

ارزیابی کیفی منابع آب سطحی با استفاده از تصاویر ماهواره‌ای در مخزن سد سیمره

ضحی مشیدی^۱، محمدحسین جهانگیر^{۲*}

۱. دانشجوی کارشناسی ارشد اکوهیدرولوژی، دانشکده علوم و فنون نوین، دانشگاه تهران، تهران

۲. دانشیار دانشکده علوم و فنون نوین، دانشگاه تهران، تهران

(تاریخ دریافت ۱۴۰۰/۰۲/۱۳؛ تاریخ تصویب ۱۴۰۰/۰۸/۱۵)

چکیده

با توجه به پیشرفت‌های صورت گرفته در فناوری سنجش از دور، جمع‌آوری اطلاعات از وضعیت کیفی منابع آب سطحی به وسیله این فناوری ضمن کاهش هزینه و زمان نمونه‌برداری‌های سنتی، می‌تواند تمامی پهنه‌های آب سطحی را مورد پایش قرار دهد. در این مطالعه قابلیت تصاویر ماهواره سنتینل-۲ و لندست-۸ برای برآورد غلظت پارامترهای کیفی آب شامل میزان اسیدیته، هدایت الکتریکی، کل جامدات محلول، قلیائیت و دمای سطحی آب بررسی شد. ابتدا تصاویر ماهواره سنتینل-۲ و لندست-۸ پیش‌پردازش شد و سپس، باندهای مناسب برای شناسایی ارتباط معنادار میان مقادیر هر پارامتر کیفیت آب و تصاویر با استفاده از روش رگرسیون خطی تعیین و دقت آنها به ازای مقادیر واقعی محاسبه شد. نتایج نشان از برتری تصاویر سنتینل-۲ به ترتیب با ضریب پی‌رسون، خطای استاندارد و RMSe برای پارامتر PH برابر ۰/۵۸۸، ۰/۲۸ و ۰/۲۹، EC برابر ۰/۸۴۷، ۷۸/۷ و ۷۷/۲۲ برابر ۰/۸۹۵، ۴۵/۸ و ۴۴/۳۷ و برای پارامتر قلیائیت فقط از طریق تصاویر لندست-۸ به ترتیب با ضریب پی‌رسون، خطای استاندارد و RMSe برابر ۰/۴۷۳، ۲۲ و ۲۱/۸. برای پارامتر دمای سطحی آب به دلیل ضریب پی‌رسون بالای هر دو تصویر ماهواره‌ای قابل استفاده هستند که این مقادیر برای لندست-۸ به ترتیب برابر با ۰/۸۷۱، ۲/۹ و ۲/۸۵ و برای سنتینل-۲ برابر با ۰/۷۵۲، ۴/۱۴ و ۴/۰۶ است.

کلیدواژه‌گان: پایش کیفی منابع آب، سنجش از دور، سنتینل-۲، لندست-۸، مخزن سد سیمره.

مقدمه

پهنه‌های آبی بدون شک از مهم‌ترین اکوسیستم‌های طبیعی کره زمین هستند. بنابراین، پایش و نظارت بر سلامت آنها، یکی از اولویت‌های اصلی مدیران ارشد منابع طبیعی هر کشوری محسوب می‌شود. روش‌های سنتی پایش کیفیت آب سطحی شامل جمع‌آوری دستی نمونه‌ها و انجام آزمایش‌های لازم روی آنها در محیط آزمایشگاه است که باید مستقیماً انجام شود [۱]. این روش‌های نمونه‌برداری با وجود داشتن دقت زیاد، نیازمند صرف نیروی انسانی، وقت و هزینه زیاد است و نمی‌تواند خصوصیات دینامیکی کیفیت آب را که دارای تغییرات زمانی و مکانی زیاد است، به درستی نشان دهد [۲ و ۳]. پایش مستمر پهنه‌های آبی با روش‌های متداول و سنتی، امری دشوار و هزینه‌بر است. به خلاف این نوع روش‌های نمونه‌برداری، فناوری سنجش از دور به دلیل قابلیت‌هایی که دارد، می‌تواند با هزینه اندک و زمانی کمتر طیف وسیعی از پروژه‌ها را در مقیاس‌های محلی تا جهانی انجام دهد [۴]. وجود قدرت تفکیک مکانی، طیفی، رادیومتریک و زمانی مناسب برای سنجنده‌های سنجش از دور باعث شده است که این سیستم‌ها به عنوان ابزاری قوی برای برآورد تغییرات مکانی و زمانی پارامترهای کیفی آب استفاده شوند [۵].

یکی از کاربردهای مهم تصاویر سنجش از دور، پایش کمی و کیفی پهنه‌های آبی است و معادلات رگرسیون خطی به دلیل ساده و پرکاربرد بودن بیش از سایر معادلات مورد توجه محققان قرار گرفته است. از این‌رو، در این تحقیق به ارزیابی و مدل‌سازی پهنه آبی با استفاده از فناوری سنجش از دور و رگرسیون خطی پرداخته شده است.

بر اساس برآوردها، جمعیت جهان در سال ۲۰۵۰ حدود ۹/۱ میلیارد نفر خواهد بود که از این مقدار، حدود ۶۹ درصد شهرنشین هستند. با افزایش جمعیت شهری و تسری الگوهای مصرف ناپایدار، منابع محدود کره زمین بیش از پیش تحت فشار قرار خواهند گرفت. از سوی دیگر، در بسیاری از مناطق جهان، آلودگی‌ها به سرعت در حال از بین بردن منابع آب در دسترس هستند. هر لیتر از فاضلاب آلوده، می‌تواند حجم زیادی از پهنه‌های آبی پذیرنده آن را آلوده سازد [۶]. علاوه بر تغییر الگوی مصرف و افزایش هدررفت منابع آبی، تغییرات اقلیمی نیز اثرات مستقیم و غیرمستقیم روی کل چرخه هیدرولوژیکی خواهد داشت. از آن جمله

می‌توان به تغییر توزیع مکانی و زمانی منابع آب در کشورها، کاهش دسترسی آن‌ها به منابع آب، کاهش تغذیه آبخوان‌ها و کاهش کیفیت منابع آب اشاره کرد [۷]. با توجه به قرار گرفتن کشور ایران در کمربند خشک و نیمه‌خشک کره زمین، کاهش کمیت و کیفیت منابع آب در دسترس موجب ایجاد مشکلات اقتصادی، اجتماعی، محیط زیستی و حتی سیاسی خواهد شد. به طور کلی، مناطق خاورمیانه و آفریقای شمالی به اثرات تغییرات اقلیم روی منابع آبی حساس است. تغییرات اقلیم به همراه رشد جمعیت، اثرات منفی بسیاری روی منابع آب مناطق یادشده دارد [۸].

کشور ایران دارای پهنه‌های آبی متعدد و متنوع شامل دریا، دریاچه، رودخانه و تالاب است. متأسفانه، بخش عمده پهنه‌های آبی کشور ایران طی دهه‌های اخیر در معرض آسیب و تخریب جدی قرار گرفته است. مطالعات نشان می‌دهد روند افت کیفیت منابع آب در کشور ایران طی دهه ۱۳۸۳-۱۳۹۲ تشدید یافته است. علاوه بر رشد جمعیت، مهاجرت و شهرنشینی، افزایش پساب‌ها، وجود خشکسالی و تغییر اقلیم، کاهش رواناب‌ها، تأثیر شدیدی بر کاهش کیفیت منابع آب داشته‌اند. افزایش بدون برنامه‌ریزی سطح زیر کشت محصولات کشاورزی و بی‌توجهی به مدیریت زهاب‌ها، موجب آلوده شدن سالانه منابع آب کشور شده است. امروزه، کشورهای پیشرفته با استفاده از ابزارهای موجود خود سعی بر حفظ و نگهداری پهنه‌های آبی ارزشمند خود دارند. در کشور ما، به دلیل بی‌توجهی مسئولان و عامه مردم، این اکوسیستم‌های ارزشمند دچار آسیب‌های فراوان و گاه جبران‌ناپذیر شده‌اند (از جمله نابودی تدریجی دریاچه ارومیه). از این‌رو، پایش و مدیریت بهینه پهنه‌های آبی کشور امری ضروری و مهم است. پایش مستمر منابع آبی توسط روش‌های متداول و بازدید زمینی و میدانی امری زمان‌بر، پرهزینه و غیرممکن است. از این‌رو، ضروری است از منابع جدید و کارآمد برای این منظور استفاده شود. علم سنجش از دور که به استخراج و تفسیر اطلاعات از تصاویر ماهواره‌ای و هوایی می‌پردازد، یکی از منابع جدید برای پایش مناطق آبی است. به علت پوشش وسیع از مناطق مختلف، فرمت رقومی تصاویر، تنوع توان تفکیک مکانی، زمانی، رادیومتریک و طیفی، یکی از منابع کارآمد برای پایش منابع آبی کشور محسوب می‌شود. استخراج اطلاعات از تصاویر سنجش از دوری به روش‌های کارآمد و نوین نیاز دارد. علاوه بر این، به دلیل وجود انواع پهنه‌های آبی نظیر رودخانه، دریا،

۷. فرابنفش (۲۵۰ تا ۳۵۰ نانومتر) [۱۱] بر اساس تحقیق انجام شده توسط چانگ و همکاران، سنجنده‌های فضایی زیادی برای پایش پارامترهای کیفیت آب استفاده شده‌اند که به طور خاص می‌توان به استر، تراء، مدیس، ای وی اچ آر، آر، اسپات، لندست تی ام، آیکونوس، ای آر اس ۲، سی ویفز، کوئیک برد و مریس اشاره کرد [۱۱]. سنجنده‌های مختلف، توانایی استخراج پارامترهای کیفیت آب مانند کلروفیل a، نترات، دما، ذرات معلق کل، کربن آلی کل و مواد شیمیایی را دارد. همچنین، سنجنش از دور هوایی در مطالعات ارزیابی کیفیت آب به خصوص در پهنه‌های کوچک‌تر نیازمند تصاویر با توان تفکیک مکانی پایین‌تر، کاربرد زیادی دارد. ژیاو و همکاران در رودخانه Han (Han) از نمونه‌برداری‌های زمینی هم‌زمان با برداشت تصاویر ماهواره‌ای HJ1A و ZY 3 استفاده کرده و با به‌کارگیری شبکه عصبی، مدل بازایی شاخص کیفیت آبی را برای منطقه مطالعه شده استخراج کردند. مدل تهیه شده دارای دقت زیادی است؛ به طوری که می‌توان با قابلیت اجرای زیاد تغییرات کیفیت آب را در سطح منطقه برآورد کرد [۱۲]. کلای بارت و فرازیر تصاویر ماهواره‌ای سری لندست ۵ و ۸ را برای بررسی وضعیت کلروفیل و تیرگی در سطح دریاچه شرق اوکلاهما به کار گرفتند. بر اساس نتایج به‌دست آمده از پژوهش یادشده، میزان همبستگی رفلکتانس باند دو پارامتر کیفیت آب کلروفیل و تیرگی نسبت به SWIR دیگر باندهای تصویربرداری قوی‌تر است [۱۳]. لیو و همکاران چهار باند تصویربرداری ماهواره آیکونوس را برای محاسبه میزان نیتروژن کل و فسفر کل رودخانه ورت در شهر هوانگشی Huangshi و دریاچه کیو Wenzhou ونژوو به کار گرفتند و با استفاده از روش رگرسیون چندمتغیره و شبکه عصبی، ارتباط میان باندهای تصویربرداری و پارامترهای کیفیت آب یادشده را مدل‌سازی کردند. نتایج این مطالعه نشان داد با وجود دقت زیاد همبستگی ۸۵ درصد نتایج هر دو مدل، توانایی شبکه عصبی برای مدل‌سازی بالاتر است [۱۴].

تامینگ و همکاران در مطالعه‌ای روی کیفیت آب دریاچه‌های کشور استونی، توانستند همبستگی خوبی بین نسبت‌های باندی ماهواره Sentinel-2 و پارامترهای زمینی مانند Chl-a با نسبت همبستگی ۰/۸۳ و CDOM با نسبت همبستگی ۰/۷۲ و DOC با نسبت همبستگی ۰/۹۲ به

دریاچه و تالاب، استخراج اطلاعات از تصاویر سنجنش از دور برای هر یک نیازمند روند خاص و منحصر است. پیشرفت‌های اخیر در دانش و فناوری سنجنش از دور موجب به‌کارگیری گسترده آن در پایش و مدیریت پهنه‌های آبی شده است. در نتیجه، خواص هیدرولوژیکی با مقیاس‌های مکانی و زمانی مناسب قابل استخراج است که موجب بهبود روش‌های مدل‌سازی پایش کیفیت آب در پهنه‌های مختلف آب‌های داخلی و خارجی شده است [۹]. این امر در نهایت موجب ردیابی سریع و به‌هنگام مخاطرات محیط زیستی حاصل از افزایش بار مواد مغذی، آلاینده‌های سمی، فلزات سنگین، شکوفندگی مضر جلبکی، تغییرات میزان کلروفیل و همچنین، میزان شوری و دما، توسط فرصت‌های فراهم‌شده با سنجنش از دور می‌شود.

بر اساس دستورالعمل کیفیت آب آشامیدنی سازمان بهداشت جهانی در سال ۲۰۱۱ [۱۰]، انواع آلوده‌کننده‌های آب شامل پس‌مانده‌های اکسیژن‌خواه، عوامل بیماری‌زا، کودهای شیمیایی، ترکیبات آلی سنتزی (مصنوعی)، ترکیبات نفتی، ترکیبات آلی طبیعی، مواد شیمیایی معدنی و کانی، عناصر نادر، شوری، مواد رادیو اکتیویته است. استفاده از تکنیک‌های سنجنش از دور غیرفعال برای پایش پهنه‌های آبی از دهه ۱۹۷۰ آغاز شد. برای نمونه، ماهواره لندست ۱، به منظور پایش عوارض محیطی استفاده شد. این ماهواره دارای باندهای قرمز، آبی و سبز با توان تفکیک مکانی ۱۸۵ متر بود. پس از آن، ماهواره‌های لندست ۲ و ۳ نمونه‌های موفق دیگر سکوه‌های مناسب برای پایش محیطی و به طور خاص، منابع آب بودند. با ارسال لندست ۴ در سال ۱۹۸۲ سنجنده‌ها از نظر توان تفکیک طیفی و مکانی بهبود قابل ملاحظه‌ای یافتند. امروزه با پیشرفت سنجنده‌های ماهواره‌ای و هوایی، استفاده از آنها در پایش منابع آب بیش از پیش شده است. به طور کلی، سنجنده‌های استفاده‌شده برای پایش منابع آب در بازه‌های مختلف طول موج تعریف شده‌اند که عبارت‌اند از:

۱. رادار
۲. مایکروویوهای غیرفعال (۲ تا ۸ میلی‌متر)
۳. باند حرارتی (۸ تا ۱۴ میکرومتر)
۴. مادون قرمز میانی (۳ تا ۵ میکرومتر)
۵. مادون قرمز نزدیک (۱ تا ۳ میکرومتر)
۶. مرئی (۳۵۰ تا ۷۵۰ نانومتر)

تک باندها و یا ترکیبی از چند باند را نشان دادند. با استفاده از مطالعات میدانی، طول موج بین ۷۰۰ و ۸۰۰ نانومتری پرکاربردترین محدوده تعیین مواد معلق در آب‌های سطحی بودند [۲۱]. مطالعه کدری همچنین توسط لیزا در سال ۲۰۰۷ در دریاچه حاشیه یخی در یخچال برینگ، آلاسکا انجام شد. تحلیل‌های رگرسیون خطی چندگانه و ساده با استفاده از باندهای مختلف Landsat7- ETM+ به منظور تعیین بهترین پیش‌بینی‌کننده‌های کدری در دریاچه‌های یخچالی انجام پذیرفت. الگوریتم نهایی باندهای ۳ (قرمز) و ۴ (مادون قرمز نزدیک) سنجنده Landsat7- ETM+ را برای پیش‌بینی غلظت کدری به کار گرفت. در این مطالعه نقشه‌های کدری تهیه‌شده با استفاده از این الگوریتم می‌توانند برای کمک به تعیین دینامیک‌های رسوبی درون و بین سالانه دریاچه ویتوس نیز استفاده شوند [۲۲].

سونگ و همکاران (۲۰۱۱) رابطه بین چهار پارامتر کیفی کلروفیل a، کدورت، کل مواد نامحلول و فسفر کل را با باندهای ماهواره Landsat توسط روش‌های رگرسیون چندگانه و شبکه‌های عصبی بررسی کردند. نتایج پژوهش یادشده نشان از RMSE برای شبکه عصبی کمتر از ۱۰ درصد و برای رگرسیون کمتر از ۲۵ درصد بود که نیاز به تحقیق بیشتر دارد [۲۳]. در مطالعه دیگری، سونگ و همکاران (۲۰۱۲) در سه مخزن سد در هند مقادیر فسفر کل را در سنجش از دور فراطیفی با روش الگوریتم ژنتیک و حداقل مربعات جزئی تخمین زدند [۲۴]. لویی و همکاران (۲۰۱۵) مقادیر فسفر و نیتروژن کل را با استفاده از تصاویر IKONOS استخراج کردند. نتایج پژوهش یادشده قابلیت این تصاویر در استخراج فاکتورهای شیمیایی آب در پهنه‌های آبی کوچک را تأیید می‌کند [۲۵].

تامینگ و همکاران (۲۰۱۶) کاربرد سنجنده Sentinel-2 را در تهیه نقشه غلظت‌های کلروفیل a، CDOM و DOC و همچنین، رنگ اقیانوس در ۹ دریاچه کوچک و ۳ دریاچه بزرگ هند بررسی کردند. مقادیر R2 به ترتیب برابر با ۰/۸۳، ۰/۷۲ و ۰/۹۲ بود که نشان داد این سنجنده پتانسیل بالایی در بازیابی مقادیر این پارامترها دارد [۲۶]. گیاردینو و همکاران (۲۰۱۶) با استفاده از تصاویر MODIS، RAPID EYE و OLI مقادیر پارامترهای CDOM، SPM، CHLa را در دریاچه گرادا در ایتالیا استخراج کردند [۲۷]. ایکسه و همکاران

دست بیاورند. آنها نتیجه گرفتند که ماهواره Sentinel-2 مناسب پایش کیفیت آب است [۱۵]. کابلی‌زاده و همکاران مطالعه‌ای با عنوان «تلفیق تصاویر ماهواره‌ای لندست-۸ و سنتینل-۲ به منظور پایش محیطی» انجام دادند. این محققان در پژوهش یادشده گفته‌اند که استفاده از روش‌های تلفیق تصاویر می‌تواند سبب افزایش قدرت تفکیک عوارض شود [۱۶]. میرعلیزاده فرد و منصوری تحقیقی با هدف مطالعات کمی و کیفی آب‌های سطحی با تصاویر ماهواره‌ای لندست-۸ در استان خوزستان انجام دادند. نتایج مطالعه آنها نشان داد شاخص‌های اتوماتیک استخراج پهنه‌های آبی در مناطق سایه‌دار و شهری کارایی بیشتری نسبت به سایر شاخص‌های دیگر به دلیل در نظر گرفتن طول موج‌های مادون قرمز کوتاه در شناسایی آب دارند [۱۷].

مومی‌پور با انجام پژوهشی تحت عنوان «مطالعه کیفیت آب‌های ساحلی با استفاده از تصاویر ماهواره‌ای فراطیفی در منطقه ساحل اروندکنار»، به این نتیجه رسید که افزایش میزان کلروفیل a در آب، سبب کاهش انعکاس در طول موج آبی و افزایش انعکاس در طول موج سبز می‌شود. هدف از انجام تحقیق یادشده، بررسی ارتباط بهینه میان پارامترهای کیفیت آب شامل اسیدیته (pH)، سولفات (SO4) و بی‌کربنات (HCO3) با تصاویر ماهواره‌ای Sentinel-2 با استفاده از یک مدل مناسب است. برای این کار پس از دریافت و پردازش اولیه تصاویر ماهواره‌ای و مقادیر پارامترهای کیفیت آب سطحی با استفاده از مدل‌های مناسب، ارتباط میان پارامترهای کیفیت آب و تصاویر سنجش از دور مدل‌سازی شده و در نهایت، با استفاده از مناسب‌ترین مدل از نظر دقت، وضعیت پارامترهای کیفیت آب برای منطقه مطالعه‌شده به صورت نقشه تهیه شد [۱۸].

ریچه و کوپر در تحقیقی در سال ۲۰۰۱ نشان دادند مواد معلق، بازتابندگی آب‌های سطحی در محدوده‌های مرئی و مادون قرمز نزدیک طیف الکترومغناطیسی را افزایش می‌دهند [۱۹]. اندازه‌گیری‌های میدانی و آزمایشگاهی جری در سال ۱۹۸۶ نشان داد بازتابندگی سطحی آب تحت تأثیر نوع رسوب، بافت، رنگ، دید سنجنده و زوایای سنجنده و عمق آب قرار می‌گیرد [۲۰]. مطالعات سنجش از دوری ریچه و همکاران در سال ۱۹۷۶ رابطه معناداری بین مواد معلق و رادیانس یا انعکاس از

جغرافیایی ۷۰۴۵۵۰ و ۳۶۸۶۰۰۰ در ۳ کیلومتری بالادست روستای تلخاب (مرز استان‌های ایلام و لرستان در غرب ایران) روی سازند آهکی آسماری ساخته شده است که از جمله معروف‌ترین سازندهای کارستی در ایران است و چهارمین سد بزرگ کشور از لحاظ حجم مخزن و ارتفاع است. این سد در حوضه آبریز رودخانه کرخه، روی رودخانه سیمره و در بالادست رودخانه کرخه ساخته شده است. ساختگاه سد در دره‌ای U شکل با دیواره‌های با شیب زیاد با ارتفاع ۱۳۰ متر از بستر رودخانه و تراز تاج سد و تراز نرمال آبیگری به ترتیب در ۷۳۰ و ۷۲۰ متر از سطح دریا قرار دارد. حجم مخزن این سد برابر با ۳/۲ میلیارد متر مکعب است که از جمله بزرگ‌ترین دریاچه‌های پشت سد ایران است.

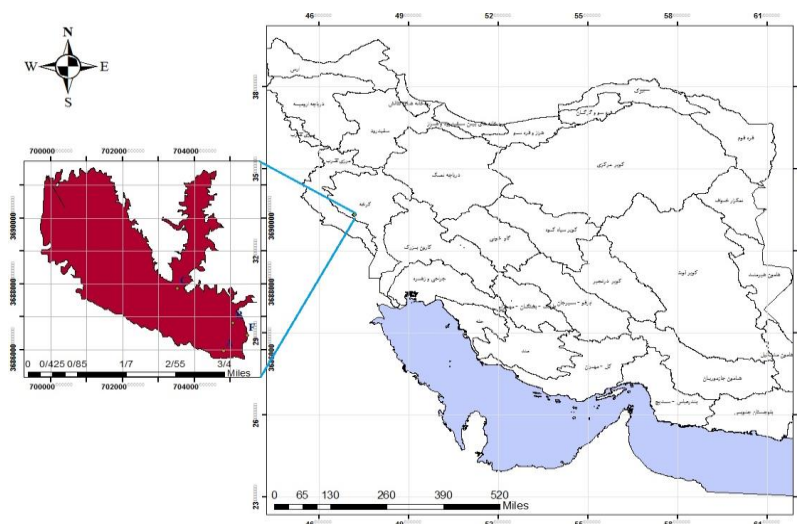
سد سیمره با اهداف متنوعی از جمله تولید انرژی برقایی و افزایش قدرت تنظیم سدهای پایین ساخته و از اوایل سال ۱۳۹۰ شروع به آبیگری شده است. با ساخت سد علاوه بر نگهداشت حجم آب در بالادست بدنه سد و تغییر در روند طبیعی ورودی و خروجی، با افزایش زمان ماندگاری آب، تغییراتی در کیفیت به وجود خواهد آمد که می‌تواند بر کیفیت آب خروجی تأثیر بگذارد. همچنین، از طریق همین تغییر کیفیت آب مخزن، آب‌های نشتی به طرف پایین دست قابل ردیابی هستند. شکل ۱ موقعیت این سد و نقاط نمونه‌برداری در این تحقیق را نشان می‌دهد. در این تحقیق ۴ نقطه در مخزن سد سیمره، با مختصات جغرافیایی زیر در نظر گرفته شد.

(۲۰۰۶) با استفاده از تصاویر ماهواره Landsat-5 مقادیر پارامترهای COD، TP، DO و SD را در رودخانه هانگ‌پو در شانگهای بررسی کردند. در این مطالعه از ۱۹ نقطه در طول رودخانه داده‌های زمینی برداشت شده است. بر اساس این مطالعه، مقدار R2 برای پارامتر DO معادل ۰/۶۸ و برای پارامتر SD معادل ۰/۷۲ تعیین شده است [۲۸]. بانده و همکاران (۲۰۱۸) به محاسبه و بررسی تمام باندها و نسبت آنها در تصاویر لندست ۸ و سنتینل ۲ برای پارامترهای کلروفیل a و کدورت به وسیله رگرسیون حداقل مربعات جزئی (PLS) با نرم‌افزار SPSS و در نهایت، محاسبه RMSE پرداختند و در نهایت، نتیجه گرفتند برای پارامتر کدورت و کلروفیل a، سنتینل ۲ نتایج بهتری نسبت به لندست ۸ ایجاد می‌کند [۲۹]. ماسوچا و همکاران (۲۰۱۸) به محاسبه و بررسی باندهای تصاویر لندست-۸ به وسیله رگرسیون برای پیش‌بینی توزیع مکانی غلظت مواد مغذی پرداختند. آنها نتیجه گرفتند که فصل خشک و خنک زمان بهینه برای استفاده از لندست ۸ به منظور پایش مواد مغذی در دریاچه گرمسیری است [۳۰].

مواد و روش‌ها

منطقه مطالعه‌شده

سد سیمره روی یال شمالی تاقدیس راوندی در ابتدای تنگه کفه‌نیلا در زون زاگرس چین‌خورده در مجاورت شمالی تاقدیس کبیرکوه در غرب ایران قرار دارد. ساختگاه سد جزئی از زاگرس چین‌خورده که در مختصاتی حد فاصل دو استان ایلام و لرستان و در ۴۰ کیلومتری شمال غربی شهرستان دره‌شهر روی رودخانه سیمره با موقعیت



شکل ۱. موقعیت سد سیمره در ایران و نقاط نمونه‌برداری از سد

جدول ۱. مختصات جغرافیایی نقاط نمونه برداری

کد نقطه (ID)	طول جغرافیایی (Long)	عرض جغرافیایی (Lat)
A	۷۰۴۸۱۴	۳۶۸۵۹۶۸
B	۷۰۵۰۷۷	۳۶۸۶۸۱۳
C	۷۰۳۵۳۹	۳۶۸۷۸۶۱
F	۷۰۵۴۸۲	۳۶۸۶۴۳۹

داده‌های استفاده شده

در این تحقیق مقادیر مربوط به پارامترهای کیفیت آب شامل اسیدیتته، هدایت الکتریکی، کل جامدات محلول، قلیائیت و دمای سطح آب از داده‌هایی که توسط آزمایشگاه مؤسسه تحقیقات آب در چهار ایستگاه به مشخصات جدول ۱ واقع بر مخزن سد سیمره به صورت ماهیانه از سال ۱۳۹۰ تا ۱۳۹۸ جمع‌آوری شده، استفاده شد که تاریخ برداشت آن‌ها با داده‌های تصاویر ماهواره سنتینل-۲ و لندست-۸ با در نظر گرفتن عدم پوشش ابر و برفناکی و مشاهده سطح زمین در تصاویر ماهواره‌ای مطابقت دارد.

پارامترهای کیفی آب

میزان اسیدیتته آب یا PH: بر مبنای لگاریتم غلظت یون هیدروژن (مول بر لیتر) بیان می‌شود. PH بین صفر (اسید بسیار قوی) تا ۱۴ (باز بسیار قوی) تغییر می‌کند. بسیاری از آب‌های سطحی دارای PH بین ۷/۵ تا ۸/۵ است. PH آب طبیعی بر واکنش‌های بیولوژیکی و شیمیایی تأثیر می‌گذارد، حلالیت یون‌های فلزی را کنترل می‌کند و بر محیط آبی طبیعی اثر می‌گذارد.

هدایت الکتریکی یا EC: یکی از راه‌های ساده تعیین غلظت یون‌های محلول در آب، اندازه‌گیری هدایت الکتریکی است. هر چه میزان املاح محلول در آب بیشتر باشد، قابلیت هدایت الکتریکی نیز افزایش می‌یابد و به بیانی دیگر، مقاومت الکتریکی آن کاهش می‌یابد.

مواد جامد محلول یا TDS: یکی از مواد مهم موجود در آب، مواد جامد است که به دو شکل مواد جامد محلول (TDS) و ذرات جامد معلق (TSS) در آب وجود دارد [۳۱]. غلظت املاح محلول در تعیین تناسب آب در مصارف شرب انسان و دام، کشاورزی و صنعت نقش مهمی دارد.

قلیائیت: نمایانگر ظرفیت آب برای خنثی کردن اسید افزوده شده تا رسیدن به PH حدود ۴/۵ است. میزان آن در آب می‌تواند تا حدودی رسوب‌گذار بودن آب را بیان

کند. هرچه قلیائیت آب بیشتر باشد، ظرفیت بافری آن بیشتر است. منشأ قلیائیت در آب‌های سطحی معمولاً به دلیل وجود یون‌های هیدروکسید (OH⁻)، کربنات (CO₃²⁻) (و بی‌کربنات (HCO₃⁻) است.

دما: یکی از مشخصه‌های مهم آب سطحی در طبیعت به شمار می‌رود. دمای آب به مقدار زیاد بر گونه‌های بیولوژیکی موجود در آب و شدت فعالیت آنها مؤثر است. در دماهای زیاد، موجودات ذره‌بینی که در استفاده از منابع غذایی و تولیدمثل کارایی بیشتری دارند، تکثیر پیدا می‌کنند. همچنین، غلظت اکسیژن محلول در آب (DO) نیز تابعی از دماست و با افزایش دما کاهش می‌یابد. دمای آب‌های سطحی تا حد زیادی تعیین‌کننده گونه‌های بیولوژیکی موجود در آب و میزان فعالیت‌های آنهاست. دما بر بیشتر واکنش‌های شیمیایی که در آب رخ می‌دهد، تأثیر می‌گذارد و اثر ملموسی نیز بر قابلیت انحلال گازها در آب دارد [۳۲]. سرعت رشد جلبک‌ها معمولاً در آب‌های گرم دیده می‌شود و این پدیده می‌تواند موجب بروز مشکل ناشی از رشد جلبک‌ها و تشکیل گروه حجیمی از آنها شود. افزایش دمای آب، ویسکوزیته آب را افزایش می‌دهد و سرعت ته‌نشینی و صافی کاهش پیدا می‌کند. میزان تشکیل تری‌هالومتان‌ها (THM) در آب کلرینه شده با دما، افزایش می‌یابد و شاید حرارت به تنهایی مهم‌ترین عاملی است که روی تغییرات فصلی غلظت تری‌هالومتان‌ها، مؤثر است [۳۳].

تصاویر ماهواره‌ای

لندست-۸: ماهواره آمریکایی دیده‌بانی زمین است که ۱۱ فوریه ۲۰۱۳ به فضا پرتاب شد. لندست-۸ هشتمین ماهواره از سری ماهواره‌های لندست و هفتمین ماهواره از این پروژه است که با موفقیت در مدار قرار گرفت. این ماهواره حاصل همکاری ناسا و سازمان زمین‌شناسی آمریکا است و توسط اوربیتال ساینسز کورپوریشن ساخته شده

است. مرکز پروازهای فضایی گودارد مسئولیت توسعه مهندسی و قرار دادن ماهواره در مدار و سازمان زمین‌شناسی آمریکا توسعه سیستم‌های زمینی و هدایت پروژه را به عهده داشته‌اند. لندست-۸ دارای ۱۱ باند است. با ترکیب باند قرمز (۴)، سبز (۳)، آبی (۲)، تصویری با رنگ‌های طبیعی به دست می‌آید. مشخصات باندهای این ماهواره در جدول ۳ آورده شده است.

جدول ۲. مشخصات و شرح مختصر پارامترهای کیفی مطالعه‌شده

نوع پارامتر	منبع	اثرات	واحد اندازه‌گیری	روش یا دستگاه اندازه‌گیری	متد استاندارد آزمایشگاهی
میزان اسیدیته	وجود برخی ترکیبات شیمیایی برخی پدیده‌های بیولوژیکی نظیر تخمیر	تأثیر بر میزان حلالیت	-	دستگاه PH متر	ASTM 5128
هدایت الکتریکی	یون‌های محلول در آب	رسانایی الکتریکی آب میزان خلوص آب	موس بر سانتی‌متر	EC متر	ISIRI 7476
مواد جامد محلول	جامدات معدنی مثل رس، لای جامدات آلی مثل ریشه گیاهان و جلبک‌ها فاضلاب شهری و صنعتی	تعیین جوامع آبی گیاهی و جانوری	ppm	روش توزین و یا TDS متر	ASTM 4127
قلیائیت	وجود یون‌های هیدروکسید، کربنات و بی‌کربنات	جلوگیری از اسهال مزمن، سوءهاضمه، تخمیر غیر طبیعی دستگاه گوارش و ترش کردن معده مصرف طولانی‌مدت آب قلیایی منجر به فیروز قلبی می‌شود.	ppm	روش حجم‌سنجی به وسیله تیتراسیون	ASTM 513
دما	تابش نور خورشید وجود برخی ترکیبات شیمیایی آب و واکنش بین آنها فعالیت بیولوژیکی در آب	تأثیر بر شدت فعالیت گونه‌های بیولوژیکی تأثیر بر اکسیژن محلول در آب	درجه سلسیوس	انواع دماسنج‌ها	

جدول ۳. مشخصات باندهای ماهواره Landsat-8

Resolution	µm	Band Number
30 m	0.433-0.453	1
30 m	0.450-0.515	2
30 m	0.525-0.600	3
30 m	0.630-0.680	4
30 m	0.845-0.885	5
30 m	1.560-1.660	6
30 m	2.100-2.300	7
15 m	0.500-0.680	8
30 m	1.360-1.390	9
100 m	10.6-11.2	10
100 m	11.5-12.5	11

دارای توان تفکیک مکانی متغیر ۱۰، ۲۰ و ۶۰ متر و شامل ۱۳ باند در محدوده طیفی مرئی (VIS)، مادون قرمز نزدیک (NIR) و مادون قرمز موج کوتاه (SWIR) هستند. علاوه بر این، سنتینل ۲ عرض برداشت (میدان دید) ۲۹۰ کیلومتر و توان تفکیک زمانی ۵ روز در استوا و ۳ روز در عرض‌های میانی دارد. اطلاعات باندهای این ماهواره در جدول ۴ ارائه شده است.

سنتینل-۲: دومین سری از ماهواره‌های Sentinel و یکی از پروژه‌های رصد زمین توسط آژانس فضایی اروپا به عنوان بخشی از برنامه کوپرنیک در ۲۳ ژوئن ۲۰۱۵ مأموریت خود را به منظور بهبود مأموریت‌های دیده‌بانی زمین و پشتیبانی از خدماتی مانند پایش جنگل‌ها، بررسی تغییرات پوشش زمین و مدیریت بلایای طبیعی آغاز کرد. سنجنده تصویربرداری سوار شده روی سنتینل-۲، MSI نام دارد که تصاویر منحصربه‌فردی را ارائه می‌دهد. این تصاویر

جدول ۴. مشخصات باندهای ماهواره Sentinel-2

شماره باند	توان تفکیک مکانی (متر)	μm میانگین طول موج بر حسب	نام باند
1	60	0.43	Coastal aerosol
2	10	0.49	Blue
3	10	0.56	Green
4	10	0.65	Red
5	20	0.70	Vegetation Red Edge
6	20	0.74	Vegetation Red Edge
7	20	0.78	Vegetation Red Edge
8	10	0.84	NIR
8a	20	0.86	Narrow NIR
9	60	0.94	Water vapour
10	60	1.37	SWIR – Cirrus
11	20	1.61	SWIR
12	20	2.19	SWIR

پردازش‌های تخصصی ماهواره‌های سری سنتینل به همراه داده‌های راداری را فراهم آورده است.

نرم‌افزار ArcGIS: نام یک زیرمجموعه از نرم‌افزار GIS است که توسط ESRI تولید شده است. بسیاری از گزینه‌های نرم‌افزار GIS به عنوان نسخه متن باز و یا محصولات تجاری قابل دسترس است. با گسترش قابلیت‌های وب و علاقه روزافزون به استفاده از نرم‌افزارهای تحت وب، شرکت ESRI محصولی را تحت عنوان ArcGIS Pro معرفی کرد. این محصول در حقیقت یک سامانه تحت وب با قابلیت‌های بسیار شبیه به نسخه دسک‌تاپ است و روزبه‌روز بر قابلیت‌های آن افزوده می‌شود.

روش تحقیق

قبل از اقدام به پیاده‌سازی تحقیق، ابتدا باید روزهایی که نمونه‌برداری میدانی و برداشت تصاویر ماهواره‌ای در آن روز انجام شده است، با در نظر گرفتن عدم پوشش ابر و برف در منطقه مطالعه‌شده، مشخص شود. سپس، تصاویر ماهواره‌ای و نمونه‌های زمینی همان روز دریافت شود. گام‌های کار و انجام تحقیق به صورت زیر است.

نرم‌افزارهای استفاده‌شده

نرم‌افزار ENVI: یکی از نرم‌افزارهای بسیار مناسبی است که امکانات جامعی از اطلاعات مختلف داده‌های ارسالی از ماهواره‌ها را در بر دارد. کلمه ENVI کوتاه‌شده عبارت‌های The Environment For Visualizing Images و محصول شرکت RSI است. این نام برای سیستم نرم‌افزاری متحول و پیشرفته‌ای برای پردازش تصاویر استفاده شده است. با توجه به استفاده کاربر از تصاویر پانکروماتیک، چندطیفی (Multispectral) و فراطیفی (Hyperspectral) نرم‌افزار ENVI، به‌روزترین ابزارهای پردازشی و تجزیه و تحلیل را به منظور استخراج اطلاعات معنادار برای تصمیم‌گیری بهتر ارائه می‌دهد.

نرم‌افزار SNAP: کلمه SNAP مخفف عبارت Sentinel Application Platforms به عنوان یک نرم‌افزار متن باز برای پردازش داده‌های ماهواره‌ای سری سنتینل است. این نرم‌افزار متن باز که در سال ۲۰۱۴ میلادی توسط سازمان فضایی اتحادیه اروپا طراحی شده است، به صورت کاربردی و مؤثری قابلیت اجرای انواع

ارتباط خطی بین دو متغیر را اندازه‌گیری می‌کند و از رابطه ۱ محاسبه می‌شود:

$$R = \frac{\sum_{x=1}^n (X_o - \bar{X}_o)(X_s - \bar{X}_s)}{\sqrt{\sum_{x=1}^n (X_o - \bar{X}_o)^2 \sum_{x=1}^n (X_s - \bar{X}_s)^2}} \quad (1)$$

که در آن X_o داده‌های مشاهده‌ای، X_s داده‌های شبیه‌سازی شده، \bar{X}_o میانگین داده‌های مشاهده‌ای است. خطای استاندارد (SE) هم از رابطه ۲ محاسبه می‌شود:

$$SE = \frac{\sigma}{\sqrt{n}} \quad (2)$$

که در آن σ انحراف استاندارد و n تعداد کل مشاهدات است. در انتها، برای سنجش دقت مدل، میزان $RMSe^1$ (ریشه میانگین مربعات خطا) محاسبه می‌شود. هر چه این مقدار کمتر از مقدار R^2 (ضریب تعیین) باشد، نشان‌دهنده دقت بیشتر مدل است [۳۵]. میزان $RMSe$ از رابطه ۳ به دست می‌آید.

$$RMSe = \sqrt{\frac{\sum_{t=1}^T (A_t - F_t)^2}{n}} \quad (3)$$

که در آن A_t داده‌های مشاهده‌ای، F_t داده‌های شبیه‌سازی شده و n تعداد کل مشاهدات است.

یافته‌ها

در این تحقیق پس از پردازش تصاویر ماهواره‌ای لندست-۸ و سنتینل-۲، با استفاده از روش رگرسیون خطی ساده و چندمتغیره و روش گام‌به‌گام، همبستگی این تصاویر با پارامترهای کیفی آب بررسی شد. مطابق جدول‌های ۵ تا ۹ بررسی نتایج آنالیز همبستگی باندهای تصویر لندست-۸ با پارامترهای کیفی آب نشان می‌دهد بهترین باندها برای بررسی پارامتر PH، ۴ و ۵ است. برای پارامتر EC و TDS، ۱، ۲ و ۵، برای قلیائیت باندهای ۳ و ۴ و برای دمای سطحی آب باند ۱ است.

مطابق جدول‌های ۱۱ تا ۱۴ بهترین مدل همبستگی پیرسون تصویر ماهواره سنتینل-۲ برای پارامتر PH، باندهای ۴ و ۵، برای پارامتر EC، باندهای ۲ و ۳، برای پارامتر TDS، باندهای ۱، ۳، ۷ و ۱۳ است. باندهای مناسب با ضریب پیرسون بالا برای دمای سطحی آب نیز ۳ و ۱۰ است.

گام اول؛ آماده‌سازی اولیه داده‌های زمینی و تصاویر ماهواره‌ای

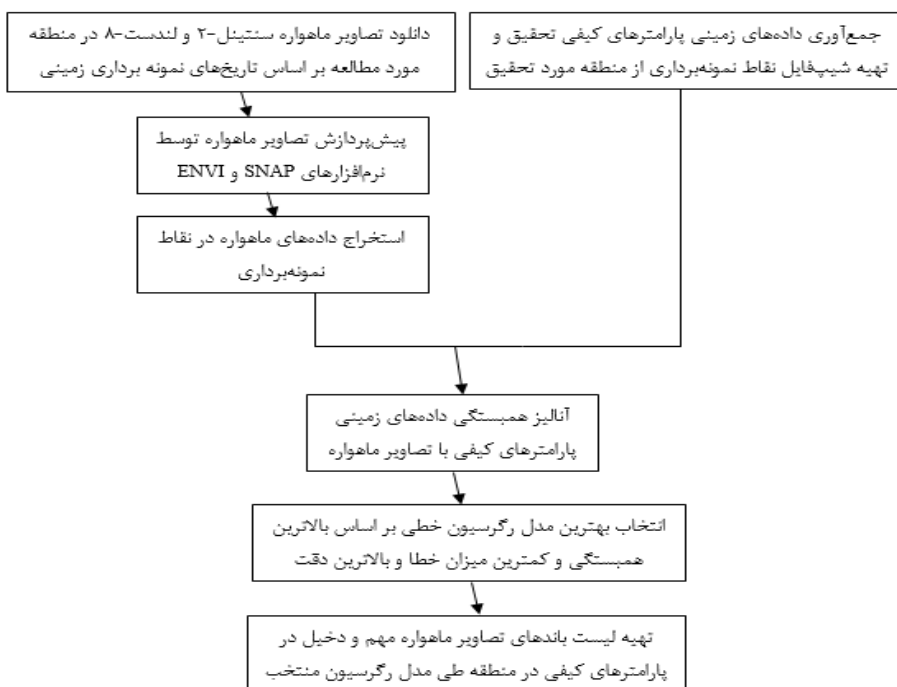
(الف) داده‌های ایستگاه‌های اندازه‌گیری زمینی: ابتدا اطلاعات مربوط به مقادیر پارامترهای کیفی آب شامل میزان اسیدیتته، هدایت الکتریکی، کل جامدات محلول، قلیائیت و دمای سطح آب جمع‌آوری و سپس، شیپ فایل از موقعیت مکانی نقاط نمونه‌برداری واقع بر سد سیمره تهیه می‌شود.

(ب) داده‌های سنجش از دور: برای کار با تصاویر ماهواره به این صورت عمل می‌شود که بعد از دریافت تصاویر در تاریخ‌های نمونه‌برداری زمینی و خارج کردن آن از حالت فشرده، در تصاویر سنتینل-۲، باندها به نرم‌افزار SNAP فراخوانی شد و از طریق ابزار Sen2Cor که یک اکستنشن الحاقی است و قابلیت نصب روی نرم‌افزار SNAP را دارد، اصلاحات اتمسفری تصاویر انجام شد. همه پیکسل باندهای تصاویر هم به منظور تسهیل در عملیات مدل‌سازی به قدرت تفکیک مکانی ۶۰ متر تغییر داده شد و سپس، از آنها به فرمت tif خروجی گرفته و به نرم‌افزار ENVI فراخوانی شد. در این نرم‌افزار، اصلاحات رادیومتریک انجام و در هر باند تصویربرداری، میانگین انعکاسی در محل ایستگاه‌های نمونه‌برداری زمینی محاسبه و در نرم‌افزار Excel خروجی گرفته شد.

گام دوم؛ بررسی همبستگی میان باندهای تصویربرداری و پارامترهای کیفیت آب: در این مرحله از تحقیق، همبستگی باندهای مختلف تصاویر ماهواره‌ای با مقادیر پارامترهای کیفیت آب بررسی می‌شود. به این منظور، در مرحله اول با به‌کارگیری مدل رگرسیون ساده، همبستگی تک‌تک باندهای تصویربرداری ماهواره با پارامترهای کیفیت آب به صورت جداگانه بررسی می‌شود. در مرحله دوم همبستگی چندبندی توسط متد گام‌به‌گام در نرم‌افزار SPSS بررسی می‌شود. با استفاده از عملیات آنالیز همبستگی، باندها که ارتباط قوی‌تری با پارامترهای کیفی دارند، شناسایی می‌شوند و باندهای با ارتباط ضعیف‌تر، حذف می‌شوند و در نتیجه، حجم اطلاعات غیرمفید کاهش می‌یابد [۳۴].

ضریب همبستگی بیان‌کننده میزان همبستگی بین نتایج برآوردشده مدل و داده‌های واقعی است یا به عبارتی،

1. Root Mean Square Error
2. Coefficient of Determination



شکل ۲. فلوجارت روش تحقیق

جدول ۵. نتایج بهترین مدل مقادیر چندباندی پارامتر PH حاصل از داده‌های زمینی با باندهای ماهواره لندست-۸

		ضریب همبستگی پیرسون	ضریب تعیین	خطای استاندارد	ضرایب استاندارد شده متغیر	مقدار p-value
مدل دوم	باند پنج	۰/۲۵۹	۰/۰۵۶	۰/۴۶	۰/۹۲۱	۰/۰۰۳
	باند چهار				-۰/۷۶۷	۰/۰۱۲

جدول ۶. نتایج بهترین مدل مقادیر چندباندی پارامتر EC حاصل از داده‌های زمینی با باندهای ماهواره لندست-۸

		ضریب همبستگی پیرسون	ضریب تعیین	خطای استاندارد	ضرایب استاندارد شده متغیر	مقدار p-value
مدل پنجم	باند یک	۰/۷۰۸	۰/۴۹۲	۱۱۱	۲/۱۸۹	۰/۰۰۰
	باند دو				-۱/۵۷۷	۰/۰۰۰
	باند پنج				-۰/۸۱۲	۰/۰۰۰

جدول ۷. نتایج بهترین مدل مقادیر چندباندی پارامتر TDS حاصل از داده‌های زمینی با باندهای ماهواره لندست-۸

		ضریب همبستگی پیرسون	ضریب تعیین	خطای استاندارد	ضرایب استاندارد شده متغیر	مقدار p-value
مدل پنجم	باند یک	۰/۶۹۶	۰/۴۷۳	۷۵/۲۴	۲/۳۸۷	۰/۰۰۰
	باند دو				-۱/۹۸	۰/۰۰۰
	باند پنج				-۱/۲۹۵	۰/۰۰۰
	باند چهار				۰/۷۰۸	۰/۰۳۴

جدول ۸. نتایج بهترین مدل مقادیر چندباندی پارامتر قلیائیت حاصل از داده‌های زمینی با باندهای ماهواره لندست-۸

مقدار p-value	ضرایب استاندارد شده متغیر	خطای استاندارد	ضریب تعیین	ضریب همبستگی پیرسون	
۰/۰۰۰	-۱/۱۵۹	۲۲	۰/۲۱۵	۰/۴۷۳	باند سه
۰/۰۰۲	۰/۷۶۴				باند چهار

جدول ۹. نتایج بهترین مدل مقادیر چندباندی پارامتر دمای سطحی آب حاصل از داده‌های زمینی با باندهای ماهواره لندست-۸

مقدار p-value	ضرایب استاندارد شده متغیر	خطای استاندارد	ضریب تعیین	ضریب همبستگی پیرسون	
۰/۰۰۰	۰/۸۷۱	۲/۹	۰/۷۵۷	۰/۸۷۱	باند یک

جدول ۱۰. خلاصه نتایج همبستگی مقادیر پارامترهای کیفی حاصل از داده‌های زمینی با ترکیب باندهای ماهواره لندست-۸

پارامتر کیفی	باندهای منتخب	ضریب همبستگی پیرسون	خطای استاندارد
PH	۴ و ۵	۰/۲۵۹	۰/۴۶
EC	۱، ۲ و ۵	۰/۷۰۸	۱۱۱
TDS	۱، ۲، ۴ و ۵	۰/۶۹۶	۷۵/۲۴
قلیائیت	۳ و ۴	۰/۴۷۳	۲۲
دمای سطحی آب	۱	۰/۸۷۱	۲/۹

جدول ۱۱. نتایج بهترین مدل مقادیر چندباندی پارامتر PH حاصل از داده‌های زمینی با باندهای ماهواره سنتینل-۲

مقدار p-value	ضرایب استاندارد شده متغیر	خطای استاندارد	ضریب تعیین	ضریب همبستگی پیرسون	
۰/۰۰۰	-۱/۰۴۵	۰/۲۸	۰/۳۲۸	۰/۵۸۸	باند پنج
۰/۰۳۷	۰/۵۳۱				باند چهار

جدول ۱۲. نتایج بهترین مدل مقادیر چندباندی پارامتر EC حاصل از داده‌های زمینی با باندهای ماهواره سنتینل-۲

مقدار p-value	ضرایب استاندارد شده متغیر	خطای استاندارد	ضریب تعیین	ضریب همبستگی پیرسون	
۰/۰۰۰	-۱/۵۴۵	۷۸/۷	۰/۷۱۰	۰/۸۴۷	باند سه
۰/۰۰۰	۱/۳۴۲				باند دو

جدول ۱۳. نتایج بهترین مدل مقادیر چندباندی پارامتر TDS حاصل از داده‌های زمینی با باندهای ماهواره سنتینل-۲

مقدار p-value	ضرایب استاندارد شده متغیر	خطای استاندارد	ضریب تعیین	ضریب همبستگی پیرسون	
۰/۰۰۰	-۰/۷۴۴	۴۵/۸	۰/۷۸۹	۰/۸۹۵	باند سه
۰/۰۰۰	۱/۱۷				باند یک
۰/۰۰۰	-۱/۰۸				باند هفت
۰/۰۰۰	۰/۶۵۶				باند سیزده

جدول ۱۴. نتایج بهترین مدل مقادیر چندباندی پارامتر دمای سطحی آب حاصل از داده‌های زمینی با باندهای ماهواره سنتینل-۲

مقدار p-value	ضرایب استاندارد شده متغیر	خطای استاندارد	ضریب تعیین	ضریب همبستگی پیرسون	
۰/۰۰۰	-۱/۱۵۹	۴/۱۴	۰/۵۵۳	۰/۷۵۲	باند سه
۰/۰۰۲	۰/۷۶۴				باند ده

جدول ۱۵. نتایج همبستگی مقادیر پارامترهای کیفی حاصل از داده‌های زمینی با ترکیب باندهای ماهواره سنتینل-۲

پارامتر کیفی	باندهای منتخب	ضریب همبستگی پیرسون	خطای استاندارد
PH	۵ و ۴	۰/۵۵۸	۰/۲۸
EC	۳ و ۲	۰/۸۴۷	۷۸/۷
TDS	۱، ۳، ۷ و ۱۳	۰/۸۹۵	۴۵/۸
دمای سطحی آب	۳ و ۱۰	۰/۷۵۲	۴/۱۴

نشان می‌دهد بیشترین تأثیر و اهمیت را برای پارامتر TDS، باند یک با بیشترین ضریب یعنی ۱/۱۷ دارد.

پارامتر کیفی قلیائیت فقط از طریق تصاویر ماهواره لندست-۸ قابل بررسی است و آماره‌ها نشان از معنادار نبودن این پارامتر با تصاویر سنتینل-۲ دارد. ضریب همبستگی پیرسون لندست-۸ برای این پارامتر کیفی برابر با ۰/۴۷۳ و خطای استاندارد ۲۲ است. باندهای دخیل در این مدل ۳ و ۴ هستند که طبق محاسبه ضریب استاندارد شده باندها، بیشترین ضریب مربوط به باند ۴ و برابر با ۰/۷۶۴ است. در نتیجه، برای بررسی این پارامتر بیشترین اثر را باند ۴ بر مدل دارد.

در بررسی پارامتر دمای سطحی آب، تصاویر لندست-۸ با ضریب پیرسون (۰/۸۷۱) و خطای استاندارد (۲/۹) و باند دخیل مدل، باند یک و تصاویر سنتینل-۲ با ضریب پیرسون (۰/۷۵۲) و خطای استاندارد (۴/۱۴) و باند دخیل مدل، باند ۳ و ۱۰ (بیشترین ضریب استاندارد شده باندها مربوط به باند ۱۰ و برابر با ۰/۷۶۴ است) قابلیت استفاده دارد.

از مقایسه جدول‌های ۱۰ و ۱۵ برمی‌آید که در بررسی پارامتر کیفی PH با تصاویر ماهواره، بین تصاویر لندست-۸ و سنتینل-۲، با توجه به ضریب همبستگی پیرسون بالاتر تصاویر سنتینل-۲ (۰/۵۸۸) و خطای استاندارد کمتر (۰/۲۸) نسبت به لندست-۸، این تصاویر مناسب‌تر است. همچنین، با محاسبه مقادیر ضرایب استاندارد شده باندهای دخیل در مدل، بیشترین تأثیر مربوط به باند ۴ با ضریب ۰/۵۳۱ است.

در بررسی پارامتر EC با تصاویر ماهواره، تصاویر سنتینل-۲ با ضریب همبستگی پیرسون بالاتر (۰/۸۴۷) و خطای استاندارد کمتر (۷۸/۷) مناسب است. محاسبه مقادیر ضرایب استاندارد شده باندهای دخیل در مدل هم نشان می‌دهد بیشترین تأثیر و اهمیت را برای پارامتر EC، باند ۲ با بیشترین ضریب یعنی ۱/۳۴ دارد.

بررسی پارامتر TDS با تصاویر ماهواره، نشان از برتری تصاویر سنتینل-۲ با ضریب همبستگی پیرسون بالاتر (۰/۸۹۵) و خطای استاندارد کمتر (۴۵/۸) دارد. محاسبه مقادیر ضرایب استاندارد شده باندهای دخیل در مدل هم

جدول ۱۶. نتایج کلی مربوط به پایش کیفی مخزن سد سیمره با تصاویر ماهواره‌ای

پارامتر کیفی	ماهواره منتخب	باند منتخب بر محاسبه اساس ضریب استاندارد شده باندها
PH	سنتینل-۲	چهار
EC	سنتینل-۲	دو
TDS	سنتینل-۲	یک
قلیائیت	لندست-۸	چهار
دمای سطحی آب	سنتینل-۲	ده
	لندست-۸	یک

نسبت به نتیجه این شاخص در تحقیق کابلی‌زاده در سد کرخه و دز و رودخانه کارون دقت بیشتری نشان می‌دهد [۱۶].

با توجه به نتایج حاصل از تحقیق و مدل‌های استفاده‌شده می‌توان بیان کرد که در بیشتر پارامترهای کیفی مد نظر در این تحقیق، ماهواره سنتینل-۲ به دلیل داشتن قدرت تفکیک مکانی و طیفی مناسب‌تر از ماهواره دیگر است و می‌تواند به طور وسیعی در پایش پیوسته وضعیت کیفی منابع آب سطحی کوچک‌مقیاس مانند مخازن استفاده شود. همچنین، این ماهواره به دلیل برخورداری از قدرت تفکیک زمانی بیشتر نسبت به دیگر ماهواره‌های سنجنش از دوری مانند اسپات و لندست، می‌تواند در فاصله‌های زمانی کوتاه‌مدت غلظت پارامترهای میدانی را تا حدود زیادی کاهش دهد. با توجه به قدرت تفکیک زمانی سنتینل-۲ که سه تا پنج روز است، این ماهواره می‌تواند سرعت پایش وضعیت کیفی منابع آب سطحی را به میزان قابل توجهی بالا ببرد؛ این در حالی است که نمونه‌برداری‌های زمینی و میدانی در حال حاضر به صورت ماهانه انجام می‌شود [۳۵]. از طرفی، استفاده از تصاویر ماهواره بر خلاف اندازه‌گیری‌های میدانی که هزینه زیادی دارند، می‌تواند پایش کیفیت آب را به دلیل رایگان بودن تصاویر آن، با هزینه بسیار کمتری انجام دهد. از آنجا که این تحقیق روی مخزن سد سیمره انجام گرفته است، پیشنهاد می‌شود این ارزیابی‌ها روی سایر مخازن سدهای کشور انجام شود تا دقت الگوریتم‌ها و تصاویر مورد استفاده برای نواحی مختلف بررسی شود.

منابع

- [۱]. کابلی‌زاده، م.، ک. رنگرن، و. ش. محمدی. ۱۳۹۷. کاربرد تلفیق تصاویر ماهواره‌ای لندست-۸ و سنتینل-۲ در پایش محیطی. نشریه سنجنش از دور و سامانه اطلاعات جغرافیایی در منابع طبیعی (کاربرد سنجنش از دور و GIS منابع طبیعی). ۹۰(۳): ۷۱-۵۳.
- [۲]. میرعلیزاده فر، س. ر. و. ش. منصور. ۱۳۹۸. ارزیابی شاخصهای سنجنش از دور در مطالعات کمی و کیفی آب‌های سطحی با تصاویر ماهواره‌های لندست-۸ (مطالعه موردی: جنوب استان خوزستان). نشریه سنجنش از دور و سامانه اطلاعات جغرافیایی در منابع طبیعی (کاربرد سنجنش از دور و GIS منابع طبیعی). ۱۰(۲): ۸۴-۶۳.

بنابراین، با توجه به نتایج به‌دست‌آمده از تحقیق، مطابق جدول ۷ در منطقه مطالعه‌شده (مخزن سد سیمره)، برای بررسی پارامتر کیفی PH، باند قرمز با طول موج ۰/۶۵ میکرومتر، EC باند آبی با طول موج ۰/۴۹ میکرومتر، TDS باند Coastal aerosol با طول موج ۰/۴۳ میکرومتر و دمای سطحی آب باند SWIR-Cirrus با طول موج ۱/۳۷ میکرومتر از ماهواره سنتینل-۲ کاربرد دارد. در بررسی پارامتر کیفی قلیائیت باند قرمز با طول موج ۰/۶۵ میکرومتر و دمای سطحی آب باند آبی با طول موج ۰/۴۹ میکرومتر کاربرد دارد.

بحث و نتیجه‌گیری

در این تحقیق سعی شد توانایی تصاویر ماهواره‌ای سنتینل-۲ و لندست-۸ برای برآورد غلظت پارامترهای کیفیت آب شامل میزان اسیدیته (PH)، هدایت الکتریکی (EC)، کل جامدات محلول (TDS)، قلیائیت و دمای سطحی آب در چهار نقطه از مخزن سد سیمره بررسی شود. به این منظور، از تصاویر برداشت‌شده سد مورد نظر استفاده و با جمع‌آوری مقادیر زمینی پارامترهای یادشده همانند مطالعه فتاحی‌مقدم [۳۳]، جیامینگ لیو و همکاران (۲۰۱۵) [۳۴]، لیزا (۲۰۰۷) [۲۲]، از مدل رگرسیون برای ارتباط و همبستگی بین این داده‌ها استفاده شد و بهترین مدل‌سازی ممکن با کمک روش گام‌به‌گام نرم‌افزار SPSS به این منظور در نظر گرفته شد. برای برآورد دقت مدل‌سازی‌های صورت‌گرفته، RMSE میان مقادیر واقعی و مقادیر حاصل از مدل‌ها محاسبه شد. نتایج همانند یافته‌های حاصل از تحقیق بانده و همکاران (۲۰۱۸) [۲۹] و همچنین، حسین‌زاده و همکاران (۱۳۹۷) [۳۵]، برای ارزیابی تصاویر ماهواره‌ای با پارامتر کیفی، نشان از برتری تصاویر ماهواره سنتینل-۲ نسبت به لندست-۸ دارد. در تحقیق حاضر برای پیدا کردن ارتباط میان تصاویر ماهواره‌های سنتینل-۲ و لندست-۸ با پارامتر کیفی PH، EC و TDS تصاویر سنتینل-۲ و برای مدل‌سازی ارتباط میان تصاویر ماهواره‌های یادشده با پارامتر کیفی قلیائیت تصاویر لندست-۸ دارای توانایی بیشتری است. نتایج مدل‌سازی ارتباط بین پارامتر دمای سطح آب با تصاویر هر دو ماهواره نشان از همبستگی بالا و توانایی هر دو ماهواره دارد.

در این تحقیق میزان دقت از طریق شاخص RMSE در پارامتر TDS با تصاویر سنتینل-۲، ۴۴/۳۷ برآورد شد که

- [13]. Viessman, W., Hammer, M. J.E. M. Perez, and P. A. Chadik, "Water Supply and Pollution Control," 1998.
- [14]. Sowers, J., Vengosh, A. and Weinthal, E. "Climate Change, Water Resources, and the Politics of Adaptation in the Middle East and North Africa," *Climatic Change*, vol. 104, 2011, pp. 599-627.
- [15]. Glasgow, H.B., Burkholder, J.M., Reed, R.E., Lewitus, A.J. and Kleinman, J.E., "Real-Time Remote Monitoring of Water Quality: A Review of Current Applications, and Advancements in Sensor, Telemetry, and Computing Technologies," *Journal of Experimental Marine Biology and Ecology*, vol. 300, 2004, pp. 409-448.
- [16]. Gorchev, H.G., Ozolins, G., "Who Guidelines for Drinking-Water Quality," *WHO Chronicle*, vol. 38, No. 3, 2011, pp. 104-108.
- [17]. Chang, N.-B., Imen, S. and Vannah, B., "Remote Sensing for Monitoring Surface Water Quality Status and Ecosystem State in Relation to The Nutrient Cycle: A 40-Year Perspective," *Critical Reviews in Environmental Science and Technology*, vol. 45, 2015, pp. 101-166.
- [18]. Xiao X, Jian X, Xiongfei W, Chengfang H, Xuejun C, Zhaohui W, Dengzhong Z. 2015. Evaluation Method of Water Quality for River Based on Multi-Spectral Remote Sensing Data. In: *The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, Volume XL-7/W3, 2015. 36th International Symposium on Remote Sensing of Environment, 11-15 May 2015, Berlin, Germany. 1517-1523.
- [19]. Clay Barrett D, Frazier A. 2016. Automated method for monitoring water quality using Landsat imagery. *Water*, 8(6): 257-269.
- [20]. Toming K, Kutser T, Laas A, Sepp M, Paavel B, Nõges T. 2016. First experiences in mapping lake water quality parameters with Sentinel-2 MSI imagery. *Remote sensing*, 8(8): 640-658.
- [21]. Ritchie JC, Cooper CM. Remote sensing techniques for determining water quality: Applications to TMDLs. *TMDL Sci Issues Conf* (2001), Water Environ Fed Alexandria, VA. 2001;367-74.
- [22]. Jerry C, R. FS. Monitoring suspended sediments with remote sensing techniques. *Hydrol Appl Sp Technol*. 1986;(160):233-43.
- [۳]. مومی پور، م. ۱۳۹۵. مطالعه کیفیت آب‌های ساحلی با تصاویر ماهواره ای فراترینی - Hyperion (مطالعه موردی: ساحل اروندکنار). *مجله علوم و فنون دریایی*، ۱۱۵(۱): ۱۲۰-۱۱۱.
- [۴]. محوی ا. جنبه های بهداشتی و زیبایی شناسی کیفیت آب. انتشارات بال گستر؛ ۱۳۷۵.
- [۵]. اسکندری مکوند م. نگرشی بر جوانب بهداشتی آب. *عرش اندیشه*؛ ۱۳۸۴. ۲۷۶ p.
- [۶]. فتاحی مقدم، م. ۱۳۹۰. ارزیابی قابلیت سنجده هایپریون، فیلداسپیک ۳ و داده های زمینی برای برآورد پارامترهای کیفیت آب در رودخانه کارون مقطع شهر اهواز، پایان نامه کارشناسی ارشد، دانشگاه شهید چمران اهواز، دانشکده علوم زمین، گرایش سنجش از دور و اطلاعات جغرافیایی.
- [۷]. حسین زاده، م. صابری، ع. صفرنژادی، غ. احمدی قراگزلو، رشید. برآورد پارامترهای کیفی آب با استفاده از الگوریتم بهینه سازی PSO و سنجش از دور (تصاویر ماهواره 2-SENTINEL)، یازدهمین سمینار بین المللی مهندسی رودخانه. بهمن ۱۳۹۷.
- [8]. Su T-C, Chou H-T. 2015. Application of multispectral sensors carried on unmanned aerial vehicle (UAV) to trophic state mapping of small reservoirs: a case study of Tain-Pu reservoir in Kinmen, Taiwan. *Remote Sensing*, 7(8): 10078-10097.
- [9]. Chen Q, Wu W, Blanckaert K, Ma J, Huang G. 2012. Optimization of water quality monitoring network in a large river by combining measurements, a numerical model and matterelement analyses. *Journal of Environmental Management*, 110: 116-124.
- [10]. Liu H, Li Q, Shi T, Hu S, Wu G, Zhou Q. 2017. Application of sentinel 2 MSI images to retrieve suspended particulate matter concentrations in Poyang Lake. *Remote Sensing*, 9(7): 761-783.
- [11]. Zheng G, DiGiacomo PM. 2017. Uncertainties and applications of satellite-derived coastal water quality products. *Progress in Oceanography*, 159:45-72.
- [12]. Postel, S., *The Last Oasis: Facing Water Scarcity*: Routledge, 2014.

- [23]. Ritchie JC, Schiebe FR, McHenry JR. Remote sensing of suspended sediments in surface waters. *Photogramm Eng Remote Sensing*. 1976;42(12):1539–45.
- [24]. L.Liversedge. Turbidity Mapping and Prediction in Ice Marginal Lakes At the Bering Glasier System, Alaska. university of Michigan; 2007.
- [25]. Song K. Water quality monitoring using Landsat Themate Mapper data with empirical algorithms in Chagan Lake, China. *J Appl Remote Sens*. 2011;5(1):053506.
- [26]. Song K, Li L, Li S, Tedesco L, Hall B, Li L. Hyperspectral remote sensing of total phosphorus (TP) in three central Indiana water supply reservoirs. *Water Air Soil Pollut*. 2012;223(4):1481–502.
- [27]. Liu J, Zhang Y, Yuan D, Song X. Empirical estimation of total nitrogen and total phosphorus concentration of urban water bodies in china using high resolution IKONOS multispectral imagery. *Water (Switzerland)*. 2015;7(11):6551–73.
- [28]. Kutser T, Paavel B, Verpoorter C, Ligi M, Soomets T, Toming K, et al. Remote sensing of black lakes and using 810 nm reflectance peak for retrieving water quality parameters of optically complex waters. *Remote Sens*. 2016;8(6).
- [29]. Giardino C, Bresciani M, Fava F, Matta E, Brando VE, Colombo R. Mapping submerged habitats and mangroves of Lampi Island Marine National Park (Myanmar) from in situ and satellite observations. *Remote Sens*. 2016;8(1):1–13.
- [30]. Xie H, Tong X, Qiu Y, Zhang H, Zhao J. Remote sensing based water quality monitoring and spatial-temporal analysis in Huangpu River, Shanghai. *Int Geosci Remote Sens Symp*. 2006;1447–50.
- [31]. Bande, Prosper, Elhadi Adam, Mohamed A M Abd Elbasit, and Samuel Adelabu. 2018. "COMPARING LANDSAT 8 AND SENTINEL-2 IN MAPPING WATER QUALITY AT VAAL DAM 1. School of Geography , Archaeology and Environmental Science , University of Witwatersrand , Johannesburg , South Africa 2. Agricultural Research Council – Institute for Soil , Cl." (July): 9280–83.
- [32]. Masocha, Mhosisi, Chipso Mungenge, and Tamuka Nihwatiwa. 2018. "Remote Sensing of Nutrients in a Subtropical African Reservoir: Testing Utility of Landsat 8." *Geocarto International* 33(5): 458–69. <http://dx.doi.org/10.1080/10106049.2016.1265596>.
- [33]. Hach, Standard, 8051. *Water Analysis HandBook*. 2003. p. 1268.
- [34]. ESA, (2012), "Sentinel-2: ESA's Optical High-Resolution Mission for GMES Operational Services", (p. 80).
- [35]. Sharifan H, Dehghani AA, Karimirad I. Correction factor for Hargreaves-Samani method to estimate ETo (case study: Gorgan synoptic station). *Water and Soil Conservation*. 2012;19(3):227-235. [Persian]
- [36]. Liu, J. , Zhang. Y., Yuan. D., Song. X., 2015, Empirical Estimation of Total Nitrogen and Total Phosphorus Concentration of Urban Water Bodies in china Using High Resolution IKONOS Multispectral Imagery, *Journal of Water* , 7, 6551-6573.