

پایش منابع آلاینده آب دریاچه‌ها با استفاده از تکنیک سنجش از دور (مطالعه موردی: دریاچه زریبار)

فریما عزیزی^۱، فاطمه دالوند^۲، پیمان طهماسبی^۳✉

نوع مقاله: علمی پژوهشی

صفحه ۷۱ تا ۸۶

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۴/۰۱/۲۷

تاریخ دریافت: ۱۴۰۳/۱۲/۱۰

چکیده

رشد جمعیت و تخلیه فاضلاب‌های مختلف باعث افزایش آلودگی منابع آبی، به‌ویژه آب‌های سطحی، شده است که این امر منجر به رشد جلبک‌ها، کاهش اکسیژن محلول و افت کیفیت آب می‌شود. به‌دلیل هزینه‌بر و زمان‌بر بودن روش‌های میدانی، فناوری سنجش از دور به‌عنوان روشی کارآمد برای پایش کیفیت آب مورد استفاده قرار می‌گیرد. در این مطالعه، از تصاویر ماهواره‌ای سنتینل-۲ برای بررسی کیفیت آب دریاچه زریبار و شناسایی منابع آلاینده استفاده شد. ابتدا با اعمال شاخص NDWI، پیکره آبی از سایر عوارض جدا گردید و سپس شاخص NDCI برای برآورد غلظت کلروفیل-آ به کار رفت که دقت آن با داده‌های زمینی $R^2=0.90$ و $RMSE=0.07$ ارزیابی شد. همچنین، با استفاده از الگوریتم یادگیری ماشین جنگل تصادفی، کاربری اراضی منطقه در پنج کلاس جنگل، پیکره آبی، مناطق شهری، کشاورزی و ترکیب جنگل و مرتع طبقه‌بندی شد که دقت کلی ۹۲/۰۴ درصد و ضریب کاپا ۸۸/۷۸ درصد را نشان داد. نتایج حاکی از آن بود که نواحی ساحلی دریاچه به‌دلیل ورود آبراهه‌های آلوده، بیش‌ترین میزان آلودگی را دارند، درحالی‌که چشمه‌های کف دریاچه موجب کاهش آلودگی در مرکز آن شده‌اند. همچنین، قسمت شرقی دریاچه به‌علت مجاورت با اراضی کشاورزی، تخلیه فاضلاب شهری و فعالیت‌های تفریحی آلوده‌تر از سایر بخش‌ها بود. یافته‌ها نشان داد که استفاده از تصاویر سنتینل-۲ و الگوریتم‌های یادگیری ماشین، روشی مؤثر و مقرون‌به‌صرفه برای ارزیابی کیفیت منابع آبی است که امکان پایش سریع و دقیق شاخص‌های کیفی را فراهم کرده و به مدیریت بهتر منابع آبی و کاهش آلودگی کمک می‌کند.

کلیدواژه‌ها: دریاچه زریبار، سنتینل-۲، غلظت کلروفیل-آ، کیفیت آب، آلودگی

^۱ دانشجوی کارشناسی ارشد، گرایش منابع آب، دانشکده کشاورزی، دانشگاه کردستان، کردستان، ایران

^۲ دانشجوی دکتری گروه علوم مهندسی آب، دانشکده کشاورزی، دانشگاه بوعلی‌سینا، همدان، ایران

^۳ ✉ دانشجوی دکتری گروه علوم مهندسی آب، دانشکده کشاورزی، دانشگاه بوعلی‌سینا، همدان، ایران (نویسنده مسئول p.tahmasebi@agr.basu.ac.ir)

مقدمه

در عصر حاضر کمبود منابع آب یکی از اصلی ترین عوامل محدودکننده تولید مواد غذایی است (رزگرت و همکاران، ۲۰۰۲). همچنین با گذشت زمان و گسترش جوامع و به تبع آن افزایش استفاده از منابع آبی، تغییر خصوصیات کیفی منابع آبی افزایش پیدا کرده است (طهماسبی و همکاران، ۱۴۰۳). طبق پیش بینی ها، جمعیت جهان تا سال ۲۰۵۰ به حدود ۹/۱ میلیارد نفر خواهد رسید که از این تعداد، تقریباً ۶۹ درصد در شهرها زندگی خواهند کرد. افزایش جمعیت شهری و گسترش الگوهای مصرف ناپایدار فشار مضاعفی بر منابع محدود زمین وارد خواهد کرد. از سوی دیگر، در بسیاری از نقاط جهان، آلودگی ها به سرعت در حال تخریب منابع آب در دسترس هستند. آب های سطحی به شدت تحت تاثیر فاضلاب آلوده قرار می گیرند، به طوری که حتی یک لیتر از آن می تواند حجم زیادی از آب را آلوده سازد (پستل، ۲۰۱۴). تغییرات اقلیمی، به همراه الگوی مصرف نامناسب و افزایش تلفات منابع آب، با تغییر پارامترهای هیدرولوژیکی، موجب کاهش دسترسی، تغذیه و کیفیت منابع آب و تغییرات-زمانی در توزیع آن ها می شود (ویسمن و همکاران، ۱۹۹۸). با توجه به این که کشور ایران در ناحیه خشک و نیمه خشک جهان واقع شده، کاهش کمیت و کیفیت منابع آب می تواند مشکلات اقتصادی، اجتماعی، زیست محیطی و حتی سیاسی به همراه داشته باشد. به طور کلی، مناطق خاورمیانه و شمال آفریقا نسبت به تأثیرات تغییرات اقلیمی بر منابع آبی حساس بوده و این تغییرات همراه با رشد جمعیت، تأثیرات منفی بالایی بر منابع آبی این نواحی خواهند گذاشت (ساور و همکاران، ۲۰۱۱).

کشور ایران دارای منابع آبی گوناگونی از جمله دریا، دریاچه، رودخانه و تالاب است. متأسفانه، بخش عمده ای از این منابع در سال های اخیر با آسیب و تخریب جدی مواجه شده است (جان علی پور و همکاران، ۱۳۹۷). مطالعات آماری نمایان گر تشدید

روند نزولی پارامترهای کیفی منابع آبی در ایران طی بازه زمانی ۱۳۸۰-۱۴۰۰ است. این تغییرات متأثر از فاکتورهای جمعیت شناختی، شهرنشینی، افزایش بار آلودگی فاضلاب ها، تغییرات اقلیمی، دگرگونی کاربری اراضی و توسعه غیراصولی زیر کشت کشاورزی بوده است (کیانی و انصاری، ۱۳۹۷). در پی تشدید فشارهای انسانی بر اکوسیستم های آبی، سنجش دقیق بیوژئوشیمیایی آب به منظور اطمینان از شرایط مطلوب زیستی ضروری است. از این رو، توسعه روش های پایش مقرون به صرفه و مستمر، جهت تضمین بهره برداری پایدار از این منابع و حفظ هموستازی اکولوژیکی آن ها، امری اجتناب ناپذیر است (سنت و همکاران، ۲۰۲۱). به این ترتیب، استانداردسازی تجزیه و تحلیل کیفیت آب و ساده سازی این فرآیندها به گونه ای که هم برای محققان و هم برای مدیران و سیاست گذاران محیط زیست قابل درک باشد، از اهمیت بالایی برخوردار است، زیرا این افراد می توانند نتایج این نوع تجزیه و تحلیل را عملی کنند (کاریدیس و کیتسو، ۲۰۱۳). در این زمینه، اتحادیه اروپا دستورالعمل چارچوب آب^۱ (WFD) را در سال ۲۰۰۰ ایجاد کرد که هدفی جامع برای حفاظت و مدیریت منابع آب دارد. این دستورالعمل به منظور بهبود کیفیت آب های سطحی و زیرزمینی، حفاظت از اکوسیستم های آبی و تضمین استفاده پایدار از منابع آب طراحی شده است. به موجب دستورالعمل WFD، کشورهای عضو موظف به اجرای برنامه های مدیریت منابع آب، ارزیابی وضعیت اکولوژیکی و پایش و دسته بندی منابع آبی بر اساس پارامترهای مشخص شده می باشند. پایش مداوم کیفیت آب، به عنوان یک اقدام ضروری در راستای تطابق با الزامات و اهداف WFD تلقی می گردد (انسپر و علی، ۲۰۱۸).

کیفیت آب را می توان بر اساس شاخص های فیزیکی، شیمیایی و بیولوژیکی مانند کدورت، کلروفیل-آ، جلبک های مضر، دما، فلزات، اکسیژن محلول، مواد مغذی (به ویژه فسفر و نیتروژن) و بسیاری از

¹ Water Framework Directive

آلاینده‌های دیگر پایش کرد (دای و همکاران، ۲۰۱۳). کیفیت منابع آبی، به‌ویژه پیکره‌های آبی، از طریق سنجش از دور ماهواره‌ای و استخراج مستقیم شاخص‌ها، روشی کارآمد و موثر است. روش‌های سنتی نمونه‌برداری میدانی، با وجود اهمیت، محدودیت‌هایی از قبیل هزینه‌های بالا، زمان‌بر بودن و عدم امکان پایش مستمر را به همراه دارند. علاوه بر این، نمونه‌های میدانی به دلیل محدودیت‌های مکانی و زمانی، نمی‌توانند نمایانگر دقتی از وضعیت کلی منطقه مورد مطالعه باشند. در مقابل، داده‌های سنجش از دور با ویژگی‌هایی نظیر تصویربرداری مکرر، پوشش وسیع، تفکیک طیفی و مکانی مناسب و ارائه داده‌ها به صورت سری زمانی، امکان پایش دقیق، مستمر و مقرون‌به‌صرفه کیفیت آب را فراهم می‌سازند (وردل و همکاران، ۲۰۱۸).

در مطالعات مربوط به غنی‌سازی مواد مغذی و اکوسیستم دریاچه‌ها، عناصر فسفر، نیتروژن و کلروفیل-آ از اهمیت ویژه‌ای برخوردارند. به همین دلیل، استفاده از مقادیر مطلق برخی متغیرها مانند فسفر کل و توده زیستی فیتوپلانکتون‌ها (کلروفیل) و همچنین محاسبه شاخص‌های وضعیت تروفیکی، روش‌های مناسبی برای ارزیابی وضعیت تروفیکی منابع آبی به شمار می‌روند (دادس، ۲۰۰۲). کلروفیل-آ، رنگ‌دانه‌ی مهم است که در جلبک‌ها و فیتوپلانکتون‌ها در اکوسیستم‌های آبی به وفور یافت می‌شود. اندازه-گیری میزان این رنگ‌دانه اطلاعات مهمی را در مورد سرعت تولید اولیه و سلامت کلی اکوسیستم‌های آبی در اختیار ما قرار می‌دهد. تولید اولیه که پایه و اساس زنجیره غذایی در اکوسیستم‌های آبی است، به‌طور مستقیم تحت تاثیر غلظت کلروفیل-آ قرار دارد. بنابراین، شاخص کلروفیل-آ نه تنها نشان دهنده میزان فعالیت بیولوژیکی در اکوسیستم‌های آبی است، بلکه به‌عنوان یک پارامتر کلیدی در ارزیابی کیفیت منابع آبی نیز مورد استفاده قرار می‌گیرد.

از جمله مطالعات داخلی و خارجی مشابه و مرتبط با موضوع تحقیق حاضر انجام شده است که در ادامه آورده شده اند؛ ژیاو و همکاران (۲۰۱۵) در رودخانه هان^۱، از نمونه‌برداری‌های زمینی همزمان با تصاویر ماهواره‌ای ZY3 و HJ1A استفاده کردند. آن‌ها با به کارگیری شبکه عصبی، مدل بازتابی شاخص کیفیت آب را برای منطقه مورد مطالعه استخراج کردند و نتایج نشان داد که مدل تهیه‌شده دقت بالایی دارد و قادر است تغییرات کیفیت آب را در سطح منطقه به خوبی برآورد کند. لیو و همکاران (۲۰۱۵) با استفاده از چهار باند تصویربرداری ماهواره‌ای ایکونوس، میزان نیتروژن کل و فسفر کل در رودخانه ورت^۲ و دریاچه کیو^۳ را بررسی کردند. آن‌ها با روش رگرسیون چندمتغیره و شبکه عصبی، ارتباط بین باندهای تصویربرداری و پارامترهای کیفیت آب را مدل‌سازی کردند و نتایج نشان داد که علی‌رغم دقت بالای همبستگی ۰/۸۵ هر دو مدل، شبکه عصبی قادر بوده با دقت بالاتری پیش‌بینی کند. از تصاویر ماهواره‌ای سری لندست-۵ و لندست-۸ جهت بررسی وضعیت کیفیت پهنه آبی از کلروفیل-آ و کدورت در دریاچه شرق اوکلاهما استفاده کردند. نتایج آن‌ها نشان داد که همبستگی بازتابش باند SWIR با دو پارامتر کیفیت آب (کلروفیل و کدورت) نسبت به باندهای دیگر بالاتر است. سو و چاو جهت تخمین غلظت تروفیک^۴ مخزن تاین‌پو^۵ د کشور تایلند، از تصاویر هواپیماهای بدون سرنشین (UAV) استفاده کردند و با دو روش MPP و میانگین‌گیری، بهترین مدل رگرسیونی را جهت تخمین غلظت تروفیک محاسبه کردند. نتایج نشان داد که روش MPP عملکرد بهتری نسبت به روش میانگین‌گیری دارد. کلای و فرایزر (۲۰۱۶) و پادر و همکاران (۲۰۱۹) جهت تخمین کلروفیل-آ آب‌های کدر شمال خلیج بنگال از دو الگوریتم OC-2 و OC-3 به همراه تصاویر لندست-۸ و سنتینل-۲ استفاده کردند و اعتبار سنجی را به کمک نمونه‌برداری زمینی انجام دادند. نتایج نشان

⁴ Trophic

⁵ Tain-Pu

¹ Han

² Wrt

³ Chiu

داد که الگوریتم OC-2 غلظت کلروفیل-آ را با دقت بالاتری پیش‌بینی کرده است. علاوه بر این غلظت کلروفیل-آ در طول فصل های زمستان، پیش از موسمی و بعد از با یکدیگر مقایسه شد که در هر دو حالت تصاویر سنتینل-۲ نتایج قابل قبول تری نسبت لندست-۸ ارائه دادند. بوما و همکاران (۲۰۲۰) با اعمال ۴ شاخص طیفی 3DBA، 2DBA، FLH و NDCI بر روی تصاویر ماهواره‌ای لندست-۸ و سنتینل-۲ غلظت کلروفیل-آ دریاچه چاد^۱ را پیش‌بینی کردند. نتایج نشان داد که شاخص‌های 3DBA و NDCI در هر دو تصویر ماهواره‌ای نتایج بهتری ارائه داده و قادر بودند غلظت کلروفیل-آ را با دقت بالاتری تخمین بزنند. سنت و همکاران (۲۰۲۱) با تکیه بر تصاویر سنتینل-۲ اقدام به پایش سری زمانی کیفیت آب مصب رودخانه سودا^۲ برای دوره ۲۰۱۸-۲۰۲۰ در کشور پرغال به کمک کلروفیل-آ و کدورت نمودند. نتایج نشان داد که تصاویر سنتینل-۲ جهت پایش و بررسی پارامترهای کیفی پیکره آبی بسیار مناسب هستند. همچنین بیش-ترین همبستگی بین پارامترهای پیش‌بینی شده با داده‌های زمینی در طول فصول بهار و تابستان بود. کامارگو و همکاران (۲۰۲۴) مطالعه‌ای جهت پایش کیفیت آب مخزن جاگوار-جاکاری^۳ از تصاویر سنتینل-۲ و نمونه‌برداری زمینی از سال ۲۰۱۵ تا ۲۰۲۲ استفاده کرده و به بررسی همبستگی بین کلروفیل-آ و چگالی سیانوباکتری‌ها پرداختند. همچنین جهت بهبود تصحیحات اتمسفری دو الگوریتم C2X و C2XC بر روی تصاویر سنتینل-۲ اعمال کردند. نتایج حاکی از آن بود که چگالی سیانوباکتری‌ها با غلظت کلروفیل-آ همبستگی بالایی دارند و نتایج حاصل از الگوریتم C2X دقت بالتری نسبت به C2XC ارائه دادند. جانگ و همکاران (۲۰۲۴) در مطالعه‌ای میزان غلظت کلروفیل-آ سد مخزنی نامیانگ در کره جنوبی را بررسی کردند. این مطالعه با هدف توسعه یک مدل تخمین کلروفیل-آ بر اساس داده‌های سنجش‌ازدور

ماهواره‌ای سنتینل-۲ و مدل رگرسیون خطی چندگانه (MLR) با استفاده از ۲۱ پارامتر در سال ۲۰۲۱ و ۲۰۲۲ انجام شد. نتایج قابل قبولی به دست آمد و ثابت کردند که تصاویر سنتینل-۲ در مخازن کوچک نیز قادر به تخمین میزان کلروفیل-آ هست و به راحتی قادر به آشکارسازی شکوفه جلبکی در پهنه آبی هست و توانایی مدیریت آلاینده‌های آبی را تسهیل می‌کند. میرعلیزاده‌فرد و منصوری (۱۳۹۸) تحقیقی با هدف ارزیابی کمی و کیفی آب‌های سطحی با تصاویر ماهواره‌ای لندست-۸ در استان خوزستان انجام دادند. نتایج این مطالعه نشان داد که شاخص‌های استخراج خودکار پهنه‌های آبی در مناطق سایه‌دار و شهری کارایی بیش‌تری نسبت به سایر شاخص‌ها دارند، به‌ویژه به دلیل در نظر گرفتن طول‌موج‌های مادون قرمز کوتاه در شناسایی پیکره آبی. مهدوی‌فرد و همکاران (۱۳۹۸) جهت پایش کیفیت آب خور تیاب از اعمال الگوریتم‌های بیوپاتیکی OC2 و OC3 بر روی تصاویر سنتینل-۲ و لندست-۸ استفاده کرده و جهت اعتبار سنجی، نتایج را با داده‌های زمینی ارزیابی دقت کردند. نتایج تحقیق نشان داد که الگوریتم OC2 در ماهواره‌های لندست-۸ و سنتینل-۲ به ترتیب دارای بیش-ترین مقدار ضریب تعیین (R^2) معادل ۰/۹۱ و ۰/۶۴ بود و همچنین مقدار RMSE به ترتیب در تصاویر ماهواره‌ای معادل با ۰/۱۳ و ۰/۳۳ بود. این نتایج بیانگر دقت بالای الگوریتم OC2 در تصاویر ماهواره‌ای مورد استفاده است و به عنوان مناسب‌ترین الگوریتم جهت تهیه نقشه پایش کیفی پیکره آبی منطقه مورد مطالعه انتخاب شد. رحمانی‌خلیلی و همکاران (۱۴۰۲) کیفیت آب خلیج گرگان را از سال ۲۰۱۹ تا ۲۰۲۲ به کمک غلظت کلروفیل-آ بررسی نمودند. جهت تخمین کلروفیل-آ شاخص‌های NDCI، M09 و M05 بر روی تصاویر سنتینل-۲ اعمال کرده و در نهایت با نمونه‌برداری‌های زمینی مقایسه کردند. نتایج نشان داد که شاخص D05 غلظت کلروفیل-آ در خلیج گرگان را

³ Jaguari-Jacaréí¹ Chad² Sado

با ضریب همبستگی بالاتر ($R^2 = 0.77$ و $RMSE = 21.5$) نسبت به سایر شاخص‌ها برآورد کرد. پایش کیفی پیکره‌های آبی به دلیل ارزش‌های زیست‌محیطی، اقتصادی و اجتماعی از اهمیت بالایی برخوردار است. پیکره‌های آبی به عنوان یکی از منابع کلیدی و زیستگاه‌های متنوع اکوسیستمی، نیازمند نظارت مداوم بر کیفیت آن جهت حفظ سلامت زیستی و تنوع گونه‌هاست. همچنین، باتوجه به فشارهای ناشی از فعالیت‌های انسانی، تغییرات اقلیمی و آلودگی‌ها، پایش کیفی آب می‌تواند به شناسایی و مدیریت بهینه این چالش‌ها کمک کند. از این رو، برقراری سامانه‌های پایش مستمر و دقیق، نه تنها به حفاظت از محیط زیست بلکه به توسعه پایدار و بهبود کیفیت زندگی ساکنان محلی نیز می‌انجامد و باتوجه به این که دریاچه زریبار از این قضیه مستثنی نیست بنابراین در پژوهش حاضر به پایش منابع آلاینده دریاچه زریبار با اعمال شاخص‌های طیفی بر تصاویر ماهواره‌ای سنتینل-۲ در سال ۲۰۱۹ پرداخته می‌شود.

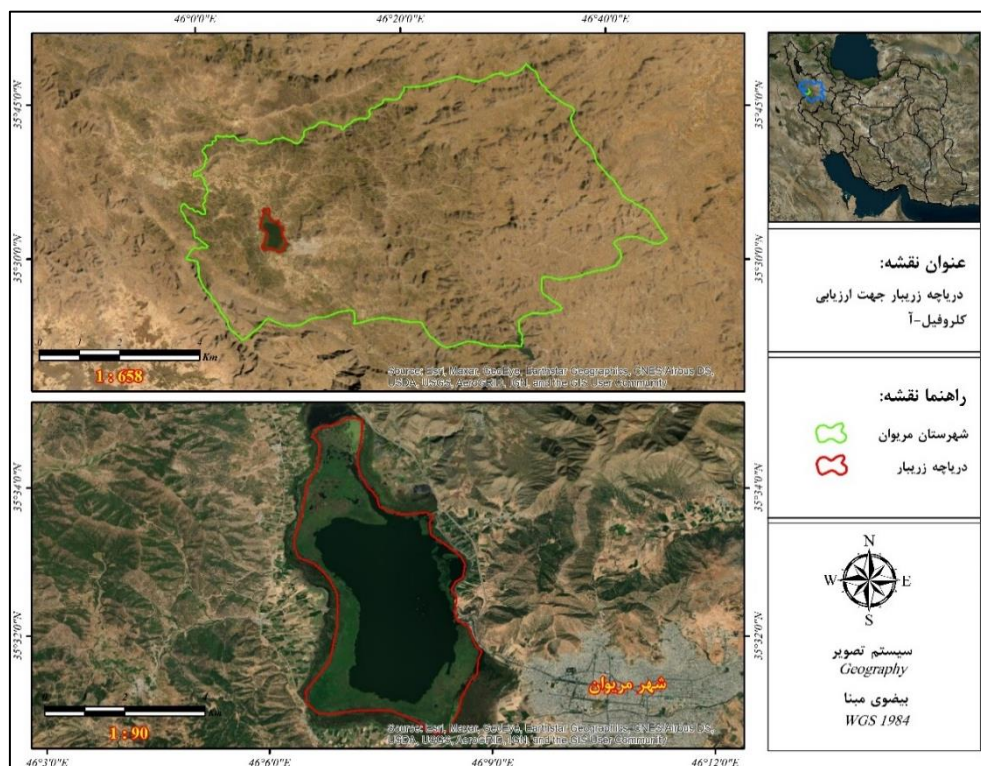
داده‌ها و روش‌ها

منطقه مورد مطالعه

شهرستان مریوان در غرب استان کردستان قرار دارد و ۱۲۵ کیلومتر با غرب سنندج فاصله دارد. این شهرستان از شمال با شهرستان سقز، از شرق با شهرستان‌های سنندج و دیواندره، از جنوب شرقی با شهرستان سروآباد و از غرب و شمال غربی با شهر پنجوین در شهرستان سلیمانیه هم‌مرز است و حدود ۱۰۰ کیلومتر تا مرز مشترک با عراق فاصله دارد. وسعت این شهرستان ۲۲۶۰ کیلومتر مربع است (طهماسبی و همکاران، ۱۴۰۳).

دریاچه زریبار در ۲ کیلومتری شمال غربی شهر مریوان و در مختصات جغرافیایی ۴۶ درجه و ۶ دقیقه طول و ۳۵ درجه و ۳۱ دقیقه عرض واقع شده و ارتفاع آن از سطح دریا ۱۲۵۰ متر است. وسعت این دریاچه به دلیل تغییرات حجم آب در فصول مختلف متفاوت است. عمق آن حداقل ۲ متر و حداکثر ۶ متر گزارش شده و

مساحت کلی آن حدود ۲۰۰۰ هکتار می‌باشد (شکل ۱). آب دریاچه زریبار از سه منبع اصلی تأمین می‌شود. نخست، نزولات جوی (برف و باران) که سالانه حدود ۲۰ میلیون مترمکعب از آب دریاچه را تأمین می‌کند. دوم، چشمه‌های جوشان از کف بستر دریاچه که به سفره‌های آب زیرزمینی مرتبط هستند و سالانه نزدیک به ۱۱ میلیون مترمکعب آب به دریاچه وارد می‌کنند. همچنین، آب‌های ورودی به دریاچه با رقمی معادل ۳۳ میلیون مترمکعب در سال از منابع موقتی تأمین می‌شوند که پس از بارش باران یا برف، از طریق آبراهه‌هایی که در دامنه‌های غربی، شرقی و حوضه آبخیز دریاچه جریان دارند، به آن می‌ریزد (آب منطقه‌ای کردستان).



شکل ۱. موقعیت جغرافیایی دریاچه زیربار

مواد و روش‌ها

روش‌شناسی به‌کاررفته جهت جمع‌آوری و پردازش داده‌ها، تجزیه و تحلیل کیفیت پیکره آبی، اعتبارسنجی و پایش منابع آلاینده دریاچه زیربار در شکل (۲) ارائه شده و در ۲ بخش مورد بررسی قرار گرفته است.

ارزیابی کیفیت پیکره آبی

فراخوانی تصاویر ماهواره‌ای سنتینل-۲

در سامانه تحت وب (GEE^۱) مجموعه داده‌های سنجش‌ازدوری موجود بوده که تمامی تصحیحات اتمسفری، رادیومتریکی، هندسی و سایر اعوجاجات آن‌ها برطرف شده و به‌صورت مجموعه‌داده در دسترس است که دیگر تصاویر نیازی به این تصحیحات ندارند (موتانگا و کومار، ۲۰۱۹). در این پژوهش از مجموعه تصاویر سطح C سنتینل-۲^۲ استفاده شد. زیرا خطاهای این تصاویر توسط تیم GEE و با استفاده از الگوریتم‌های استاندارد برطرف شده است و دیگر نیازی به رفع این خطاها نیست (اوروسا و همکاران، ۲۰۲۳). تصاویر

سنتینل-۲ دارای قدرت تفکیک مکانی ۱۰ و ۲۰ متر است. ازاین‌رو جهت پایش کیفی دریاچه زیربار که مساحت کمی دارد بسیار مناسب است. ازاین‌رو سعی شد این تصاویر به‌گونه‌ای انتخاب شود که دارای حداقل فاصله زمانی با داده‌های برداشت شده زمینی از سطح آب دریاچه و کم‌ترین پوشش ابر (۲ درصد) را داشته باشند. باتوجه به این‌که فعالیت‌های انسانی (فاضلاب شهری، کود کشاورزی و غیره) در اطراف دریاچه زیربار بالا بوده اگر فاصله زمانی تصویر برداری ماهواره‌ای و نمونه‌برداری زمینی زیاد باشد نتایج پیش‌بینی شده با واقعیت زمینی هم‌خوانی نداشته و خطای پیش‌بینی به طور ناخواسته بالا می‌رود و نتایج قابل اعتمادی ارائه نمی‌دهد. بنابراین لازم است که تاریخ تصویر برداری با نمونه برداری زمینی کم‌ترین فاصله زمانی را داشته باشند. در نتیجه تاریخ تصویر برداری مطابق با تاریخ نمونه‌برداری زمینی در یک روز (۲۰۱۹/۰۷/۲۹) انتخاب گردید.

^۲ Image Collection Sentinel 2 Level C

^۱ Google Earth Engine

جداسازی پیکره آبی با شاخص NDWI

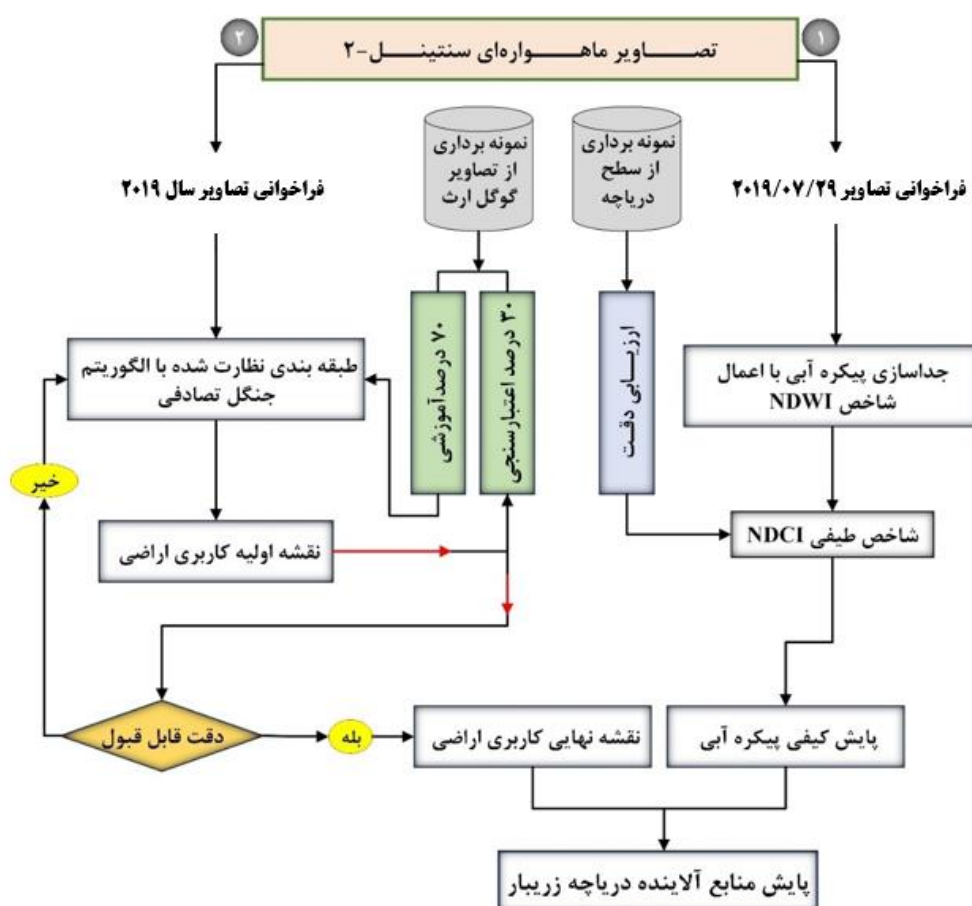
شاخص نرمال شده تفاوت پهنه‌های آبی^۱ (NDWI) جهت شناسایی پیکره‌های آبی در تصاویر ماهواره‌ای مورد استفاده قرار می‌گیرد. این شاخص در دامنه‌ای بین ۱- و ۱+ تغییر می‌کند؛ به‌طوری که هر چه مقدار پیکسل به ۱+ نزدیک‌تر باشد، وجود آب را نشان می‌دهد و اگر به ۱- نزدیک‌تر باشد، نشان‌دهنده عدم وجود آب است (سو و همکاران، ۲۰۲۴). بنابراین، NDWI در سامانه تحت وب GEE بر روی تصاویر سنتینل-۲ اجرا شده تا مناطق آبی از مناطق غیرآبی تفکیک شوند. در این مرحله، پهنه آبی دریاچه به طور کامل از محیط اطراف جدا شده تا در مراحل بعدی، کلاس‌های پوشش گیاهی و خاکی در مدل دخالت نداشته باشند. این امر

به دلیل این است که در این کلاس‌ها، میزان کلروفیل-آ نسبت به کلاس آبی بیش‌تر است و می‌تواند منجر به ایجاد خطای کاذب شود (جیانگ و همکاران، ۲۰۲۰). بنابراین، این مرحله یکی از مهم‌ترین مراحل در پایش کیفی پهنه آبی به شمار می‌رود.

$$NDWI = (Green - NIR) / (Green + NIR)$$

$$NDWI = (B3 - B8) / (B3 + B8)$$

Green: باند سبز در تصاویر ماهواره‌ای است. این باند در تصاویر سنتینل-۲ برابر با باند ۳ (B3) است.
NIR: باند مادون‌قرمز نزدیک در تصاویر ماهواره‌ای است. این باند در تصاویر سنتینل-۲ برابر با باند ۸ (B8) است.



شکل ۲. روند نمای کلی مراحل انجام تحقیق

¹ Normalized Difference Water Inde (NDWI)

ارزیابی کیفی پهنه آبی با اعمال شاخص طیفی NDCI

باتوجه به اینکه ارتباط مستقیم بین غلظت کلروفیل-آ و کیفیت پیکره آبی برقرار است (میشرا و همکاران، ۲۰۱۲). از این رو شاخص نرمال شده تفاوت کلرفیل^۱ (NDCI) بر روی پیکره آبی استخراج شده دریاچه زریبار اعمال گردید تا کیفیت آبی این پیکره آبی برآورد گردد. این تخمین به کمک تحلیل بازتاب و جذب بر روی باندهای تصاویر سنجش از دوری به دست می‌آید (میشرا و همکاران، ۲۰۱۲).

$$NDCI = (Red\ dge1 - Red) / (Red\ dge1 + Red)$$

$$NDCI = (B5 - B4) / (B5 + B4)$$

Red dge: باند لبه قرمز در تصاویر ماهواره‌ای است. این باند در تصاویر سنتینل-۲ برابر با باند ۵ (B3) است. Red: باند قرمز در تصاویر ماهواره‌ای است. این باند در تصاویر سنتینل-۲ برابر با باند ۴ (B4) است.

کاربری اراضی

انتخاب و پیش‌پردازش تصاویر ماهواره‌ای

در این تحقیق تغییرات پوشش اراضی محدوده اطراف دریاچه زریبار در سال ۲۰۱۹ مورد بررسی قرار گرفت تا سهم کاربری‌های موجود در آلاینده‌ی دریاچه مشخص شود. از مجموعه تصاویر سطح C سنتینل-۲ که استفاده شد. جهت تفکیک راحت‌تر کاربری‌ها تصاویر ماهواره‌ای را در اوج سبزی‌نگی محصولات یعنی اوایل اردیبهشت تا اواخر خرداد در نظر گرفته شود. سپس جهت ترکیب تصاویر بدون ابر فیلتر میانگین اعمال شد و به صورت تک تصویر در آمد، سپس با به‌کارگیری الگوریتم یادگیری ماشین جنگل تصادفی^۲ (تیکویه و همکاران، ۲۰۲۳)، تصویر ترکیبی را در ۵ کلاس؛ جنگل، پیکره آبی (دریاچه زریبار)، مناطق ساخته شده (شهر مریوان)، کشاورزی و مخلوط جنگل و مرتع در سامانه تحت وب GEE طبقه‌بندی گردید و در نهایت نقاط روستایی و آبراهه‌ها به نقشه طبقه‌بندی شده اضافه شد.

نمونه‌برداری جهت آموزش و اعتبار سنجی مدل طبقه‌بندی

جهت آموزش و اعتبارسنجی مدل یادگیری ماشین جنگل تصادفی، نقاط نمونه‌برداری از تصاویر با وضوح بالای گوگل ارث مربوط به سال ۲۰۱۹ انتخاب شد. این نقاط به‌گونه‌ای انتخاب شدند که هر ۵ کلاس کاربری را به‌خوبی پوشش دهند. در نهایت از ۷۰ درصد مجموع نقاط نمونه‌برداری شده جهت آموزش مدل طبقه‌بندی و از ۳۰ درصد آن برای ارزیابی دقت مدل استفاده شد (تیکویه و همکاران، ۲۰۲۳).

طبقه‌بندی تصاویر ماهواره‌ای

طبقه‌بندی تصویر ماهواره‌ای، پس از اعمال فیلترها و اضافه‌کردن شاخص‌ها به آن صورت می‌گیرد. باتوجه به اینکه چندین مدل طبقه‌بندی نظارت شده ماشین بردار پشتیبان^۳ (SVM)، درختان طبقه‌بندی و رگرسیون^۴ (CART) و جنگل تصادفی و غیره وجود دارد. در این میان الگوریتم یادگیری ماشین جنگل تصادفی بیش‌ترین استفاده را برای این منظور دارد و دارای دقت قابل‌قبولی است (وینگیت و همکاران، ۲۰۱۶) (زورقانی و همکاران، ۲۰۱۸). بنابراین، در این تحقیق الگوریتم نظارت شده جنگل تصادفی جهت طبقه‌بندی تصاویر ماهواره‌ای سنتینل-۲ انتخاب شد و به کمک این الگوریتم تصاویر را در ۵ کلاس (جنگل، پیکره آبی، مناطق ساخته شده، کشاورزی و مخلوط جنگل و مرتع) طبقه‌بندی شدند.

ارزیابی دقت

لازمه استفاده از هر نوع اطلاعات موضوعی، آگاهی از درستی و صحت آن است (تیان و همکاران، ۲۰۱۶). در ارزیابی دقت مشخص می‌شود که داده‌های به‌دست‌آمده متناسب با کاربرد موردنظر، از دقت لازم برخوردار هستند یا خیر. این ارزیابی می‌تواند به‌صورت مقایسه بین داده‌های تولید شده توسط مدل و داده‌های مرجع باشد. روش معمول و استاندارد برای تعیین دقت نتایج به‌دست‌آمده، استفاده از ماتریس خطا است که حاصل

³ Support vector machines (SVM)

⁴ Classification and Regression Trees (CART)

¹ Normalized Difference Chlorophyll Index (NDCI)

² Random Forest

مقایسه پیکسل به پیکسل های معلوم در واقعیت زمینی با پیکسل های متناظر در نتایج است (مانوئل و بلانکو، ۲۰۲۳).

یافته های تحقیق

ارزیابی دقت

نتایج حاصل ارزیابی دقت پایش کیفی پیکره آبی دریاچه زریبار و طبقه بندی کاربری اراضی در جدول (۱) نمایش داده شده است. همان طور که پیداست که میزان R^2 و RMSE بین داده های پیش بینی شده و اندازه گیری شده از سطح دریاچه زریبار به ترتیب ۰/۰۷ و ۰/۹۰ بوده است. از این رو شاخص NDCI قادر بود که غلظت کلروفیل-آ را بادقت خیلی بالایی پیش بینی کند و نتایج قابل قبولی ارائه داده است (شکل ۳). همچنین ارزیابی دقت تصاویر طبقه بندی شده به کمک ۳۰ درصد از نقاط نمونه برداری در سامانه تحت وب GEE انجام شد. نتایج نشان داد دقت کلی و شاخص کاپا به ترتیب برابر ۹۲/۰۴ و ۸۸/۷۸ درصد بود. این مقادیر نشان دادند که تصاویر سنتینل-۲ و الگوریتم یادگیری ماشین جنگل تصادفی بسیار دقیق بوده و از نتایج آن ها می توان جهت تجزیه و تحلیل سایر مراحل استفاده نمود (شکل ۴).

در این تحقیق جهت اعتبارسنجی نقشه ارزیابی کیفی پیکره آبی از نمونه برداری زمینی سطح دریاچه زریبار توسط استفاده شد و نتایج را به صورت خطای جذر میانگین مربعات (RMSE) و ضریب همبستگی (R^2) نشان داده شد. RMSE حاصل تفاوت میان مقدار پیش بینی شده با مقدار واقعی می باشد. هر چه این مقدار به صفر نزدیک تر باشد مدل با دقت بیشتری پیش بینی را انجام داده است. R^2 خط رگرسیون بین حاصل پردازش بین دو دسته داده است. در صورتی که رابطه بین این دو دسته داده به ۱ نزدیک شود، رابطه قوی تری بین داده ها برقرار (ژاپو و همکاران، ۲۰۲۴). در ادامه ارزیابی دقت نقشه طبقه بندی حاصل از الگوریتم جنگل تصادفی به کمک دقت کلی^۱ و ضریب کاپا^۲ (K) نشان داده شد. ضریب کاپا معمولاً از صفر تا ۱ متغیر است که ضریب ۱ نشان دهنده دقت صددرصدی است. در واقع کاپا: $K > 0/8$ نشان دهنده برآورد قوی و دقت قابل قبول است. K بین ۰/۴ تا ۰/۸ (۴۰ تا ۸۰ درصد) دقت متوسط و $K < 0/4$ نشان دهنده دقت پایین است (کونگالتون، ۱۹۹۱).

جدول ۱. نتایج ارزیابی دقت

ارزیابی دقت	پایش کیفی پیکره آبی	طبقه بندی کاربری اراضی
RMSE	۰/۰۷	--
R^2	۰/۹۰	--
دقت کلی	--	۹۲/۰۴
ضریب کاپا	--	۸۸/۷۸

بررسی شد تا تأثیر گذاری کاربری ها را در آلاینده گی این دریاچه مشخص شود. همان طور که از شکل ۴ پیداست به طور کلی چهار آبراهه، آب های سطحی اطراف دریاچه را به داخل پیکره آبی دریاچه زریبار منتقل می کنند. این امر، نقش اهمیت آبراهه ها در انتقال مواد مغذی و آلاینده ها به دریاچه را برجسته می سازد. گسترش

پایش منابع آلاینده گی دریاچه زریبار

از مهم ترین عوامل آلودگی دریاچه زریبار؛ فاضلاب شهر مریوان و روستاهای اطراف و زه آب های زمین های کشاورزی می باشد که تنها مسیر ورودی آلودگی این کاربری ها به دریاچه از طریق آبراهه ها صورت می گیرد. از این رو کاربری اراضی اطراف دریاچه زریبار

² Kappa Coefficient

¹ Overall accuracy

چشم‌گیر اراضی کشاورزی و مناطق مسکونی در مجاورت دریاچه، بار مواد مغذی (به ویژه نیتروژن و فسفر) را از طریق رواناب سطحی و آبراهه‌ها به داخل دریاچه را افزایش می‌دهد. این افزایش مواد مغذی، پدیده غنی‌شدگی^۱ را تسریع کرده و منجر به رشد بی‌رویه جلبک‌ها و کاهش شفافیت آب می‌شود. علاوه بر این، گسترش مناطق مسکونی، با افزایش سطوح نفوذناپذیر و تولید آلاینده‌های مختلف، کیفیت آب دریاچه را به‌طور مستقیم تحت تاثیر قرار می‌دهد. در نتیجه، تغییرات کاربری اراضی در حوضه آبریز دریاچه زریبار، با افزایش بار آلودگی و کاهش کیفیت آب، تهدیدی جدی برای تنوع زیستی و سلامت اکولوژیکی این اکوسیستم ارزشمند محسوب می‌شود. از طرفی شکل ۳، نقشه ارائه شده، الگوی توزیع غلظت کلروفیل-آ در سطح دریاچه زریبار را با استفاده از شاخص $NDCI^2$ نشان می‌دهد. بر اساس این نقشه، مناطق ساحلی دریاچه غلظت کلروفیل-آ بالاتری را نسبت به مرکز دریاچه نشان می‌دهند، که به وضوح با شیب رنگ از قرمز (غلظت بالا) در حاشیه به سبز (غلظت پایین) در مرکز دریاچه قابل مشاهده بود. این توزیع، تأییدکننده تأثیر مستقیم آبراهه‌های ورودی بر کیفیت آب دریاچه است؛ آبراهه‌ها با انتقال مواد مغذی و آلاینده‌ها از حوضه آبریز به سواحل دریاچه، موجب افزایش نرخ رشد جلبک‌ها و در نتیجه، افزایش غلظت کلروفیل-آ در این مناطق می‌شوند. از سوی دیگر، وجود چشمه‌های جوشان در مرکز دریاچه که آب تازه و تمیز را به اکوسیستم تزریق می‌کنند، می‌تواند عامل دیگری در کاهش غلظت کلروفیل-آ در این ناحیه باشد. این پدیده نشان می‌دهد که دینامیک پیچیده‌ای از عوامل محیطی و هیدرولوژیکی در تعیین کیفیت آب دریاچه زریبار نقش دارند. بررسی غلظت کلروفیل-آ در چهار جهت اصلی (شرق، جنوب، غرب و شمال) دریاچه، امکان ارزیابی دقیق‌تر منابع آلودگی و تأثیرات منطقه‌ای را فراهم می‌کند و به برنامه‌ریزی مدیریت

منابع آب و کاهش آلودگی در مناطق آسیب‌پذیر کمک می‌کند.

با استناد به نقشه کاربری اراضی دریاچه زریبار (شکل ۴)، الگوی پیچیده‌ای از آلودگی در این اکوسیستم آبی نمایان شد که ناشی از تعامل میان فعالیت‌های انسانی و شبکه آبراهه‌های ورودی است. رودخانه شماره ۱ در بخش شرقی دریاچه، به‌عنوان مهم‌ترین منبع آلودگی شناخته می‌شود؛ این رودخانه با عبور از اراضی کشاورزی و شهر مریوان، حجم قابل توجهی از سموم کشاورزی، کودهای شیمیایی، و فاضلاب شهری و روستایی را به دریاچه منتقل می‌کند. این امر، بخش شرقی را به آلوده‌ترین منطقه تبدیل کرده است. در مقابل، بخش جنوبی دریاچه با اراضی کشاورزی گسترده و رودخانه شماره ۲ به‌عنوان طولانی‌ترین آبراهه، حجم بالایی از آلاینده‌ها کشاورزی را دریافت کرده و رتبه دوم آلودگی را به خود اختصاص می‌دهد. رواناب سطحی ناشی از اراضی کشاورزی، به‌عنوان یک منبع اصلی آلودگی عمل می‌کند و رودخانه شماره ۲ با انتقال متمرکز آلاینده‌ها، نقش کلیدی در این فرآیند ایفا می‌کند. بخش غربی دریاچه، با رودخانه شماره ۳ کوتاه و دریافت رواناب‌های محدود از اراضی کشاورزی و جنگلی، کم‌ترین میزان آلودگی را داشت. این بخش، فاقد منابع آلودگی نقطه‌ای مانند فاضلاب شهری یا روستایی است همچنین پوشش گیاهی متراکم اراضی جنگلی، نقش مؤثری در کاهش رواناب سطحی و جذب آلاینده‌ها ایفا می‌کند. در نهایت، بخش شمالی دریاچه با غالبیت اراضی جنگلی و مرتعی و محدودیت اراضی کشاورزی، میزان آلودگی متوسطی را نشان داد. رودخانه شماره ۴، با وجود دریافت رواناب‌های سطحی آلوده به سموم کشاورزی، بار آلودگی کم‌تری را نسبت به رودخانه‌های شماره ۱ و ۲ به دریاچه منتقل می‌کند. این الگو، ضرورت مدیریت یکپارچه منابع آب، کنترل رواناب‌های سطحی، کاهش استفاده از سموم و کودهای شیمیایی، تصفیه فاضلاب‌های شهری و روستایی، و پایش مستمر کیفیت آب رودخانه و دریاچه را برای

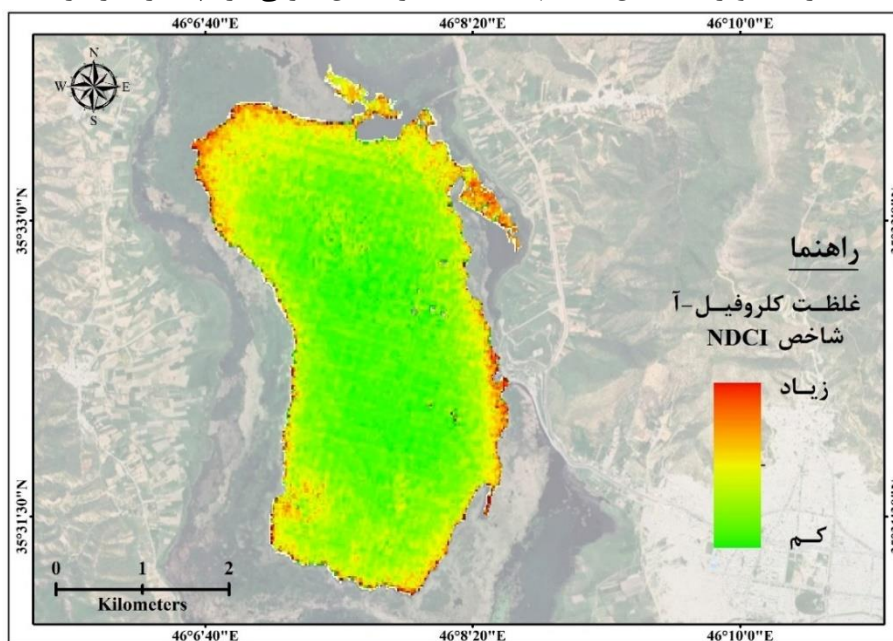
² Normalized Difference Chlorophyll Index

¹ Eutrophication

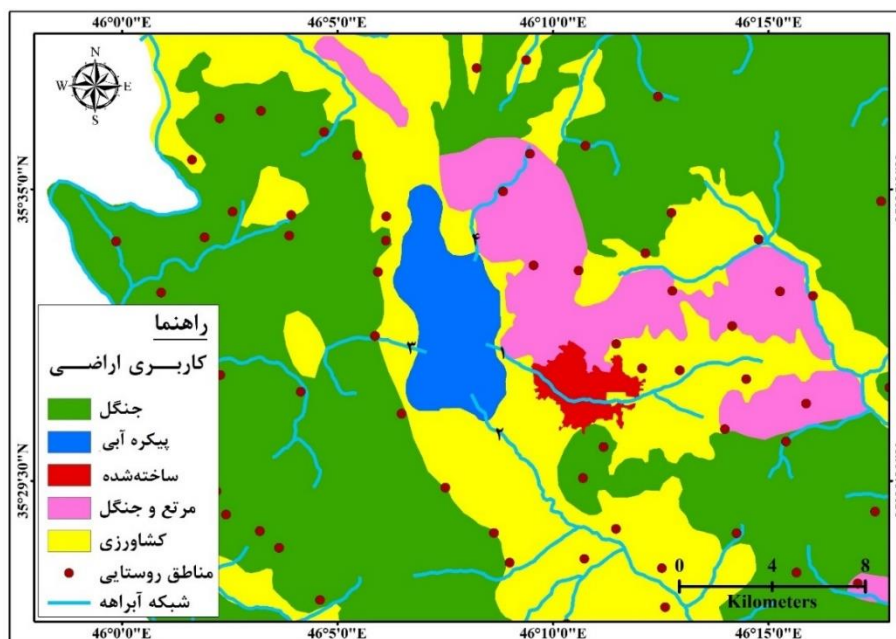
کاهش آلودگی و حفظ سلامت اکوسیستم دریاچه زریبار را نشان می‌دهد. همچنین، تأکید می‌کند که حفاظت از اراضی جنگلی و مرتعی به‌عنوان سپری در برابر آلودگی، از اهمیت بالایی برخوردار است. همچنین این نتایج با تحقیقات زیر هم‌راستا بود:

در تحقیق (بک و همکاران، ۲۰۱۶) از تصاویر ماهواره‌های مختلف چند طیفی و ابرطیفی و الگوریتم‌های مختلف جهت اندازه‌گیری کلروفیل-آ استفاده شد؛ نتایج به‌دست آمده مشخص نمود که دقت الگوریتم‌های 2BDA و NDCI به ترتیب برابر با R^2 معادل ۰/۷۹۹ و ۰/۷۹۴ در تصاویر سنتینل ۲ بود که به نسبت دقت همین الگوریتم‌ها در تصاویر لندست-۸ به ترتیب برابر با R^2 معادل ۰/۱۵۶ و ۰/۱۲۵، از دقت به نسبت بالاتری برخوردار بوده و گواه دقت بالای این دو الگوریتم با استفاده از تصاویر سنتینل-۲ جهت

اندازه‌گیری کلروفیل-آ نسبت به تصاویر لندست ۸ می‌باشد. در تحقیق (کریمی و همکاران، ۲۰۲۲) جهت اندازه‌گیری میزان کلروفیل-آ از تصاویر لندست ۸ و سنتینل ۲ بر روی دریاچه کم عمق چیتگر استفاده شد. نتایج به‌دست آمده نشان دهنده دقت بالای الگوریتم 2BAND در لندست ۸ و الگوریتم‌های 3BAND و NDCI در سنتینل-۲ جهت اندازه‌گیری کلروفیل-آ می‌باشد. در تحقیق (کنارکوهی و همکاران، ۲۰۲۰) برای اندازه‌گیری کلروفیل آ از شاخص NDCI بر روی تصاویر لندست ۸ و در تالاب چغاخور استفاده شد که نتایج نشان‌دهنده دقت بالای این شاخص (R^2 معادل ۰/۹۲) جهت اندازه‌گیری میزان کلروفیل-آ در تصاویر لندست-۸ می‌باشد. همچنین ابراهیم‌پور و همکاران (۱۳۹۲) با مطالعه دریاچه زریبار آلوده‌ترین بخش آن را بخش شرقی دریاچه در نظر گرفتند.



شکل ۳. ارزیابی کیفی پهنه آبی بر حسب غلظت کلروفیل-آ



شکل ۴. کاربری اراضی اطراف دریاچه زریبار

نتیجه‌گیری

یکی از مشکلاتی که در نتیجه افزایش جمعیت به وجود آمده آلوده ساختن آب‌های سطحی که باعث کاهش آلاینده‌های پهنه‌های آبی شده است. بررسی و ارزیابی کیفیت آب در گذشته به صورت مشاهدات میدانی و آزمایشگاهی بود که علاوه بر اتلاف وقت و هزینه نیاز به اندازه‌گیری‌های متعددی نیز داشت. امروزه متخصصان جهت پایش کیفی پیکره آبی از اندازه‌گیری غلظت کلروفیل-آ استفاده می‌کنند و یکی از عوامل اصلی نشان‌دهنده کیفیت آب می‌باشد. طی سالیان اخیر با افزایش استفاده از تصاویر ماهواره‌ای عوامل مختلفی مورد بررسی قرار گرفته‌اند که یکی از آن‌ها میزان کلروفیل-آ موجود در آب بوده و باعث شده ارزیابی غلظت کلروفیل-آ در کم‌ترین زمان ممکن انجام شود و به تبع آن هزینه آن نیز نسبت به روش‌های اندازه‌گیری میدانی به شدت کاهش یابد؛ از این رو در این تحقیق آلاینده‌های دریاچه زریبار با استفاده از غلظت کلروفیل-آ و با بهره‌گیری از تصاویر ماهواره سنتینل-۲ در سامانه تحت وب GEE پایش گردید. در ابتدا به کمک آستانه‌گذاری بر روی شاخص NDWI، پیکره آبی دریاچه از سایر کلاس‌ها جدا گردید. به گونه‌ای که اگر غیر از کلاس آب، کلاس‌های دیگر از

جمله خشکی و پوشش گیاهی در مدل‌های برآورد کلروفیل-آ شرکت می‌کردند خطای کاذب ایجاد می‌شد. بنابراین این مرحله یکی از مهم‌ترین مراحل پایش آلاینده‌های دریاچه بود. سپس جهت پیش‌بینی غلظت کلروفیل-آ پهنه آبی تفکیک شده از تصویر ماهواره‌ای شاخص طیفی NDCI اعمال گردید و نتایج قابل قبولی ارائه داد. در ادامه کاربری‌های اطراف دریاچه زریبار را با استفاده از الگوریتم جنگل تصادفی در ۵ کلاس (جنگل، پیکره آبی، مناطق ساخته شده، کشاورزی و مخلوط جنگل و مرتع) طبقه‌بندی شد و نتایج آن با ارزیابی کیفی دریاچه مقایسه گرد تا منابع آلاینده دریاچه مشخص شود. نتایج حاکی از آن بود سواحل دریاچه آلودگی بالاتری نسبت به مرکز دریاچه دارد به گونه‌ای با فاصله از ساحل و نزدیک شدن به مرکز دریاچه آلودگی کمتر می‌شود که این امر ناشی از پیوستن آبراهه‌ها به دریاچه است که بار زیادی از آلودگی را به دریاچه می‌ریزند و هم‌چنان در مرکز دریاچه چشمه‌های جوشان از کف فعالیت دارند که روزانه حجم زیادی آب تمیز را به دریاچه می‌ریزند. قسمت شرقی دریاچه به دلیل وجود کاربری کشاورزی، فاضلاب شهر مریوان و اسکله‌های تفریحی آلوده‌تر از سایر بخش‌ها بود.

منابع

- dense coincident surface observations. *Remote Sensing of Environment*, 178, 15-30.
- Camargo, Z. C. M., Sòria-Perpinyà, X., Pompêo, M., Moschini-Carlos, V., & Sendra, M. D. (2024). Obtaining estimation algorithms for water quality variables in the Jaguari-Jacaréi Reservoir using Sentinel-2 images. *Remote Sensing Applications: Society and Environment*, 36, 101317. Buma, W. G., & Lee, S. I. (2020). Evaluation of sentinel-2 and landsat 8 images for estimating chlorophyll-a concentrations in lake Chad, Africa. *Remote Sensing*, 12(15), 2437.
- Congalton, R. G., 1991. A review of assessing the accuracy of classification of remotely sensed data. *Remote Sens. Environ.* 37, 35-46. [https://doi.org/10.1016/00344257\(91\)90048-B](https://doi.org/10.1016/00344257(91)90048-B).
- Day, J.; Yáñez-Arancibia, A.; Kemp, W.; Crump, B.; Kemp, M. Chapter Nineteen: Human Impact And Management of Coastal And Estuarine Ecosystems, *Estuar. Ecol. In Human Impact and Management of Coastal and Estuarine Ecosystems*, 2nd ed.; Wiley-Blackwell: Singapore, 2013; Volume 1, pp. 483-496. ISBN 9780471755678.
- Jang, W., Kim, J., Kim, J. H., Shin, J. K., Chon, K., Kang, E. T., ... & Kim, S. (2024). Evaluation of Sentinel-2 Based Chlorophyll-a Estimation in a Small-Scale Reservoir: Assessing Accuracy and Availability. *Remote Sensing*, 16(2), 315.
- Jiang, W., Ni, Y., Pang, Z., He, G., Fu, J., Lu, J., ... & Lei, T. (2020). A new index for identifying water body from Sentinel-2 satellite remote sensing imagery. *ISPRS Annals of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, 3, 33-38.
- Karimi, B., Hashemi, S. H., & Aghighi, H. (2022). Performance of Sentinel-2 and Landsat-8 satellites in estimating Chlorophyll-a concentration in a shallow freshwater lake.
- Karydis, M., & Kitsiou, D. (2013). Marine water quality monitoring: A review. *Marine pollution bulletin*, 77(1-2), 23-36.
- Liu JiaMing, L. J., Zhang YanJun, Z. Y., Yuan Di, Y. D., & Song XingYuan, S. X. (2015). Empirical estimation of total nitrogen and total phosphorus concentration of urban water bodies in China using high resolution IKONOS multispectral imagery.
- Manuel, A., & Blanco, A. C. (2023). Transformation of the normalized difference chlorophyll index to retrieve chlorophyll-a concentrations in Manila Bay. *The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, 48, 217-221.
- Mishra, S., & Mishra, D. R. (2012). Normalized difference chlorophyll index: A novel model for remote estimation of chlorophyll-a concentration in turbid productive waters. *Remote Sensing of Environment*, 117, 394-406.
- Mutanga, O., & Kumar, L. (2019). Google earth engine applications. *Remote sensing*, 11(5), 591.
- Orusa, T., Viani, A., Cammareri, D., & Borgogno Mondino, E. (2023). A google earth engine algorithm to map phenological metrics in
- ابراهیم پور، صلاح الدین و محمدزاده، حسین. (۱۳۹۲). ارزیابی و پهنه‌بندی کیفیت آب دریاچه زریوار با استفاده از شاخص‌های کیفی NSFQI OWQI, CWQI. پژوهش های محیط زیست ۱۳۷-۱، (۷) ۴.
- جانعلی پور، میلاد، بابایی، حدیثه، صلواتی‌فر، مریم و عباس زاده طهرانی، نادیا. (۱۳۹۷). پایش کیفیت پهنه‌های آبی با استفاده از تصاویر سنجش از دور هوایی و ماهواره ای (مفاهیم، روش‌ها و راهکارهای نوین). فناوری در مهندسی هوافضا. ۲(۳). ۱۱-۱.
- رحمانی خللی، فاطمه و حق پرست، سارا و نصیراحمدی، کامران و خیرآبادی، وحید، ۱۴۰۲، برآورد غلظت کلروفیل-آ در خلیج گرگان با استفاده از تصاویر ماهواره‌های سنتینل-۲، نهمین همایش بین المللی دانش و فناوری علوم کشاورزی، منابع طبیعی و محیط‌زیست ایران، تهران، <https://civilica.com/doc/1964043>
- طهماسبی، پیمان، بیگلری قلدره، سعدی، بشتامیان، سید مجتبی، حسینی، سید پویا و گل محمدی‌قانع، پگاه. (۱۴۰۳). مقایسه تصاویر ماهواره‌های لندست-۸ و سنتینل-۲ جهت تخمین میزان کلروفیل-آ دریاچه زریوار فصلنامه علوم محیطی. doi: 10.48308/envs.2024.1373. ۵۸۴-۵۷۱، (۴) ۲۲
- کیانی، امید و انصاری، عبدالحمید. (۱۳۹۷). کاربردهای سنجش از دور در پایش و مدیریت منابع آب، هفتمین کنفرانس ملی مدیریت منابع آب ایران، یزد، <https://civilica.com/doc/845584>
- مهدوی فرد، مصطفی و ولیزاده کامران، خلیل و عطازاده، احسان. (۱۳۹۹). تخمین غلظت کلروفیل-آ با استفاده از داده‌های میدانی و پردازش تصاویر ماهواره ای سنتینل-۲ و لندست-۸ (مطالعه موردی: خور تیاب)، <https://civilica.com/doc/1019429>
- میرعلیزاده فرد سیدرضا و منصوری شهروز. (۱۳۹۸). ارزیابی شاخص‌های سنجش از دور در مطالعات کمی و کیفی آب های سطحی با تصاویر ماهواره ای لندست-۸ (مطالعه موردی: جنوب استان خوزستان). سنجش از دور و سامانه اطلاعات جغرافیایی در منابع طبیعی (کاربرد سنجش از دور و GIS در علوم منابع طبیعی ۱۰ (پیاپی ۳۵): ۶۳-۸۴.
- Ansper, A.; Alikas, K. Retrieval of Chlorophyll a from Sentinel-2 MSI Data for the European Union Water Framework Directive Reporting Purposes. *Remote Sens.* 2018, 11, 64.
- Barrett, D. C., & Frazier, A. E. (2016). Automated method for monitoring water quality using Landsat imagery. *Water*, 8(6), 257.
- Beck, R., Zhan, S., Liu, H., Tong, S., Yang, B., Xu, M., ... & Su, H. (2016). Comparison of satellite reflectance algorithms for estimating chlorophyll-a in a temperate reservoir using coincident hyperspectral aircraft imagery and

- detection using the random forest approach: The case of the Upper Blue Nile River basin, Ethiopia. *Global Challenges*, 7(10), 2300155.
- Viessman, W., Hammer, M. J.E. M. Perez, and P. A. Chadik, "Water Supply and Pollution Control," 1998.
- Werdell, P.J.; McKinna, L.I.; Boss, E.; Ackleson, S.G.; Craig, S.E.; Gregg, W.W.; Lee, Z.; Maritorena, S.; Roesler, C.S.; Rousseaux, C.S.; et al. An overview of approaches and challenges for retrieving marine inherent optical properties from ocean color remote sensing. *Prog. Oceanogr.* 2018, 160, 186–212.
- Wingate, V.R.; Phinn, S.R.; Kuhn, N.; Bloemertz, L.; Dhanjal-Adams, K.L. Mapping Decadal Land Cover Changes in the Woodlands of North Eastern Namibia from 1975 to 2014 Using the Landsat Satellite Archived Data. *Remote Sens.* 2016, 8, 681.
- 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. *The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, 40, 1517-1523.
- Zhao, D., Huang, J., Li, Z., Yu, G., & Shen, H. (2024). Dynamic monitoring and analysis of chlorophyll-a concentrations in global lakes using Sentinel-2 images in Google Earth Engine. *Science of The Total Environment*, 912, 169152.
- mountain areas worldwide with landsat collection and sentinel-2. *Geomatics*, 3(1), 221-238.
- Poddar, S., Chacko, N., & Swain, D. (2019). Estimation of Chlorophyll-a in northern coastal Bay of Bengal using Landsat-8 OLI and Sentinel-2 MSI sensors. *Frontiers in Marine Science*, 6, 598.
- Postel, S., *The Last Oasis: Facing Water Scarcity*: Routledge, 2014.
- Rosegrant, M. W. Cai, X. and S. A. Cline, *World water and food to 2025: dealing with scarcity*: Intl Food Policy Res Inst, 2002.
- Sent, G., Biguino, B., Favareto, L., Cruz, J., Sa, C., Dogliotti, A. I., ... & Brito, A. C. (2021). Deriving water quality parameters using sentinel-2 imagery: A case study in the Sado Estuary, Portugal. *Remote sensing*, 13(5), 1043.
- 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.
- Su, Z., Xiang, L., Steffen, H., Jia, L., Deng, F., Wang, W., ... & Gao, P. (2024). A New and Robust Index for Water Body Extraction from Sentinel-2 Imagery. *Remote Sensing*, 16(15), 2749.
- Tian, S.; Zhang, X.; Tian, J.; Sun, Q. Random Forest Classification of Wetland Landcovers from Multi-Sensor Data in the Arid Region of Xinjiang, China. *Remote Sens.* 2016, 8, 954.
- Tikuye, B. G., Rusnak, M., Manjunatha, B. R., & Jose, J. (2023). *Land use and land cover change*

Evaluation of Water Contaminants in Lakes Using Remote Sensing Techniques (Case Study: Lake Zaribar)

Abstract

The increasing global population and unchecked wastewater discharges have significantly degraded surface water resources, resulting in accelerated algal blooms, diminished dissolved oxygen levels, and overall water quality deterioration. Traditional field-based monitoring approaches, while accurate, are time-consuming and resource-intensive. Consequently, remote sensing technologies, particularly satellite imagery, have emerged as viable alternatives for efficient and large-scale aquatic ecosystem monitoring. This study investigates the application of Sentinel-2 satellite imagery for assessing the spatial distribution of water pollution in Lake Zaribar, located in Kurdistan Province, Iran. The Normalized Difference Water Index (NDWI) was first used to extract the water body from satellite data. Subsequently, the Normalized Difference Chlorophyll Index (NDCI) was applied to estimate chlorophyll-a concentrations, a reliable proxy for eutrophication and biological productivity. The NDCI-derived chlorophyll-a values exhibited high correspondence with field data ($R^2=0.90$; $RMSE=0.07$), indicating robust model performance. Land use classification was performed using the Random Forest machine learning algorithm, identifying five dominant land use types: forest, water body, urban, agriculture, and mixed forest-pasture. The classification yielded an overall accuracy of 92.04% and a Kappa coefficient of 88.78%, reflecting high reliability. Results revealed that pollution levels were highest in the lake's eastern region, driven by agricultural runoff, untreated urban wastewater, and tourism-related activities. Conversely, central areas showed lower chlorophyll-a levels, likely due to dilution by groundwater-fed springs at the lakebed. Four major surface waterways were identified as pollution conduits, intensifying nutrient loading and subsequent eutrophication near the shoreline. The findings emphasize the significant role of land use in shaping water quality dynamics. Agricultural expansion and urban sprawl around the lake increased nutrient influx, whereas forested zones helped buffer pollution. The integrated use of Sentinel-2 data and machine learning techniques demonstrated effectiveness in both identifying pollution hotspots and guiding water resource management. In conclusion, the study validates remote sensing as a reliable and cost-effective approach for continuous lake monitoring. It provides decision-makers with a scientific basis for implementing targeted pollution mitigation strategies and reinforces the importance of preserving forested catchments to protect aquatic ecosystems such as Lake Zaribar.

Key words: Zaribar Lake, Sentinel-2, Chlorophyll-A concentration, Water quality, Pollution

