

# Comparative performance analysis of Google Earth Engine and SNAP platforms for estimating water quality parameters in Minab dam reservoir using multi-spectral resolution satellite imagery

Fatemeh Goroei<sup>1</sup>, Ommolbanin Bazrafshan<sup>2\*</sup>

<sup>1</sup> MSc in Watershed Management Science and Engineering, Department of Natural Resources Engineering, Faculty of Agriculture and Natural Resources Engineering, University of Hormozgan, Bandar Abbas, Iran

<sup>2</sup> Professor, Department of Natural Resources, Faculty of Agriculture and Natural Resources Engineering, University of Hormozgan, Bandar Abbas, Iran

## Abstract

### Introduction

Access to clean freshwater has become a critical global challenge due to pollution from anthropogenic activities such as urbanization and intensive agriculture. These pressures have significantly degraded lake water quality, increasing the risk of harmful algal blooms—a phenomenon that is exacerbated by climate change. Lakes, as multifunctional ecosystems supporting water supply, irrigation, and energy production, are particularly vulnerable to eutrophication. This process is primarily driven by excessive aquatic plant growth, quantified through chlorophyll-a (Chl-a) concentrations. As the dominant photosynthetic pigment in phytoplankton, Chl-a serves as a sensitive biomarker for nutrient loading and lake trophic status due to its rapid response to environmental shifts. Water surface temperature (SST) and suspended sediment concentration (SSC) are equally vital water quality parameters. SST profoundly influences the biogeochemical cycles of aquatic ecosystems, while turbidity—a measure of light-scattering suspended particles—reflects sediment dynamics and anthropogenic pollution. Remote sensing technologies, particularly satellite platforms like Sentinel-2, have emerged as powerful tools for synoptic water quality monitoring. This study evaluates the efficacy of Google Earth Engine (GEE) and Sentinel Application Platform (SNAP) in analyzing temporal variations of water quality parameters (Chl-a, SST, SSC) in Minab Dam Lake (2016–2023). The investigation further explores interrelationships between these variables and environmental drivers.

### Materials and Methods

This study evaluated the water quality of Minab Esteghlal Dam Lake using remote sensing techniques, integrating field data from the Hormozgan Regional Water Company with multi-sensor satellite imagery. Sentinel-2 MSI Level-2A and Landsat-8 OLI/TIRS Collection 2 Level-2 data were acquired from the Copernicus Open Access Hub (2016–2023) to analyze Chl-a, SST, and SSC. The Normalized Difference Water Index (NDWI) was applied to delineate water boundaries, followed by atmospheric correction of Sentinel-2 data using SEN2COR. GEE was used to facilitate large-scale temporal processing, while the SNAP enabled advanced spectral analysis, including Chl-a estimation via OC2/OC3 algorithms and SSC quantification using red-band reflectance. Landsat-8 thermal bands were used to derive SST through radiative transfer equations. Final outputs in TIFF format were visualized in ArcGIS with standardized symbology, ensuring accurate spatial representation of water quality dynamics. This integrated approach leveraged cloud-based (GEE) and desktop (SNAP/ArcGIS) platforms to optimize efficiency and precision in monitoring the lake's ecological parameters.

### Results and Discussion

The analysis demonstrated a declining trend in Minab Dam Lake's water quality during the study period. Both SNAP and GEE platforms consistently revealed seasonal Chl-a dynamics, with concentrations peaking in spring/summer (attributed to elevated SST and optimal phytoplankton growth conditions) and declining in autumn/winter (due to reduced temperature and solar radiation). SNAP exhibited superior performance in atmospheric correction and spatial detail extraction, achieving 15-20% higher accuracy than GEE in Chl-a quantification, with lower estimation errors (RMSE: 3.14 vs. GEE's 4.44). This precision stems from SNAP's advanced algorithmic parameter customization capabilities, making it ideal for localized, high-resolution studies. Conversely, GEE excelled in large-scale, long-term trend analysis, processing big data 40% faster through its cloud-computing infrastructure and machine learning tools, albeit with marginally reduced precision. The SST-Chl-a relationship exhibited nonlinear seasonality, with stronger correlations observed during warmer months. While SSC generally suppressed Chl-a concentrations through light attenuation, episodic nutrient inputs from sediment loads occasionally triggered transient phytoplankton blooms. Notably, SSC impacts were more

pronounced during colder months, exacerbating water quality degradation. These findings highlight the platforms' complementary strengths: SNAP for process-oriented studies requiring atmospheric precision, and GEE for synoptic, time-series investigations. The results underscore the importance of platform selection based on study objectives, whether high-precision local analysis or watershed-scale temporal monitoring.

## Conclusion

This study demonstrates the effectiveness of remote sensing platforms in monitoring the water quality dynamics of Minab Dam Lake, revealing a clear declining trend over the 2016–2023 period. The seasonal variability of Chl-a concentrations—peaking in spring/summer due to warmer SST and favorable growth conditions, then declining in autumn/winter—was consistently captured by both SNAP and GEE. However, their complementary strengths highlight the importance of platform selection based on research objectives: SNAP proved superior for localized, high-precision analysis, excelling in atmospheric correction (15–20% greater accuracy) and spatial detail extraction. Its customizable algorithms make it ideal for mechanistic studies requiring fine-tuned parameter adjustments. GEE enabled efficient large-scale and long-term assessments, reducing processing time by 40% through cloud-based workflows. While slightly less precise, its machine learning tools and data scalability are invaluable for trend analysis. The complex interplay between environmental drivers—such as the nonlinear SST-Chl-a relationship and the dual role of SSC as both light attenuators and nutrient sources—underscores the need for integrated monitoring approaches. These findings provide actionable insights for water resource management: SNAP can guide targeted mitigation of eutrophication hotspots, while GEE supports system-wide policy decisions. To enhance the monitoring and management of Minab Dam Lake, a hybrid approach combining high-precision SNAP analysis for localized eutrophication hotspots and GEE-based large-scale trend assessment is recommended. Targeted mitigation strategies, such as reducing agricultural runoff and controlling sediment inflow, should be prioritized in critical zones identified through SNAP's detailed Chl-a mapping. Meanwhile, GEE's rapid processing capabilities can support real-time policy adjustments by tracking seasonal water quality variations across the entire watershed. Additionally, integrating in-situ sensors with remote sensing data can improve predictive modeling, particularly under climate change-induced stressors. Finally, stakeholder collaboration between environmental agencies, local communities, and policymakers is essential to implement sustainable water management practices, ensuring long-term ecological balance in the lake ecosystem.

**Keywords:** Temporal monitoring, satellite image processing, chlorophyll-a, environmental factors

**Article Type:** Research Article

## Acknowledgement

We would like to express our sincere gratitude to the Regional Water Company of Hormozgan Province for the financial and logistical support that significantly contributed to the research project.

## Conflicts of interest

The authors of this article declared no conflict of interest regarding the authorship or publication of this article.

## Data Availability Statement:

The datasets are available upon a reasonable request to the corresponding author

## Authors' contribution

**Fatemeh Goroe:** Writing - original draft preparation, Software, Formal analysis, **Ommolbanin Bazrafshan:** Resources, Manuscript and investigation, Visualization, Supervision, Conceptualization, methodology

\*Corresponding Author, E-mail: o.bazrafshan@hormozgan.ac.ir

**Citation:** Goroe, F., Bazrafshan, O. 2025. Comparative Performance Analysis of Google Earth Engine and SNAP Platforms for Estimating Water Quality Parameters in Minab Dam Reservoir Using Multi-Spectral Resolution Satellite Imagery, *Water and Soil Management and Modelling*, 5(3), 104-122.

doi: 10.22098/mmws.2025.16743.1557

Received: 06 February 2025, Received in revised form: 27 May 2025, Accepted: 30 May 2025, Published online: 23 September 2025

Water and Soil Management and Modeling, Year 2025, Vol. 5, No. 3, pp. 104-122.

Publisher: University of Mohaghegh Ardabili

© Author(s)





## مقایسه عملکرد سامانه های Google Earth Engine و SNAP در تخمین پارامترهای کیفی آب دریاچه سد میناب با استفاده از تصاویر ماهواره ای چندتفکیک مکانی

فاطمه گروئی<sup>۱</sup>، ام البنین بذرافشان<sup>۲\*</sup>

<sup>۱</sup> دانش آموخته کارشناسی ارشد علوم و مهندسی آبخیزداری، گروه مهندسی منابع طبیعی، دانشکده کشاورزی و منابع طبیعی، دانشگاه هرمزگان، بندرعباس، ایران

<sup>۲</sup> استاد، گروه مهندسی منابع طبیعی، دانشکده کشاورزی و منابع طبیعی، دانشگاه هرمزگان، بندرعباس، ایران

### چکیده

این پژوهش به مقایسه کارایی سامانه Google Earth Engine (GEE) و Sentinel Application Platform (SNAP) در بررسی تغییرات زمانی کیفیت آب دریاچه سد میناب و ارتباط آن با متغیرهای محیطی شامل دمای آب (SST)، رسوبات معلق (SSC) و غلظت کلروفیل-a پرداخته است. داده های این پژوهش طی دوره زمانی ۲۰۱۶ تا ۲۰۲۳ جمع آوری و تحلیل شده اند. نتایج نشان داد که کیفیت آب دریاچه سد میناب طی دوره مورد بررسی روندی کاهشی داشته است. به طور خاص، غلظت کلروفیل-a در فصل های بهار و تابستان به دلیل افزایش SST افزایش یافته، در حالی که در پاییز و زمستان به دلیل کاهش دما و نور خورشید، کاهش یافته است. همچنین، تاثیر رسوبات معلق SSC بر کاهش کیفیت آب به ویژه در ماه های سردتر مشهود بوده است. مقایسه نتایج نشان داد، SNAP در تصحیح اتمسفری و استخراج جزئیات مکانی (با دقت ۲۰-۱۵ درصد بالاتر) از GEE عملکرد برتری دارد، در مقابل GEE در پردازش داده های بلندمدت و کلان (کاهش ۴۰ درصد زمان پردازش) نسبت به SNAP کارآمدتر بود. SNAP تغییرات فصلی کلروفیل-a را با خطای ۴/۳۱ شناسایی کرد، در حالی که این مقدار برای GEE برابر با ۴/۴۴ برآورد نمود. لذا SNAP برای مطالعات دقیق و محلی (با قابلیت تنظیم پارامترهای الگوریتمی) مناسب تر است در حالی که GEE به دلیل دسترسی به داده های ابری و ابزارهای یادگیری ماشین، برای تحلیل های گسترده و سریع گزینه بهینه ای است. این پژوهش نشان داد که عوامل محیطی متعدد مانند دما، نور، مواد مغذی، و جریانات آبی تأثیرات پیچیده ای بر تولید فیتوپلانکتون ها و در نتیجه غلظت کلروفیل-a دارند و تنها نمی توان به یک عامل خاص برای توضیح تغییرات غلظت کلروفیل-a تکیه کرد. در نهایت، یافته ها نشان دهنده اهمیت کاربرد و تلفیق قابلیت های این دو سامانه (GEE مقیاس پذیر و SNAP صحت) برای پایش و مدیریت منابع آب است.

**واژه های کلیدی:** پایش زمانی، پردازش تصاویر ماهواره ای، کلروفیل-a، عوامل محیطی

### نوع مقاله: پژوهشی

\*مسئول مکاتبات، پست الکترونیکی: o.bazrafshan@hormozgan.ac.ir

**استناد:** گروئی، ف، بذرافشان، الف. ۱۴۰۴. مقایسه عملکرد سامانه های Google Earth Engine و SNAP در تخمین پارامترهای کیفی آب دریاچه سد میناب با استفاده از تصاویر ماهواره ای چندتفکیک مکانی. *مدل سازی و مدیریت آب و خاک*، ۵(۳)، ۱۰۴-۱۲۲. doi: 10.22098/mmws.2025.16743.1557

تاریخ دریافت: ۱۴۰۳/۱۱/۱۸، تاریخ بازنگری: ۱۴۰۴/۰۳/۰۶، تاریخ پذیرش: ۱۴۰۴/۰۳/۰۹، تاریخ انتشار: ۱۴۰۴/۰۷/۰۱

*مدل سازی و مدیریت آب و خاک*، سال ۱۴۰۴، دوره ۵، شماره ۳، صفحه ۱۰۴ تا ۱۲۲.

© نویسندگان

ناشر: دانشگاه محقق اردبیلی



## ۱- مقدمه

در سال‌های اخیر، اهمیت مخازن سدها به‌عنوان منابع حیاتی تأمین آب آشامیدنی و کشاورزی، و همچنین تولید انرژی، کشتیرانی و تفریحات آبی بیش از پیش مورد توجه قرار گرفته است. این اکوسیستم‌های آبی علاوه بر کاربردهای اقتصادی و محیط زیستی، نقش کلیدی در تنظیم چرخه‌های آبی، کنترل سیلاب، و حفظ تنوع زیستی ایفا می‌کنند (Li et al., 2024b; Kowe et al., 2023). با این حال، تأثیر فعالیت‌های انسانی نظیر شهرنشینی، کشاورزی، و صنعتی‌سازی باعث کاهش کیفیت آب دریاچه‌ها شده است. در این میان، تهاجم جلبک‌ها یکی از مهم‌ترین پیامدهای منفی تغذیه‌گرایی دریاچه‌هاست که به‌دلایلی هم‌چون افزایش مواد مغذی، دمای بالا، و کاهش جریان آب رخ می‌دهد. این پدیده در دهه‌های اخیر به یکی از جدی‌ترین چالش‌های محیط‌زیستی تبدیل شده است که به‌طور مستقیم بر اکولوژی و کیفیت آب تأثیر می‌گذارد (Zhao et al., 2024). تغذیه‌گرایی مخزن‌ها و دریاچه‌ها تحت عنوان موضوعی مهم در سال ۱۹۷۰ مورد بررسی قرار گرفت. این پدیده اغلب به رشد بیش از حد گیاهان آبی هم‌چون جلبک و علف‌های هرز مربوط می‌شود (Liu et al., 2023). کلروفیل-a یک رنگدانه فتوسنتزی اولیه است که در تمام گیاهان آبی و خشکی یافت می‌شود (Jang et al., 2024) و به‌عنوان شاخصی از فراوانی فیتوپلانکتون و زیست‌توده جلبکی، به‌دلیل واکنش سریع و حساسیت به عوامل محیطی مختلف، اغلب برای ارزیابی سطوح تغذیه‌ای دریاچه‌ها و وضعیت سلامت کلی دریاچه‌ها استفاده می‌شود (Li et al., 2024a).

دمای آب (SST)<sup>۱</sup> یک عامل حیاتی است که بر محیط اکولوژیکی رودخانه‌ها، دریاچه‌ها، اقیانوس‌ها و دیگر بدنه‌های آبی تأثیر می‌گذارد. علاوه بر این، دمای آب بر متابولیسم، رفتار و ساختار و پویایی شبکه‌های تغذیه‌ای، توزیع گونه‌ها و دگرگونی‌های شیمیایی درون دریاچه تأثیر می‌گذارد (Kong et al., 2024; Korver et al., 2024). تغییرات مکانی-زمانی متغیرهای اقلیمی به‌ویژه دما یکی از بارزترین نشانه‌های تغییر اقلیم در یک منطقه است (Shi et al., 2024). کدورت (SSC)<sup>۲</sup>، یک ویژگی فیزیکی است که به‌عنوان وجود ذرات معلق که شفافیت آب را کاهش می‌دهد، یک پارامتر مهم در پایش کیفیت آب با منابع متنوع از جمله فرایندهای طبیعی و فعالیت‌های انسانی است (Parra et al., 2024). ارزیابی کدورت برای درک انتقال رسوب و بار آلودگی در حوضه‌های آبخیز کوچک ضروری است.

غلظت ذرات معلق، رنگ، حلالیت و مواد آلی ممکن است بر کدورت آب تأثیر بگذارد (Singh et al., 2014).

سنجش از دور یکی از روش‌های نوین و کارآمد در ارزیابی پارامترهای محیطی آب است. به‌ویژه در مناطقی که دسترسی به نمونه‌برداری میدانی دشوار است، بسیار مفید واقع می‌شود (Lioumbas et al., 2023). امروزه این ابزار، روشی مؤثر برای مشاهده و تخمین غلظت کلروفیل-a در محیط‌های آبی مختلف، از جمله اقیانوس‌های باز، مناطق ساحلی، دریاچه‌های داخلی و رودخانه‌ها پدیدار شده است (Wang and Chen, 2024; Shi et al., 2024). در میان ابزارهای سنجش از دور، تصاویر سنجنده ستینیل-۲ و لندست-۸ از مهم‌ترین منابع داده در پایش کیفیت آب محسوب می‌شوند. سنجنده چندطیفی سنجنده ستینیل-۲ و سنجنده OLI، لندست-۸ با تفکیک مکانی بالا، امکان شناسایی و تخمین پارامترهای مختلف آب از جمله SST، SSC و کلروفیل-a را فراهم می‌کنند (Adjovu et al., 2023).

Karimi et al. (2024) به مطالعه اثربخشی ماهواره‌های ستینیل-۲ و لندست-۸ در تخمین غلظت کلروفیل-a در دریاچه چیتگر تهران برای پایش اوتروفیکاسیون پرداختند. براساس نتایج الگوریتم Two Band به‌عنوان بهترین مدل برای لندست-۸ شناسایی شد، در حالی که الگوریتم‌های 2BAND و 2BAND بهترین مدل‌ها برای داده‌های ستینیل-۲ بودند. به‌طور کلی، هر دو ماهواره عملکرد مناسبی از خود نشان دادند و می‌توانند به‌طور مؤثر غلظت کلروفیل-a را در دریاچه چیتگر تخمین بزنند. et al. (2024) Salls به بررسی گسترش کاربرد پایش بر کلروفیل ستینیل-۲ در دریاچه‌های ایالات متحده پرداختند. این مطالعه از دو الگوریتم حداکثر شاخص کلروفیل (MCI)<sup>۳</sup> و شاخص کلروفیل تفاوت نرمال شده (NDCI) برای تجزیه و تحلیل داده‌های چندطیفی و کمی‌کردن سطوح کلروفیل-a در ۱۰۳ دریاچه در ایالات متحده استفاده کرد. نتایج نشان داد که کارایی MCI بهتر از NDCI است. Zhao et al. (2024) به پژوهشی به بررسی تجزیه و تحلیل دینامیکی غلظت کلروفیل-a در دریاچه‌ها در مقیاس جهانی با استفاده از تصاویر ستینیل-۲ در GEE پرداختند. به‌طور کلی نتایج این مطالعه نشان داد که کلروفیل-a با موفقیت توسط تصاویر بازتابی ستینیل-۲ تعبیه شده در GEE قابلیت ارزیابی دارند. Johansen et al. (2024) به ارزیابی گسترده‌ای از تصاویر ستینیل-۲ و GEE برای نقشه‌برداری کلروفیل-a در سراسر ایالات متحده پرداختند. این پژوهش نشان داد که الگوریتم‌های 2BDA و NDCI برای نقشه‌برداری سطوح

<sup>3</sup> Normalized Difference Chlorophyll Index

<sup>4</sup> Maximum Chlorophyll Index

<sup>1</sup> SST: Sea Surface Temperature

<sup>2</sup> Suspended Sediment concentration

استفاده از تصاویر سنجش از دور است. کم‌تر پژوهشی در گذشته به ارزیابی این تصاویر در بررسی متغیرهای کیفی دریاچه سد میناب پرداخته است.

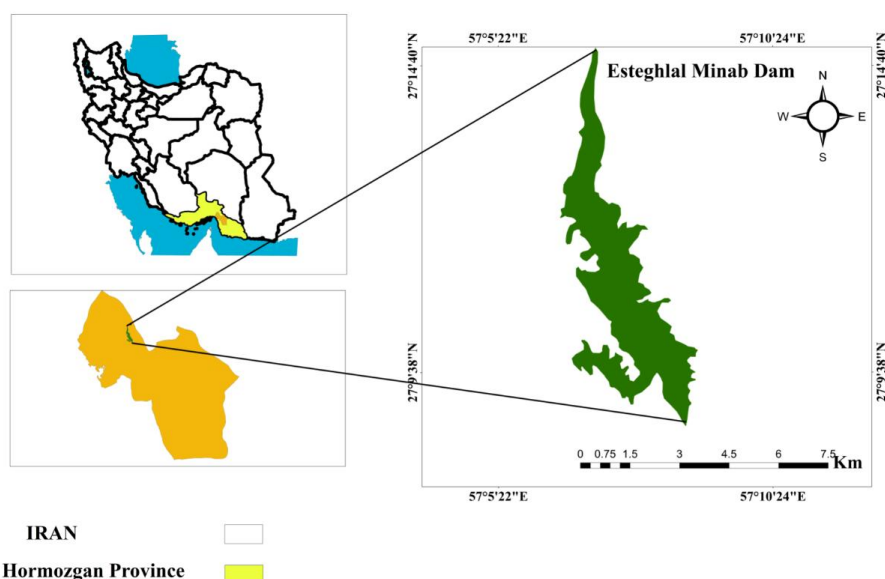
## ۲- مواد و روش‌ها

### ۲-۱- منطقه مورد مطالعه

سد استقلال میناب (شکل ۱) یکی از قدیمی‌ترین سدهای کشور است که در منطقه‌ای گرم و در ارتفاع کم از سطح دریا واقع شده است. این سد در سه کیلومتری شهرستان میناب در استان هرمزگان و ۱۲۰ کیلومتری شرق بندرعباس در ارتفاع ۵۰ متری از سطح دریا قرار دارد و حوضه آبخیز شامل رودخانه‌های جگین و رودان به وسعت ۹۵۰۰ کیلومتر مربع در شمال شرقی و شمال غربی آن است (Meimandi et al., 2024). حوضه آبخیز استقلال میناب یکی از بزرگ‌ترین و مهم‌ترین حوضه‌های آبخیز سواحل دریای عمان و خلیج فارس در استان است، که تقریباً ۶۰ درصد وسعت آن در استان کرمان و ۴۰ درصد در استان هرمزگان است. ساخت سد به‌عنوان مهم‌ترین سد در این حوضه در سال ۱۳۵۳ آغاز و در سال ۱۳۶۲ به پایان رسید و به‌عنوان منبع حیاتی تامین کننده ۵۰ درصد آب شرب بندرعباس عمل می‌کند. با این حال، سد با چالش‌های متعددی از جمله ورود فاضلاب از روستاهای بالادست، فرسایش در حوضه آبخیز، رواناب و شیرابه کشاورزی، فضولات حیوانی و غیره مواجه است که به‌شدت بر کیفیت آب تأثیر می‌گذارد (Imani et al., 2022).

کلروفیل-a با عملکرد ثابت در روش‌های مختلف میدانی و پنجره‌های زمانی مؤثرترین هستند. مطالعات متعدد نشان داده‌اند که رابطه بین کلروفیل-a، دمای سطح آب و غلظت رسوبات معلق یکی از پیچیده‌ترین و در عین حال مهم‌ترین روابط در اکولوژی آب‌های داخلی محسوب می‌شود. در این زمینه می‌توان به Li et al. (2023) اشاره نمود. ایشان در پژوهشی به مطالعه دریاچه دیانچی با استفاده از داده‌های سنتینل-۲ می‌پردازد. نتایج نشان داد که در محدوده دمایی بهینه ۲۰ تا ۲۵ درجه و غلظت رسوبات معلق پایین (SSC) کمتر از ۵۰ میلی‌گرم در لیتر، همبستگی مثبت قوی بین SST و کلروفیل-a وجود دارد. که نشان‌دهنده تأثیر مثبت دما بر رشد فیتوپلانکتون‌ها در غیاب محدودیت نوری است. با این حال، زمانی که غلظت رسوبات از آستانه ۱۰۰ میلی‌گرم در لیتر فراتر می‌رود، اثر دمای بهینه تا ۴۰ درصد کاهش می‌یابد. این پدیده عمدتاً ناشی از کاهش نفوذ نور و اختلال در فعالیت فتوسنتزی است، حتی در دماهای مطلوب، که بر اهمیت توجه همزمان به پارامترهای دما و کدورت در پیش‌بینی تولیدات اولیه تأکید می‌کند.

جمع‌بندی مرور منابع نشان می‌دهد، که الگوریتم‌های نسبت باند و کاربرد تصاویر چندتفکیکه مکانی با استفاده از تصاویر سنتینل-۲ و GEE می‌تواند ابزار ارزشمندی برای شناسایی و پایش بر شکوفایی مضر جلبکی در مقیاس بزرگ، به‌ویژه در مناطقی که جمع‌آوری داده‌ها محدود است، باشند. هدف از پژوهش حاضر مقایسه دو سنجنده معرفی شده در برآورد غلظت کلروفیل-a، کدورت و دمای سطح آب در دریاچه سد میناب با



شکل ۱- موقعیت مکانی و جغرافیایی سد استقلال میناب واقع در استان هرمزگان  
Figure 1. Location and geographical situation of Esteghlal Minab dam located in Hormozgan province

## ۲-۲- داده‌های مورد استفاده

در پژوهش حاضر از دو گروه داده استفاده شده است:

## ۲-۲-۱- داده‌های میدانی

داده‌های میدانی پارامترهای کیفی آب از قبیل غلظت کلروفیل-a، دمای سطح آب و غلظت مواد محلول در آب برای دریاچه سد میناب طی سال ۱۳۹۸ الی ۱۴۰۲ توسط شرکت آب منطقه‌ای هرمزگان جمع‌آوری شد. داده‌ها از عمق ۳۰ سانتی‌متری برداشت شد. پس از صاف کردن نمونه‌ها با کاغذ صافی، غلظت کلروفیل-a با استفاده از روش USM که یک روش آمریکایی برای استخراج کلروفیل-a است، تعیین شد (Wang et al., 2020). در این روش پس از خردکردن صافی، ۲ تا ۳ میلی‌متر استن ۹۰ درصد به نمونه اضافه شد. سپس حجم کل محلول را استون ۹۰ درصد به ۵ میلی‌لیتر رسانده و به مدت ۲۰ دقیقه در سانتریفیوژ با دور ۵۰۰ زلال شد. در مرحله بعد اسپکتروفتومتر با استفاده از استون ۹۰ درصد صفر شده و با استفاده از سل یک سانتی‌متری دانسیته نوری در طول موج‌های ۶۴۷، ۶۶۴ و ۶۳۰ نانومتر اندازه‌گیری شد. رابطه ۱ و ۲ برای تعیین غلظت کلروفیل-a مورد استفاده قرار گرفت. غلظت کلروفیل-a برحسب میلی‌گرم بر لیتر بیان می‌شود.

$$chl a = 11.85(OD_{664}) - 1.54(OD_{647}) - 0.08(OD_{630}) \quad (1)$$

در رابطه ۱،  $OD_{664}$  دانسیته نوری در طول موج ۶۶۴؛  $OD_{647}$  دانسیته نوری در طول موج ۶۴۷؛  $OD_{630}$  دانسیته نوری در طول موج ۶۳۰ است.

## جدول ۱- موقعیت ایستگاه‌های نمونه‌برداری

Table 1. The locations of sampling stations

| Station No. | Longitude   | Latitude    |
|-------------|-------------|-------------|
| 1           | 57° 07' 02" | 27° 09' 54" |
| 2           | 57° 07' 03" | 27° 09' 52" |
| 3           | 57° 06' 48" | 27° 09' 53" |
| 4           | 57° 06' 52" | 27° 09' 53" |
| 5           | 57° 06' 58" | 27° 09' 56" |
| 6           | 57° 06' 46" | 27° 09' 57" |
| 7           | 57° 06' 46" | 27° 09' 50" |

## ۲-۲-۲- داده‌های ماهواره‌ای

در این پژوهش از سنجنده‌های Sentinel-2 Level-2A MSI و Landsat-8 OLI/TIRS(Collection2- Level2) به ترتیب برای تخمین مقدار غلظت کلروفیل-a، SST و SSC استفاده شد. ماهواره سنتینل-۲ در ۲۳ ژوئن ۲۰۱۵ توسط آژانس فضایی اروپا به‌عنوان دومین ماهواره از سری سنتینل به فضا پرتاب شد. این ماهواره به‌عنوان بخشی از برنامه کوپرنیک، مأموریتش را برای

اخذ تصاویری با وضوح بالا و با هدف بهبود خدمات مختلف از جمله بررسی تغییرات پوشش زمین، مدیریت بلایای طبیعی و پایش جنگل‌ها انجام می‌دهد. سنتینل-۲ مجهز به سنجنده‌ای پیشرفته به نام MSI است (Moshayedi and Jahangir, 2021). لندست-۸ ماهواره آمریکایی دیدبان زمین است که در ۱۱ فوریه ۲۰۱۳ به فضا پرتاب شد. این ماهواره هر ۱۶ روز یک‌بار، یک دور کامل از زمین را تصویربرداری و ضبط می‌کند و دارای تفکیک مکانی ۳۰ متر است. داده‌های Level 2A معمولاً شامل تصاویر سطح زمین هستند که تصحیح اتمسفری و رادیومتریک روی آن‌ها اعمال شده است. این داده‌ها به‌طور کلی بازتاب سطحی<sup>۱</sup> را ارائه می‌دهند که برای تحلیل‌های صحیح‌تر مانند بررسی پوشش گیاهی، تغییرات کاربری اراضی و سایر مطالعات محیطی مناسب هستند (Obata and Yoshioka, 2024). داده‌های Collection 2 Level 2 نیز شامل تصاویر سطح زمین با تصحیح اتمسفری و رادیومتریک هستند. این مجموعه داده‌ها معمولاً به‌روزرسانی‌هایی در الگوریتم‌های پردازش و تصحیح دارند که دقت و قابلیت اطمینان داده‌ها را افزایش می‌دهند (Nazeer et al., 2021).

تصحیح رادیومتریک برای حذف اثرات ناشی از تغییرات در سیستم تصویربرداری (مانند نویز سنسور، خطای کالیبراسیون و غیره) و تصحیح اتمسفر برای حذف اثرات جو زمین (مانند پراکندگی و جذب نور توسط ذرات و گازهای موجود در جو) انجام می‌شود. در داده‌های مذکور تصحیح‌های لازم صورت گرفته و در بیش‌تر موارد نیازی به اعمال تصحیح مجدد نیست (Sola et al., 2018).

در این پژوهش ابتدا داده‌های لندست-۸ در طی دوره آماری ۸ ساله یعنی از سال ۲۰۱۶ تا ۲۰۲۳ از سایت مربوطه<sup>۲</sup> دانلود شد و برای تخمین غلظت کلروفیل-a، محاسبه دمای سطح آب، برآورد میزان رسوبات معلق در سطح آب، جدا سازی پهنه‌های آبی از غیرآبی توسط شاخص NDWI<sup>۳</sup>، فراخوانی تصاویر ماهواره‌های لندست-۸ و سنتینل-۲ اعمال فیلترهای زمانی و مکانی، اعمال فیلتر ابر و خروجی گرفتن از GEE و نرم‌افزار SNAP<sup>۴</sup> استفاده شد.

## ۲-۳- رویه‌های محاسبات

برای تعیین ویژگی‌های کیفی آب دریاچه سد میناب از داده‌های ماهواره‌ای و محیط‌های کاری مختلف (GEE و SNAP) استفاده شد.

<sup>3</sup> Normalized Difference Water Index

<sup>4</sup> Sentinels Application Platforms

<sup>1</sup> Surface Reflectance

<sup>2</sup> <https://data.space.copernicus.eu/>

## ۲-۳-۱- الگوریتم‌های مورد استفاده در این پژوهش

GEE، یکی از جدیدترین پلتفرم‌های محاسباتی ابری، یک سامانه پیشرفته تحلیل مکانی است که با بهره‌گیری از یک مخزن عظیم داده‌های ماهواره‌ای، پردازش بلادرنگ را امکان‌پذیر می‌سازد (Sherjah et al., 2023). این سامانه تعداد زیادی مجموعه داده در سرور خود دارد که تمام تصحیحات رادیومتریک، هندسی، اتمسفری و سایر اعوجاجات آن‌ها حذف شده و در قالب مجموعه داده‌های در دسترس هستند که دیگر، تصاویر نیازی به این اصلاحات ندارند (Nazeer et al., 2021). SNAP یک نرم‌افزار متن باز است که در سال ۲۰۱۴ طراحی شده و به‌ویژه برای پردازش داده‌های سنجنده سری سنتینل و داده‌های راداری کاربرد دارد (Moshayedi and Jahangir, 2021).

## ۲-۳-۲- الگوریتم‌های تخمین غلظت کلروفیل-a

## ۲-۳-۲-۱- برآورد غلظت کلروفیل-a در GEE

در این پژوهش از داده‌های سنجنده چندطیفی ماهواره سنتینل-۲ برای برآورد غلظت کلروفیل-a استفاده شد. تصاویر منحصر به فرد ارائه شده توسط این ماهواره دارای توان تفکیک مکانی ۱۰، ۲۰ و ۶۰ متری با ۱۳ باند طیفی است که محدوده‌های طیفی مرئی، مادون قرمز طول موج کوتاه و مادون قرمز نزدیک را پوشش می‌دهد. پردازش داده‌های سنتینل-۲ در منابع آبی با GEE از طریق کد نویسی تحت جاوا با وضوح مکانی ۱۰ متر انجام شد و همین‌طور پردازش سری‌زمانی داده‌ها در GEE انجام شد. این الگوریتم با استفاده از روابط بازتابی سنجش از دور و روابط تجربی در محدوده طیف آبی تا سبز، غلظت کلروفیل-a نزدیک به سطح را بر حسب میلی‌گرم بر متر مکعب برآورد شد. بعد از تهیه و پردازش تصاویر، میانگین غلظت کلروفیل در نرم‌افزار SNAP برآورد شد. کلروفیل-a را می‌توان از B3/B4 با استفاده از رابطه زیر محاسبه کرد:

$$Chl - a = 0.80 \times \exp(0.35 \times B_3/B_4) \quad (2)$$

Chl-a نشان‌دهنده غلظت کلروفیل-a؛ تابع نمایی  $\exp$  به‌منظور محاسبه رشد نمایی نسبت بازتاب باند سبز به قرمز استفاده می‌شود. عبارت B3/B4 نسبت بازتاب باند سبز به بازتاب باند قرمز را در سنجنده سنتینل-۲ نشان می‌دهد. از این معادله برای تخمین غلظت کلروفیل-a در تصاویر ماهواره‌ای استفاده شده است (Ha et al., 2017). این نرم‌افزار از روش‌های پردازش ابری (Cloud Computing) استفاده می‌کند که امکان پردازش سریع و کارآمد حجم زیادی از داده‌ها را فراهم می‌کند.

## ۲-۳-۲-۲- برآورد غلظت کلروفیل-a در SNAP

پروداکت Level-2A MSI سنجنده سنتینل-۲ از سال ۲۰۱۶ تا ۲۰۲۳ از سایت <https://dataspace.copernicus.eu> دانلود شد و به‌منظور تهیه و آماده‌سازی تصاویر، پردازش تصاویر و برآورد میانگین غلظت کلروفیل از نرم‌افزار SNAP استفاده شد. Sen2Cor یک الگوریتم پردازش تصاویر ماهواره‌ای است که به‌طور خاص برای تصحیح اتمسفری داده‌های سنتینل-۲ طراحی شده و خروجی آن محصول Level-2A است. این الگوریتم، بازتاب سطحی را محاسبه می‌کند و پارامترهای اتمسفری مانند اثر آئروسول‌ها و بخار آب را حذف می‌نماید (Wang et al., 2020). مراحل پردازش الگوریتم Sen2Cor در ادامه ارائه شده است.

۱. پیش‌پردازش Level-1C: بررسی متادیتا و اعمال پارامترهای هندسی و رادیومتریک روی داده‌های TOA.
۲. تخمین بخار آب: محاسبه غلظت بخار آب با استفاده از باندهای ۹۴۰ نانومتر و ۱۱۳۰ نانومتر.
۳. محاسبه ضخامت ایتیکی آئروسول (AOT): برآورد میزان آئروسول با مدل‌های انتقال تابش (مثل SMAC).
۴. محاسبه بازتاب سطحی (BOA): حذف اثرات Rayleigh و گازهای جوی برای محاسبه بازتاب واقعی سطح زمین.
۵. تولید Level-2A و طبقه‌بندی صحنه: خروجی شامل تصاویر BOA و نقشه طبقه‌بندی (SCM) برای شناسایی ابر، آب، پوشش گیاهی و غیره.

## ۲-۳-۲-۳- الگوریتم‌های تخمین دما

برای برآورد دمای سطح آب از داده‌های سنجنده TIRS ماهواره لندست-۸ مجموعه داده Level 2 - Collection 2 و الگوریتم پنجره مجزا (Split Window) استفاده شد. این الگوریتم به‌دلیل دقت بالا در کاهش اثرات جو و تطابق با باندهای حرارتی لندست-۸ (باندهای ۱۰ و ۱۱)، روشی متداول در مطالعات سنجش از دور محسوب می‌شود (Seenipandi et al., 2021). مراحل پردازش داده‌ها به شرح زیر است:

الف: تبدیل مقادیر دیجیتالی (DN) به رادیانس طیفی با استفاده از رابطه ۳:

$$L_{\lambda} = M_L * Q_{cal} + A_L \quad (3)$$

$L_{\lambda}$ : مقدار رادیان طیفی  $(\frac{W}{m^2 \times sr \times \mu m})$ ;  $M_L$ : ضریب مقیاس‌گذاری ضربی تشعشع برای باند (the ) nfrom BAND\_MULT\_BAND\_ (metadata)  
 $A_L$ : ضریب مقیاس‌گذاری افزایشی تشعشع برای باند (the ) nfrom BAND\_ADD\_BAND\_ (metadata)  
 $Q_{cal}$ : مقدار پیکسل در DN است.  
 ب: تبدیل رادیانس به دمای روشنایی (BT):

در اینجا،  $S^2$  میانگین مربعات خطای رگرسیون تبدیل‌شده (in log-10 units) و  $X$  باند یا نسبت باند است. در آخر مدل‌سازی SSC به وسیله رابطه زیر انجام شد که در آن،  $X$  برابر است با نسبت  $\frac{B3}{B2}$ .

$$SSC = 30.03 X^{3.3187} \quad (10)$$

مدل SSC به‌طور مؤثری مقادیر رسوبات معلق کم‌تر از ۲۰ میلی‌گرم در لیتر را پیش‌بینی می‌کند و مقادیر بالاتر از این مقدار با دقت کم‌تری برآورد می‌کند. انتخاب این مدل به‌دلیل سادگی، قابلیت تفسیر و تطابق خوب آن با داده‌های میدانی است. مطالعات پیشین نشان داده‌اند که رابطه‌ی نمایی می‌تواند به‌طور مؤثر تغییرات SSC را در محدوده‌های مختلف پیش‌بینی کند. از طرفی از آن‌جا که مدل نمایی در برخی موارد منجر به کم‌برآوردی مقادیر SSC می‌شد، از یک عامل تصحیح سوگیری (CF) استفاده شد. این عامل بر اساس میانگین مربعات خطای رگرسیون محاسبه می‌شود و به بهبود دقت پیش‌بینی‌ها کمک می‌کند (Hernández-Cruz et al., 2019).

## ۲-۴- اعمال شاخص نرمال شده تفاوت پهنه‌های آبی (NDWI)

شاخص NDWI یک شاخص ساده و کارآمد برای شناسایی و اندازه‌گیری مناطق آبی است. این شاخص از باند سبز مرئی و باند مادون قرمز نزدیک برای برجسته کردن اجسام آبی استفاده می‌کند. محصول NDWI بدون بعد است و بین -۱ تا +۱ متغیر است، اگر این مقدار نزدیک به -۱ باشد نشان‌دهنده عدم وجود آب است. در حالی که اگر مقدار این شاخص نزدیک به +۱ باشد نشان‌دهنده وجود آب است (Hegy and Agapiou, 2023). این شاخص برای سنجنده سنتینل-۲ از رابطه‌های زیر به‌دست می‌آید:

$$NDWI = (Green - NIR) / (Green + NIR) \quad (11)$$

$$NDWI = (B3 - B8) / (B3 + B8) \quad (12)$$

Green نشان‌دهنده باند سبز در تصویرهای ماهواره‌ای است که بیش‌ترین بازتاب را برای آب دارد و NIR نشان‌دهنده باند مادون قرمز با طول موج کوتاه است.

## ۲-۵- روش‌های ارزیابی صحت

در پژوهش حاضر، از خطای جذر میانگین مربعات، میانگین قدرمطلق خطا و ضریب همبستگی برای ارزیابی دقت مدل‌های برآورد کلروفیل-a استفاده شده است. که در ادامه روابط آن ارائه شده است.

برای تبدیل رادیانس طیفی ( $L_\lambda$ ) به دمای روشنایی BT (برحسب کلوین) از رابطه زیر استفاده می‌شود:

$$T = \frac{K2}{\ln\left(\frac{K1}{L_\lambda} + 1\right)} \quad (4)$$

T: دمای مؤثر برحسب درجه کلوین؛  $L_\lambda$ : رادیان طیفی  $\left(\frac{W}{m^2 \times sr \times \mu m}\right)$ ؛ K1 و K2 ثابت دما برحسب درجه کلوین است. فرآیند تبدیل مقدار دمای مؤثر (درجه کلوین) به مقدار دمای مؤثر (درجه سانتی‌گراد) با استفاده از رابطه ۵ انجام می‌شود:

$$T(^{\circ}C) = T(^{\circ}K) - 273 \quad (5)$$

$T(^{\circ}C)$ : مقدار دمای تابشی (درجه سانتی‌گراد)؛  $T(^{\circ}K)$ : مقدار دمای تابشی (درجه کلوین) است.

پ: محاسبه دمای سطح با الگوریتم پنجره مجزا: تکنیکی است که برای استخراج خودکار دمای سطح دریا و سطح زمین، بدون ابر از تابش‌های مشتق شده از ماهواره توسعه یافته‌است (رابطه ۶).

$$T_s = 0.038BT_{10} - ((BT_{10} - BT_{10}) \times 2.946) \quad (6)$$

$T_s$ : دمای سطح (درجه سانتی‌گراد)؛  $BT_{10}$ : مقدار دمای روشنایی (درجه سانتی‌گراد) باند ۱۰؛  $BT_{11}$ : مقدار دمای روشنایی (درجه سانتی‌گراد) باند ۱۱ هستند.

## ۲-۳-۲- الگوریتم‌های رسوبات معلق در آب<sup>۱</sup> SSC

در این مطالعه، ابتدا داده‌های میدانی غلظت رسوبات معلق (SSC) از سال ۲۰۱۹ تا ۲۰۲۳ جمع‌آوری شد و هم‌زمان مقادیر بازتاب و نسبت باندهای تصاویر ماهواره‌ای لندست-۸ استخراج شد. با تحلیل همبستگی بین این داده‌ها، یک مدل تجربی نمایی توسعه یافت که رابطه بین متغیرهای ماهواره‌ای و SSC میدانی را توصیف می‌کند (رابطه ۷). ضرایب مدل با روش رگرسیون حداقل مربعات معمولی محاسبه شد (رابطه ۸)، اما نتایج نشان داد که مدل اولیه تمایل به کم‌برآوردی دارد. به‌همین منظور، یک ضریب تصحیح سوگیری<sup>۲</sup> (CF) اعمال شد و در نهایت SSC تصحیح‌شده با ترکیب مدل نمایی و این ضریب تصحیح محاسبه شد (رابطه ۹). این روش امکان برآورد دقیق‌تر غلظت رسوبات معلق را از داده‌های سنجش از دور فراهم می‌سازد (Ondrusek et al., 2012).

$$SSC = aX^b \quad (7)$$

$$CF = \exp(2.651 \times S^2) \quad (8)$$

$$SSC_{Correct} = 10^a \times SCC \times CF \quad (9)$$

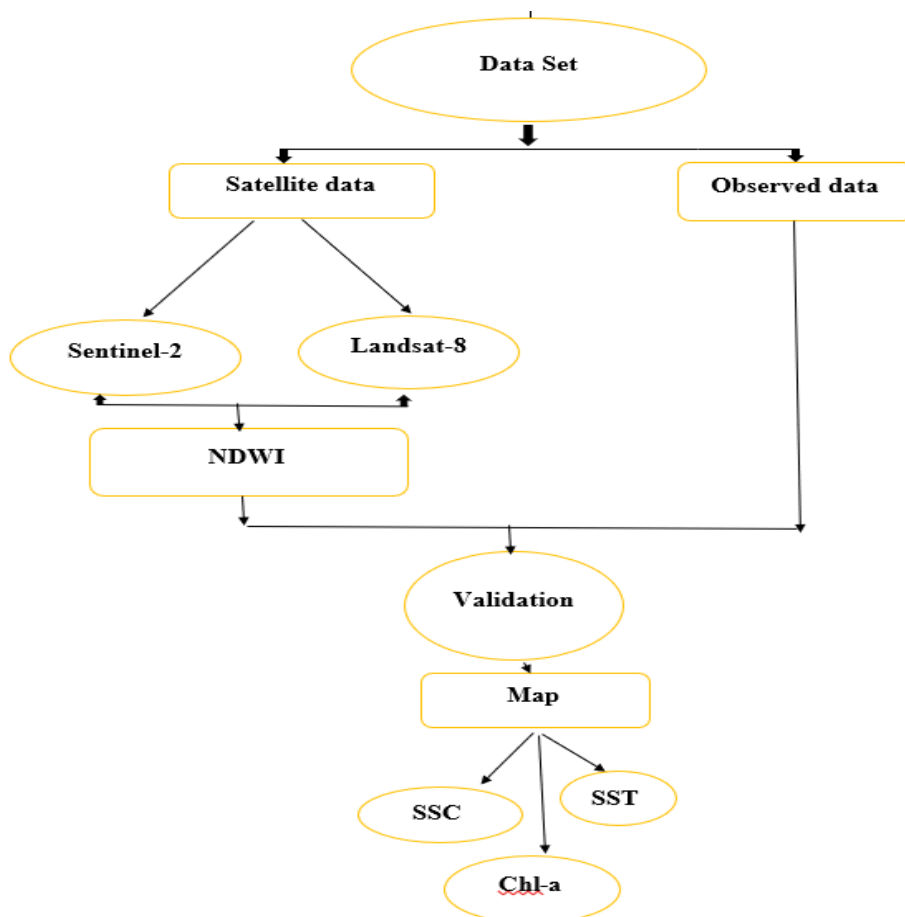
<sup>2</sup> Correct factor

<sup>1</sup> Suspended sediment concentration

$O_i$  داده‌های مشاهده شده (متغیر واقعی)؛  $P_i$  داده‌های پیش‌بینی شده و  $n$  تعداد داده‌ها هستند. همچنین، فرایند کلی انجام پژوهش در شکل ۲ نشان داده شده است.

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (O_i - P_i)^2}{n}} \quad (13)$$

$$MAE = \frac{\sum_{i=1}^n (O_i - P_i)^2}{n} \quad (14)$$



شکل ۲- فلوچارت روش تحقیق  
Figure 2. Flowchart of the research method

فصل‌ها نیز جداگانه ارائه شد. به‌طور کلی، غلظت کلروفیل در فصل‌های بهار و تابستان بیش‌تر و در فصل‌های پاییز و زمستان کم‌تر است (شکل ۵). نتیجه اصلی این نمودار نشان می‌دهد، تغییرات فصلی و ماهانه در غلظت کلروفیل-a به‌شدت به شرایط محیطی و تغییرات دما بستگی دارد. در فصل‌های گرم‌تر، غلظت کلروفیل افزایش و در فصل‌های سردتر کاهش می‌یابد. نتایج مطالعات Okati et al. (2019) نشان داد، بیش‌ترین میانگین غلظت کلروفیل-a در فصل‌های بهار و تابستان و کم‌ترین مقادیر مربوط به فصل‌های زمستان و پاییز است.

در فصل‌های بهار و تابستان غلظت کلروفیل-a به‌طور قابل توجهی افزایش می‌یابد. این افزایش می‌تواند ناشی از عوامل متعددی باشد، از جمله افزایش دما، مواد مغذی و نورخورشید به رشد جلبک‌ها کمک می‌کند. دمای بالاتر آب در فصل‌های گرم، شرایط مطلوبی را برای رشد جلبک‌ها فراهم می‌کند. از طرفی،

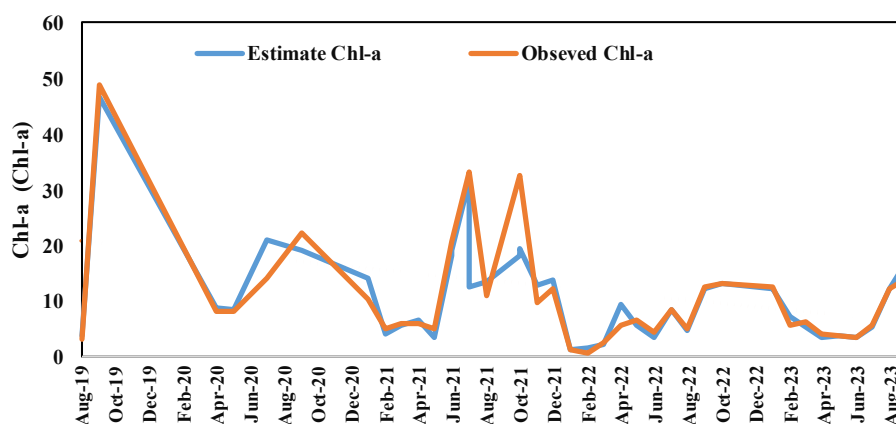
### ۳- نتایج و بحث

پس از آماده‌سازی و پردازش داده‌های میدانی و داده‌های ماهواره‌ای نتایج حاصل شد و داده‌های میدانی و ماهواره‌ای مورد مقایسه قرار گرفتند.

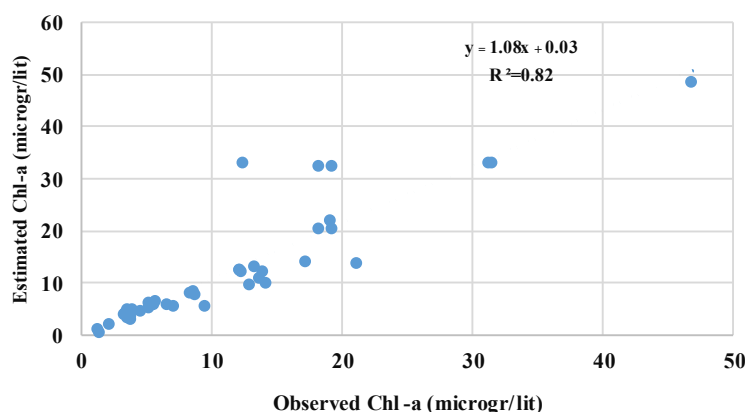
۳-۱- مقایسه کلروفیل-a اندازه‌گیری شده و برآورد شده در ماه‌ها و فصول مختلف با استفاده از سنتینل-۲ در SNAP  
شکل ۳، تغییرات غلظت کلروفیل-a اندازه‌گیری شده و برآورد شده و شکل ۴، همبستگی بین مقادیر اندازه‌گیری شده و برآورد شده را با استفاده از نرم‌افزار SNAP در همه ماه‌های اندازه‌گیری شده نشان می‌دهد. براساس شکل ۴، همبستگی قابل‌قبولی  $(R^2=0.82)$  بین مقادیر اندازه‌گیری شده و برآورد شده وجود دارد. لازم به ذکر است که مقادیر به‌ازای تمام ماه‌های اندازه‌گیری است. لذا برای بررسی همبستگی بین مقادیر برآورد شده، نمودارهای

می‌کند. در فصل‌های پاییز و زمستان غلظت کلروفیل-a کاهش می‌یابد. که به دلیل کاهش دما، کاهش نور خورشید و کاهش ورود مواد مغذی است (Wang et al., 2024).

افزایش فعالیت‌های کشاورزی و رواناب‌های ناشی از بارش‌های فصلی می‌تواند منجر به ورود مقادیر بیش‌تری از مواد مغذی (مانند نیترات و فسفات) به دریاچه شود و نور خورشید در تابستان به دلیل طولانی‌تر بودن روزها و شدت بیش‌تر نور خورشید در فصل‌های گرم، فرآیند فتوسنتز را تسریع می‌کند و به رشد جلبک‌ها کمک



شکل ۳- تغییرات کلروفیل-a اندازه‌گیری شده و برآورد شده طی دوره آماری ۲۰۱۶ تا ۲۰۲۳ با استفاده از SNAP در سنجنده سستینل-۲  
Figure 3. Measured and estimated chlorophyll-a changes during the statistical period of 2016 to 2023 using SNAP in Sentinel-2



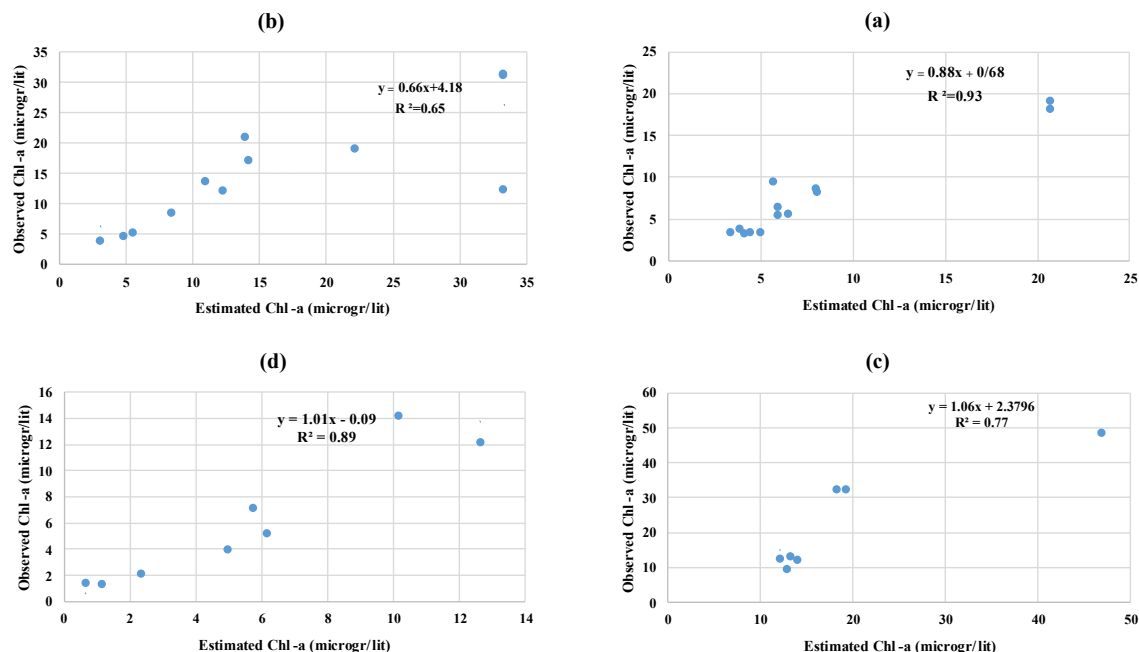
شکل ۴- همبستگی بین مقادیر اندازه‌گیری شده و برآورد شده کلروفیل-a با استفاده از SNAP در سنجنده سستینل-۲  
Figure 4. Correlation between the observed and estimated Chl-a using SNAP in Sentinel-2

دارد (۰/۸۹)، اگرچه MAE (۱/۱۳) و RMSE (۱/۶۲) نشان می‌دهند که خطاهای مدل هنوز وجود دارند. اما همبستگی متوالی در مقیاس ماهانه به‌طور متوسط عملکرد مناسبی دارد، با همبستگی (۰/۸۲) و MAE و RMSE در محدوده قابل‌قبول (۲/۵۰) و (۴/۹۳) است. در مجموع، مدل بهترین عملکرد خود را در بهار و زمستان نشان می‌دهد و عملکرد آن در تابستان و پاییز نیاز به بهبود دارد.

جدول ۲ شامل نتایج ارزیابی مدل پیش‌بینی کلروفیل-a برای چهار فصل سال و میانگین ماهانه است. در فصل بهار بهترین عملکرد مدل با کمترین MAE (۱/۰۸) و RMSE (۱/۴۹) و بالاترین همبستگی (۰/۹۳) مشاهده می‌شود. در تابستان مدل صحت کمتری دارد، با MAE (۳/۵۰) و RMSE (۶/۶۰) بالاتر و همبستگی کمتر (۰/۶۵). در فصل پاییز مقدار MAE و RMSE به ترتیب (۴/۹۸) و (۷/۵۶) و همبستگی (۰/۷۷۳) است. در نهایت در زمستان مقادیر مشاهده شده و برآورد شده همبستگی خوبی

جدول ۲- آماره‌های مقادیر مشاهده و برآورد شده با نرم‌افزار SNAP با سنجنده سستینل-۲  
Table 2. Average statistics of the observed and estimated values with SNAP software with Sentinel-2

| Season  | Corelation | Observed average | Estimated average | RMSE | MAE  |
|---------|------------|------------------|-------------------|------|------|
| Spring  | 0.93       | 7.83             | 7.61              | 1.49 | 1.08 |
| Summer  | 0.65       | 16.26            | 15.01             | 6.60 | 3.50 |
| Fall    | 0.77       | 23.09            | 19.46             | 7.56 | 4.98 |
| Winter  | 0.89       | 5.46             | 5.90              | 1.62 | 1.13 |
| Monthly | 0.81       | 12.55            | 11.56             | 4.93 | 2.50 |



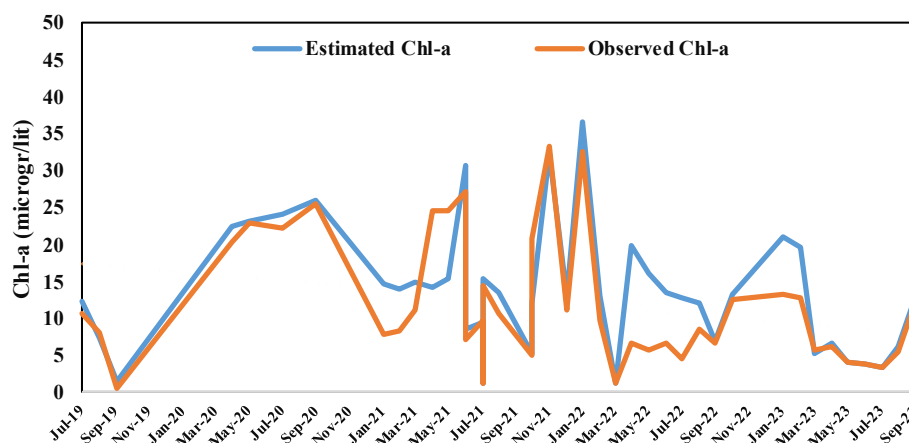
شکل ۵- همبستگی بین کلروفیل a- اندازه‌گیری شده و برآورد شده در فصول سال ، (الف) بهار، (ب) تابستان، (پ) پاییز و (ت) زمستان در سنجنده سنتینل ۲ با SNAP

Figure 5. Correlation between the measured and estimated chlorophyll-a in the seasons, (a) spring, (b) summer, (c) autumn, and (d) winter in Sentinel-2 using SNAP

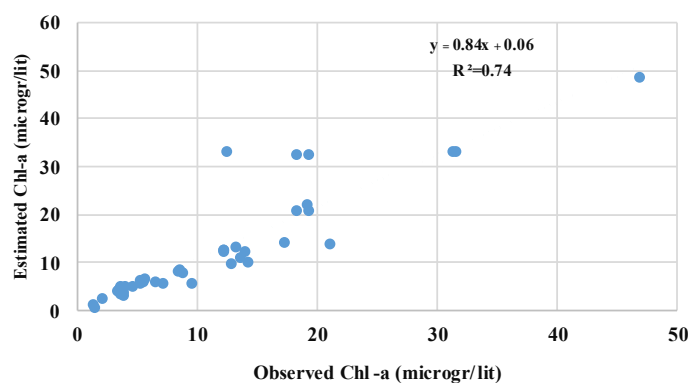
Sommer and Lengfellner (2008) تابستان با بالاترین مقادیر کلروفیل-a همراه است، زیرا دمای بالا و طولانی‌تر بودن روزها شرایط ایده‌آلی برای رشد و تکثیر جلبک‌ها را فراهم می‌آورد. همچنین براساس نتایج Haberman and Sayer (2008) در فصل پاییز، به دلیل کاهش دما و طول روز، مقادیر کلروفیل-a به تدریج کاهش می‌یابد. براساس نتایج، در فصل زمستان، با پایین‌ترین مقادیر کلروفیل-a همراه است. براساس نتایج Wetzel and Likens (2000) به دلیل کاهش دما و نور خورشید شرایط را برای رشد جلبک‌ها غیرمناسب می‌کند. این تغییرات فصلی نشان‌دهنده تأثیر مستقیم دما و نور خورشید بر فعالیت فتوسنتزی جلبک‌ها و در نتیجه غلظت کلروفیل-a در آب است.

### ۳-۲- مقایسه کلروفیل-a اندازه‌گیری شده و برآورد شده در ماه‌ها و فصول مختلف با استفاده از GEE در سنجنده لندست-۸

شکل ۶ تغییرات غلظت کلروفیل-a اندازه‌گیری شده و برآورد شده و شکل ۷ همبستگی بین مقادیر اندازه‌گیری شده و برآورد شده را با استفاده از GEE در همه ماه‌های اندازه‌گیری شده نشان می‌دهد. براساس نتایج، همبستگی قابل‌قبولی ( $R^2 = 0.73$ )، بین مقادیر اندازه‌گیری شده و برآورد شده وجود دارد. لازم به ذکر است که مقادیر به‌ازای تمام ماه‌های اندازه‌گیری است. در فصل بهار، مقادیر کلروفیل-a در آب به تدریج افزایش می‌یابد. نتایج Reynolds (2006) نشان داد، به دلیل افزایش دما و نور خورشید شرایط مناسبی برای رشد جلبک فراهم می‌شود. براساس نتایج



شکل ۶- تغییرات کلروفیل a- اندازه‌گیری شده و برآورد شده طی دوره آماری ۱۳۹۸ تا ۱۴۰۲ با استفاده از GEE در سنجنده لندست-۸  
Figure 6. The measured and estimated chlorophyll-a changes from 2018 to 2022 using GEE in Landsat-8

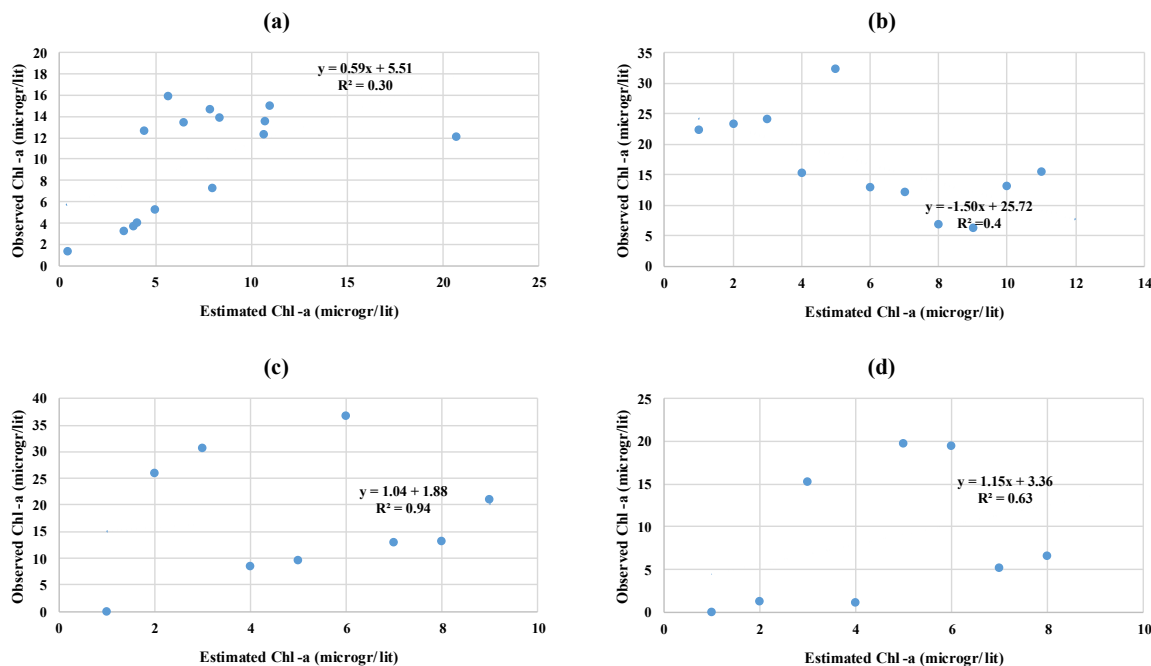


شکل ۷- همبستگی بین مقادیر اندازه‌گیری شده و برآورد شده با استفاده از GEE در سنجنده لندست-۸  
Figure 7. Correlation between the measured and estimated values using GEE in Landsat-8

جدول ۳ و شکل ۸ شامل نتایج ارزیابی مدل پیش‌بینی کلروفیل a- برای چهار فصل سال و میانگین ماهانه با استفاده از GEE است. فصل پاییز با بالاترین همبستگی (۰/۹۳) و خطاهای نسبتاً پایین MAE (۲/۶۵) و RMSE (۳/۵۸) بهترین عملکرد را دارد. تابستان با کم‌ترین خطاها MAE (۲/۱۵) و RMSE (۳/۲۶) با همبستگی قوی (۰/۸۵) عملکرد بسیار خوبی دارد. زمستان و بهار دارای عملکرد ضعیف‌تری نسبت به تابستان و پاییز هستند. زمستان با همبستگی متوسط (۰/۶۲) خطاهای نسبتاً بالا MAE و RMSE به ترتیب (۳/۱۱) و (۵/۶۴) و بهار با همبستگی بسیار ضعیف (۰/۳۱) و خطاهای بالا MAE و RMSE به ترتیب (۳/۷۸) و (۵/۱۶) نشان‌دهنده عدم صحت مناسب در این فصول هستند. اما همبستگی ماهانه بسیار بالا است، که نشان می‌دهد مدل عملکرد خوبی دارد، با همبستگی (۰/۸۶) و MAE و RMSE به ترتیب در محدوده قابل قبول (۳/۱۸) و (۴/۷) است.

جدول ۳- آماره‌های میانگین مقادیر مشاهده و برآورد شده کلروفیل a- با GEE در لندست-۸  
Table 3. Average statistics of the observed and estimated values of chlorophyll-a with GEE in Landsat-8

| Season | Correlation | Observed average | Estimated average | RMSE | MAE  |
|--------|-------------|------------------|-------------------|------|------|
| Spring | 0.31        | 7.34             | 9.86              | 5.16 | 3.78 |
| Summer | 0.83        | 16.43            | 16.70             | 3.26 | 2.15 |
| Fall   | 0.95        | 17.15            | 19.77             | 3.58 | 2.65 |
| Winter | 0.62        | 6.81             | 9.77              | 5.64 | 3.11 |



شکل ۸- همبستگی بین کلروفیل a- اندازه‌گیری شده و برآورد شده در فصول سال ، (الف) بهار، (ب) تابستان، (پ) پاییز و (ت) زمستان با GEE در سنجنده لندست-۸

Figure 8. Correlation between the measured and estimated chlorophyll-a in the seasons, (a) spring, (b) summer, (c) autumn, and (d) winter, using GEE and Landsat-8

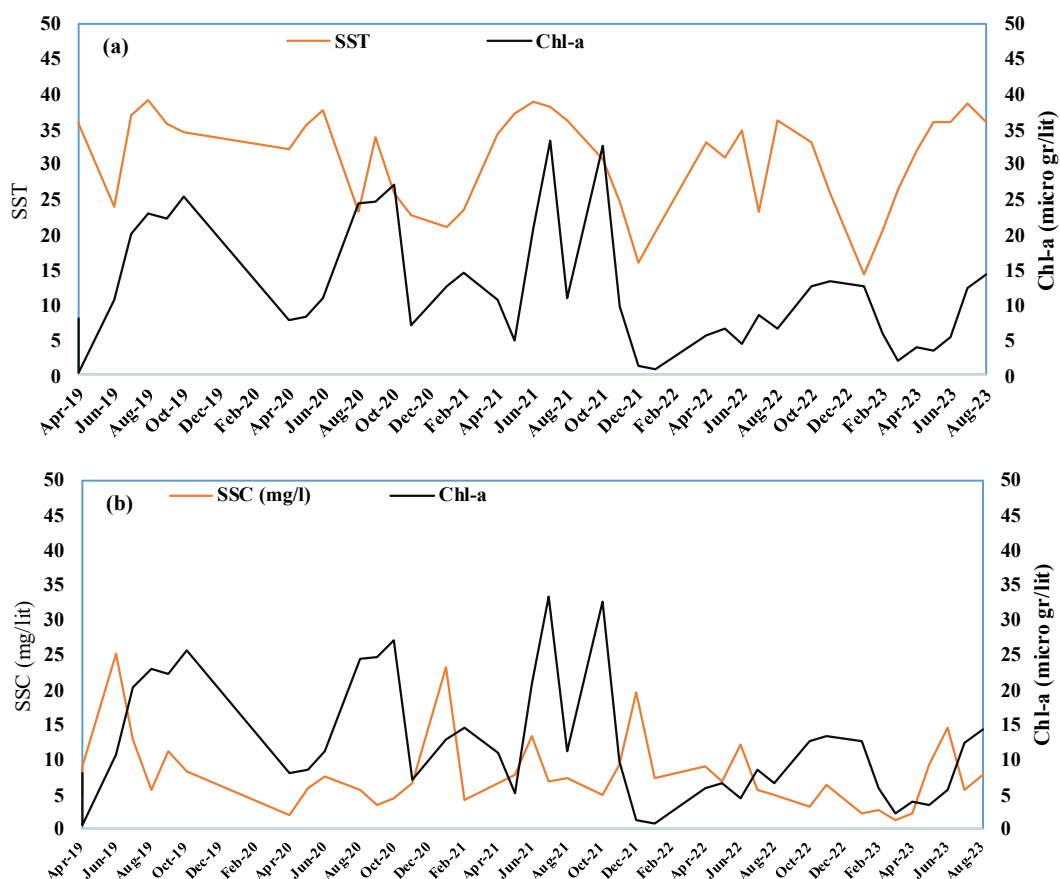
Sen2Cor برای تصحیح اتمسفری استفاده می‌کند که به‌طور ویژه برای داده‌های سنتینل-۲ طراحی شده‌اند. این نرم‌افزار امکان تنظیم دقیق‌تر پارامترهای پردازش را فراهم می‌کند، که به بهبود دقت نتایج کمک می‌کند. در فصل‌های تابستان و پاییز، GEE عملکرد بهتری دارد. Wang et al (2020) گزارش داد، این نرم‌افزار از روش‌های پردازش ابری (Cloud Computing) استفاده می‌کند که امکان پردازش سریع و کارآمد حجم زیادی از داده‌ها را فراهم می‌کند. این ویژگی به‌ویژه در فصل‌هایی که تغییرات محیطی سریع‌تر است (مانند تابستان) مفید است.

### ۳-۴- بررسی ارتباط دمای آب (SST) و رسوبات معلق آب (SSC) با کلروفیل-a مشاهده‌ای

شکل ۹ (الف) تغییرات ماهانه دمای سطح آب و غلظت کلروفیل-a را در مناطق مورد مطالعه نشان می‌دهد. براساس نتایج، رابطه میان این دو متغیر همواره خطی و ثابت نیست. براساس مطالعات Wang et al (2024)، عوامل متعدد محیطی پیچیده شامل عوامل محیطی فیزیکی-شیمیایی، پویایی اکوسیستم و عوامل انسانی به‌طور همزمان بر تولید فیتوپلانکتون‌ها و در نتیجه غلظت کلروفیل-a تاثیر می‌گذارند.

### ۳-۳- مقایسه کلروفیل a- اندازه‌گیری شده و برآورد شده در ماه‌ها و فصول مختلف با استفاده از GEE در سنجنده لندست-۸ و SNAP در سنجنده سنتینل-۲

براساس نتایج، در فصل بهار و زمستان نرم‌افزار SNAP عملکرد بهتری دارد زیرا هم خطاهای کم‌تری دارد و هم همبستگی بالاتری نشان می‌دهد. اما در فصل تابستان و پاییز GEE عملکرد بهتری دارد زیرا هم خطاهای کم‌تری دارد و هم همبستگی بالاتری در پاییز مشاهده می‌شود. اگر هدف کاهش خطا و افزایش دقت در همه فصل‌ها است، SNAP در بهار و زمستان انتخاب بهتری است. اما اگر به همبستگی بالاتر و دقت بیشتر در تابستان و پاییز اهمیت داده شود، GEE گزینه بهتری است. در فصل‌های بهار و زمستان، SNAP عملکرد بهتری از خود نشان می‌دهد. این نرم‌افزار از الگوریتم‌های پیشرفته‌تری برای تصحیح اتمسفری و رادیومتریک استفاده می‌کند، که باعث کاهش خطاها و افزایش دقت نتایج می‌شود. به‌ویژه در فصل زمستان، که شرایط جوی ممکن است پیچیده‌تر باشد (مانند وجود ابر یا مه)، SNAP توانسته است با دقت بیش‌تری داده‌ها را پردازش کند. طبق نتایج Li et al (2018)، SNAP از الگوریتم‌های خاصی مانند



شکل ۹- تغییرات ماهانه (الف) دمای آب با کلروفیل-a و (ب) رسوبات معلق آب با کلروفیل-a با کمک GEE در سنجنده لندست-۸  
Figure 9. Monthly changes of SST (a) and SSC (b) chlorophyll-a using GEE and Landsat-8

حداکثر می‌رساند. همچنین، کاهش غلظت کلروفیل-a در فصل زمستان (بهمن ۲۰۲۱) را می‌توان به کاهش نور خورشید و دمای پایین‌تر نسبت داد. این شرایط محیطی باعث کاهش فعالیت فتوسنتزی فیتوپلانکتون‌ها و در نتیجه کاهش تولید کلروفیل-a می‌شود. این الگو با یافته‌های (Nezlin (2008) مطابقت دارد که نشان می‌دهد تغییرات فصلی در نور و دما تأثیر مستقیمی بر تولید کلروفیل و رشد فیتوپلانکتون‌ها دارند. علاوه بر این، می‌توان به نقش عوامل دیگری مانند جریان‌های آبی، بارش‌های فصلی، و فعالیت‌های انسانی در تغییرات غلظت رسوبات معلق و کلروفیل-a اشاره کرد. برای مثال، افزایش بارش‌های فصلی می‌تواند منجر به ورود بیش‌تر رسوبات به آب شود که به نوبه خود بر شفافیت آب و غلظت کلروفیل-a تأثیر می‌گذارد. مطالعه Li et al. (2022) بر روی دریاچه سد Pingxai نشان داد که بارش‌های موسمی منجر به افزایش ۴۰-۶۰ درصدی غلظت رسوبات معلق می‌شود. این امر با نتایج ما که افزایش غلظت رسوبات را پس از بارش‌های شدید (دی ۱۴۰۰) نشان می‌دهد، مطابقت دارد. همچنین، فعالیت‌های انسانی مانند کشاورزی، صنعت، و ساخت‌وساز می‌توانند با افزایش ورود مواد مغذی و رسوبات به آب، بر این پارامترها تأثیر بگذارند. پژوهش Qiao et al. (2024) در

شکل ۹ (ب) نشان‌دهنده تغییرات ماهانه رسوبات معلق آب و کلروفیل-a در دوره زمانی مشخصی است. و شکل ۱۰ و ۱۱ نیز توزیع تغییرات این متغیرها را در دو مقیاس فصلی و ماهانه و شکل ۱۲ در مقیاس سالانه نشان می‌دهد. با توجه به نتایج می‌توان به این نتیجه رسید که تغییرات غلظت رسوبات معلق و کلروفیل-a در آب از الگوهای مشخصی پیروی می‌کنند که تحت تأثیر عوامل محیطی مختلفی قرار دارند. همان‌طور که اشاره شد، رابطه معکوس بین غلظت رسوبات معلق و کلروفیل-a به‌وضوح در نمودار قابل مشاهده است. این پدیده عمدتاً به دلیل تأثیر کدورت آب بر نفوذ نور و در نتیجه کاهش فرآیند فتوسنتز در لایه‌های زیرین آب است. این موضوع در مطالعات متعددی از جمله Petus et al (2010) مورد تأیید قرار گرفته است. از سوی دیگر، افزایش غلظت کلروفیل-a در ماه‌هایی مانند تیر ۱۴۰۰ می‌تواند ناشی از ورود مواد مغذی از رسوبات معلق به آب باشد. این مواد مغذی، به‌ویژه در فصل‌های گرم سال، شرایط مناسبی را برای رشد فیتوپلانکتون‌ها فراهم می‌کنند. این یافته با نتایج مطالعه Singh and Prasa (2010) هم‌خوانی دارد که نشان می‌دهد افزایش دسترسی به مواد مغذی و نور خورشید در فصل‌های بهار و تابستان، رشد فیتوپلانکتون‌ها و در نتیجه غلظت کلروفیل-a را به

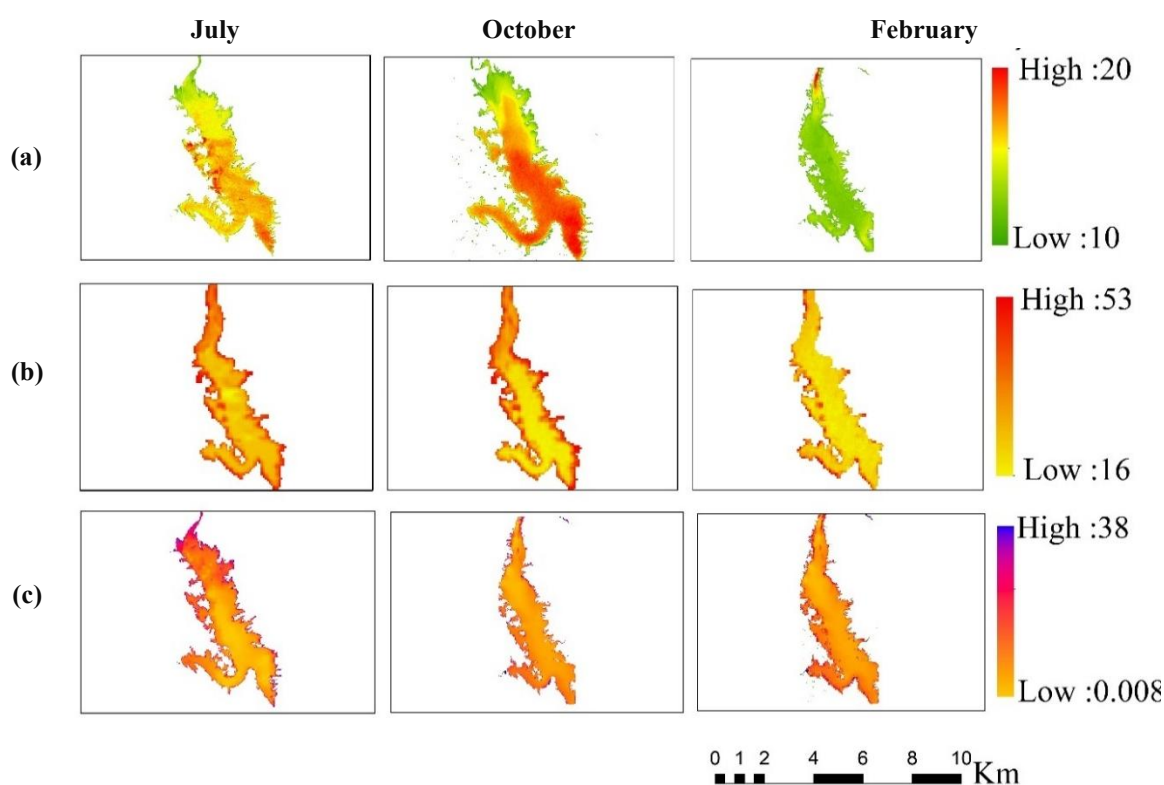
ضروری است. این مطالعات می‌توانند شامل بررسی تأثیر تغییرات اقلیمی، تغییرات در الگوهای بارش، و تأثیر فعالیت‌های انسانی بر اکوسیستم‌های آبی باشند. چنین پژوهش‌هایی نه تنها به درک بهتر از تعاملات پیچیده بین عوامل محیطی و بیولوژیکی کمک می‌کنند، بلکه می‌توانند در مدیریت پایدار منابع آبی و حفظ سلامت اکوسیستم‌های آبی نیز موثر باشد.

دریاچه سد Xiaolangdi تأیید می‌کند که فعالیت‌های کشاورزی در حوضه آبریز می‌تواند تا ۳۵ درصد بر غلظت کلروفیل-a تأثیر بگذارد. این نتیجه مشابه مشاهده ما در مورد تأثیر رواناب کشاورزی بر کیفیت آب است.

در نهایت، برای درک کامل‌تر این پدیده‌ها و پیش‌بینی تغییرات آینده، انجام مطالعات بلندمدت و جامع‌تر در این زمینه

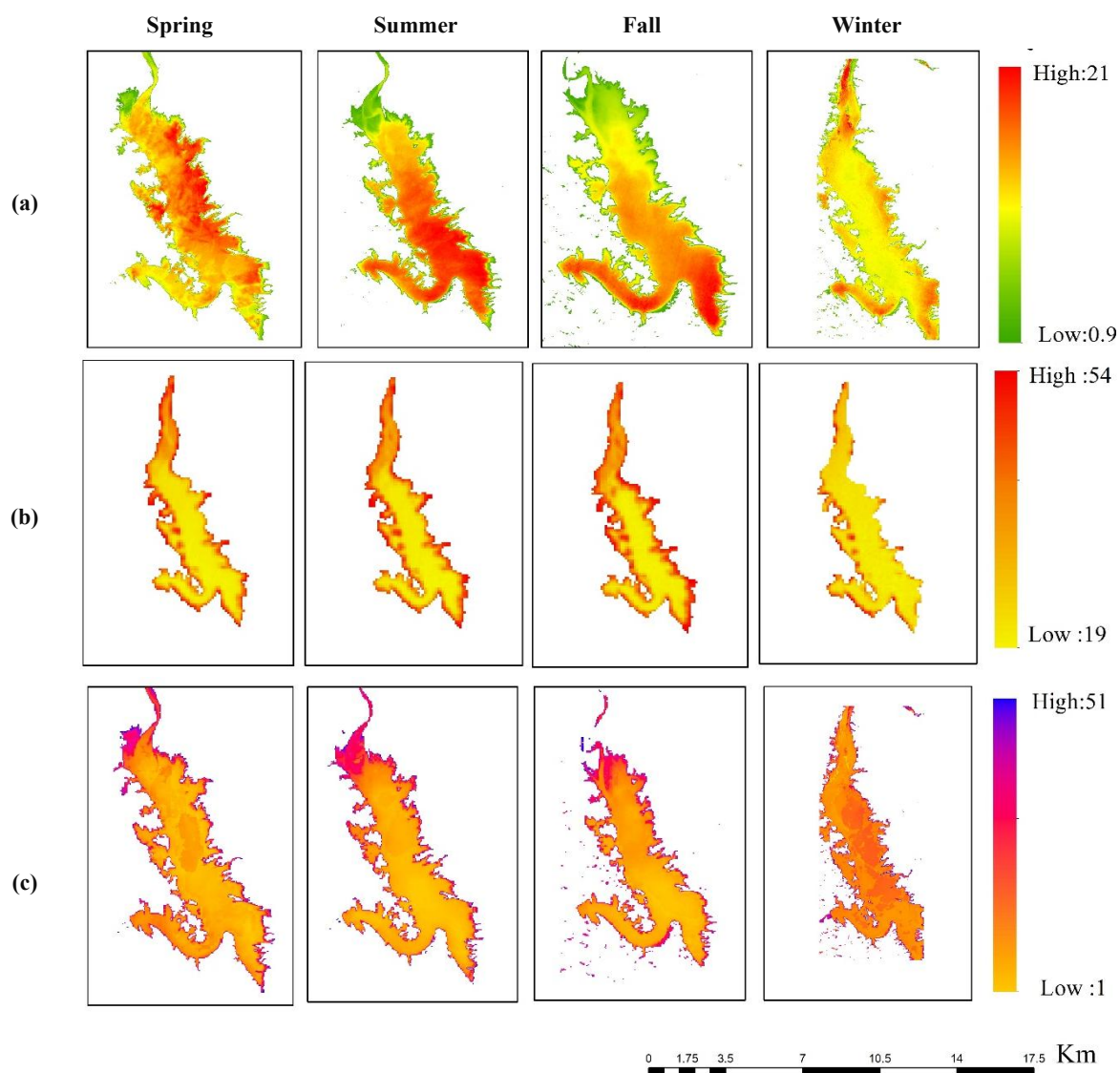
جدول ۴- میانگین مقادیر مشاهده و اندازه‌گیری کلروفیل-a با SST و SSC با کمک GEE در سنجنده لندست-۸

| Variable     | Season  | Average | STD  | Correlation |
|--------------|---------|---------|------|-------------|
| SST (°C)     | Spring  | 33.60   | 4.11 | 0.24        |
|              | Summer  | 34.42   | 5.42 | 0.72        |
|              | Fall    | 27.18   | 5.10 | 0.54        |
|              | Winter  | 20.23   | 4.66 | 0.23        |
|              | Monthly | 30.63   | 6.89 | 0.17        |
| SSC (mg/lit) | Spring  | 8.10    | 5.84 | 0.36        |
|              | Summer  | 7.96    | 3.86 | -0.18       |
|              | Fall    | 5.95    | 2.33 | -0.28       |
|              | Winter  | 8.50    | 9.05 | -0.14       |
|              | Monthly | 7.79    | 5.63 | 0.11        |



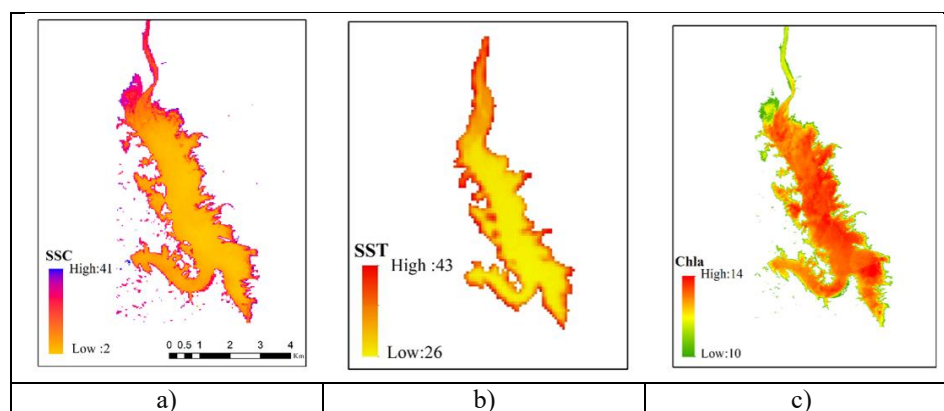
شکل ۱۰- متوسط ماهانه غلظت کلروفیل-a (الف)، دما (ب) و کدورت آب (ث) در سال ۲۰۲۱ با GEE در سنجنده لندست-۸

Figure 10. Average monthly concentration of chlorophyll-a (a), SST (b), and SSC(c) at 2021 using GEE at Landsat-8



شکل ۱۱- کلروفیل-a (الف)، دما (ب) و کدورت آب (ث) برای فصول سال ۲۰۲۱ با GEE در سنجنده لندست-۸

Figure 11. Chlorophyll-a (a), SST (b), and SSC (c) map for the seasons of 2021 using GEE at Landsat-8



شکل ۱۲- نقشه های میانگین سالانه (الف) کلروفیل-a، (ب) دمای سطح آب و (ج) کدورت آب در سال ۲۰۲۱ با Google Earth Engine

Figure 12. The annual average map of chlorophyll-a (a), water temperature (b), and water turbidity (c)

#### ۴- نتیجه‌گیری

نتایج این مطالعه نشان داد که غلظت کلروفیل-a در سد میناب به شدت تحت تأثیر تغییرات فصلی و عوامل محیطی مانند دما، نور خورشید و رسوبات معلق قرار دارد. در فصول بهار و تابستان، شرایط مطلوب محیطی (نور و دما) منجر به افزایش غلظت کلروفیل-a شد، در حالی که در پاییز و زمستان، کاهش دما و نور خورشید باعث کاهش غلظت آن شد. همچنین، رابطه پیچیده‌ای بین رسوبات معلق و غلظت کلروفیل-a مشاهده شد، به طوری که افزایش رسوبات معمولاً با کاهش شفافیت آب و کاهش فتوسنتز همراه بود، اما در برخی موارد، ورود مواد مغذی از رسوبات می‌توانست به افزایش موقت غلظت کلروفیل-a منجر شود.

از نظر ابزارهای تحلیلی، SNAP در سنجندة سنتینل-۲ به دلیل دقت بالا در پردازش تصاویر ماهواره‌ای و انجام تصحیحات اتمسفری، برای بررسی تغییرات جزئی و دقیق غلظت کلروفیل-a در مقیاس‌های کوچک‌تر و دوره‌های زمانی کوتاه مدت مناسب‌تر است. در مقابل، GEE در سنجندة لندست-۸ با قابلیت نمایش داده‌ها در مقیاس بزرگ‌تر و دوره‌های زمانی طولانی‌تر، برای تحلیل روندهای کلی و تغییرات بلندمدت کارآمدتر عمل می‌کند. ترکیب نتایج این دو نرم‌افزار می‌تواند دیدگاه جامع‌تری از تغییرات کلروفیل-a ارائه دهد و به مدیریت بهتر منابع آبی کمک کند.

تفاوت عملکرد نرم‌افزار SNAP و GEE در فصل‌های مختلف سال نشان‌دهنده اهمیت انتخاب ابزار مناسب برای پردازش داده‌های ماهواره‌ای است. اگر هدف کاهش خطا و افزایش دقت در همه فصل‌ها باشد، SNAP در بهار و زمستان انتخاب بهتری است. اما اگر به همبستگی بالاتر و دقت بیش‌تر در تابستان و پاییز اهمیت داده شود، GEE گزینه مناسب‌تری است. ترکیب قابلیت‌های این دو نرم‌افزار می‌تواند به بهبود دقت و کاهش خطا در همه فصل‌ها کمک کند.

در نهایت، این مطالعه بر اهمیت درک تعاملات پیچیده بین عوامل محیطی (مانند دما، نور، رسوبات و مواد مغذی) در تعیین غلظت

کلروفیل-a تأکید دارد و نشان می‌دهد که استفاده از داده‌های ماهواره‌ای و نرم‌افزارهای پیشرفته می‌تواند ابزار قدرتمندی برای پایش و مدیریت اکوسیستم‌های آبی باشد.

#### سپاسگزاری

پژوهش حاضر حاصل طرح دانشجویی با شرکت آب منطقه‌ای استان هرمزگان است. لذا از کارشناسان بخش تحقیقات این شرکت بخاطر حمایت‌های بی‌دریغشان بی‌نهایت سپاسگزاریم.

#### تضاد منافع نویسندگان

هیچ تضاد منافعی بین نویسندگان وجود ندارد.

#### دسترسی به داده‌ها

در صورت درخواست ارسال می‌شود.

#### مشارکت نویسندگان

فاطمه گروئی: مفهوم سازی انجام تحلیل‌های نرم‌افزاری/آماري، نگارش نسخه اولیه مقاله؛ ام‌البنین بذرافشان: تحلیل داده، تصحیح و نگارش نسخه پایانی.

#### منابع

- اکاتی، نرجس، عین‌الهی، فاطمه، و غفاری، مصطفی (۱۳۹۱). بررسی تغییرات فصلی میزان کلروفیل-a در آب مخازن چاه نیمه‌های سیستان. *علوم و تکنولوژی محیط زیست*، ۲۱ (۱)، ۴۵-۵۵. doi: 10.22034/JEST.2018.13749
- ایمانی، سمیه، عبدل‌آبادی، حمید، و زارع‌رشکوهی، مریم (۱۴۰۱). ارزیابی راهکارهای مدیریتی کنترل بار مواد مغذی در مقیاس حوضه‌ای؛ حوضه آبریز سد استقلال میناب. *محیط شناسی*، ۴۸ (۱)، ۷۸-۵۵. doi: 10.22059/jes.2022.335803.1008263
- مشیدی، ضحی، و جهانگیر، محمدحسین (۱۴۰۰). ارزیابی کیفی منابع آب سطحی با استفاده از تصاویر ماهواره‌ای در مخزن سیمره. *اکوهیدرولوژی*، ۸ (۴)، ۹۲۵-۹۳۹. doi: 10.22059/ije.2021.328294.1530

#### References

- Adjovu, G. E., Stephen, H., James, D., & Ahmad, S. (2023). Overview of the application of remote sensing in effective monitoring of waterquality parameters. *Remote Sensing*, 15(7), 1-35. doi: 10.3390/rs15071938.
- Ha, N. T. T., Thao, N.T.P., Koike, K., & Nhuan, M. T. (2017). Selecting the best band ratio to estimate chlorophyll-a concentration in a tropical freshwater lake using sentinel 2A images from a case study of Lake Ba Be (Northern Vietnam). *ISPRS International Journal of Geo-Information*, 6(9), 290. doi: 10.3390/ijgi6090290.
- Haberman, J., & Sayer, C.D. (2008). Seasonal Variation in Chlorophyll-a Concentrations in Lakes: A Review of Potential Mechanisms." *Hydrobiologia*, 603(1), 63-77. doi: 10.10854/21546.2008.203145
- Hegyi, A., & Agapiou, A. (2023). Rapid Assessment of 2022 Floods around the UNESCO Site of Mohenjo-Daro in Pakistan by Using Sentinel and Planet Labs Missions. doi:10.3390/su15032084
- Hernández-Cruz, B., Vasquez-Ortiz, M., Canet, C., & Prado-Molina, J. (2019). Algorithm to

- calculate suspended sediment concentration using Landsat 8 imagery. *Applied Ecology & Environmental Research*, 17(3), 18-29. doi: 10.2166/hydro.2023.137
- Imani, S., Abdolabadi, H., & Zareh Rashquoieh, M. (2022). Assessment of Basin-Scaled Nutrient Load Management Strategies; Minab Dam Watershed. *Journal of Environmental Studies*, 48(1), 55-78. doi: 10.22059/jes.2022.335803.1008263 [In Persian]
- Jang, W., Kim, J., Kim, J.H., Shin, J.K., Chon, K., Kang, E.T., Park, Y., & 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. doi: 10.3390/rs16020315
- Johansen, R.A., Reif, M.K., Saltus, C.L., & Pokrzywinski, K.L. (2024). A Broad-scale Assessment of Sentinel-2 Imagery and the Google Earth Engine for the Nationwide Mapping of Chlorophyll a. *Sustainability*, 16(5), 2090. doi: 10.3390/su16052090
- Karimi, B., Hashemi, S.H., & Aghighi, H. (2024). Application of Landsat-8 and Sentinel-2 for retrieval of chlorophyll-a in a shallow freshwater lake. *Advances in Space Research*, 74(1), 117-129. doi: 10.1016/j.asr.2024.03.056
- Kong, X., Li, Y., Wang, L., & Liu, H. (2024). Lake Surface Temperature Retrieval Study Based on Landsat 8 Satellite Imagery—A Case Study of Poyang Lake. *Atmosphere*, 15(4), 428. doi:10.3390/atmos15040428
- Korver, M.C., Lehner, B., Cardille, J.A., & Carrea, L. (2024). Surface water temperature observations and ice phenology estimations for 1.4 million lakes globally. *Remote Sensing of Environment*, 308, 114-124. doi: 10.1016/j.rse.2024.114164
- Kowe, P., Ncube, E., Magidi, J., Ndambuki, J.M., Rwasoka, D.T., Gumindoga, W., Maviza, A., De Jesus Paulo Mavaringana, M., & Kakanda, E.T. (2023). Spatial-temporal variability analysis of water quality using remote sensing data: A case study of Lake Manyame. *Scientific African*, 21, e01877. doi: 10.1016/j.sciaf.2023.e01877
- Li, H., Li, X., Song, D., Nie, J., & Liang, S. (2024a). 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. doi: 10.1016/j.scitotenv.2023.168642
- Li, H., Somogyi, B., & Tóth, V. (2024b). Exploring spatiotemporal features of surface water temperature for Lake Balaton in the 21st century based on Google Earth Engine. *Journal of Hydrology*, 640, 131-146. doi: 10.1016/j.jhydrol.2024.131672
- Li, Y., Chen, J., Ma, Q., Zhang, H. K., & Liu, J. (2018). Evaluation of Sentinel-2A surface reflectance derived using Sen2Cor in North America. *IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing*, 11(6), 1997-2021. doi: 10.1109/JSTARS.2018.2835823
- Li, Y., Zhou, Z., Kong, J., Wen, C., Li, S., Zhang, Y., Xie, J., & Wang, C. (2022). Monitoring Chlorophyll-a concentration in karst plateau lakes using Sentinel 2 imagery from a case study of pingzhai reservoir in Guizhou, China. *European Journal of Remote Sensing*, 55(1), 1-19. doi: 10.1080/22797254.2022.2079565
- Lioumbas, J., Christodoulou, A., Katsiapi, M., Xanthopoulou, N., Stournara, P., Spahos, T., Seretoudi, G., Mentis, A., & Theodoridou, N. (2023). Satellite remote sensing to improve source water quality monitoring: A water utility's perspective. *Remote Sensing Applications: Society and Environment*, 32, 101042. doi: 10.1016/j.rsase.2023.101042
- Liu, J., Qiu, Z., Feng, J., Wong, K.P., Tsou, J.Y., Wang, Y., & Zhang, Y. (2023). Monitoring Total Suspended Solids and Chlorophyll-a Concentrations in Turbid Waters: A Case Study of the Pearl River Estuary and Coast Using Machine Learning. *Remote Sensing*, 15(23), 5559. doi: 10.3390/rs15235559
- Meimandi, J.B., Bazrafshan, O., Esmailpour, Y., Zamani, H., & Shekari, M. (2024). Risk assessment of meteorological-groundwater drought using copula approach in the arid region. *Stochastic Environmental Research and Risk Assessment*, 38(4), 1523-1540. doi: 10.1007/s00477-023-02641-8
- Moshayedi, Z., & Jahangir, M.H. (2021). Qualitative evaluation of surface water resources using satellite images in Seymareh dam reservoir. *Journal of Ecohydrology*, 8(4), 925-939. doi: 10.22059/ije.2021.328294.1530 [In Persian]
- Nazeer, M., Ilori, C.O., Bilal, M., Nichol, J.E., Wu, W., Qiu, Z., & Gayene, B.K. (2021). Evaluation of atmospheric correction methods for low to high resolutions satellite remote sensing data. *Atmospheric Research*, 249, 105308. doi: 10.1016/j.atmosres.2020.105308
- Nezlin, N.P. (2008). Seasonal and interannual variability of remotely sensed chlorophyll. *Environmental Chemistry*, 5, 333-349. doi: 10.1007/698\_5\_063
- Obata, K., & Yoshioka, H. (2024). Unmixing-based radiometric and spectral harmonization for consistency of multi-sensor reflectance time-series data. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 212, 396-411. doi: 10.1016/j.isprsjprs.2024.05.016
- Okati, N., Eynollahi, F., & Ghafari, M. (2019). Study of Seasonal Changes in Chlorophyll a Concentration in the Water of Chahnimeh Reservoirs in Sistan. *Journal of environmental*

- Science and Technology*, 21(1), 45-55. doi: 10.1014/jest.2019.1874 [In Persian]
- Ondrusek, M., Stengel, E., Kinkade, C. S., Vogel, R. L., Keegstra, P., Hunter, C., & Kim, C. (2012). The development of a new optical total suspended matter algorithm for the Chesapeake Bay. *Remote Sensing of Environment*, 119, 243-254. doi:10.1016/j.rse.2011.12.018
- Parra, L., Ahmad, A., Sendra, S., Lloret, J., & Lorenz, P. (2024). Combination of Machine Learning and RGB Sensors to Quantify and Classify Water Turbidity. *Chemosensors*, 12(3), 34. doi:3390/chemosensors12030034
- Petus, C., Chust, G., Gohin, F., Doxaran, D., Froidefond, J.M., & Sagarminaga, Y. (2010). Estimating turbidity and total suspended matter in the Adour River plume (South Bay of Biscay) using MODIS 250-m imagery. *Continental Shelf Research*, 30, 379-392. doi:10.1016/j.csr.2009.12.007
- Qiao, S., Yang, Y., Xu, B., Yang, Y., Zhu, M., Li, F., & Yu, H. (2024). How the Water-Sediment Regulation Scheme in the Yellow River affected the estuary ecosystem in the last 10 years?. *Science of the Total Environment*, 927, 172-185. doi:10.1016/j.scitotenv.2024.172002
- Reynolds, C.S. (2006). *The Ecology of Phytoplankton*. Cambridge University Press. doi: 10.1017/CBO9780511542145
- Salls, W.B., Schaeffer, B.A., Pahlevan, N., Coffey, M.M., Seegers, B.N., Werdell, P.J., Ferriby, H., Stumpf, R.P., Binding, C.E., & Keith, D.J. (2024). Expanding the Application of Sentinel-2 Chlorophyll Monitoring across United States Lakes. *Remote Sensing*, 16(11), 1977. doi:10.3390/rs16111977
- Seenipandi, K., Ramachandran, K.K., Ghadei, P., & Shekhar, S. (2021). Seasonal variability of sea surface temperature in Southern Indian coastal water using Landsat 8 OLI/TIRS images. In *Remote Sensing of Ocean and Coastal Environments* (pp. 277-295). Elsevier. doi:10.1016/B978-0-12-819604-5.00016-0
- Sherjah, P., Saji Kumar, N., & Nowshaja, P. (2023). Quality monitoring of inland water bodies using Google Earth Enging. *Journal of Hydroinformatics*, 25(2), 432-450. doi:10.2166/hydro.2023.137
- Shi, X., Gu, L., Li, X., Jiang, T., & Gao, T., (2024). Automated spectral transfer learning strategy for semi-supervised regression on Chlorophyll-a retrievals with Sentinel-2 imagery. *International Journal of Digital Earth*, 17(1), 23-38. doi:10.1080/17538947.2024.2313856
- Singh, R., Saritha, V., & Pande, C.B. (2024). Monitoring of wetland turbidity using multi-temporal Landsat-8 and Landsat-9 satellite imagery in the Bisalpur wetland, Rajasthan, India. *Environmental Research*, 241, 117638. doi:10.1016/j.envres.2023.117638
- Sola, I., García-Martín, A., Sandonís-Pozo, L., Álvarez-Mozos, J., Pérez-Cabello, F., González-Audicana, M., & Llovería, R.M. (2018). Assessment of atmospheric correction methods for Sentinel-2 images in Mediterranean landscapes. *International journal of applied earth observation and geoinformation*, 73, 63-76.
- Sommer, U., & Lengfellner, K. (2008). Climate Change and the Timing of Phytoplankton Blooming in Lakes: Effects of Temperature and Light. *Aquatic Sciences*, 70(2), 195-206. doi:10.1111/j.1365-2486.2008.01571.x
- Wang, J., & Chen, X. (2024). A new approach to quantify chlorophyll-a over inland water targets based on multi-source remote sensing data. *Science of The Total Environment*, 906, 167631. doi:10.1016/j.scitotenv.2023.167631
- Wang, L., Xu, M., Liu, Y., Liu, H., Beck, R., Reif, M., Emery, M., Young, J., & Wu, Q. (2020). Mapping freshwater chlorophyll-a concentrations at a regional scale integrating multi-sensor satellite observations with Google earth engine. *Remote Sensing*, 12(20), 32- 48. doi:10.3390/rs12203278
- Wang, N., Luo, C., Wu, X., Chen, L., Ge, X., Huang, C., & Zhu, S. (2024). Effects of water temperature on growth of invasive *Myriophyllum aquaticum* species. *Aquatic Invasions*, 19(2), 153-167. doi:10.3391/ai.2024.19.2.124920
- Wetzel, R.G., & Likens, G.E. (2000). *Limnological Analysis*. Springer. doi:10.1007/978-1-4757-3250-4
- 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. doi:10.1016/j.scitotenv.2023.169152.