

Research Paper

Bathymetry in Abu Musā Island Using Remote Sensing Techniques¹

Parvāneh Sobhāni^{2*} , Mahyār Majidi Nik² 

1. Assistant Professor, Department of Environmental Science, Natural Resources Faculty, Lorestan University, Khorramabad, Iran.

2. Ph.D. student of oceanography, Researcher of the Department of Environmental Geography Studies, Madde Danesh Studies Center, Tehran, Iran.

 DOI: 10.22124/GSCAJ.2025.26528.1288

Received: 2024/01/19

Accepted: 2022/05/02

Abstract

Bathymetry is particular important for managing and monitoring coastal islands and preparing accurate maps and information about these shallow areas. In this regard, bathymetry using satellite imagery has provided a broad perspective in shallow coastal areas due to its high efficiency and low cost. Therefore, in the present study, an experimental bathymetry study of Abu Musā island was conducted with the aim of obtaining more information about the phenomena and features of shallow water areas using Sentinel-2 images and the Google Earth Engine (GEE) web platform. Additionally, pre-processing was also carried out to remove the effects of surface reflection for accurate bathymetry estimation in two time periods, tidal and non-tidal, in comparison with the ICZM project data. According to the results, in Abou Musā Island, the classification of bathymetric points during tidal conditions had correlation coefficients and errors of $R^2 = 0.96$ and $RMSE = 1.11$, and outside the low tide, $R^2 = 0.74$ and $RMSE = 2.3$. The obtained results indicated that the bathymetric accuracy has decreased due to tidal effects in this island. This means that due to the shallow water column in the intertidal areas, the relationship between the logarithm ratio and water depth cannot be properly evaluated, because there is not enough correlation between the data used to define the logarithm/depth relationship, which results in a decrease in the correlation coefficient between the green/blue band ratio and water depth in the intertidal area (during the calibration of the experimental bathymetric technique). Furthermore, the validation results of the measured depth points and the estimated depth points showed that there is a high correlation between these points. These results indicated the high accuracy of the Sentinel-2 satellite images and the pre-processing set performed in the experimental bathymetry process in shallow coastal areas. Therefore, this technique can be used as an efficient method in the bathymetry process in other target islands and shallow coastal areas.

Keywords: Bathymetry, Sentinel 2 Images, Shallow Coastal Areas, Abu Musā Island.

Highlight

- Bathymetry using satellite imagery has provided a broad perspective in shallow coastal areas due to its high efficiency and low cost.
- Experimental bathymetry is an efficient method that can also be utilized in the bathymetric process for other islands and shallow coastal areas.

Extended Abstract

Introduction

Bathymetry is particularly important for managing and monitoring coastal islands and preparing accurate maps and information about these shallow areas. In this regard, bathymetry using satellite imagery has provided a broad perspective in shallow coastal areas due to its high efficiency and low cost. The bathymetry process means determining the depth and studying the bathymetry of water areas such as coastal areas, islands, oceans, seabeds,

¹ This article is derived from a research project titled "Bathymetry in Abu Musā Island Using Remote Sensing Techniques," which was conducted at the Center for Marine Specialized Studies and Research (Madde Danesh) by the first author in collaboration with the second author.

2. Corresponding Author: sobhani.pa@lu.ac.ir

rivers and lakes. Mapping coastal bed areas allows for monitoring and describing shallow coastal areas and also serves as a basis for studies to investigate deep-sea habitats and plan for military-naval operations and maritime transport. In general, the bathymetry process in coastal areas is necessary to obtain more information about underwater phenomena and features, as well as to carry out activities such as shipping, dredging, pipe and cable laying, determining coastal hazard points, hydrological studies, preparing bed maps, and obtaining information about marine habitats for use in military, environmental and engineering affairs. However, due to reasons such as high costs and lack of necessary equipment, hundreds of thousands of kilometers of the world's sea coasts lack accurate information on depth changes. On the other hand, extensive exploitation of coastal areas has led to the increasing development of these areas, severe damage to coastal ecosystems, geological hazards, continuous erosion, flood problems and the destruction of marine ecosystems. In this regard, the bathymetry of coastal areas is one of the important issues in the military-naval and environmental fields in islands and coastal areas. Also, bathymetry in coastal areas plays a significant role in the internal infrastructure of the region, so the development and development of hydrographic services at the national level can improve the safety of seafarers, protect human lives, and provide facilities for the protection of the marine environment.

Methodology

In the present study, an experimental bathymetry study of Abu Musā island was conducted with the aim of obtaining more information about the phenomena and features of shallow water areas using Sentinel 2 imagery and the Google Earth Engine (GEE) web-based platform. Additionally, pre-processing steps were also carried out to eliminate the effects of surface reflection for accurate bathymetry estimation during two time periods, tidal and non-tidal, in comparison with the ICZM project data. For this purpose, Sentinel 2 multispectral images were used as the best available and free multispectral dataset in GEE. The objective of this satellite is to image the Earth's surface with high quality and accuracy in two radiation wavelengths (visible and ultraviolet) and to analyze land surface changes over time. These images have a variable spatial resolution ranging from 10 and 60 meters and include 13 different bands (0.443-190.2 μm). Given that blue and green wavelengths have the greatest penetration in water depth due to reflection between 400 and 600 nm, they are therefore very suitable for bathymetry estimation. Accordingly, in the present study, the pixel values of Sentinel-2's Band 2 (blue) and Band 3 (green) (Band 2 = 490 nm and Band 3 = 560 nm) were used to estimate bathymetry. After preparing the output of the blue-to-green band ratio (B/G) and applying the set of water spectral indices, 1500 points were randomly sampled for training and testing for classification, and then a linear regression model was applied to it, from which 1000 samples for training and 500 samples for testing were classified and selected. Consequently, the numerical values of the corresponding pixels of the selected points was extracted and analyzed from the 4 bands (10 m) of the Sentinel 2 imagery.

Results and discussion

As the results showed, in Abu Musā Island, the classification of bathymetric points during high tide has correlation coefficients and errors of $R^2 = 0.96$ and $RMSE = 1.11$, and outside the low tide, $R^2 = 0.74$ and $RMSE = 2.3$. The obtained results indicated that the bathymetric accuracy has decreased due to the tidal effects on this island. This means that due to the shallow water column in the intertidal areas, the relationship between the logarithm ratio and water depth cannot be properly evaluated, because there is not enough correlation between the data used to define the logarithm/depth relationship, which results in a decrease in the correlation coefficient between the green/blue band ratio and water depth in the intertidal area (during the calibration of the experimental bathymetric technique). Also, the validation results of the measured depth points and the estimated depth points showed that there is a high correlation between these points.

Conclusion

These results indicated the high accuracy of the Sentinel 2 satellite images and the pre-processing set performed in the experimental bathymetry process in shallow coastal areas. Therefore, this technique can be used as an efficient method in the bathymetry process in other target islands and shallow coastal areas. Accordingly, remote sensing techniques and satellite bathymetry models are suitable methods for estimating depth with high spatial resolution and wide coverage on the surface of islands and especially shallow coastal areas. In this regard, it is suggested that other algorithms and automated methods be used in bathymetry surveys. Moreover, available data from the site, such as nautical charts, can be used to retrieve accurate bathymetry by developing efficient and effective methods that can be repeated in different environments. Future studies should be conducted to improve the accuracy of the results, including adding high-quality images from other sources, integrating and improving bathymetry methods, and optimizing the integration process such as pixel selection and fitting.

Funding

This article has been completed with the cooperation and financial assistance of the Madde Danesh Studies Center.

Authors' Contribution

Authors contributed equally to the conceptualization and writing of the article. All of the authors approved the content of the manuscript and agreed on all aspects of the work

Conflict of Interest

Authors declared no conflict of interest.

Acknowledgments

The authors would like to thank the Center for Specialized Marine Studies and Research of Madde Danesh, for their assistance in conducting this research.

Citation:

Sobhāni, P. & Majidi Nik, M. (2025) Bathymetry in Abu Musā Island Using Remote Sensing Techniques., *Geographical Studies of Coastal Areas Journal*, 6(1), pp. 63-77.
DOI: 10.22124/GSCAJ.2025.26528.1288

Copyrights:

Copyright for this article is retained by the author(s), with publication rights granted to *Geographical studies of Coastal Areas Journal*. This is an open-access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution License (<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0>), which permits unrestricted use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.



عمق‌سنجی در جزیره بوموسی با استفاده از تکنیک‌های سنجش از دور^۱

پروانه سبحانی^{۱*}، مهیار مجیدی نیک^۲

۱. استادیار گروه محیط زیست، دانشگاه لرستان، دانشکده منابع طبیعی، خرم آباد، ایران.

۲. دانشجوی دکتری اقیانوس شناسی، پژوهشگر گروه مطالعات جغرافیایی محیطی مرکز مطالعات و پژوهش‌های تخصصی دریایی مد دانش، تهران، ایران.

doi DOI: 10.22124/GSCAJ.2025.26528.1288

تاریخ دریافت مقاله: ۱۴۰۲/۱۰/۲۰

تاریخ پذیرش مقاله: ۱۴۰۴/۰۲/۲۲

چکیده

عمق‌سنجی به‌منظور مدیریت و پایش جزایر، مناطق ساحلی و همچنین تهیه نقشه‌ها و اطلاعات دقیقی از این مناطق کم‌عمق، از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است. در این راستا، عمق‌سنجی با استفاده از تصاویر ماهواره‌ای به‌دلیل کارایی بالا و هزینه کم، چشم‌انداز گسترده‌ای را در مناطق کم‌عمق ساحلی فراهم کرده است. بنابراین در مطالعه حاضر، به مطالعه عمق‌سنجی تجربی جزیره بوموسی با هدف کسب اطلاعات بیشتر از پدیده‌ها و عوارض مناطق کم‌عمق آب با استفاده از تصاویر سنتینل ۲ و سامانه تحت وب گوگل‌ارث انجین (GEE) پرداخته شد. همچنین پیش‌پردازش‌هایی جهت حذف اثرات بازتاب سطحی برای تخمین دقیق عمق‌سنجی در دو بازه زمانی جزر و مد و خارج از جزر در مقایسه با داده‌های طرح ICZM نیز صورت گرفت. همان‌طور که نتایج نشان داد، در جزیره بوموسی طبقه‌بندی نقاط عمق‌سنجی در زمان جزر و مد دارای ضرایب همبستگی و خطای $R^2=0/96$ و $RMSE=1/11$ و در خارج از زمان جزر و مد $R^2=0/74$ و $RMSE=2/3$ می‌باشد. نتایج به‌دست آمده حاکی از آن است که میزان دقت عمق‌سنجی به‌دلیل اثرات جزر و مد در این جزیره کاهش یافته است. این بدین معنا است که به‌دلیل وجود ستون آب کم‌عمق در مناطق جزر و مدی، نمی‌توان به درستی رابطه بین نسبت لگاریتم و عمق آب را ارزیابی کرد، زیرا همبستگی کافی در بین داده‌های مورد استفاده برای تعریف رابطه لگاریتم/عمق وجود ندارد که نتیجه آن کاهش ضریب همبستگی بین نسبت نوار سبز/آبی و عمق آب در ناحیه جزر و مدی (طی کالیبراسیون تکنیک عمق‌سنجی تجربی) است. علاوه بر این، نتایج اعتبارسنجی نقاط عمق اندازه‌گیری شده و نقاط عمق برآورد شده، نشان داد که همبستگی بالایی بین این نقاط وجود دارد. این نتایج حاکی از دقت بالای تصاویر ماهواره‌ای سنتینل ۲ و مجموعه پیش‌پردازش‌های صورت گرفته در فرایند عمق‌سنجی تجربی در مناطق کم‌عمق ساحلی است. از این‌رو، این تکنیک به‌عنوان روشی کارآمد می‌تواند در فرایند عمق‌سنجی در سایر جزایر و مناطق کم‌عمق ساحلی هدف نیز مورد استفاده قرار گیرد.

واژگان کلیدی: عمق‌سنجی، تصاویر سنتینل ۲، مناطق کم‌عمق ساحلی، جزیره بوموسی.

نکات برجسته:

- عمق‌سنجی با استفاده از تصاویر ماهواره‌ای به‌دلیل کارایی بالا و هزینه کم، چشم‌انداز گسترده‌ای را در مناطق کم‌عمق ساحلی فراهم می‌کند.
- عمق‌سنجی تجربی روشی کارآمد است که می‌تواند در فرایند عمق‌سنجی برای سایر جزایر و مناطق ساحلی کم‌عمق نیز مورد استفاده قرار گیرد.

^۱ این مقاله برگرفته از طرح پژوهشی با عنوان عمق‌سنجی در جزیره بوموسی با استفاده از تکنیک‌های سنجش از دور می‌باشد که در مرکز مطالعات و پژوهش‌های تخصصی دریایی مد دانش به وسیله نویسنده نخست و همکاری نویسنده دوم انجام شده است.

*نویسنده مسئول: sobhani.pa@lu.ac.ir

۱. مقدمه

مناطق کم عمق ساحلی در مباحث هیدرودینامیک و مهندسی سواحل، همواره از جمله مناطق پویا و در حال تغییر قلمداد می‌شوند. این مناطق به دلیل شرایط عمق‌نگاری و اعماق محدود و همچنین تأثیرگذاری شرایط جوی و دریایی همواره تغییرات عمق در آن‌ها قابل مشاهده است (Roelfsema et al., 2018: 28; Kutser et al., 2020). بنابراین، عمق‌سنجی به منظور مدیریت و پایش جزایر، مناطق ساحلی و همچنین تهیه نقشه‌ها و اطلاعات دقیقی از این مناطق کم عمق، از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است (Mudiyansele et al., 2022، امینی، ۱۳۹۷: ۸۷).

فرایند عمق‌سنجی به معنای تعیین عمق و مطالعه عمق‌نگاری پهنه‌های آبی همچون مناطق ساحلی، جزایر، اقیانوس‌ها، بستر دریاها، رودخانه‌ها و دریاچه‌ها می‌باشد (کریمی و همکاران، ۱۴۰۰: ۸). نقشه‌برداری از مناطق بستر سواحل امکان پایش و توصیف مناطق کم عمق ساحلی را فراهم می‌سازد و همچنین به عنوان مبنای مطالعاتی برای بررسی زیستگاه‌های اعماق دریا و برنامه‌ریزی برای عملیات نظامی-دریایی و حمل و نقل دریایی است (Ashphaq et al., 2021: 348; Duan et al., 2022: 3240; Jagalingam et al., 2015: 563). به طور کلی فرایند عمق‌سنجی در نواحی ساحلی برای کسب اطلاعات بیشتر از پدیده‌ها و عوارض زیر آب و همچنین انجام فعالیت‌هایی نظیر کشتیرانی، لایروبی، لوله و کابل‌گذاری، تعیین نقاط پرخطر ساحلی، مطالعات هیدرولوژیکی، تهیه نقشه‌های جنس بستر، اطلاع از زیستگاه‌های دریایی، به منظور به کارگیری در امور نظامی، زیست محیطی و مهندسی ضروری است (فارسی، ۱۳۹۷: ۵۴). این در حالی است که به دلایلی همچون هزینه‌های سنگین و نبود تجهیزات لازم، صدها هزار کیلومتر از سواحل دریاهای جهان فاقد اطلاعات دقیقی از تغییرات عمق هستند (Ashphaq et al., 2021: 356).

از طرفی دیگر بهره‌برداری‌های گسترده از مناطق ساحلی منجر به توسعه روزافزون این مناطق، آسیب شدید به اکوسیستم‌های ساحلی، مخاطرات زمین‌شناسی، فرسایش مداوم، مشکلات سیل و نابودی اکوسیستم‌های دریایی شده است (Duan et al., 2016: 132). در این راستا عمق‌سنجی از نواحی ساحلی یکی از موضوعات مهم در زمینه‌های نظامی-دریایی و زیست محیطی در جزایر و مناطق ساحلی می‌باشد. همچنین عمق‌سنجی در مناطق ساحلی نقش بسزایی را در زیرساخت‌های داخلی منطقه ایفاء می‌کند، به طوری که پرورش و توسعه خدمات هیدروگرافی در سطح ملی می‌تواند ضمن ارتقا ایمنی دریانوردان، حفاظت از جان انسان‌ها، تسهیلاتی را نیز به منظور حفاظت از محیط زیست دریایی فراهم کند (Martin et al., 2014: 44).

۲. مبانی نظری

در طی سال‌های اخیر، روش‌های نوینی مبتنی بر فناوری سنجش از دور، با توجه به قابلیت بررسی دوره‌های زمانی مختلف و طولانی مدت، در اختیار گذاشتن اطلاعات مکانی پیوسته و در نهایت هزینه‌های رایگان مورد توجه بسیاری از محققان جهت عمق‌سنجی قرار گرفته است (Viana-Borja et al., 2023). تصاویر ماهواره‌ای Landsat از اولین تصاویر ماهواره‌ای محسوب می‌شوند که جهت تهیه نقشه‌های عمق‌سنجی مورد استفاده قرار گرفته است. بعد از آن از تصاویر ماهواره‌های Quickbird، Worldview، Spot و به تازگی^۱ نیز تصاویر Sentinel مورد توجه بسیاری از محققان می‌باشد (Karimi et al., 2016: 9). عمق‌سنجی اغلب با استفاده از الگوریتم‌های مختلفی که ارتباط بین ارزش پیکسل‌های تصاویر (شامل بازتابندگی در باندهای اپتیکی و تابندگی در باندهای حرارتی) را با عمق آب در نظر می‌گیرد انجام می‌شود و بدین ترتیب بر اساس ویژگی‌های طیفی آب (مانند میرایی و پراکنش) و همچنین انتشار نور در ستون آب اندازه‌گیری می‌شوند (Traganos et al., 2018).

کیفیت تصاویر در این سنجنده‌ها، حاصل از تبادل بین وضوح فضایی و فرکانس بازتاب شده از ماهواره‌ها است. بنابراین، سنجنده‌هایی با وضوح مکانی پایین می‌توانند منجر به عدم قطعیت‌های بزرگ در پیکسل‌های ترکیبی آب و خشکی در امتداد خطوط ساحلی شوند. برای غلبه بر بسیاری از مشکلات مذکور، در تخمین عمق‌سنجی مناطق کم عمق ساحلی، می‌توان از سامانه تحت وب گوگل ارث انجین (GEE)^۱ استفاده نمود. GEE یک پلتفرم محاسباتی قدرتمند و با کیفیت بالا می‌باشد که

^۱ - Google Earth Engine (GEE)

امکان دسترسی آسان به مجموعه داده‌های حاصل از بازتاب ماهواره‌ای را برای تجزیه و تحلیل عمق‌سنجی در مقیاس جهانی فراهم کرده است. کاربرد GEE در انواع مطالعات در مقیاس جهانی از جمله طبقات کاربری اراضی، تغییرات پوشش‌های جنگلی، تراز سطح آب و کاربری‌های شهری قابل مشاهده است. به‌ویژه، مجموعه داده‌های حاصل از بازتاب سطحی تصاویر Sentinel2 در GEE به‌طور گسترده در حوزه مطالعات محیط‌زیستی (Traganos et al., 2018; Shelestov et al., 2017) و دریایی-ساحلی استفاده شده است.

۳. پیشینه پژوهش

با توجه به اهمیت عمق‌سنجی در جزایر و مناطق کم عمق ساحلی، تاکنون مطالعاتی در این راستا صورت گرفته است که می‌توان به کریمی و همکاران (۱۴۰۰)، در استخراج نقشه عمق‌سنجی سواحل دریای خزر با استفاده از داده‌های ماهواره‌ای اشاره نمود. مطابق نتایج، نقشه آب استخراج شده از تصویر ماهواره‌ای لندست ۸ با نقاط کنترلی حاکی از آن است که عمق آب حاصل شده با توجه به شرایط جغرافیایی آب دریای خزر از دقت قابل قبولی برخوردار است. در مطالعه‌ای دیگر، امینی و عبداللهی کاکرودی (۱۳۹۷)، به بررسی عمق‌سنجی از نواحی کم‌عمق ساحلی با استفاده از تصاویر لندست-۸ و به روش آموزش شبکه عصبی مصنوعی پرداختند. نتایج آن‌ها نشان داد که دقت عمق به‌دست آمده در طبقات مختلف متفاوت است و بیشترین دقت در طبقات ۳/۱- تا ۳/۹۷- متری قابل مشاهده است. ویانا-بوجا و همکاران (۲۰۲۳) نیز برای نظارت بر ساحل مدیترانه غربی، به بررسی عمق‌سنجی با استفاده از تصاویر سنتینل ۲ پرداختند. نتایج به‌دست آمده اعماق محدوده مورد مطالعه را تا ۱۴ متری و با میانگین خطای ۰/۷۱ متر نشان می‌دهد که این یافته‌ها می‌تواند درک بهتری از فرایندهای اکوسیستمی را در بستری از سواحل دریای مدیترانه فراهم کند. مودیانسلاگ^۱ و همکاران (۲۰۲۲)، عمق‌سنجی سواحل با استفاده از ماشین یادگیری و تصاویر سنتینل ۲ در جنوب غربی فلوریدا را مورد بررسی قرار دادند. آن‌ها بیان کردند که مطابق با میانگین مربعات خطای به‌دست آمده، این مدل از کارایی بالا و سازگاری کافی با ویژگی‌های مختلف مناطق ساحلی برخوردار است. همچنین لی و همکاران (۲۰۲۱)، به نقشه‌برداری مکانی از مناطق کم‌عمق سواحل با استفاده از سامانه تحت وب GEE پرداختند. نتایج آن‌ها حاکی از آن است که عمق‌سنجی ماهواره‌ای از مناطق کم‌عمق سواحل اطلاعات مهمی را در زمینه تحقیقات علمی، حفاظت از محیط زیست و حمل‌ونقل دریایی با وضوح فضایی بالا و پوششی گسترده فراهم می‌کند.

مطابق مطالعات صورت گرفته، عمق‌سنجی با استفاده از تکنیک‌های سنجش از دوری روشی کارآمد در نواحی کم عمق ساحلی می‌باشد و می‌تواند امکان کسب نتایجی با دقتی بالا و هزینه کم را فراهم آورد. در این راستا، در مطالعه حاضر به مطالعه عمق‌سنجی تجربی جزیره بوموسی واقع در استان هرمزگان پرداخته شد. به‌طور کلی فرایند عمق‌سنجی در این مطالعه با هدف کسب اطلاعات بیشتر از پدیده‌ها و عوارض مناطق کم‌عمق آب با استفاده از تصاویر سنتینل ۲ و سامانه تحت وب گوگل ارث انجین (GEE) در این جزیره صورت گرفت. جزیره بوموسی به‌دلیل موقعیت استراتژیک و سیاسی خود از امکانات و تأسیسات مختلفی برخوردار است، از این‌رو، برای توسعه این امکانات و افزایش زیرساخت‌ها، اطلاعات عمق‌سنجی از این جزیره از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است. از طرفی، اطلاعات عمق آب نه تنها برای ناوبری ایمن دریایی بلکه برای مدیریت و پایش این جزیره بسیار مهم و کاربردی است. به همین دلیل برآورد عمق با استفاده از تکنیک‌های سنجش از دور نقش مهمی در پایش، مدیریت و بهره‌برداری بهینه از این منطقه و انجام مطالعات بر روی فرایندهای ساحلی دارد. این مطالعه تکمیل‌کننده سایر مطالعات در راستای برآورد عمق‌سنجی مناطق کم‌عمق سواحل و مقایسه آن در دو زمان جزر و مد و خارج از جزر و مد با توجه به شرایط آب‌های خلیج فارس می‌باشد. از آنجایی که آب‌های خلیج فارس، طیف وسیعی از جزر و مد را شامل می‌شوند، تخمین عمق‌سنجی و نقشه‌برداری در چنین شرایطی با دشواری و عدم دقت همراه است که باید در بررسی‌ها مورد توجه قرار گیرد. از این‌رو، در مطالعه حاضر به اعتبارسنجی نتایج به‌دست آمده با نقاط عمق‌سنجی اندازه‌گیری شده در طرح ICZM^۲ نیز پرداخته شد.

^۱ - Mudiyansele

^۲ - Integrated Coastal Zone Management

۴. روش پژوهش

منطقه مورد مطالعه جزیره بوموسی با مساحت ۱۲ کیلومترمربع و ارتفاع ۴۶ متر از سطح دریا واقع در جنوب خلیج فارس و ۲۱۳ کیلومتری غرب بندرعباس می‌باشد. از نظر شرایط آب و هوایی دارای اقلیمی گرم با متوسط دمای ۲۸/۲ درجه سانتی‌گراد، بارندگی ۵۳/۳ میلی‌متر و رطوبت نسبی سالانه ۷۴ درصد است. این جزیره همچنین میزبان ساکنین بوموسی، یکی از کم جمعیت‌ترین شهرهای هرمزگان می‌باشد که در شکل ۱، موقعیت جغرافیایی این محدوده نمایش داده شده است.



شکل ۱. موقعیت جغرافیایی محدوده مورد مطالعه

۴.۱. داده‌ها

در این مطالعه از تصاویر چندطیفی^۱ سنتینل ۲ به‌عنوان بهترین مجموعه داده‌های چندطیفی در دسترس و رایگان در سامانه تحت وب GEE استفاده شد. هدف این ماهواره، تصویربرداری از سطح زمین با کیفیت و دقت بالا در دو موج تابشی (مرئی و فرابنفش) و تحلیل تغییرات سطح زمین در طول زمان است. این تصاویر دارای توان تفکیک مکانی متغیر بین ۱۰ تا ۶۰ متر و شامل ۱۳ باند مختلف (۴۴۳-۰/۲/۱۹۰ μm) در محدوده طیفی مرئی، مادون قرمز نزدیک و مادون قرمز با طول موج کوتاه می‌باشند. علاوه بر این، دارای عرض نوار برداشت ۲۹۰ کیلومتر و توان تفکیک زمانی ۵ روز در استوا است (رزاک^۲ و همکاران، ۲۰۲۳: ۸). بر این اساس در مطالعه حاضر، به‌منظور افزایش دقت و کسب نتایجی با وضوح بالاتر به بررسی باندهای ۲، ۳، ۴ و ۸ (B, G, R و NIR) با قدرت تفکیک مکانی ۱۰ متری و بیش‌ترین قدرت عمق نفوذ در آب پرداخته شد و همچنین زمان برداشت تصویر مربوط به ۱ دسامبر سال ۲۰۲۲ می‌باشد. لازم به ذکر است که زمان و طول مدت انتخاب تصویر در این جزیره، با توجه به زمان جزر و مد و در بازه‌ای کوتاه مدت در نظر گرفته شد. در جدول ۱ نیز ویژگی باندهای مورد مطالعه در بررسی عمق‌سنجی جزیره بوموسی نمایش داده شده است.

جدول ۱. ویژگی‌های داده‌های ماهواره‌ای مورد مطالعه

نوع ماهواره	زمان دسترسی	دوره بازگشت	قدرت تفکیک مکانی	ویژگی باندهای مورد مطالعه
Sentinel2 (MSI)	از سال ۲۰۱۵ تا کنون	۵ روز	B, G, R, و NIR: ۱۰ m	B: طول موج ۴۹۰ نانومتر و عمق نفوذ ۲۵ متر G: طول موج ۵۶۰ نانومتر و عمق نفوذ ۱۵ متر R: طول موج ۶۶۵ نانومتر و عمق نفوذ ۵ متر NIR: طول موج ۸۴۲ نانومتر و عمق نفوذ ۰/۵ متر

۱. Multispectral Image (MSI)

۲. Razzak

۲.۴. روش عمق سنجی تجربی آب

عمق سنجی با استفاده از سنجش از دور ماهواره نوری وابسته به طول موج نور در ستون آب است (Pacheco et al., 2015). مشخص است که آب کم عمق انرژی کمتری نسبت به آب های عمیق جذب می کند و بدین ترتیب بازتاب تابش خورشیدی بالاتری خواهد داشت و بالعکس (Pope et al., 2016: 18). علاوه بر این، در آب های کم عمق تر، تابش خورشید پس از تماس با عمق پایین به سطح بازتاب می شود که این بازتاب خروجی آب^۱ اندازه گیری شده توسط سنسور ماهواره برای تبدیل به عمق آب، از طریق معادلات تحلیلی صورت می گیرد. در حقیقت بازتاب خروجی آب، نسبت تابش آب خروجی و تابش سطح آب در عمق پایین است که اغلب به آن بازتاب سنجش از دور^۲ گفته می شود (Li et al., 2019). با این حال، انتظار می رود این فرض تنها در آب های شفاف کم عمق معتبر باشد، زیرا بازتاب خروجی آب نه تنها به بازتاب از سطح پایین، بلکه به خواص جذب و پراکندگی مواد محلول و معلق در ستون آب نیز بستگی دارد. بدین ترتیب مطابق رابطه ۱، ابتدا بازتاب سنجش از دور را از بازتاب سطح موزایک (λ) ρ محاسبه می کنیم.

$$R_{rs}(\lambda) = \rho_m(\lambda) / \pi \quad \text{رابطه ۱}$$

در مرحله بعد، بازتاب سنجش از راه دور زیر سطحی^۳ (R_{rs}) مطابق با رابطه ۱، از R_{rs} استخراج می گردد تا اثر سطحی هوا از آب حذف شود (رابطه ۲).

$$r_{rs}(\lambda) = \frac{R_{rs}(\lambda)}{0.52 + 1.72R_{rs}(\lambda)} \quad \text{رابطه ۲}$$

با توجه به این که طول موج های آبی و سبز به دلیل بازتاب بین ۴۰۰ تا ۶۰۰ نانومتری بیشترین نفوذ را در عمق آب دارند، بنابراین برای تخمین عمق سنجی بسیار مناسب می باشند (Monteys et al., 2015). در این راستا، در مطالعه حاضر از مقادیر پیکسلی باند ۲ (آبی) و باند ۳ (سبز) تصاویر سنتینل (باند ۲ = ۴۹۰ نانومتر و باند ۳ = ۵۶۰ نانومتر) برای تخمین عمق سنجی استفاده شد. نسبت باند آبی به سبز (B/G) می تواند عمق آب حاصل از ماهواره را از طریق یک رابطه خطی بین بازتاب آب و عمق سنجی را فراهم کند. این روش نسبت باندهای طیفی ۲ و ۳ را از طریق یک فرمول تجربی برای ارتباط دادن عمق آب به نسبت بازتاب این دو باند طیفی را نشان می دهد (رابطه ۳). در این رابطه، عمق سنجی حاصل از ماهواره SDB^۴ و نسبت بازتاب خروجی آب از نوار آبی به نوار سبز ($R_{rs} \text{ b2/b3}$) است (Casal et al., 2019: 2858). روش تبدیل نسبی در استفاده از تصاویر چندطیفی برای تهیه نقشه آب های کم عمق بر چندین موضوع تأکید دارد: ۱) به تفریق پیکسل های تیره آب نیازی نیست، ۲) در روش تبدیل نسبی نیاز به مؤلفه های تجربی کمتری است که کاربرد این روش را برای مناطق جغرافیایی وسیع آسان تر می کند، و ۳) این روش نسبی می تواند در دسترس و قابل اعتماد تنظیم شود (Caballero et al., 2020).

$$SDB = m_0 \frac{\ln(1000 \times rrsb2)}{\ln(1000 \times rrsb3)} - m_1 \quad \text{رابطه ۳}$$

در رابطه فوق m_0 و m_1 شیب تنظیم شده توسط رگرسیون خطی بین نسبت باندهای آبی به سبز جهت مقیاس بندی نسبت به عمق، و 1000 یک عدد ثابت برای اطمینان از پاسخ خطی نسبت لگاریتمی با عمق می باشد (اطمینان از این که مقدار در تمام نقاط، مثبت باقی خواهد ماند) (Stumpf et al., 2003).

۳.۴. محاسبه شاخص های طیفی

در عمق سنجی سواحل و جزایر به ویژه در مناطق گلی، که آب شفافیت کمی دارد، بازتاب طول موج های مختلف از سطح

^۱ . Water-leaving reflectance

^۲ . Remote sensing reflectance (Rrs)

^۳ . Below-Surface Remote Sensing Reflectance (rrs)

^۴ . Satellite-Derived Bathymetric (SDB)

خاک، آب و پوشش گیاهی به عنوان عمده ترین پارامترهای تأثیرگذار و محدودکننده در این محاسبات محسوب می شوند. در این راستا، عمق سنجی دقیق و تمایز پهنه های آبی نیازمند بررسی یکسری از شاخص های طیفی از جمله شاخص نرمال شده تفاوت پوشش گیاهی (NDVI)^۱، شاخص نرمال شده تفاوت کدورت (NDTI)^۲، شاخص آب سطح زمین (LSWI)^۳ و شاخص نرمال شده تفاوت پهنه های آبی (NDWI)^۴ است که در ادامه به شرح هر یک از این شاخص ها و روابط محاسباتی آنها پرداخته شد. بدین ترتیب، از هر یک از شاخص های طیفی نام برده شده با توجه به میزان شفافیت و عمق آب در کرانه های ساحلی، می توان به عنوان ویژگی های حساس در عمق سنجی و مناطق جزر و مدی سواحل استفاده نمود.

شاخص NDVI: این شاخص یکی از مهم ترین و پرکاربردترین شاخص ها برای بارزسازی پوشش گیاهی است (هانگ^۵ و همکاران، ۲۰۲۱: ۸). شاخص NDVI مقادیر نرمال شده بین -۱ و +۱ را شامل می شود، به طوری که مناطقی با پوشش گیاهی متراکم به دلیل انعکاس نسبتاً بالایی در محدوده مادون قرمز نزدیک و انعکاس کم در محدوده قرمز مرئی، از مقادیر بالای NDVI برخوردار است. این شاخص از طریق رابطه ۴ قابل محاسبه است. در این رابطه، R و NIR به ترتیب موج های قرمز مرئی و مادون قرمز نزدیک است (Shimu et al., 2019: 4).

$$NDVI = \frac{(NIR - R)}{(NIR + R)} \quad \text{رابطه ۴}$$

شاخص NDTI: این شاخص برای جداسازی پهنه های گل آلود و جزر و مدی از کاربرد بالایی برخوردار است. با توجه به این که آب های صاف و زلال در محدوده باندهای سبز و به ویژه باند قرمز بازتاب بسیار ضعیفی (کمتر از ۱۰ درصد) دارند، بنابراین می توان از این باندها برای برآورد و بررسی پهنه های گلی و جزر و مدی که فاقد شفافیت هستند، استفاده نمود (Lacaux et al., 2007: 68). این شاخص با استفاده از رابطه ۵، قابل محاسبه است.

$$NDTI = \frac{(R - G)}{(R + G)} \quad \text{رابطه ۵}$$

شاخص LSWI: این شاخص با استفاده از باندهای مادون قرمز نزدیک و میانی مطابق رابطه ۶، محاسبه می شود. شاخص LSWI از عملکرد بالایی در شناسایی پیکسل های کلاس آب بر روی تصاویر ماهواره ای برخوردار است، به ویژه زمانی که پهنه های آبی با پوشش گیاهی ترکیب شده است و تمایز آنها از یکدیگر سخت می باشد.

$$LSWI = \frac{(B_{NIR} - B_{SWIR-1})}{(B_{NIR} + B_{SWIR+1})} \quad \text{رابطه ۶}$$

شاخص NDWI: از این شاخص برای استخراج پهنه های آبی از سایر پهنه های غیرآبی بر روی تصاویر ماهواره ای استفاده می شود. شاخص NDWI از باند سبز مرئی و باند مادون قرمز نزدیک برای بارزسازی پهنه های آبی و حذف پوشش های گیاهی و خاک استفاده می کند. دامنه تغییرات این شاخص بین +۱ و -۱ قرار دارد که هر چه ارزش پیکسل به +۱ نزدیک تر باشد نشان دهنده وجود پهنه های آبی و هر چه به -۱ نزدیک تر باشد حاکی از وجود پهنه های غیرآبی است. برای محاسبه این شاخص می توان از رابطه ۷، استفاده نمود (Zurmure et al., 2021: 7559). با توجه به این که در مطالعه حاضر، تصاویر مورد استفاده شامل مجموعه تصاویر ماهواره ای سنتینل ۲ می باشد، در رابطه زیر باند سبز مرئی معادل باند ۳ و باند مادون قرمز نزدیک معادل باند ۸ است.

$$NDWI = \frac{(B3 - B8)}{(B3 + B8)} \quad \text{رابطه ۷}$$

^۱ . Normalized Difference Vegetation Index (NDVI)

^۲ . Normalized Difference Turbidity Index (NDTI)

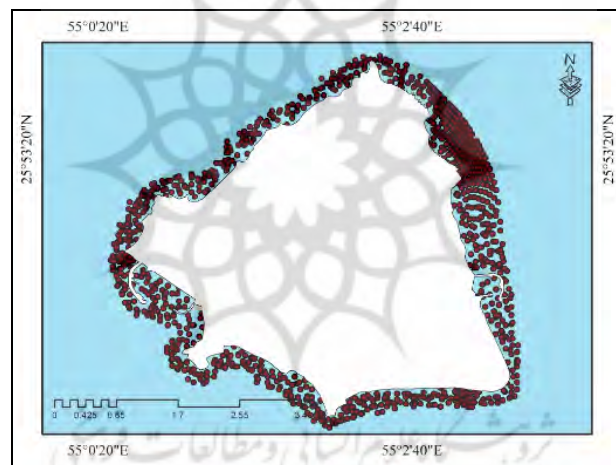
^۳ . Land Surface Water Index (LSWI)

^۴ . Normalized Difference Water Index (NDWI)

^۵ . Huang

۴.۴. انتخاب نقاط آموزشی

پس از تهیه خروجی نسبت باند آبی به سبز (B/G) و اعمال مجموعه شاخص‌های طیفی آب، به نمونه‌برداری ۱۵۰۰ نقطه به صورت تصادفی، جهت آموزش و نمونه آزمایشی برای طبقه‌بندی اقدام شد و سپس یک مدل رگرسیون خطی بر روی آن اعمال گردید، که از این مجموعه نقاط، ۱۰۰۰ نمونه برای آموزش و ۵۰۰ نمونه برای آزمایش طبقه‌بندی و مورد انتخاب قرار گرفت (شکل ۲). بدین ترتیب، مقدار عددی پیکسل‌های متناظر نقاط انتخاب شده، از ۴ باند ۱۰ متری تصویر سنتینل ۲ استخراج و بررسی گردید. لازم به ذکر است که در مطالعه حاضر به اعتبارسنجی نتایج به دست آمده با نقاط عمق‌سنجی اندازه‌گیری شده در طرح مدیریت یکپارچه مناطق ساحلی ICZM^۱ نیز پرداخته شده است. مدیریت یکپارچه مناطق ساحلی، فرایندی خاص با اهداف پویا و پیچیده برای برنامه‌ریزی در مناطق ساحلی-دریایی می‌باشد. هدف از تهیه طرح مدیریت یکپارچه مناطق ساحلی، ایجاد توازن میان منافع حاصل از توسعه اقتصادی و استفاده انسان از سواحل، حفاظت، نگهداری و بازسازی سواحل، به حداقل رسانیدن خسارات جانی و مالی در سواحل و منافع مترتب بر دسترسی و بهره‌گیری همگانی از سواحل است که به توسعه پایدار در استفاده‌های چندگانه از مناطق ساحلی و حفظ فرآیندهای حیاتی اکولوژیک، سیستم‌های حمایت کننده از حیات و تنوع زیستی در مناطق ساحلی منجر می‌شود. با توجه به این که مطالعات میدانی مستلزم زمان و هزینه‌ای بالا می‌باشد از این رو در مطالعه حاضر از داده‌های عمق‌سنجی اندازه‌گیری شده در طرح ICZM توسط سازمان بنادر و دریانوردی طی مطالعات میدانی صورت گرفته و داده‌های ثبت شده در قالب نقاط عمق سنجی و داده‌ها CD^۲ پایین تر از تراز جزر استفاده گردید تا از این طریق صحت نتایج بدست آمده مورد سنجش قرار گیرد.



شکل ۲. نقشه نقاط آموزشی نمونه برداری شده

۴.۵. داده‌های جزر و مدی

به منظور تهیه نقشه عمق‌سنجی در نقطه مبنا، لحاظ کردن اطلاعات جزر و مد در هنگام گرفتن تصویر و همچنین در طول نمونه‌برداری داده‌ها امری ضروری و بسیار مهم است (Bird et al., 2017:9; Bastos et al., 2018: 228). بنابراین در مطالعه حاضر، با توجه به اطلاعات موجود از سازمان دریاها و بنادر (طرح ICZM) به بررسی و اصلاح اعماق اندازه‌گیری شده در مطالعات میدانی و پایین‌ترین جزر و مد نجومی پرداخته شد و این فرایند در زمان گرفتن تصاویر ماهواره‌ای نیز مورد توجه قرار گرفت.

زمان ثبت بر اساس زاویه آزیموت خورشیدی موجود بر روی تصویر، تخمین زده می‌شود. بدین ترتیب، پس از به دست آوردن زمان تخمینی ثبت برای هر تصویر، اصلاح جزر و مد برای موقعیت خط ساحلی استخراج شده از تصویر نیز اجرا می‌شود. در حقیقت مقدار اصلاح جزر و مد ضربی از اختلاف سطح آب در لحظه گرفتن و میانگین سطح دریا (MSL) با شیب ساحل

^۱ -Integrated Coastal Zone Management

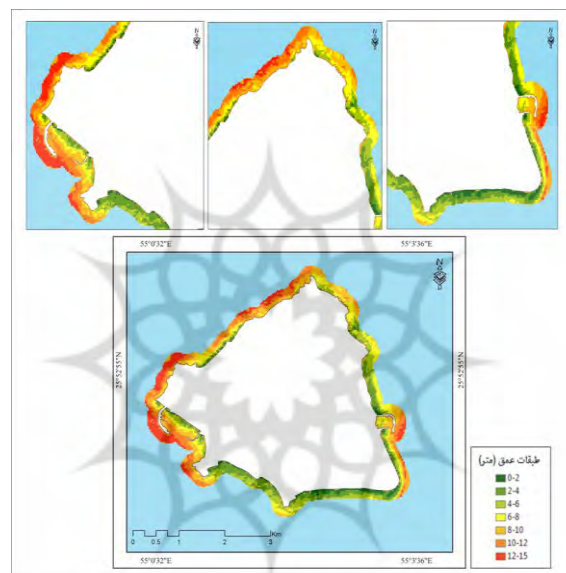
^۲ -Chart Datum

^۳ - Mean Sea Level

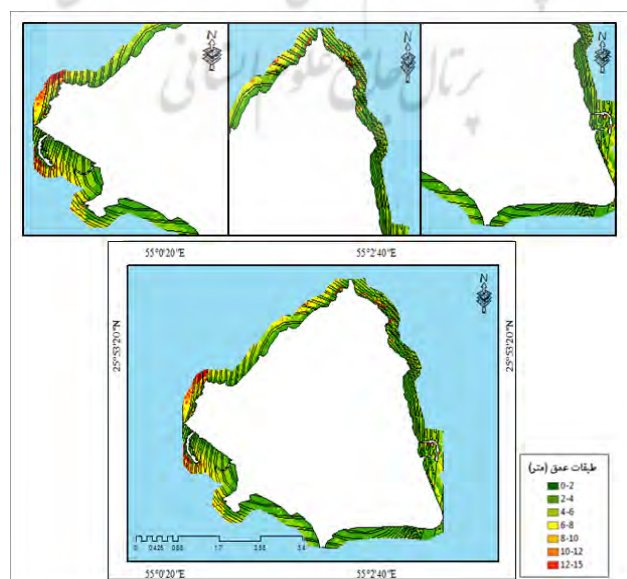
است. بدین ترتیب در مرحله اول، ما سطح جزر و مد را نسبت به میانگین سطح دریا در منطقه مورد مطالعه با استفاده از اطلاعات جزر و مدی برآورد کردیم. سپس میانگین سطح دریا را نسبت به $Z = 0$ با استفاده از داده‌های موجود مورد بررسی قرار دادیم و در نهایت، Z جزر و مدی را از عمق کل آب کم کردیم و h تصحیح شده را به دست آوردیم (برآورد ارتفاع جزر و مد نسبت به میانگین سطح آب).

۵. یافته‌های پژوهش و بحث

مطابق نتایج به دست آمده، نقشه طبقات عمق سنجی جزیره بوموسی از ۰ تا ۱۵ متری با ضریب $R^2=0/96$ و $RMSE=1/11$ در خارج از زمان جزر و مد قابل مشاهده است (شکل ۳). همچنین در مطالعه حاضر، علاوه بر طبقه‌بندی نقاط عمق سنجی در خارج از زمان جزر و مد، به بررسی عمق محدوده مورد مطالعه در زمان جزر و مد آب نیز پرداخته شد (شکل ۴). بدین منظور ارتفاع جزر و مد نسبت به میانگین سطح آب دریا ($Z = 0$) برآورد گردید. نتایج حاصل شده نشان داد که، ضرایب R^2 و $RMSE$ به ترتیب در زمان جزر و مد $0/74$ و $2/3$ می‌باشند.



شکل ۳. نقشه طبقات عمق سنجی جزیره بوموسی (خارج از جزر و مد)

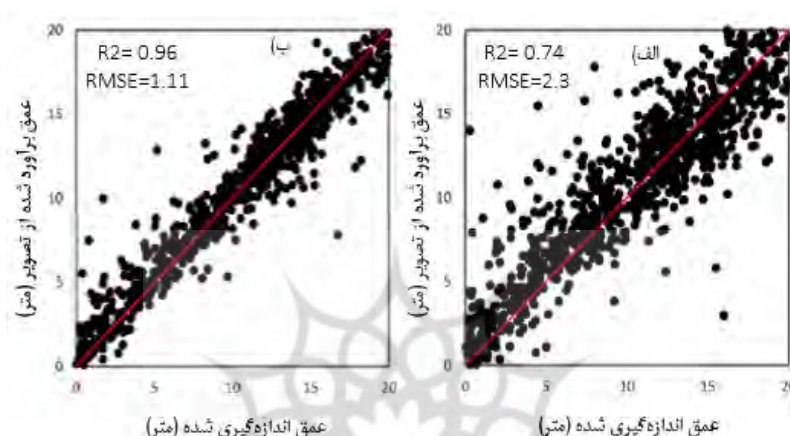


شکل ۴. نقشه طبقات عمق سنجی جزیره بوموسی (زمان جزر و مد)

در ادامه مطابق جدول ۲، به مقایسه نتایج عمق سنجی در دو وضعیت زمان جزر و مد و خارج از جزر و مد پرداخته شد. همان طور که نتایج نشان داد، میزان R^2 در زمان جزر و مد کاهش و مقادیر RMSE و بایاس در طی فرایند عمق سنجی افزایش یافته است (شکل ۵). بدین ترتیب عمق برآورد شده در زمان جزر و مد در مقایسه با خارج از زمان جزر و مد، دقت کمی دارد.

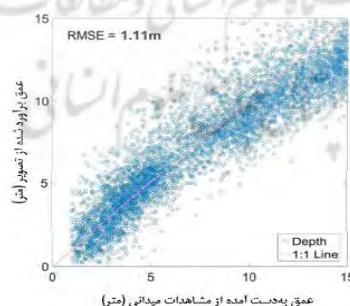
جدول ۲. مقایسه نتایج عمق سنجی جزیره بوموسی در زمان جزر و مد و خارج از جزر و مد

عمق سنجی	RMSE	R^2	Mean normalized bias (MNB)
جزر و مد	۲/۳	۰/۷۴	۰/۱۷
خارج از جزر و مد	۱/۱۱	۰/۹۶	-۰/۲۰



شکل ۵. مقایسه عمق سنجی: (الف) در زمان جزر و مد و (ب) خارج از زمان جزر و مد

در ادامه به منظور سنجش میزان دقت نتایج به دست آمده، هیستوگرام مربوط به اختلاف بین مقادیر عمق برآورد شده و نقاط عمق اندازه گیری شده (داده های میدانی) نیز مورد بررسی قرار گرفت (شکل ۶). همان طور که نتایج نشان داد، همبستگی بالایی بین عمق برآورد شده و نمونه های عمق اندازه گیری شده از داده های میدانی وجود دارد و با توجه به $RMSE = 1/11$ به دست آمده، اکثر نقاط از خط ۱:۱ پیروی می کنند.



شکل ۶. اعتبار سنجی عمق برآورد شده با استفاده از نقاط اندازه گیری شده

در این راستا تراگانوس^۱ و همکاران (۲۰۱۸) و لی و همکاران (۲۰۱۹) نیز از تکنیک عمق سنجی تجربی در مطالعات مناطق کم عمق ساحلی استفاده نمودند. آن ها بیان کردند که روش های تجربی عمق سنجی به باندهای خاصی در طول موج مرئی نیاز دارند که باندهای ۲ و ۳ (طول موج های آبی و سبز) به عنوان متغیرهای مستقل و تنها ورودی های خطی ساده یا چندگانه، بیشترین کاربرد را در فرایند عمق سنجی در یک منطقه معین دارند.

¹. Traganos

همان‌طور که نتایج نشان داد، در جزیره بوموسی طبقه‌بندی نقاط عمق‌سنجی در زمان جزر و مد دارای ضرایب همبستگی و خطای $R^2=0/74$ و $RMSE=2/3$ و در خارج از زمان جزر و مد $R^2=0/96$ و $RMSE=1/11$ می‌باشد. نتایج به‌دست آمده حاکی از آن است که میزان دقت عمق‌سنجی به‌دلیل اثرات جزر و مد در این جزیره کاهش یافته است. این بدین معنا است که به‌دلیل وجود ستون آب کم‌عمق در مناطق جزر و مدی، نمی‌توان به درستی رابطه بین نسبت لگاریتم و عمق آب را ارزیابی کرد، زیرا همبستگی کافی در بین داده‌های مورد استفاده برای تعریف رابطه لگاریتم/عمق وجود ندارد که نتیجه آن کاهش ضریب همبستگی بین نسبت نوار سبز/آبی و عمق آب در ناحیه جزر و مدی (طی کالیبراسیون تکنیک عمق‌سنجی تجربی) است. در این راستا نتایج به‌دست آمده در این مطالعه، توسط مطالعات بوئه^۱ و همکاران (۲۰۲۰) و فرانس^۲ و همکاران (۲۰۲۲) نیز مورد تأیید قرار گرفت. آن‌ها بیان کردند که استخراج نقشه‌های عمق‌سنجی بدون در نظر گرفتن زمان جزر و مد از دقت و صحت کافی برخوردار نمی‌باشد و این عامل باید به‌عنوان یکی از پارامترهای محدودکننده در فرایند عمق‌سنجی، مورد بررسی و تحلیل قرار گیرد. در مطالعه‌ای دیگر، فیتون^۳ و همکاران (۲۰۲۱)، به مطالعه عمق‌سنجی در مناطق جزر و مدی با استفاده از تکنیک‌های سنجش از راه دور پرداختند. نتایج آن‌ها نشان داد که اثرات جزر و مدی طیف وسیعی از عمق سواحل را تحت تأثیر قرار می‌دهد و می‌تواند نقش مهمی در سختی بررسی منظم و تهیه نقشه عمق‌سنجی در این مناطق داشته باشد. همچنین رهنمای^۴ و همکاران (۲۰۱۹)، در مطالعه آب‌های ورودی و خروجی خلیج فارس به نقش مهم جزر و مد در نوسانات آب این منطقه اشاره کردند. لپر^۵ و همکاران (۲۰۲۴)، بیان کردند که میزان دقت عمق‌سنجی و ثبات اندازه‌گیری آن وابسته به نوسانات جزر و مدی در نواحی ساحلی می‌باشد. همچنین نتایج مطالعه گو^۶ و همکاران (۲۰۲۳)، نشان داد که زمان جزر و مد بر روی تغییرات خط ساحلی و عمق‌سنجی در سواحل ژجیانگ مؤثر است و به‌طور تهدیدآمیزی منجر به وقوع سیلاب در این منطقه شده است.

علاوه براین، نتایج اعتبارسنجی نقاط عمق اندازه‌گیری شده و نقاط عمق برآورد شده، نشان داد که همبستگی بالایی بین این نقاط وجود دارد و همچنین با توجه به ضرایب R^2 و $RMSE$ به‌دست آمده، اکثر نقاط از خط ۱:۱ پیروی می‌کنند که این نتایج حاکی از دقت بالای تصاویر ماهواره‌ای سنتینل ۲ و مجموعه پیش‌پردازش‌های صورت گرفته در فرایند عمق‌سنجی تجربی در مناطق کم‌عمق ساحلی است. همچنین، این تکنیک با توجه به کم بودن تعداد پارامترهای مورد بررسی، از انعطاف‌پذیری بالایی نسبت به تغییرات بستر برخوردار است و برخلاف سایر روش‌ها و مدل‌ها مستلزم دسترسی به داده‌های انعکاس آب‌های عمیق نمی‌باشد و از این‌رو می‌تواند به‌عنوان روشی کارآمد در فرایند عمق‌سنجی در سایر جزایر و مناطق کم‌عمق ساحلی هدف مورد استفاده قرار گیرد. نتایج مطالعه نجار^۷ و همکاران (۲۰۲۲) نیز نشان داد که ابزار سنجش از راه دور اخیراً به عنوان منابع داده قابل اعتماد و ارزیابی ظاهر شده‌اند که می‌توانند برای تخمین عمق‌سنجی با استفاده از مدل‌های وارونگی عمق استفاده شوند. ویانا بورجا^۸ و همکاران (۲۰۲۴) بیان کردند که داده‌های عمق‌سنجی برای درک دینامیک ساحلی ضروری هستند، با این حال روش‌های سنتی جمع‌آوری داده‌ها اغلب توسط چالش‌های لجستیکی و هزینه‌های بالا محدود می‌شوند. از این‌رو، در مطالعات عمق‌سنجی، به‌کارگیری تصاویر طیفی چندگانه و همزمان با شرایط جزر و مد پایین (LT) و بالا (HT) از اهمیت بالایی برخوردار است.

۶. نتیجه‌گیری

در مطالعه حاضر، تصاویر سنتینل ۲ در سامانه GEE برای استخراج داده‌های عمق‌سنجی در جزیره بوموسی مورد ارزیابی قرار گرفت. تکنیک به‌کار گرفته شده شامل عمق‌سنجی تجربی آب با توجه به مجموعه عوامل محدودکننده‌ای همچون اثرات

^۱. Bué

^۲. France

^۳. Fitton

^۴. Rahnemania

^۵. Lepper

^۶. Gou

^۷. Najar

^۸. Viana-Borja

اتمسفری (مه، ذرات معلق در هوا و ابرها)، انعکاس سطح آب (تابش خورشید و بازتاب اتمسفری) و ستون آب (مانند رسوب‌گذاری، کدورت و جزر و مد) بر عمق‌سنجی در مناطق کم‌عمق ساحلی می‌باشد. بنابراین، مجموعه‌ای از شاخص‌های طیفی (NDWI، LSWI، NDTI، NDVI) برای برطرف کردن عوامل محدودکننده ذکر شده و همچنین پیش‌پردازش‌هایی جهت حذف اثرات بازتاب سطحی برای تخمین دقیق عمق‌سنجی در این منطقه به‌کار گرفته شد. در حقیقت بیشترین تمرکز ما بر روی روش‌های تجربی حاصل از روابط آماری خطی یا مبتنی بر نسبت بین باندهای نفوذی آب (طول موج‌های آبی و سبز با بیشترین نفوذ) و داده‌های عمقی به‌دست آمده از مناطق کم‌عمق ساحلی بوده است. به‌طور کلی، فرایند عمق‌سنجی با استفاده از تصاویر ماهواره‌ای به‌دلیل کارایی بالا و هزینه کم، چشم‌انداز گسترده‌ای را در مناطق کم‌عمق ساحلی فراهم کرده است. از طرفی تصحیحات بازتاب اتمسفری و عمق‌سنجی تجربی آب فرایندهای مهمی می‌باشند که بررسی عملکرد مدل‌های مورد سنجش در فرایند عمق‌سنجی در مناطق کم‌عمق ساحلی را قابل اطمینان‌تر می‌سازند. براین اساس، تکنیک‌های سنجش از راه دور و مدل‌های عمق‌سنجی ماهواره‌ای روش مناسبی برای برآورد عمق با وضوح فضایی بالا و پوششی گسترده در سطح جزایر و به‌ویژه مناطق کم‌عمق ساحلی است. در این راستا پیشنهاد می‌شود که در بررسی عمق‌سنجی از سایر الگوریتم‌ها و روش‌ها خودکار نیز استفاده شود. علاوه براین، داده‌های موجود از محل مانند چارت‌های دریایی، می‌توانند برای بازیابی عمق‌سنجی دقیق با توسعه روش‌های کارآمد و مؤثر که می‌توانند در محیط‌های مختلف تکرار شوند، استفاده گردد. مطالعات آتی باید در جهت بهبود دقت نتایج شامل افزودن تصاویری با کیفیت بالا از منابع دیگر، یکپارچه‌سازی و بهبود روش‌های عمق‌سنجی و بهینه‌سازی فرایند ادغام مانند انتخاب پیکسل و برازش آن‌ها صورت گیرد. از طرفی اختلاف ناشی از فصول و تغییرات ناشی از جریان‌های دریایی، رشد و تکثیر جلبک‌ها و فیتوپلانکتون‌ها را در سطح گسترده و در مناطقی با عمق‌های مختلف، تحت تأثیر قرار می‌دهد و می‌تواند بر مقدار تابش‌های ورودی به سنجنده نیز اثر گذارد، که این امر مستلزم مطالعات و بررسی‌های بیشتر در این زمینه است. همچنین در فرایند عمق‌سنجی داشتن اطلاعاتی جامع از جنس و مدل‌سازی بستر در آنالیز طیفی داده‌های فضایی، می‌تواند به بهبود نتایج دقیق حاصل از عمق‌سنجی کمک نماید.

در نهایت مدل‌سازی جزر و مد و امواج‌های دریایی با استفاده از درونیایی مجموعه خطوط آبی و تصاویر ماهواره‌ای چندطیفی می‌تواند تا حد زیادی محدودیت‌های ناشی از امواج دریایی و جزر و مد را در فرایند عمق‌سنجی مناطق کم‌عمق ساحلی کاهش داده و مورد بررسی قرار گیرد.

۷. حامیان پژوهش

این پژوهش با همکاری و کمک مالی مرکز مطالعات و پژوهش‌های تخصصی دریایی مددانش تکمیل شده است.

۸. مشارکت نویسندگان

نویسندگان در تمام مراحل و بخش‌های انجام شده سهم برابر داشته‌اند.

۹. تعارض منافع

نویسندگان اعلام می‌کنند که هیچ گونه تضاد منافی ندارند.

۱۰. تقدیر و تشکر

نویسندگان بدینوسیله از مرکز مطالعات و پژوهش‌های تخصصی دریایی مددانش که در انجام این پژوهش یاری رسانده است قدردانی می‌نمایند.

منابع

- امینی، لیلا. (۱۳۹۷). عمق‌سنجی از نواحی کم عمق ساحلی با استفاده از داده‌های سنجش از دور (مطالعه موردی: جنوب شرقی دریای خزر). پایان نامه کارشناسی ارشد، رشته سنجش از دور و سیستم اطلاعات جغرافیایی، دانشکده جغرافیا، دانشگاه تهران، صص ۱-۱۴۳.
- امینی، لیلا، و عبدالهی کاکرودی، عطاله. (۱۳۹۷). عمق‌سنجی از نواحی کم عمق ساحلی با استفاده از تصاویر لندست-۸ به طریق آموزش شبکه عصبی (مطالعه موردی: جنوب شرقی دریای خزر). پژوهش‌های ژئومورفولوژی کمی، ۷ (۳)، صص ۲۱۶-۲۳۰.
- فارسی، حمید. (۱۳۹۷). تهیه نقشه عمق‌سنجی نواحی ساحلی با استفاده از تصاویر ماهواره‌ای. پایان نامه کارشناسی ارشد، رشته مهندسی نقشه‌برداری (گرایش ژئودزی-هیدروگرافی)، پردیس دانشکده مهندسی نقشه‌برداری و اطلاعات مکانی، دانشگاه تهران، صص ۱-۱۰۸.
- کریمی، نعمت‌اله، بحرینی مطلق، مسعود، فرخ نیا، اشکان، روزبهانی، رضا، و بنی هاشمی، سیده معصومه. (۱۴۰۰). استخراج نقشه عمق‌سنجی سواحل دریای خزر با استفاده از داده‌های ماهواره‌ای. مهندسی دریا، ۱۷ (۱۳۴)، صص ۱-۱۱.
- Ashphaq, M., Srivastava, P. K., and Mitra, D. (2021). Review of near-shore satellite derived bathymetry: Classification and account of five decades of coastal bathymetry research. *Journal of Ocean Engineering and Science*, 6(4), 340-359.
- Bastos, A. P., Lira, C. P., Calvão, J., Catalão, J., Andrade, C., Pereira, A. J., and Correia, O. (2018). UAV derived information applied to the study of slow-changing morphology in dune systems. *Journal of Coastal Research*, (85), 226-230.
- Bué, I., Catalão, J., and Semedo, Á. (2020). Intertidal bathymetry extraction with multispectral images: A logistic regression approach. *Remote Sensing*, 12(8), 1311.
- Bird, C. O., Bell, P. S., and Plater, A. J. (2017). Application of marine radar to monitoring seasonal and event-based changes in intertidal morphology. *Geomorphology*, 285, 1-15.
- Caballero, I., and Stumpf, R. P. (2020). Towards routine mapping of shallow bathymetry in environments with variable turbidity: Contribution of Sentinel-2A/B satellites mission. *Remote Sensing*, 12(3), 451.
- Casal, G., Monteys, X., Hedley, J., Harris, P., Cahalane, C., and McCarthy, T. (2019). Assessment of empirical algorithms for bathymetry extraction using Sentinel-2 data. *International Journal of Remote Sensing*, 40(8), 2855-2879.
- Duan, H., Zhang, H., Huang, Q., Zhang, Y., Hu, M., Niu, Y., and Zhu, J. (2016). Characterization and environmental impact analysis of sea land reclamation activities in China. *Ocean & Coastal Management*, 130, 128-137.
- Duan, Z., Chu, S., Cheng, L., Ji, C., Li, M., and Shen, W. (2022). Satellite-derived bathymetry using Landsat-8 and Sentinel-2A images: Assessment of atmospheric correction algorithms and depth derivation models in shallow waters. *Optics Express*, 30(3), 3238-3261.
- Fitton, J. M., Rennie, A. F., Hansom, J. D., and Muir, F. M. (2021). Remotely sensed mapping of the intertidal zone: A Sentinel-2 and Google Earth Engine methodology. *Remote Sensing Applications: Society and Environment*, 22, 100499.
- France, F. H., Cobac, Y., Suanez, S., Ledantec, N., Chataigner, T., Yates, M., and Ammann, J. (2022). Tidal influence on the littoral drift of a beach with complex bathymetry: example of the Vougot beach, Guissény (France). In *XVIIèmes Journées Nationales Génie Côtier-Génie Civil* (pp. 49-56).
- Huang, B., Hu, X.P., Fuglstad, G.A., Zhou, X., Zhao, W.W. and Cherubini, F. (2020). Predominant regional biophysical cooling from recent land cover changes in Europe. *Nat. Commun.* 11, 1-13.
- Jagalingam, P., Akshaya, B. J., & Hegde, A. V., (2015). Bathymetry mapping using Landsat 8 satellite imagery. *Procedia Engineering*, 116, 560-566.
- Gou, X., Liang, H., Cai, T., Wang, X., Chen, Y., & Xia, X. (2023). The Impact of Coastline and Bathymetry Changes on the Storm Tides in Zhejiang Coasts. *Journal of Marine Science and Engineering*, 11(9), 1832.
- Karimi, N., Bagheri, M. H., Hooshyaripor, F., Farokhnia, A., and Sheshangosht, S. (2016). Deriving and evaluating bathymetry maps and stage curves for shallow lakes using remote sensing data. *Water Resources Management*, 30(14), 5003-5020.
- Kutser, T., Hedley, J., Giardino, C., Roelfsema, C., and Brando, V. E. (2020). Remote sensing of shallow waters—A 50 year retrospective and future directions. *Remote Sensing of Environment*, 240, 111619.

- Lacaux, J.P., Tourre, Y.M., Vignolles, C., Ndione, J.A. and Lafaye, M. (2007). Classification of ponds from high-spatial resolution remote sensing: application to Rift Valley Fever epidemics in Senegal. *Remote Sens. Environ*, 106, 66-74.
- Lepper, R., Jänicke, L., Hache, I., Jordan, C., & Kösters, F. (2024). Exploring the tidal response to bathymetry evolution and present-day sea level rise in a channel-shoal environment. *Ocean Science*, 20(3), 711-723.
- Li, J., Knapp, D. E., Lyons, M., Roelfsema, C., Phinn, S., Schill, S. R., and Asner, G. P. (2021). Automated global shallow water bathymetry mapping using Google Earth Engine. *Remote Sensing*, 13(8), 1469.
- Martin, S. (2014). An introduction to ocean remote sensing. *Cambridge University Press*. 1-56.
- Monteys, X., Harris, P., Caloca, S., & Cahalane, C. (2015). Spatial prediction of coastal bathymetry based on multispectral satellite imagery and multibeam data. *Remote Sensing*, 7(10), 13782-13806.
- Mudiyanselage, S. S. J. D., Abd-Elrahman, A., Wilkinson, B., and Lecours, V. (2022). Satellite-derived bathymetry using machine learning and optimal Sentinel-2 imagery in South-West Florida coastal waters. *GIScience & Remote Sensing*, 59(1), 1143-1158.
- Pacheco, A., Horta, J., Loureiro, C., and Ferreira, Ó. (2015). Retrieval of nearshore bathymetry from Landsat 8 images: A tool for coastal monitoring in shallow waters. *Remote Sensing of Environment*, 159, 102-116.
- Pope, A., Scambos, T. A., Moussavi, M., Tedesco, M., Willis, M., Shean, D., and Grigsby, S. (2016). Estimating supraglacial lake depth in West Greenland using Landsat 8 and comparison with other multispectral methods. *The Cryosphere*, 10(1), 15-27.
- Rahneamani, A., Bidokhti, A. A., Ezam, M., Lari, K., and Ghader, S. (2019). A numerical study of the frontal system between the inflow and outflow waters in the Persian Gulf. *Journal of Applied Fluid Mechanics*, 12(5), 1475-1486.
- Roelfsema, C., Kovacs, E., Ortiz, J. C., Wolff, N. H., Callaghan, D., Wettle, M., and Phinn, S. (2018). Coral reef habitat mapping: A combination of object-based image analysis and ecological modelling. *Remote Sensing of Environment*, 208, 27-41.
- Razzak, M. T., Mateo-García, G., Lecuyer, G., Gómez-Chova, L., Gal, Y., and Kalaitzis, F. (2023). Multi-spectral multi-image super-resolution of Sentinel-2 with radiometric consistency losses and its effect on building delineation. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 195, 1-13.
- Stumpf, R. P., Holderied, K., and Sinclair, M. (2003). Determination of water depth with high-resolution satellite imagery over variable bottom types. *Limnology and Oceanography*, 48(1part2), 547-556.
- Shimu, S., Aktar, M., Afjal, M., Nitu, A., Uddin, M. and Al Mamun, M. (2019). NDVI -based change detection in Sundarban Mangrove Forest using remote sensing data. In Proceedings of the 2019 4th International Conference on Electrical Information and Communication Technology (EICT), Khulna, Bangladesh, 1-5.
- Traganos, D., Poursanidis, D., Aggarwal, B., Chrysoulakis, N., and Reinartz, P. (2018). Estimating satellite-derived bathymetry (SDB) with the google earth engine and sentinel-2. *Remote Sensing*, 10(6), 859.
- Viaña-Borja, S. P., Fernández-Mora, A., Stumpf, R. P., Navarro, G., and Caballero, I. (2023). Semi-automated bathymetry using Sentinel-2 for coastal monitoring in the Western Mediterranean. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, 120, 103328.
- Zurmure, N., Sawant, S., Shindikar, M. and Lele, N. (2021). Mapping the spatio-temporal changes in mangrove vegetation along Thane Creek, India. In Proceedings of the 2021 IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium IGARSS, Brussels, Belgium, 7557-7560.

References

- Amini, L. (2018). Bathymetry of shallow coastal areas using remote sensing data (case study: Southeast Caspian Sea). Master's Thesis, Remote Sensing and Geographical Information System, Faculty of Geography, University of Tehran, pp. 143-1. [In Persian]
- Amini, L., and Abdulahi Kakarodi, A. A. (2018). Bathymetry of shallow coastal areas using Landsat-8 images through neural network training (case study: Southeast Caspian Sea). *Quantitative Geomorphology Research*, 7 (3), 216-230. [In Persian]
- Ashphaq, M., Srivastava, P. K., and Mitra, D. (2021). Review of near-shore satellite derived bathymetry: Classification and account of five decades of coastal bathymetry research. *Journal of Ocean Engineering and Science*, 6(4), 340-359.
- Bastos, A. P., Lira, C. P., Calvão, J., Catalão, J., Andrade, C., Pereira, A. J., and Correia, O. (2018). UAV derived information applied to the study of slow-changing morphology in dune systems. *Journal of Coastal Research*, (85), 226-230.

- Bird, C. O., Bell, P. S., and Plater, A. J. (2017). Application of marine radar to monitoring seasonal and event-based changes in intertidal morphology. *Geomorphology*, 285, 1-15.
- Bué, I., Catalão, J., and Semedo, Á. (2020). Intertidal bathymetry extraction with multispectral images: A logistic regression approach. *Remote Sensing*, 12(8), 1311.
- Caballero, I., and Stumpf, R. P. (2020). Towards routine mapping of shallow bathymetry in environments with variable turbidity: Contribution of Sentinel-2A/B satellites mission. *Remote Sensing*, 12(3), 451.
- Casal, G., Monteys, X., Hedley, J., Harris, P., Cahalane, C., and McCarthy, T. (2019). Assessment of empirical algorithms for bathymetry extraction using Sentinel-2 data. *International Journal of Remote Sensing*, 40(8), 2855-2879.
- Duan, H., Zhang, H., Huang, Q., Zhang, Y., Hu, M., Niu, Y., and Zhu, J. (2016). Characterization and environmental impact analysis of sea land reclamation activities in China. *Ocean & Coastal Management*, 130, 128-137.
- Duan, Z., Chu, S., Cheng, L., Ji, C., Li, M., and Shen, W. (2022). Satellite-derived bathymetry using Landsat-8 and Sentinel-2A images: Assessment of atmospheric correction algorithms and depth derivation models in shallow waters. *Optics Express*, 30(3), 3238-3261.
- Farsi, H. (2018). Preparation of bathymetry map of coastal areas using satellite images. Master's thesis, field of mapping engineering (geodesy-hydrography trend), Faculty of Mapping and Geospatial Information Engineering, *University of Tehran*, pp. 108-1. [In Persian]
- Fitton, J. M., Rennie, A. F., Hansom, J. D., and Muir, F. M. (2021). Remotely sensed mapping of the intertidal zone: A Sentinel-2 and Google Earth Engine methodology. *Remote Sensing Applications: Society and Environment*, 22, 100499.
- France, F. H., Cobac, Y., Suanez, S., Ledantec, N., Chataigner, T., Yates, M., and Ammann, J. (2022). Tidal influence on the littoral drift of a beach with complex bathymetry: example of the Vougot beach, Guissey (France). In *XVIIèmes Journées Nationales Génie Côtier–Génie Civil* (pp. 49-56).
- Huang, B., Hu, X.P., Fuglstad, G.A., Zhou, X., Zhao, W.W. and Cherubini, F. (2020). *Predominant regional biophysical cooling from recent land cover changes in Europe*. *Nat. Commun.* 11, 1–13.
- Jagalingam, P., Akshaya, B. J., & Hegde, A. V., 2015. Bathymetry mapping using Landsat 8 satellite imagery. *Procedia Engineering*, 116, 560-566.
- Karimi, N. A., Bahreini Mutlaq, M., Farrokhnia, A., Rozbahani, R., and Bani Hashemi, S. M. (2021). Extraction of the bathymetric map of the Caspian Sea shores using satellite data. *Marine Engineering*, 17 (134), 1-11. [In Persian]
- Karimi, N., Bagheri, M. H., Hooshyaripor, F., Farokhnia, A., and Sheshangosht, S. (2016). Deriving and evaluating bathymetry maps and stage curves for shallow lakes using remote sensing data. *Water Resources Management*, 30(14), 5003-5020.
- Kutser, T., Hedley, J., Giardino, C., Roelfsema, C., and Brando, V. E. (2020). Remote sensing of shallow waters—A 50 year retrospective and future directions. *Remote Sensing of Environment*, 240, 111619.
- Lacaux, J.P., Tourre, Y.M., Vignolles, C., Ndione, J.A. and Lafaye, M. (2007). Classification of ponds from high-spatial resolution remote sensing: application to Rift Valley Fever epidemics in Senegal. *Remote Sens. Environ*, 106, 66–74.
- Li, J., Knapp, D. E., Lyons, M., Roelfsema, C., Phinn, S., Schill, S. R., and Asner, G. P. (2021). Automated global shallow water bathymetry mapping using Google Earth Engine. *Remote Sensing*, 13(8), 1469.
- Martin, S. (2014). An introduction to ocean remote sensing. *Cambridge University Press*. 1-56.
- Monteys, X., Harris, P., Caloca, S., & Cahalane, C. (2015). Spatial prediction of coastal bathymetry based on multispectral satellite imagery and multibeam data. *Remote Sensing*, 7(10), 13782-13806.
- Mudiyanselage, S. S. J. D., Abd-Elrahman, A., Wilkinson, B., and Lecours, V. (2022). Satellite-derived bathymetry using machine learning and optimal Sentinel-2 imagery in South-West Florida coastal waters. *GIScience & Remote Sensing*, 59(1), 1143-1158.
- Najar, M. A., Benshila, R., Bennioui, Y. E., Thoumyre, G., Almar, R., Bergsma, E. W., & Wilson, D. G. (2022). Coastal bathymetry estimation from Sentinel-2 satellite imagery: Comparing deep learning and physics-based approaches. *Remote Sensing*, 14(5), 1196.
- Pacheco, A., Horta, J., Loureiro, C., and Ferreira, Ó. (2015). Retrieval of nearshore bathymetry from Landsat 8 images: A tool for coastal monitoring in shallow waters. *Remote Sensing of Environment*, 159, 102-116.

- Pope, A., Scambos, T. A., Moussavi, M., Tedesco, M., Willis, M., Shean, D., and Grigsby, S. (2016). Estimating supraglacial lake depth in West Greenland using Landsat 8 and comparison with other multispectral methods. *The Cryosphere*, 10(1), 15-27.
- Rahnemania, A., Bidokhti, A. A., Ezam, M., Lari, K., and Ghader, S. (2019). A numerical study of the frontal system between the inflow and outflow waters in the Persian Gulf. *Journal of Applied Fluid Mechanics*, 12(5), 1475-1486.
- Razzak, M. T., Mateo-García, G., Lecuyer, G., Gómez-Chova, L., Gal, Y., and Kalaitzis, F. (2023). Multi-spectral multi-image super-resolution of Sentinel-2 with radiometric consistency losses and its effect on building delineation. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 195, 1-13.
- Roelfsema, C., Kovacs, E., Ortiz, J. C., Wolff, N. H., Callaghan, D., Wettle, M., and Phinn, S. (2018). Coral reef habitat mapping: A combination of object-based image analysis and ecological modelling. *Remote Sensing of Environment*, 208, 27-41.
- Shimu, S., Aktar, M., Afjal, M., Nitu, A., Uddin, M. and Al Mamun, M. (2019). NDVI -based change detection in Sundarban Mangrove Forest using remote sensing data. In Proceedings of the 2019 4th International Conference on Electrical Information and Communication Technology (EICT), Khulna, *Bangladesh*, 1-5.
- Stumpf, R. P., Holderied, K., and Sinclair, M. (2003). Determination of water depth with high-resolution satellite imagery over variable bottom types. *Limnology and Oceanography*, 48(1part2), 547-556.
- Traganos, D., Poursanidis, D., Aggarwal, B., Chrysoulakis, N., and Reinartz, P. (2018). Estimating satellite-derived bathymetry (SDB) with the google earth engine and sentinel-2. *Remote Sensing*, 10(6), 859.
- Viaña-Borja, S. P., Fernández-Mora, A., Stumpf, R. P., Navarro, G., and Caballero, I. (2023). Semi-automated bathymetry using Sentinel-2 for coastal monitoring in the Western Mediterranean. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, 120, 103328.
- Zurmure, N., Sawant, S., Shindikar, M. and Lele, N. (2021). Mapping the spatio-temporal changes in mangrove vegetation along Thane Creek, India. In Proceedings of the 2021 IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium IGARSS, *Brussels, Belgium*, 7557-7560.

نحوه استناد به این مقاله:

سبحانی، پروانه و مجیدی نیک، مهیار (۱۴۰۴). عمق سنجی در جزیره بوموسی با استفاده از تکنیک های سنجش از دور. *مطالعات جغرافیایی نواحی ساحلی*، ۶ (۱)، ۶۳-۷۷.

DOI: 10.22124/GSCAJ.2025.26528.1288

Copyrights:

Copyright for this article are retained by the author(s), with publication rights granted to *Geographical studies of Coastal Areas Journal*. This is an open-access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution License (<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0>), which permits unrestricted use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

