتاب بالای اتمسفر^۱ و سپس، تصحیح اتمسفری برای تبدیل آن به بازتاب سطحی استفاده شد. تصویر داندوده‌سنجنده Landsat8 OLI از سایت USGS دارای پردازش سطح IT است. به این معنا که این تصویر به تصحیحات رادیومتریک مطلق و حذف اثر اتمسفری نیاز دارد. برای تصحیح رادیومتریک مطلق این تصویر و تبدیل درجه روشنایی به بازتاب بالای اتمسفر، از نرم‌افزار ENVI 5.3 استفاده شده است. در این نرم‌افزار با استفاده از ابزار Radiometric calibration تصویر TOA Reflectance تولید شد. تصویر سنجنده Sentinel2B نیز که از سایت USGS داندوده شده است، دارای پردازش سطح IC است. تصویر یادشده در این سطح از نظر رادیومتریک شامل مقادیر TOA Reflectance است و فقط نیازمند حذف اثرات اتمسفر برای رسیدن به مقادیر بازتاب سطحی است. در گام بعد، برای اعمال تصحیح اتمسفری روی تصویر سنجنده Landsat8 OLI، از افزونه FLAASH^۲ موجود در نرم‌افزار ENVI 5.3 استفاده شد. افزونه FLAASH به عنوان یک الگوریتم کاربردی بر اساس مدل‌های انتقال اتمسفری این قابلیت را دارد که بتواند اثر اتمسفر از نظر جذب و پراکنش امواج الکترومغناطیسی را مدل کند، به گونه‌ای که اثر جذب و پراکنش از روی امواج تا حد زیادی برطرف شود و مقادیر بازتاب سطحی با دقت مناسبی محاسبه شود. از آنجا که الگوریتم FLAASH برای باندهای حرارتی مناسب نیست، بنابراین تنها باندهای پایین‌تر از این محدوده در نظر گرفته شد. در نتیجه، باندهای ۲ تا ۷ سنجنده Landsat8 OLI برای ادامه پژوهش انتخاب شد. همچنین، برای تصحیح اتمسفری تصویر سنجنده Sentinel2B و رسیدن به بازتاب سطح زمین^۳ از افزونه Sen2cor نرم‌افزار SNAP که مختص پردازش‌های تصاویر سنجنده Sentinel است، استفاده شد. پس از تصحیح اتمسفری، تصویر Sentinel2B از سطح IC به سطح 2A انتقال یافت. باندهای ۱، ۹ و ۱۰ این سنجنده حاوی اطلاعات ذرات معلق در هوا^۴ و بخار آب و ابر هستند و توان تفکیک مکانی پایینی دارند، به همین دلیل در

۵. درخشندگی

۶. سبزی‌نگی

۷. رطوبت

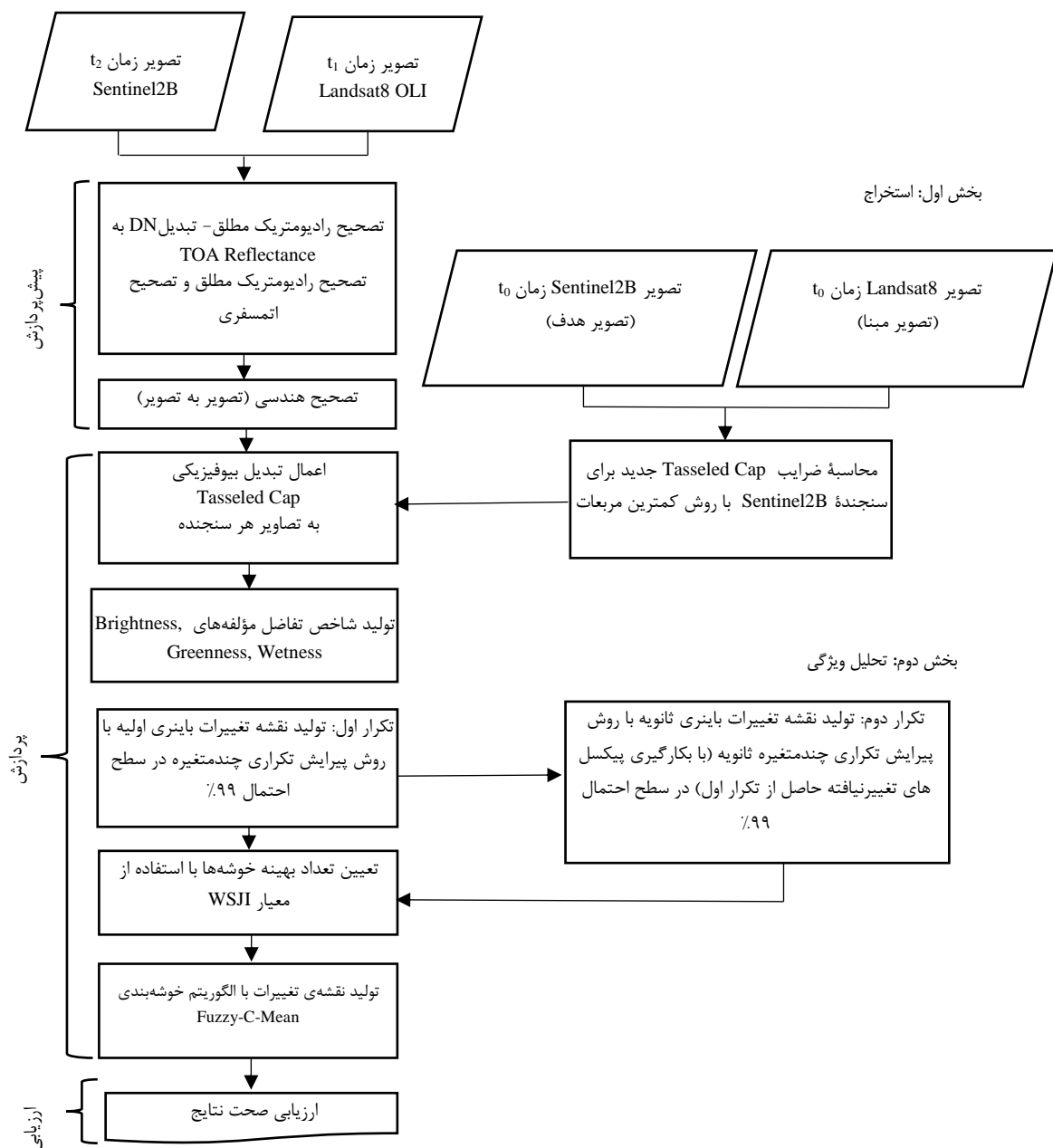
8. Difference image (DI)

1. TOA reflectance

2. Fast Line-of-sight Atmospheric Analysis of Spectral Hyper cubes: FLAASH

3. Surface Reflectance

4. Aerosol



شکل ۲. فلوجارت روش پیشنهادی

$$\begin{aligned}
 \text{Brightness} &= 0.3029 \times B_2 + 0.2786 \times B_3 + 0.4733 \times B_4 + 0.5599 \times B_5 + 0.508 \times B_6 + 0.1872 \times B_7 \\
 \text{Greenness} &= (-0.2941) \times B_2 + (-0.243) \times B_3 + (-0.5424) \times B_4 + 0.7276 \times B_5 + 0.0713 \times B_6 + (-0.1608) \times B_7 \\
 \text{Wetness} &= 0.1511 \times B_2 + 0.1973 \times B_3 + 0.3283 \times B_4 + 0.3407 \times B_5 + (-0.7117) \times B_6 + (-0.4559) \times B_7
 \end{aligned}
 \tag{۱}$$

$$\begin{aligned}
 \text{Brightness} &= 0.0822 \times B_2 + 0.1360 \times B_3 + 0.2611 \times B_4 + 0.2964 \times B_5 + 0.3338 \times B_6 + 0.3877 \times B_7 + 0.3895 \times B_8 + 0.4750 \times \\
 & B_{8A} + 0.3882 \times B_{11} + 0.1366 \times B_{12} \\
 \text{Greenness} &= (-0.1128) \times B_2 + (-0.1680) \times B_3 + (-0.3480) \times B_4 + (-0.3303) \times B_5 + 0.0852 \times B_6 + 0.3302 \times B_7 + 0.3165 \times B_8 \\
 & + 0.3625 \times B_{8A} + (-0.4578) \times B_{11} + (-0.4064) \times B_{12} \\
 \text{Wetness} &= 0.1363 \times B_2 + 0.2802 \times B_3 + 0.3072 \times B_4 + 0.5288 \times B_5 + 0.1379 \times B_6 + (-0.0001) \times B_7 + (-0.0807) \times B_8 + (-0.1389) \\
 & \times B_{8A} + (-0.4064) \times B_{11} + (-0.5602) \times B_{12}
 \end{aligned}
 \tag{۲}$$

فرم روابط ۳ و ۴ نشان دهیم، می توان شاخص تفاضل (تصویر تفاضل یا تصویر اختلاف) را با تفاضل مقادیر درجات خاکستری پیکسل های تصاویر دوزمانه، به صورت رابطه ۵ محاسبه کرد [۱۷ و ۱۸].

$$I^1 = \{I^1(r,c) | r=1,2,\dots,R, c=1,2,\dots,C, I^1(r,c) \in [0, 2^n - 1]\} \quad (3)$$

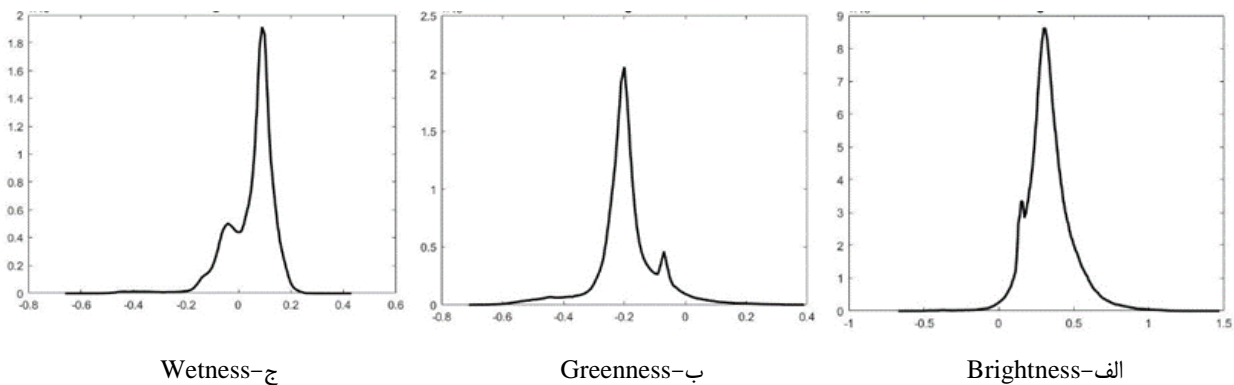
$$I^2 = \{I^2(r,c) | r=1,2,\dots,R, c=1,2,\dots,C, I^2(r,c) \in [0, 2^n - 1]\} \quad (4)$$

$$I^{DI} = \left\{ \begin{array}{l} I^{DI}(r,c) = I^2(r,c) - I^1(r,c) | r=1,2,\dots,R, c=1,2,\dots, \\ I^{DI}(r,c) \in [-2^n + 1, 2^n - 1] \end{array} \right\} \quad (5)$$

شکل ۳ هیستوگرام های شاخص تفاضل مؤلفه های Wetness، Brightness و Greenness را نشان می دهد. چنانچه در این شکل قابل ملاحظه است، نقطه اوج هیستوگرام اختلاف قابل توجهی با عدد صفر دارد. در حالی که انتظار می رفت در این هیستوگرام ها قله (نقطه اوج) هیستوگرام که نشان دهنده مناطق عدم تغییرات است، روی عدد صفر یا نزدیک آن قرار گیرد. این مسئله می تواند به دلیل تعمیم پذیری پایین پارامترهای تبدیل TC باشد [۱۸]. بنابراین، مسئله یادشده در تحقیق حاضر مورد بررسی قرار گرفته و روش مناسبی برای ارتقای تعمیم پذیری تبدیل TC برای سنجنده Sentinel2B پیشنهاد می شود.

متداول ترین شاخصی که بتوان با آن مناطق تغییر یافته را متمایز کرد، شاخص تفاضل (اختلاف) بین تصاویر دوزمانه است. اگر تصاویر زمان ۱ و زمان ۲ اخذ شده از یک منطقه جغرافیایی که نسبت به همدیگر از لحاظ هندسی تصحیح شده اند را به ترتیب با دو بردار I^1 و I^2 به

در این روابط؛ $I^i(r,c)$ درجه خاکستری پیکسلی در موقعیت مکانی سطر r ام و ستون c ام از تصویر زمان i ، $C, R, (i=1,2)$ بیانگر ابعاد مکانی تصویر (به ترتیب سطرها و ستون ها) و n توان تفکیک رادیومتریکی تصویر است. تفسیر شاخص تفاضل این گونه است که اگر منطقه ای طی زمان تغییر نداشته باشد، مقادیر طیفی آن در تصاویر زمان ۱ و زمان ۲، عین هم یا مشابه هم بوده و اندازه آن در تصویر تفاضل برابر یا نزدیک صفر است، ولی برای مناطق تغییر یافته، مقادیر تصویر تفاضل بزرگ تر یا کوچک تر از صفر خواهند بود.



شکل ۳. هیستوگرام شاخص تفاضل مؤلفه های Wetness، Brightness و Greenness مجموعه داده اول قبل از تصحیح پارامترهای تبدیل TC

چندمتغیره) و تکنیک خوشه بندی FCM [۲۱] است. در مرحله اول این روش، تغییرات فاحش با روش پیرایش تکراری چندمتغیره [۲۲] تشخیص داده شده و حذف می شود. این مرحله می تواند به طور متوالی تکرار شود.

در ادامه روش پیشنهادی، نوعی روش نوین و کارآمد بدون نظارت برای تفکیک مناطق تغییر یافته از سایر نواحی معرفی می شود. روش پیشنهادی تلفیق آزمون آماری با تابع توزیع خی-مربع [۱۹ و ۲۰] (روش پیرایش تکراری

تغییرات رخ داده در منطقه مشخص می‌شود. بررسی تحقیقات پیشین نشان می‌دهد تا به حال راهکار خودکار و بدون نظارت برای تعیین تعداد بهینه خوشه‌ها در شناسایی بدون نظارت تغییرات توسعه داده نشده است. در تحقیق حاضر، تعداد بهینه خوشه‌ها با تحلیل معیارهای ارزیابی خوشه‌بندی برآورد شد. از کارآمدترین شاخص‌ها، معیار WSJI است [۲۳]. شاخص WSJI، الهام گرفته از شاخص CWBI، بوده و برای اندازه‌گیری کیفیت خوشه‌بندی از ترکیب خطی فشردگی و جدایی فازی متوسط استفاده می‌کند. مقدار کم WSJI متناظر با یک خوشه‌بندی مناسب است. بنابراین، کمترین مقدار معیار WSJI تعیین کننده تعداد بهینه خوشه‌ها است. ابتدا شاخص CWBI تشریح شده و سپس، شاخص WSJI معرفی می‌شود. شاخص CWBI میانگین فشردگی و جدایی خوشه‌های فازی را با استفاده از مجموع دو تابع Dis و Scat تعیین می‌کند [۲۳]:

$$CWBI(K) = \alpha Scat(K) + Dis(K) \quad (8)$$

در رابطه ۸ α یک فاکتور وزنی است که معادل با $Dis(K_{max})$ ، $Dis(K)$ با حداکثر تعداد خوشه است که با رابطه ۱۲ محاسبه می‌شود. همچنین، $Scat(K)$ به میانگین پراکندگی (یعنی فشردگی) K خوشه اشاره دارد و به صورت رابطه ۹ تعریف می‌شود:

$$Scat(K) = \frac{\frac{1}{K} \sum_{i=1}^K \sigma(z_i)}{\sigma(X)} \quad (9)$$

در رابطه ۹ $\|x\| = (x^T \cdot x)^{1/2}$ بیانگر واریانس داده‌ها است که طبق رابطه ۱۰ تعریف شده است:

$$\sigma(X) = \frac{1}{N} \sum_{j=1}^N (x_j - \bar{z})^2 \quad (10)$$

$\sigma(z_i)$ بیانگر تنوع فازی خوشه i است که به صورت رابطه ۱۱ تعریف می‌شود:

$$\sigma(z_i) = \frac{1}{N} \sum_{j=1}^N \mu_{ij} (x_j - z_i)^2 \quad (11)$$

هرچه مقدار $Scat(K)$ کوچک تر باشد، فشردگی خوشه بیشتر است. همچنین، تابع فاصله $Dis(K)$ جدایی بین

ناحیه پذیرش نمونه‌ها (پیکسل‌های تغییرنیافته) از نظر ظاهری به صورت بیضی/بیضوی‌هایی است که با توزیع خی-مربع در سطوح احتمال مختلف ایجاد می‌شود. بنابراین، برای پیکسل‌های تغییرنیافته، X_{ij} یک توزیع گاوسی با بردار میانگین m_j و ماتریس کواریانس Σ_j است، که به صورت رابطه ۶ تعریف می‌شود (معادل محاسبه فاصله Mahalanobis برای تک تک پیکسل‌ها است):

$$C_{ij} = (x_{ij} - m_j) \sum_j^{-1} (x_{ij} - m_j) \sim \chi^2(2b) \quad (6)$$

در رابطه (۶)، C_{ij} توزیع خی-مربع با درجه آزادی $2b$ است. بنابراین، می‌توان نوشت:

$$P(c_{ij} < \chi_{1-\alpha}^2(2b)) = 1 - \alpha \quad (7)$$

رابطه به این معنا است که برای سطح احتمال انتخاب شده $1-\alpha$ (که در این تحقیق، $1-\alpha = 0.99$ است) می‌توان مقدار $\chi_{1-\alpha}^2(2b)$ را طوری تعیین کرد که C_{ij} فقط با احتمال α رشد کند [۲۲]. در برآوردهای اولیه ماتریس‌های m_j و Σ_j از کل مجموعه پیکسل‌ها استفاده می‌شود و اولین پیرایش اعمال می‌شود. از مجموعه پیکسل‌های برجسته‌خورده به عنوان تغییرنیافته، تخمین‌های جدیدی برای ماتریس‌های m_j و Σ_j انجام می‌شود و پیرایش دوباره تکرار می‌شود. این روش تکرار شونده تا هنگامی که هیچ پیکسل جدیدی به عنوان تغییرات برجسته نخورد، ادامه می‌یابد. در واقع، در این روش به جای استخراج پیکسل‌های تغییر یافته در یک مرحله از برآوردهای اولیه ضعیف ماتریس‌های میانگین و کواریانس، انتخاب outlierها در هر تکرار جدید دقیق‌تر می‌شود [۲۲]. بعد از تعیین پیکسل‌های تغییرنیافته، نقشه تغییرات باینری تولید می‌شود که در آن، مناطق عدم تغییرات از مناطق تغییرات تفکیک شده است. در مرحله دوم، به منظور تفکیک تغییرات چندگانه محتمل در منطقه، از تکنیک خوشه‌بندی FCM استفاده می‌شود. در این تکنیک، پیکسل‌های تغییر یافته به تعداد خوشه‌های مشخص دسته‌بندی می‌شوند که هر یک از آن‌ها نماینده یک نوع تغییر واقعی در سطح زمین است. تعیین تعداد بهینه خوشه‌ها اهمیت فوق‌العاده‌ای دارد و فرایند سخت و پیچیده‌ای است. تعداد بهینه خوشه‌ها یا به صورت سعی و خطا تعیین می‌شود و یا با استفاده از دانش قبلی از

در نهایت، پس از تولید نقشه تغییرات باینری منطقه، ارزیابی کارایی روش پیشنهادی با معیارهای صحت کلی (O.A)، خطای کلی (T.E)، هشدار اشتباه (F.A) و خطای از دست رفته (M.E) انجام می‌گیرد.

یافته‌ها

در تحقیق حاضر، برای رفع مشکل تعمیم پذیری پایین پارامترهای تبدیل TC، از تصاویر مجموعه داده دوم که در بخش ۱-۳ معرفی شده است، استفاده شد. بنابراین، دو تصویر هم‌زمان سنجنده‌های Landsat8 OLI و Sentinel2B که در تاریخ ۲۰۱۸/۰۷/۳۱ از منطقه مورد مطالعه تهیه شدند، مورد تحلیل قرار گرفتند. برای تصحیح پارامترهای TC، تصویر سنجنده Landsat8 OLI به عنوان تصویر مبنا قرار گرفته و با اعمال تبدیل خطی TC مختص این سنجنده، مؤلفه‌های Brightness، Greenness و Wetness برای منطقه مورد نظر تعیین شدند. سپس، با روش کمترین مربعات معکوس، پارامترهای تبدیل خطی TC برای تصویر هدف (Sentinel2B) برآورد شد. جدول ۱ پارامترهای جدید تبدیل TC را برای سنجنده Sentinel2B در مقایسه با پارامترهای قبلی آن نشان می‌دهد.

جدول ۱. مقایسه پارامترهای جدید و قبلی تبدیل TC سنجنده Sentinel2B

Index	Band2	Band3	Band4	Band5	Band6	Band7	Band8	Band8-A	Band11	Band12
Brightness	۰/۰۸۲۲	۰/۱۳۶۰	۰/۲۶۱۱	۰/۲۹۶۴	۰/۳۳۳۸	۰/۳۸۷۷	۰/۳۸۹۵	۰/۴۷۵۰	۰/۳۸۸۲	۰/۱۳۶۶
Greenness	-۰/۱۱۲۸	-۰/۱۶۸۰	-۰/۳۴۸۰	-۰/۳۳۰۳	۰/۰۸۵۲	۰/۳۳۰۲	۰/۳۱۶۵	-۰/۳۶۲۵	-۰/۴۵۷۸	-۰/۴۰۶۴
Wetness	۰/۱۳۶۳	۰/۲۸۰۲	۰/۳۰۷۲	۰/۵۲۸۸	۰/۱۳۷۹	-۰/۰۰۰۱	-۰/۰۸۰۷	-۰/۱۳۸۹	-۰/۴۰۶۴	-۰/۵۶۰۲
New_Brightness	-۰/۱۴۷۱	۰/۳۳۱۲	۰/۴۹۳۶	۰/۰۷۸۴	۰/۲۸۹۹	۰/۲۷۹۵	-۰/۱۱۳۲	۰/۰۷۷۵	۰/۷۵۱۳	۰/۰۵۱۲
New_Greenness	-۰/۱۱۴۵	-۰/۲۸۸۲	-۰/۲۰۲۵	-۰/۵۱۰۰	۰/۰۵۷۶	۰/۲۱۷۹	۰/۳۷۰۶	۰/۲۳۳۲	۰/۲۴۳۲	-۰/۲۹۱۷
New_Wetness	۰/۰۲۵۹	۰/۲۲۴۰	-۰/۱۴۲۷	۰/۵۹۱۷	-۰/۱۸۸۲	-۰/۱۶۴۷	۰/۰۴۸۰	۰/۵۳۳۸	-۰/۸۵۷۸	-۰/۲۱۵۰

پس از محاسبه تفاضل مؤلفه‌های Brightness، Greenness و Wetness روش پیرایش تکراری چندمتغیره روی آنها اعمال شد. پس از دو مرحله تکرار با در نظر گرفتن سطح احتمال ۹۹ درصد (سطح ریسک $\alpha = 0.01$) در هر تکرار، مرز بین پیکسل‌های تغییر یافته و تغییر نیافته مشخص شد و نقشه باینری تغییرات حاصل شد. شکل‌های ۵ و ۶ به ترتیب اسکاتر پلات نمونه‌ها و نقشه تغییرات باینری حاصل از روش پیشنهادی در فضای ویژگی سه بعدی را نشان می‌دهند. در شکل ۵ نمونه‌های آبی‌رنگ

خوشه‌ها را اندازه‌گیری می‌کند که طبق رابطه ۱۲ تعریف می‌شود:

$$Dis(K) = \frac{D_{\max}}{D_{\min}} \sum_{i=1}^K \left(\sum_{k=1}^K Z_i - Z_k \right)^{-1} \quad (12)$$

در رابطه ۱۲ $D_{\max} = \max\{\|z_i - z_k\|\}$ ، $D_{\min} = \min\{\|z_i - z_k\|\}$ ، $i, k \in \{2, 3, \dots, K\}$ هر چه مقدار $Dis(K)$ کوچک‌تر باشد، جداسازی خوشه‌ها بهتر است. با الهام از شاخص CWBI، می‌توان در ادامه شاخص WSJI را طبق رابطه ۱۳ تعریف کرد [۲۳]:

$$WSJI(K) = Scat(K) + \frac{Sep(K)}{Sep(K_{\max})} \quad (13)$$

در رابطه ۱۳ $Scat(K)$ همان معیار فشردگی است که با رابطه ۹ تعیین شد و $Sep(K)$ جدایی بین خوشه‌ها است که با رابطه ۱۴ محاسبه می‌شود:

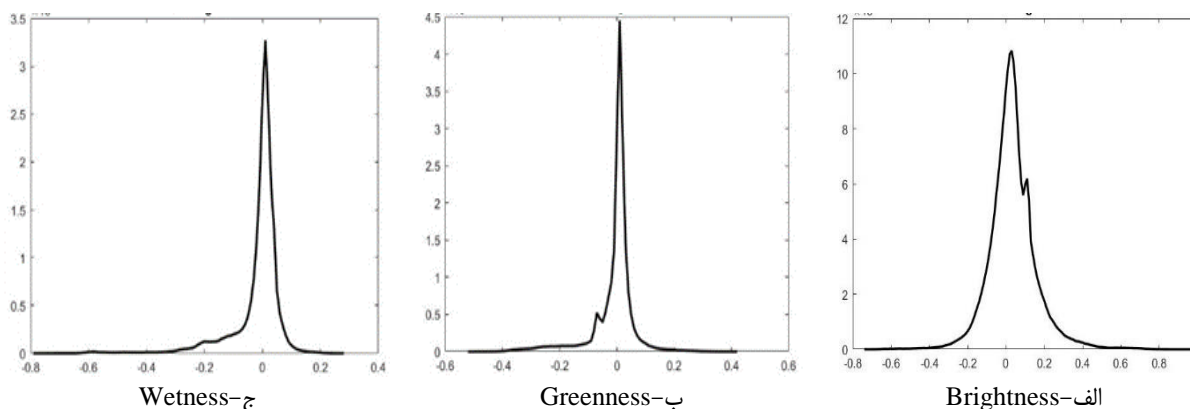
$$Sep(K) = \frac{D_{\max}^2}{D_{\min}^2} \sum_{i=1}^K \left(\sum_{k=1}^K Z_i - Z_k^2 \right)^{-1} \quad (14)$$

در رابطه ۱۴ $D_{\max} = \max\{\|z_i - z_k\|\}$ ، $D_{\min} = \min\{\|z_i - z_k\|\}$ و $Sep(K_{\max})$ به $Sep(K)$ با حداکثر تعداد خوشه اشاره دارد.

شکل ۴ نیز هیستوگرام شاخص تفاضل مؤلفه‌های Brightness، Greenness و Wetness را در مجموعه داده اول (داده‌های دوزمانه Landsat8 OLI و Sentinel2B) بعد از تصحیح تبدیل TC نشان می‌دهد. قله این هیستوگرام پس از تصحیح پارامترهای TC، روی عدد صفر قرار گرفته است که با توجه به کثرت نمونه‌های تغییر نیافته در این تصاویر، مؤید بهبود تبدیل TC برای سنجنده Sentinel2B است. بنابراین، می‌توان با به‌کارگیری مؤلفه‌های تصحیح شده تبدیل TC، صحت بالاتری در تشخیص تغییرات را انتظار داشت.

است، این روند تکراری اثر کاهشی بر تعداد نمونه‌های تغییرات داشته و در نهایت، سبب بهبود نتایج تشخیص تغییرات شده است که این مسئله به صورت کمی مورد بررسی قرار گرفته و تأیید شده است. در شکل ۶ نیز مناطق سفیدرنگ بیانگر تغییرات رخ داده در سطح زمین (تغییرات آب، خاک و پوشش گیاهی) بوده و نواحی مشکی‌رنگ بیانگر مناطق تغییرنیافته است.

بیانگر پیکسل‌های تغییر یافته است که با تحلیل فضای ویژگی متشکل از تفاضل مؤلفه‌های Brightness، Wetness و Greenness تشخیص داده شده‌اند. نمونه‌های سبزرنگ، پیکسل‌های عدم تغییرات (با لحاظ $\alpha = 0.01$) پس از اولین تکرار روش پیرایش تکراری چندمتغیره را نشان می‌دهد. محدوده قرمز رنگ، نواحی عدم تغییرات پس از تکرار دوم روش پیرایش تکراری چندمتغیره را با لحاظ $\alpha = 0.01$ نشان می‌دهد. همان‌طور که در شکل ۵ مشخص

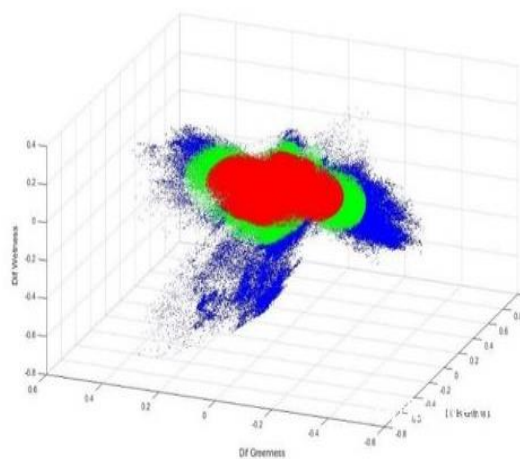


شکل ۴. هیستوگرام شاخص تفاضل مؤلفه‌های Brightness، Greenness و Wetness مجموعه داده اول (داده‌های دو زمانه Landsat8 OLI و Sentinel2B) پس از تصحیح پارامترهای تبدیل TC



شکل ۶. نقشه تغییرات باینری حاصل از روش پیشنهادی در فضای ویژگی سه‌بعدی (مناطق سفیدرنگ بیانگر تغییرات رخ داده در آب، خاک و پوشش گیاهی منطقه است)

صورتی که تمام حالت‌های تغییرات موجود در فضای ویژگی سه‌بعدی در نظر گرفته شود (تغییرات مثبت، تغییرات منفی و عدم تغییرات)، حداکثر ۲۸ ($3^3 + 1$) خواهد بود. اما انتظار



شکل ۵. اسکا ترپلات نمونه‌ها در فضای ویژگی سه‌بعدی حاصل از تفاضل مؤلفه‌های Brightness، Greenness و Wetness

در گام بعد، هدف تعیین تعداد بهینه خوشه‌ها با معیار WSJI در فضای ویژگی سه‌بعدی است. کمترین تعداد خوشه $K=2$ است. برای تعیین ماکزیمم تعداد خوشه‌ها در

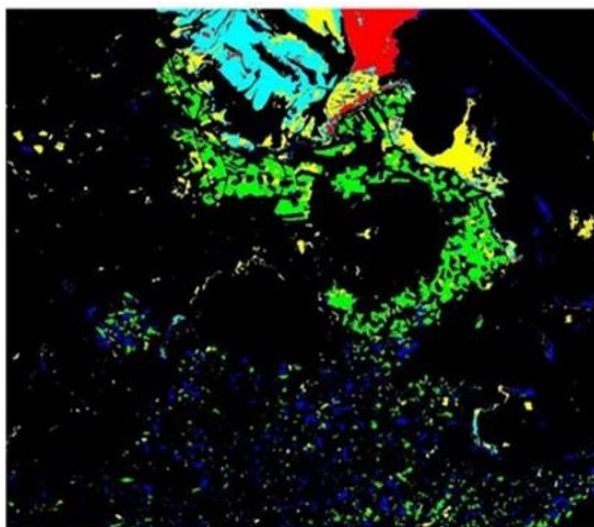
در نهایت پس از اجرای الگوریتم، معیار WSJI با مقدار ۰/۲۶۱۸، تعداد ۵ خوشه را به عنوان تعداد بهینه خوشه‌های تغییرات در منطقه برای فضای ویژگی سه‌بعدی تعیین کرد. در گام آخر، فرایند خوشه‌بندی چندگانه مناطق تغییر یافته با استفاده از الگوریتم FCM با تعداد خوشه‌های بهینه تعیین شده انجام شد.

شکل ۷ اسکاتریلات حاصل از خوشه‌بندی چندگانه به روش FCM در فضای ویژگی سه‌بعدی و شکل ۸ نقشه تغییرات چندگانه حاصل از روش پیشنهادی را نشان می‌دهد. توجه شود که رنگ‌ها در شکل‌های ۷ و ۸ متناظر نیستند. در شکل ۷ خوشه قرمز رنگ نشان دهنده خوشه عدم تغییرات است، در حالی که در شکل ۸ مناطق تغییر یافته با رنگ سیاه مشخص شده‌اند.

می‌رود با در نظر گرفتن ۲۸ حالت مختلف، تغییرات معناداری در منطقه پدیدار نشود و فقط زمان اجرای الگوریتم افزایش یابد که نتایج بررسی عملی نیز همین مسئله را ثابت کرد. در نتیجه، برای کاهش محاسبات و با استفاده از اطلاعات فضای ویژگی دوبعدی، در صورتی که تمام حالت‌های تغییرات موجود در فضای ویژگی دوبعدی در نظر گرفته شود (تغییرات مثبت، تغییرات منفی و عدم تغییرات)، حداکثر ۹ ($2^3 + 1$) خوشه تغییرات معنادار به عنوان بیشترین تعداد خوشه‌ها انتخاب می‌شود. در تعیین تعداد بهینه خوشه‌ها با شاخص WSJI نیز با مقایسه‌ای که بین مقادیر WSJI برای تعداد خوشه‌ها ۲ تا ۹ انجام گرفت، کمترین مقدار این معیار، تعداد بهینه خوشه‌ها را مشخص کرد که نتایج این بررسی‌ها در جدول ۲ ارائه شده است.

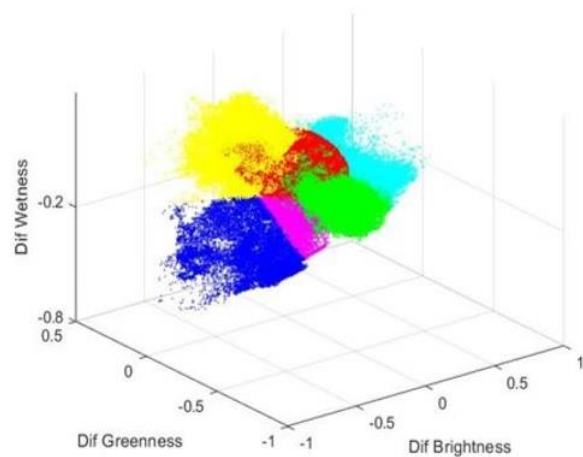
جدول ۲. تعیین تعداد بهینه خوشه‌های تغییرات با بررسی مقادیر WSJI برای تعداد مختلف خوشه‌ها در فضای ویژگی سه‌بعدی

تعداد خوشه	۲	۳	۴	۵	۶	۷	۸	۹
WSJI	۰/۵۰۷۱	۰/۳۷۸۴	۰/۲۸۹۱	۰/۲۶۱۸	۰/۳۲۷۴	۰/۵۶۷۰	۰/۷۸۱۸	۱/۰۷۱۳



شکل ۸. نقشه تغییرات چندگانه حاصل از روش پیشنهادی با تحلیل تفاضل مؤلفه‌های Greenness, Brightness و Wetness. رنگ‌های مختلف موجود در این نقشه هر یک بیانگر نوعی از تغییرات پوشش سطح زمین است

پارامترهای ارزیابی صحت شامل صحت کلی (O.A)، خطای کلی (T.E) هشدار اشتباه (F.A) و خطای ازدست‌رفته (M.E) برای بررسی صحت نتایج شناسایی تغییرات مورد استفاده قرار گرفت. همان‌طور که در این جدول مشاهده



شکل ۷. اسکاتریلات حاصل از خوشه‌بندی تفاضل مؤلفه‌های Greenness, Brightness و Wetness به روش FCM

جدول ۳ نتایج حاصل از ارزیابی صحت روش پیشنهادی را نشان می‌دهد α سطح ریسک و m توان وزنی است که درجه فازی بودن الگوریتم FCM را کنترل می‌کند و به صورت پیش‌فرض ۲ در نظر گرفته می‌شود.

برای ارزیابی بهتر و جامع‌تر، نتایج حاصل از روش پیشنهادی با نتایج حاصل از دو روش متداول شامل؛ خوشه‌بندی فازی چندمتغیره باینری شاخص بزرگی تغییرات معرفی‌شده توسط، Ghosh و همکاران (۲۰۱۱) [۲۴] و تکنیک حد آستانه‌گذاری تک‌متغیره اتسو [۱۹ و ۲۵] مقایسه شد. تکنیک خوشه‌بندی فازی نامبرده یک تکنیک حساس به متن برای شناسایی بدون نظارت تغییرات در تصاویر سنجش از دور چندزمانه است [۲۴]. این تکنیک مبتنی بر رویکرد خوشه‌بندی فازی است و از همبستگی مکانی بین پیکسل‌های همسایه در تصویر تفاضل استفاده می‌کند. در پیاده‌سازی این روش طبق توصیه توسعه دهندگان از قدرمطلق بزرگی تغییرات تصویر بازتاب حاصل از تصاویر Landsat8 OLI و Sentinel2B استفاده شده و سپس، پیکسل‌ها با روش خوشه‌بندی FCM به دو خوشه تغییرات و عدم تغییرات تفکیک شدند. جدول ۴ نتایج ارزیابی صحت حاصل از پیاده‌سازی این روش را نشان می‌دهد. درخور یادآوری است در این روش از باندهای مشابه تصاویر سنجنده‌های Landsat8 OLI و Sentinel2B استفاده شده است. در این جدول C بیانگر تعداد خوشه‌ها و m پارامتر فازی‌سازی است. صحت کلی ۷۶/۲۴ درصد و هشدار اشتباه ۳۳/۸۳ درصد نشان‌دهنده کارایی پایین این روش نسبت به روش پیشنهادی است که صحت کلی ۹۲/۰۶ درصد و هشدار اشتباه ۶/۲۷ درصد را به همراه داشت.

می‌شود، روش پیشنهادی در دو حالت مورد ارزیابی قرار گرفته است. در حالت اول که تنها از تفاضل مؤلفه‌های Greenness و Wetness استفاده شده، صحت کلی (O.A) در تکرار اول روش پیرایش چندمتغیره، ۷۳/۴۶ و در تکرار دوم برابر ۸۹/۱۹ درصد است در حالت دوم که تمام مؤلفه‌های TC به کار گرفته شده، صحت کلی در تکرار اول حدود ۸۲/۷۲ درصد بوده و در تکرار دوم ۹۲/۰۶ درصد است. این نتایج نشان می‌دهد تکرار روش پیرایش چندمتغیره پیشنهادی، بدون استثنا تأثیر مثبت و قابل توجهی در نتایج شناسایی تغییرات داشته است؛ چرا که هم در حالت استفاده از دو مؤلفه Greenness و Wetness و هم در حالت استفاده از سه مؤلفه Brightness، Greenness و Wetness افزایش صحت شناسایی تغییرات قابل توجه است. از طرفی، استفاده از تمام مؤلفه‌های TC برای شناسایی تغییرات در مقایسه با دو مؤلفه Greenness و Wetness، خطای کلی (T.E) را حدود ۳ درصد کاهش داده و خطای از دست‌رفته (M.E) را حدود به نصف تقلیل داده است. بهترین نتیجه، از الگوریتم شناسایی تغییرات با لحاظ تمام مؤلفه‌های TC و با حذف Outlierها (خطاهای فاحش) در دو تکرار روش پیرایش چندمتغیره (در سطح احتمال ۹۹ درصد) حاصل شده است. این نتایج، کارایی زیاد روش پیشنهادی در شناسایی بدون نظارت تغییرات با استفاده از تصاویر اپتیک چندسنسوری را نشان می‌دهد.

جدول ۳. نتایج ارزیابی صحت روش پیشنهادی

روش پیشنهادی	ویژگی‌های مورد تحلیل	معیارهای ارزیابی صحت				پارامترها
		F.A%	M.E%	T.E%	O.A%	
روش پیشنهادی	Wetness و تفاضل مؤلفه‌های Greenness	۰/۴۵	۴۶/۸۴	۲۳/۵۷	۷۶/۴۳	$\alpha_1=0.01$ FCM: m=2
		۱/۰۹	۲۰/۶۰	۱۰/۸۱	۸۹/۱۹	$\alpha_1=0.01$ $\alpha_2=0.01$ FCM: m=2
	Wetness، Greenness و Brightness	۱/۴۱	۳۳/۲۷	۱۷/۲۸	۸۲/۷۲	$\alpha_1=0.01$ FCM: m=2
		۶/۲۷	۹/۶۲	۷/۹۴	۹۲/۰۶	$\alpha_1=0.01$ $\alpha_2=0.01$ FCM: m=2

جدول ۴. نتایج ارزیابی صحت روش متداول اول (خوشه‌بندی فازی چندمتغیره باینری شاخص بزرگی تغییرات [۲۴])

روش شناسایی تغییرات	ویژگی‌های مورد تحلیل	معیارهای ارزیابی صحت				پارامترها
		F.A%	M.E%	T.E%	O.A%	
خوشه‌بندی فازی چندمتغیره باینری	شاخص بزرگی تغییرات تصاویر بازتاب طیفی	۳۳/۸۳	۱۳/۶۲	۲۳/۷۶	۷۶/۲۴	FCM: m=2, C=2

شده است. همان‌طور که در جدول ۵ مشخص است، معیار صحت کلی این روش در مؤلفه‌های Brightness، Greenness و Wetness به ترتیب ۵۶/۵۱، ۸۱/۲۷ و ۸۰/۸۵ درصد است که نسبت به معیار صحت کلی روش پیشنهادی تحقیق حاضر که برابر ۹۲/۰۶ است، پایین‌تر است. مقایسه روش پیشنهادی مقاله حاضر با دو روش متداول در این حوزه، مؤید کارایی بیشتر روش پیشنهادی برای تشخیص بدون نظارت تغییرات آب، خاک و پوشش گیاهی سطح زمین بوده و می‌تواند به عنوان یک روش بدون نظارت در کاربردهای مختلف مورد بهره‌برداری قرار گیرد.

جدول ۵. نتایج ارزیابی صحت روش متداول دوم (تکنیک حد آستانه‌گذاری تک‌متغیره اتسو [۱۹ و ۲۵])

روش شناسایی تغییرات	معیارهای ارزیابی صحت			
	F.A%	M.E%	T.E%	O.A%
حد آستانه‌گذاری اتسو روی قدرمطلق تفاضل Brightness	۳۷/۶۱	۴۹/۴۰	۴۳/۴۹	۵۶/۵۱
حد آستانه‌گذاری اتسو روی قدر مطلق تفاضل Greenness	۰/۸۰	۳۶/۷۷	۱۸/۷۲	۸۱/۲۷
حد آستانه‌گذاری اتسو روی قدر مطلق تفاضل Wetness	۰/۷۷	۳۷/۶۴	۱۹/۱۴	۸۰/۸۵

یافتند که این فضا متشکل از سه مؤلفه Brightness، Greenness و Wetness است. سپس، شاخص تفاضل هریک از این مؤلفه‌ها محاسبه شده و با استفاده از آنها و با روش پیرایش تکراری چندمتغیره، نقشه تغییرات باینری تولید شد. روش پیرایش تکراری چندمتغیره پیشنهادی در این تحقیق از تابع توزیع خی - مربع در تکرارهای متوالی و در سطوح اطمینان مختلف به منظور تشخیص Outlierها استفاده می‌کند تا مناطق تغییرنیافته را مشخص کند. در این روش، پس از دو تکرار متوالی و در سطح اطمینان ۹۹ درصد، محدوده عدم تغییرات مشخص شده و پیکسل‌های تغییرنیافته و تغییرنیافته از یکدیگر تفکیک شده و نقشه باینری تغییرات تولید شد. سپس، به منظور تعیین تغییرات چندگانه رخ داده در سطح زمین، نمونه‌های تغییرنیافته با استفاده از تکنیک خوشه‌بندی FCM به تعداد مشخص خوشه، تفکیک شدند. در روش پیشنهادی، تعداد بهینه خوشه‌ها که از ملزومات تکنیک خوشه‌بندی FCM است، به صورت کاملاً اتوماتیک و بدون نظارت با تحلیل معیار WSJI تعیین شد. در فضای ویژگی سه‌بعدی، ۵ خوشه تغییرات تعیین شده و سپس، نقشه تغییرات چندگانه منطقه فراهم شد. به طور کلی، نوآوری‌های تحقیق حاضر در دو مورد: ۱- برآورد پارامترهای تبدیل

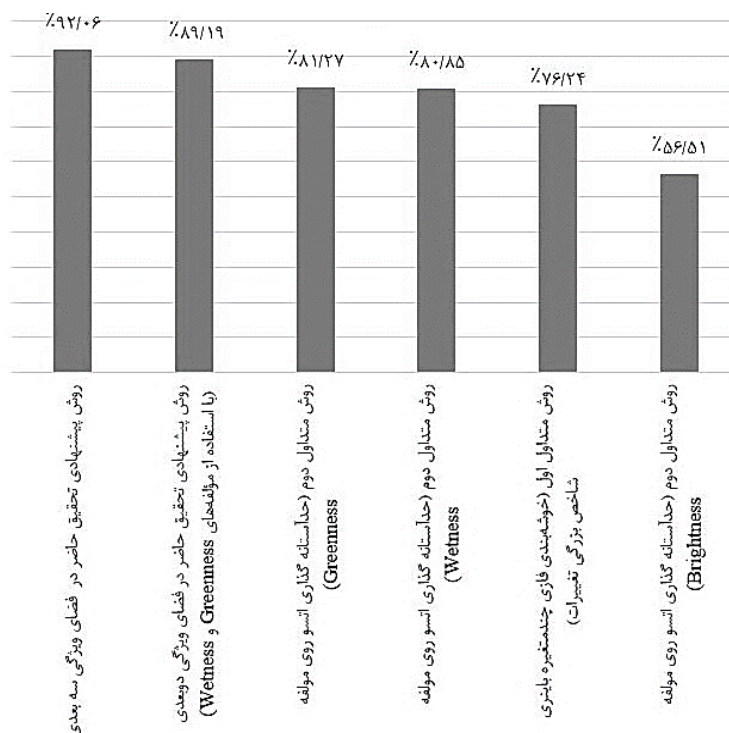
در پیاده‌سازی روش متداول دوم (حد آستانه‌گذاری تک‌متغیره) [۱۹ و ۲۵] از تکنیک حد آستانه‌گذاری اتسو برای خوشه‌بندی شاخص قدرمطلق تفاضل مؤلفه‌های Brightness، Greenness و Wetness به دو خوشه تغییرات و عدم تغییرات استفاده شد. در این روش، ابتدا شاخص قدرمطلق تفاضل هر یک از مؤلفه‌های Brightness، Greenness و Wetness محاسبه شد و سپس، هر یک از این شاخص‌ها به صورت جداگانه توسط حد آستانه‌گذاری متقارن اتسو خوشه‌بندی شدند تا نقشه تغییرات باینری حاصل شود. نتایج ارزیابی عملی این روش در جدول ۵ ارائه

بحث و نتیجه‌گیری

شناسایی تغییرات، فرایند شناسایی تفاوت‌ها در خصوصیات شیء یا پدیده با بررسی آن در زمان‌های متفاوت است. به دلیل مزایای خاص و ارزشمند تکنولوژی سنجش از دور در تولید اطلاعات مکانی، تحلیل تصاویر سنجش از دور چندزمانه به ابزار توانمندی در شناسایی تغییرات سطح زمین تبدیل شده و مورد توجه متخصصان ژئوماتیک و علوم زمین قرار گرفته است. امروزه، ضرورت استفاده از تصاویر چندسنسوری برای شناسایی تغییرات امری بدیهی بوده و در سال‌های اخیر به یکی از چالش‌های مطرح در تشخیص تغییرات تبدیل شده است. از این‌رو، در تحقیق حاضر، یک روش جدید و کارآمد برای شناسایی تغییرات در تصاویر اپتیک چندسنسوری در رویکردی بدون نظارت که مبتنی بر به‌کارگیری شاخص‌های بیوفیزیکی مستخرج از تبدیل TC است، پیشنهاد شده و مورد ارزیابی قرار گرفت. روش پیشنهادی شامل دو بخش اصلی است. ابتدا تعمیم‌پذیری پارامترهای TC برای سنجنده‌های Landsat8 و Sentinel2B بررسی شده و پارامترهای TC جدید برای سنجنده Sentinel2B برآورد شد. سپس، تبدیل TC به تصاویر Landsat8 و Sentinel2B اعمال شده و این تصاویر از فضای چندطیفی به فضای بیوفیزیکی انتقال

پیشنهادی تحقیق حاضر در حالت استفاده از تمام مؤلفه‌های Brightness, Greenness و Wetness بهترین نتایج شناسایی تغییرات را به دنبال داشته است (صحت کلی برابر ۹۲/۰۶ درصد). سایر روش‌ها به ترتیب صحت کلی عبارت‌اند از: ۲- روش پیشنهادی در حالت دوبعدی (با استفاده از مؤلفه‌های Greenness و Wetness) با صحت کلی حدود ۸۹/۱۹ درصد، ۳- روش متداول دوم (حد آستانه گذاری اتسو روی شاخص Greenness) با صحت کلی ۸۱/۲۷ درصد، ۴- روش متداول دوم (حد آستانه گذاری اتسو روی شاخص Wetness) با صحت کلی ۸۰/۸۵ درصد، ۵- روش متداول اول (خوشه بندی فازی باینری) با صحت کلی ۷۶/۲۴ درصد و ۶- روش متداول دوم (حد آستانه گذاری اتسو روی شاخص Brightness) با صحت کلی ۵۶/۵۱ درصد.

TC برای سنجنده Sentinel2B و ۲- تعیین خودکار تعداد بهینه خوشه‌ها در خوشه‌بندی چندمتغیره پیشنهادی است. به عنوان یک مطالعه موردی و به سبب اهمیت منابع آبی در کشورمان ایران، از تصاویر سنجنده‌های Landsat8 و Sentinel2B حاشیه جنوب غربی دریاچه ارومیه برای ارزیابی روش پیشنهادی استفاده شد. با ارزیابی روش پیشنهادی در فضای ویژگی سه بعدی، معیار ارزیابی صحت کلی، خطای از دست‌رفته و هشدار اشتباه به ترتیب ۹۲/۰۶، ۹/۶۲ و ۶/۲۷ درصد محاسبه شدند. با مقایسه معیارهای ارزیابی این روش با سایر روش‌های متداول در این زمینه مشخص شد که روش پیشنهادی از صحت و کارایی بیشتری نسبت به روش‌های متداول در این حوزه برخوردار است. شکل ۹ صحت کلی روش پیشنهادی را به همراه سایر روش‌های متداول نشان می‌دهد. طبق شکل ۹، روش



شکل ۹. مقایسه معیار ارزیابی صحت کلی روش پیشنهادی با روش‌های متداول مقایسه شده

Multitemporal Landsat Imagery. Remote sensing. 2014; 6(5): 4173-4189.

- [3]. Huang X, Zhang L, Zhu T. Building change detection from multitemporal high-resolution remotely sensed images based on a morphological building index. IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing. 2013; 7(1): 105-115.

منابع

- [1]. Moghimi A, Ebadi H, Sadeghi V. Review of Change Detection Methods from Multitemporal Satellite Images by Pixel-Based and Object-Based Approach. Geospatial Engineering Journal. 2016; 7 (2): 99-110. [Persian]
- [2]. Rokni K, Ahmd A, Selamat A, Hazini S. Water Feature Extraction and Change Detection Using

- [4]. Cifuentes P, Malpica J.A, González-Matesanz F.J. Change Detection with SPOT-5 and FORMOSAT-2 Imageries. International Symposium on Visual Computing. 2008; 1186-1195.
- [5]. Deng J.S, Wang K, Li J, Deng Y.H. Urban Land Use Change Detection Using Multisensor Satellite Images. Soil Science Society of China. 2009; 19(1): 96-103.
- [6]. Correa Y.T.S, Bovolo F, Bruzzone L. Change detection in Very High Resolution multisensor optical images. Image and Signal Processing for Remote Sensing XX. October 2014.
- [7]. Liu G, Delon J, Gousseau Y, Tupin F. Unsupervised change detection between multi-sensor high resolution satellite images. 24th European Signal Processing Conference. Budapest, Hungary. 2016.
- [8]. Ali Baig M.H, Zhang L, Shuai T, Tong Q. Derivation of a tasseled cap transformation based on Landsat 8 at-satellite reflectance. Remote Sensing Letters. 2014; 5(5): 423-431.
- [9]. Nedkov R. Orthogonal transformation of segmented images from the satellite Sentinel-2. Comptes rendus de l'Academie bulgare des Sciences. 2017; 70(5): 687-692.
- [10]. Huang C, Wylie B, Yang L, Homer C, Zylstra G. Derivation of a tasseled cap transformation based on Landsat 7 at-satellite reflectance. International journal of remote sensing. 2002; 23(8): 1741-1748.
- [11]. Kauth R.J, Thomas G.S. The Tasseled Cap - A Graphic Description of the Spectral-Temporal Development of Agricultural Crops as Seen by LANDSAT. LARS Symposia. 1976.
- [12]. Rahman, S, Mesev V. Change Vector Analysis, Tasseled Cap, and NDVI-NDMI for Measuring Land Use/Cover Changes Caused by a Sudden Short-Term Severe Drought: 2011 Texas Event. Remote sensing. 2019; 11(19): 1-21.
- [13]. Thakkar A, Desai V, Patel A, Potdar M. An effective hybrid classification approach using tasseled cap transformation (TCT) for improving classification of land use/land cover (LU/LC) in semi-arid region: a case study of Morva-Hadaf watershed, Gujarat, India. Arabian journal of Geoscience. 2016; 9: 180.
- [14]. Yarbrough L.D, Easson, G, Kuszmaul J.S. Using At-Sensor Radiance and Reflectance Tasseled Cap Transforms Applied to Change Detection for the ASTER Sensor. Aster. 2005; 2:141-145.
- [15]. Minu S, Shetty A. A Comparative Study of Image Change Detection Algorithms in MATLAB. Aquatic Procedia. 2015; 4: 1366-1373.
- [16]. Jensen J.R. Introductory Digital Image Processing: A Remote Sensing Perspective 4th ed. Pearson Series in Geographic Information Science; 2015.
- [17]. Sadeghi V. Development of fuzzy logic thresholding technique for automatic changes detection in satellite imagery. PhD thesis. KNT University of Technology. 1395. [Persian]
- [18]. Ghorbani A, Sadeghi V, Ranjbari A. Change detection in optical multi-sensor remote sensing images using biophysical transformations correction. 12th National Congress of Civil Engineering. 2020. [Persian]
- [19]. Teng S.P, Chen Y.K, Cheng K.S, Lo H.C. Hypothesis-test-based landcover change detection using multi-temporal satellite images—A comparative study. Advances in Space Research, 2008; 41(11): 1744-1754.
- [20]. Thill M. The Relationship between the Mahalanobis Distance and the Chi-Squared Distribution. <https://markusthill.github.io/mahalanbis-chi-squared>. 2017.
- [21]. Ghosh A, Mishra N.S, Ghosh S. Fuzzy clustering algorithms for unsupervised change detection in remote sensing images. Information Sciences. 2011; 181(4): 699-715.
- [22]. Desclée B, Bogaert P, Defourny P. Forest change detection by statistical object-based method. Remote Sensing of Environment. 2006; 102 (1): 1-11.
- [23]. Li H, Zhang S, Ding X, Zhang C, Dale P. Performance evaluation of cluster validity indices (CVIs) on multi/hyperspectral remote sensing datasets. Remote Sensing. 2016; 8(4): 2-22.
- [24]. Ghosh A, Mishra N.S, Ghosh S. Fuzzy clustering algorithms for unsupervised change detection in remote sensing images. Information Sciences, 2011; 181(4): 699-715.
- [25]. Patra S, Ghosh S, Ghosh A. Histogram thresholding for unsupervised change detection of remote sensing images. International Journal of Remote Sensing. 2011; 32(21): 6071-6089.