ارزیابی پارامترهای کیفیت آب و رسوبات معلق در سواحل خوزستان با استفاده از داده‌های ماهواره‌ای MODIS

هیوا علمیزاده[1*]
خسرو فاضل‌پور[2]

۱. گروه زمین‌شناسی دریا، دانشگاه علوم و فنون دریایی خرمشهر، ایران.
۲. گروه بوم‌شناسی و اقلیم، دانشکده علوم محیطی، دانشگاه یوکلید، اسپانیا.

* **نویسنده مسئول مکاتبات**
Elmizadeh@kmsu.ac.ir

تاریخ دریافت: ۱۴۰۳/۰۳/۱۲
تاریخ پذیرش: ۱۴۰۵/۰۳/۱۰

این مقاله برگرفته از طرح تحقیقاتی است.

چکیده

پایش کیفیت آب و رسوبات معلق در اکوسیستم‌های ساحلی حساسی مانند خلیج‌فارس، برای ارزیابی سلامت اکولوژیک و مدیریت پایدار آن ضروری است. این مطالعه با هدف ارائه یک تحلیل یکپارچه از پارامترهای کلیدی کیفیت آب و رسوبات معلق در سواحل خوزستان، واقع در شمال‌غربی خلیج‌فارس، با استفاده از داده‌های سنجنده‌ی MODIS انجام شد. پارامترهای مورد بررسی شامل شفافیت آب با استفاده از عمق دیسک سشی (Secchi Disk Depth یا SDD)، شوری سطح دریا (Sea Surface Salinity یا SSS)، دمای سطح آب (Sea Surface Temperature یا SST)، غلظت کلروفیل-a، کدورت و غلظت مواد جامد معلق (Total Suspended Solids یا TSS) بودند. داده‌های MODIS با کدنویسی در محیط نرم-افزار MATLAB پردازش و پس از اعمال تصحیحات هندسی و اتمسفری، با استفاده از الگوریتم‌های مختلف وارونسازی (نیمه‌تحلیلی و تجربی) تجزیه‌وتحلیل شدند و صحت‌سنجی نتایج با داده‌های میدانی انجام گرفت. ارزیابی دقت الگوریتم‌های برآورد SDD نشان داد که الگوریتم تجربی (EMP) با بیشترین ضریب تعیین (۰.۸۶ = R^2) و کمترین خطا (متر ۰/۹۲ =RMSE) بهترین عملکرد را داشت. بااین‌حال، مزایای الگوریتم‌های نیمه‌تحلیلی (SA) و الگوریتم شبه‌تحلیلی (Quasi-Analytical Algorithm یا QAA) ازلحاظ استقلال از داده‌های میدانی و قابلیت تعمیم‌پذیری نیز مورد بحث قرار گرفت. برآورد سایر پارامترها نیز با دقت قابل قبولی همراه بود؛ به‌طوری‌که شوری سطح دریا با بالاترین دقت (۰/۸۹ = R^2 و ۰/۶۸ = RMSE) برآورد گردید. در مورد رسوبات معلق، یک مدل رگرسیون ترکیبی با بهره‌گیری هم‌زمان از باندهای با قدرت تفکیک ۲۵۰ و ۵۰۰ متری MODIS، بهترین برآورد غلظت مواد جامد معلق (SS) را با ۰/۸۲= R^2 ارائه داد. این مطالعه کارایی و قابلیت اطمینان تکنیک سنجش از دور را به‌عنوان ابزاری کارآمد، مقرون‌به‌صرفه و با پوشش مکانی-زمانی گسترده برای پایش یکپارچه و مستمر سلامت اکولوژیک سواحل خوزستان تأیید می‌کند و لزوم مدیریت مؤثر حوضه‌های آبریز رودخانه‌های ورودی را خاطرنشان می‌سازد.

واژگان کلیدی: سنجش از دور، پایش کیفیت آب، شفافیت آب، محیط ساحلی پیچیده، وارونسازی، خلیج‌فارس.

مقدمه

اکوسیستم‌های ساحلی، به‌عنوان مناطق گذر بین خشکی و دریا، از غنی‌ترین و درعین‌حال آسیب‌پذیرترین محیط‌های کره زمین محسوب می‌شوند (Gall *et al*., 2022; Xue *et al*., 2024). این زیست‌بوم‌ها با فراهم آوردن خدمات ارزشمندی همچون تصفیه آب، حفاظت ساحل، تأمین منابع غذایی و ذخیره‌گاه تنوع زیستی، نقشی حیاتی در معیشت و اقتصاد جوامع انسانی ایفا می‌کنند (Wu *et al*., 2025; Nandy *et al*., 2024). خلیج‌فارس، به‌عنوان یک دریای نیمه‌بسته و کم‌عمق در منطقه‌ای با اقلیم خشک، نمونه‌ای بارز از چنین اکوسیستم حساسی است. ویژگی‌های منحصربه‌فردی همچون نرخ تبخیر بالا، گردش آب محدود و فشار فزاینده فعالیت‌های انسانی (شامل توسعه صنعتی، شهری، کشاورزی و تراکم ترافیک دریایی)، این حوضه آبی را در معرض تنش‌های محیطی شدیدی قرار داده است (Ghaemi *et al*., 2022; Kabiri *et al*., 2022; Abedini *et al*., 2025).

[Downloaded from jweb.ahvaz.iau.ir on 2026-11-11]

کیفیت آب پارامتری تعیین‌کننده در سلامت، تاب‌آوری و کارکرد اکولوژیک این محیط‌هاست. در میان شاخص‌های متعدد کیفیت آب، پارامترهایی چون شفافیت (با استفاده از عمق سشی دیسک یا SDD)، غلظت کلروفیل-a (شاخصی از تراکم فیتوپلانکتون‌ها)، کدورت، دمای سطح آب (Sea Surface Temperature-SST)، شوری سطح دریا (Sea Surface Salinity-SSS) و غلظت کل مواد معلق (Suspended Solids-SS / Total Suspended Solids-TSS) در پایش کیفیت آب از جایگاه ویژه‌ای برخوردارند (Katlane *et al*., 2023; Merder *et al*., 2024; Shao *et al*., 2024). این پارامترها نه‌تنها به‌طور مستقیم بر زنجیره غذایی دریایی (از تولیدکنندگان اولیه تا ماهیان) تأثیر می‌گذارند، بلکه شاخصی غیرمستقیم از فرآیندهای کلیدی مانند ورود رسوبات و مواد مغذی از حوضه‌های آبریز، وقوع شکوفایی‌های جلبکی و اختلاط آب‌ها نیز محسوب می‌شوند. برای مثال، کاهش شفافیت ناشی از ورود رسوبات معلق، عمق منطقه فتوتیک را محدود کرده و می‌تواند با کاهش نرخ فتوسنتز، تولید اولیه و درنتیجه کل اکوسیستم را تحت تأثیر قرار دهد (Katlane *et al*., 2023; Kabiri, 2023; Sukkuea *et al*., 2025). از سوی دیگر، افزایش هم‌زمان مواد مغذی و رسوبات می‌تولند به اوتریفیکاسیون (Eutrophication) و شکوفایی جلبکی منجر شود که پیامدهای مخربی چون کم‌اکسیژنی و مرگ‌ومیر آبزیان را در پی دارد؛ بنابراین، پایش هم‌زمان و یکپارچه این پارامترها، درک جامعی از وضعیت سلامت اکوسیستم ساحلی و شناسایی منابع فشار وارد بر آن را ممکن می‌سازد (Wu *et al*., 2022; Román, 2022).

روش‌های متداول پایش کیفیت آب، مبتنی بر نمونه‌برداری میدانی نقطه‌ای و آنالیزهای آزمایشگاهی است. اگرچه این روش‌ها از دقت تحلیلی بالایی برخوردارند، اما با محدودیت‌های ذاتی چون پوشش مکانی و زمانی ناکافی، هزینه‌بر و زمان‌بر بودن و دشواری دسترسی به تمامی نقاط (به‌ویژه در مناطق وسیع و صعب‌العبور) مواجه هستند. این محدودیت‌ها به‌ویژه برای پایش پویایی‌های سریع و در مقیاس کلان اکوسیستم‌های ساحلی مانند خلیج‌فارس، چالشی جدی به شمار می‌روند (Xue *et al*., 2024; Kabiri and Moradi, 2023; Mushtaq *et al*., 2025). در این راستا، فناوری سنجش از دور ماهواره‌ای به‌عنوان مکملی کارآمد و انقلابی برای روش‌های سنتی مطرح شده است. این فناوری با فراهم آوردن داده‌هایی با پوشش مکانی وسیع، تکرار زمانی بالا و قابلیت دسترسی تاریخی، امکان ردیابی تغییرات محیطی در مقیاس‌های مختلف مکانی و زمانی را فراهم می‌کند (Schaeffer *et al*., 2023; Masoud, 2022; Fettweis *et al*., 2023). در میان سنجنده‌های متعدد، سنجنده MODIS، به دلیل دارا بودن باندهای طیفی متعدد در محدوده مرئی و مادون‌قرمز، تفکیک‌پذیری زمانی روزانه و دسترسی آزاد به داده‌ها، به‌طور گسترده‌ای در مطالعات آب‌شناسی ساحلی و اقیانوسی مورد استفاده قرار گرفته است (Abegaz *et al*., 2023; Rocha *et al*., 2024; Dilipkumar and Shanmugam, 2023).

با وجود پیشینه قابل‌توجه در استفاده از سنجش از دور برای برآورد جداگانه پارامترهای کیفیت آب در خلیج‌فارس و دیگر نقاط جهان (Evans *et al*., 2025; Son *et al*., 2025)، شکاف پژوهشی آشکاری در زمینه تحلیل یکپارچه و هم‌زمان چندین پارامتر کلیدی و بررسی روابط متقابل آن‌ها در پاسخ به یک محرک محیطی مشترک (مانند ورود رواناب‌های حاوی رسوب) احساس می‌شود. اکثر مطالعات پیشین متمرکز بر یک یا دو پارامتر (مانند کلروفیل یا دمای سطح آب) بوده‌اند و ارزیابی جامعی که ارتباط بین شفافیت، رسوبات معلق، مواد مغذی (با پروکسی کلروفیل) و خصوصیات فیزیکی آب را در کنار هم و در یک چارچوب اکولوژیک بررسی کند، محدود است. به‌علاوه، ارزیابی مقایسه‌ای و بحث در مورد مزایا و معایب الگوریتم‌های مختلف وارونسازی (تجربی در مقابل نیمه‌تحلیلی) برای پارامترهایی مانند SDD در آب‌های پیچیده ساحلی خلیج‌فارس نیاز به توجه بیشتری دارد. پر کردن این شکاف‌ها برای تدوین الگوهای دقیق‌تر از تأثیر فعالیت‌های انسانی و طبیعی بر سلامت سواحل و ارائه راهکارهای مدیریتی مؤثر، ضروری به نظر می‌رسد.

هدف اصلی این مطالعه، توسعه و اجرای یک چارچوب مبتنی بر سنجش از دور برای ارزیابی یکپارچه سلامت اکولوژیک سواحل خوزستان است که پاسخگوی شکاف موجود در پایش هم‌زمان چندین پارامتر کلیدی و ارزیابی الگوریتم‌ها در محیط پیچیده این منطقه باشد. بر این اساس، اهداف این پژوهش به شرح زیر تعریف می‌شوند: نخست، ارزیابی و مقایسه عملکرد الگوریتم‌های وارونسازی تجربی و نیمه‌تحلیلی در برآورد دقیق عمق سشی دیسک (SDD). دوم، برآورد پارامترهای فیزیکی و زیستی کلیدی شامل شوری سطح دریا (SSS)، دمای سطح آب (SST)، کلروفیل-a و کدورت و اعتبارسنجی آن‌ها با داده‌های زمینی. سوم، توسعه یک مدل بهینه برای تخمین غلظت

[Downloaded from jweb.ahvaz.iau.ir on 2026-11-11]

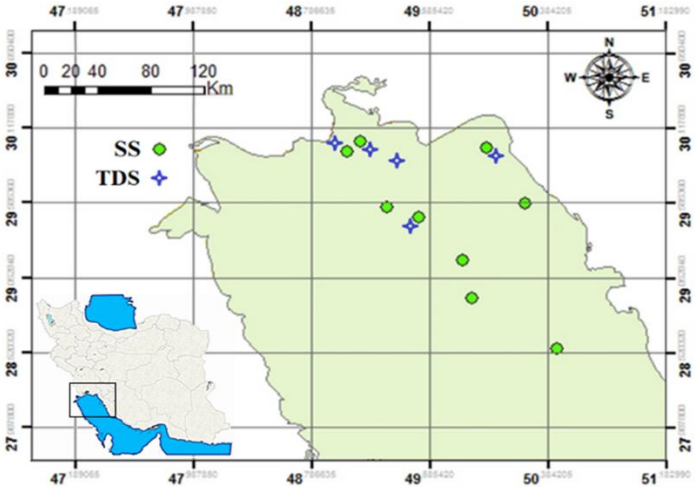
رسوبات معلق با استفاده از قابلیت‌های طیفی سنجنده MODIS. درنهایت، این تحقیق در پی آن است تا با تلفیق یافته‌های حاصل از این پارامترها، بینشی در مورد وضعیت سلامت محیط ساحلی ارائه دهد و کاربرد عملیاتی سنجش از دور را به‌عنوان ابزاری کارآمد برای پایش مستمر و مدیریت یکپارچه نواحی ساحلی خلیج‌فارس مورد تأکید قرار دهد.

نوآوری این تحقیق در رویکرد ترکیبی و یکپارچه‌گرایانه آن نهفته است. این مطالعه صرفاً به ارائه یک الگوریتم یا نقشه محدود نمی‌شود، بلکه با تلفیق نتایج چندین شاخص مکمل، تأثیر فرآیندهای حوضه آبریز (ورود رسوب و مواد مغذی) بر محیط دریایی ساحلی را بررسی می‌کند. مقایسه سیستماتیک الگوریتم‌های SDD و ارائه مدل بهینه برای رسوبات معلق در منطقه، ارزش کاربردی و روش‌شناختی کار را افزایش می‌دهد. درنهایت، این پژوهش چارچوبی عملیاتی مبتنی بر داده‌های ماهواره‌ای (MODIS) برای پایش مستمر و مقرون‌به‌صرفه سلامت اکوسیستم‌های ساحلی خلیج‌فارس ارائه می‌دهد که می‌تواند به‌عنوان ابزاری قدرتمند در اختیار مدیران و تصمیم‌گیرندگان حوزه محیط‌زیست دریایی قرار گیرد.

مواد و روش‌ها

منطقه مورد مطالعه

این مطالعه در سواحل خوزستان واقع در شمال غربی خلیج‌فارس انجام شده است (شکل ۱). این منطقه ساحلی به دلیل دارا بودن زیست‌بوم‌های متنوع ساحلی، فعالیت‌های شیلاتی، قرارگیری در معرض ورود رواناب‌های اصلی حوضه‌های آبریز جنوب زاگرس و نیز تأثیرپذیری از ورود پساب‌های کشاورزی و رسوبات رودخانه‌ای از اهمیت اکولوژیک بالایی و پویایی رسوبی و زیست‌شناختی بالایی برخوردار است. رودخانه‌های ورودی به این ناحیه، حجم قابل‌توجهی از آب شیرین، رسوبات معلق و مواد مغذی را به خلیج‌فارس تخلیه می‌کنند. سایر مسیل‌ها و رودخانه‌های فصلی کوچک‌تر نیز در فصول بارانی نقش قابل‌توجهی در تغذیه رسوبی ساحل ایفا می‌کنند. این منطقه از نظر اکولوژیک یک محیط ساحلی-دریایی پیچیده محسوب می‌شود که در آن خواص نوری آب نه‌تنها تحت تأثیر فیتوپلانکتون، بلکه به‌شدت متأثر از مواد معدنی معلق (رسوبات) و مواد رنگ‌دانه‌دار محلول (CDOM) است. این ویژگی، وارونسازی پارامترهای کیفی آب را با چالش مواجه می‌سازد. انتخاب این منطقه به دلیل حساسیت اکولوژیک، تأثیرپذیری بالا از فعالیت‌های زمین‌پایه و همچنین ضرورت پایش مستمر برای مدیریت منابع دریایی بوده است.



شکل ۱: موقعیت نقاط نمونه‌برداری محدوده مورد مطالعه.

[Downloaded from jweb.ahvaz.iau.ir on 2026-11-11]

داده‌های ماهواره‌ای و میدانی

داده‌های اصلی این پژوهش شامل تصاویر سطح ۱ (L1B) سنجنده MODIS نصب‌شده بر روی ماهواره‌های Aqua و Terra بود که از سامانه LAADS مرکز ناسا دریافت شدند. معیار اصلی انتخاب تصاویر، هم‌زمانی یا نزدیک‌ترین زمان ممکن به تاریخ نمونه‌برداری‌های میدانی در سه مجموعه داده شامل داده‌های عمق سشی دیسک (SDD)، داده‌های پارامترهای فیزیکی- شیمیایی آب و داده‌های رسوبات معلق (SS/TSS)، مربوط به اسفند ۱۴۰۱ (۲۰۲۲ میلادی) بود. همچنین، تصاویری با حداقل پوشش ابری (کمتر از ۱۰ درصد) بر روی منطقه مورد مطالعه انتخاب شدند.

برای کالیبراسیون و اعتبارسنجی نتایج ماهواره‌ای، از سه مجموعه داده میدانی استفاده شد. داده‌های عمق سشی دیسک شامل ۶۵ اندازه‌گیری در ۶ ایستگاه ساحلی در سال ۲۰۲۲ بود که توسط سازمان شیلات ایران برداشت شده بود. علاوه بر این، داده‌های پروفیل عمقی دما، شوری، کلروفیل-a و کدورت با استفاده از دستگاه CTD مدل Ocean Seven-316 در ۱۳ ترانسکت و ۲۶ ایستگاه جمع‌آوری شدند. داده‌های رسوبات معلق نیز شامل اندازه‌گیری مواد جامد معلق (SS) و کل مواد معلق (TSS) در نقاط مختلف ساحلی استان خوزستان بود (جدول ۱).

جدول ۱: مشخصات داده‌های مورد استفاده در پژوهش

نوع داده	پارامتر	واحد اندازه‌گیری	تفکیک‌پذیری مکانی	کاربرد در پژوهش	منبع داده
ماهواره‌ای	بازتاب طیفی(Rrs)	sr^{-1}	۱ کیلومتر	استخراجSDD ، Chl-a، کدورت، SSS، SS/TSS	MODIS Aqua/Terra (L1B)
ماهواره‌ای	دمای روشنایی (T31, T32)	کلوین	۱ کیلومتر	برآوردSST	MODIS Aqua/Terra
میدانی	عمق سشی دیسک (SDD)	متر	نقطه‌ای	کالیبراسیون و اعتبارسنجی الگوریتم‌ها	سازمان شیلات ایران
میدانی	دما	°C	نقطه‌ای	اعتبارسنجیSST	CTD (Ocean Seven-316)
میدانی	شوری	PSU	نقطه‌ای	کالیبراسیون مدلSSS	CTD
میدانی	کلروفیل a-	µg/L	نقطه‌ای	اعتبارسنجی الگوریتم‌های OC2/OC3	CTD
میدانی	کدورت	NTU	نقطه‌ای	ارزیابی الگوریتم کدورت	CTD
میدانی	SS / TSS	mg/L	نقطه‌ای	کالیبراسیون مدل‌های رگرسیونی	نمونه‌برداری آزمایشگاهی

روش کار

پیش‌پردازش تصاویر ماهواره‌ای: کلیه مراحل پیش‌پردازش و پردازش تصاویر در محیط نرم‌افزار MATLAB (نسخه R2021a) و به‌صورت کدنویسی انجام شد. مراحل اصلی شامل:

خواندن تصاویر با فرمت HDF،

تصحیح هندسی با استفاده از داده‌های موقعیت‌نگاری همراه تصویر،

تصحیح رادیومتریک و تبدیل مقادیر دیجیتال به رادیانس و سپس بازتاب در سطح سنجنده،

تصحیح اتمسفری با استفاده از الگوریتم DOS برای باندهای مرئی و مادون‌قرمز نزدیک (Shao *et al*., 2024)،

اعمال ماسک خشکی، ابر و پیکسل‌های غیرآبی، با استفاده از آستانه‌گذاری در باندهای مادون‌قرمز حرارتی و مرئی،

تبدیل بازتاب سطحی به بازتاب زیرسطحی (Rrs) برای الگوریتم‌های نیازمند این پارامتر.

خروجی این مرحله، ماتریس‌های جغرافیایی‌شده (Georeferenced Arrays) بازتاب و دمای روشنایی برای باندهای مورد نیاز بود.

هم‌خطی‌سازی داده‌های ماهواره‌ای و میدانی: به‌منظور مقایسه صحیح داده‌های میدانی و ماهواره‌ای، هم‌خطی‌سازی زمانی—مکانی انجام شد. برای هر ایستگاه میدانی، مقدار متناظر ماهواره‌ای به‌صورت میانگین پیکسل‌های همسایه در شعاع یک پیکسل (مطابق با خطای

[Downloaded from jweb.ahvaz.iau.ir on 2026-11-11]

موقعیت‌یابی) استخراج شد. در مورد داده‌های CTD، تنها مقادیر مربوط به لایه سطحی آب (عمق ۰ تا ۱ متر) با داده‌های ماهواره‌ای مقایسه گردید.

تحلیل آماری و ارزیابی دقت: دقت کلیه پارامترهای استخراج‌شده با استفاده از شاخص‌های آماری ضریب تعیین (R^2)، جذر میانگین مربعات خطا (RMSE) و میانگین خطای مطلق (MAE) و در مقایسه با داده‌های میدانی ارزیابی شد. همچنین، برای بررسی معناداری آماری مدل‌های رگرسیونی از تحلیل واریانس (ANOVA) و مقدار p-value استفاده گردید.

داده‌های میدانی و هم‌خطی‌سازی: برای اعتبارسنجی و کالیبراسیون نتایج حاصل از تصاویر ماهواره‌ای، از سه مجموعه داده میدانی مختلف استفاده شد:

الگوریتم‌های وارونسازی و استخراج پارامترها: از الگوریتم‌های مختلفی برای استخراج هر پارامتر از داده‌های بازتابی یا حرارتی MODIS استفاده شد. تمامی این الگوریتم‌ها در محیط MATLAB پیاده‌سازی شدند.

عمق سشی دیسک (SDD): در این رابطه سه رویکرد اصلی مورد ارزیابی قرار گرفت:

الگوریتم شبه‌تحلیلی (QAA-V5): این الگوریتم استاندارد، با دریافت Rrs در بلندهای ۴۴۳، ۴۹۰، ۵۵۵ و ۶۷۰ نانومتر، ابتدا ضریب پس‌پراکندگی کل (b_b) و ضریب جذب کل (a) در ۵۵۵ نانومتر را محاسبه کرده و سپس با یک سری روابط مرحله‌ای، این ضرایب را به طول‌موج ۴۹۰ نانومتر برمی‌گرداند. در نهایت، ضریب تضعیف پرتو (K_d) در ۴۹۰ نانومتر از (معادله ۱) تخمین زده شد (Cao *et al*., 2024; Najah *et al*., 2021).

$$Kd(490) \approx 1.5 \times a(490) \quad \text{(معادله ۱)}$$

سپس با استفاده از معادله تجربی (معادله ۲) عمق سشی دیسک برآورد گردید (Shi *et al*., 2024; Sahoo *et al*., 2023).

$$ZSD \approx 1.7/Kd(490) \quad \text{(معادله ۲)}$$

الگوریتم نیمه‌تحلیلی (SA): این الگوریتم مستقیماً از بازتاب زیرسطحی در دو باند ۴۹۰ و ۵۶۰ نانومتر برای محاسبه a(490) و b_b(490) استفاده می‌کند. سپس K_d(490) از معادله دقیق‌تر (معادله ۳) محاسبه شده و در نهایت Z_{SD} با در نظر گرفتن ضریب کنتراست از (معادله ۴) به دست آمد (Zhu *et al*., 2022; Hafeez, 2022; Smith *et al*., 2025).

$$Kd(490) = (1 + 0.005\theta s)a(490) + 4.18(1 - 0.52e - 10.8a(490))bb(490) \quad \text{(معادله ۳)}$$

$$ZSD = \gamma 0 Kd(V) + C(V) \quad \text{(معادله ۴)}$$

الگوریتم تجربی (EMP): این الگوریتم که برای آب‌های ساحلی و کدر توسعه یافته، یک معادله رگرسیونی مستقیم (معادله ۵) بین نسبت بازتاب در باندهای ۴۹۰ و ۵۶۰ نانومتر با عمق سشی دیسک ایجاد می‌کند (Magri, 2023; Li *et al*., 2024; Carrea *et al*., 2023):

$$ZSD = 1.888\gamma 0(R(0-,490)R(0-,560) - 0.52) \quad \text{(معادله ۵)}$$

دمای سطح دریا (SST): برای محاسبه SST از الگوریتم جهانی MCSST (Multi-Channel Sea Surface Temperature) استفاده شد که یک الگوریتم شکاف پنجره (Split-Window) است. این الگوریتم با استفاده از تفاوت جذب بخار آب در دو باند حرارتی ۱۱ و ۱۲ میکرومتر (باندهای ۳۱ و ۳۲ MODIS)، اثر جو را تصحیح می‌کند (Liu, 2024; Ho, 2023; Sun *et al.*, 2025). معادله کلی به این شکل است (معادله ۶):

$$SST = C1 + C2 \times T31 + C3 \times (T31 - T32) + C4 \times (\sec(\theta) - 1) \times (T31 - T32) \quad \text{(معادله ۶)}$$

که در آن T_{31} و T_{32} دمای روشنایی باندهای ۳۱ و ۳۲، θ زاویه زنیت دید و C_1 تا C_4 ضرایب ثابت الگوریتم هستند. ضرایب بر اساس شرایط جو (میزان اختلاف دمای دو باند) از جداول استاندارد ناسا انتخاب شدند.

[Downloaded from jweb.ahvaz.iau.ir on 2026-11-11]

کلروفیل-a (Chl-a) : برای برآورد غلظت کلروفیل-a از دو الگوریتم تجربی استاندارد شامل الگوریتم OC3 (Li *et al.*, 2024; Chen, 2024; Quevedo-Castro *et al.*, 2025) (معادله ۷) و الگوریتم OC2 (معادله ۸) که بر اساس نسبت باندهای آبی به سبز کار می‌کنند، استفاده شد. خروجی این الگوریتم‌ها بر حسب میکروگرم بر لیتر است (Rego *et al.*, 2024; Styles *et al.*, 2025):

$$Chl - a = 10(a0 + a1R + a2R2 + a3R3 + a4R4) \quad \text{(معادله ۷)}$$

که در آن $R = \log ۱۰(\max(Rrs(443), Rrs(488))Rrs(547))$ ضرایب ثابت هستند.

$$R = \log ۱۰(Rrs(488)Rrs(547)). \quad \text{(معادله ۸)}$$

شوری سطح دریا (SSS): با توجه به عدم وجود باند اختصاصی برای شوری در MODIS، از یک رگرسیون چندمتغیره مبتنی بر داده‌های میدانی استفاده شد (معادله ۹). مدل نهایی با استفاده از روش حداقل مربعات و با ورودی بازتاب در هفت باند مرئی و مادون‌قرمز نزدیک MODIS ساخته شد (Ye *et al.*, 2024; Kim *et al.*, 2023):

$$SSS(psu) = \beta0 + \beta1 \times Band1 + \beta2 \times Band2 + \ldots + \beta7 \times Band7 \quad \text{(معادله ۹)}$$

کدورت: برای برآورد این پارامتر از معادله تجربی (معادله ۱۰) که برای آب‌های ساحلی با MODIS کالیبره شده است، استفاده شد (Wu *et al.*, 2025; Katlane *et al.*, 2023):

$$Turbidity(NTU) = (44 - 19.489 \times P2P4 - 0.711 \times P3) \times 100 \quad \text{(معادله ۱۰)}$$

که در آن Pi برابر با بازتاب تصحیح‌شده اتمسفری در باند i ام MODIS است.

مواد جامد معلق (SS و TSS): برای برآورد این پارامترها، ابتدا چندین مدل رگرسیونی خطی ساده (با یک باند) و ترکیبی (چند باند) مورد آزمایش قرار گرفت. داده‌های میدانی SS و TSS با مقادیر بازتاب در بلندهای مختلف MODIS (به‌ویژه بلند ۱ در ۶۴۵ نانومتر که به‌شدت تحت تأثیر رسوبات معدنی است) مرتبط شدند. بهترین مدل از نظر آماری (بالاترین R^2 و کمترین RMSE) که یک رگرسیون ترکیبی با استفاده از تمامی هفت باند مرئی و مادون‌قرمز نزدیک MODIS بود، انتخاب گردید (Wu *et al.*, 2025; Sivakumar *et al.*, 2022).

تحلیل آماری و ارزیابی دقت: دقت کلیه پارامترهای استخراج‌شده با استفاده از آماره‌های معتبر و در مقایسه با داده‌های میدانی ارزیابی شد. برای هر پارامتر و هر الگوریتم، ضریب تعیین (R^2)، جذر میانگین مربعات خطا (RMSE) و میانگین خطای مطلق (MAE) محاسبه گردید (معادله ۱۱ و ۱۲):

$$RMSE = \sqrt{1n\sum i = 1n(Pi - Oi)2} \quad \text{(معادله ۱۱)}$$

$$MAE = 1n\sum i = 1n \mid Pi - Oi \mid \quad \text{(معادله ۱۲)}$$

که در آن Pi مقدار پیش‌بینی‌شده (ماهواره‌ای)، Oi مقدار مشاهده‌شده (میدانی) و n تعداد نمونه‌ها است. همچنین، برای بررسی معناداری آماری مدل‌های رگرسیونی از تحلیل واریانس (ANOVA) و مقدار p-value استفاده شد. در نهایت نتایج حاصله تحلیل گردید.

نتایج

ارزیابی دقت الگوریتم‌های برآورد عمق سشی دیسک (SDD): دقت سه الگوریتم مورد بررسی برای برآورد پارامتر SDD با استفاده از ۶۵ داده میدانی ارزیابی شد. نتایج آماری حاصل از این مقایسه در (جدول ۲) و (شکل ۲) ارائه شده است.

الگوریتم تجربی (EMP): این الگوریتم با بیشترین ضریب تعیین (R^2 = ۰/۸۶) و کمترین مقدار خطا (RMSE = ۰/۹۲ متر و MAE = ۰/۷۵ متر)، بهترین عملکرد را در برآورد SDD در منطقه مطالعاتی نشان داد. نمودار پراکندگی مقادیر برآوردی در مقابل مقادیر میدانی، توزیع داده‌ها را بسیار نزدیک به خط ۱:۱ نشان می‌دهد (شکل ۲).

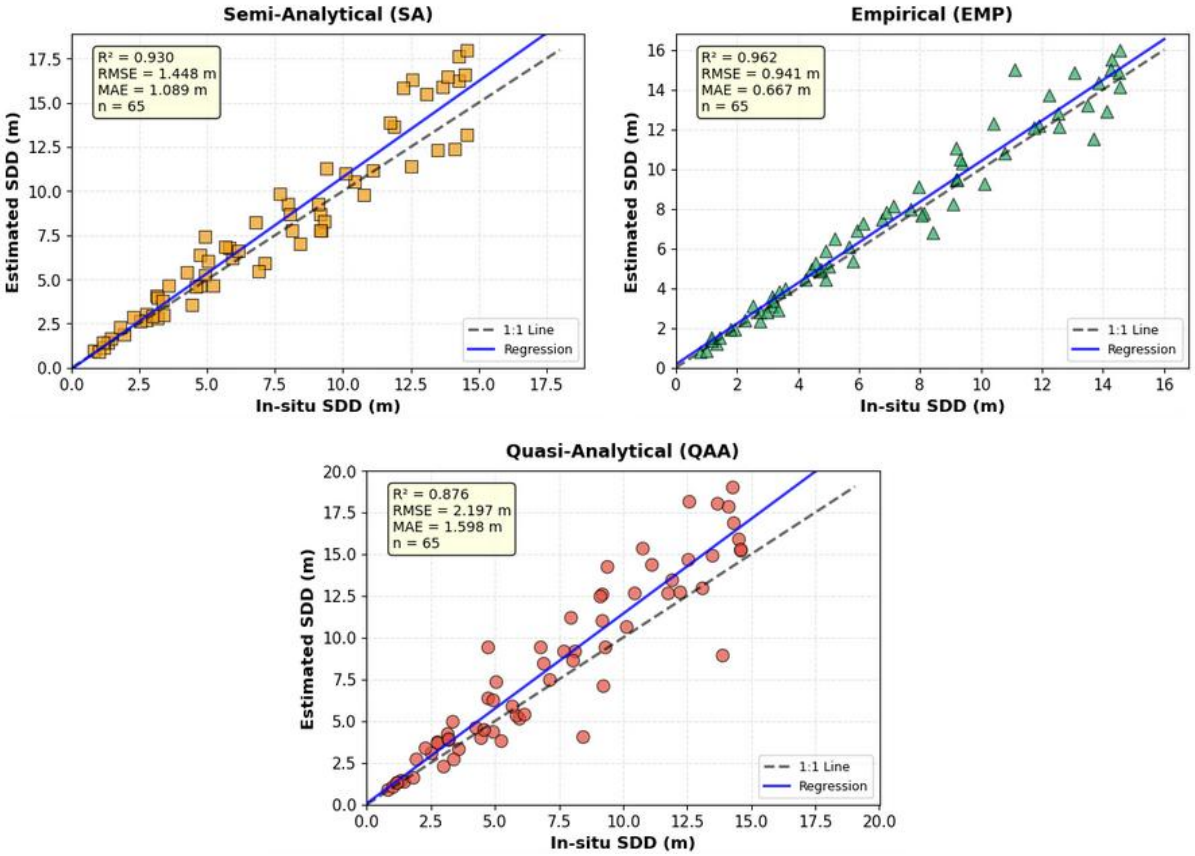
[Downloaded from jweb.ahvaz.iau.ir on 2026-11-11]

الگوریتم نیمه‌تحلیلی (SA): عملکرد این الگوریتم با R^2 = ۰/۷۵ و RMSE = ۱/۳۰ متر در رده دوم قرار گرفت. اگرچه دقت آن از الگوریتم EMP کمتر بود، اما پراکندگی خطا در محدوده وسیع‌تری از مقادیر SDD (از کم به زیاد) یکنواخت‌تر بود (شکل ۲).

الگوریتم شبه‌تحلیلی (QAA): این الگوریتم با R^2 = ۰/۷۱ و RMSE = ۱/۷۰ متر، بیشترین خطای مطلق را نشان داد. نمودار پراکندگی حاکی از تمایل الگوریتم به برآورد بیش از حد (Overestimation) مقادیر SDD، به‌ویژه در محدوده مقادیر کم و متوسط (کمتر از ۱۰ متر) بود (شکل ۲).

جدول ۲: آماره‌های ارزیابی دقت الگوریتم‌های مختلف برآورد SDD.

الگوریتم	(R^2)	RMSE	MAE	تعداد نمونه(n)
تجربی(EMP)	۰/۸۶	m۰/۹۲	m۰/۷۵	۶۵
نیمه‌تحلیلی(SA)	۰/۷۵	m۱/۳۰	m۱/۰۲	۶۵
شبه‌تحلیلی(QAA-V5)	۰/۷۱	m۱/۷۰	m۱/۳۵	۶۵



شکل ۲: نمودار پراکندگی برای الگوریتم‌های QAA، SA و EMP

ارزیابی دقت پارامترهای فیزیک‌وشیمیایی: برآورد پارامترهای شوری سطح دریا (SSS)، دمای سطح دریا (SST)، کلروفیل-a و کدورت با استفاده از داده‌های MODIS و الگوریتم‌های ذکر شده در بخش روش، با اندازه‌گیری‌های CTD در لایه سطحی مقایسه شد. نتایج صحت‌سنجی در (جدول ۳) و نمودارهای پراکندگی (شکل ۳) ارائه شده است.

[Downloaded from jweb.ahvaz.iau.ir on 2026-11-11]

شوری سطح دریا (SSS): مدل رگرسیونی چندمتغیره توسعه‌یافته با بیشترین دقت در بین پارامترها عمل کرد که با R^2 = ۰/۸۹ و ۰/۶۸ واحد عملی RMSE = (psu) همراه بود. این نشان‌دهنده قابلیت خوب باندهای MODIS در تشخیص تغییرات شوری ناشی از اختلاط آب‌های شیرین رودخانه‌ای با آب شور دریا در منطقه است.

دمای سطح دریا (SST): الگوریتم MCSST با R^2 = ۰/۸۱ و ۱/۲۰ درجه سلسیوس = RMSE، دمای سطح آب را با دقتی قابل‌قبول برآورد نمود. خطای برآورد در محدوده دمایی مشاهده‌شده (حدود ۲۳ تا ۲۶ درجه سلسیوس) یکنواخت بود.

کلروفیل-a (Chl-a) : از بین دو الگوریتم OC3 و OC2، الگوریتم OC3 عملکرد بهتری با R^2 = ۰/۷۵ و ۲/۳۰ میکروگرم بر لیتر = RMSE نشان داد. بااین‌حال، نمودار پراکندگی حاکی از پراکندگی نسبتاً زیاد داده‌ها به‌ویژه در غلظت‌های بالاتر کلروفیل (بیش از ۵ میکروگرم بر لیتر) است که می‌تواند ناشی از تاثیر هم‌زمان رسوبات معلق بر سیگنال بازتابی در باندهای آبی باشد.

کدورت: رابطه تجربی اعمال‌شده با R^2 = ۰/۷۵ و ۱/۷۸ واحد NTU = RMSE، قادر به بازتولید روند تغییرات کدورت بود. برآوردها در محدوده مقادیر کم کدورت (کمتر از ۵ NTU) از دقت بالاتری برخوردار بودند. به‌طور خلاصه:

۱. شوری (SSS): بالاترین دقت ($R^2 \sim 0.89$)

۲. کلروفیل-a: کمترین دقت (به دلیل تداخل با رسوبات)

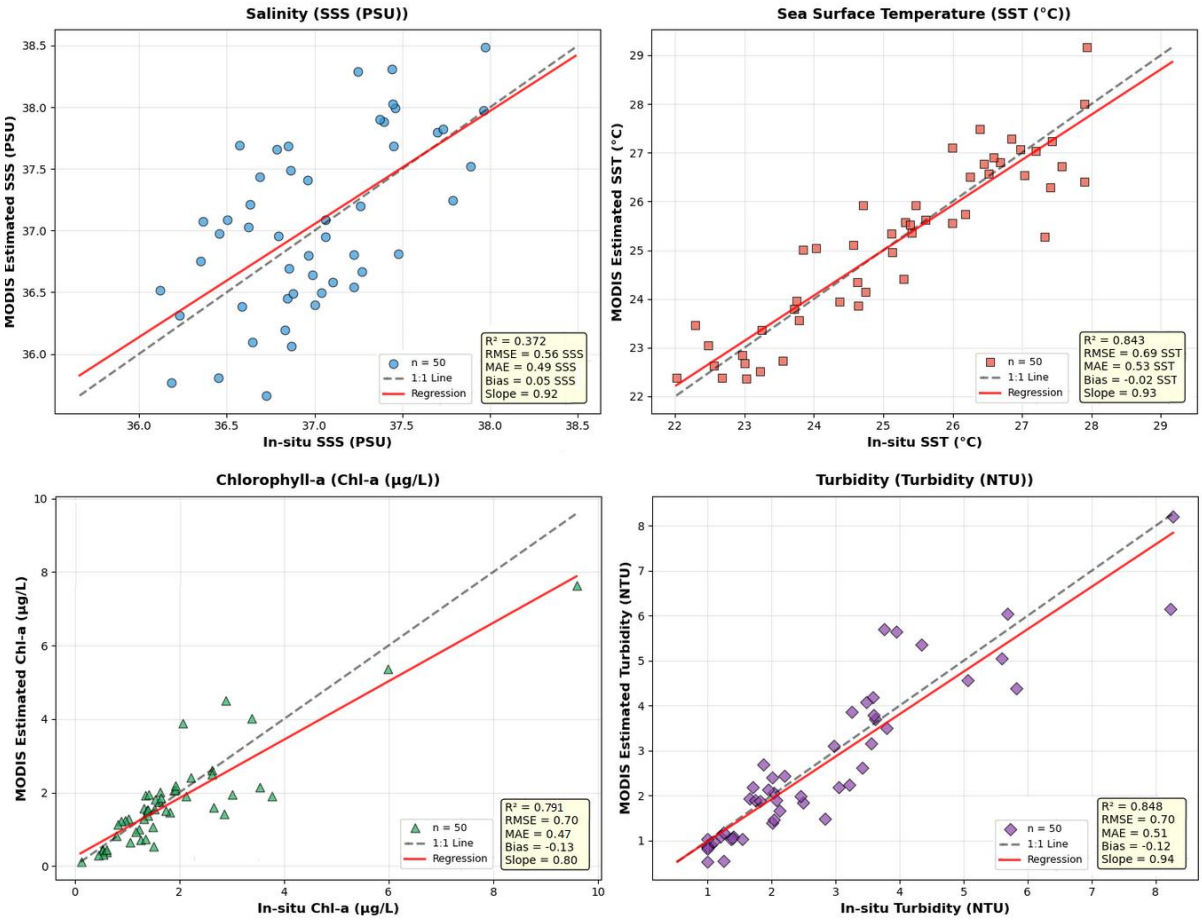
۳. دما (SST): دقت متوسط (به دلیل اثرات اتمسفری)

۴. کدورت: دقت خوب (مستقیم مرتبط با بازتاب)

جدول ۳: دقت برآورد پارامترهای مختلف با استفاده از داده‌های MODIS

الگوریتم/مدل	متغیر کیفی	(R^2)	MAE
عمق سشی دیسک(SDD)	الگوریتم تجربی(EMP)	۰/۸۶	(m) ۰/۹۲
شوری سطح دریا(SSS)	رگرسیون (باندهای ۱-۷)	۰/۸۹	(psu)۰ /۶۸
دمای سطح دریا(SST)	الگوریتمMCSST	۰/۸۱	(°C) ۱/۲
کلروفیل-a	الگوریتمOC3	۰/۷۵	(µg/L) ۲/۳
کدورت	رابطه تجربی (باندهای ۲،۳،۴)	۰/۷۵	(NTU) ۱/۷۸
مواد جامد معلق(SS)	رگرسیون ترکیبی (باندهای ۱-۷)	۰/۸۲	(mg/L) ۰/۸۸

[Downloaded from jweb.ahvaz.iau.ir on 2026-11-11]



شکل ۳: مقایسه پارامترهای فیزیکوشیمیایی (شوری سطح دریا (SSS)، دمای سطح دریا (SST)، کلروفیل-a و کدورت)

برآورد غلظت مواد معلق (SS و TSS): برای برآورد غلظت مواد جامد معلق (SS)، چهار مدل رگرسیونی آزمایش شد. نتایج ارزیابی این مدل‌ها در جدول ۴ ارائه شده است.

مدل مبتنی بر باند ۱ (رابطه ۱: $SS = 94.095 \times Band1 - 2.787$) با $R^2 = ۰/۶۷$ و RMSE ۱/۲۴ mg/l و مدل مبتنی بر باند ۴ (رابطه ۲: $SS = 97.085 \times Band4 - 5.821$) با $R^2 = ۰/۷۸$ و RMSE ۱/۰۱ mg/l عمل کردند. همچنین مدل رگرسیون خطی ترکیبی که از تمامی هفت باند مرئی و مادون‌قرمز نزدیک MODIS به‌عنوان متغیر مستقل استفاده می‌کرد (رابطه ۳)، به‌طور قابل‌توجهی عملکرد بهتری داشت. این مدل با $R^2 = ۰/۸۲$ و کمترین خطا (RMSE ۰/۸۸ mg/l و MAE ۰/۶۷ mg/l)، بهترین برآورد را ارائه داد. تحلیل واریانس (ANOVA) برای این مدل مقدار p-value کمتر از ۰/۰۰۰۱ را نشان داد که حاکی از معناداری آماری شدید مدل است.

مدل TSS: الگوریتم تجربی مبتنی بر باند ۱ (رابطه ۶) برای برآورد TSS با $R^2 = ۰/۸۸$ و RMSE ۵/۴۰ mg/l همراه بود. اگرچه R^2 بالاست، اما مقدار RMSE مطلق به دلیل دامنه گسترده مقادیر TSS، نسبتاً بالا بود. بر این اساس مدل ترکیبی به‌عنوان مدل بهینه برای منطقه انتخاب و ضرایب نهایی آن با استفاده از کل مجموعه داده‌ها، اصلاح و به‌صورت رابطه زیر بازنویسی شد. اعتبارسنجی مستقل این مدل بهینه‌شده با داده‌های میدانی تأیید شد که نتایج آن $R^2 = ۰/۹۱$ و RMSE ۰/۴۲ mg/l را نشان داد:

$$SS\ (mg/L) = 26.912 + (-2.818) \times Band1 - 17.392 \times Band2 - (-10.032) \times Band3 + 53.232 \times Band4 + 12.254 \times Band5 + 6.32 \times Band6 + 35.321 \times Band7$$

[Downloaded from jweb.ahvaz.iau.ir on 2026-11-11]

جدول ۴: مقایسه دقت مدل‌های مختلف برآورد مواد جامد معلق (*SS*)

مدل	ضریب تعیین (R^2)	RMSE (mg/L)	MAE (mg/L)	توضیح
رابطه ۱	۰/۶۷	۱/۲۴	m۰/۷۵	رگرسیون خطی ساده (باند ۱)
رابطه ۲	۰/۷۸	۱/۰۱	m۱/۰۲	رگرسیون خطی ساده (باند ۴)
رابطه ۳	۰/۸۲	۰/۸۸	m۱/۳۵	رگرسیون خطی ترکیبی (باندهای ۱ تا ۷)
رابطه ۴	۰/۶۵	۱/۴۸		رگرسیون خطی ترکیبی (باندهای ۱ و ۲)

بحث و نتیجه‌گیری

یافته‌های این مطالعه مؤید قابلیت قابل‌توجه سنجنده MODIS و الگوریتم‌های وارونسازی در برآورد پارامترهای کیفی آب در محیط پویا و پیچیده سواحل خوزستان واقع در شمال غربی خلیج‌فارس است. دقت بالای برآورد شوری سطح دریا (R^2=۰/۸۹) با استفاده از یک مدل رگرسیونی چندمتغیره، همسو با یافته‌های Ye و همکاران (۲۰۲۴) است که نشان دادند ترکیب باندهای مرئی و مادون‌قرمز نزدیک MODIS می‌تواند تغییرات ناشی از اختلاط آب شیرین و شور را در دریای جنوب چین ردیابی کند. اگرچه MODIS فاقد باند ریزموج اختصاصی شوری است، ولی این نتیجه نشان می‌دهد در مناطق ساحلی تحت تأثیر رواناب رودخانه، تغییرات غلظت مواد معلق و CDOM که بر بازتاب در باندهای مرئی تأثیر می‌گذارند، می‌توانند به‌عنوان پراکسی مناسبی برای تشخیص جبهه آب شیرین عمل کنند.

عملکرد مطلوب الگوریتم تجربی (EMP) در برآورد SDD با بیشترین دقت (R^2=۰/۸۶)، با پژوهش‌های انجام‌شده در سایر آب‌های کدر و ساحلی مانند مطالعه Kabiri (۲۰۲۲) در خلیج‌فارس و خلیج عمان همخوانی دارد که در آن الگوریتم‌های تجربی مبتنی بر نسبت باندها دقت بالایی نشان دادند. این الگوریتم‌های تجربی که ارتباط مستقیمی بین نسبت‌های طیفی و SDD برقرار می‌کنند، اغلب به دلیل سادگی و عدم نیاز به محاسبات پیچیده خواص نوری ذاتی، در آب‌های Case II نتایج خوبی ارائه می‌دهند (Kabiri, 2022). بااین‌حال، برتری دقت EMP در اینجا نباید به معنای برتری مطلق آن تفسیر شود. همان‌طور که توسط Najah و Al-Shehhi (۲۰۲۱) اشاره شده، الگوریتم‌های نیمه‌تحلیلی مانند SA، اگرچه ممکن است در یک مجموعه داده خاص دقت کمتری نشان دهند، اما به دلیل مبتنی بودن بر اصول فیزیکی انتقال نور، قابلیت تعمیم‌پذیری بالاتری دارند و کمتر وابسته به شرایط نوری منطقه کالیبراسیون هستند. عملکرد نسبتاً خوب الگوریتم SA (R^2 =۰/۷۵) در این مطالعه نیز این پتانسیل را تأیید می‌کند. تمایل الگوریتم QAA به برآورد بیش از حد SDD، احتمالاً ناشی از عدم تطابق کامل ضرایب الگوریتم استاندارد (که برای آب‌های اقیانوسی باز بهینه شده) با ویژگی‌های نوری شدیداً جذب‌کننده و پراکنده‌کننده آب‌های ساحلی خلیج‌فارس است. این یافته با نتایج Cao و همکاران (۲۰۲۴) که نیاز به بهبود الگوریتم QAA برای آب‌های ساحلی کدر شرق چین را نشان دادند، مطابقت دارد (Cao *et al*., 2024).

موفقیت مدل ترکیبی چندبلندی در برآورد غلظت مواد جامد معلق (SS) با R^2=۰/۸۲، بر اهمیت استفاده هم‌زمان از اطلاعات طیفی چندین باند برای جداسازی سیگنال مواد معدنی از سایر اجزای آب (مانند فیتوپلانکتون و CDOM) تأکید دارد. این نتیجه با کار Wu و همکاران (۲۰۲۵) که بر مزیت استفاده از چندین باند طیفی برای پایش کیفیت آب در محیط‌های ساحلی کدر تأکید کردند، هم‌راستا است (Wu *et al*., 2025). در مطالعه حاضر، ترکیب باندهای با رزولوشن ۲۵۰ متر (باندهای ۱ و ۲) و ۵۰۰ متر (باندهای ۳ تا ۷)، امکان بهره‌گیری هم‌زمان از حساسیت طیفی بالا و پوشش مکانی وسیع‌تر را فراهم آورد و منجر به تولید مدلی با خطای کمتر و قابلیت اطمینان بالاتر شد. این رویکرد مشابه استراتژی‌ای است که Sivakumar و همکاران (۲۰۲۲) برای برآورد پارامترهای کیفیت آب در آب‌های داخلی با استفاده از داده‌های هایپر طیفی به کار بردند (Sivakumar *et al*., 2022).

این مطالعه نشان داد که فناوری سنجش از دور، به‌ویژه با استفاده از داده‌های در دسترس سنجنده MODIS، ابزاری قدرتمند، مقرون‌به‌صرفه و قابل اعتماد برای پایش یکپارچه سلامت اکولوژیک سواحل خوزستان واقع در شمال غربی خلیج‌فارس است. ارزیابی الگوریتم‌های مختلف نشان داد که در شرایط منطقه، الگوریتم‌های تجربی (مانند EMP برای SDD) و مدل‌های ترکیبی چندباندی (برای SS) با دقت قابل‌قبولی عمل می‌کنند.

[Downloaded from jweb.ahvaz.iau.ir on 2026-11-11]

یافته‌ها به وضوح لزوم اتخاذ رویکرد مدیریت یکپارچه حوضه آبریز- ساحل را نشان می‌دهند. هرگونه اقدام مدیریتی برای بهبود سلامت این اکوسیستم ساحلی، بدون توجه به کنترل فرسایش و رواناب در حوضه‌های آبریز بالادست ناکام خواهد ماند. در این راستا، پایش مستمر با سنجش از دور می‌تواند به‌عنوان یک سیستم هشدار اولیه، اثربخشی اقدامات مدیریتی در حوضه آبریز (مانند اصلاح الگوی کشاورزی یا اجرای پروژه‌های آبخیزداری) را در بهبود کیفیت آب ساحلی ردیابی و ارزیابی نماید. این چارچوب می‌تواند الگویی برای پایش سایر مناطق ساحلی مشابه تحت تأثیر فشارهای زمین‌پایه در خلیج فارس و سایر نقاط جهان باشد.

محدودیت‌های مطالعه و پیشنهادهایی برای پژوهش‌های آتی:

با وجود دستاوردهای این پژوهش، محدودیت‌هایی نیز باید مورد توجه قرار گیرند. اولاً، مقیاس زمانی داده‌های میدانی برای استخراج روابط بلندمدت کافی نبوده و پایش مستمر با داده‌های ماهواره‌ای جدیدتر (مانند Sentinel-3) را می‌طلبد. ثانیاً، اثرات آئروسل‌های محلی و گردوغبار که در منطقه خلیج‌فارس شایع است، می‌تواند به‌ویژه بر باندهای آبی و برآورد کلروفیل تأثیر بگذارد و نیاز به الگوریتم‌های تصحیح اتمسفری پیشرفته‌تر دارد. ثالثاً، سنجش از دور تنها اطلاعات لایه سطحی آب را ارائه می‌دهد و برای درک کامل تأثیرات عمودی، هم‌راهی با پروفیل‌های عمقی CTD ضروری است.

پیشنهاد می‌شود پژوهش‌های آتی بر روی موارد زیر متمرکز شوند:

۱. ادغام داده‌های چندسنجنده‌ای: استفاده ترکیبی از داده‌های Sentinel-2/MSI و Landsat-9/OLI-2 با قدرت تفکیک مکانی بالاتر (۱۰-۳۰ متر) برای پایش دقیق‌تر تغییرات در نزدیکی ساحل و مصب‌ها، رویکردی که Hafeez و همکاران (۲۰۲۲) مؤثر بودن آن را نشان دادند (Hafeez *et al*., 2022).

۲. توسعه الگوریتم‌های تطبیقی: توسعه و کالیبراسیون الگوریتم‌های وارونسازی (به‌ویژه برای کلروفیل و SDD) که به‌طور خاص برای آب‌های Case II خلیج‌فارس با در نظر گرفتن غلظت بالای CDOM و ذرات معدنی بهینه‌سازی شده‌اند. این امر نیازمند مجموعه داده‌های میدانی گسترده‌تر و دقیق‌تری است.

۳. ایجاد چارچوب پایش عملیاتی: طراحی یک سامانه نیمه‌خودکار مبتنی بر ابر (Cloud Computing) مانند Google Earth Engine برای پردازش بلادرنگ داده‌های ماهواره‌ای و تولید نقشه‌های کیفی آب به‌صورت دوره‌ای، به‌منظور پشتیبانی از تصمیم‌گیری‌های مدیریتی، همان‌گونه که Schaeffer و همکاران (۲۰۲۳) برای GLIMR پیشنهاد کردند (Schaeffer *et al*., 2023).

۴. تکمیل پایگاه داده میدانی: انجام نمونه‌برداری‌های میدانی منظم و بلندمدت در فصول مختلف و در شبکه‌ای با تراکم بیشتر، برای بهبود کالیبراسیون الگوریتم‌ها و درک تغییرات فصلی پارامترها ضروری است.

۵. پایش اثرات پدیده‌های حدی: از قابلیت سنجش از دور می‌توان برای پایش اثرات پدیده‌های حدی مانند شکوفایی جلبکی مضر (کشند قرمز) و یا تخلیه رسوبات ناشی از سیلاب در مقیاس وسیع بهره برد.

سپاسگزاری

این مقاله مستخرج از نتایج طرح تحقیقاتی اجرا شده با شماره قرارداد ۱۰۰ از محل اعتبارات ویژه پژوهشی دانشگاه علوم و فنون دریایی خرمشهر است.

منابع

Abedini, M., Esmaeilpour, Y., Gholami, H., Bazrafshan, O., and Nafarzadegan, A. R. 2025. Change analysis of surface water clarity in the Persian Gulf and the Oman Sea by remote sensing data and an interpretable deep learning model. Environmental Science and Pollution Research, 1-18.

Abegaz, N. T., Tsidu, G. M., and Arsiso, B. K. 2023. Spatiotemporal variability of the lake Tana water quality derived from the MODIS-based forel–ule index: the roles of hydrometeorological and surface processes. Atmosphere, *14*(2), 289.

[Downloaded from jweb.ahvaz.iau.ir on 2026-11-11]

Cao, S., Xiao, F., Chen, M., Wang, Z., Luo, J., and Du, Y. 2024. Inversion and analysis of transparency changes in the eastern coastal waters of China from 2003 to 2023 by an improved QAA-based method. Frontiers in Marine Science, 11, 1503177.

Carrea, L., Crétaux, J. F., Liu, X., Wu, Y., Calmettes, B., Duguay, C. R., and Albergel, C. 2023. Satellite-derived multivariate world-wide lake physical variable timeseries for climate studies. Scientific Data, 10(1), 30.

Chen, K., Zhang, J., Zheng, Y., and Xie, X. 2024. A study on global oceanic chlorophyll-a concentration inversion model for MODIS using machine learning algorithms. IEEE Access.

Dilipkumar, J., and Shanmugam, P. 2023. Fuzzy-based global water quality assessment and water quality cells identification using satellite data. Marine Pollution Bulletin, *193*, 115148.

Evans, S. N., Konzewitsch, N., Marks, R., Hovey, R. K., and Bellchambers, L. M. 2025. From Pixels to Policy: Calibration of satellite-derived ocean water quality metrics to guide EBFM in Exmouth Gulf, Western Australia. Regional Studies in Marine Science, 104672.

Fettweis, M., Riethmüller, R., Van der Zande, D., and Desmit, X. 2023. Sample based water quality monitoring of coastal seas: how significant is the information loss in patchy time series compared to continuous ones. Science of the Total Environment, *873*, 162273.

Gall, M. P., Pinkerton, M. H., Steinmetz, T., and Wood, S. 2022. Satellite remote sensing of coastal water quality in New Zealand. New Zealand Journal of Marine and Freshwater Research, *56*(3), 585-616.

Ghaemi, M., Mohammadpour, G., Hamzei, S., and Gholamipour, S. 2022. Spatial and temporal characterizations of seawater quality on marine waters area of the Persian Gulf. Regional Studies in Marine Science, 53, 102407.

Hafeez, S., Wong, M. S., Abbas, S., and Asim, M. 2022. Evaluating landsat-8 and sentinel-2 data consistency for high spatiotemporal inland and coastal water quality monitoring. Remote Sensing, *14*(13), 3155.

Ho, C. R., and Liu, A. K. 2023. Preface: Remote sensing applications in ocean observation. Remote Sensing, 15(2), 415.

Kabiri, K. 2022. Estimation of the Secchi disk depth from the NASA MODIS-Aqua diffuse attenuation coefficient data in the northern Persian Gulf and the Gulf of Oman: A spatiotemporal assessment. Regional Studies in Marine Science, *52*, 102359.

Kabiri, K. 2023. Retrieval and validation of the Secchi disk depth values (Z sd) from the Sentinel-3/OLCI satellite data in the Persian Gulf and the Gulf of Oman. Environmental Science and Pollution Research, *30*(29), 73649-73661.

Kabiri, K., and Moradi, M. 2023. A cross-sensor-based approach to estimate depth values in nearshore coastal waters, case study: Nayband Bay, Persian Gulf. ISPRS Annals of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences, *10*, 343-348.

Karthick, M., Shanmugam, P., and Kumar, G. S. 2024. Long-term water quality assessment in coastal and inland waters: An ensemble machine-learning approach using satellite data. Marine Pollution Bulletin, 209, 117036.

Katlane, R., El Kilani, B., Dhaoui, O., Kateb, F., and Chehata, N. 2023. Monitoring of sea surface temperature, chlorophyll, and turbidity in Tunisian waters from 2005 to 2020 using MODIS imagery and the Google Earth Engine. Regional Studies in Marine Science, *66*, 103143.

Kim, H. C., Son, S., Jo, C. O., Kim, Y. H., Park, M., Park, Y. G., and Ryu, J. 2023. Spatio-temporal structures of satellite-derived water quality indicators along the Korean South Coast. Environment International, 178, 108083.

Li, H., Li, X., Song, D., Nie, J., and Liang, S. 2024. Prediction on daily spatial distribution of chlorophyll-a in coastal seas using a synthetic method of remote sensing, machine learning and numerical modeling. Science of the Total Environment, 910, 168642.

Liu, J. 2024. An Operational Global Near-Real-Time High-Resolution Seamless Sea Surface Temperature Products from Satellite-Based Thermal Infrared Measurements. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 62, 1-8.

Magri, S. 2023. Enhancing the usability of Satellite Earth Observations through Data Driven Models. An application to Sea Water Quality.

Masoud, A. A. 2022. On the retrieval of the water quality parameters from sentinel-3/2 and landsat-8 OLI in the Nile delta's coastal and inland waters. Water, *14*(4), 593.

Merder, J., Zhao, G., Pahlevan, N., Rigby, R. A., Stasinopoulos, D. M., and Michalak, A. M. 2024. A novel algorithm for ocean chlorophyll-a concentration using MODIS Aqua data. ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing, *210*, 198-211.

Mushtaq, F., Alhems, L. M., Farooq, M., and Tiwari, S. P. 2025. A comprehensive review of geomatics based coastal zone management in the Realm of Gulf, Saudi Arabia. Discover Applied Sciences, *7*(2), 140.

[Downloaded from jweb.ahvaz.iau.ir on 2026-11-11]

Najah, A., and Al-Shehhi, M. R. 2021. Performance of the ocean color algorithms: QAA, GSM, and GIOP in inland and coastal waters. Remote Sensing in Earth Systems Sciences, 4(4), 235-248.

Nandy, A., Phinn, S., Grinham, A., and Albert, S. 2024. Developing a semi-automated near-coastal, water quality-retrieval process from global multi-spectral data: south-eastern Australia. Remote Sensing, *16*(13), 2389.

Quevedo-Castro, A., Monjardín-Armenta, S. A., Rangel-Peraza, J. G., Plata-Rocha, W., Loaiza, J. G., and Bustos-Terrones, Y. A. 2025. Accurate and robust estimation of TDS, TOC, Chl-a and surface water temperature using Landsat-8, Sentinel-2, MODIS, and ASTER sensors. Environmental Monitoring and Assessment, 198(1), 44.

Rego, S. A., Detenbeck, N. E., and Shen, X. 2024. EstuarySAT Database Development of Harmonized Remote Sensing and Water Quality Data for Tidal and Estuarine Systems. Water, 16(19), 2721.

Ri, T. C., and Jo, J. S. 2023. A genetic algorithm-optimized neural network for chlorophyll a estimation using MODIS satellite data in coastal water: Application to the sinpho bay of DPR Korea. Journal of the Indian Society of Remote Sensing, 51(7), 1541-1551.

Rocha, V. N. L., Santos, C. A. G., and Silva, R. M. 2024. Estimation of Water Surface Reflectance and Total Suspended Solid Using MODIS Images for a Reservoir in the Brazilian Semiarid Region. Journal of Environmental Informatics, *44*(2).

Román, A., Tovar-Sánchez, A., Gauci, A., Deidun, A., Caballero, I., Colica, E., and Navarro, G. 2022. Water-quality monitoring with a UAV-mounted multispectral camera in coastal waters. Remote Sensing, *15*(1), 237.

Sahoo, B. 2023. 20-Year Assessment of Total Suspended Sediment (TSS) Variability in Barataria Bay from Modis Ocean Color Using a Combination of Adaptive Semi-Analytical and Neural Network Algorithms. Louisiana State University and Agricultural & Mechanical College.

Schaeffer, B. A., Whitman, P., Vandermeulen, R., Hu, C., Mannino, A., Salisbury, J., and Reynolds, N. 2023. Assessing potential of the Geostationary Littoral Imaging and Monitoring Radiometer (GLIMR) for water quality monitoring across the coastal United States. Marine pollution bulletin, *196*, 115558.

Shao, S., Wang, Y., Liu, G., and Song, K. 2024. A systematic review of the application of the geostationary ocean color imager to the water quality monitoring of inland and coastal waters. Remote Sensing, *16*(9), 1623.

Shi, L., Mao, Z., Zhang, Y., Wang, Z., and Tu, Q. 2024. An Extended Quasi− Analytical Algorithm for Retrieving Absorption Coefficient Using 510–620 nm Bands from OLCI and MERIS Satellite Data. Water, 16(1), 67.

Sivakumar, R., Prasanth, B. S. V., and Ramaraj, M. 2022. An empirical approach for deriving specific inland water quality parameters from high spatio-spectral resolution image. Wetlands Ecology and Management, 30(2), 405-422.

Smith, M. E., Lemley, D. A., Whitfield, E., and Adams, J. B. 2025. Evaluation of Sentinel-2 for water quality monitoring in a eutrophic estuary in South Africa. Water SA, 51(3), 181-190.

Son, Y. B., Kim, E., Cho, J. H., Choi, S. K., and Kang, D. 2025. Analysis of regional variation of water transparency in the Yellow Sea and East China Sea based on MODIS data. Regional Studies in Marine Science, *84*, 104093.

Styles, E., Wakamatsu, L., and Fischer, A. M. 2025. Assessing chlorophyll-a retrieval of Sentinel-3 OLCI, VIIRS, MODIS and OC-CCI in Monterey Bay (California, USA). Ocean and Coastal Research, 73, e25024.

Sukkuea, A., Akkajit, P., Suwannarat, K., Foithong, P., Afsarimanesh, N., and Alahi, M. E. E. 2025. AI-Driven Time Series Forecasting of Coastal Water Quality Using Sentinel-2 Imagery: A Case Study in the Gulf of Thailand. Water, *17*(12), 1798.

Sun, X., Guan, L., and Lu, S. 2025. Estimation of sea surface temperature in the Arctic based on Fengyun-3D/MERSI II data. Intelligent Marine Technology and Systems, 3(1), 11.

Wu, S., Qi, J., Yan, Z., Lyu, F., Lin, T., Wang, Y., and Du, Z. 2022. Spatiotemporal assessments of nutrients and water quality in coastal areas using remote sensing and a spatiotemporal deep learning model. International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation, *112*, 102897.

Wu, Z., Pang, J., Li, J., Wang, Y., Ruan, J., Zhang, X., and Gao, Y. 2025. A review of remote sensing-based water quality monitoring in turbid coastal waters. Intelligent Marine Technology and Systems, *3*(1), 24.

Xue, C., Hu, C., Cannizzaro, J. P., Barnes, B. B., Qi, L., Shi, J., and Palandro, D. A. 2024. Remote sensing of water quality in Qatari coastal waters between 2002 and 2022. IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing.

Ye, H., Tang, S., Bai, Y., and Kalhoro, M. A. 2024. Estimation of sea surface salinity from MODIS-Aqua data in the northern South China Sea. Regional Studies in Marine Science, 77, 103684.

Zhu, X., Guo, H., Huang, J. J., Tian, S., Xu, W., and Mai, Y. 2022. An ensemble machine learning model for water quality estimation in coastal area based on remote sensing imagery. Journal of Environmental Management, *323*, 116187.

[Downloaded from jweb.ahvaz.iau.ir on 2026-11-11]

Assessment of Water Quality Parameters and Suspended Sediments in Khuzestan Coastal Waters Using MODIS Satellite Data

Heeva Elmizadeh*[1]
Khosro fazelpoor[2]

1. Associate Professor, Department of Marine Geology, Khorramshahr University of Marine Sciences and Technology, Iran.

2. Department of Ecology and Climate, Faculty of Environmental Sciences, Euclid University, Spain.

***Corresponding author:**
Elmizadeh@kmsu.ac.ir

Received date: June/01/2024
Accepted date: May/31/2026

Abstract

Monitoring water quality and suspended sediments in sensitive coastal ecosystems like the Persian Gulf is essential for assessing ecological health and enabling sustainable management. This study aimed to integrate findings from satellite image processing concerning water clarity (using Secchi Disk Depth, SDD), key environmental parameters (salinity, sea surface temperature, chlorophyll-a, and turbidity), and suspended sediment concentration (SS and TSS) along the Khuzestan coast in the northwestern Persian Gulf. MODIS sensor data were processed through coding in the MATLAB environment and, following geometric and atmospheric corrections, were analyzed using various inversion algorithms (semi-analytical and empirical). Results were validated with field data. Accuracy assessment of the SDD estimation algorithms revealed that the empirical algorithm (EMP) performed best, with the highest coefficient of determination ($R^2 = 0.86$) and lowest error (RMSE = 0.92 m). However, the advantages of semi-analytical algorithms (SA and QAA) in terms of independence from field data and generalizability were also discussed. The estimation of other parameters was also achieved with acceptable accuracy; sea surface salinity was estimated with the highest precision ($R^2 = 0.89$, RMSE = 0.68). For suspended sediments, a combined regression model utilizing both 250 m and 500 m resolution MODIS bands provided the best estimate of suspended solids (SS) concentration, with $R^2 = 0.82$ and RMSE = 0.88 mg/L. This study confirms the efficacy and reliability of remote sensing techniques as an efficient, cost-effective tool with extensive spatio-temporal coverage for the integrated and continuous monitoring of the ecological health of the Khuzestan coasts and underscores the necessity for effective management of contributing river watersheds.

Keywords: Remote Sensing, Water quality monitoring, SDD, Complex Coastal Waters, Retrieval, Persian Gulf.

[Downloaded from jweb.ahvaz.iau.ir on 2026-11-11]