

پایش تغییرات دریاچه زریبار کردستان با استفاده از شاخص‌های طیفی تفاضل نرمال و تصاویر لندست در سامانه Google Earth Engine

حسین یوسفی^۱، حسن ترابی پوده^{۲*}، علی حق‌زاده^۳، آرمان صمدی^۴، آزاده ارشیا^۵، یزدان یاراحمدی^۶

- ۱- دانشیار گروه انرژی‌های نو و محیط‌زیست، دانشکده علوم و فنون نوین، تهران، ایران
۲- دانشیار گروه مهندسی آب، دانشکده کشاورزی و منابع طبیعی، دانشگاه لرستان، خرم‌آباد، ایران
۳- دانشیار گروه مهندسی آبخیزداری، دانشکده کشاورزی و منابع طبیعی، دانشگاه لرستان، خرم‌آباد، ایران
۴- دانش‌آموخته کارشناسی ارشد سنجش از دور و GIS، دانشگاه تهران، تهران، ایران
۵- دانشجوی دکتری سازه‌های آبی، دانشکده کشاورزی و منابع طبیعی، دانشگاه لرستان، خرم‌آباد، ایران
۶- دانشجوی دکتری علوم و مهندسی آبخیز، دانشکده منابع طبیعی و علوم زمین، دانشگاه کاشان، کاشان، ایران
*نویسنده مسئول: torabi.ha@lu.ac.ir

تاریخ پذیرش مقاله: ۱۴۰۰/۰۲/۲۶

تاریخ دریافت مقاله: ۱۴۰۰/۰۱/۰۲

چکیده

دریاچه‌ها از منابع ملی باارزش هر کشور محسوب می‌شوند و بررسی تغییرات سطح و حجم آب دریاچه‌ها به منظور حفاظت آن‌ها و همچنین برای تصمیم‌گیری و مدیریت بهتر منابع آب، همواره از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است. بررسی تغییرات در سال‌های اخیر در بین کشورها جایگاه ویژه‌ای پیدا کرده است. در این پژوهش به پایش تغییرات مساحت دریاچه زریبار واقع در استان کردستان در بازه زمانی بلندمدت ۳۶ ساله ۱۹۸۴-۲۰۲۰ پرداخته شده است. قابل ذکر است که در این مطالعه از سامانه Google Earth Engine یا به اختصار GEE استفاده شد که سامانه‌ای نوپا و بسیار کاربردی در سال‌های اخیر است. این سامانه، حجم بالایی از اطلاعات را با کمترین زمان در دسترس قرار می‌دهد. در پژوهش حاضر با استفاده از تصاویر ماهواره‌ای لندست ۵ و ۸ و سامانه GEE و الگوریتم‌های طیفی NDWI و MNDWI در کمترین زمان و هزینه، جداسازی پهنه آبی از سایر پدیده‌ها با استفاده از آستانه‌گذاری صورت گرفت و تغییرات بلندمدت مساحت آن بررسی شد. تغییرات یادشده برای مدیریت منابع آبی و نیز مدیریت بحران در منطقه با توجه به اهمیت دریاچه زریبار، حائز اهمیت است. اعتبارسنجی نتایج و مقایسه بین شاخص‌ها برای دریاچه زریبار نشان داد که شاخص MNDWI با ضریب کاپای ۰/۹۴ و دقت کلی ۹۷ درصد برای دوره اخیر، شاخصی بسیار مناسب برای این منطقه محسوب می‌شود و نتایج آن از شاخص NDWI بسیار بهتر و در نتیجه کارآمدتر است. نوسانات سطح دریاچه زریبار در بازه زمانی بلندمدت ۳۶ ساله، زیاد بوده است. به‌طور نمونه میانگین سطح دریاچه در بازه زمانی ۱۹۸۴-۱۹۹۵ با شاخص MNDWI ۸۵۲/۹۶۰ هکتار بوده و در بازه زمانی ۲۰۱۵-۲۰۲۰ با همین شاخص، ۹۸۹/۳۷۱ هکتار است. توصیه می‌شود پژوهشگران، برنامه‌ریزان و کاربران اجرایی از شاخص‌های طیفی و سامانه GEE با توجه به قابلیت‌های بالایی که دارند برای شناسایی روند تغییرات پهنه‌های آبی در مدیریت منابع آب بهره گیرند.

واژه‌های کلیدی: پهنه آبی، زریبار، سامانه گوگل ارث انجین، MNDWI، NDWI.

مقدمه

زیادی دارد (گودرزی و وفایی نژاد، ۱۳۹۸). بیشتر پهنه‌های آبی به‌طور طبیعی ایجاد می‌شوند ولی برخی از آن‌ها ساخته‌ی دست بشر هستند (وفایی نژاد و همکاران، ۱۳۹۳). پهنه آبی معمولاً به انباشت حجم زیادی از آب مانند اقیانوس‌ها، دریاها،

بررسی تغییرات پهنه‌های آبی با توجه به میزان تأثیرگذاری این تغییرات بر محیط پیرامون و با توجه به آستانه‌ی بالای حساسیت زیست‌محیطی این پدیده، اهمیت

خشک‌سالی و بسیاری موضوعات مختلف دیگر قابل‌بررسی است. پژوهشگران در سال‌های اخیر و با روی کار آمدن این سامانه برای تحقیقات سنجش‌ازدور، کشاورزی، مدیریت بلایای طبیعی، پیش‌بینی شیوع بیماری و موضوعات متعدد دیگر از آن بهره می‌گیرند.

در این مطالعه از تصاویر لندست و شاخص‌های NDWI و MNDWI برای تشخیص پهنه آبی (دریاچه زریوار کردستان) استفاده شده است. شاخص تفاضل نرمال‌شده آب (NDWI) و شاخص تفاضل نرمال‌شده آب اصلاح‌شده (MNDWI) از شاخص‌های جهانی شناخته شده‌اند.

(Hesham et al. 2013) با استفاده از تصاویر ماهواره‌ای، تالاب دلتای نیل طی سال‌های ۱۹۷۳ تا ۲۰۱۱ را بر اساس شاخص‌های NDWI و MNDWI مورد بررسی قرار دادند. نتایج نشان داد به علت مصارف کشاورزی، قسمت جنوبی تالاب، ۴۲/۸ درصد از آب خود را ازدست‌داده است.

(Sarp and Ozcelik 2017) از شاخص‌های NDWI و MNDWI و روش طبقه‌بندی SVM برای استخراج پهنه‌های آبی استفاده کردند. نتایج پژوهش بر کارایی بهتر شاخص MNDWI و روش SVM تأکید داشت.

(Zou et al. 2017) کاهش مداوم سطح آب را در اوکلاهاما طی سال‌های ۱۹۸۴ تا ۲۰۱۴ بررسی کردند و از تصاویر لندست و شاخص‌های NDWI و MNDWI در مطالعه خود بهره گرفتند. Wang (2018) به مطالعه چند شاخص طیفی از جمله NDWI و MNDWI روی تصاویر لندست و سنتینل پرداخت و شاخص‌های مذکور را مناسب استخراج پهنه‌های آبی دانستند. ترابی و همکاران (۲۰۱۸) در پژوهشی وضعیت دریاچه بختگان را در سال‌های ۱۹۹۱، ۲۰۰۰، ۲۰۱۰ و ۲۰۱۷ مورد بررسی قرار دادند. در پژوهش یادشده از تصاویر ماهواره‌ای لندست و روش نظارت‌شده بیشترین شباهت، استفاده شد. همچنین با استفاده از روش شبکه عصبی پرسپترون چندلایه، کلاس‌ها طبقه‌بندی شد. در نتایج به‌دست‌آمده صحت کلی و ضریب کاپا به ترتیب ۸۹ درصد و ۰/۸۵ محاسبه شدند.

(Wang et al. 2019) با استفاده از سامانه گوگل ارث انجین به ارزیابی تغییرات پهنه‌های آبی با بررسی پویایی طولانی‌مدت دریاچه پویانگ پرداختند و آن را ابزاری مناسب برای این مطالعات معرفی کردند.

دریاچه‌ها گفته می‌شود اما می‌تواند انباشت‌های کوچک آب مانند آبگیرها و تالاب‌ها و غیره نیز باشد. پهنه آبی فقط شامل آب‌های ساکن یا محاصره‌شده نیست بلکه رودها، جویبارها، کانال‌ها و دیگر مواردی که در آن‌ها آب از محلی به محل دیگری می‌رود نیز به‌عنوان پهنه آبی در نظر گرفته می‌شود (علی‌بخشی و همکاران، ۱۳۹۹).

بررسی روند تغییرات مساحت پهنه‌های آبی، یکی از ابزارهای مهم در برنامه‌ریزی و توسعه به‌شمار می‌آید. در دهه‌های گذشته، پایش تغییرات مساحت پهنه آبی در بازه‌های زمانی مختلف به‌عنوان یک پژوهش زیربنایی موردتوجه واقع شده است، زیرا مساحت پهنه‌های آبی، ماهیت دینامیکی دارد و مدیریت چنین واحدهای اکولوژیکی حساسی به کسب اطلاعات دقیق در فواصل زمانی مختلف نیاز دارد. از نظر زیست‌محیطی پهنه‌های آبی به دلیل داشتن اکوسیستم‌های حساس، اهمیت و ارزش زیادی دارند، بنابراین نیاز اساسی به ارزیابی و پایش این مناطق وجود دارد (وفایی نژاد، ۱۳۹۵؛ محمدی و همکاران، ۱۳۹۶).

با استفاده از الگوریتم‌های موجود در سنجش‌ازدور، می‌توان گام بزرگی در مدیریت منابع آب برداشت (گودرزی و وفایی نژاد، ۱۳۹۸). سامانه گوگل ارث انجین از بهترین و قدرتمندترین سامانه‌های تخصصی سنجش‌ازدور تحت وب است که در سال‌های اخیر، بسیاری از فرآیندهای پردازش تصاویر ماهواره‌ای و به‌ویژه پردازش داده‌های سری زمانی را تسهیل کرده است (علی‌بخشی و همکاران، ۱۳۹۹).

منبع مهم اطلاعاتی به کار گرفته شده در این پژوهش، سامانه گوگل ارث انجین است. با این سامانه می‌توان تمام مناطق و پوشش‌ها را با قدرت تفکیک زمانی بالا تحلیل نمود و همچنین نیازی به دانلود تصاویر ماهواره‌ای با حجم بالا ندارد. ابزارهای مبتنی بر سیستم‌های عامل محاسبات ابری برای پردازش داده‌های جغرافیایی در مقیاس بزرگ و بدون نیاز به تخصص فنی خاصی طراحی شده‌اند مانند سامانه گوگل ارث انجین که می‌تواند داده‌های موجود در پایگاه داده را پردازش کرده و نتایج مناسب را ارائه کند (Zhu et al. 2019; Wulder. 2019).

در سامانه گوگل ارث انجین، امکان استخراج اطلاعات منابع آبی مانند مساحت پهنه‌های آبی، بارش باران، سطح پوشش برف، عمق برف، آب زیرزمینی، رواناب، سیل، پایش

نحوه اندرکنش آب‌های زیرزمینی و سطحی منطقه ساحل جنوب‌شرقی این دریاچه به‌عنوان مهم‌ترین جبهه ورودی آب‌های سطحی به دریاچه، تغییرات زمانی و مکانی جریان آب زیرزمینی موردبررسی قرار گرفت. در این تحقیق، سهم آب‌های زیرزمینی در مقایسه با جریان‌های سطحی آب، در تأمین آب محدوده دریاچه ارومیه از سمت جبهه جنوب‌شرقی فقط حدود ۰/۹ درصد تعیین گردید.

خسروی و همکاران (۱۳۹۹) در مطالعه‌ای به بررسی تغییرات پهنه‌های آبی با استفاده از شاخص‌های آبی و گوگل ارث انجین در تالاب‌های شهرستان پلدختر پرداختند. ایشان تغییرات تالاب‌ها طی چهار دهه گذشته را با استفاده از تصاویر ماهواره‌ای لندست و کاربرد ۷ شاخص پهنه آبی بررسی کردند. اعتبارسنجی نتایج به‌دست‌آمده از شاخص‌ها و سرویس ارث انجین نشان داد که ابزاری مفید برای شناسایی روند افزایشی و کاهش سطح آب تالاب‌ها هستند.

شیخ‌قادر و مهدوی فرد (۱۳۹۹) در مطالعه‌ای به‌کارگیری و پردازش داده‌های حجیم چند سنجنده‌ای را در Earth Explorer (EE) Engine به‌منظور آشکارسازی تغییرات دریاچه ارومیه در فصول بارشی موردبررسی قرار دادند. نتایج نشان داد خروجی‌های حاصل از تصاویر لندست همبستگی بالایی با محصول آبی مودیس دارد و نیز سطح دریاچه ارومیه از سال ۲۰۰۰ تا ۲۰۱۹ بیش از ۲۶ درصد کاهش داشته که در این میان بیشترین کاهش سطح آب مربوط به ۲۰۰۰ تا ۲۰۱۵ با بیش از ۵۲ درصد بوده است. ایشان نتیجه گرفتند که سامانه انجین، ابزاری مفید جهت شناسایی و پایش روند تغییرات سطح دریاچه‌ها و همچنین کار با داده‌های حجیم است.

علیپور و همکاران (۱۴۰۰) در مطالعه‌ای به استفاده از الگوریتم SEBAL و تصاویر سنجنده MODIS جهت تخمین تبخیر و تعرق واقعی در حوضه آبریز دریاچه ارومیه پرداختند. الگوی مکانی تبخیر و تعرق نشان داد که اراضی کشاورزی واقع در بخش غربی، جنوبی و شرقی حوضه آبریز بیشترین مقادیر ارتفاع تبخیر و تعرق واقعی را دارند و تغییرات زمانی نشان داد که مقادیر ارتفاع تبخیر و تعرق واقعی از ماه آوریل تا ماه جولای افزایش داشته است.

Liang (2019) با استفاده از سنجش‌ازدور و شاخص MNDWI طی سال‌های ۲۰۱۴-۱۹۸۸ حوضه آبریز هونجیان را موردبررسی قرار داده و ویژگی پاسخ چندمقیاسی از مساحت دریاچه را با استفاده از تحلیل همبستگی موردبررسی قرار دادند. نتایج نشان داد که مساحت دریاچه، کاهش داشته است که البته در طی زمان، افزایش تدریجی و سپس کاهش قابل-توجه داشته است.

حیدری زادی و همکاران (۱۳۹۷) در مطالعه‌ای به ارزیابی وضعیت آب‌های زیرزمینی دشت مهران و عوامل تأثیرگذار بر کمیت این منابع با استفاده از تصاویر لندست پرداختند. بدین منظور از آمار ۲۳ حلقه چاه پیژومتری واقع در آبخوان دشت مهران در طی سال‌های آبی ۱۳۹۳-۱۳۷۳ استفاده شد و هیدروگراف آب زیرزمینی برای دشت ترسیم گردید. به‌منظور بررسی ارتباط بین کاربری اراضی و آب زیرزمینی، تغییرات نقشه کاربری اراضی در طی سه دوره زمانی ۱۳۶۸، ۱۳۸۱ و ۱۳۹۴ با استفاده از تصاویر ماهواره‌ای TM و ETM+ ماهواره لندست در منطقه مهران تهیه گردید. برای طبقه‌بندی تصاویر از روش طبقه‌بندی نظارت‌شده و روش حداکثر احتمال استفاده شد. نتایج نشان داد که در طول دوره به وسعت اراضی کشاورزی، مناطق مسکونی، مراتع خیلی فقیر و اراضی بایر افزوده شده و در مقابل از وسعت مراتع فقیر کاسته شده است. اخوان قالیباف و همکاران (۱۳۹۸) با استفاده از تصاویر ماهواره‌ای MODIS تغییرات مساحت پوشش زمین و کاربری حوضه آبخیز دریاچه ارومیه را از سال ۲۰۰۵ تا ۲۰۱۶ موردبررسی قرار دادند. نتایج نشان داد که بیشترین کاهش مساحت کاربری مربوط به پهنه‌های آبی و پوشش بیابانی است و بیشترین افزایش مساحت کاربری مربوط به اراضی زراعی و باغی است. میکائیلی و همکاران (۱۳۹۸) از تصاویر ماهواره لندست به‌منظور ارزیابی تغییرات پوشش بخش جنوبی دریاچه ارومیه در سال‌های ۲۰۰۰ و ۲۰۱۷ و شاخص NDVI استفاده کردند. نتایج نشان داد که مساحت اراضی کشاورزی و باغ، افزایش درخور توجهی داشته است و از مساحت پهنه‌های آبی و مراتع کاسته شده است.

شمشکی و کرمی (۱۳۹۸) در مطالعه‌ای به بررسی تغییرات زمانی و مکانی جریان آب زیرزمینی در ساحل جنوب‌شرقی دریاچه ارومیه پرداختند. در این پژوهش با هدف شناسایی

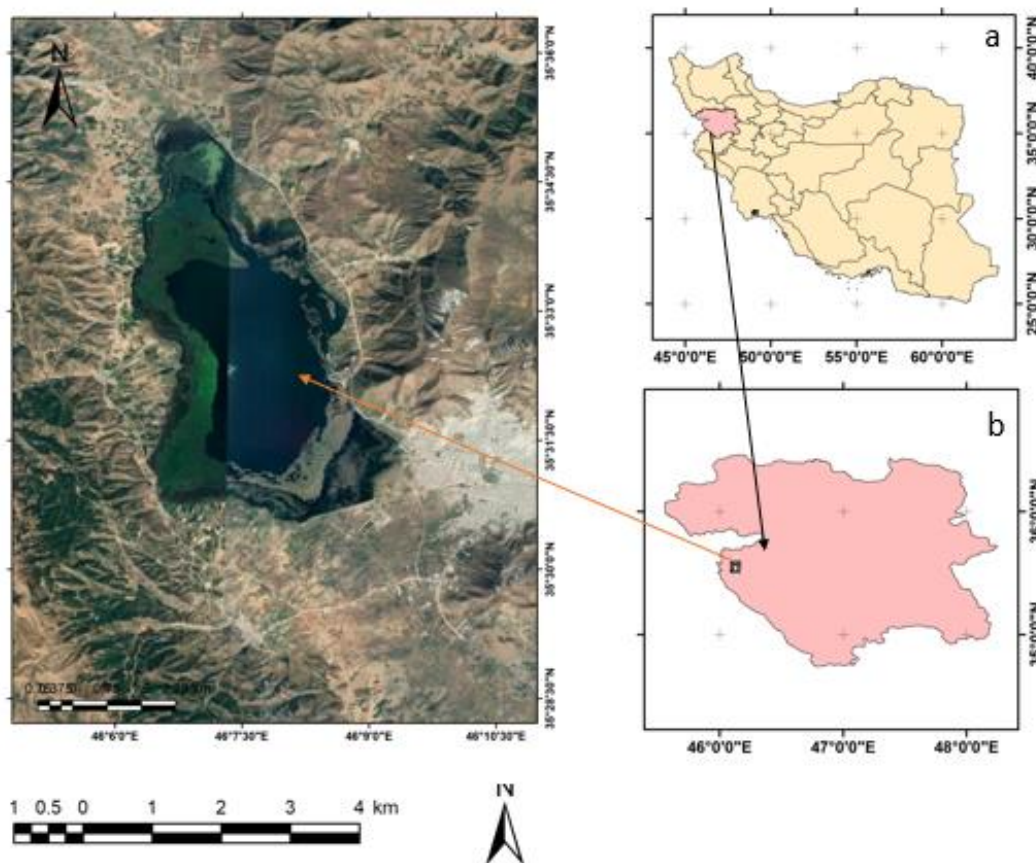
طبیعی و از بزرگ‌ترین دریاچه‌های آب شیرین ایران است و همچنین از معروف‌ترین و زیباترین جاذبه‌های طبیعی غرب کشور محسوب می‌شود. این دریاچه در فاصله ۳ کیلومتری غرب شهر مریوان واقع شده است. ارتفاع این دریاچه از سطح دریا ۱۲۸۵ متر است و اطراف آن را جنگل‌های بلوط احاطه کرده است. این منطقه با اقلیم نیمه‌مرطوب با توجه به اهمیت زیست‌محیطی و گردشگری این دریاچه در این مطالعه، تغییرات سطح آن طی یک دهه اخیر با بهره‌گیری از سامانه نوپای گوگل ارث انجین، مورد بررسی قرار می‌گیرد. در شکل ۱ موقعیت جغرافیایی منطقه مورد مطالعه در ایران و استان کردستان آورده شده است.

با توجه به اینکه گوگل ارث انجین به عنوان سامانه‌ای نو و به‌نوعی شگفت‌انگیز، توانسته است بسیاری از فرآیندهای پردازش تصاویر ماهواره‌ای را در سال‌های اخیر آسان کند و بسیار مورد توجه و استقبال پژوهشگران در موضوعات مختلف قرار گرفته است، لذا در این پژوهش از قابلیت‌های سامانه GEE استفاده می‌شود و با استفاده از شاخص‌های طیفی NDWI و MNDWI و تصاویر لندست در سامانه گوگل ارث انجین به پایش تغییرات بلندمدت دریاچه زریبار در استان کردستان پرداخته می‌شود.

مواد و روش

منطقه مورد مطالعه

در این مطالعه به بررسی تغییرات دریاچه زریبار استان کردستان پرداخته می‌شود. این دریاچه یکی از دریاچه‌های



شکل ۱- موقعیت دریاچه زریبار در ایران (a) و استان کردستان (b).

روش کار

سامانه گوگل ارث انجین (Google Earth Engine)

تا به امروز مطالعات مربوط به تغییرات پهنه‌های آبی از جمله دریاچه‌ها و موضوعاتی از این قبیل و مرتبط با تصاویر ماهواره‌ای با استفاده از نرم‌افزارهای تخصصی مانند ENVI انجام می‌گرفت. محاسبات و بررسی‌ها با استفاده از این نرم‌افزارها بسیار زمان‌بر بود و باید ابتدا تصحیحات هندسی و اتمسفری انجام می‌شد تا از درصد خطاها کاسته شود و تعداد بسیار زیادی تصویر با حجم زیاد، تولید و طبقه‌بندی شود. این عملیات علاوه بر هدر رفت زمان زیاد، نیاز به حافظه ذخیره‌سازی زیادی هم برای تصاویر داشت. با استفاده از سامانه GEE می‌توان گام بزرگی در مدیریت منابع آب و محیط اطراف آن برداشت (علی‌بخشی و همکاران، ۱۳۹۹).

در سال‌های اخیر با استفاده از گوگل ارث انجین می‌توان همه مناطق، پوشش‌ها و کاربری‌های سطح زمین را با قدرت تفکیک زمانی بالا به صورت سری زمانی تحلیل نمود. این سامانه یک پایگاه داده، تحلیل مکانی و متن‌باز (open source) است که به کاربران امکان می‌دهد تا کاربرد تصاویر ماهواره‌ای بلندمدت را لمس و تجزیه و تحلیل کنند.

گوگل ارث انجین جدیدترین پلتفرم پردازش‌های زمین است که با فراهم آوردن امکان دسترسی آزاد کاربران به مجموعه داده‌های سنجنده‌ها، فرآیند کشف علمی را هموار می‌کند (تمیمی نیا و همکاران، ۲۰۲۰). در این سامانه کاربران از طریق یک رابط برنامه‌نویسی مبتنی بر اینترنت (AIP) و یک محیط توسعه تعاملی مبتنی بر وب به GEE دسترسی می‌یابند (Gorelick et al., 2017). قابلیت‌های شگفت‌انگیز این سامانه فرصت‌های بی‌سابقه‌ای برای استفاده از این پلتفرم برای پردازش و تفسیر داده‌های حجیم فراهم می‌کند و در زمینه‌های بسیار متعددی مورد توجه قرار گرفته است (امانی و همکاران، ۲۰۱۹).

سامانه GEE در برخی موارد، بیش از ۴۰ سال تصاویر ماهواره‌ای گذشته، حال و آینده را درون خود، جای داده است. این تصاویر همراه با ابزار و محاسبات لازم برای تجزیه و تحلیل‌های پیشرفته مکانی، می‌تواند پژوهشگران را به مطالعات فرا تحلیلی برساند (تافته و همکاران، ۱۳۹۹).

شناسایی دریاچه در سامانه Google Earth Engine

در سامانه گوگل ارث انجین کد نویسی برای فیلتر کردن زمان، منطقه مورد مطالعه، تعیین اندازه پیکسل‌ها و انتخاب نوع محصول مدنظر برای پژوهش انجام می‌شود. به منظور محاسبه مساحت دریاچه زیربار برای هر کدام از تصاویر، شاخص‌های NDWI و MNDWI محاسبه می‌شوند و سپس بر اساس آستانه گذاری برای هر تصویر، مساحت پهنه آبی و تغییرات آن مورد محاسبه و بررسی قرار می‌گیرد. البته به علت تعداد بالای تصاویر، فقط نمونه‌هایی از آن‌ها در شکل‌های ۲ و ۳ این پژوهش آورده شده است. تعداد ۲۲۳ تصویر ماهواره لندست از دریاچه زیربار در بازه زمانی بلندمدت ۳۶ ساله از ۱۹۸۴ تا ۲۰۱۱ در این مطالعه استفاده شده است که با وجود سامانه گوگل ارث انجین نیازی به بارگیری تصاویر نبوده و در کمترین زمان با کدنویسی در اختیار قرار می‌گیرند.

تصاویر لندست

با توجه به آرشو بسیار غنی که تصاویر ماهواره سری لندست دارد، یکی از باارزش‌ترین تصاویر ماهواره‌ای در مطالعات علوم طبیعی است. این تصاویر از ۵۰ سال گذشته به صورت مستمر از سطح زمین تصویربرداری کرده است. در این پژوهش از تصاویر ماهواره سنجنده TM لندست ۵ و سنجنده OLI لندست ۸ برای بررسی میزان تغییرات پهنه آبی منطقه مورد مطالعه استفاده شده است. در این مطالعه از سال ۱۹۸۴ تا ۲۰۱۱ از تصاویر لندست ۵ و از سال ۲۰۱۳ تا آخر سال ۲۰۲۰ از تصاویر لندست ۸ استفاده شده است.

شاخص‌های طیفی

از جمله شاخص‌های طیفی برای استخراج پهنه‌های آبی، شاخص‌های NDWI و MNDWI هستند. این شاخص‌ها بر اساس میزان حساسیت بازتاب‌های مختلف در محدوده طیفی بین آب و غیر آب طراحی شده‌اند.

شاخص تفاضل نرمال شده آب (NDWI)

یکی از شاخص‌های جهانی که در زمینه شناسایی مناطق آبی مورد استفاده قرار می‌گیرد، شاخص NDWI است. این شاخص برای به حداکثر رساندن بازتاب آب با استفاده از

صحت کلی (Overall accuracy = OA) از جمع عناصر قطر اصلی ماتریس خطا تقسیم بر تعداد کل پیکسل‌ها طبق رابطه ۳ به دست می‌آید.

$$OA = 1/n \sum P_{ij} \quad (3)$$

ضریب کاپا (Kc) نیز از دیگر روش‌های اعتبارسنجی نتایج است که از رابطه ۴ محاسبه می‌شود (Guide, 2008).

$$Kc = n \times Stotal \sum_{i=1}^r (s_i s_j / n) - \sum_{i=1}^r s_i s_j \quad (4)$$

که در آن، Stotal مجموع پیکسل به درستی طبقه‌بندی شده، n تعداد کل پیکسل‌ها، r تعداد سطرهای اعتبارسنجی، Si مجموع حاشیه‌ای ردیف i، Sj مجموع حاشیه‌ای از ستون j هستند.

نتایج و بحث

نتایج شاخص‌های طیفی

به منظور شناسایی پهنه‌های آبی در این پژوهش از دو شاخص MNDWI و NDWI استفاده شد که به علت تعداد بالای تصاویر، دو نمونه از این تصاویر در شکل ۲ برای سال‌های ۱۹۸۴ و ۲۰۲۰ به صورت سالانه نمایش داده شده است. همان‌طور که در شکل‌ها مشاهده می‌شود، هر چه مقدار عددی شاخص‌های شناسایی پهنه آبی بیشتر شده است و درواقع به سمت رنگ روشن در تصاویر رفته است، توانسته که آب را تشخیص دهد و بلعکس در قسمت‌های تیره که مقدار عددی شاخص، پایین است، درواقع نشان‌دهنده پدیده‌های غیرآب است.

سطح دریاچه در بلندمدت تغییرات زیادی داشته و در سال‌هایی کم و در سال‌هایی افزایش پیدا کرده است که می‌تواند علل مختلفی داشته باشد که در این مطالعه، تغییرات بارندگی طی سال‌های مورد مطالعه مدنظر قرار گرفته و مقایسه شده است. در شکل ۳ هم که نتیجه شناسایی پهنه‌ی آبی بر اساس آستانه‌گذاری در شاخص‌ها (به صورت رنگی) آورده شده است تا پهنه آبی شناسایی شده، قابل تشخیص باشد.

طول موج سبز، به حداقل رساندن بازتاب کم NIR با ویژگی‌های آب و بازتاب زیاد NIR توسط ویژگی‌های پوشش گیاهی و خاک طراحی شده است. NIR و Green به ترتیب مقادیر بازتابی طیفی به دست آمده در بخش مادون قرمز نزدیک و سبز طیف الکترومغناطیسی هستند. مقادیر NDWI بین ۱- تا ۱+ است که مقادیر منفی یا نزدیک به صفر به معنای غیر آب است و مقادیر نزدیک به ۱+ نشان‌دهنده رطوبت بسیار زیاد است. رابطه ۱ مربوط به شاخص NDWI است (McFeeters, 1996).

$$NDWI = (B_{Green} - B_{NIR}) / (B_{Green} + B_{NIR}) \quad (1)$$

شاخص تفاضل نرمال شده آب اصلاح شده (MNDWI)

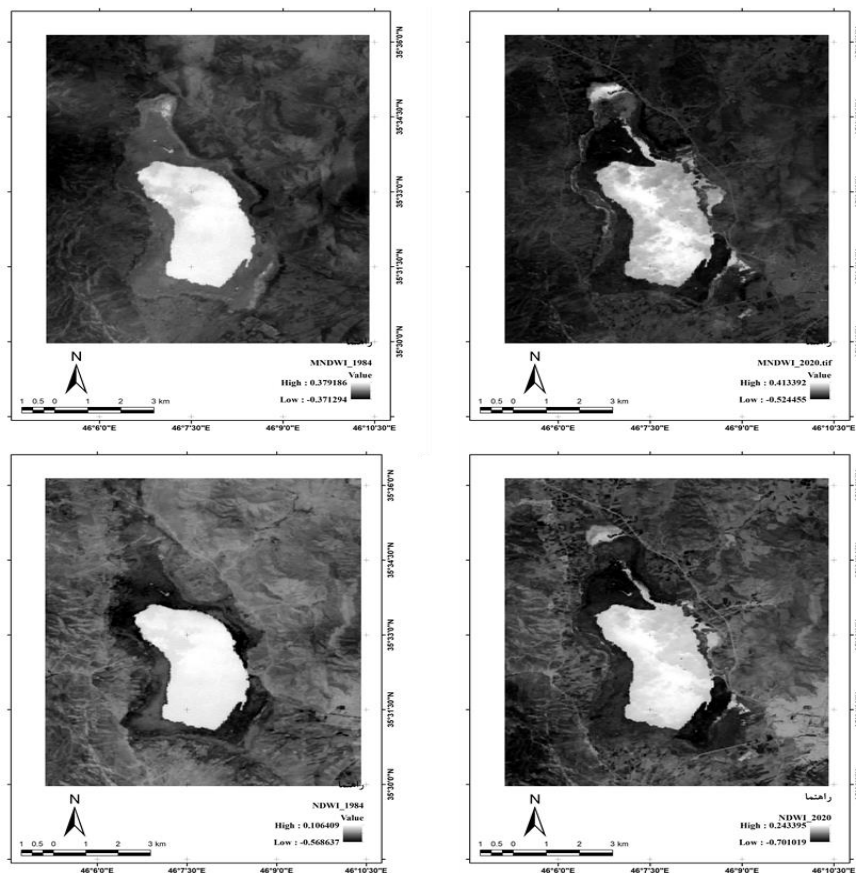
شاخص‌های طیفی مختلفی وجود دارد که می‌توان بر اساس آن‌ها پهنه‌های آبی را بر روی تصاویر ماهواره‌ای شناسایی کرد. یکی از این شاخص‌های معروف و کاربردی MNDWI است که بهبود یافته شاخص NDWI است. یکی از مهم‌ترین شاخص‌هایی که در زمینه شناسایی مناطق آبی مورد استفاده قرار می‌گیرد، شاخص MNDWI است. این شاخص به منظور بارز کردن ویژگی‌های آب در تصاویر، طراحی شده است که می‌تواند به خوبی مناطق آبی مختلط با پوشش گیاهی و مناطق شهری را بارز سازی کند و طبق رابطه ۲ عمل می‌کند. (Xu, 2006).

$$MNDWI = (B_{Green} - B_{SWIR-1}) / (B_{Green} + B_{SWIR-1}) \quad (2)$$

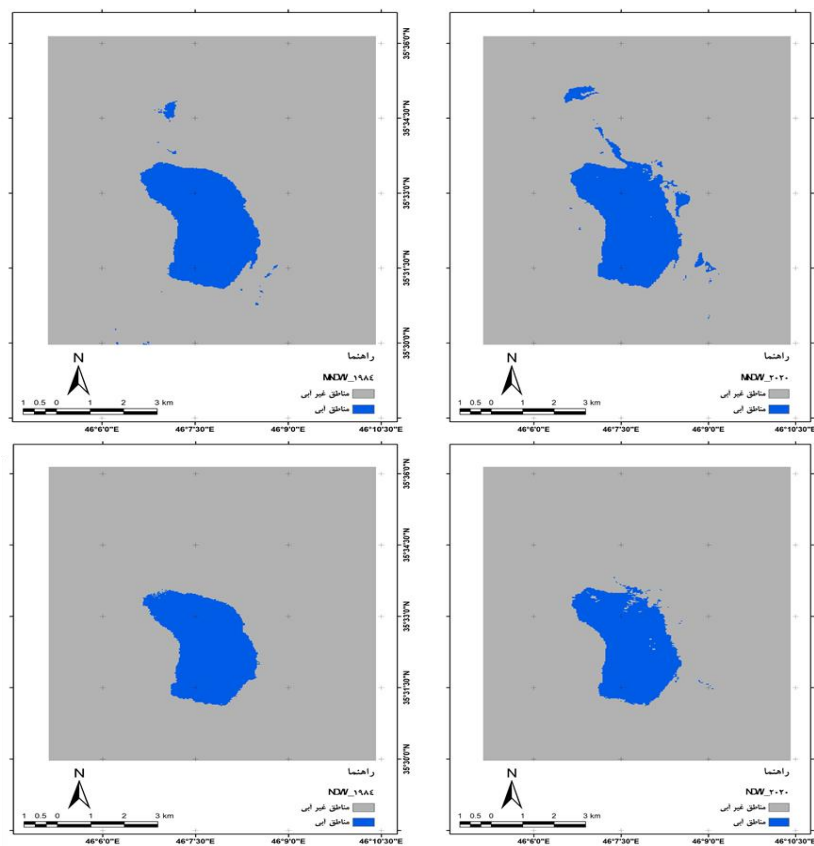
در این رابطه Green نشان‌دهنده باند طیفی Green است که بالاترین بازتاب را برای آب دارد و SWIR باند مادون قرمز طول موج کوتاه است.

اعتبارسنجی

برای اعتبارسنجی نتایج می‌توان از روش‌های صحت کلی و ضریب کاپا استفاده کرد. صحت کلی بیانگر میزان اعتبار نتایج است که در نقشه‌های استخراج شده از تصاویر ماهواره‌ای، میزان حداقل ۸۵ درصد قابل قبول است (Banko, 1998). روش



شکل ۲- اعمال شاخص‌های طیفی روی تصاویر به‌منظور شناسایی پهنه‌ی آبی.

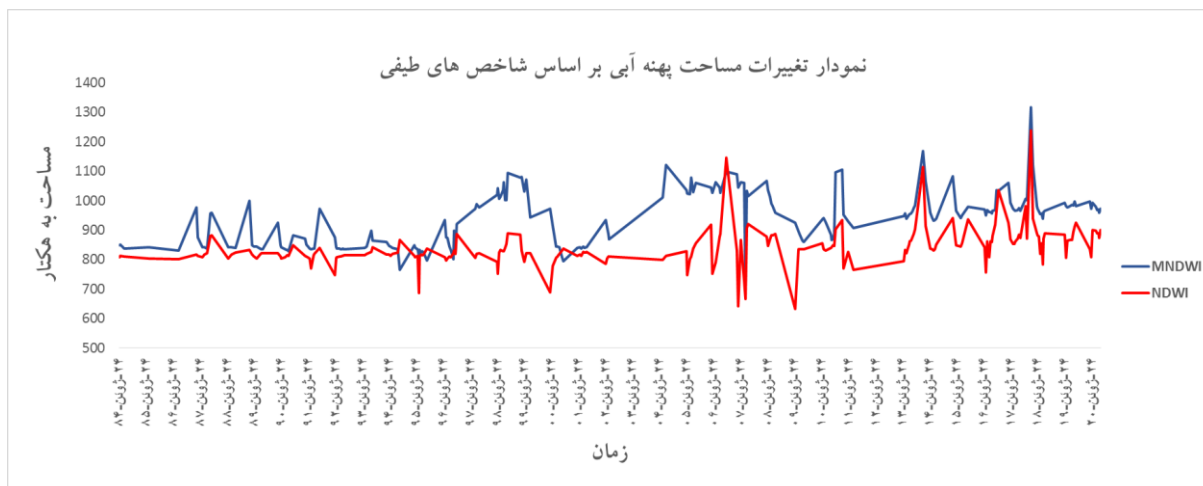


شکل ۳- شناسایی پهنه‌ی آبی بر اساس آستانه گذاری در شاخص‌ها.

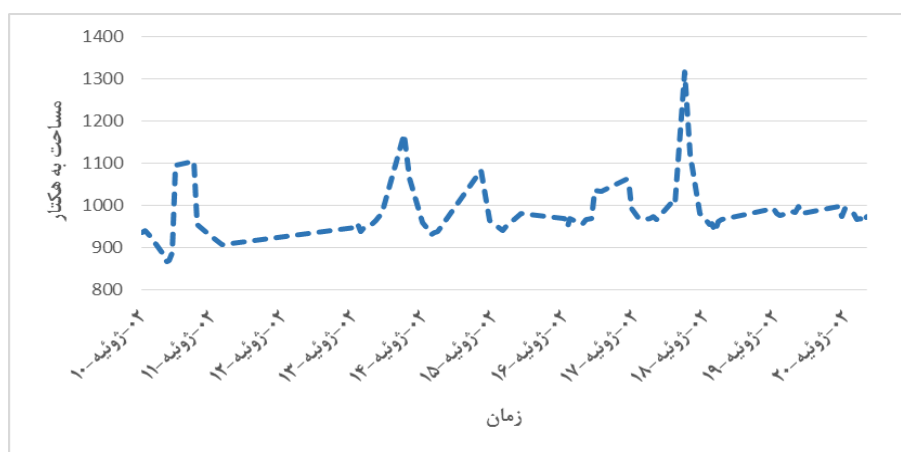
بررسی روند تغییرات مساحت دریاچه

نمودار نوسانات بارندگی دهه اخیر نیز به منظور مقایسه در شکل ۶ آورده شده است و می توان تغییرات سطح دریاچه را با آن مقایسه کرد. در سال های دارای بارش بیشتر، سطح دریاچه نیز افزایش داشته است، همانند سال ۲۰۱۸ که بارش بالایی داشته و سطح دریاچه نیز بیشتر شده است. درواقع نوسانات زیاد دریاچه در فصول مختلف می تواند ناشی از عوامل مختلفی همچون سیلاب ها و برداشت های بی رویه از دریاچه و همچنین تغییرات و نوسانات رژیم بارندگی و خشک سالی ها باشد که در این مطالعه به عامل بارندگی اشاره شده است و نمودارهای مربوط نیز مورد مقایسه قرار گرفته شده است.

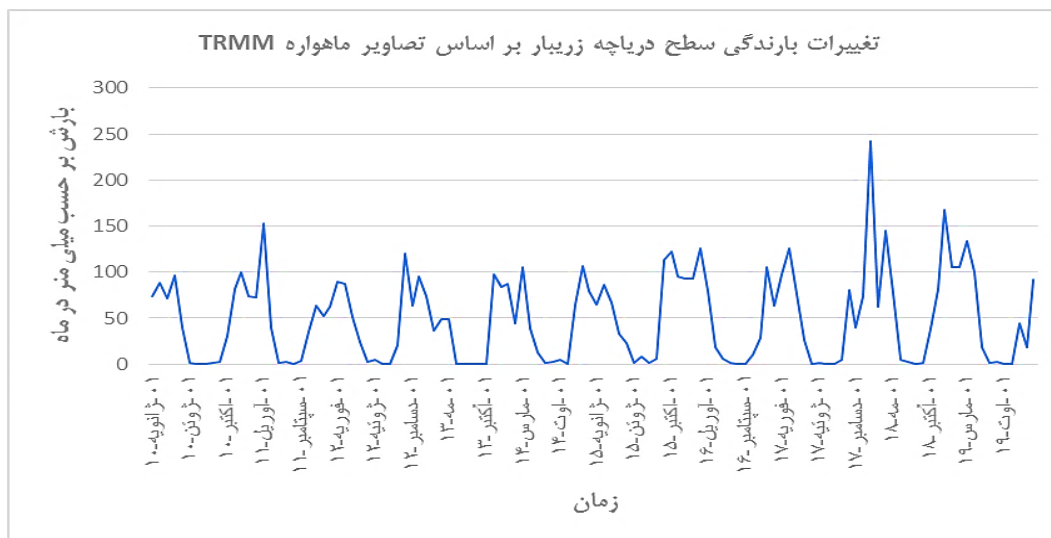
بررسی تغییرات مساحت دریاچه زیربار با استفاده از تصاویر ماهواره لندست ۵ و ۸ در شکل ۴ نمایش داده شده است و به علت بالا بودن تعداد داده ها و تصاویر، مقادیر یک ماه به طور نمونه برای بازه بلندمدت مورد مطالعه، آورده شده است. مقادیر میانگین، حداقل و حداکثر مساحت در تاریخ های مختلف در جدول ۱ آورده شده است. نکته حائز اهمیت، روند تغییرات و درواقع میزان نوسانات سطح دریاچه طی سال های اخیر است که بیشترین نوسانات در بازه های زمانی اخیر رخ داده است. نوسانات سطح دریاچه در بازه زمانی یک دهه اخیر با استفاده از شاخص MNDWI در شکل ۵ آورده شده است.



شکل ۴- روند تغییرات بلندمدت مساحت دریاچه زیربار با استفاده از تصاویر ماهواره لندست ۵ و ۸.



شکل ۵- تغییرات سطح دریاچه زیربار در یک دهه اخیر-شاخص MNDWI (۲۰۱۰-۲۰۲۰).



شکل ۶- تغییرات بارندگی منطقه در بازه زمانی ۲۰۲۰-۲۰۱۰.

جدول ۱- پارامترهای مختلف آماری برای محاسبه مساحت برحسب هکتار با استفاده از شاخص‌های طیفی.

شاخص NDWI	شاخص MNDWI	پارامترهای آماری
۸۳۹/۵۸۳	۹۳۴/۸۱۲	میانگین
۱۲۳۷/۵۴۲	۱۳۱۷/۵۹۶	حداکثر
۶۳۱/۷۸۳	۷۲۰	حداقل

محاسبات و مقایسه دو شاخص نشان می‌دهد که شاخص MNDWI مقادیر بالاتری از شاخص NDWI را نشان می‌دهد. حاصل در ۴ دوره زمانی مختلف برای هر دو شاخص طیفی، موردبررسی قرار گرفته است. نتایج در جدول ۲ نشان داده شده به‌منظور بررسی روند تغییرات و نوسانات سطح دریاچه، نتایج است.

جدول ۲- تغییرات سطح دریاچه زیربار در بازه‌های زمانی مختلف (هکتار).

دوره زمانی	حداقل MNDWI	حداکثر MNDWI	میانگین MNDWI
۱۹۸۴-۱۹۹۵	۷۶۶/۰۶۴	۹۹۹/۴۵۲	۸۵۲/۹۶۰
۱۹۹۵-۲۰۰۵	۷۹۴/۵۲۴	۱۱۲۰/۲۹۸	۹۳۹/۳۴۱
۲۰۰۵-۲۰۱۵	۷۲۰	۱۱۶۹/۰۱۵	۹۷۶/۱۴۸
۲۰۱۵-۲۰۲۰	۹۳۷/۹۴۹	۱۳۱۷/۵۹۶	۹۸۹/۳۷۱
دوره زمانی	حداقل NDWI	حداکثر NDWI	میانگین NDWI
۱۹۸۴-۱۹۹۵	۶۸۵/۶۳۲	۸۸۱/۵۷۸	۸۱۴/۲۸۵
۱۹۹۵-۲۰۰۵	۶۸۸/۶۹۳	۸۸۸/۱۵۲	۸۱۵/۵۱۸
۲۰۰۵-۲۰۱۵	۶۳۱/۷۸۳	۱۱۴۵/۸۱۱	۸۵۲/۱۰۷
۲۰۱۵-۲۰۲۰	۷۵۵/۵۱	۱۲۳۷/۵۴۲	۸۸۴/۹۳۴

اعتبارسنجی نتایج و مقایسه شاخص‌ها برای منطقه
 به‌منظور اعتبارسنجی نتایج، بازه زمانی ۱۹۸۴ و ۲۰۲۰ را شده است.
 مدنظر قرار داده و بر اساس ضریب کاپا و دقت کلی، مقایسه‌ای

جدول ۳ - اعتبارسنجی نتایج و مقایسه بین شاخص‌ها برای دریاچه زریوار.

سال	ضریب کاپا/ شاخص MNDWI	دقت کلی/ شاخص MNDWI
۱۹۸۴	۰/۹۲	۹۵ درصد
۲۰۲۰	۰/۹۴	۹۷ درصد
سال	ضریب کاپا/ شاخص NDWI	دقت کلی/ شاخص NDWI
۱۹۸۴	۰/۸۶	۹۱ درصد
۲۰۲۰	۰/۸۳	۸۶ درصد

در چند سال اخیر، سامانه نوپا و بسیار کاربردی گوگل ارث انجین روی کار آمده است که به کاربران این امکان را می‌دهد که در کمترین زمان و بدون نیاز به دانلود حجم بسیار بالایی از تصاویر و بدون نیاز به تصحیحات رایج در نرم‌افزارهای سنجش‌ازدور، بیشترین بررسی‌ها و مطالعات صورت گیرد. در این مطالعه برای اولین بار تغییرات بلندمدت مساحت دریاچه زریوار واقع در استان کردستان با استفاده از سامانه GEE و تصاویر لندست و شاخص‌های طیفی NDWI و MNDWI انجام شد. بر اساس نتایج حاصل، میانگین مساحت دریاچه طی بازه زمانی مورد مطالعه بر اساس MNDWI مقداری برابر با ۹۳۴/۸۱۲ هکتار و بر اساس شاخص NDWI مقداری برابر با ۸۳۹/۵۸ هکتار بوده است. به منظور بررسی روند تغییرات و نوسانات سطح دریاچه، نتایج حاصل در ۴ دوره زمانی مختلف گذشته و سال‌های اخیر برای هر دو شاخص طیفی، مورد بررسی قرار گرفت که نشان از نوسانات زیاد در سال‌های اخیر داشت. تغییرات سطح پهنه آبی می‌تواند علل مختلفی داشته باشد که از مهم‌ترین آن‌ها تغییرات بارندگی است. در این مطالعه نیز عامل بارندگی مدنظر قرار گرفت و نمودار تغییرات بارندگی و مقایسه آن با تغییرات سطح دریاچه نیز ارائه شد.

اعتبارسنجی نتایج و مقایسه بین شاخص‌ها برای دریاچه زریوار نشان داد که شاخص MNDWI با ضریب کاپای ۰/۹۲ و دقت کلی ۹۵ درصد برای بازه زمانی گذشته و همچنین با ضریب کاپای ۰/۹۴ و دقت کلی ۹۷ درصد، شاخصی بسیار مناسب برای این منطقه محسوب می‌شود و نتایج آن از شاخص NDWI بسیار بهتر و در نتیجه کارآمدتر است. دریاچه‌ها از باارزش‌ترین منابع ملی هر کشوری محسوب می‌شوند. برای مدیریت بهتر آن‌ها لازم است که تغییرات و نوسانات دریاچه‌ها

بر اساس این نتایج، شاخص MNDWI نتایج بهتری ارائه کرده است. مقادیر دقت کلی و ضریب کاپا برای شاخص MNDWI هم برای سال ۱۹۸۴ و هم برای سال ۲۰۲۰ بیشتر از مقادیر دقت کلی و ضریب کاپا برای این سال‌ها با استفاده از شاخص NDWI است؛ بنابراین این شاخص برای مطالعه تغییرات دریاچه زریوار، مناسب‌تر است. خسروی و همکاران (۱۳۹۹) نیز که تغییرات پهنه‌های آبی را با استفاده از شاخص‌های آبی و گوگل ارث انجین بررسی کرده بودند از اعتبارسنجی نتایج به‌دست‌آمده از شاخص‌ها و سرویس گوگل ارث انجین، نشان دادند که ابزاری مفید برای شناسایی روند افزایشی و کاهشی سطح آب تالاب‌ها هستند. نتایج مطالعه Sarp and Ozcelik (2017) نیز بر کارایی بهتر شاخص MNDWI و روش SVM تأکید داشتند و لیانگ (۲۰۱۹) نیز شاخص MNDWI را مناسب بررسی تغییرات مساحت دریاچه معرفی کرد. شیخ قادری و مهدوی فرد (۱۳۹۹) نیز نتیجه گرفتند که سامانه انجین، ابزاری مفید جهت شناسایی و پایش روند تغییرات سطح دریاچه‌ها و همچنین کار با داده‌های حجیم است. نکته حائز اهمیت اینکه در این مطالعه، بحث روی حجم آب نبوده، بلکه تغییرات سطح یک پهنه آبی (دریاچه زریوار) با استفاده از سامانه نوپا و بسیار کاربردی گوگل ارث انجین مدنظر بوده است که هم تغییرات سطح این دریاچه در بلندمدت مورد بررسی قرار گرفت و هم کاربرد این سامانه و شاخص‌های طیفی مذکور برای این منطقه بررسی شدند.

نتیجه‌گیری

استفاده از فنون سنجش‌ازدور و کاربرد تصاویر ماهواره‌ای با تفکیک مکانی متوسط و بالا که امکان پایش تغییرات در گذشته و حال را مقدور می‌سازد، بسیار مؤثر و کارآمد است.

دریاچه ارومیه در فصول بارشی. اولین کنفرانس ملی داده-کاوی در علوم زمین، دانشکده مهندسی علوم زمین. علی‌بخشی، ت.، عزیزی، ز.، وفایی‌نژاد، ع.، آقامحمدی زنجیرآبادی، ح.، ۱۳۹۹. بررسی تغییرات مساحت پهنه‌های آبی حوضه آبریز سد شهید عباسپور ناشی از سیل‌های ۲۰۱۹ با استفاده از Google Earth Engine. اکوهیدرولوژی، ۷(۲): ۳۴۵-۳۵۲.

علیپور، ح.، اخوان قالیباف، م.، قلیوف، ا.، کورنوا، م.، مختاری، م. ح.، ۱۴۰۰. استفاده از الگوریتم SEBAL و تصاویر سنجنده MODIS جهت تخمین تبخیر و تعرق واقعی (مطالعه موردی: حوضه آبریز دریاچه ارومیه). هیدروژئولوژی، انتشار آنلاین.

گودرزی، ز.، وفایی‌نژاد، ع.، ۱۳۹۸. استفاده از الگوریتم جهش قورباغه و سیستم اطلاعات مکانی برای کمک به بهره‌برداری بهینه از مخزن سد درودزن. اکوهیدرولوژی، ۶(۴): ۹۸۳-۹۹۱.

محمدی ورزنه، ن.، وفایی‌نژاد، ع.، ۱۳۹۴. تخصیص آب در شبکه‌های آبیاری به کمک سیستم پشتیبانی تصمیم‌گیری مبتنی بر سیستم اطلاعات مکانی و الگوریتم ازدحام ذرات (نمونه موردی: اراضی کشاورزی قورتان). اکوهیدرولوژی، ۲(۱): ۳۹-۴۹.

میکائیلی حاجی‌کندی، خ.، سبحانی، ب.، ورامش، س.، ۱۳۹۸. ارزیابی تغییرات پوشش بخش جنوبی دریاچه ارومیه با استفاده از تصاویر ماهواره‌ای. تحقیقات کاربردی علوم جغرافیایی. انتشار آنلاین.

وفایی‌نژاد، ع.، ۱۳۹۵. بهینه‌سازی الگوی کشت با استفاده از روش TOPSIS و الگوریتم ژنتیک بر مبنای قابلیت‌های GIS (اراضی بخش جلگه، استان اصفهان). اکوهیدرولوژی، ۳(۱): ۶۹-۸۲.

وفایی‌نژاد، ع.، یوسف‌زاده، ج.، یوسفی، ح.، محمدی ورزنه، ن.، ۱۳۹۳. مدیریت توزیع آب در شبکه‌های آبیاری و تخصیص الگوی کشت به کمک سیستم اطلاعات مکانی و برنامه‌ریزی خطی (نمونه موردی: اراضی پایین‌دست سد آغ‌چای). اکوهیدرولوژی، ۱(۲): ۱۲۳-۱۳۲.

Amani, M., Mahdavi, S., Afshar, M., Brisco, B., Huang, W., Mirzadeh, M., Hopkinson, C., 2019. Canadian wetland inventory using Google Earth

در بازه‌های زمانی مختلف موردبررسی قرار گیرد تا علت‌های مختلف آن‌ها نیز بتوانند مورد ارزیابی قرار گیرند و در نتیجه پژوهشگران و کاربران و مدیران اجرایی برای مدیریت پهنه‌های آبی از آن‌ها بهره‌گیرند. مطالعاتی از این قبیل می‌تواند به برنامه‌ریزان و سیاست‌گذاران برای توسعه‌ی سیاست‌های کلان در مدیریت منابع طبیعی و منابع آب، یاری‌رساند.

منابع

اخوان قالیباف، م.، علی‌پور، ح.، الوست، ق.، کورنوا، م.، مختاری، م. ح.، ۱۳۹۸. بررسی تغییرات مساحت پوشش زمین و کاربری حوضه آبخیز دریاچه ارومیه با استفاده از تصاویر MODIS. هیدروژئومورفولوژی، ۶(۱۸): ۹۷-۱۱۳.

تافته، ا.، ملاح، س.، ابراهیمی پاک، ن. ع.، ۱۳۹۹. بررسی نتایج داده‌های روزانه، ده‌روزه و ماهانه تصاویر ماهواره در تخمین مقدار بارش با استفاده از سامانه Google Earth Engine در استان خوزستان. نشریه حفاظت منابع آب و خاک، ۹(۳): ۹۴-۱۰۳.

ترابی، غ.، آقامحمدی زنجیرآباد، ح.، بهزادی، س.، ۱۳۹۷. پایش وضعیت دریاچه بختگان و اراضی اطراف آن با استفاده از تصاویر ماهواره‌ای و هوش محاسباتی. اکوهیدرولوژی، ۵(۱): ۲۵۱-۲۶۳.

حیدری‌زادی، ز.، محمدی، ع.، یعقوبی، ث.، ۱۳۹۷. ارزیابی وضعیت آب‌های زیرزمینی دشت مهران و عوامل تأثیرگذار بر کمیت این منابع. هیدروژئولوژی، ۳(۲): ۵۹-۶۸.

خسروی، ر.، حسن‌زاده، ر.، حسینجانی‌زاده، م.، محمدی، ص.، ۱۳۹۹. بررسی تغییرات پهنه‌های آبی با استفاده از شاخص‌های آبی و گوگل ارث انجین (مطالعه موردی: تالاب‌های شهرستان پلدختر- استان لرستان). اکوهیدرولوژی، ۷(۱): ۱۳۱-۱۴۶.

شمشکی، ا.، کرمی، غ.، ۱۳۹۸. تغییرات زمانی و مکانی جریان آب زیرزمینی در ساحل جنوب‌شرقی دریاچه ارومیه. هیدروژئولوژی، ۴(۱): ۲۶-۴۱.

شیخ‌قادر، س. ه.، مهدوی‌فرد، م.، ۱۳۹۹. به‌کارگیری و پردازش داده‌های حجیم چندسنجنده‌ای در Earth Engine (EE) Explorer به‌منظور آشکارسازی تغییرات

- Google earth engine cloud platform. Remote Sensing, 11(3): 313.
- Wulder, M.A., 2019. Current status of Landsat program, science, and applications. Remote sensing of environment, 225: 127-147.
- Xu, H., 2006. Modification of normalized difference water index (NDWI) to enhance open water features in remotely sensed imagery. International journal of remote sensing, 27(14): 3025-3033.
- Zhu, Z., Michael, A., David, P., Curtis, E., Matthew, C., Volker, C., 2019. Benefits of the free and open Landsat data policy. Remote Sensing of Environment, 224: 382-385.
- Zou, Z., Dong, J., Menarguez, M., Xiao, X., Qin, Y., Doughty, R., Hooker, K., Hambright, D., 2017. Continued decrease of open surface water body area in Oklahoma during 1984–2015. Science of the Total Environment, 595: 451-460.
- engine: the first map and preliminary results. Remote Sensing, 11(7): 842.
- Banko, G., 1998. A review of assessing the accuracy of classifications of remotely sensed data and of methods including remote sensing data in forest inventory.
- Goodarzi, M., Pourhashemi, M., Azizi, Z., 2019. Investigation on Zagros forests cover changes under the recent droughts using satellite imagery, Journal of Forest Science, 65(1): 9-17.
- Gorelick, N., Hancher, M., Dixon, M., Ilyushchenko, S., Thau, D., Moore, R., 2017. Google Earth Engine: Planetary-scale geospatial analysis for everyone. Remote sensing of Environment, 202: 18-27.
- Guide, E.U.S., 2008. ENVI on-line software user's manual. ITT Visual Information Solutions.
- Hesham, M., Asmar, El., Mohammed, E., Sameh, B., Kafrawy, El., 2013. Surface area change detection of the burullus lagoon, north of the Nile delta, Egypt, using water indices a remote sensing approach. The Epyptial journal of remote sensing and space science, 16(1): 119-123.
- Liang, K., Li, Y., 2019. Changes in Lake Area in Response to Climatic Forcing in the Endorheic Hongjian Lake Basin, China. Remote Sensing, 11(24): 3046.
- McFeeters, S.K., 1996. The use of the Normalized Difference Water Index (NDWI) in the delineation of open water features. International journal of remote sensing, 17(7): 1425-1432.
- Sarp, G., Ozcelik, M., 2017. Water body extraction and change detection using time series: A case study of Lake Burdur, Turkey. Journal of Taibah University for Science, 11(3): 381-391.
- Tamiminia, H., Salehi, B., Mahdianpari, M., Quackenbush, L., Adeli, S., Brisco, B., 2020. Google Earth Engine for geo-big data applications: A meta-analysis and systematic review. ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing, 164: 152-170.
- Wang, C., 2018. Long-Term Surface Water Dynamics Analysis Based on Landsat Imagery and the Google Earth Engine Platform: A Case Study in the Middle Yangtze River Basin. Remote Sensing, 10(10): 1635.
- Wang, Y., Ma, J., Xiao, X., Wang, X., Dai, S., Zhao, B., 2019. Long-term dynamic of Poyang Lake surface water: A mapping work based on the