

Original Article



Comparison of Landsat-8 and Sentinel-2 Satellite Images to Estimate the Amount of Chlorophyll-a in Zaribar Lake

Received: 2023.04.14

Accepted: 2023.03.10

Peyman Tahmasebi,^{1*} Saadi Biglari Gholdareh,² Seyyed Mojtaba Bashtamian,² Seyyed Puya Hosseini,³ Pegah Golmohammadi Ghane⁴

¹ Department of Water Engineering, Faculty of Agriculture, University of Bu-Ali Sina, Hamedan, Iran

² Department of Remote Sensing and GIS, Faculty of Earth Sciences, University of Shahid Beheshti, Tehran, Iran

³ Department of Rangeland and Watershed Management, Faculty of Natural Resources, University of Technology, Isfahan, Iran

⁴ Department of Water Engineering, Faculty of Agriculture, University of Kurdistan, Sanandaj, Iran

EXTENDED ABSTRACT

Introduction: Population growth and pollution caused by the discharge of all types of municipal, industrial, agricultural sewage, and waste disposal valves have caused the spread of pollution and the limitation of water resources. Surface water sources such as seas, lakes, rivers, and reservoirs of dams are more exposed to pollution than underground water sources. This pollution leads to the increase of nutrients and the blooming of algae and their consequences, such as the increase of chlorophyll-a, change in dissolved oxygen, and ultimately the reduction of water quality. Considering the close relationship between water quality and environmental health and quality of life, it is necessary to monitor the quality of surface water. By monitoring the changes in water quality, it is possible to observe, evaluate, and correct the long-term trends of water quality reduction and also predict its quality changes for the future. Due to the fact that the traditional methods of water quality evaluation are time-consuming, risky, and expensive, experts use remote sensing images to control water quality.

Material and Methods: In this research, the chlorophyll-a of Zaribar Lake was investigated from Landsat-8 and Sentinel-2 satellite images in 2019 using the Google Earth Engine platform. For this purpose, the water body of the lake was separated from the non-water body using the NDWI index. Then, four spectral indices 2DBA, 3DBA, NDCI, and FLH-Violet were applied on the separated water body from satellite images. Finally, the predicted amount of chlorophyll-a was compared with the actual amount of chlorophyll-a on the ground in order to select the most suitable spectral index and satellite image to estimate the concentration of chlorophyll-a. **Results and Discussion:** The results obtained from the comparison of spectral indices showed that 2DBA and NDCI indices are more accurate than 3DBA and FLH-Violet indices in both satellite images and were able to predict the chlorophyll-a concentration well. Therefore, 2DBA and NDCI indices were considered the most efficient indices to evaluate the chlorophyll-a concentration. Also, the amount of R^2 obtained from 2BDA and NDCI indices in Landsat-8 and Sentinel-2 satellite images were compared to determine which satellite image is able to estimate the concentration of chlorophyll-a with higher accuracy. The results indicated that the amount of R^2 in Sentinel-2 images was 2DBA=0.799 and NDCI=0.794 and in Landsat-8 was 2DBA=0.156 and NDCI=0.125. Therefore, Sentinel-2 was able to predict the concentration of chlorophyll-a more accurately than Landsat-8. This is due to the larger size of Landsat-8 cells compared to Sentinel-2, which can make the detection of chlorophyll-a a challenge in small areas. In addition, there was a one-day time interval between ground sampling and the date of Landsat-8 image collection, when the movement of chlorophyll-a concentration had occurred temporally and spatially, on the surface and in the depth of the lake. However, the ground sampling and the taking of Sentinel-2 images were simultaneous and within the same day.

Conclusion: Based on the obtained results, it can be concluded that the use of 2BDA and NDCI indices compared to other indices for small areas in Sentinel-2 images provided higher accuracy than Landsat-8 images. The most important reason is the smaller size of cells in Sentinel-2 images. In order to more accurately evaluate the concentration of chlorophyll-a, the lake must be monitored in a time series and different seasons, because a large volume of water flows from the bottom of the lake through rivers and boiling springs every day, on which the concentration of chlorophyll-a depends; Therefore, the concentration of chlorophyll-a in the lake should be evaluated in low water and high water conditions in order to determine its polluting sources, which unfortunately was not addressed in this research due to the lack of sampling.

Keywords: Water pollution, Chlorophyll-a concentration, Google Earth Engine, Landsat-8 and Sentinel-2 satellite images, Spectral indices

How to cite this article:

Tahmasebi, P., Biglari Gholdareh, S., Bashtamian, S.M., Hosseini, S.P. and Golmohammadi Ghane, P., 2024. Comparison of Landsat-8 and Sentinel-2 Satellite Images to Estimate the Amount of Chlorophyll-a in Zaribar Lake. *Environ. Sci.* 22(4): 571-584

* Corresponding Author Email Address: p.tahmasebi@uok.ac.ir

DOI: 10.48308/envs.2024.1373



Copyright: © 2024 by the authors. Submitted for possible open access publication under the terms and conditions of the Creative Commons Attribution (CC BY) license <https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>.

مقایسه تصاویر ماهواره‌ای لندست-۸ و سنتینل-۲ جهت تخمین میزان کلروفیل-آ دریاچه زریبار

پیمان طهماسبی*^۱، سعدی بیگلری قلدره^۲، سید مجتبی بشتامیان^۳، سید پویا حسینی^۴،
پگاه گل محمدی قانع^۴

تاریخ دریافت: ۱۴۰۲/۱۲/۲۰

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۳/۰۱/۲۶

چکیده مبسوط

سابقه و هدف: رشد جمعیت و آلودگی ناشی از تخلیه انواع انواع فاضلاب‌های شهری، صنعتی و کشاورزی، شیرهای دفع زباله باعث گسترش آلودگی و محدودتر شدن منابع آب شده است. منابع آب سطحی مانند دریاها، دریاچه‌ها، رودخانه‌ها و مخازن سدها بیشتر از منابع آب زیرزمینی در معرض آلودگی هستند. این آلودگی منجر به افزایش مواد مغذی و شکوفایی جلبک‌ها و عواقب آن‌ها مانند افزایش کلروفیل-آ، تغییر در اکسیژن محلول و در نهایت کاهش کیفیت آب می‌گردد. با توجه به رابطه نزدیک بین کیفیت آب و بهداشت محیط و کیفیت زندگی، نظارت بر کیفیت آب‌های سطحی ضروری است. با پایش تغییرات کیفیت آب، می‌توان روندهای بلندمدت کاهش کیفیت آب را مشاهده، ارزیابی و تصحیح نمود و همچنین تغییرات کیفیت آن را برای آینده پیش‌بینی کرد. با توجه به اینکه روش‌های سنتی ارزیابی کیفیت آب زمان‌بر، پر خطر و هزینه‌بر هستند متخصصان از تصاویر سنجنش از دور برای کنترل کیفیت آب استفاده می‌کنند.

مواد و روش‌ها: در این تحقیق غلظت کلروفیل-آ دریاچه زریبار با استفاده از تصاویر ماهواره‌ای لندست-۸ و سنتینل-۲ در سال ۲۰۱۹ به کمک سامانه تحت وب Google Earth Engine بررسی شد. بدین منظور ابتدا به کمک شاخص NDWI پهنه آبی دریاچه از غیر آب تفکیک شد. سپس چهار شاخص‌های طیفی 3DBA، 2DBA، NDCI و FLH-Violet بر پهنه آبی تفکیک شده از تصاویر ماهواره‌ای اعمال گردید. در نهایت میزان کلروفیل-آ پیش‌بینی شده با میزان کلروفیل-آ واقعی زمینی مقایسه شد تا مناسب‌ترین شاخص طیفی و تصویر ماهواره‌ای جهت تخمین غلظت کلروفیل-آ انتخاب شود.

نتایج و بحث: نتایج بدست آمده از مقایسه شاخص‌های طیفی نشان داد که شاخص‌های 2DBA و NDCI نسبت به شاخص‌های 3DBA و FLH-Violet در هر دو تصویر ماهواره‌ای دقت بالاتری دارند و توانسته‌اند غلظت کلروفیل-آ را به خوبی پیش‌بینی کنند. بنابراین شاخص‌های 2DBA و NDCI بعنوان کارآمدترین شاخص‌ها جهت ارزیابی غلظت کلروفیل-آ در نظر گرفته شد. هم‌چنین میزان R^2 حاصل از شاخص‌های 2DBA و NDCI در تصاویر ماهواره‌ای لندست-۸ و سنتینل-۲ با هم مقایسه شد تا مشخص شود کدام تصویر ماهواره‌ای غلظت قادر به تخمین غلظت کلروفیل-آ را با دقت بالاتری است. نتایج حاکی از آن بود که میزان R^2 در تصاویر سنتینل-۲ ($2DBA = 0.799$) و $NDCI = 0.794$) و در لندست-۸ ($2DBA = 0.156$ و $NDCI = 0.125$) است. بنابراین تصاویر سنتینل-۲ قادر بوده غلظت کلروفیل-آ را با دقت بالاتری نسبت به تصاویر لندست-۸ پیش‌بینی کردند. که این امر ناشی از بزرگ‌تر بودن اندازه سلول‌های لندست-۸ نسبت به سنتینل-۲ است که در مناطق کوچک می‌تواند تشخیص کلروفیل-آ را با چالش روبرو نماید و علاوه بر این فاصله زمانی یک روزه بین نمونه‌برداری زمینی و تاریخ برداشت تصویر لندست-۸ وجود داشت که جایجایی غلظت کلروفیل-آ بصورت زمانی و مکانی، در سطح و در عمق دریاچه اتفاق افتاده بود.

نتیجه‌گیری: با استناد به نتایج کسب شده می‌توان گفت استفاده از شاخص‌های 2DBA و NDCI نسبت به سایر شاخص‌ها برای مناطق کوچک در تصاویر سنتینل-۲ نسبت به تصاویر لندست-۸ دقت قابل بالاتری ارائه دادند که یکی از مهم‌ترین دلایل آن اندازه کوچک‌تر سلول‌های تصاویر سنتینل-۲ است. جهت ارزیابی دقیق‌تر غلظت کلروفیل-آ می‌بایست دریاچه باید بصورت سری زمانی و در فصول مختلف پایش شود زیرا روزانه حجم زیادی از آب از طریق رودخانه‌ها و چشمه‌های جوشان از کف به دریاچه می‌ریزد که غلظت کلروفیل-آ به آنها وابسته است؛ از این رو بایستی در شرایط کم آب و پر آب غلظت کلروفیل-آ دریاچه ارزیابی شود تا منابع آلاینده آن مشخص شود که متأسفانه به دلیل کمبود نمونه‌برداری در این تحقیق به آن پرداخته نشده است.

واژه‌های کلیدی: آلودگی آب، غلظت کلروفیل-آ، Google Earth Engine، تصاویر ماهواره‌ای لندست-۸ و سنتینل-۲، شاخص‌های کیفی

^۱ گروه علوم و مهندسی آب،
دانشکده کشاورزی، دانشگاه بوعلی-
سینا، همدان، ایران

^۲ گروه سنجنش از دور و سیستم
اطلاعات جغرافیایی، دانشکده علوم
زمین دانشگاه شهید بهشتی، تهران،
ایران

^۳ گروه مرتع و آبخیزداری، دانشکده
منابع طبیعی، دانشگاه صنعتی
اصفهان، اصفهان، ایران

^۴ گروه علوم و مهندسی آب،
دانشکده کشاورزی، دانشگاه
کردستان، سنندج، ایران

استناد به این مقاله: طهماسبی،

پ.، س. بیگلری قلدره، س. م.

بشتامیان، س. پ. حسینی و پ. گل

محمدی قانع. ۱۴۰۳. مقایسه تصاویر

ماهواره‌ای لندست-۸ و سنتینل-۲

جهت تخمین میزان کلروفیل-آ

دریاچه زریبار. فصلنامه علوم

محیطی. ۲۲(۴): ۵۷۱-۵۸۴.

* Corresponding Author Email Address: p.tahmasebi@uok.ac.ir

DOI: 10.48308/envs.2024.1373



مقدمه

با گذشت زمان و گسترش جوامع و به تبع آن افزایش استفاده از منابع آبی، تغییر خصوصیات کیفی منابع آبی افزایش پیدا کرده است. رشد جمعیت و آلودگی‌های ناشی از تخلیه انواع فاضلاب‌های شهری، صنعتی و کشاورزی، شیرابه‌های محل دفع زباله و رواناب‌های سطحی باعث گسترش آلودگی و محدودتر شدن منابع آب شده است (Samadi et al., 2009). منابع آبی سطحی مانند دریاچه‌ها، رودخانه‌ها و مخازن سدها بیش‌تر از منابع آبی زیرزمینی در معرض آلودگی هستند (Simeonov et al., 2003). در بسیاری از مناطق جهان دریاچه‌های کوچک بعنوان منبع تأمین آب آشامیدنی و مناطق تفریحی (ورزش‌های آبی، شنا، ماهی‌گیری و ...) مورد استفاده قرار می‌گیرند و دارای اهمیت فرهنگی - اقتصادی می‌باشند. با این حال این دریاچه‌ها به دلیل حجم کم آب و شرایط هیدرولوژیکی ناپایداری که دارند تحت تأثیر فشارهای انسانی، اسیدی شدن، تغییرات اقلیمی و افزایش فسفر و نیتروژن قرار می‌گیرند (Padisak et al., 2003). در این میان فشارهای انسانی و اقلیمی وارد بر دریاچه بیشتر بوده که معمولاً آن را با مشکل یوتروفیکاسیون^۱ (پرتولیدی) مواجه می‌کند و به صورت یک معضل جدی حیات دریاچه را تهدید می‌نماید. اهمیت این موضوع به اندازه‌ای است که گفته می‌شود مهم‌ترین فاکتور در مطالعات اکوسیستم یک دریاچه، یوتروفیکاسیون می‌باشد (Asaeda et al., 2001). یوتروفیکاسیون مشکل مداوم و شایعی است که از جدی‌ترین تهدیدهای زیست‌محیطی محسوب می‌شود و بار اضافه مواد مغذی در سامانه‌های آبی است که منجر به افزایش تولیدشده و هر چند وقت یک بار باعث ایجاد شکوفه‌های سمی بسیار زیاد جلبک‌های میکروسکوپی^۲ و سبب کمبود اکسیژن در مناطق وسیع می‌گردد که این مسئله می‌تواند اشکال دیگر پهنه‌های آبی که به اکسیژن محلول در آب وابسته هستند را از بین ببرد. به عبارت

دیگر پرتولیدی؛ غنی‌سازی آب توسط مواد مغذی مخصوصاً ترکیبات نیتروژن و فسفر، که رشد سریع جلبک‌های میکروسکوپی و بسیاری از گیاهان آبی را تقویت کرده و متعاقباً یک اختلال نامطلوب در تعادل ارگانیسم‌ها و کیفیت آب بوجود می‌آورند. بطور کلی پرتولیدی به معنای فرا غنی شدن منابع آبی است (Khan and Ansari, 2001). طبق گزارشات منتشر شده ۵۴٪ دریاچه‌های آسیا، ۵۳٪ دریاچه‌های اروپا، ۴۸٪ دریاچه‌های آمریکای شمالی، ۴۱٪ دریاچه‌های آمریکای جنوبی و ۲۸٪ دریاچه‌های آفریقا با مشکل پرتولیدی مواجه هستند (Nyenje et al., 2010). از آنجایی که پرتولیدی سبب تغییر در فون و فلور، شرایط زنجیره غذایی و چرخه مواد مغذی دریاچه می‌شود (Asaeda et al., 2001). شناخت منابع آبی یوتروف و بررسی وضعیت تروپی آن‌ها اولین قدم جهت کنترل چنین پیامدهایی خواهد بود. اهمیت این موضوع سبب گردید که علاوه بر تحقیقات متعدد در این زمینه مدل‌های بسیاری برای بررسی پرتولیدی ارائه گردد (Koelmans et al., 2001).

در بررسی‌های مغذی شدن و اکوسیستم یک دریاچه، فسفر، نیتروژن و کلروفیل-آ جزو عناصر مهم هستند. از این رو استفاده از مقدار مطلق برخی متغیرها مانند فسفر کل و زیست توده فیتوپلانکتون (کلروفیل) و محاسبه شاخص‌های وضعیت تروفیک روش‌های مناسبی برای بررسی وضعیت تروفیک منابع آبی می‌باشند (Dodds, 2002). به این منظور مدل‌های تجربی بسیاری جهت برآورد میزان فسفر Schippers et al. (2006) نیتروژن Arheimer et al. (2004) و بویژه کلروفیل و در منابع آبی پیشنهاد شده است. با توجه به نقش کلروفیل-آ در بررسی‌های اکولوژیکی منابع آبی، عمده مدل‌ها بر برآورد میزان کلروفیل-آ با استفاده از مقادیر مواد مغذی (فسفر و نیتروژن) تمرکز دارند. از طرفی به منظور مدیریت

استفاده خواهد شد و نتایج حاصله با داده‌های برداشت شده در محل به کمک نرم افزار Spss مورد ارزیابی قرار می‌گیرند.

مواد و روش‌ها

منطقه مورد مطالعه

شهرستان مریوان در غرب استان کردستان واقع شده و در ۱۲۵ کیلومتری غرب سنندج قرار دارد. از شمال به شهرستان سقز، از شرق به شهرستان سنندج و دیواندره و از جنوب شرقی به شهرستان سروآباد و از غرب و شمال غربی به شهر پنجوبین شهرستان سلیمانیه و ۱۰۰ کیلومتری مرز مشترک با کشور عراق منتهی می‌شود. وسعت این شهرستان ۲۲۶۰ کیلومتر مربع می‌باشد.

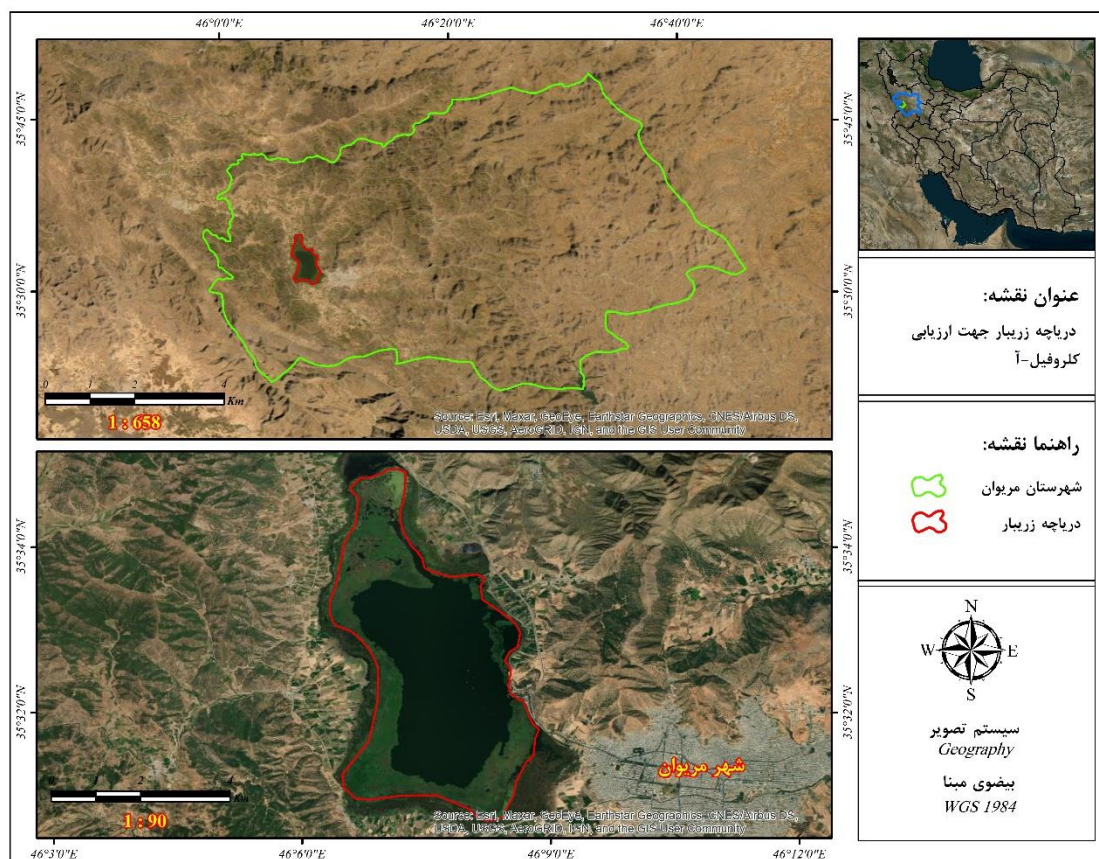
دریاچه زریبار در دو کیلومتری شمال غربی شهر مریوان و در طول جغرافیایی ۴۶ درجه و شش دقیقه و عرض جغرافیایی ۳۵ درجه و ۳۱ دقیقه و ارتفاع ۱۲۵۰ متری از سطح دریا واقع شده است. وسعت دریاچه به دلیل تغییرات حجم آبی در فصول مختلف متغیر می‌باشد. حداقل عمق آن حدود دو متر و حداکثر شش متر گزارش شده است. مساحت دریاچه حدود ۲۰۰۰ هکتار می‌باشد. آب دریاچه زریبار توسط سه منبع اصلی تغذیه می‌شود (Asarab, 2007) که شامل:

نزولات جوی (برف و باران) که سالانه حدود ۲۰ میلیون مترمکعب (آب منطقه‌ای استان کردستان) آب دریاچه را تامین می‌کند. چشمه‌های کف جوش بستر دریاچه که به سفره آب‌های زیرزمینی مرتبط است و سالانه نزدیک به ۱۱ میلیون متر مکعب از این منبع آب به دریاچه وارد می‌شود (Asarab, 2007). آب‌های ورودی به دریاچه با رقمی معادل ۳۳ میلیون مترمکعب در سال که از منابع تأمین آب موقتی دریاچه محسوب می‌شوند و پس از بارش باران یا برف، از طریق آبراهه‌های جاری بر دامنه‌های غربی، شرقی و حوضه آبخیز دریاچه به آن می‌ریزد (آب منطقه ای کردستان).

پرتولیدی، مطالعه روابط بین نیتروژن و فسفر با کلروفیل-آ بسیار با اهمیت بوده و اطلاعات مفیدی از شرایط اکولوژیک منبع آبی در اختیار می‌گذارد (Wang et al. (2007); Lv et al. (2008); Suthers and Rissik. (2019).

در این خصوص تعیین وضعیت کیفی منابع آب برای اتخاذ راه کارهای مناسب جهت جلوگیری از کاهش کیفیت آب و یا بهبود آن ضروری به نظر می‌رسد. با توجه به اینکه میزان کلروفیل-آ از مهم‌ترین عوامل تعیین کننده کیفیت آب می‌باشد در این پژوهش مورد بررسی قرار می‌گیرد. جهت پایش میزان کلروفیل-آ پهنه آبی چندین روش وجود دارد از جمله برداشت میدانی و حضور در محل جهت نمونه برداری در سطح و عمق مشخص است این روش بسیار هزینه‌بر و زمان‌بر است و از طرفی بستگی به شرایط آب و هوایی دارد برای مثال در فصل زمستان نمونه برداری بسیار سخت و مشقت بار است. روش دیگر استفاده از سنسورهای ثابت است که این روش نیز مشکلاتی از جمله محدود بودن به تراز سطح آب دارد بعنوان مثال در روزهایی که حجم آب به علت بارش بالا می‌رود و همچنین در شرایط کم آبی که سطح آب پایین می‌رود سنسور خارج از پهنه آبی قرار می‌گیرد سنسور قادر به اندازه‌گیری در سطح مورد نظر نمی‌باشد. با توجه به مشکلات نامبرده داده‌های سنجش از دور بهترین روش برای پایش کیفی آب می‌باشد.

در این راستا، داده‌های سنجش از دور با ویژگی‌هایی از قبیل تصویر برداری مکرر در فواصل زمانی کم، وسیع بودن سطح پوشش زمینی برداشت شده توسط سنسور، قدرت تفکیک طیفی و مکانی مناسب داده‌ها، ارزان بودن و دسترسی سریع به نقاط دور افتاده ابزاری مناسب جهت پایش کیفی آب را فراهم می‌سازند (Gorelick et al. (2017). در این پژوهش با استفاده از تصاویر ماهواره‌های لندست-۸ و سنتینل-۲ در سامانه تحت وب GEE برای پایش کلروفیل-آ دریاچه زریبار از سال ۲۰۱۷ تا ۲۰۱۹



شکل ۱- منطقه مورد مطالعه (دریاچه زریبار)

Fig. 1- The study area (Zaribar Lake)

استفاده شده است زیرا خطاهای این تصاویر توسط تیم GEE و با استفاده از الگوریتم‌های استاندارد بر طرف شده است. در جدول (۱) قدرت تفکیک مکانی^۵ و محدوده طیفی هر یک از باندهای تصاویر در طیف الکترومغناطیسی آورده شده است. بطوریکه تصاویر سنتینل-۲ دارای قدرت تفکیک مکانی ۱۰ و ۲۰ متر و تصاویر لندست-۸، ۳۰ متر است.

داده‌های مورد استفاده

سامانه تحت وب GEE تعداد بالایی مجموعه داده در سرور خود دارد که تمامی تصحیحات اتمسفری، رادیومتریک، هندسی و سایر اعوجاجات آنها برطرف شده و به صورت مجموعه داده در دسترس است که دیگر تصاویر نیازی به این تصحیحات ندارند. در این پژوهش از مجموعه تصاویر سطح C سنتینل ۳۲ و تصاویر سطح زمین لندست ۴۸

جدول ۱- قدرت تفکیک مکانی و محدوده طیفی تصاویر سنتینل-۲ و لندست-۸

Table 1. Spatial resolution and spectral range of Sentinel-2 and Landsat-8 images

Spectrum	S2	Range (nm)	C (m)	SR (m)	L8	(nm) Range	C (nm)	SR (m)
Aerosol	B1	433-453	433	60	B1	435-451	433	30
Blue	B2	458-523	491	10	B2	452-512	480	30
Green	B3	543-578	560	10	B3	533-590	561	30
Red	B4	650-680	665	10	B4	636-673	654	30
RE-1	B5	698-713	705	20	-	-	-	-
NIR-1	B8b	855-875	865	20	B5	851-879	865	30

لندست-۸= L8, قدرت تفکیک مکانی = SR, مرکز محدوده طیفی = C, محدوده طیف الکترومغناطیسی = Range, سنتینل ۲ = S2*

از سطح پیکره آبی دریاچه زریبار باشد و هم‌چنین کم‌ترین پوشش ابر (دو درصد) را داشته باشند. در جدول (۲) تاریخ برداشت نمونه‌برداری زمینی و تاریخ تصاویر ماهواره‌ای متناسب با تاریخ نمونه‌برداری زمینی ذکر شده است.

روش تحقیق

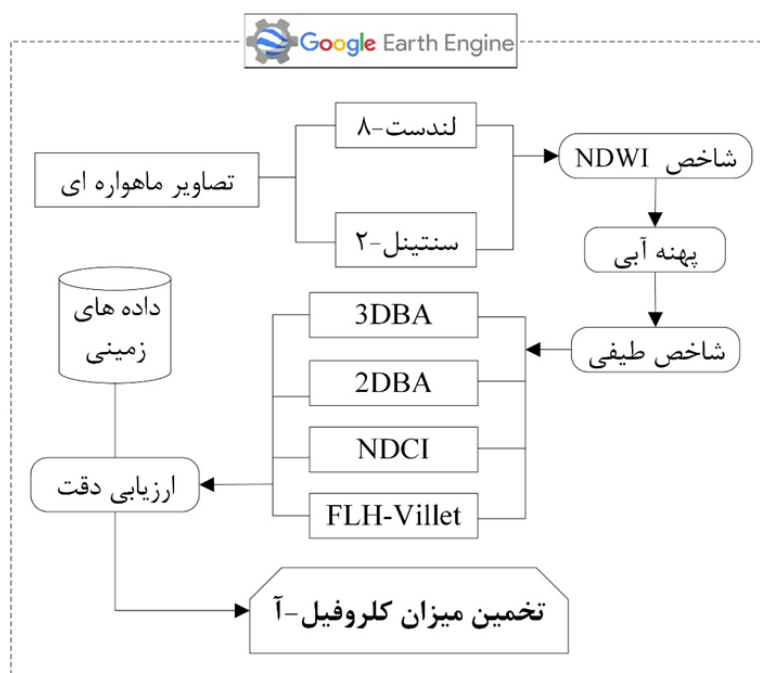
تهیه و آماده‌سازی تصاویر، کدنویسی، پردازش تصاویر و ارزیابی نتایج از سامانه تحت وب GEE استفاده شد و درنهایت با استفاده از نرم‌افزار ArcGIS نسبت به تهیه نقشه غلظت کلروفیل-آ منطقه مورد مطالعه اقدام شد. فرایند کلی انجام پژوهش در شکل ۲ نشان داده شده است.

با توجه به اینکه دریاچه زریبار محیطی پویا است و لایه‌های آبی آن توسط چشمه‌های جوشان از کف دائمی در حال جابجایی است در نتیجه مقدار کلروفیل-آ به سرعت تغییر می‌کند. بنابراین سعی شد نزدیک‌ترین تاریخ تصویربرداری ماهواره‌های سنتینل-۲ و لندست-۸ نسبت به نمونه‌برداری زمینی از سطح دریاچه زریبار انتخاب شود تا دارای حداقل فاصله زمانی باشند و در برآورد میزان کلروفیل-آ خطای کاذب ایجاد نشود و مقدار پیش‌بینی شده کلروفیل-آ به واقعیت نزدیک باشد. سرانجام شاخص‌های طیفی بر روی این تصاویر اعمال شد و نتایج به شرح زیر است. در این تحقیق سعی شد تصاویر ماهواره‌ای به‌طوری انتخاب شود که دارای حداقل فاصله زمانی با داده‌های برداشت شده زمینی

جدول ۲- تاریخ برداشت نمونه‌برداری زمینی و تاریخ تصاویر ماهواره‌ای

Table 2. The date of ground sampling and the date of satellite images

داده و تصویر ماهواره ای Data and satellite image	تاریخ برداشت Data collection
سنتینل-۲ Sentinel-2	2019.07.29
لندست-۸ Landsat 8	2019.07.28
نمونه‌برداری زمینی Sampling	2019.07.29



شکل ۲- فلوچارت روش انجام تحقیق

Fig. 2- Flowchart of the research method

اعمال شاخص نرمال شده تفاوت پهنه‌های آبی

(NDWI) بر روی تصاویر ماهواره‌ای

پس از آنکه تصاویر ماهواره‌ای متناسب با تاریخ نمونه برداری زمینی انتخاب شد بایستی شاخص NDWI جهت استخراج پهنه‌های آبی بر روی تصاویر ماهواره‌ای اعمال شود. این شاخص از باند مادون قرمز نزدیک و باند سبز مرئی برای بازسازی پهنه‌های آبی و حذف پوشش گیاهی و خاک استفاده می‌کند. دامنه تغییرات این شاخص بین +1 و -1 قرار دارد؛ هرچه ارزش پیکسل به +1 نزدیک‌تر باشد، نشان دهنده وجود پهنه آبی است و هرچه به -1 نزدیک‌تر باشد، نشان دهنده عدم وجود پهنه آبی می‌باشد. بنابراین این شاخص در سامانه تحت وب GEE بر روی تصاویر ماهواره‌ای اعمال گردید تا پهنه آبی از غیر آب جدا شود. در این مرحله پهنه آبی دریاچه بطور کامل از محیط اطراف جدا شده تا در مرحله اجرای شاخص‌های پایش کلروفیل بر روی تصاویر ماهواره‌ای، پوشش‌های گیاهی و خاکی در مدل شرکت نکنند زیرا در محیط‌های خاکی و گیاهی مقدار کلروفیل-آ نسبت به پهنه‌های آبی بالا بوده و به شدت میزان کلروفیل-آ بالا را نشان می‌دهند و خطای کاذب ایجاد می‌شود. در نتیجه این مرحله یکی از مهم‌ترین مراحل ارزیابی کلروفیل-آ است. این شاخص با استفاده از رابطه زیر به

دست می‌آید:

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

$$NDWI = (B3 - B5) / (B3 + B5) \quad \text{لندست-۸:}$$

$$NDWI = (B3 - B8) / (B3 + B8) \quad \text{سنتینل ۲:}$$

Green: باند سبز در تصاویر ماهواره‌ای است. این باند در تصاویر لندست-۸ و سنتینل ۲ برابر با باند ۳ (B3) است. NIR: باند مادون قرمز نزدیک در تصاویر ماهواره‌ای است. این باند در تصاویر لندست-۸ و سنتینل ۲ به ترتیب برابر با باند ۵ (B5)، باند ۸ (B8) است.

اعمال شاخص‌های طیفی بر روی تصاویر جهت

ارزیابی کلروفیل-آ

شاخص‌های طیفی بر روی پهنه آبی دریاچه زریبار که در مرحله قبل استخراج گردید اعمال می‌شوند تا میزان کلروفیل آن برآورد گردد. این تخمین به کمک تحلیل بازتاب و جذب بر روی باندهای تصاویر سنجنش از دوری بدست می‌آید. در این تحقیق از چهار شاخص طیفی 2DBA، 3DBA، NDCI و FLH-Violet برای پیش‌بینی کلروفیل-آ دریاچه زریبار استفاده شد. در جدول (۳) رابطه مربوط به شاخص‌های طیفی آورده شده است.

جدول ۳- شاخص‌های طیفی اعمال شده بر روی تصاویر ماهواره‌ای

Table 3. The spectral indices applied to satellite images

تصویر ماهواره‌ای Satellite image	شاخص طیفی Spectral index	ترکیب باندی Band composition
Sentinel-2	2BDA	(band5)/(band4)
	3BDA	(1/band4) - (1/band5) × (band8b)
	NDCI	(band5) - (band4)/(band5) + (band4)
	FLH-Violet	(band3) - [(band4) + (band2) - (band4)]
Landsat 8	2BDA	(band5)/(band4)
	3BDA	(band2) - (band4)/(band3)
	NDCI	(band5) - (band4)/(band5) + (band4)
	FLH-Violet	(band3) - [(band5) + ((band1) - (band5))]

ارزیابی دقت

لازمه استفاده از هر نوع اطلاعات موضوعی، آگاهی از درستی و صحت آن است. ارزیابی نتایج پیش‌بینی کلروفیل-آ آخرین مرحله از تولید نقشه‌های حاصل از کلروفیل-آ است. در ارزیابی مشخص می‌شود که داده‌های بدست آمده متناسب با کاربرد مورد نظر، از دقت لازم برخوردار هستند یا خیر. این ارزیابی می‌تواند بصورت مقایسه بین داده‌های تولید شده توسط مدل و داده‌های مرجع (داده‌های برداشت شده توسط شرکت آساراب) باشد. روش معمول و استاندارد برای تعیین دقت نتایج به‌دست آمده، استفاده از ماتریس خطا است. ماتریس خطا که ماتریس ابهام^۶ نیز نامیده می‌شود، حاصل مقایسه پیکسل به پیکسل‌های معلوم در واقعیت زمینی با پیکسل‌های متناظر در نتایج است. که در این پژوهش از خطای جزز میانگین مربعات و ضریب همبستگی برای ارزیابی دقت مدل-های برآورد کلروفیل-آ دریاچه زریبار استفاده شده است.

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (X_{obs,i} - X_{mod,i})^2}{n}} \quad (1)$$

$X_{obs,i}$: مقدار واقعی زمینی

$X_{mod,i}$: مقدار پیش‌بینی شده

n: مجموع تعداد نقاط

نتایج و بحث

ارزیابی الگوریتم‌های پیش‌کلروفیل-آ

جهت برآورد میزان کلروفیل-آ دریاچه زریبار الگوریتم‌های 2BDA, 3BDA, NDCI و FLH بر روی تصاویر سنتینل-۲ (۱۰ و ۲۰ متر) و لندست-۸ (۳۰ متر) اعمال گردید. بصورت کلی نتایج حاصل از تصاویر سنتینل-۲ بسیار به واقعیت نزدیک‌تر بود. در واقع تصاویر سنتینل-۲ نسبت به تصاویر لندست-۸ میزان کلروفیل-آ را با دقت بالاتری برآورد کرده است. شاخص‌های 2BDA و NDCI در هر دو تصویر به خوبی عمل کردند و نتایج قابل قبولی ارائه دادند.

سنتینل-۲

پس از آن‌که هر چهار الگوریتم 2BDA, 3BDA, NDCI و FLH بر تصویر سنتینل-۲ اعمال شد نتایج بدست آمده به کمک داده‌های نمونه‌برداری زمینی توسط شرکت ساراب ارزیابی دقت گردید (شکل ۳). الگوریتم‌های 2BDA و NDCI بالاترین عملکرد را در برآورد میزان کلروفیل داشتند R^2 آنها به ترتیب برابر با ۰/۷۹۷ و ۰/۷۹۲ است. اما الگوریتم FLH کمترین دقت را در برآورد میزان کلروفیل داشت که R^2 آن برابر با ۰/۰۳ است (جدول ۴ و نمودار ۱).

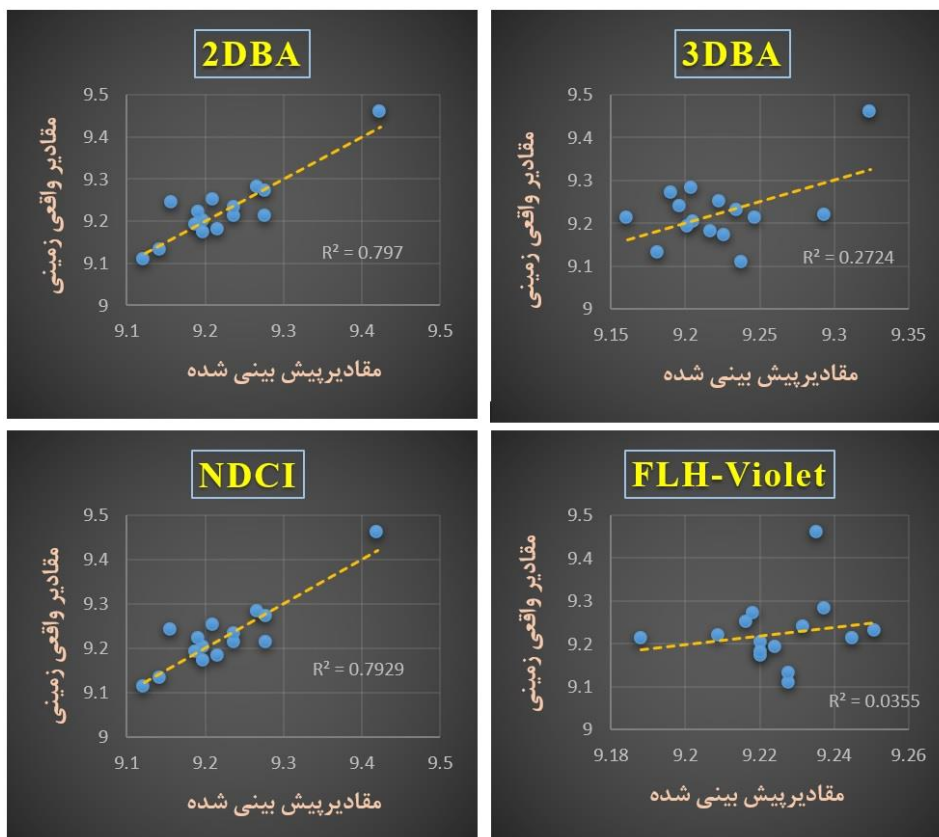
جدول ۴- ارزیابی دقت میزان کلروفیل-آ پیش‌بینی شده
Table 4. Evaluation of predicted Chlorophyll-a accuracy

Index	Sentinel-2		Landsat-8	
	RMSE	R ²	RMSE	R ²
2DBA	0.00905	0.7970	0.01499	0.4427
3DBA	0.01713	0.2724	0.01580	0.3897
NDCI	0.00914	0.7929	0.01535	0.4159
FLH-Violet	0.01973	0.0355	0.01935	0.0714

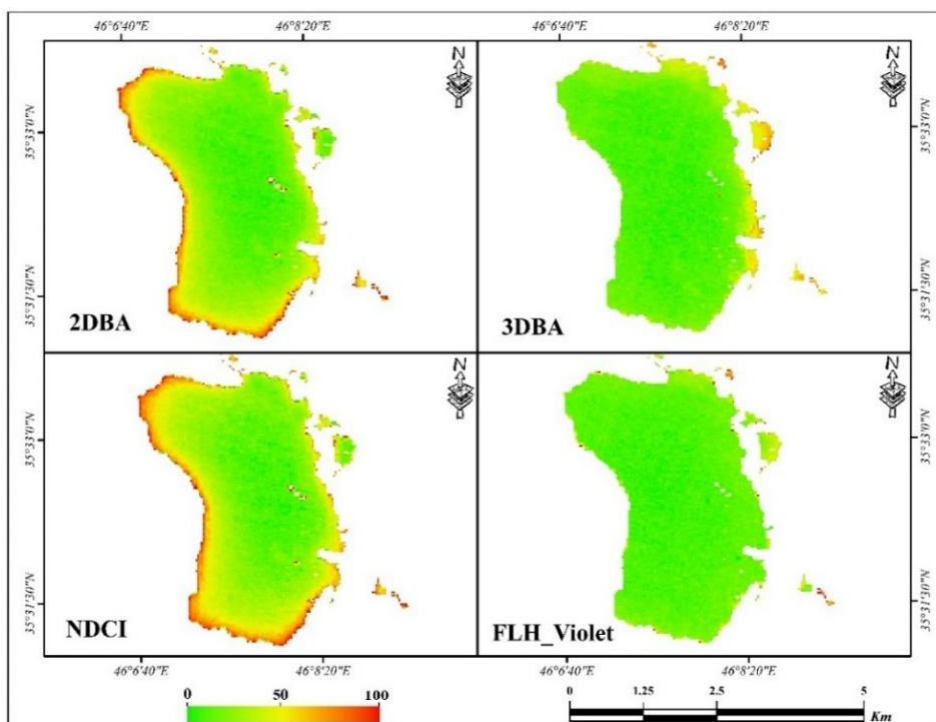
بردارای ماهواره لندست-۸ و تاریخ نمونه‌برداری زمینی است. در تصاویر لندست-۸ هم طبق سنتینل-۲، الگوریتم‌های 2BDA و NDCI بالاترین عملکرد را در برآورد میزان کلروفیل داشتند R^2 آنها به ترتیب برابر با ۰/۴۴ و ۰/۴۱ می‌باشد. همچنین الگوریتم FLH کم‌ترین دقت را در برآورد میزان کلروفیل داشت که R^2 آن برابر با ۰/۰۷ است (جدول ۴ و نمودار ۲).

لندست-۸

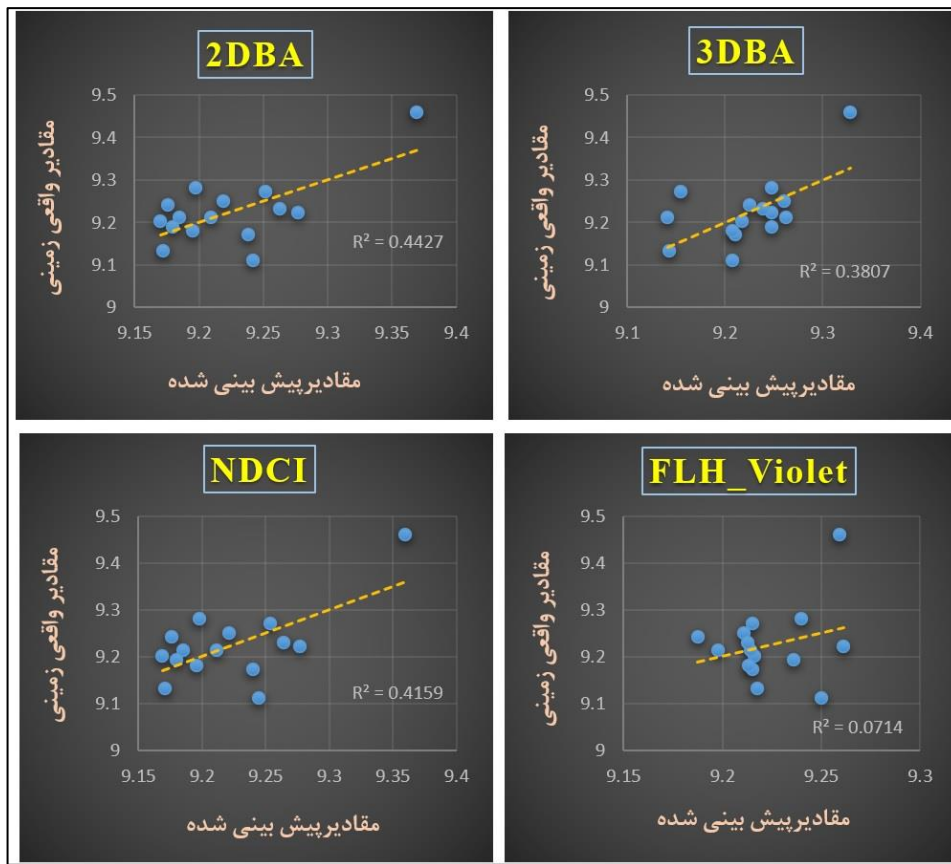
پس از اجرای الگوریتم‌های 2BDA, 3BDA, NDCI و FLH بر روی تصویر لندست-۸، با استفاده از داده‌های زمینی شرکت ساراب نتایج بدست آمده از الگوریتم‌ها ارزیابی دقت شدند (شکل ۴). همان‌طور که از جدول (۴) پیداست نتایج بدست قابل قبول نبوده و R^2 در هر چهار الگوریتم کم‌تر از ۰/۵۰ بوده است. که ناشی از اختلاف زمانی بین تاریخ تصویر



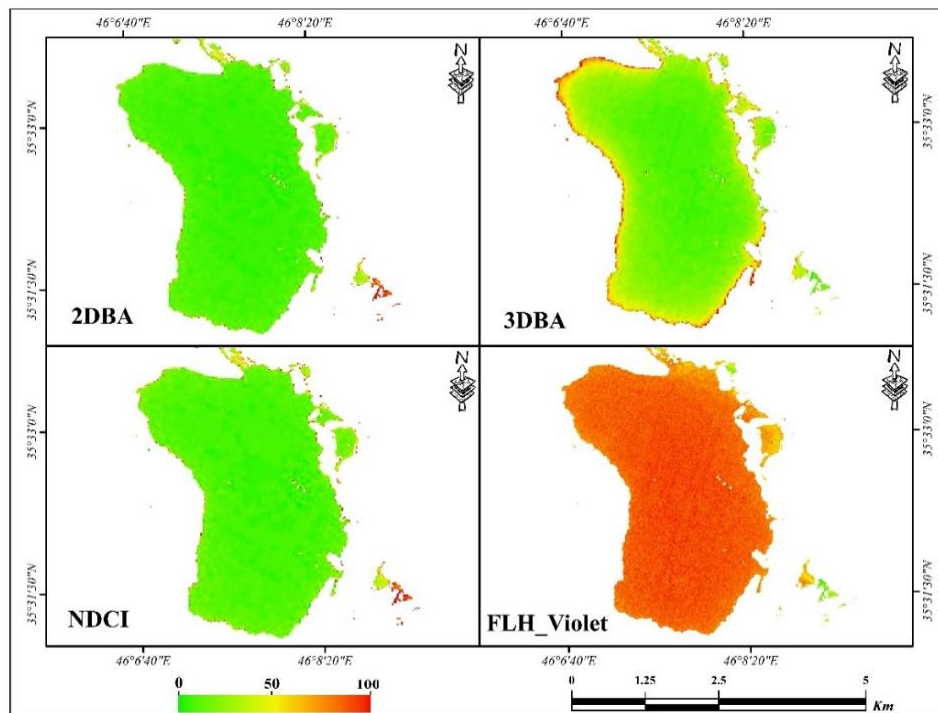
شکل ۳- ارزیابی دقت میزان کلروفیل-آ پیش بینی شده در تصویر سنتینل ۲
 Fig. 3- Evaluation of the accuracy of predicted Chlorophyll-a in Sentinel-2 imagery



شکل ۴- ارزیابی دقت میزان کلروفیل-آ در تصویر سنتینل ۲
 Fig. 4- Evaluation of Chlorophyll-a accuracy in Sentinel-2 imagery



شکل ۵- ارزیابی دقت میزان کلروفیل-آ پیش بینی شده در تصویر لندست-۸
 Fig. 5- Evaluation of predicted Chlorophyll-a accuracy in Landsat-8 image



شکل ۶- ارزیابی دقت میزان کلروفیل-آ در تصویر لندست-۸
 Fig. 6- Evaluation of Chlorophyll-a accuracy in Landsat-8 imagery

بالای این دو الگوریتم با استفاده از تصاویر سنتینل-۲ جهت اندازه‌گیری کلروفیل-آ نسبت به تصاویر لندست-۸ می‌باشد. در تحقیق Karimi et al. (2022) جهت اندازه‌گیری میزان کلروفیل-آ از تصاویر لندست-۸ و سنتینل-۲ بر روی دریاچه کم عمق چیتگر استفاده شد. نتایج بدست آمده نشان دهنده دقت بالای الگوریتم 2BAND در لندست-۸ و الگوریتم‌های 2BAND و NDCI در سنتینل-۲ جهت اندازه‌گیری کلروفیل-آ می‌باشد. در تحقیق (Valizadeh Kamran et al. 2020) در منطقه خور تیباب برای نظارت بر اندازه‌گیری مقدار کلروفیل-آ از الگوریتم‌های بیو اپتیک OC2 و OC3 بر روی تصاویر لندست-۸ و سنتینل-۲ استفاده کردند. نتایج آن‌ها حاصل از دقت تصاویر بالای اعمال الگوریتم‌ها در تصاویر لندست-۸ (R^2 معادل ۰/۹۱) نسبت به سنتینل-۲ (R^2 معادل ۰/۶۴) بود. در تحقیق (Kenarkoohi et al. 2020) برای اندازه‌گیری کلروفیل آ از شاخص NDCI بر روی تصاویر لندست-۸ و در تالاب چغاخور استفاده شد که نتایج نشان دهنده دقت بالای این شاخص (R^2 معادل ۰/۹۲) برای اندازه‌گیری میزان کلروفیل-آ در تصاویر لندست-۸ می‌باشد (Taheri et al. 2018). نیز برای بررسی غلظت کلروفیل-آ در دریاچه سد اکباتان از همبستگی ترکیب باندی بین تصاویر لندست ۷ و غلظت کلروفیل-آ استفاده کردند. یکی از دلایل دقت بالای الگوریتم‌های 2BDA و NDCI در تصاویر سنتینل-۲ نسبت به تصاویر لندست-۸ در تحقیق حاضر استفاده از تصویر سنتینل در همان روز نمونه برداری است در صورتیکه تصویر لندست با یک روز اختلاف زمانی نسبت به نمونه‌برداری کسب شده است؛ همچنین یکی دیگر از دلایل نتایج بهتر تصویر سنتینل-۲ قدرت تفکیک مکانی آن بوده که در تحقیق Buma et al. (2020) نیز به آن اشاره شده است.

نتیجه‌گیری

یکی از مشکلاتی که در نتیجه افزایش جمعیت بوجود آمده آلوده ساختن آب‌های سطحی است و باعث کاهش کیفیت

در این تحقیق جهت اندازه‌گیری میزان کلروفیل-آ در دریاچه زریبار از تصاویر لندست-۸ و سنتینل-۲ استفاده شد. الگوریتم‌هایی که جهت اندازه‌گیری کلروفیل-آ بر روی این تصاویر اعمال شد شامل الگوریتم‌های 2BDA، 3BDA، NDCI و FLH بود که نتایج بدست آمده نشان دهنده دقت قابل قبول الگوریتم‌های 2BDA و NDCI به ترتیب با R^2 معادل ۰/۷۹۷ و ۰/۷۹۲ در تصاویر سنتینل-۲ بود. یکی از تخمین‌های درستی که این دو الگوریتم بدست آوردند و در شکل (۴) به خوبی نمایان است میزان خطای آن در مناطق حاشیه‌ای دریاچه در قسمت غربی است که می‌تواند بدلیل عمق کم آب و فعالیت‌های انسانی اطراف دریاچه باشد؛ همچنین استفاده از تصاویر لندست-۸ بدلیل اندازه بزرگ‌تر سلول‌های آن نسبت به تصاویر سنتینل-۲ می‌تواند استفاده از آن را جهت تشخیص کلروفیل-آ در مناطق کوچک با چالش روبرو نماید (Buma et al. 2020) که در نتایج به خوبی نمایان است و الگوریتم‌های اعمال شده بر روی تصاویر سنتینل توانسته‌اند نتایج قابل قبولی نسبت به لندست-۸ ارائه دهند. با توجه به اینکه تصویر دریافتی ماهواره لندست-۸ یک روز قبل از نمونه‌برداری زمینی بوده و همچنین به دلیل جابجایی زمانی و مکانی کلروفیل-آ در دریاچه یکی از دلایل خطای تصویر لندست نیز از دلایل دیگر خطای بالای تصاویر لندست-۸ نسبت به تصاویر سنتینل-۲ می‌باشد که در صورت کسب داده نزدیک به زمان نمونه‌برداری احتمالاً اعمال الگوریتم‌های استخراج کلروفیل آ به کمک تصاویر لندست-۸ نتایج بهتری به دست آورد.

در تحقیق Beck et al. (2016) از تصاویر ماهواره‌های مختلف چند طیفی و ابر طیفی و الگوریتم‌های مختلف جهت اندازه‌گیری کلروفیل-آ استفاده شد؛ نتایج به دست آمده مشخص نمود که دقت الگوریتم‌های 2BDA و NDCI به ترتیب برابر با R^2 معادل ۰/۷۹۹ و ۰/۷۹۴ در تصاویر سنتینل-۲ بود که به نسبت دقت همین الگوریتم‌ها در تصاویر لندست-۸ به ترتیب برابر با R^2 معادل ۰/۱۵۶ و ۰/۱۲۵، از دقت به نسبت بالاتری برخوردار بوده و گواه دقت

می‌تواند موثر باشد. دلیل دیگر اندازه بزرگ‌تر سلول‌های تصاویر لندست-۸ نسبت به اندازه سلول‌های سنتینل-۲ بوده که می‌تواند میزان خطای اندازه‌گیری را بخصوص در مناطق حاشیه‌ای افزایش دهد. جهت بررسی دقیق‌تر میزان کلروفیل-آ در این دریاچه می‌بایست در سری‌های زمانی فصول مختلف صورت گیرد که با توجه به میزان بارش اندازه آب موجود تغییر پیدا می‌کند و غلظت کلروفیل آ نیز به آن وابسته است؛ بنابراین بایستی در شرایط کم آب و پر آب دریاچه نیز باید میزان کلروفیل آ مورد بررسی قرار گیرد که متاسفانه به دلیل کمبود نمونه‌برداری در این تحقیق به آن پرداخته نشده است.

سپاسگزاری

با کمال تشکر و قدردانی از شرکت مهندسی مشاور آساراب، که با تلاش و همکاری بی‌وقفه خود در جمع‌آوری داده‌ها و انجام مطالعات جامع دریاچه زریبار شهرستان مریوان، نقش بسزایی در پیشبرد این تحقیق ایفا کردند. زحمات و تخصص این تیم، بویژه در زمینه داده‌ها کمک شایانی کرده به ما و امید است نتایج این پژوهش بتواند در حفاظت و مدیریت بهینه این اکوسیستم ارزشمند مؤثر واقع شود.

پی‌نوشت‌ها

¹ Eutrophication

² Microalgae

³ Image Collection Sentinel 2 Level C

⁴ Image Collection Landsat 8 Surface Reflectance

⁵ Spatial Resolution

⁶ Confusion Matrix

References

Arheimer, B., Torstensson, G. and Wittgren, H.B., 2004. Landscape planning to reduce coastal eutrophication: agricultural practices and constructed wetlands. *Landscape and Urban Planning*. 67(1-4), 205-215. [https://doi.org/10.1016/S0169-2046\(03\)00040-9](https://doi.org/10.1016/S0169-2046(03)00040-9).

Asaeda, T., Trung, V.K., Manatunge, J. and Van Bon, T., 2001. Modelling macrophyte-nutrient-phytoplankton interactions in shallow eutrophic lakes and the evaluation of environmental impacts. *Ecological Engineering*. 16(3), 341-357.

آب شده است. بررسی و اندازه‌گیری کیفیت آب در گذشته به صورت مشاهدات میدانی و آزمایشگاهی بوده که علاوه بر اتلاف وقت و هزینه نیاز به اندازه‌گیری‌های متعددی نیز داشته است. دانشمندان برای بررسی کیفیت آب از اندازه‌گیری میزان کلروفیل-آ موجود در آب استفاده می‌کنند و یکی از موارد نشان دهنده کیفیت آب می‌باشد. طی سالیان اخیر با افزایش استفاده از تصاویر ماهواره‌ای عوامل مختلفی مورد بررسی قرار گرفته‌اند که یکی از آن‌ها میزان کلروفیل-آ موجود در آب بوده و باعث شده بررسی میزان کلروفیل-آ در کم‌ترین زمان ممکن انجام شده و به تبع آن هزینه آن نیز نسبت به روش‌های اندازه‌گیری میدانی کاهش یابد؛ از همین رو در این تحقیق جهت اندازه‌گیری میزان کلروفیل-آ در دریاچه زریبار واقع در شهرستان مریوان استان کردستان از تصاویر ماهواره‌ای سنتینل-۲ و لندست-۸ به کمک سامانه تحت وب Google Earth Engine استفاده شد. الگوریتم‌های مورد استفاده شامل الگوریتم‌های 2BDA، 3BDA، NDCI و FLH بود که نتایج به دست آمده نشان دهنده دقت قابل قبول الگوریتم‌های 2BDA و NDCI به ترتیب با R^2 معادل ۰/۷۹۷ و ۰/۷۹۲ در تصاویر سنتینل-۲ بود. اجرای این الگوریتم‌ها بر روی تصاویر لندست-۸ نتوانست دقت قابل قبولی ارائه دهد. یکی از دلایل عدم دقت مناسب تصاویر لندست-۸ جهت اندازه‌گیری کلروفیل آ فاصله زمانی یک روزه با نمونه‌برداری‌های زمینی است که با توجه به جابجایی کلروفیل آ به صورت زمانی و مکانی، در سطح و در عمق

منابع

[https://doi.org/10.1016/S0925-8574\(00\)00120-8](https://doi.org/10.1016/S0925-8574(00)00120-8).

Beck, R., Shengan Zhan, Hongxing Liu, Susanna Tong, Bo Yang, Min Xu, Zhaoxia Ye, Yan Huang, Song Shu, Qiusheng Wu, Shujie Wang, Kevin Berling, Andrew Murray, Erich Emery, Molly Reif, Joseph Harwood, Jade Young, Christopher Nietch, Dana Macke, Mark Martin, Garrett Stillings, Richard Stump, Haibin Su., 2016. Comparison of satellite reflectance algorithms for estimating chlorophyll-a in a temperate reservoir using coincident hyperspectral aircraft imagery and dense

- coincident surface observations. *Remote Sensing of Environment*. 178, 15-30. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2016.03.002>.
- Buma, W. G., and Lee, S. I., 2020. Evaluation of sentinel-2 and landsat 8 images for estimating chlorophyll-a concentrations in lake Chad, Africa. *Remote Sensing*, 12(15), 2437. [10.3390/rs12152437](https://doi.org/10.3390/rs12152437).
- Dodds, W. K., 2003. Misuse of inorganic N and soluble reactive P concentrations to indicate nutrient status of surface waters. *Journal of the North American Benthological Society*, 22(2), 171-181. <https://doi.org/10.2307/1467990>.
- Gorelick, N., Hancher, M., Dixon, M., Ilyushchenko, S., Thau, D., and Moore, R., 2017. Google Earth Engine: Planetary-scale geospatial analysis for everyone. *Remote sensing of Environment*, 202, 18-27. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2017.06.031>.
- Karimi, B., Hashemi, S. H., and Aghighi, H. 2022., Performance of Sentinel-2 and Landsat-8 satellites in estimating Chlorophyll-a concentration in a shallow freshwater lake. <https://doi.org/10.21203/rs.3.rs-1968542/v1>.
- Kenarkoohi, M., Ahmadi Nadoushan, M., and Abolhasani, M. H., 2020. Estimation of Chlorophyll-A Concentration in Choghakhor wetland using remote sensing and in-situ measurements. *Journal of Animal Environment*, 12(3), 475-486. <https://www.magiran.com/p2214207>.
- Khan, F. A., and Ansari, A. A. 2005., Eutrophication: an ecological vision. *The botanical review*, 71(4), 449-482. [http://dx.doi.org/10.1663/0006-8101\(2005\)071\[0449:EAEV\]2.0.CO;2](http://dx.doi.org/10.1663/0006-8101(2005)071[0449:EAEV]2.0.CO;2).
- Koelmans, A.A., Van der Heijde, A., Knijff, L.M., Aalderink, R.H., 2001. Integrated Modelling of Eutrophication and Organic Contaminant Fate & Effects in Aquatic Ecosystems, A Review. [10.1016/s0043-1354\(01\)00095-1](https://doi.org/10.1016/s0043-1354(01)00095-1).
- Nyenje, P.M., Foppen, J.W., Uhlenbrook, S., Kulabako, R, Muwanga, A., 2010. utrophication and nutrient release in urban areas of sub-Saharan Africa - A review. *Science of the Total Environment*. 408: 447-455. [10.1016/j.scitotenv.2009.10.020](https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2009.10.020).
- Padisak, J., Borics, G.A., Feh'er, G., Grigorszky, I.A., Oldal, I., Schmidt, A., Zambone-Doma, Z., 2003. Dominant species, functional assemblages and frequency of equilibrium phases in late summer phytoplankton assemblages in Hungarian small shallow lakes. *Hydrobiologia*. 502: 157-168. [10.1023/B:HYDR.0000004278.10887.40](https://doi.org/10.1023/B:HYDR.0000004278.10887.40).
- Samadi M.T, Saghi M.H, Rahmani A.R, Torabzadeh H., 2009. Zoning of Water Quality of Hamadan Darreh-Morad Beyg River Based on NSFQI Index Using Geographic Information System. *Journal of Hamadan University of Medical Sciences*; 16(3): 8-43. <http://sjh.umsha.ac.ir/article-1-309-fa.html>.
- Simeonov V, J.A. Stratis, C. Samara, G. Zachariadis, D. Voutsas, A. Anthemidis, M. Sofoniou, Th. Kouimtzis., 2003. Assessment of the surface water quality in Northern Greece, *Water Res*; 37: 4119-4124. [https://doi.org/10.1016/S0043-1354\(03\)00398-1](https://doi.org/10.1016/S0043-1354(03)00398-1).
- Suthers, I., Rissik, D., and Richardson, A. (Eds.), 2019. *Plankton: A guide to their ecology and monitoring for water quality*. CSIRO publishing. <https://doi.org/10.1093/plankt/fbp102>.
- Schippers, P., Van de Weerd, H., De Klein, J., De Jong, B., and Scheffer, M., 2006. Impacts of agricultural phosphorus use in catchments on shallow lake water quality: about buffers, time delays and equilibria. *Science of the Total Environment*, 369(1-3), 280-294. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2006.04.028>.
- Taheri, A., Serajian, M. R., Ghashghaie, M., and Weysi, K. 2018. Estimation of Chlorophyll-a Concentration Using Remote Sensing Images. *Iranian Journal of Soil and Water Research*, 49(1), 39-50. doi: 10.22059/ijswr.2018.208586.667472.
- Valizadeh Kamran, Khalil & Atazadeh, Ehsan and MahdaviFard, Mostafa., 2020. Estimation of chlorophyll-a concentration using ground data and Sentinel-2 and Landsat-8 Satellite images processing (Case study: Tiab Estuary). *Journal of RS and GIS for Natural Resources*, 1, 72-83. [10.30495/girs.2020.672377](https://doi.org/10.30495/girs.2020.672377).
- Wang, X.1., Lu, Y.1., He, G.Z., Han, J.Y., Wang, T.Y. 2007. Exploration of relationships between phytoplankton biomass and related environmental variables using multivariate statistic analysis in a eutrophic shallow lake: A 5-year study. *Journal of Environmental Sciences*. 19: 920-927. [https://doi.org/10.1016/S1001-0742\(07\)60152-1](https://doi.org/10.1016/S1001-0742(07)60152-1).



*This page is intentionally
left blank.*