

مقاله علمی-پژوهشی

ارزیابی و مقایسه شاخص‌های طیفی کدورت آب دریاچه زریبار با بهره‌گیری از علم سنجش-ازدور

پیمان طهماسبی^{۱*}، آرمان مقدم‌نیا^۲، هیرش قدرشناس^۳

تاریخ دریافت: ۱۴۰۴/۱۰/۱۶ تاریخ پذیرش: ۱۴۰۵/۰۲/۱۵

چکیده

کدورت آب به‌عنوان یکی از مهم‌ترین شاخص‌های فیزیکی کیفیت آب، نقش تعیین‌کننده‌ای در پویایی‌های اکولوژیکی، نفوذ نور و سلامت زیست‌بوم‌های آبی دارد. دریاچه زریبار میوان، به‌عنوان بزرگ‌ترین دریاچه آب شیرین طبیعی ایران، در سال‌های اخیر تحت تأثیر فشارهای انسانی و تغییرات هیدروکلیماتیکی با نوسانات قابل توجه کیفی مواجه بوده است. از این رو، پایش دقیق و مستمر کدورت آب این پهنه آبی از اهمیت بالایی برخوردار است. پژوهش حاضر با هدف ارزیابی و مقایسه کارایی شاخص‌های طیفی مختلف در تخمین کدورت آب دریاچه زریبار با استفاده از تصاویر ماهواره‌ای سنتینل-۲ در مقیاس فصلی سال ۱۳۹۸ انجام گردید. بدین منظور، چهار شاخص طیفی شامل TurbChip، TurbBow، NDTI و TurbLath پس از انجام پیش‌پردازش‌های رادیومتریکی و هندسی بر روی تصاویر ماهواره‌ای استخراج شدند. داده‌های میدانی کدورت آب برداشت‌شده از ۱۵ ایستگاه نمونه‌برداری به‌عنوان داده مرجع برای توسعه و واسنجی مدل‌های رگرسیون خطی مورد استفاده قرار گرفت. ارزیابی دقت مدل‌ها با بهره‌گیری از شاخص‌های آماری ضریب تبیین (R^2) و ریشه میانگین مربعات خطا (RMSE) انجام گردید. نتایج نشان داد که شاخص NDTI در تمامی فصول منتخب دارای بیش‌ترین توان تبیین تغییرات کدورت R^2 (۰/۷۶ تا ۰/۸۹) و کم‌ترین RMSE (۰/۰۰۴۱۳ تا ۰/۰۰۵۳۳) بوده و عملکردی بهتری نسبت به سایر شاخص‌ها دیگر از خود نشان داد. همچنین الگوهای مکانی-زمانی کدورت حاکی از افزایش معنادار کدورت در فصول گرم سال، به‌ویژه در نواحی حاشیه‌ای دریاچه، و کاهش آن در فصول سرد و بخش‌های مرکزی بود. در مجموع، نتایج این پژوهش نشان می‌دهد که ترکیب شاخص NDTI با داده‌های سنتینل-۲ ابزاری کارآمد، کم‌هزینه و قابل اتکا برای پایش مکانی-زمانی کدورت آب در دریاچه‌های کم‌عمق فراهم می‌آورد و می‌تواند به‌عنوان پشتوانه‌ای علمی در مدیریت پایدار، حفاظت زیست‌محیطی و تصمیم‌گیری‌های کلان در خصوص دریاچه زریبار مورد استفاده قرار گیرد.

واژه‌های کلیدی: پایش کیفیت آب، سنجش‌ازدور، سنتینل-۲، کدورت، میوان

مقدمه

می‌کنند (طهماسبی، ۱۴۰۳). منابع آب سطحی، به‌ویژه دریاچه‌ها، تالاب‌ها و رودخانه‌ها، علاوه بر تأمین آب شرب، کشاورزی و صنعت، از منظر زیست‌محیطی، اقلیمی، اقتصادی و اجتماعی نیز دارای اهمیت فراوانی هستند. این منابع، زیستگاه گونه‌های متنوع گیاهی و جانوری بوده و نقش مهمی در تنظیم چرخه‌های بیوژئوشیمیایی، تعدیل اقلیم محلی و حفظ تعادل اکولوژیکی ایفا می‌کنند (Wetzel, 2001). با این حال، در دهه‌های اخیر، رشد سریع جمعیت، توسعه شهرنشینی، گسترش فعالیت‌های کشاورزی و صنعتی و تغییرات اقلیمی، فشارهای فزاینده‌ای را بر منابع آب وارد کرده است که منجر به کاهش کمی و کیفی این منابع شده است (Damania et al., 2019). یکی از مهم‌ترین چالش‌های مرتبط با منابع آب سطحی، افت کیفیت آن است. کیفیت آب به‌عنوان مجموعه‌ای از ویژگی‌های فیزیکی،

منابع آبی از مهم‌ترین و پرکاربردترین منابع طبیعی به‌شمار می‌آیند که نقش اساسی در بقای انسان و سایر موجودات زنده ایفا

۱- دانشجوی دکتری گروه علوم و مهندسی آب، دانشکده کشاورزی، دانشگاه بوعلی‌سینا، همدان، ایران.

۲- دانش‌آموخته گروه علوم و مهندسی آب گرایش آبیاری و زهکشی، دانشکده کشاورزی، دانشگاه کردستان، سنندج، ایران.

۳- دانش‌آموخته گروه علوم و مهندسی آب گرایش آبیاری و زهکشی، دانشکده کشاورزی، دانشگاه کردستان، سنندج، ایران.

(*) نویسنده مسئول: p.tahmasebi@agr.basu.ac.ir

DOI: [10.22034/ijid.2026.570973.2663](https://doi.org/10.22034/ijid.2026.570973.2663)

شیمیایی و زیستی، تعیین کننده قابلیت استفاده از آب برای مصارف مختلف و سلامت اکوسیستم های آبی است. تغییر در پارامترهای کیفی آب می تواند پیامدهای گسترده ای نظیر کاهش تنوع زیستی، اختلال در زنجیره غذایی، افزایش خطرات بهداشتی و کاهش کارایی اقتصادی منابع آبی را به دنبال داشته باشد (WHO, 2022). از این رو، پایش و ارزیابی مستمر کیفیت آب، یکی از ارکان اساسی مدیریت پایدار منابع آب محسوب می شود (طهماسبی و همکاران، ۱۴۰۳).

در کنار شاخص های زیستی، شاخص های فیزیکی نیز نقش مهمی در تعیین کیفیت آب ایفا می کنند. کدورت آب یکی از مهم ترین شاخص های فیزیکی است که نشان دهنده میزان ذرات معلق آلی و معدنی در ستون آب می باشد (Ali et al., 2022). افزایش کدورت می تواند ناشی از فرسایش خاک، ورود رسوبات، رشد جلبک ها و یا فعالیت های انسانی در حوزه آبریز باشد. کدورت بالا باعث کاهش نفوذ نور در آب شده و فرآیند فتوسنتز را مختل می کند، در نتیجه بر رشد گیاهان آبی و فیتوپلانکتون ها تأثیر منفی می گذارد (Hecht and van der Lingene., 1992). ذرات معلق موجود در آب می توانند به عنوان ناقل آلاینده ها و فلزات سنگین عمل کرده و سلامت آبزیان و انسان را به خطر اندازند. بررسی کدورت آب، امکان تحلیل جامعی از وضعیت فیزیکی و کیفی منابع آبی را فراهم می سازد و تغییرات آن می تواند بیان گر تحولات مهم هیدرولوژیکی و اکولوژیکی در پهنه های آبی باشد. افزایش کدورت معمولاً ناشی از ورود رسوبات، رواناب های سطحی، فعالیت های انسانی و انتقال مواد معلق از حوضه آبریز است که در نهایت منجر به کاهش شفافیت آب و افت کیفیت زیستگاه های آبی می شود. از این رو، پایش دقیق و مستمر کدورت آب، به ویژه در دریاچه های حساس و ارزشمند، نقش مهمی در ارزیابی وضعیت کیفی آب و اتخاذ راهبردهای مدیریتی و حفاظتی مؤثر ایفا می کند. روش های سنتی پایش کیفیت آب، مبتنی بر نمونه برداری های میدانی و آزمایشگاهی، اگرچه از دقت بالایی برخوردارند، اما با محدودیت هایی نظیر هزینه بالا، زمان بر بودن، سلامت و بهداشت، پوشش مکانی محدود و عدم امکان پایش پیوسته همراه هستند. این محدودیت ها به ویژه در پهنه های آبی وسیع یا مناطق صعب العبور، کارایی این روش ها را کاهش می دهد. در مقابل، علم سنجش از دور به عنوان یکی از فناوری های نوین، توانسته است تحولی اساسی در پایش منابع آب ایجاد کند.

سنجش از دور علم کسب اطلاعات فیزیکی از عوارض بدون تماس مستقیم و بر پایه انرژی بازتابی آن هاست (Landry., 1977). سنجش از دور با استفاده از داده های ماهواره ای و سنجده های طیفی، امکان استخراج اطلاعات مربوط به ویژگی های فیزیکی و زیستی آب را در مقیاس های مکانی و زمانی مختلف فراهم می سازد. بازتاب طیفی آب و اجزای موجود در آن، از جمله فیتوپلانکتون ها و ذرات معلق، این امکان را فراهم می کند که پارامترهایی کلروفیل-آ و

کدورت به صورت غیرمستقیم برآورد شوند (Poddar et al., 2019). از مهم ترین مزایای سنجش از دور می توان به پوشش وسیع، تکرارپذیری زمانی بالا، کاهش هزینه ها و امکان تحلیل تغییرات بلندمدت اشاره کرد. بنابراین استفاده از تصاویر ماهواره ای در پایش کیفیت آب، به مدیران و پژوهشگران این امکان را می دهد که روندهای زمانی، الگوهای مکانی و نقاط بحرانی را شناسایی کرده و تصمیمات مدیریتی مؤثرتری اتخاذ نمایند. در سال های اخیر، کاربرد سنجش از دور در مطالعات دریاچه ها و تالاب ها به طور چشم گیری افزایش یافته و به عنوان ابزاری کارآمد در مدیریت منابع آب مورد توجه قرار گرفته است.

بید و همکاران با استفاده از تصاویر ماهواره لندست و شاخص اختلاف کدورت نرمال شده (NDTI)، میزان کدورت فصلی سد پانچت در هندوستان را شناسایی کردند. نتایج بیانگر سطح بالایی از همبستگی ($R^2 = 0.9$) بین مقادیر NDTI و غلظت کل رسوبات معلق بر حسب میلی گرم در لیتر ($p < 0.05$, $N = 15$) با حداقل میزان RMSE وجود داشت. همچنین تغییرات کدورت فصلی و انواع مختلف کدورت در سطح معنی داری ۹۵ درصد معنی دار بودند (Bid et al., 2019).

ژانگ و همکاران در مطالعه، تغییرات سالانه و فصلی غلظت کلروفیل-آ و کدورت دریاچه نانسی، استان شاندونگ چین، طی سال های ۲۰۱۶ تا ۲۰۲۲ با ترکیب هشت مدل یادگیری ماشین و تصاویر سنتینل-۲ تحلیل شد. نتایج نشان داد کلروفیل-آ در بهار و زمستان کمتر از تابستان و پاییز است، اما در بهار ۲۰۱۷ کدورت به طور غیرعادی افزایش یافت که به علت بالاتر بودن ذرات معلق ذکر شد. این روش ترکیبی توانایی پایش دقیق آلودگی در دریاچه ها را تأیید کرد (Zhang et al., 2024).

دوانترو و همکاران به ارزیابی میزان کدورت آب در مخزن سد ساگولینگ، با استفاده از تصاویر ماهواره سنتینل-۲ و شاخص طیفی NDTI در اندونزی پرداختند. نتایج این مطالعه کارایی شاخص NDTI را در شناسایی کدورت مخزن و پتانسیل آن در ترسیب و ته نشینی را تصدیق نمود. همچنین نقشه تولید شده توانایی ارائه ی یک نمای کلی برای ذینفعانی که وظیفه مدیریت منابع آب را بر عهده دارند، داشت (Dewantoro et al., 2024).

میشرا و همکاران طی پژوهشی میزان کدورت فصلی دریاچه بالخاش در کشور قزاقستان را به کمک داده های ماهواره لندست-۸ شاخص NDTI و متغیرهای اکتشافی، مدل سازی و پیش بینی کردند. یافته ها نشان داد که همبستگی های منفی معنی داری بین NDTI، دمای نزدیک به سطح و سطح آب در هر دو مقیاس مشاهده؛ اما هیچ رابطه مشخصی بین کدورت و متغیرهای بارش یا باد وجود نداشت. در میان متغیرهای کاربری اراضی، علفزارها و زمین های بایر نزدیک دریاچه همبستگی مثبتی با NDTI نشان دادند، اما به مرور زمان از

تبدیل کرده است (Gholami and Shapouri, 2012). به دلیل کم عمق بودن دریاچه، حساسیت بالایی آن نسبت به تغییرات ورودی رسوبات، نوسانات سطح آب، فعالیت‌های انسانی و فرآیندهای بیولوژیکی، پدیده کدورت آب به عنوان یکی از شاخص‌های کلیدی کیفیت آب در این اکوسیستم آبی مطرح می‌باشد. نقشه موقعیت جغرافیایی دریاچه زریبار، ایستگاه‌های نمونه‌برداری و محدوده مورد مطالعه در شکل (۱) ارائه شده است.

جمع‌آوری داده‌ها

در پژوهش حاضر، به منظور بررسی تغییرات مکانی و زمانی کدورت آب دریاچه زریبار و ارزیابی دقت شاخص‌های طیفی مبتنی بر داده‌های سنجش‌ازدور، نمونه‌برداری‌های زمینی در نقاطی از دریاچه انجام شد که از نظر شرایط هیدرودینامیکی و توزیع مکانی، نماینده کل پهنه آبی بودند. ایستگاه‌های نمونه‌برداری به گونه‌ای انتخاب شدند که بخش‌های مختلف دریاچه، شامل نواحی مرکزی، مناطق حاشیه‌ای و بخش‌های تحت تأثیر ورودی‌های آب و فعالیت‌های انسانی را پوشش دهند. عملیات نمونه‌برداری میدانی در ۱۵ ایستگاه منتخب طی ماه‌های اردیبهشت و خرداد سال ۱۳۹۸ انجام گرفت. پس از برداشت نمونه‌های آب، اندازه‌گیری کدورت در آزمایشگاه دانشگاه کردستان با استفاده از دستگاه کدورت‌سنج (Turbidimeter) با مشخصات (Mi 415, Martini instruments, Romania) و مطابق با روش‌های استاندارد آزمایشگاهی صورت پذیرفت. مقادیر اندازه‌گیری شده به عنوان داده‌های مرجع زمینی (Ground Truth)، در تحلیل‌های بعدی مورد استفاده قرار گرفتند و مبنای اصلی اعتبارسنجی روابط تجربی و شاخص‌های طیفی استخراج شده از داده‌های ماهواره‌ای را تشکیل دادند. به منظور تحلیل ارتباط بین داده‌های زمینی و اطلاعات سنجش‌ازدور، از تصاویر ماهواره سنتینل-۲ (Sentinel-2) استفاده شد. انتخاب تصاویر با در نظر گرفتن حداقل میزان پوشش ابری و بیشترین تطابق زمانی با تاریخ نمونه‌برداری‌های میدانی صورت گرفت. داده‌های ماهواره‌ای پس از انجام پردازش‌های لازم، شامل تصحیحات رادیومتریکی و هندسی، برای محاسبه شاخص‌های طیفی مرتبط با کدورت و تهیه نقشه‌های پهنه‌بندی مکانی کدورت دریاچه به کار گرفته شدند. موقعیت مکانی ایستگاه‌های نمونه‌برداری در شکل (۱) و تاریخ اخذ تصاویر مورد استفاده در جدول (۱) ارائه شده است.

شیوه انجام پژوهش

در گام نخست، به منظور شناسایی و تفکیک پهنه آبی دریاچه زریبار از سایر عوارض سطحی، از شاخص طیفی اختلاف نرمال شده آب (Normalized Difference Water Index - NDWI) استفاده شد. این شاخص با بهره‌گیری از بازتاب طیفی باند سبز مرئی (Green) و باند مادون قرمز نزدیک (Near Infrared - NIR)،

نظر مکانی کاهش یافته‌اند. برعکس، بوته‌زارها و تالاب‌ها همبستگی منفی با NDTI نشان می‌دهند. (Mishra et al., 2025).

لتوال و همکاران به مدل‌سازی و تخمین میزان کدورت در دو مخزن در هند با استفاده از تصاویر سنتینل-۲ و شاخص NDTI، اقدام نمودند. با توجه به نتایج، مقادیر شاخص NDTI با مقادیر کدورت بزرگتر از ۱۰ NTU با ضریب تبیین ۰/۸۱ و تخمین خطای استاندارد ۵/۳ همبستگی قوی با داده‌های میدانی داشت (Latwal et al., 2025).

بر این اساس، پژوهش حاضر با هدف ارزیابی و مقایسه شاخص‌های طیفی کدورت آب با استفاده از تصاویر ماهواره‌ای سنتینل-۲ به منظور پایش کدورت دریاچه زریبار مریوان در چهار فصل سال ۱۳۹۸ انجام شده است. در این مطالعه، با بهره‌گیری از داده‌های سنجش‌ازدور، وضعیت کدورت آب دریاچه به طور جامع بررسی شده و الگوها و روندهای تغییرات مکانی و زمانی کدورت شناسایی می‌گردد. به منظور ارزیابی دقت نتایج حاصل از تصاویر ماهواره‌ای، مقادیر برآورده کدورت با داده‌های برداشت شده میدانی مقایسه و با استفاده از شاخص‌های آماری مورد تحلیل قرار می‌گیرند. نتایج این پژوهش می‌تواند به عنوان پشتوانه‌ای علمی در جهت بهبود برنامه‌ریزی، مدیریت پایدار منابع آب و حفاظت زیست‌محیطی دریاچه زریبار مورد استفاده قرار گرفته و مبنایی برای تصمیم‌گیری‌های مدیریتی و زیست‌محیطی فراهم سازد.

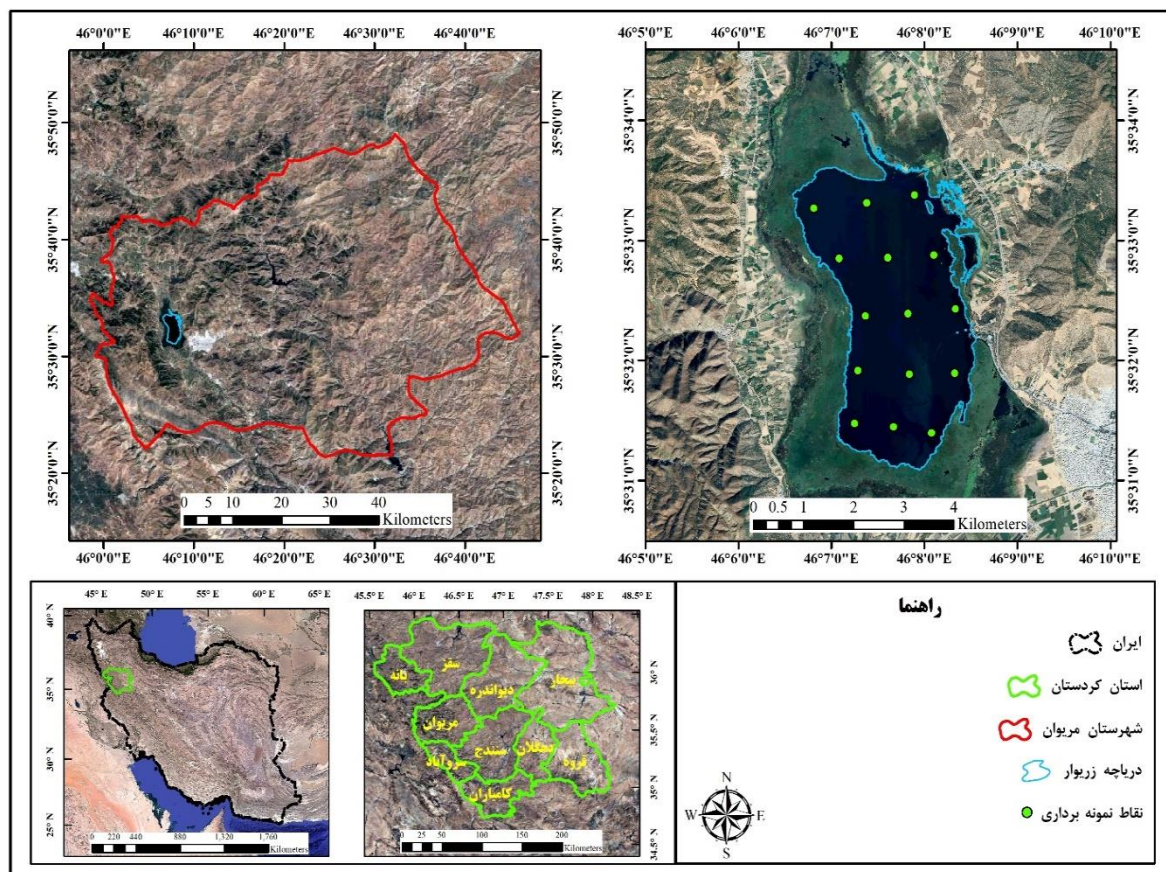
مواد و روش‌ها

منطقه مورد مطالعه

دریاچه زریبار (Zarivar Lake) به عنوان بزرگ‌ترین دریاچه آب شیرین طبیعی ایران، یکی از مهم‌ترین اکوسیستم‌های آبی غرب کشور محسوب می‌شود. این دریاچه از نظر هیدرولوژیکی و زیست‌محیطی نقش بسزایی در تعادل اکولوژیک منطقه داشته و از شاخص‌ترین جاذبه‌های طبیعی استان کردستان به شمار می‌رود (طهماسبی و همکاران، ۱۴۰۳). دریاچه زریبار در فاصله حدود ۲ کیلومتری شمال غرب شهرستان مریوان واقع شده و از نظر موقعیت جغرافیایی در محدوده طول ۴۸°۴۶' و ۴۸°۴۶' و عرض ۳۳°۳۵' و ۳۳°۳۵' درجه شمالی، واقع گردیده قرار دارد (Sharifinia et al., 2013). میانگین عمق دریاچه زریبار حدود ۳ متر بوده و حداکثر عمق آن به حدود ۷ متر می‌باشد که نشان‌دهنده ماهیت کم عمق این پهنه آبی است. حجم ذخیره آب دریاچه در حدود ۳۰ میلیون مترمکعب برآورد می‌شود. تأمین آب دریاچه عمدتاً از طریق چشمه‌های کفجوش (Subaqueous Springs)، چشمه‌های حاشیه غربی دریاچه و همچنین نزولات جوی صورت می‌گیرد، که این ویژگی، زریبار را از نظر رژیم تغذیه هیدرولوژیکی به یک سامانه منحصربه‌فرد

نزدیک به ۱+ بیان گر حضور پهنه‌های آبی بوده و مقادیر منفی و نزدیک به ۱- نشان‌دهنده سطوح غیرآبی از جمله پوشش گیاهی و اراضی فاقد پوشش گیاهی می‌باشند.

امکان جداسازی مؤثر سطوح آبی از پوشش‌های گیاهی و اراضی فاقد پوشش را فراهم می‌سازد. دلیل کارایی این شاخص، جذب بالای انرژی در باند NIR و بازتاب نسبتاً بالای آن در باند سبز توسط آب، در مقایسه با سایر پوشش‌های سطحی است. دامنه تغییرات شاخص NDWI در بازه ۱- تا ۱+ قرار دارد، به گونه‌ای که مقادیر مثبت و



شکل ۱- موقعیت مکانی دریاچه زربار در کشور ایران، استان کردستان و شهرستان مریوان به همراه توزیع مکانی ایستگاه‌های نمونه‌برداری در منطقه مورد مطالعه

جدول ۱- تاریخ اخذ تصاویر و ماهواره به کاررفته در این مطالعه

ماهواره	تاریخ اخذ تصویر (شمسی)	تاریخ اخذ تصویر (میلادی)
سنیتل - ۲	۱۳۹۸/۰۳/۰۳	2019-05-24
	۱۳۹۸/۰۵/۱۱	2019-08-02
	۱۳۹۸/۰۸/۲۴	2019-11-15
	۱۳۹۸/۱۰/۰۴	2019-12-25

فرمول محاسبه شاخص NDWI مطابق رابطه (۱) ارائه شده است (McFeeters., 1996)

$$NDWI = \frac{\rho_{Green} - \rho_{NIR}}{\rho_{Green} + \rho_{NIR}} \quad (1)$$

در این رابطه، ρ_{Green} بازتاب مربوط به باند سبز و ρ_{NIR} بازتاب

بر این اساس، آستانه‌گذاری مناسب بر روی مقادیر NDWI، امکان استخراج دقیق مرز پهنه آبی دریاچه را فراهم می‌کند و نقش مهمی در کاهش اثر اختلاط پیکسلی در مراحل بعدی تحلیل دارد.

ت (TurbLath شاخص

شاخص فوق، نسبت بازتاب مادون قرمز نزدیک به قرمز است که به عنوان یک شاخص کدورت بهینه شده برای آب‌های بسیار کدر، که در آن نوارهای مرئی ممکن است اشباع شوند، استفاده می‌شود (Beck et al., 2019).

$$\text{TurbLath} = \frac{\rho_{\text{NIR}}}{\rho_{\text{Red}}} \quad (۵)$$

محاسبه میزان کدورت آب با استفاده از شاخص‌های طیفی

به منظور برآورد کمی کدورت آب دریاچه زریبار، رابطه بین مقادیر اندازه‌گیری شده کدورت در محل و شاخص‌های طیفی استخراج شده از تصاویر ماهواره‌ای مورد تحلیل قرار گرفت. در این راستا، با بهره‌گیری از مدل رگرسیون خطی، ارتباط آماری بین داده‌های میدانی کدورت و مقادیر متناظر شاخص‌های طیفی برقرار شد. مدل‌های رگرسیونی حاصل، به عنوان روابط تجربی، امکان تبدیل مقادیر شاخص‌های طیفی به مقادیر کمی کدورت را فراهم ساختند. پس از تعیین معادله رگرسیونی بهینه، این معادله بر روی کل پهنه آبی دریاچه اعمال گردید و بدین ترتیب نقشه‌های پهنه‌بندی مکانی کدورت آب برای تمامی پیکسل‌های دریاچه استخراج شد (Atar et al., 2020). نتایج حاصل، امکان ارائه تصویری جامع از توزیع مکانی و تغییرات کدورت آب دریاچه زریبار را برای ماه‌های منتخب فراهم نمود. این ماه‌ها به عنوان نماینده شرایط فصلی سال ۱۳۹۸ در نظر گرفته شدند و تحلیل آن‌ها، دورنمای کلی از وضعیت کدورت دریاچه در مقیاس فصلی ارائه می‌دهد.

معیارهای ارزیابی

یکی از مراحل اساسی در فرآیند واسنجی و ارزیابی مدل‌ها، بررسی عملکرد آن‌ها از طریق مقایسه نتایج شبیه‌سازی شده با داده‌های مرجع و مشاهداتی است. این ارزیابی امکان سنجش میزان انطباق خروجی‌های مدل با شرایط واقعی را فراهم کرده و نقش تعیین‌کننده‌ای در انتخاب مدل بهینه ایفا می‌کند (Bagwan et al., 2021). در این پژوهش، به منظور ارزیابی کارایی مدل‌ها و توانایی آن‌ها در پیش‌بینی متغیر مورد مطالعه، از شاخص‌های آماری متداول استفاده شد. بدین منظور، معیارهای ریشه میانگین مربعات خطا (Root Mean Square Error – RMSE) و ضریب تبیین (Coefficient of Determination – R²) به عنوان شاخص‌های اصلی ارزیابی دقت و صحت مدل‌ها به کار گرفته شدند. شاخص RMSE بیان‌گر میزان انحراف مقادیر پیش‌بینی شده مدل از داده‌های مشاهده شده بوده و مقادیر کمتر آن نشان‌دهنده دقت بالاتر مدل است. از سوی دیگر، ضریب تبیین (R²) میزان همبستگی و قدرت تبیین تغییرات داده‌های مشاهده شده توسط مدل را نشان می‌دهد، به طوری که مقادیر نزدیک‌تر به یک بیان‌گر عملکرد بهتر مدل می‌باشد. روابط ریاضی مربوط به

مربوط به باند مادون قرمز نزدیک است.

پس از فراخوانی و آماده‌سازی تصاویر پردازش شده ماهواره سنتینل-۲ در پلتفرم Google Earth Engine، شاخص‌های طیفی منتخب مرتبط با کدورت آب، مطابق با شاخص‌های زیر، به صورت جداگانه برای هر یک از تصاویر مورد مطالعه محاسبه شدند. انتخاب این شاخص‌ها بر اساس مبانی فیزیکی بازتاب طیفی آب و حساسیت آن‌ها نسبت به تغییرات کدورت صورت گرفت. محاسبه شاخص‌ها برای هر تصویر به طور مستقل انجام گردید تا امکان بررسی تغییرات کدورت و تحلیل پویایی مکانی آن در بازه‌های زمانی مختلف فراهم شود. شاخص‌های به کاررفته در این پژوهش، که زیر ارائه می‌شوند، مبنای اصلی استخراج اطلاعات کمی از تصاویر ماهواره‌ای سنتینل-۲ و برقراری ارتباط بین داده‌های سنجش‌ازدور و اندازه‌گیری‌های زمینی کدورت را تشکیل می‌دهند.

الف) شاخص تفاضل کدورت نرمال شده (NDTI)

NDTI یک شاخص طیفی در سنجش‌ازدور است که به طور گسترده برای برآورد کدورت آب‌های سطحی استفاده می‌شود. این شاخص از اختلاف بازتابندگی باند قرمز و باند سبز بهره می‌گیرد. مقادیر این شاخص که در بازه -۱ تا +۱ قرار می‌گیرد. با افزایش کدورت (یعنی افزایش مواد معلق)، بازتابندگی در باند قرمز نسبت به باند سبز بیشتر می‌شود و در نتیجه مقدار NDTI افزایش می‌یابد (Lacaux et al., 2007). معادله مربوط به این شاخص، در رابطه (۲)، ارائه شده است.

$$\text{NDTI} = \frac{\rho_{\text{Red}} - \rho_{\text{Green}}}{\rho_{\text{Red}} + \rho_{\text{Green}}} \quad (۲)$$

در این معادله، ρ_{Red} بازتاب مربوط به باند قرمز می‌باشد.

ب) شاخص TurbBow

TurbBow یک نوع شاخص کدورت نوری بدون بعد است که از بازتاب سنجش از دور مشتق شده و به صورت نسبت بازتاب قرمز به سبز تعریف می‌شود و به عنوان نماینده‌ای برای کدورت آب و ذرات معلق استفاده می‌شود (Beck et al., 2019).

$$\text{TurbBow} = \frac{\rho_{\text{Red}}}{\rho_{\text{Green}}} \quad (۳)$$

در این معادله، ρ_{Red} بازتاب مربوط به باند قرمز می‌باشد.

در این معادله، ρ_{Red} بازتاب مربوط به باند قرمز می‌باشد.

پ) شاخص TurbChip

این شاخص نسبت بازتاب لبه قرمز به قرمز است که به عنوان نماینده کدورت استفاده می‌شود و به گونه‌ای طراحی شده است که نسبت به نسبت‌های باند کاملاً مرئی، حساسیت کمتری به جذب کلروفیل داشته باشد (Beck et al., 2019).

$$\text{TurbChip} = \frac{\rho_{\text{Red Edge}}}{\rho_{\text{Red}}} \quad (۴)$$

در این معادله، $\rho_{\text{Red Edge}}$ بازتاب مربوط به باند لبه قرمز می‌باشد.

محاسبه شاخص‌های RMSE و R^2 به ترتیب در روابط (۶) تا (۷) ارائه شده‌اند (Al-Areeq et al, 2022) بر اساس این معیارها، مدلی که کم‌ترین مقدار RMSE و بیش‌ترین مقدار R^2 را دارا باشد، به‌عنوان مدل با بهترین عملکرد و بالاترین توان پیش‌بینی انتخاب گردید. نتایج حاصل از این ارزیابی، مبنای قضاوت در خصوص کارایی مدل‌ها و انتخاب مناسب‌ترین مدل برای تحلیل‌های نهایی پژوهش قرار گرفت.

$$R^2 = \frac{\sum_{i=1}^N (O_i - \bar{O})(P_i - \bar{P})}{\sqrt{\sum_{i=1}^N (O_i - \bar{O})^2 \sum_{i=1}^N (P_i - \bar{P})^2}} \quad (۶)$$

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N (O_i - P_i)^2}{N}} \quad (۷)$$

که در آن‌ها O_i و $\bar{O}$ به ترتیب مقادیر مشاهداتی و میانگین مقادیر مشاهداتی، P_i مقادیر پیش‌بینی شده، $\bar{P}$ میانگین مقادیر پیش‌بینی شده و N تعداد داده‌ها هستند.

نتایج و بحث

در این بخش، نتایج حاصل از تحلیل داده‌های سنجش‌ازدور و اندازه‌گیری‌های میدانی کدورت آب دریاچه زریبار ارائه و مورد بحث قرار می‌گیرد. بدین منظور، ابتدا رفتار مکانی و زمانی شاخص‌های طیفی منتخب در برآورد کدورت آب مورد بررسی قرار گرفته و توانایی هر یک از شاخص‌ها در نمایش تغییرات فصلی و الگوهای مکانی کدورت تحلیل می‌گردد. سپس با توسعه مدل‌های رگرسیونی و مقایسه مقادیر برآوردشده با داده‌های مرجع زمینی، دقت و کارایی شاخص‌ها ارزیابی شده و شاخص بهینه برای پایش کدورت دریاچه زریبار معرفی می‌گردد. در نهایت، نتایج به‌دست‌آمده در چارچوب فرآیندهای حاکم بر دریاچه تفسیر شده و با یافته‌های مطالعات پیشین مقایسه می‌شوند تا تصویری جامع از قابلیت‌های داده‌های سنتینل-۲ در پایش کیفیت آب این پهنه آبی ارائه گردد.

ارزیابی شاخص‌های پایش کدورت آب دریاچه زریبار

شاخص طیفی NDTI

شکل (۲) توزیع مکانی و تغییرات زمانی شاخص تفاضل نرمال‌شده کدورت (NDTI) را در دریاچه زریبار برای تاریخ‌های منتخب سال ۱۳۹۸ نمایش داده‌است. نتایج نشان داد که مقادیر این شاخص در ماه‌های خرداد و مرداد به‌طور محسوسی بالاتر از ماه‌های آبان و دی است، به‌گونه‌ای که بیشینه مقادیر NDTI در مردادماه مشاهده می‌شود. این الگوی فصلی بیان‌گر افزایش کدورت آب در فصول گرم سال بوده و می‌تواند به افزایش دمای هوا، تشدید فرآیندهای زیستی، رشد فیتوپلانکتون‌ها، افزایش بازتعلیق رسوبات کف و کاهش تراز آب دریاچه نسبت داده شود (Wetzel, 2001). از منظر توزیع مکانی، نتایج حاکی از آن است که در ماه‌های آبان و دی،

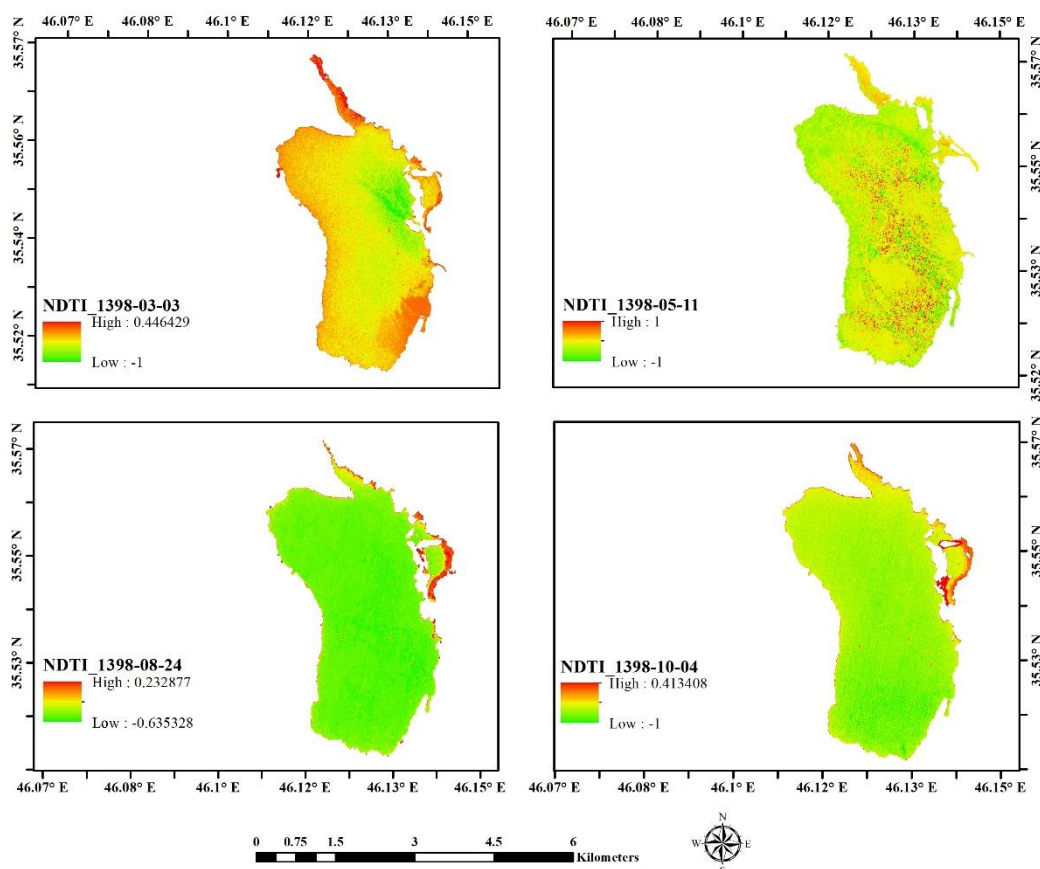
الگوی پراکنش NDTI نسبتاً مشابه بوده و بیش‌ترین مقادیر شاخص عمدتاً در نواحی حاشیه‌ای دریاچه متمرکز شده‌اند، در حالی که کم‌ترین مقادیر در بخش‌های مرکزی دریاچه مشاهده می‌شود. این الگوی مکانی را می‌توان به ویژگی‌های مورفومتری دریاچه، به‌ویژه کم‌عمق بودن نواحی پیرامونی، تأثیر مستقیم ورودی‌های سطحی نظیر زه‌آب‌های کشاورزی و رواناب‌های شهری همراه با فاضلاب‌های ورودی، و همچنین حساسیت بالاتر این مناطق نسبت به فرآیند بازتعلیق رسوبات کف نسبت داد؛ موضوعی که در مطالعه (دالوند و طهماسبی، ۱۴۰۴) نیز مورد تأکید قرار گرفته بود. در مقابل، بخش‌های مرکزی دریاچه زریبار به‌دلیل عمق بیش‌تر و پایداری نسبی ستون آب، از مقادیر کدورت کم‌تری برخوردار هستند. (Robe, 1961) عمق بیش‌تر ستون آب و پایداری نسبی آن باعث کاهش مقادیر کدورت در بخش‌های مرکزی دریاچه‌ها می‌شود. این پدیده به‌دلیل کاهش تحرک و مخلوط شدن ذرات معلق در آب به‌واسطه پایداری بیش‌تر و عمق آب می‌باشد. در نتیجه نتایج حاصل از تحلیل شاخص تفاضل نرمال‌شده کدورت (NDTI) نشان می‌دهد که این شاخص توانایی بالایی در بازنمایی تغییرات مکانی و زمانی کدورت آب دریاچه زریبار دارد و می‌تواند نوسانات کیفی آب را در مقیاس‌های مختلف با دقت مناسبی منعکس نماید. مبنای این عملکرد به رفتار فیزیکی-طیفی مواد معلق در آب بازمی‌گردد؛ به‌طوری‌که افزایش غلظت ذرات معلق آلی و معدنی موجب تقویت بازتابندگی در باند قرمز و تغییرات محدودتر در باند سبز می‌شود و این تفاوت طیفی به‌صورت مستقیم در افزایش مقادیر شاخص NDTI نمود می‌یابد. هم‌سویی نتایج این پژوهش با یافته‌های مطالعات پیشین (Lacaux et al., 2007; Beck et al., 2019) در زمینه کارایی شاخص‌های مبتنی بر باندهای مرئی، به‌ویژه باند قرمز، در برآورد کدورت آب‌های سطحی، مؤید آن است که شاخص NDTI در ترکیب با داده‌های ماهواره‌ای Sentinel-2 می‌تواند به‌عنوان ابزاری کارآمد و کم‌هزینه برای پایش کیفی آب دریاچه زریبار و پشتیبانی از تصمیم‌گیری‌های مدیریتی و حفاظتی مورد استفاده قرار گیرد.

شاخص طیفی TurbBow

شکل (۳) توزیع مکانی شاخص طیفی TurbBow محاسبه‌شده را برای دریاچه زریبار را در تاریخ‌های منتخب سال ۱۳۹۸ نمایش می‌دهد. نتایج نشان می‌دهد که مقادیر این شاخص، مشابه شاخص NDTI، در ماه‌های خرداد و مرداد به‌طور قابل‌توجهی بالاتر از ماه‌های آبان و دی است که بیان‌گر تشدید کدورت آب در فصول گرم سال می‌باشد. این الگوی زمانی را می‌توان به افزایش دمای هوا، تقویت فرآیندهای هیدروپنمیک، افزایش زیست‌توده‌های معلق و تشدید بازتعلیق رسوبات کف در شرایط کم‌عمق دریاچه نسبت داد. از منظر

توانایی مناسبی در تفکیک نواحی با کدورت بالاتر و بازنمایی تغییرات مکانی-زمانی کدورت آب دارد. از این منظر، عملکرد TurbBow تا حد زیادی با شاخص NDTI قابل مقایسه است؛ با این تفاوت که ارزیابی دقیق‌تر میزان دقت و برتری نسبی این شاخص‌ها در بخش تحلیل کمی و مدل‌سازی به‌طور مفصل مورد بررسی قرار خواهد گرفت. بر این اساس، شاخص TurbBow می‌تواند به‌عنوان یکی از شاخص‌های قابل اتکا در پایش کدورت آب در دریاچه‌های کم‌عمق، از جمله دریاچه زریبار، مورد استفاده قرار گیرد.

توزیع مکانی، شاخص TurbBow در ماه‌های آبان و دی الگوی نسبتاً مشابهی را نشان می‌دهد؛ به‌طوری‌که بیشینه مقادیر شاخص عمدتاً در نواحی حاشیه‌ای دریاچه و کمینه آن‌ها در بخش‌های مرکزی مشاهده می‌شود. این الگوی مکانی بیان‌گر نقش عوامل مورفولوژیکی دریاچه، از جمله کم‌عمق بودن حاشیه‌ها و تأثیر مستقیم ورودی‌های سطحی، در افزایش غلظت ذرات معلق و در نتیجه افزایش کدورت آب است. در مقابل، نواحی مرکزی دریاچه به دلیل عمق بیش‌تر و پایداری نسبی ستون آب، شرایط آرام‌تری داشته و مقادیر کدورت کم‌تری را نشان می‌دهند. رفتار شاخص TurbBow حاکی از آن است که این شاخص، که مبتنی بر نسبت بازتابندگی باندهای قرمز و سبز می‌باشد،



شکل ۲- نقشه‌های مربوط به شاخص NDTI در دریاچه زریبار در تاریخ‌های منتخب

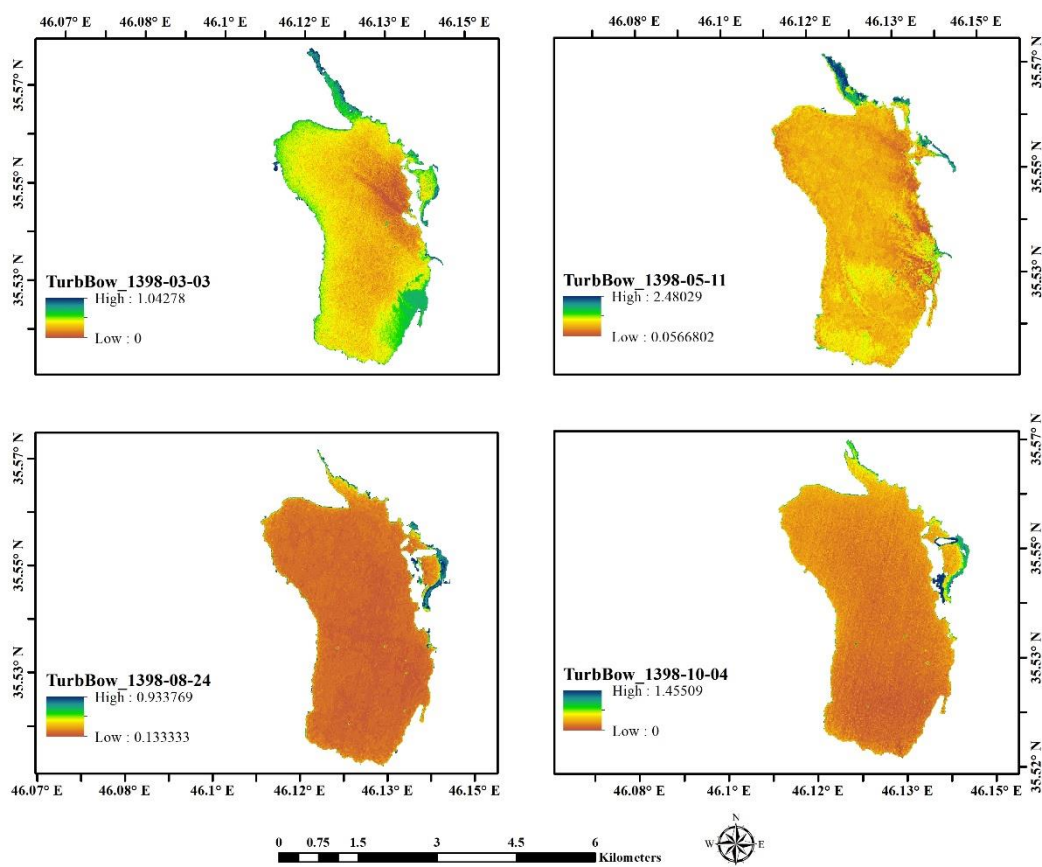
برخوردار نیست. با این حال، مقادیر این شاخص در فصول گرم سال به‌طور کلی بیش‌تر از فصول سرد مشاهده می‌شود که بیان‌گر حساسیت آن نسبت به افزایش کلی کدورت در شرایط دمایی بالاتر است. تفاوت رفتاری شاخص TurbChip را می‌توان به ماهیت طیفی آن نسبت داد. این شاخص مبتنی بر نسبت بازتابندگی باند لبه قرمز به باند قرمز است و به‌گونه‌ای طراحی شده است که نسبت به جذب ناشی از کلروفیل-آ حساسیت کم‌تری داشته باشد. در نتیجه، در

شاخص طیفی TurbChip

نقشه‌های پهنه‌بندی مکانی شاخص طیفی TurbChip ارائه‌شده در شکل (۴)، رفتار متفاوتی نسبت به شاخص‌های NDTI و TurbBow در دریاچه زریبار نشان می‌دهند. برخلاف دو شاخص پیشین که الگوی زمانی نسبتاً منظم‌تری را در فصول مختلف سال نشان دادند، شاخص TurbChip بیشینه مقادیر را در تصویر مربوط به خردادماه ثبت کرده و تغییرات فصلی آن از الگوی یکنواخت‌تری

بخش‌های مرکزی است. این موضوع نشان می‌دهد که اگرچه رفتار زمانی این شاخص متفاوت است، اما از نظر مکانی همچنان تحت تأثیر ویژگی‌های مورفولوژیکی و هیدرودینامیکی دریاچه قرار دارد. در مجموع، نتایج حاصل بیان‌گر آن است که شاخص TurbChip می‌تواند اطلاعات مکملی در تحلیل کدورت آب ارائه دهد، اما پایداری و سازگاری رفتاری آن در مقایسه با شاخص‌های NDTI و TurbBow محدودتر ارزیابی می‌شود.

شرایطی که سهم مؤلفه‌های زیستی در کدورت افزایش می‌یابد، رفتار این شاخص ممکن است از شاخص‌های مبتنی بر باندهای کاملاً مرئی فاصله بگیرد. این ویژگی می‌تواند توضیح‌دهنده تفاوت الگوی زمانی TurbChip نسبت به شاخص‌های NDTI و TurbBow باشد. از منظر توزیع مکانی، الگوی شاخص TurbChip اگرچه نوسانات کم-تری را نسبت به سایر شاخص‌ها نشان می‌دهد، اما همچنان نشان دهنده مقادیر بالاتر در نواحی حاشیه‌ای دریاچه و مقادیر کم‌تر در



شکل ۳- نقشه‌های مربوط به شاخص TurbBow در دریاچه زریبار در تاریخ‌های منتخب

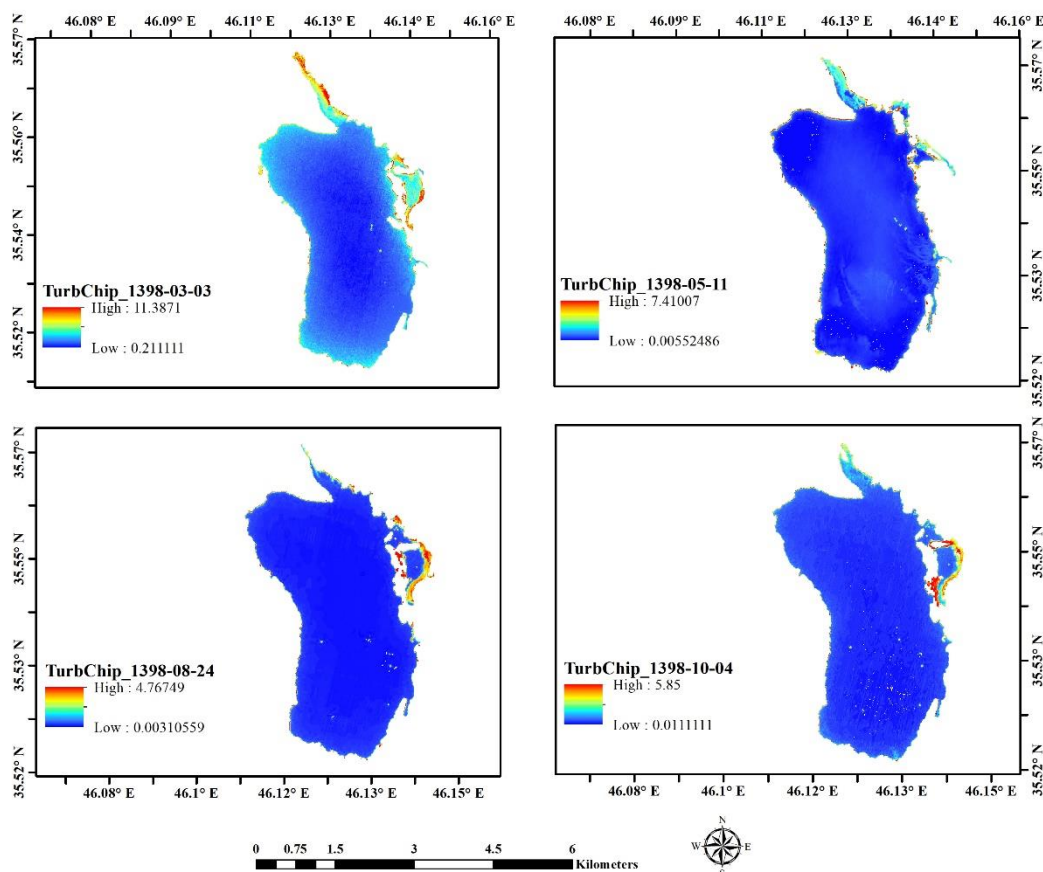
افزایش دمای هوا، کاهش تراز آب دریاچه، تشدید اختلاط عمودی ستون آب و افزایش بازتعلیق رسوبات کف در نواحی کم‌عمق. این شرایط سبب افزایش غلظت مواد معلق در ستون آب شده و در نتیجه، بازتابندگی طیفی آب در باندهای مورد استفاده در این شاخص را افزایش می‌دهد. از منظر توزیع مکانی، نتایج نشان می‌دهد که بیشینه مقادیر شاخص TurbLath عمدتاً در مناطق پیرامونی دریاچه متمرکز شده، در حالی که کمینه مقادیر آن در بخش‌های مرکزی مشاهده می‌شود. این الگوی مکانی بیان‌گر نقش مؤثر ویژگی‌های مورفولوژیکی دریاچه و ورودی‌های سطحی در افزایش کدورت آب در نواحی حاشیه‌ای است. در مقابل، بخش‌های مرکزی دریاچه به دلیل

شاخص طیفی TurbLath

شکل (۵) توزیع مکانی شاخص طیفی TurbLath را در دریاچه زریبار برای تاریخ‌های منتخب سال ۱۳۹۸ نشان می‌دهد. بررسی نقشه‌ها نشان داد که مقادیر این شاخص در ماه‌های خرداد و مرداد به‌طور محسوسی بالاتر از ماه‌های آبان و دی می‌باشد، به‌گونه‌ای که بیشینه مقادیر TurbLath در مردادماه مشاهده شده است. این الگوی زمانی مؤید افزایش کدورت آب در فصول گرم سال بوده و با نتایج به‌دست‌آمده از شاخص‌های NDTI و TurbBow هم‌راستا است. افزایش مقادیر شاخص TurbLath در فصول گرم را می‌توان به‌ترکیبی از عوامل فیزیکی و زیست‌محیطی نسبت داد؛ از جمله

شاخص با شرایط فیزیکی حاکم بر دریاچه و هم‌خوانی آن با الگوهای مشاهده‌شده در سایر شاخص‌ها، بیان‌گر قابلیت مناسب TurbLath در پایش کدورت آب در دریاچه‌های کم‌عمق می‌باشد. از این رو، این شاخص می‌تواند به‌عنوان یکی از گزینه‌های مؤثر در مدل‌سازی و برآورد کدورت آب دریاچه زریبار مورد توجه قرار گیرد.

عمق بیش‌تر، پایداری نسبی ستون آب و کاهش اثر فرآیندهای بازتعطیل، مقادیر کدورت کم‌تری را نشان می‌دهند. عملکرد شاخص TurbLath در بازنمایی هم‌زمان تغییرات مکانی و زمانی کدورت نشان می‌دهد که این شاخص نسبت به نوسانات فصلی و الگوهای فضایی کدورت از حساسیت بالایی برخوردار است. سازگاری نتایج این



شکل ۴- نقشه‌های مربوط به شاخص TurbChip در دریاچه زریبار در تاریخ‌های منتخب

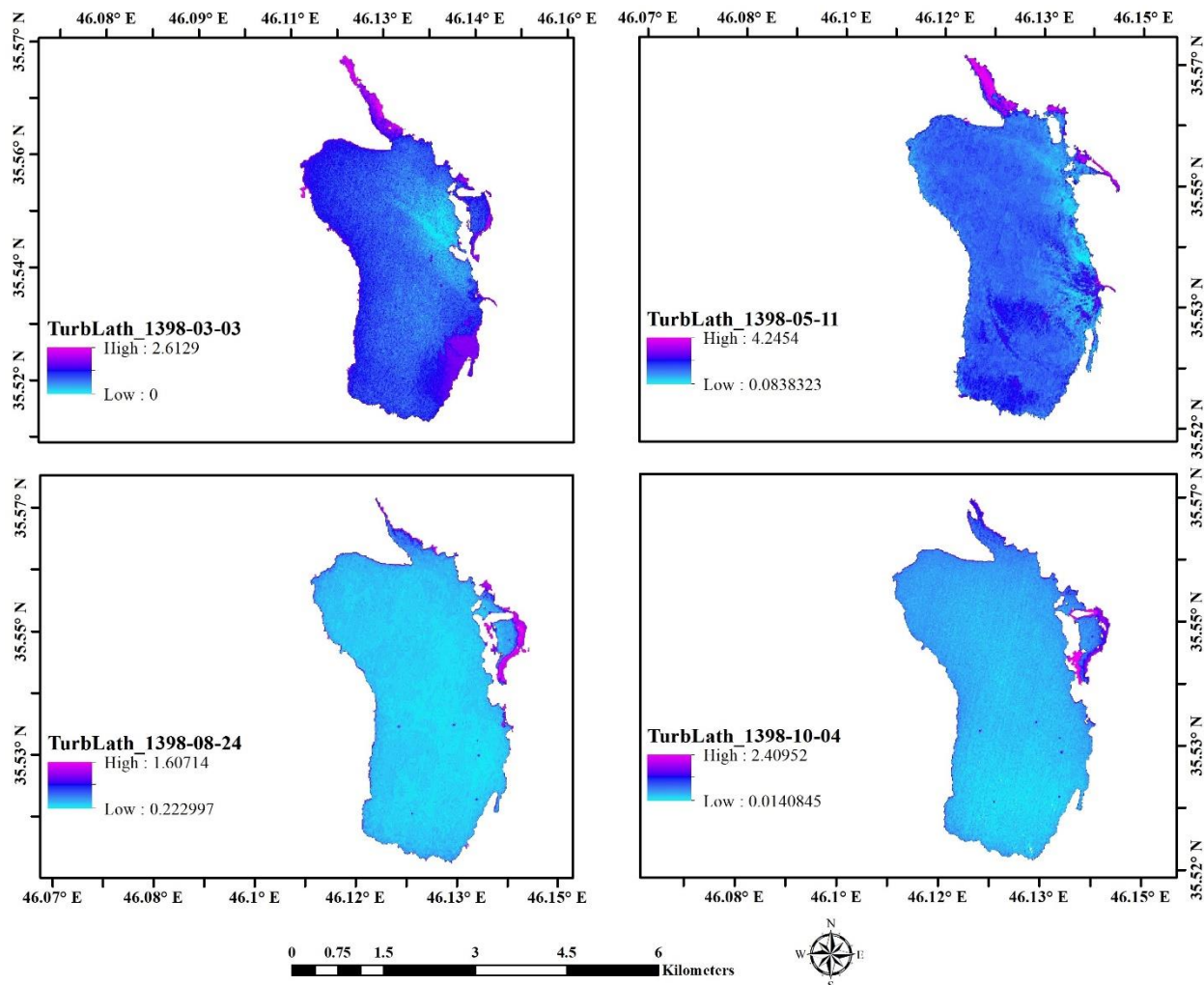
شاخص‌های آماری R^2 و RMSE در تاریخ‌های منتخب سال ۱۳۹۸ ارائه کرده است. بر اساس داده‌ها، شاخص NDTI در تمامی تاریخ‌ها دارای بیش‌ترین مقدار R^2 (۰/۷۶ تا ۰/۸۹) و کم‌ترین مقادیر RMSE (۰/۰۴۱۳ تا ۰/۰۵۳۳) است، که نشان‌دهنده دقت بالای آن در بازتولید داده‌های اندازه‌گیری‌شده است. شاخص TurbBow و TurbLath عملکرد ضعیفی را ارائه می‌دهند به‌ترتیب R^2 (۰/۱۸۲ تا ۰/۵۸۳) و RMSE (۰/۰۰۹۸۵ تا ۰/۰۲۴۹۸) و همچنین شاخص TurbChip به دلیل نوسانات بیش‌تر در داده‌های فصلی، دارای کم‌ترین R^2 (۰/۰۱۵۰ تا ۰/۰۶۱۴۶) و بیش‌تر RMSE (۰/۰۰۷ تا ۰/۰۱۲۲۲) در میان شاخص‌های مذکور ضعیف‌ترین عملکرد را به‌خود اختصاص داده است. بنابراین تحلیل مکانی و زمانی نتایج نشان می‌دهد که شاخص NDTI قادر

مدل‌سازی کدورت دریاچه زریوار و انتخاب بهترین مدل

به‌منظور ارزیابی دقت شاخص‌های طیفی کدورت منتخب (TurbLath و TurbChip، TurbBow، NDTI)، مقادیر این شاخص‌ها در ۱۵ ایستگاه نمونه‌برداری استخراج شده و با داده‌های میدانی کدورت مقایسه گردیدند. برای برآورد کمی کدورت در کل پهنه دریاچه زریبار، از مدل رگرسیون خطی استفاده شد. جهت ارزیابی دقت و مقایسه عملکرد شاخص‌ها، از شاخص‌های آماری ضریب تبیین (R^2) و ریشه میانگین مربعات خطا (RMSE) استفاده گردید. این رویکرد امکان مقایسه مستقیم عملکرد شاخص‌ها را فراهم می‌سازد و زمینه را برای شناسایی شاخصی که بیش‌ترین قدرت تبیین و کم‌ترین خطای پیش‌بینی را دارد، مهیا می‌کند. جدول (۲) نتایج اعتبارسنجی شاخص‌ها را با استفاده از

حساسیت به تغییرات کدورت، کمترین اثر اختلالات ناشی از فیتوپلانکتون‌ها و تغییرات زیست‌توده را دارد و به همین دلیل، قابلیت اتکا بالایی در پایش فصلی و بلندمدت را می‌تواند داشته باشد.

است تغییرات کدورت را به‌طور منسجم و سازگار با الگوهای فصلی و مکانی دریاچه زریبار بازنمایی کند. علاوه بر این، قدرت تبیین بالای NDTI در ماه‌های گرم سال (خرداد و مرداد) و پایداری نسبی آن در ماه‌های سرد (آبان و دی)، نشان می‌دهد که این شاخص علاوه بر



شکل ۵- نقشه‌های مربوط به شاخص TurbLath در دریاچه زریبار در تاریخ‌های منتخب

جدول ۲- ارزیابی دقت میزان کدورت پیش‌بینی شده

۱۳۹۸/۱۰/۰۴		۱۳۹۸/۰۸/۲۴		۱۳۹۸/۰۵/۱۱		۱۳۹۸/۰۳/۰۳		تاریخ‌های منتخب
RMSE	R ²	RMSE	R ²	RMSE	R ²	RMSE	R ²	شاخص‌های آماری
شاخص‌های طیفی کدورت (NTU)								
۰/۰۴۱۲۶	۰/۷۵۸۷	۰/۰۵۳۰۲	۰/۷۶۵۱	۰/۰۵۰۵۴	۰/۸۸۵۷	۰/۰۵۳۲۸	۰/۷۹۴۵	NDTI
۰/۰۱۱۹۲	۰/۵۸۶۳	۰/۰۰۹۸۵	۰/۱۸۹۶	۰/۰۱۳۵۲	۰/۱۸۲۱	۰/۰۲۴۹۸	۰/۵۶۱۶	TurbBow
۰/۰۰۹۷۶	۰/۲۰۴۳	۰/۰۰۹۷۴	۰/۲۰۷۶	۰/۰۱۲۷۶	۰/۲۶۷۸	۰/۰۵۳۹۹	۰/۰۰۱۱	TurbChip
۰/۰۱۲۲۲	۰/۱۱۶۸	۰/۰۰۸۵۴	۰/۳۹۱۰	۰/۰۱۰۵۰	۰/۵۰۳۴	۰/۰۰۷۳	۰/۶۱۴۶	TurbLath

نتیجه‌گیری

پژوهش حاضر با هدف ارزیابی و مقایسه کارایی شاخص‌های طیفی مبتنی بر داده‌های سنجش‌ازدور در برآورد و پایش کدورت آب دریاچه زریبار می‌یوان انجام شد و تلاش گردید با تلفیق داده‌های ماهواره‌ای سنتینل-۲ و اندازه‌گیری‌های میدانی، تصویری جامع از تغییرات مکانی-زمانی کدورت این پهنه آبی ارائه شود. نتایج حاصل نشان داد که شاخص‌های طیفی مورد بررسی، توانایی متفاوتی در بازنمایی تغییرات کدورت داشته و عملکرد آن‌ها به شدت تحت تأثیر ماهیت طیفی باندهای به کاررفته، شرایط فصلی و ویژگی‌های مورفومتریک دریاچه قرار دارد.

تحلیل‌های مکانی و زمانی نشان داد که کدورت آب دریاچه زریبار دارای الگوی فصلی مشخصی است، به طوری که بیشینه مقادیر کدورت در فصول گرم سال (خرداد و مرداد) و کمینه آن در فصول سرد (آبان و دی) مشاهده شد. این رفتار فصلی را می‌توان نتیجه برهم‌کنش عوامل متعددی نظیر افزایش دمای هوا، کاهش تراز آب، تشدید فعالیت‌های زیستی، افزایش بازتعلیق رسوبات کف در شرایط کم‌عمق و تأثیر ورودی‌های سطحی از حوزه آبریز دانست. از منظر مکانی نیز، تمرکز مقادیر بالاتر کدورت در نواحی حاشیه‌ای و کم‌عمق دریاچه در مقایسه با بخش‌های مرکزی، بیان‌گر نقش کلیدی ویژگی‌های مورفولوژیکی و هیدرودینامیکی در کنترل توزیع ذرات معلق و کیفیت آب در این اکوسیستم آبی است.

در میان شاخص‌های طیفی ارزیابی‌شده، شاخص تفاضل نرمال‌شده کدورت (NDTI) بهترین عملکرد را در تمامی فصول نشان داد. مقادیر بالای ضریب تبیین R^2 (۰/۷۶ تا ۰/۸۹) و مقادیر پایین RMSE (۰/۰۴۱۳ تا ۰/۰۵۳۳) NUT حاکی از توان بالای این شاخص در تبیین تغییرات واقعی کدورت و تطابق مناسب با داده‌های میدانی است. برتری NDTI را می‌توان به حساسیت بالای آن نسبت به تغییرات بازتابندگی باند قرمز در حضور ذرات معلق و پایداری نسبی آن در برابر اثرات جذب کلروفیل نسبت داد. نتایج به‌دست‌آمده با گزارش‌های منتشرشده در پژوهش‌های پیشین، به‌ویژه مطالعات (Dewantoro et al., 2024; Mishra et al., Bid et al., 2019; Latwal et al., 2025) تطابق قابل توجهی نشان می‌دهد. این ویژگی سبب شده است که NDTI حتی در شرایطی که سهم مؤلفه‌های زیستی در کدورت افزایش می‌یابد، همچنان رفتار منسجم و قابل اتکایی از خود نشان دهد.

در مقابل، شاخص‌های TurbBow و TurbLath اگرچه توانایی مناسبی در بازنمایی الگوهای کلی مکانی-زمانی کدورت در بعضی از ماه‌ها داشتند، اما از نظر دقت کمی و پایداری آماری، عملکرد ضعیف‌تری نسبت به NDTI نشان دادند. شاخص TurbChip نیز به دلیل نوسانات بیش‌تر و حساسیت متفاوت به ترکیب اپتیکی (ترکیب

اپتیکی آب بیان‌گر ماهیت، غلظت و برهم‌کنش اجزای نوری فعال موجود در ستون آب، شامل ذرات معلق معدنی و آلی، فیتوپلانکتون‌ها و مواد آلی محلول رنگی است که از طریق فرآیندهای جذب، پراکنش و بازتاب نور، ویژگی‌های طیفی ثبت‌شده توسط سنجنده‌های سنجش‌ازدور را کنترل می‌کنند) آب، کم‌ترین دقت را در برآورد کدورت ارائه کرد و استفاده از آن به‌عنوان شاخص اصلی پایش کدورت در دریاچه زریبار توصیه نمی‌شود، هرچند می‌تواند به‌عنوان شاخص مکمل در تحلیل‌های چندشاخصه مورد توجه قرار گیرد.

به‌طور کلی، نتایج این پژوهش نشان می‌دهد که داده‌های ماهواره‌ای سنتینل-۲ در ترکیب با شاخص‌های طیفی مناسب، به‌ویژه شاخص NDTI، قابلیت بالایی در پایش غیرتماسی، کم‌هزینه و پیوسته کدورت آب دریاچه‌های کم‌عمق دارند. این رویکرد می‌تواند به‌عنوان ابزاری کارآمد در پایش بلندمدت کیفیت آب، شناسایی نواحی بحرانی، ارزیابی اثرات فعالیت‌های انسانی و پشتیبانی از تصمیم‌گیری‌های مدیریتی و حفاظتی مورد استفاده قرار گیرد. به‌کارگیری این روش در برنامه‌های مدیریت پایدار دریاچه زریبار، می‌تواند نقش مؤثری در حفظ کیفیت اکولوژیکی این پهنه آبی ارزشمند و کاهش مخاطرات زیست‌محیطی ناشی از افزایش کدورت ایفا نماید. همچنین پیشنهاد می‌شود در مطالعات آتی، با افزایش تعداد نمونه‌های میدانی، استفاده از مدل‌های غیرخطی و الگوریتم‌های یادگیری ماشین، و بررسی هم‌زمان سایر پارامترهای کیفی آب، دقت و جامعیت پایش سنجش‌ازدوری کیفیت آب در این دریاچه بیش از پیش ارتقا یابد.

تقدیر و تشکر

نویسندگان این مقاله با کمال احترام و قدردانی، زحمات صادقانه و ارزشمند جناب آقای مهندس حمیدی، کارشناس وقت گروه علوم و مهندسی آب، را ارج می‌نهند. تلاش‌های بی‌وقفه ایشان در جمع‌آوری نمونه‌ها و اجرای دقیق آزمایش‌های کیفیت آب در آزمایشگاه با دستگاه کدورت‌سنج، نقش بسزایی در صحت و دقت نتایج پژوهش ایفا کرده و بدون همکاری ایشان، انجام این مطالعه میسر نمی‌شد. از همراهی، دقت و تعهد ایشان صمیمانه سپاس‌گزاریم.

منابع

باقری، س. و حقیقی، پ. ۱۳۹۹. تحلیل پارامترهای کیفی آب‌های سطحی (مطالعه موردی: حوزه بندرعباس - سدیج). فصلنامه آماد و فناوری دفاعی ۳(۲): ۷۷-۹۶.

دالوند، ف. و طهماسبی، پ. ۱۴۰۴. پایش منابع آلاینده آب دریاچه‌ها با استفاده از تکنیک سنجش‌ازدور (مطالعه موردی: دریاچه زریبار)، مجله کاربرد سامانه اطلاعات جغرافیایی و

- forecasting using machine learning framework with dimension reduction and hyperspectral data. *Environmental Research*. 262: 119823.
- Lacaux, J. P., Tourre, Y. M., Vignolles, C., Ndione, J. A. and Lafaye, M. 2007. Classification of ponds from high-spatial resolution remote sensing: Application to Rift Valley Fever epidemics in Senegal. *Remote sensing of environment*. 106(1): 66-74.
- Landry, B. 1977. EYE IN THE SKY: INTRODUCTION TO REMOTE SENSING (Author: Dorothy Harper). McGill Journal of Education/Revue des sciences de l'éducation de McGill. 12(001).
- Latwal, A., Rehana, S. and Rajan, K. S. 2025. Spatiotemporal analysis of Turbidity in Tropical Reservoirs using Sentinel-2 Satellite Imagery under Catchment Dynamics. *Remote Sensing Applications: Society and Environment*. 101631.
- 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.
- Mishra, K., Choudhary, B. and Fitzsimmons, K. E. 2024. Predicting and evaluating seasonal water turbidity in Lake Balkhash, Kazakhstan, using remote sensing and GIS. *Frontiers in Environmental Science*, 12:1371759.
- Mishra, R. K. 2023. Fresh water availability and its global challenge. *British Journal of Multidisciplinary and Advanced Studies*. 4(3): 1-78.
- Poddar, S., Chacko, N. and 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.
- Robel, R. J. 1961. Water depth and turbidity in relation to growth of sago pondweed. *The Journal of Wildlife Management*. 25(4): 436-438.
- Steel, R. G. D., & Torrie, J. H. (1960). Principles and procedures of statistics.
- Wetzel, R. G. 2001. Limnology: lake and river ecosystems. Gulf professional publishing.
- World Health Organization. 2022. Guidelines for drinking-water quality: incorporating the first and second addenda. World Health Organization.
- Yang, Z., Li, F., Shen, S., Wang, X., Nihmot Ibrahim, A., Zheng, H. and Zhang, Y. 2025. Natural chlorophyll: A review of analysis methods, health benefits, and stabilization strategies. *Critical Reviews in Food Science and Nutrition*. 65(16): 3069-3083.
- سنجش‌ازدور در برنامه‌ریزی. (۱۵(۴): ۷۱-۸۶.
- طهماسبی، پ.، بیگلری قلدره، س.، بشتامیان، س. م.، ح.، س. و گل- محمدی قانع، پ.، (۱۴۰۳). مقایسه تصاویر ماهواره‌های لندست- ۸ و سنتینل- ۲ جهت تخمین میزان کلروفیل-آ دریاچه زریبار. فصلنامه علوم محیطی، (۴)۲۲: ۵۷۱-۵۸۴.
- طهماسبی، پ.، ۱۴۰۳. اصول مدیریت منابع آب. انتشارات قلم محقق، صفحه ۱-۳.
- Al-Areeq, A. M., Abba, S. I., Yassin, M. A., Benaafi, M., Ghaleb, M. and Aljundi, I. H. 2022. Computational machine learning approach for flood susceptibility assessment integrated with remote sensing and GIS techniques from Jeddah, Saudi Arabia. *Remote Sensing*. 14(21): 5515.
- Ali, N. S., Kalash, K. R., Ahmed, A. N. and Albayati, T. M. 2022. Performance of a solar photocatalysis reactor as pretreatment for wastewater via UV, UV/TiO₂, and UV/H₂O₂ to control membrane fouling. *Scientific Reports*. 12(1): 16782.
- Bagwan, W. A. and Gavali, R. S. 2021. Delineating changes in soil erosion risk zones using RUSLE model based on confusion matrix for the Urmodi river watershed, Maharashtra, India. *Modeling Earth Systems and Environment*. 7(3): 2113-2126.
- Beck, R., Xu, M., Zhan, S., Johansen, R., Liu, H., Tong, S. and Huang, Y. 2019. Comparison of satellite reflectance algorithms for estimating turbidity and cyanobacterial concentrations in productive freshwaters using hyperspectral aircraft imagery and dense coincident surface observations. *Journal of Great Lakes Research*. 45(3): 413-433.
- Bid, S. and Siddique, G. 2019. Identification of seasonal variation of water turbidity using NDTI method in Panchet Hill Dam, India. *Modeling Earth Systems and Environment*. 5(4): 1179-1200.
- Damania, R., Desbureaux, S., Rodella, A. S., Russ, J. and Zaveri, E. 2019. Quality unknown: the invisible water crisis. World Bank Publications.
- Dewantoro, M. D. R., Ulfa, M. and Supatmanto, B. D. 2024. Water Turbidity Mapping Using Sentinel-2A Imagery and Cloud Based Google Earth Engine in Saguling Reservoir. In IOP Conference Series: Earth and Environmental Science. 1343(1): 012027. IOP Publishing.
- Gupta, S. and Gupta, S. 2025. Time series forecasting of chlorophyll-a concentrations in the Chesapeake Bay. *Scientific Reports*. 15(1): 30877.
- Hecht, T. and Van der Lingen, C. D. 1992. Turbidity-induced changes in feeding strategies of fish in estuaries. *African Zoology*. 27(3): 95-107.
- Kim, D., Lee, K., Jeong, S., Song, M., Kim, B., Park, J. and Heo, T. Y. 2024. Real-time chlorophyll-a

Evaluation and Comparison of Spectral Turbidity Indices for Zarivar Lake Using Remote Sensing Techniques

P. Tahmasebi^{1*}; A. Moghadamnia²; H. Ghadrshnas³

Recived: Jan.06, 2026

Accepted: May.05, 2026

Abstract

Water turbidity, as one of the most important physical indicators of water quality, plays a crucial role in ecological dynamics, light penetration, and the health of aquatic ecosystems. Zarivar Lake in Marivan, recognized as the largest natural freshwater lake in Iran, has experienced considerable water quality fluctuations in recent years due to increasing anthropogenic pressures and hydroclimatic changes. Therefore, accurate and continuous monitoring of water turbidity in this aquatic system is of great importance. The present study aimed to evaluate and compare the performance of various spectral indices for estimating water turbidity in Zarivar Lake using Sentinel-2 satellite imagery on a seasonal scale during 2019. For this purpose, four spectral indices including NDTI, TurbBow, TurbChip, and TurbLath were extracted from Sentinel-2 images after applying radiometric and geometric corrections. Field-measured turbidity data collected from 15 sampling stations were used as reference data for the calibration and validation of linear regression models. Model performance was assessed using the coefficient of determination (R^2) and the root mean square error (RMSE). The results indicated that the NDTI index exhibited the highest explanatory power for turbidity variations (R^2 ranging from 0.76 to 0.89) and the lowest prediction error (RMSE ranging from 0.00413 to 0.00533 NTU) across all selected seasons, outperforming the other indices. Furthermore, the spatiotemporal patterns of turbidity revealed a significant increase during warm seasons, particularly in the marginal zones of the lake, and lower values during cold seasons and in the central parts of the lake. Overall, the findings demonstrate that the integration of the NDTI index with Sentinel-2 data provides a reliable, cost-effective, and efficient approach for spatiotemporal monitoring of water turbidity in shallow lakes and can serve as a robust scientific basis for sustainable management, environmental conservation, and decision-making processes concerning Zarivar Lake.

Keywords: Marivan, Remote sensing, Sentinel-2, turbidity, water quality monitoring

1- Ph.D. Student, Department of Water Science and Engineering, Faculty of Agriculture, Bu-Ali Sina University, Hamedan, Iran

2- MS.c graduated of Irrigation and Drainage, Department of Water Sciences and Engineering, Faculty of Agriculture, University of Kurdistan, Sanandaj, Iran

3- MS.c graduated of Irrigation and Drainage, Department of Water Sciences and Engineering, Faculty of Agriculture, University of Kurdistan, Sanandaj, Iran

(*- Corresponding Author Email: p.tahmasebi@agr.basu.ac.ir)