



The application of satellite images Sentinel 2 and Landsat 8 and comparison of their capabilities in estimating chlorophyll-a concentration in the Gorgan Bay

Fatemeh Rahmani Khalili ¹, Sarah Haghparast ² ✉, Kamran Nasir Ahmadi ³, Vahid Kheirabadi ⁴

1. *Fisheires Department, Faculty of Animal Sciences and Fisheries, Sari University of Agricultural Sciences and Natural Resources, Sari, Iran*
Email: f.rahmani.khalili1370@gmail.com

2. (Corresponding Author) *Fisheires Department, Faculty of Animal Sciences and Fisheries, Sari University of Agricultural Sciences and Natural Resources, Sari, Iran*

Email: s.haghparast@sanru.ac.ir

3. *Civil Engineering Department, Faculty of Chemical, Industrial and Civil Engineering, Mazandaran University of Science and Technology, Behshahr, Iran*

Email: Dr.nasirahmadi@mazust.ac.ir

4. *Fisheires Department, Faculty of Animal Sciences and Fisheries, Sari University of Agricultural Sciences and Natural Resources, Sari, Iran*
Email: kheirabadi@yahoo.com

ARTICLE INFO

Article type:
Research Article

Article History:

Received:

10 July 2024

Received in revised form:

11 October 2024

Accepted:

5 November 2024

Available online:

20 December 2024

Keywords:

Satellite images,
 Gorgan Gulf,
 Sentinel-2,
 Chlorophyll A,
 Landsat 8.

ABSTRACT

Regarding the changes in the water quality of Gorgan Bay, this study aimed to investigate the capabilities of satellite images Sentinel 2 and Landsat 8 and compare their efficacy in estimating chlorophyll-a concentration. In this research, satellite images of the bay were obtained from Sentinel-2 and Landsat-8 from April 2021 to August 2022. The preparation of 29 images including atmospheric correction, separation of the water zone, and image processing were performed. Then, chlorophyll-a concentration maps (mg/m³) using the models of NDCI, D05, M09, and T07 were obtained from ENVI software and compared with field data in the stations of interest. To estimate chlorophyll-a concentration, the results showed that NDCI and M09 models were well-correlated with field data. Based on Sentinel-2 satellite images and in comparison to other models, the highest correlation coefficient (R) with the field data was found in the NDCI model (0.633) which showed the lowest root mean square error (8.8 mg/m³). According to the Landsat 8 images and compared to other models, the M09 model had the highest correlation coefficient with the field data (0.743) and showed the lowest root mean square error (2.33 mg/m³). Results of the present work indicated that for Sentinel-2 satellite images, model NDCI, and based on Landsat 8 satellite images, the M09 model had a reasonable efficacy in the Gorgan Gulf.

Citation: Rahmani Khalili, F., Haghparast, S., Nasir Ahmadi, K., & Kheirabadi, V. (2024). The application of satellite images Sentinel 2 and Landsat 8 and comparison of their capabilities in estimating chlorophyll-a concentration in the Gorgan Bay, Tehran. *Geographical planning of space quarterly journal*, 14 (4), 117-131.

doi: <http://doi.org/10.30488/gps.2025.460663.3750>



© The Author(s)

This is an open access article under the CC BY-NC 4.0 license (<https://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/>).

Publisher: Golestan University Press

Extended Abstract

Introduction

Gorgan Gulf, one of the largest Gulfs of the Caspian Sea, is located in the southeast corner of this sea. From ecological and economic viewpoints, the Gorgan Gulf and Miankale Wetland are significant. The Caspian Sea level, nearby rivers, and the Miankale Peninsula influence the Gorgan Gulf. It plays a vital role in the growth and reproduction of aquatic animals and bony and cartilaginous fish and attracts winter migratory birds.

The concentration of chlorophyll-a plays a vital role as a quality indicator of water bodies, and the presence of phytoplankton is used to check the water quality and biochemical status. Common measurements of water quality parameters, such as estimating the amount of chlorophyll-a and water-soluble substances, require field sampling, analysis, and laboratory measurements, which are very costly and time-consuming. Remote sensing techniques provide an overview of large areas in real-time. Remote sensing algorithms that rely more on the detection of specific spectral features using the blue, green, yellow, red, or near-infrared range are well used to distinguish and detect algal blooms from other natural phenomena.

Despite the high importance of the Gorgan Gulf ecosystem, few studies have been done regarding the estimation of chlorophyll-a using remote sensing data in this area. In this study, an attempt was made to estimate the chlorophyll data in the Gorgan Gulf using ENVI software and satellite images, and the results obtained through field sampling and previous studies were validated in this region to provide an index for the correct estimation of chlorophyll-a data in the Gorgan Gulf. Finally, among the models applied to determine the concentration of chlorophyll-a, the best model suitable for the studied area and correlated well with the field data was selected to prepare Chlorophyll-a concentration maps.

Methodology

Field sampling and measurement of chlorophyll-a concentration were performed monthly at three sites (Bandar Gaz, Nowkandeh, and Bandar Torkman) using

the Algatorch device with an accuracy of 0.1 from April 2021 until August 2022 at surface depth. Algatorch device is one of the most famous sensors for measuring chlorophyll-a and cyanobacteria, and it can measure portable and the profile of chlorophyll accumulation at different depths. Satellite data images were received simultaneously with field data collection to analyze and estimate the required parameters. Landsat-8 and Sentinel-2 multispectral satellite images were used to estimate the concentration of chlorophyll a. Landsat-8 multispectral images have a spatial resolution of 30 m and a temporal resolution of 16 days. The number of 29 images related to 2021 to 2022 of Collection-2, Level-1 data type was downloaded from the US Geology website (<https://earthexplorer.usgs.gov>). Twelve images of Sentinel-2 data on the dates collected in the field were downloaded from the website (<https://apps.sentinel-hub.com>). To extract the concentration of chlorophyll-a, NDCI, D05, M09, and T07 models were used in ENVI software and then compared with the field data in the desired stations. Statistical parameters were applied to evaluate the efficacy of different algorithms: root mean squared error (RMSE) and R-squared relationship coefficient (R²).

Results and discussion

The results of field measurement of chlorophyll-a concentration in terms of mg/m³ in the studied area showed that the concentration of chlorophyll-a varies in the measured stations in different months of the year. The chlorophyll-a concentration results from Sentinel-2 and Landsat-8 satellite images showed that based on the analysis of Sentinel-2 satellite images, the correlation coefficient (R) between the relationship between the NDCI model and field data was equal to 0.633. The root mean square error (RMSE index) was the lowest error for the NDCI model at the rate of 8.8 mg/m³, with the highest correlation and the lowest error compared to other models. Also, based on the analysis of Landsat-8 satellite images, the correlation coefficient (R) between the M09 model and the field data was equal to 0.743, and the root mean

square error (RMSE index), the lowest error for the M09 model was 2.33 mg/m³. NDCI and M09 models estimating chlorophyll-a concentration correlated well with field data. The result obtained by the NDCI method in Landsat-8 is more suitable than Sentinel-2.

Conclusion

Based on the results of the present study, the changes in the chlorophyll-a concentration during 2021-2022 were very significant due to the decrease in the water level of the gulf, and its maximum value was observed in winter 2021. Using the NDCI model on Landsat-8 satellite images and the M09 model on Sentinel-2 satellite images, a good estimate of the chlorophyll-a concentration in the turbid waters of the Gorgan Gulf could be provided. Through these models, biological studies can be done at a low cost and a higher speed.

Funding

There is no funding support.

Authors' Contribution

Fatemeh Rahmani Khalili: satellite data collection, software implementation, analysis of results and writing. Sara Haqqarast: methodology, validation and final writing. Kamran Nasir Ahmadi: data collection and editing. Vahid Khairabadi: data collection and calibration..

Conflict of Interest

Authors declared no conflict of interest.

Acknowledgments

The author thanks and appreciates the cooperation of the experts of the General Department of Environmental Protection of Golestan and Mazandaran provinces who helped us in conducting this research, especially those who did the qualitative evaluation of the article. Also, the current research has been done in the form of a master's thesis at Sari University of Agricultural Sciences and Natural Resources..

کاربرد تصاویر ماهواره‌ای سنتینل-۲ و لندست-۸ و مقایسه کارایی آن‌ها در برآورد کلروفیل آ در خلیج گرگان

فاطمه رحمانی خلیلی^۱، سارا حق پرست^۲ ✉، کامران نصیراحمدی^۳، وحید خیرآبادی^۴

- ۱- گروه شیلات، دانشکده علوم دامی و شیلات، دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی ساری، ساری، ساری، ایران. رایانامه: frahmani.khalili1370@gmail.com
- ۲- نویسنده مسئول، گروه شیلات، دانشکده علوم دامی و شیلات، دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی ساری، ساری، ساری، ایران. رایانامه: s.haghparsat@sanru.ac.ir
- ۳- گروه عمران، دانشکده مهندسی شیمی، صنایع و عمران، دانشگاه علم و فناوری مازندران، بهشهر، ایران. رایانامه: Dr.nasirahmadi@mazust.ac.ir
- ۴- گروه شیلات، دانشکده علوم دامی و شیلات، دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی ساری، ساری، ساری، ایران. رایانامه: khairabadi@yahoo.com

اطلاعات مقاله	چکیده
نوع مقاله: مقاله پژوهشی	
تاریخ دریافت: ۱۴۰۳/۰۴/۲۰	
تاریخ بازنگری: ۱۴۰۳/۰۷/۰۹	
تاریخ پذیرش: ۱۴۰۳/۰۸/۱۵	
تاریخ چاپ: ۱۴۰۳/۰۹/۳۰	
واژگان کلیدی: تصاویر ماهواره‌ای، خلیج گرگان، سنتینل-۲، کلروفیل آ، لندست-۸	با توجه به تغییرات به وجود آمده در شرایط کیفی آب در خلیج گرگان به‌ویژه در دهه اخیر، هدف از انجام این مطالعه بررسی کاربرد تصاویر ماهواره‌ای سنتینل-۲ و لندست-۸ و مقایسه کارایی آن‌ها در برآورد کلروفیل آ در این منطقه می‌باشد. بدین منظور، ابتدا تصاویر ماهواره‌ای خلیج گرگان از ماهواره‌های سنتینل-۲ و لندست-۸ از فروردین ۱۴۰۰ تا ۲۹ مرداد ۱۴۰۱ تهیه و آماده‌سازی ۲۹ تصویر شامل تصحیح اتمسفری، جداسازی پهنه آبی، پردازش تصاویر انجام شد. سپس نقشه‌های غلظت کلروفیل آ بر اساس واحد میلی‌گرم بر مترمکعب با استفاده از مدل‌های M09، D05، NDCI و T07 در نرم‌افزار ENVI به دست آمد و با داده‌های میدانی در ایستگاه‌های بندر ترکمن، نوکنده و بندرگز مقایسه شدند. نتایج نشان داد که مدل NDCI و M09 در برآورد غلظت کلروفیل آ همبستگی خوبی با داده‌های میدانی داشتند. بر اساس تحلیل تصاویر ماهواره سنتینل-۲ در مقایسه میان مدل‌ها، بالاترین میزان ضریب همبستگی (R) با داده‌های میدانی در مدل NDCI، برابر با ۰/۶۳۳ بود که کمترین خطای میانگین ریشه مربعات (۸/۸ میلی‌گرم بر مترمکعب) را داشتند. بر اساس تحلیل تصاویر ماهواره لندست-۸ در مقایسه میان مدل‌ها، بالاترین ضریب همبستگی (R) با داده‌های میدانی در مدل M09 و برابر با ۰/۷۴۳ به دست آمد که کمترین خطای میانگین ریشه مربعات را به میزان ۲/۳۳ میلی‌گرم بر مترمکعب را داشت. نتایج تحقیق حاضر نشان می‌دهد که بر اساس تصاویر ماهواره سنتینل-۲، مدل NDCI و بر اساس تصاویر ماهواره لندست، مدل M09 جهت تخمین کلروفیل آ در خلیج گرگان کارایی قابل قبولی دارند.

استناد: رحمانی خلیلی، فاطمه؛ حق پرست، سارا؛ نصیراحمدی، کامران و خیرآبادی، وحید. (۱۴۰۳). کاربرد تصاویر ماهواره‌ای سنتینل-۲ و لندست-۸ و مقایسه کارایی آن‌ها در برآورد کلروفیل آ در خلیج گرگان. *مجله آمایش جغرافیایی فضا*، ۱۴ (۴)، ۱۳۱-۱۱۷.

<http://doi.org/10.30488/gps.2025.460663.3750>

مقدمه

در سطح جهان، غلظت کلروفیل آ نقش مهمی را به عنوان شاخص کیفی پهنه‌های آبی ایفا می‌کند و از آن‌ها به عنوان نماینده‌ای برای شناسایی شکوفایی مضر جلبکی (Acheampong, 2018: 6) و حضور فیتوپلانکتون جهت بررسی شرایط کیفی آب و وضعیت زیست‌شیمیایی استفاده می‌شود (Sun et al., 2014: 290). غلظت کلروفیل آ، اندازه‌گیری مؤثر از وضعیت آب دریا و دریاچه‌ها است؛ چراکه تا حد زیادی به فراوانی فیتوپلانکتون آبی و توده زنده مرتبط است (Arabi, 2019: 134). وقوع غلظت‌های بالای فیتوپلانکتون که در عکس‌العمل نسبت به ورود مواد مغذی گیاهان (بخصوص فسفر) ناشی از فعالیت‌های انسانی رخ می‌دهد موجب آثار مضر متعدد در محیط‌های دریایی شده و در نتیجه مطالعه مقادیر غلظت کلروفیل آ، توزیع و تغییرات فصلی آن از اهمیت ویژه در مطالعات محیط زیستی برخوردار است (Cuia et al., 2022: 187).

اندازه‌گیری‌های متداول پارامترهای کیفی آب همچون تخمین میزان کلروفیل آ و مواد محلول در آب نیازمند نمونه‌برداری‌های میدانی، تجزیه و تحلیل و اندازه‌گیری‌های آزمایشگاهی است که بسیار هزینه‌بر و زمان‌بر هستند. تکنیک‌های سنجش‌ازدور یک مشاهده کلی هم‌دید از مناطق بزرگ را در زمان واقعی ارائه می‌دهند (Elhag et al., 2019: 556). الگوریتم‌های سنجش‌ازدور که بیشتر به تشخیص ویژگی‌های طیفی خاص با استفاده از محدوده آبی، سبز، زرد، قرمز یا مادون قرمز نزدیک تکیه می‌کنند، به خوبی برای تمایز و تشخیص شکوفایی جلبکی از دیگر پدیده‌های طبیعی استفاده می‌شوند (مهدوی فرد و همکاران، ۱۳۹۹: ۷۳).

با توجه به اهمیت میزان کلروفیل آ در محیط‌های آبی، تاکنون مطالعات زیادی در دنیا و ایران با استفاده از فناوری سنجش‌ازدور و پردازش تصاویر ماهواره‌ای با توان تفکیک مکانی‌های متفاوت صورت پذیرفته است. کنارکوهی و همکاران (۱۳۹۹) غلظت کلروفیل آ را با استفاده از سنجش‌ازدور و اندازه‌گیری میدانی در تالاب چغاخور برآورد کردند. آن‌ها بیان داشتند که در صورت عدم دسترسی به منطقه و عدم توانایی بررسی‌های میدانی، روش سنجش‌ازدور برای بررسی کیفیت آب روش مناسبی است. مهدوی فرد و همکاران (۱۳۹۹) غلظت کلروفیل آ را با استفاده از داده‌های میدانی و الگوریتم‌های بیوپاتیکی OC2 و OC3 و از داده‌های ماهواره‌ای Multi-Spectral سنتینل ۲ و OLI لندست ۸ در خور تیاب بررسی نمودند. نتایج تحقیق آن‌ها نشان داد که الگوریتم OC2 در ماهواره‌های لندست ۸ و سنتینل ۲ به عنوان مناسب‌ترین الگوریتم برای تهیه نقشه غلظت کلروفیل آ در منطقه موردنظر می‌باشد. دارماون و همکاران (۲۰۲۱) توزیع غلظت و پویایی کلروفیل آ را برای هر دو فصل خشک و بارانی و تأثیر رودخانه‌ها یا سایر عوامل اقیانوس‌شناسی را که ممکن است رخ دهد، در تنگه مادورای آندونزی با استفاده از سنجش‌ازدور و تصویرسازی ماهواره لندست ۸ و سنجنده OLI بررسی نمودند. نتایج آن‌ها نشان داد که توزیع کلروفیل آ، غلظت و پویایی آن در آب‌های تنگه مادورا در نزدیکی ناحیه ساحلی پاسوران بین ماه‌ها یا فصل‌های خشک و بارانی متغیر است.

برآورد دقیق پارامترهای بیوفیزیکی به روش سنجش از راه دور مانند کلروفیل آ و زیست‌توده فیتوپلانکتون در آب‌های کدر پر تولید در مطالعات بزرگ‌مقیاس و چند زمانه مرتبط با تولید اولیه، چرخه کربن، چرخه‌های بیوژئوشیمیایی و به‌طور کلی کیفیت آب‌های داخلی و ساحلی امری ضروری است. باین‌وجود، این برآورد به دلیل حضور اجزای فعال نوری غیر هموار که خصوصیات جذبی‌شان با کلروفیل آ هم‌پوشانی دارد، همچنان به صورت یک چالش باقی‌مانده است (Mishra &

1. Darmawan
2. Mtura Strait
3. Pasuruan

Mishra 2012). کانال‌های طیفی در بخش آبی-سبز طیف الکترومغناطیس به شدت تحت تأثیر حضور اجزایی مانند مواد آلی محلول رنگی (CDOM)، ذرات آلی مرده و پپتیدهای تریپتون^۲ می‌باشند. الگوریتم‌های تجربی (مانند OC4V4) که از کانال‌های طیف رنگی آبی و سبز استفاده می‌کنند، اغلب تخمین نسبتاً دقیقی از کلروفیل آ در آب‌های نوع اول (case I) به دست می‌دهند. اما این الگوریتم‌ها تخمین‌های دقیقی از کلروفیل آ در آب‌های پر تولید کدر ارائه نمی‌کنند (O'Reilly et al., 1998: 24846; Ruddick et al., 2001:3576). میشر و میشر^۳ (۲۰۱۲) از مدل جدید کلروفیل تفاوت نرمال شده^۴ (NDCI) برای تخمین از راه دور غلظت کلروفیل آ در آب‌های پر تولید کدر پیشنهاد کردند. یداو^۵ و همکاران (۲۰۱۹) در پژوهشی با عنوان ارزیابی کلروفیل آب دریاچه بیوا^۶ و آب ساحلی کاسابای^۷ ژاپن از داده‌های ماهواره‌ای سنجنده OLI لندست ۸ و سنجنده MSI سنتینل ۲ استفاده کردند. نتایج ایشان حاکی از آن بود که هر دو سنجنده مورد استفاده در آب ساحلی دارای مقدار RMSE کمتر از $0.3 \mu\text{g/L}$ و R^2 بیش از 0.8 هستند، اما نتایج به دست آمده از ماهواره سنتینل ۲ (R^2 بیش از 0.7) برای آب دریاچه نسبتاً بهتر از ماهواره لندست ۸ (RMSE کمتر از $1 \mu\text{g/L}$) بود.

خلیج گرگان به عنوان یکی از بزرگ‌ترین خلیج‌های دریای خزر، در گوشه جنوب شرقی این دریا واقع شده است. اهمیت خلیج گرگان و تالاب میانکاله از لحاظ اقتصادی و اکولوژیکی بسیار بالا بوده و اکولوژی این بدنه آبی تحت تأثیر دریای خزر، رودهای مجاور و شبه جزیره میانکاله قرار گرفته است و در رشد و تکثیر آبزیان، ماهیان استخوانی، غضروفی و جذب پرندگان مهاجر زمستانی نقش مهمی دارد. ارتباط آبی زیاد خلیج گرگان با دریای خزر باعث می‌شود شرایط زیستی مشابه دریا داشته باشد و در صورتی که ورود آب رودخانه‌ای از طریق دخالت انسانی افزایش یابد، می‌تواند سبب رشد گیاهان تالابی در آن شود. علی‌رغم اهمیت بسیار بالای اکولوژیکی خلیج گرگان، تاکنون در مطالعات متعددی اندازه‌گیری میدانی در خلیج گرگان و تالاب میانکاله صورت گرفته است اما پژوهش‌های اندکی در زمینه کاربرد تصاویر ماهواره‌ای و سنجش از دور در این منطقه صورت گرفته که تنها محدود به برآورد کدورت آب با استفاده از تصاویر ماهواره‌ای سنجنده *LISS-III* از ماهواره *IRS* بوده است (عقیقی و همکاران، ۱۳۸۸: ۵۵) و در رابطه با تخمین کلروفیل آ در خلیج گرگان با کمک تکنیک‌های سنجش از راه دور هیچ‌گونه مطالعه مدونی صورت نگرفته است. لذا در این مطالعه سعی بر آن شد تا با استفاده از نرم‌افزار *ENVI* و تصاویر ماهواره‌ای، برآوردی از داده‌های کلروفیل آ در خلیج گرگان انجام و نتایج حاصل از طریق نمونه‌برداری‌های میدانی و مطالعات پیشین در منطقه صحت‌سنجی شوند تا بتوان مدلی جهت تخمین صحیح داده‌های کلروفیل آ برای خلیج گرگان ارائه داد. در نهایت از بین مدل‌های مورد استفاده برای تعیین غلظت کلروفیل آ، بهترین مدلی که مناسب منطقه مورد مطالعه و ماهواره‌های مورد استفاده است و همچنین با داده‌های میدانی همبستگی خوبی دارد، انتخاب می‌گردد تا از آن برای تهیه نقشه غلظت کلروفیل آ استفاده شود.

روش پژوهش

نمونه‌برداری میدانی در ۳ ایستگاه (شامل بندرگز، نوکنده و بندر ترکمن) جهت سنجش غلظت کلروفیل آ با استفاده از دستگاه آلگاتورچ^۸ با دقت 0.1 میکروگرم بر لیتر به صورت ماهانه از فروردین ۱۴۰۰ تا ۲۹ مرداد ۱۴۰۱ در عمق سطحی

1. Colored Dissolved Organic Matter
2. Tripton
3. Mishra & Mishra
4. Normalized Difference Chlorophyll Index
5. Yadav
6. Lake Biwa
7. Vasa Bay
8. Algae Torch

خلیج صورت گرفت. این دستگاه یکی از مشهورترین سنسورهای اندازه‌گیری کلروفیل آ و سیانوباکتری است و قابلیت اندازه‌گیری پرتابل و نیز اندازه‌گیری پروفایل تجمع کلروفیل در اعماق مختلف دارد. تعیین موقعیت جغرافیایی ایستگاه‌ها با استفاده از دستگاه GPS با همکاری اداره کل محیط‌زیست استان‌های گلستان و مازندران در خلیج گرگان انجام شد. برای تحلیل و برآورد پارامترهای مورد نیاز، تصاویر داده‌های ماهواره‌ای هم‌زمان با برداشت داده‌های میدانی دریافت گردید. برای تخمین غلظت کلروفیل آ از تصاویر ماهواره‌های چند طیفی لندست-۸ و سنتینل ۲ استفاده شد. تصاویر چند طیفی لندست-۸ (Landsat-8) دارای توان تفکیک مکانی ۳۰ متر و توان تفکیک زمانی ۱۶ روزه است. تعداد ۲۹ تصویر مربوط به سال‌های ۲۰۲۱ لغایت ۲۰۲۲ میلادی از نوع داده‌های Level-1, Collection-2، از سایت زمین‌شناسی آمریکا (<https://earthexplorer.usgs.gov>) بارگیری شد. تعداد ۱۲ تصویر مربوط به داده‌های سنتینل-۲ در تاریخ‌هایی که برداشت میدانی شده بود، از سایت (<https://apps.sentinel-hub.com>) بارگیری شد.

از آنجائی که تصاویر لندست-۸ از نوع کالکشن ۲، Level-1، تصحیح رادیومتریک و هندسی شده بوده و تنها نیاز به تصحیح اتمسفری دارد، لذا به منظور تصحیح اتمسفری داده‌های چند طیفی لندست-۸ در این پژوهش از ابزار QUAC^۱ در نرم‌افزار ENVI 5.3.1 استفاده شد. خروجی این ابزار، تصویری با مقادیر پیکسل بازتاب سطحی زمین (Surface Reflectance) است. از طرفی تصاویر سنتینل-۲، L2A، تصاویری تصحیح‌شده از نظر رادیومتریک، هندسی و اتمسفریک بوده و نیازی به انجام تصحیحات روی این تصاویر نمی‌باشد (Niroumand-Jadidi et al., 2021).

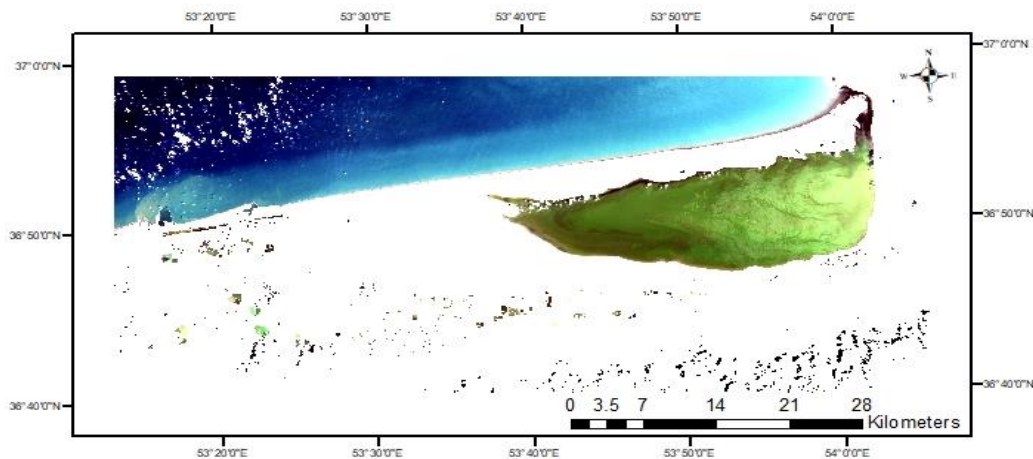
بعد از تصحیح اتمسفریک، جهت اصلاح مقیاس داده‌های تصاویر لندست ۸، از ابزارهای Quick Stats و Band Math و رابطه ۳ استفاده شد. در تحلیل تصاویر سنتینل-۲ ارزش داده‌های تصویر بین ۰ و ۱ بودند که نیاز به تغییر مقیاس نداشتند.

$$(b1 \leq 0) * 0 + (b1 \geq 10000) * 1 + (b1 > 0 \text{ and } b1 < 10000) * \text{float}(b1 / 10000.0) \quad (3)$$

رابطه ۳ بدین مفهوم است که اگر ارزش باند تعریف‌شده (b1) کمتر از صفر باشد، مقدار را صفر قرار دهد و اگر بزرگ‌تر از ۱۰۰۰۰ باشد، مقدار را یک و مقادیر بزرگ‌تر از ۰ و کمتر از ۱۰۰۰۰ را تقسیم بر ۱۰۰۰۰ می‌کند.

تفکیک پهنه آبی در تصاویر ماهواره‌ای (Masked)

در بسیاری از مواقع وجود یک عارضه می‌تواند در تحلیل تصاویر خطا ایجاد کند. برای نمونه، وجود ابر می‌تواند بر روی میزان رفتار طیفی و مقدار حداقل و حداکثر بازتاب تأثیرگذار باشد (Ferreira et al., 2013:521). در این حالت نیاز است که فیلتر کردن صورت بگیرد. ماسک‌ها نقش حیاتی در حوزه سنجش‌ازدور ایفا می‌کنند و با کمک آن‌ها می‌توان پدیده‌هایی مانند ابر یا آب یا سایه که مقادیر یکسانی دارند را مشخص و حذف کرد (شکل ۱). برای این منظور با تعیین حد آستانه بازتاب و جذب در نمودار هیستوگرام بازتاب پدیده‌ها، محدوده ماسک شده مشخص و سپس با فراخوانی پهنه اصلاح‌شده، تصویر ماسک شده پهنه آبی از سایر پدیده‌ها در نرم‌افزار ENVI تفکیک گردید.



شکل ۱. نمایی از تصویر Mask شده خلیج گرگان و حذف پهنه‌های غیرآبی

استخراج کلروفیل آ از داده‌های ماهواره‌ای

به منظور استخراج غلظت کلروفیل-آ از مدل نسبت بانندی NDCI^۱ (مدل نرمال شده میزان کلروفیل) ارائه شده توسط Mishra و Mishra (۲۰۱۲)، مدل ارائه شده توسط Gitelson و همکاران (۲۰۰۸) که به اختصار D05 نامیده می‌شود، مدل ارائه شده توسط Moses و همکاران (۲۰۰۹) که به اختصار M09 نامیده می‌شود و همچنین مدل ارائه شده توسط Tzortziou و همکاران (۲۰۰۷) که به اختصار T07 نامیده می‌شود، در نرم‌افزار ENVI استفاده شد. روابط ریاضی نسبت‌های بانندی جهت محاسبه هر یک از مدل‌های برآورد کلروفیل آ در خلیج گرگان در زیر لیست شده است:

مدل NDCI عبارت است از:

$$C_{Chl-a} \propto \frac{(R_{rs}(708) - R_{rs}(665))}{(R_{rs}(708) + R_{rs}(665))} \quad (۴)$$

مدل D05 عبارت است از:

$$C_{Chl-a} \propto [R_{rs}^{-1}(665) - R_{rs}^{-1}(708)] \times R_{rs}(753) \quad (۵)$$

مدل M09 عبارت است از:

$$C_{Chl-a} \propto R_{rs}^{-1}(665) \times R_{rs}(708) \quad (۶)$$

مدل T07 عبارت است از:

$$C_{Chl-a} \propto R_{rs}^{-1}(559) \times R_{rs}(665) \quad (۷)$$

در مدل‌های (۴)، (۵)، (۶) و (۷) بازتاب سنجش از دور در محدوده طیفی سبز (۵۵۹ نانومتر)، قرمز (۶۶۵ نانومتر) و امواج لبه قرمز (۷۰۸-۷۵۳ نانومتر) و C_{Chl-a} غلظت کلروفیل آ می‌باشند.

جهت برآورد میزان غلظت کلروفیل آ بر اساس میلی‌گرم بر مترمکعب، از روابط تجربی زیر برای هر کدام از مدل‌های به دست آمده توسط مدل‌های بالا استفاده شد.

مدل تجربی محاسبه کلروفیل آ به روش NDCI عبارت است از:

$$Chl - a = 14.039 + 86.115 \times index + 194.325 \times index^2 \quad (۸)$$

1. Normalized Difference Chlorophyll Index

مدل تجربی محاسبه کلروفیل آ به روش D05 عبارت است از:

$$Chl - a = 14.07 + 177.56 \times index + 808.03 \times index^2 \quad (9)$$

مدل تجربی محاسبه کلروفیل آ به روش M09 عبارت است از:

$$Chl - a = 31.133 \times index - 15.617 \quad (10)$$

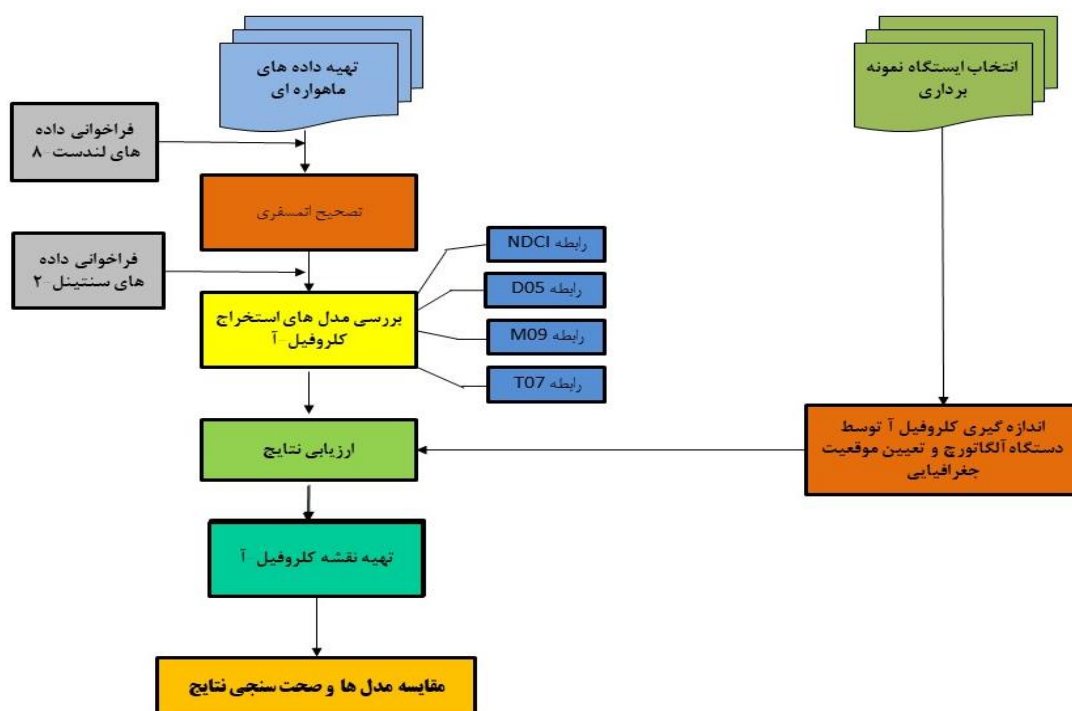
مدل تجربی محاسبه کلروفیل آ به روش T07 عبارت است از:

$$Chl - a = 26.56 \times index - 1.832 \quad (11)$$

در روابط بالا، Index مقادیر به دست آمده از مدل های ۴، ۵، ۶ و ۷ بوده و غلظت کلروفیل آ (Chl-a) بر حسب میلی گرم بر مترمکعب می باشد.

تصاویر ماهواره ای پس از تصحیحات لازم، با استفاده از دستور Band Math پردازش و نقاط ایستگاه های مورد نظر در تصاویر پردازش شده پیاده گردید و مقادیر کلروفیل آ به دست آمده از مدل ها در هر نقطه از پهنای خلیج گرگان با رسم پروفایل های خطی عمودی و افقی یا شکسته در بازه های مختلف پهنه آبی ثبت شد.

نگاره فرآیند بازیابی کلروفیل آ از داده های سنجش از دور و مقایسه آن با داده های میدانی در شکل ۲ ارائه شده است. مراحل انجام کار به شرح زیر می باشد:

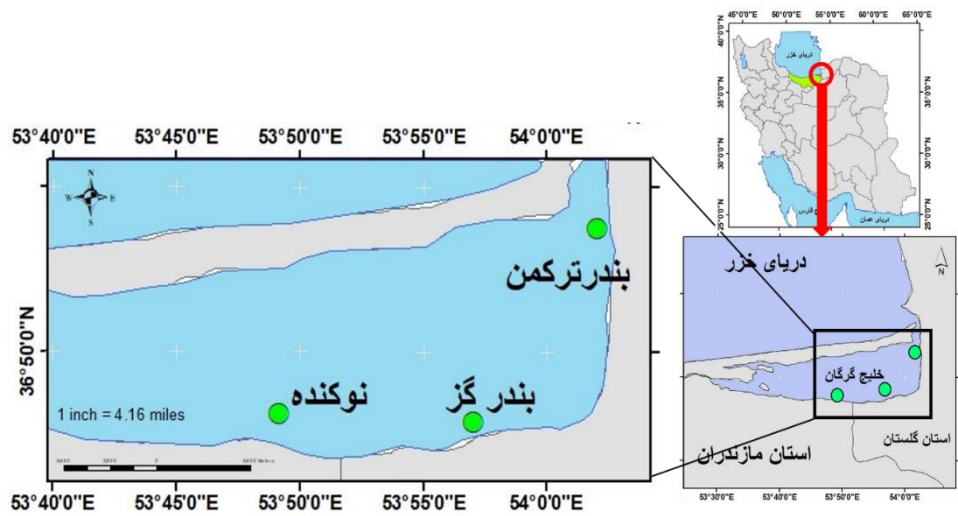


شکل ۲. فرآیند انجام پژوهش

محدوده مورد مطالعه

خلیج گرگان بین دو استان مازندران و گلستان در بین عرض های جغرافیایی ۳۶/۸۰-۳۶/۹۵ درجه شمالی و طول های جغرافیایی ۴۲/۵۳-۵۴/۰۳ درجه شرقی در بخش منتهی الیه جنوب شرقی دریای خزر قرار دارد. خلیج گرگان بزرگ ترین خلیج در دریای خزر است که بر اثر پیشروی شبه جزیره میانکاله در جنوب شرقی دریای خزر تشکیل شده است. طول آن تقریباً ۶۰ کیلومتر و حداکثر پهنای آن نزدیک به ۱۲ کیلومتر و وسعت خلیج گرگان حدود ۴۰۰ کیلومتر

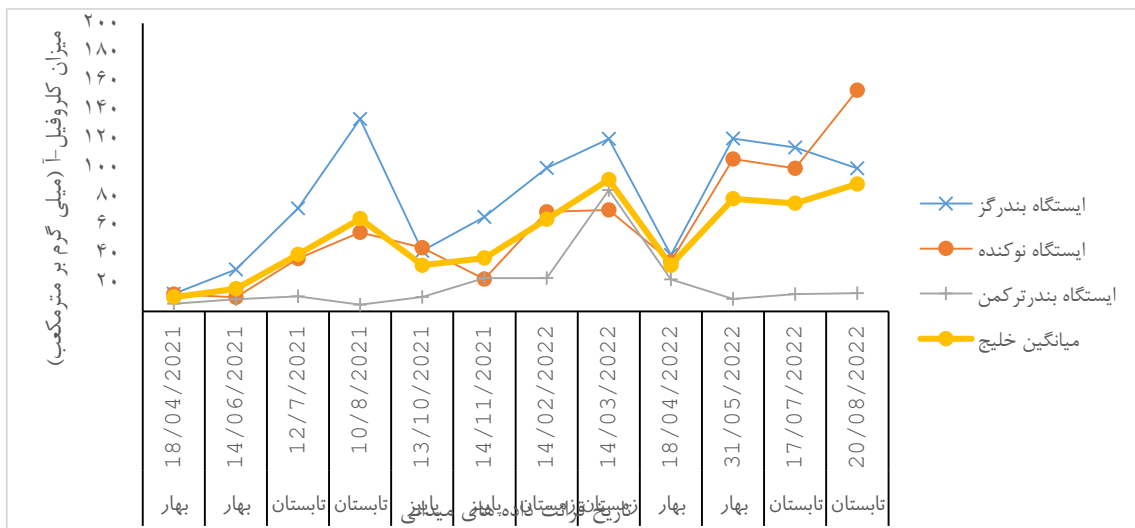
مربع (۴۰۰۰ هکتار) است. شکل خلیج سه گوش است و رأس آن در بخش غربی قرار گرفته است (عقیقی و همکاران، ۱۳۸۸: ۵۸)(شکل ۳).



شکل ۳. موقعیت جغرافیایی نقاط نمونه برداری شده در خلیج گرگان

یافته‌ها

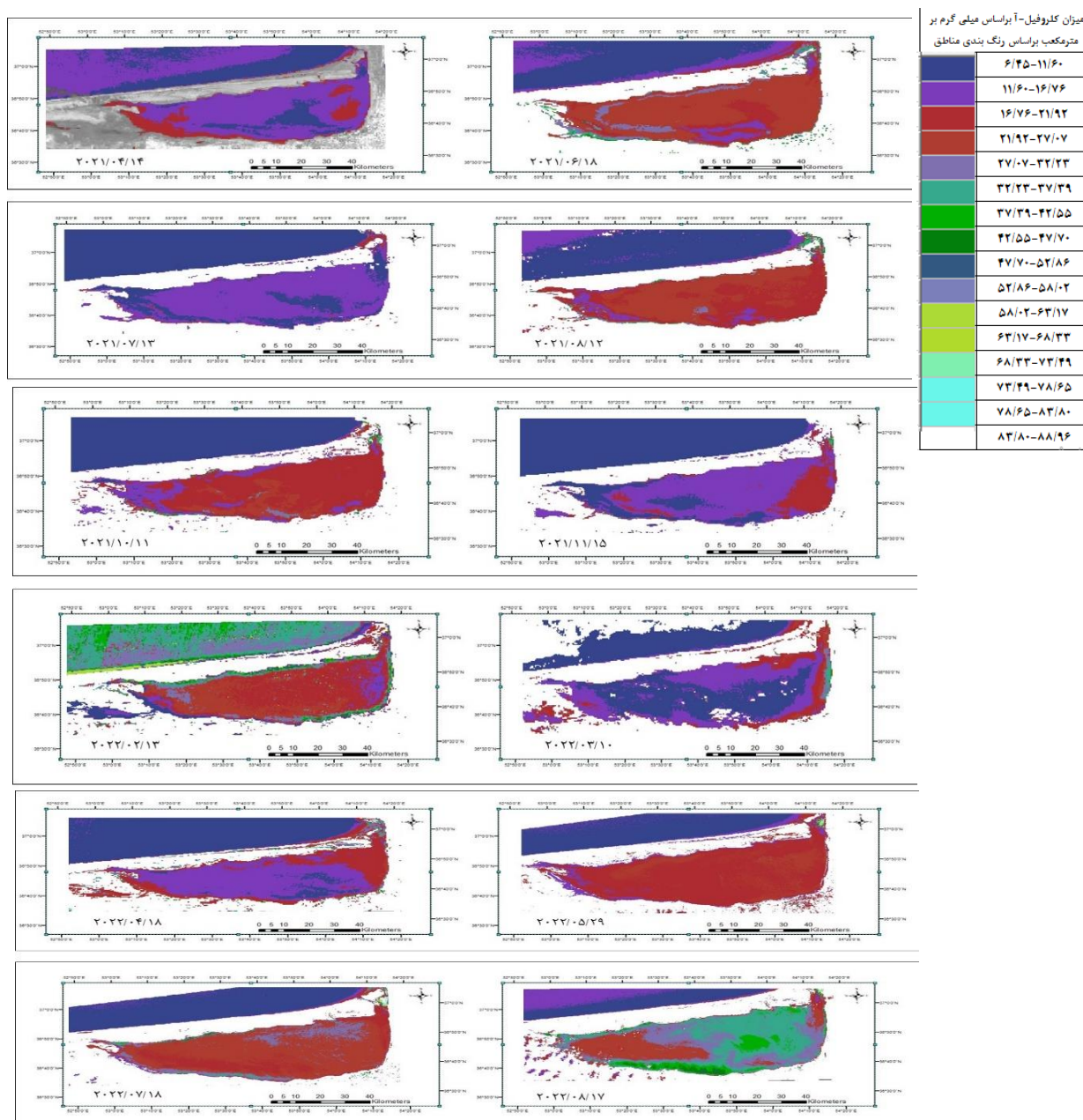
نتایج اندازه‌گیری میدانی میزان غلظت کلروفیل آ بر حسب میلی‌گرم بر مترمکعب در منطقه مورد مطالعه نشان داد که میزان غلظت کلروفیل آ در ایستگاه‌های اندازه‌گیری شده در ماه‌های مختلف سال متغیر است.



شکل ۴. نمودار روند تغییرات غلظت کلروفیل-آ در خلیج گرگان و ایستگاه‌های موردنظر (۲۰۲۲-۲۰۲۱)

با توجه به شکل ۴، میزان غلظت کلروفیل آ بهار ۲۰۲۱ میلادی (۱۴۰۰ شمسی) دارای مقادیر پایینی در سه ایستگاه موردنظر بود، در فصل تابستان این میزان غلظت به علت افزایش دما صعودی شد، سپس با یک روند کاهشی در پاییز مواجه گردید و در زمستان ۲۰۲۲ میلادی معادل با زمستان ۱۴۰۰ شمسی یک افزایش غلظت را تجربه کرد.

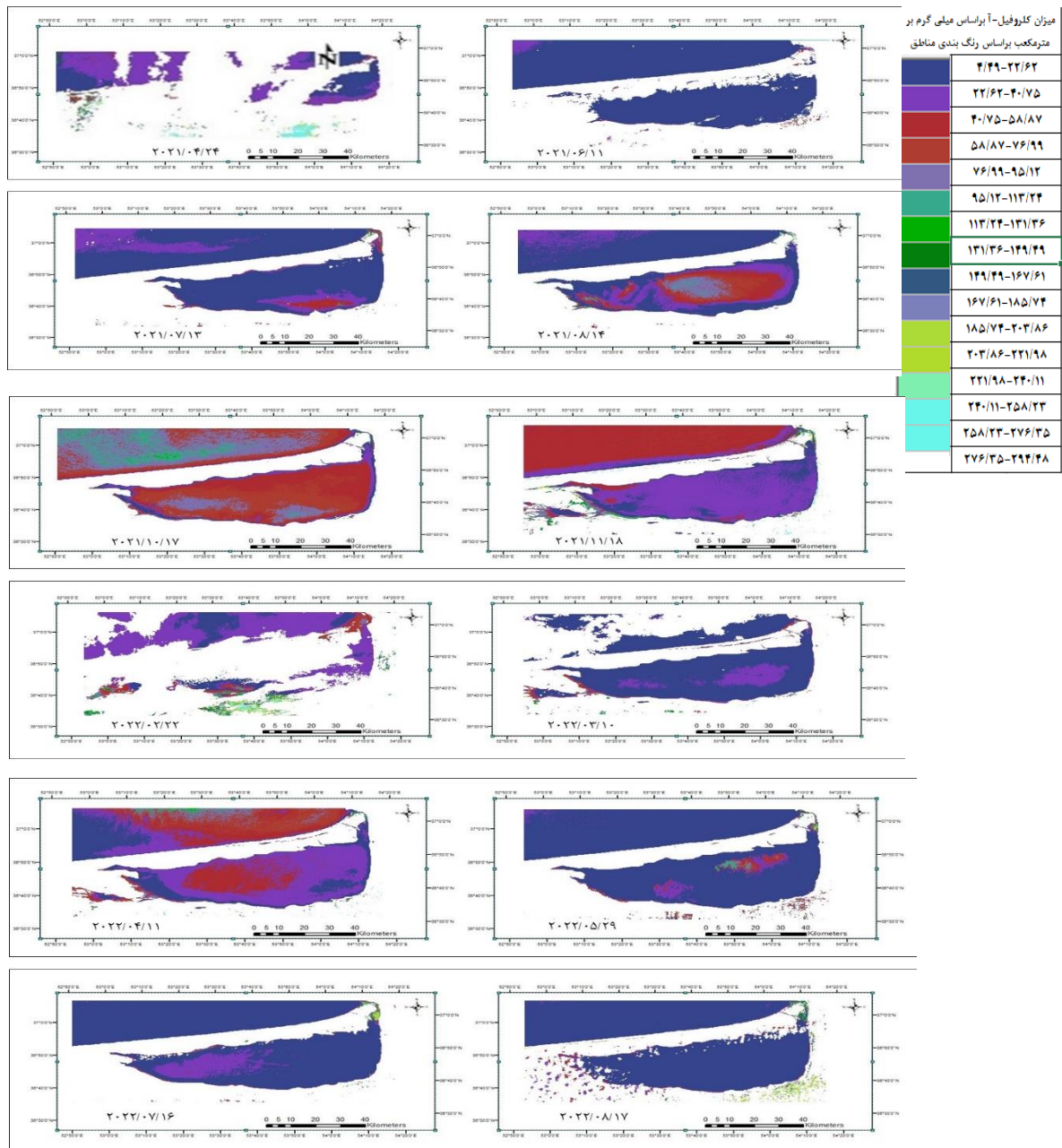
نقشه خروجی غلظت کلروفیل-آ با به کارگیری مدل NDCI با استفاده از تصاویر سنتینل-۲ در نرم افزار ENVI در شکل ۵ آورده شده است.



شکل ۵. نقشه خروجی غلظت کلروفیل-آ با استفاده از مدل NDCI در خلیج گرگان با استفاده از تصاویر سنتینل-۲ در نرم افزار ENVI

همان طور که در نقشه های خروجی غلظت کلروفیل-آ در شکل ۵ مشاهده گردید، تفکیک رنگی غلظت کلروفیل-آ بر اساس میلی گرم بر مترمکعب با استفاده از مدل NDCI در راهنمای نقشه نشان می دهد که تغییرات کلروفیل-آ در تصاویر ماهواره ای سنتینل ۲ در تاریخ های مختلف یکسان نبوده و دارای نوسات افزایشی و کاهش می باشد. به عنوان مثال در تصویر ماهواره ای مورخ ۲۰۲۲/۰۷/۱۸ تغییرات کلروفیل-آ در بیشتر نقاط پهنه خلیج بین ۱۶/۷ تا ۲۷ میلی گرم بر مترمکعب به رنگ قرمز نشان

داده‌شده است ولیکن در تصویر ماهواره‌ای مورخ ۲۰۲۲/۰۸/۱۷ میلادی (۲۶ مرداد ۱۴۰۱ شمسی) تفکیک رنگی مختلفی از تغییرات غلظت کلروفیل آ از ۱۶/۷ تا ۴۲/۵ میلی گرم بر مترمکعب به رنگ‌های مختلف قرمز، آبی و سبز می‌باشد. همچنین حداکثر بلوم جلبکی در بخش‌های جنوبی خلیج در اواسط آگوست ۲۰۲۲ میلادی (مرداد ۱۴۰۱ شمسی) مشاهده شد و حداقل غلظت کلروفیل آ در کل خلیج در تصویر گرفته‌شده از اواسط جولای ۲۰۲۲ به دست آمد.



شکل ۶. نقشه خروجی غلظت کلروفیل آ با استفاده از مدل M09 در خلیج گرگان با استفاده از تصاویر لندست-۸ در نرم‌افزار ENVI

همان‌طور که در نقشه‌های خروجی غلظت کلروفیل آ در شکل ۶ مشاهده گردید، تفکیک رنگی غلظت کلروفیل آ بر اساس میلی گرم بر مترمکعب با استفاده از مدل M09 در راهنمای نقشه نشان می‌دهد که تغییرات کلروفیل آ در تصاویر ماهواره‌ای لندست-۸ در تاریخ‌های مختلف یکسان نبوده و دارای نوسات افزایشی و کاهش می‌باشد. وجود ابر در بالای خلیج گرگان

در تحلیل تصاویر ماهواره‌ای در تاریخ‌های ۲۰۲۱/۰۴/۲۴ میلادی (۴ اردیبهشت ۱۴۰۰ شمسی) و ۲۰۲۲/۰۲/۲۲ میلادی (۳ اسفند ۱۴۰۰ شمسی) قابل مشاهده است.

نتایج همبستگی میان مدل‌های برآورد غلظت کلروفیل آ با داده‌های میدانی

نتایج حاصل از ضریب همبستگی اسپیرمن میان مدل‌های برآورد غلظت کلروفیل آ حاصل از تصاویر سنتینل-۲ با نتایج میدانی آن نشان داد که مدل NDCI با مقدار $0/633$ بیشترین ضریب همبستگی و کمترین RMSE ($8/8$ میلی‌گرم بر مترمکعب) را دارد (جدول ۱).

جدول ۱. نتایج R و RMSE در مدل‌های برآورد کلروفیل آ با استفاده از داده‌های سنتینل-۲

مدل	R ضریب همبستگی اسپیرمن	RMSE	P value
NDCI	$0/633$	$8/8$	$<0/05$
D05	$0/431$	$26/04$	$>0/05$
M09	$0/331$	$24/62$	$>0/05$
T07	$0/091$	$41/34$	$>0/05$

نتایج حاصل از ضریب همبستگی بین غلظت کلروفیل آ برآورد شده با استفاده از مدل‌های مختلف و غلظت کلروفیل میدانی با استفاده از تصاویر ماهواره‌ای لندست-۸ نشان داد که مدل M09 بیشترین ضریب همبستگی ($R^2=0/743$) و کمترین RMSE ($2/33$ میلی‌گرم بر مترمکعب) را دارد (جدول ۲).

جدول ۲. نتایج R و RMSE روش‌های به کارگیری شده جهت محاسبه کلروفیل آ با استفاده از داده‌های لندست-۸

مدل	R ضریب همبستگی اسپیرمن	RMSE (میلی‌گرم بر مترمکعب)	P value
NDCI	$0/586$	$10/8$	$>0/05$
D05	$0/486$	$15/8$	$>0/05$
M09	$0/743$	$2/33$	$<0/05$
T07	$0/371$	$21/7$	$>0/05$

نتایج حاصل از مقایسه کیفی بین مقادیر NDCI و غلظت کلروفیل آ تخمین زده شده با استفاده از ماهواره‌های سنتینل-۲ و لندست ۸ در تمامی ایستگاه‌های مورد مطالعه در جدول ۳ نشان داده شده است. بر این اساس، دامنه تغییرات مدل NDCI در ایستگاه‌ها نمونه‌برداری بین -1 تا $+0/58$ متغیر بود. مقادیر کلروفیل آ با همان دامنه یکسان از NDCI توسط ماهواره لندست ۸ در مقایسه با ماهواره سنتینل-۲ بالاتر تخمین زده شده است.

جدول ۳. مقایسه کیفی بین NDCI و غلظت کلروفیل آ تخمین زده شده با استفاده از ماهواره‌های سنتینل-۲ و لندست-۸

سنتینل-۲		لندست-۸	
دامنه NDCI	دامنه کلروفیل آ (میلی‌گرم بر مترمکعب)	دامنه NDCI	دامنه کلروفیل آ (میلی‌گرم بر مترمکعب)
$<-0/1$	$\geq 4/5$	$<-0/1$	$\geq 9/7$
0	$4/5-14/23$	0	$9/7-9/11$
1	$14/23-24/08$	1	$18/44-21/55$
2	$24/08-29/32$	2	$21/55-27/13$
4	$29/32-52/79$	4	$27/13-74/69$
5	$\geq 52/79$	5	$74/69-106/15$
1	-	1	$106/15-128/24$

بحث

در این پژوهش تلاش شد تا مناسب‌ترین مدل با توجه به نوع داده‌های ماهواره‌ای لندست-۸ و سنتینل-۲ به منظور صحت سنجی و برآورد کلروفیل-آ در خلیج گرگان مشخص شود. ضمن بررسی انجام‌شده از سالنامه آماری ۱۴۰۰-۱۴۰۱ اداره کل هواشناسی استان گلستان، مشخص گردید که در زمستان ۱۴۰۰، دمای استان گلستان یک روند افزایشی را تجربه کرده و در ۲۵ اسفند همان سال که بعد از تاریخ قرائت میدانی ایستگاه‌های موردنظر بوده (۲۰۲۲/۰۳/۱۴) میلادی معادل با ۲۳ اسفند ۱۴۰۰ شمسی)، یک کاهش دمایی محسوس همراه با جبهه هوای سرد سیبری اتفاق افتاده بود که منجر به کاهش میزان غلظت کلروفیل‌آ در تاریخ ۲۰۲۲/۰۴/۱۸ میلادی (۲۹ فروردین ۱۴۰۱ شمسی) گردید. سپس با افزایش دمای هوا و تغییر سایر فاکتورهای شیمیایی آب، تغییرات میزان کلروفیل‌آ در فصل بهار و تابستان ۱۴۰۱ نیز همان تغییرات بهار و تابستان سال گذشته مشاهده گردید، بر اساس نتایج مطالعه حاضر، میزان غلظت کلروفیل‌آ در داده‌های میدانی اندازه‌گیری شده در فصل بهار ۲۰۲۱ میلادی (۱۴۰۰ شمسی) دارای مقادیر پایینی در سه ایستگاه موردنظر بود، در فصل تابستان این میزان به علت افزایش دما صعودی شد، سپس با یک روند کاهشی در پاییز مواجه گردید و در زمستان ۲۰۲۲ میلادی معادل با زمستان ۱۴۰۰ شمسی یک افزایش غلظت را تجربه کرد. سپس در ۲۵ اسفند که بعد از تاریخ قرائت میدانی (۲۰۲۲/۰۳/۱۴) میلادی معادل با ۲۳ اسفند ۱۴۰۰ شمسی) ایستگاه‌های موردنظر بوده، یک کاهش دمایی محسوس همراه با جبهه هوای سرد سیبری اتفاق افتاده بود که منجر به کاهش میزان غلظت کلروفیل‌آ در تاریخ ۲۰۲۲/۰۴/۱۸ میلادی (معادل با ۲۹ فروردین ۱۴۰۱ شمسی) گردید. در ادامه این روند با افزایش دمای هوا و تغییر سایر فاکتورهای شیمیایی آب، تغییرات میزان کلروفیل‌آ افزایش یافت. خروجی نقشه‌های کلروفیل‌آ حاصل از تصاویر ماهواره‌ای لندست-۸ و سنتینل-۲ در این تحقیق نیز حاکی از افزایش قابل‌توجهی در میزان غلظت کلروفیل‌آ در زمستان ۲۰۲۱ بود.

در مطالعه الحربی (۲۰۲۳) جهت بررسی شکوفایی جلبکی در دریای سرخ با استفاده از مدل اختلاف نرمال شده میزان سبزیگی (NDVI) مشخص شد که شکوفایی جلبکی بیشتر در فصل زمستان رخ می‌دهد که با نتایج مطالعه حاضر تطابق دارد. ملکی و همکاران (۱۴۰۰) در مطالعه تغییرات غلظت کلروفیل‌آ در خلیج گرگان بیان داشتند که این تغییرات در پاییز و زمستان با تغییرات درجه حرارت سطحی آب هماهنگ است و درجه حرارت کمتر دلالت بر تشدید اختلاط آب‌های زیرین بر اثر وزش باد دارد که سبب افزایش ورود مواد مغذی به لایه‌های فوقانی و افزایش نرخ رشد فیتوپلانکتون و زیتوده آن می‌گردد که نتایج مطالعه حاضر را تأیید می‌کند.

خروجی نتایج غلظت کلروفیل‌آ از تصاویر ماهواره‌ای سنتینل-۲ و لندست-۸ نشان داد که بر اساس تحلیل تصاویر ماهواره سنتینل-۲، میزان ضریب همبستگی (R) بین مدل NDCI با داده‌های میدانی برابر با ۰/۶۳۳ بود و کمترین خطا RMSE در مدل NDCI به میزان ۸/۸ میلی‌گرم بر مترمکعب به دست آمد که نسبت به سایر مدل‌ها بیشترین همبستگی و کمترین خطا را داشت (جدول ۲). همچنین بر اساس تحلیل تصاویر ماهواره لندست-۸، ضریب همبستگی (R) بین مدل M09 و داده‌های میدانی برابر با ۰/۷۴۳ بود و کمترین خطا RMSE برای مدل M09 به میزان ۲/۳۳ میلی‌گرم بر مترمکعب به دست آمد (جدول ۳). یکی از بزرگ‌ترین مزایای مدل NDCI دامنه متغیر آن بین -۱ تا +۱ در مناطقی است که خالی از پوشش ابر و اثرات ناشی از کف و مجاورت هستند. از این رو، با کمک این مدل ترسیم نقشه‌های کمی از کلروفیل‌آ (همانند مدل تفاوت نرمال شده گیاهی NDVI برای تاج پوشش گیاهی در خشکی) و آشکارسازی بلوم جلبکی با استفاده از تصاویر

1. Aharbi
2. Normalized Difference Vegetation Index

ماهواره‌ای جهت سنجش‌ازدور مناطقی که دسترسی به داده‌های میدانی در آن‌ها غیرممکن و یا غیرقابل استفاده است، امکان‌پذیر است. تجزیه‌وتحلیل رابطه میان مدل NDCI و داده‌های کلروفیل‌آ کمک می‌کند تا بین دامنه تقریبی از کلروفیل‌آ با ارزش‌های مشخصی از NDCI ارتباط برقرار کرده و با این کاربرد فوق‌العاده ترسیم دقیق‌تری از نقشه کلروفیل‌آ منطقه را به صورت سنجش از راه دور به دست می‌آید. بر اساس خواص جذبی و ساختار باند طیفی به کاررفته در مدل NDCI، در آب‌های شفاف نوری مقادیر NDCI نزدیک به ۱- است. در آب‌هایی با بلوم متوسط تا زیاد جلبکی مقادیر NDCI از ۰/۳- تا نزدیک به ۱+ متغیر است. در بلوم جلبکی شدید به همراه بقایای جلبکی شناور در سطح آب، مقادیر NDCI بین ۰/۵ تا ۱+ است (Mishra & Mishra, 2012). در مطالعه حاضر، مقادیر به دست آمده از مدل NDCI در ماهواره‌های سنتینل-۲ و لندست ۸ بین ۱- تا ۰/۵۸+ متغیر بود که کمترین مقدار در ماهواره سنتینل-۲ و بالاترین مقدار در ماهواره لندست ۸ به دست آمد. همچنین مقادیر کلروفیل‌آ تخمین زده شده بر اساس مدل NDCI در ماهواره لندست ۸ بسیار بالاتر از مقادیر برآورد شده توسط ماهواره سنتینل-۲ بود (جدول ۴). با توجه به مقادیر میدانی کلروفیل‌آ از یک سو و همبستگی میان مقادیر مدل NDCI با داده‌های کلروفیل‌آ میدانی از سوی دیگر، می‌توان دریافت که در مدل NDCI مقادیر برآورد شده کلروفیل‌آ توسط ماهواره سنتینل-۲ به واقعیت نزدیک‌تر است.

الگوریتم‌های تجربی NDCI و M09 در برآورد غلظت کلروفیل‌آ همبستگی خوبی با داده‌های میدانی داشتند. نتیجه ُ به دست آمده از روش NDCI در سنتینل-۲ نسبت به لندست-۸ مناسب‌تر است که این امر احتمالاً می‌تواند به این دلیل باشد که باندهای تشکیل‌دهنده مدل فوق که بین محدوده قرمز مرئی و مادون قرمز نزدیک هستند، در ماهواره لندست-۸ پهنای باندی بیشتری داشتند (به ترتیب ۶۷۰ - ۶۴۰ نانومتر و ۸۸۰ - ۸۵۰ نانومتر برای باند قرمز و مادون قرمز نزدیک) و لذا افزایش عرض باند منجر به میانگین‌گیری از بازتاب‌های نوری شده و در تشخیص کلروفیل‌آ از سایر پدیده‌ها ابهاماتی صورت گرفته است. مدل D05 مورد استفاده برای پردازش تصاویر سنتینل-۲ خطای کمتری نسبت به ماهواره لندست-۸ داشت، که دلیل آن احتمالاً به کارگیری باندهای ۴ با طول موج ۶۶۵ نانومتر (باند قرمز)، باند ۵ با طول موج ۷۰۸ نانومتر و باند ۶ با طول موج ۷۵۳ نانومتر (باندهای لبه قرمز نزدیک) در تصاویر سنتینل-۲ برای محاسبه میزان کلروفیل‌آ در مدل D05 است که در تصاویر لندست-۸ باند لبه قرمز نزدیک با این طول موج وجود نداشت و از امواج مادون قرمز نزدیک (NIR) با طول موج ۸۴۲ نانومتر استفاده شد، لذا با خطای بیشتری $RMSE=96/04 \text{ mg/m}^3$ برای تصاویر سنتینل ۲ در مقایسه با $RMSE=1578/8 \text{ mg/m}^3$ برای تصاویر لندست-۸) میزان غلظت کلروفیل‌آ را محاسبه کرد.

Mishra و Mishra (۲۰۱۲) از میان مدل‌های M09، NDCI و D05 بر روی تصاویر ماهواره‌ای MERIS در خلیج چسپایک و خلیج دلاور، خلیج موبایل و منطقه دلتای رودخانه می‌سی‌سی‌پی در شمال خلیج مکزیک، مدل NDCI را برای نظارت کمی کلروفیل‌آ در آب‌های ساحلی و مصب داخلی پیشنهاد کرد و بیان داشت که در مورد آب‌های ساحلی دور دست و بدون داده‌های واقعی زمینی نیز می‌توان از NDCI برای تشخیص شکوفایی جلبکی و استنتاج کیفی کلروفیل‌آ استفاده کرد که با نتایج مطالعه حاضر و تشخیص بهتر مدل NDCI با استفاده از داده‌های سنتینل-۲ در برآورد کلروفیل‌آ مطابقت دارد و مدل M09 با استفاده از داده‌های لندست-۸، نتایج مطلوبی برای برآورد کلروفیل‌آ در منطقه مورد مطالعه این تحقیق نشان می‌دهد. طبق نتایج سایر محققین، استفاده از الگوریتم‌های تجربی بهتر از الگوریتم‌های نیمه‌تحلیلی با داده‌های میدانی همگام هستند و لذا در برآورد غلظت کلروفیل‌آ به‌ویژه در آب‌های کدر و حاوی بار مواد آلی محلول رنگی عملکرد بهتری دارند (Oreilly et al., 1998؛ موسوی ده‌موردی و بنایی، ۱۳۹۷).

با توجه به خشک‌سالی‌های اخیر و پس‌روی آب دریای خزر و به تبع آن کاهش مساحت آبی خلیج گرگان، دسترسی به

نقاط مختلف خلیج جهت برآورد میزان غلظت کلروفیل-آ به صورت میدانی با مشکل مواجه گردیده و حتی ایستگاه‌های مورد مطالعه این تحقیق از اواخر سال ۲۰۲۲ میلادی (معادل ۱۴۰۱ شمسی) تاکنون فاقد آب بودند. با بررسی به عمل آمده و تحلیل تصاویر ماهواره‌ای سنتینل-۲ و لندست-۸ مشاهده گردید که در برخی موارد، تصویر لندست-۸ قادر به قرائت ایستگاه‌های مورد نظر نبوده و آن ایستگاه را فاقد پهنه آبی در نظر گرفت ولی تصویر ماهواره‌ای دریافت شده از سنتینل-۲ در همان بازه زمانی قرائت میدانی کلروفیل-آ، آن ایستگاه را دارای ارزش دانسته و برآورد غلظت کلروفیل-آ و سایر مدل‌های مورد نظر امکان‌پذیر بود که احتمالاً علت آن را می‌توان به قدرت تفکیک مکانی ۱۰ متری ماهواره سنتینل-۲ نسبت به قدرت تفکیک مکانی ۳۰ متری ماهواره لندست-۸ نسبت داد.

نتیجه‌گیری

بر اساس نتایج مطالعه حاضر، تغییرات غلظت کلروفیل-آ در منطقه مورد مطالعه طی یک سال (۱۴۰۰-۱۳۹۹) با توجه به کاهش تراز آب در خلیج، بسیار قابل توجه بود و حداکثر مقدار آن در فصل زمستان ۱۴۰۰ مشاهده گردید. به کارگیری مدل NDCI با استفاده از داده‌های ماهواره‌ای لندست-۸ و سنتینل-۲ و مدل M09 با استفاده از داده‌های ماهواره‌ای لندست-۸ می‌تواند برآورد خوبی از میزان غلظت کلروفیل-آ در زمان‌های مختلف از آب‌های کدر خلیج گرگان ارائه نمایند و در انجام مطالعات زیستی به کارشناسان با صرف هزینه کم و سرعت بالاتر کمک مطلوبی برسانند.

حامی مالی

این اثر حامی مالی نداشته است.

سهام نویسندگان در پژوهش

فاطمه رحمانی خلیلی: جمع‌آوری داده‌های ماهواره‌ای، اجرای نرم‌افزار، تحلیل نتایج و نگارش. سارا حق‌پرست: روش‌شناسی، اعتبارسنجی و نگارش نهایی. کامران نصیراحمدی: جمع‌آوری داده‌ها و ویراستاری. وحید خیرآبادی: جمع‌آوری و کالیبراسیون داده‌ها.

تضاد منافع

نویسندگان اعلام می‌دارند که هیچ تضاد منافی در رابطه با نویسندگی و یا انتشار این مقاله ندارند.

تقدیر و تشکر

نویسنده از همکاری کارشناسان اداره کل حفاظت محیط‌زیست استان‌های گلستان و مازندران که در انجام این پژوهش به ما یاری رسانند، به‌ویژه کسانی که کار ارزیابی کیفی مقاله را انجام دادند، تشکر و قدردانی می‌نماید. همچنین پژوهش حاضر در قالب پایان‌نامه کارشناسی ارشد در دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی ساری به انجام رسیده است.

منابع

- عقیقی، حسین؛ علیمحمدی، عباس؛ سراجیان، محمدرضا و عاشورلو، داوود. (۱۳۸۸). برآورد کدورت آب با استفاده از تصاویر LISS-III ماهواره IRS. فصلنامه مدرس علوم انسانی، ۱۳ (۳)، ۵۵-۸۹. <https://doi.org/10.3923/pjbs.2008.711.718>
- موسوی دهموردی، لاله و بنایی، مهدی. (۱۳۹۷). تخمین و مدل‌سازی کلروفیل-آ با استفاده از ماهواره لندست-۸ در آب‌های ساحلی دیلم. مجله زیست‌شناسی دریا، ۱۰ (۳۸)، ۲۹-۲۱.

مهدوی فرد، مصطفی؛ ولی زاده کامران، خلیل و عطازاده، احسان. (۱۳۹۹). تخمین غلظت کلروفیل-آ با استفاده از داده‌های میدانی و پردازش تصاویر ماهواره‌ای سنتینل-۲ و لندست-۸ (مطالعه موردی-خور تیاب). نشریه سنجش‌ازدور و سامانه اطلاعات جغرافیایی در منابع طبیعی، ۱۱ (۱)، ۷۲-۸۳.

References

- Acheampong, C. (2018). *Deriving Algal concentration from Sentinel-2 through a downscaling technique: a case near the intake of a desalination plant*. Thesis submitted to the Faculty of Geo-Information Science and Earth Observation of the University of Twente in partial fulfillment of the requirements for the degree of Master of Science in Geo-information Science and Earth Observation, Enschede, The Netherlands, pp 65. <https://doi.org/10.1029/98JC02160>.
- Aghighi, H., Alimohammadi, A., Sarajian, M. R., and Ashourlou, D. (2009). Estimation of water turbidity using LISS-III images from the IRS satellite. *Journal of the Humanities Teacher*, 13(3), 55-89. <https://doi.org/10.3923/pjbs.2008.711.718> [In Persian].
- Alharbi, B. (2023). Remote sensing techniques for monitoring algal blooms in the area between Jeddah and Rabigh on the Red Sea Coast. *Remote Sensing Applications: Society and Environment*, 30 (2023) 100935. <https://doi.org/10.1016/j.rsase.2023.100935>
- Arabi, B. (2019). *Optical Remote Sensing of Water Quality in the Wadden Sea*. Doctor of Philosophy, Enschede: University of Twente, Faculty of GeoInformation Science and Earth Observation (ITC). pp 206. DOI: 10.17026/dans-zrv-6e3h
- Cuia, T.W., Zhangc, J., Wangd, K., Weie, J.W., Mud, B., Mac, Y., Zhuf, J.H., Liuc. R.J., & Chenc, X. Y. (2020). Remote sensing of chlorophyll a concentration in turbid coastal waters based on a global optical water classification system. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 163 (2020) 187–201. DOI:10.1016/j.isprsjprs.2020.02.017
- Darmawan, A., Herawati, E.Y., Azkiya, M., Cahyani, R.N., Aryani, S.H., Fradaningtyas, C., Hardiyanti, A., & Dwiyantri, R.S. M. (2021). Seasonal monitoring of chlorophyll-a with Landsat 8 Oli in the Madura Strait, Pasuruan, East Java, Indonesia. *Geography, Environment, Sustainability*, 14 (2), 22-29. <https://doi.org/10.24057/2071-9388-2020-199>.
- Elhag, M., Gitas, I., Othman, A., Bahrawi, J., & Gikas, P. (2019). Assessment of Water Quality Parameters Using Temporal Remote Sensing Spectral Reflectance in Arid Environments, Saudi Arabia. *Water*, 11, 556. doi:10.3390/w11030556 www.mdpi.com/journal/water.
- Ferreira, M.S., & Lourdes, M.D. (2013). Chlorophyll-a spatial inference using artificial neural network from multispectral images and in situ measurements. *Anais da Academia Brasileira de Ciências*, 85(2), 519-532. DOI:10.1590/S0001-37652013005000037.
- Gitelson, A. A., Dall'Olmo, G., Moses, W., Rundquist, D.C., Barrow, T., Fisher, T.R., Gurlin, D., & Holz, J. (2008). A simple semi-analytical model for remote estimation of chlorophyll-a in turbid waters: Validation. *Remote Sensing of Environment*, 12, 3582–3593. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2008.04.015>.
- Guo, J., Lu, J., Zhang, Y., Zhou, C., Zhang, S., Wang, D., & Lv, X. (2022). Variability of Chlorophyll-a and Secchi Disk Depth (1997–2019) in the Bohai Sea Based on Monthly Cloud-Free Satellite Data Reconstructions. *Remote Sensing*, 14(3), 639; <https://doi.org/10.3390/rs14030639>.
- Mahdavifard, M., Valizadeh Kamran, Kh. and Atazadeh, A. (2019). Estimating chlorophyll-a concentration using field data and processing of Sentinel-2 and Landsat-8 satellite images (Case study-Khortiab). *Journal of Remote Sensing and Geographic Information Systems in Natural Resources*, 11(1), 72-83. [In Persian].
- Mishra, S. & Mishra, D. R. (2011). Normalized difference chlorophyll index: A novel model for remote estimation of chlorophyll-a concentration in turbid productive waters. *Remote Sensing of Environment*, 117, 394–406. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2011.10.016>
- Moses, W. J., Gitelson, A. A., Berdnikov, S., & Povazhnyy, V. (2009). Satellite estimation of chlorophyll-a concentration using the red and NIR bands of MERIS—The Azov Sea case study. *IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters*, 6(4), 845–849. <https://doi.org/10.1088/1748-9326/4/4/045005>

- Mousavi Dehmordi, L., and Benaei, M. (2018). Estimation and modeling of chlorophyll a using Landsat 8 satellite in coastal waters of Daylam. *Journal of Marine Biology*, 10(38), 21-29. [In Persian].
- Niroumand-Jadidi, M., Bovolo, F., Bruzzone, L., & Gege, P. (2021). Inter-comparison of methods for Chlorophyll-a retrieval: Sentinel-2 time-series analysis in Italian Lakes. *Remote Sensing* 13(12), 2381 <https://doi.org/10.3390/rs13122381>.
- O'Reilly, J. E., Maritorena, S., Mitchell, B. G., Siegal, D. A., Carder, K. L., Graver, S. A., Kahru, M. and McClain, C., 1998. Ocean color chlorophyll algorithms for SeaWiFS. *Journal of Geophysical Research*, 103(5), 24937-24953. DOI:10.1029/98JC02160
- Ruddick, K.G., Gons, H. J., Rijkeboer, M., & Tilstone, G. (2001). Optical remote sensing of chlorophyll-a in case 2 waters by use of an adaptive two-band algorithm with optimal error properties. *Applied Optics*, 40(21), 3575–3585. DOI: 10.1364/ao.40.003575.
- Sun, D., Hu, C., Qiu, Z., Cannizzaro, J.P., & Barnes, B.B. (2014). Influence of a red band-based water classification approach on chlorophyll algorithms for optically complex estuaries. *Remote Sensing of Environment*, 155, 289-302. DOI:10.1016/j.rse.2014.08.035.
- Tzortziou, M., Subramaniam, A., Herman, J. R., Gallegos, C. L., Neale, P. J., & Harding, L. W., Jr. (2007). Remote sensing reflectance and inherent optical properties in the mid Chesapeake Bay. *Estuarine Coastal and Shelf Science*, 72, 16–32. DOI: 10.1016/j.ecss.2006.09.018
- Yadav, S., Yamashiki, Y., Susaki, J., Yamashita, Y., & Ishikawa, K. (2019). Chlorophyll Estimation of Lake Water and Coastal Water Using Landsat-8 and Sentinel-2A Satellite. *The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences, Volume XLII-3/W7*, 77-82. DOI:10.5194/isprs-archives-XLII-3-W7-77-2019.