

Research Paper



Comparative Analysis of Water Level Extraction Methods for Gorgan Bay and Its Monitoring Using Multi-Temporal Satellite Data



Hamid Amoonnia^{1*}, Mohammadreza Yousefi Roshan², Mohammad Daymevar³

1. Assistant Professor, Department of Geography Education, Farhangian University, Tehran, Iran. h.amoonia@cfu.ac.ir.
2. Assistant Professor, Department of Geography Education, Farhangian University, Tehran, Iran. mr.yousefiroshan@cfu.ac.ir.
3. Academic Instructor, Department of Science Education, Farhangian University, Tehran, Iran. daymevarm@cfu.ac.ir.

Keywords

Water Level Changes, spectral water indices, Satellite Data, Landsat Imagery ,Gorgan Bay.

Received: 2024/06/15

Accepted: 2024/08/17

Published: 2025/01/19

ABSTRACT

Introduction

Gorgan Bay, one of the most important northern wetlands of Iran, is highly sensitive to water level fluctuations due to its unique geographical location on the Caspian Sea coast and its position in the low-altitude region of the continental shelf. Fluctuations in the Caspian Sea water level throughout history, and especially in recent periods, have had significant consequences for Gorgan Bay. Some researchers, considering the scenarios of predicted water level changes in Gorgan Bay and the construction of dams and diversion canals, consider the drying up of Gorgan Bay to be likely. In recent years, the country's wetlands have been severely affected by various factors leading to a decrease in their level and depth. This has raised many concerns and has made the need for necessary measures to conserve and restore these wetlands more apparent than ever. This study was conducted with the aim of monitoring water level changes in Gorgan Bay using satellite images and water spectral indices to provide more accurate information on the current status and trend of changes in this region.

*Corresponding Author: Hamid Amoonnia

E-mail: h.amoonia@cfu.ac.ir

How to cite this article: H;Amoonnia, M R; Yousefi Roshan, M; Daymevar (2025). Comparative Analysis of Water Level Extraction Methods for Gorgan Bay and Its Monitoring Using Multi-Temporal Satellite Data. *Hydrogeomorphology*, 11(41): 48–66.

DOI:10.22034/hyd.2024.62117.1743



Copyright © 2025 by the authors.

Publisher: University of Tabriz

Methodology

This study is a descriptive-analytical research that was conducted using Landsat 5 and 8 satellite images collected in four different time periods (1990, 2000, 2010, and 2020). The spectral indices used include NDWI, MNDWI, AWEI, and NDPI, which were calculated using TerrSet2020 software. Satellite imagery data was obtained from the United States Geological Survey (USGS) with a spatial resolution of 30 meters. To more accurately evaluate and compare the results, statistical methods such as RMSE were used for error analysis. These methods allow for a detailed examination of water level changes over time and analysis of long-term trends. Using this data and detailed analysis, a better understanding of water level fluctuations in Gorgan Bay can be achieved.

Results and Discussion

The findings of this study indicate that the MNDWI index, with a mean root mean square error (RMSE) of 21/66, is the most accurate method for extracting water level from Landsat imagery. Data analysis shows that the water surface area of Gorgan Bay has undergone significant changes between 1990 and 2020. Between 1990 and 2000, there was an increase in water level of 2384 hectares, while between 2000 and 2010, a decrease of 1488 hectares was observed. The most significant decrease in water level occurred between 2010 and 2020, showing a remarkable decrease of 11080 hectares. This alarming decrease could be due to various factors, including reduced precipitation, increased evaporation, and human activities. The findings of this research emphasize the importance of continuous and accurate monitoring of Gorgan Bay water levels. Comparison of the results of this study with other similar studies shows that water spectral indices, especially MNDWI, are valuable tools for monitoring and managing water levels. The results of this study can help environmental managers and planners make better decisions to protect Gorgan Bay with more accurate and up-to-date information. Additionally, the use of satellite imagery and spectral indices can significantly improve the accuracy and efficiency of water level monitoring. The use of this data in future planning can help reduce environmental and economic damage.

Conclusions

This study demonstrates that the MNDWI index outperforms other methods for extracting water levels in Gorgan Bay and can serve as a scientific guide for managing and planning water level changes in this wetland. The research findings emphasize the need for continuous water level monitoring using satellite imagery and water spectral indices for the conservation and restoration of Gorgan Bay. This continuous monitoring can help in the rapid identification of changes and fluctuations and the implementation of appropriate management actions. The implications of this research can contribute to mitigating the environmental and economic damages caused by water level changes in Gorgan Bay. By utilizing accurate and scientific data, effective conservation and management plans can be implemented to preserve the region's biodiversity and economic value.

مقاله پژوهشی



بررسی تطبیقی روش‌های استخراج سطح آب خلیج گرگان و پایش تغییرات آن با استفاده از داده‌های ماهواره ای چند زمانه



حمید عمونیا^{۱*}، محمدرضا یوسفی روشن^۲، محمد دیمه ور^۳

۱- استادیار گروه آموزش جغرافیا، دانشگاه فرهنگیان، تهران، ایران. h.amoonia@cfu.ac.ir
 ۲- استادیار گروه آموزش جغرافیا، دانشگاه فرهنگیان، تهران، ایران. mr.yousefiroshan@cfu.ac.ir
 ۳- مربی گروه آموزش علوم تجربی، دانشگاه فرهنگیان، تهران، ایران. daymevarm@cfu.ac.ir

چکیده

خلیج گرگان، یکی از مهم‌ترین تالاب‌های شمالی ایران است که تغییرات سطح آب آن پیامدهای زیست‌محیطی متعددی برای مناطق اطراف دارد. مطالعه حاضر به بررسی تطبیقی تغییرات سطح آب خلیج گرگان با استفاده از شاخص‌های طیفی آب می‌پردازد. مطالعات گذشته، تغییرات سطح آب خلیج گرگان را قابل توجه نشان می‌دهند. این تغییرات باعث خسارات زیادی از نظر اکولوژیکی و اقتصادی شده است که نیاز مبرم به راهبردهای موثر در مدیریت را برجسته می‌سازد. در این پژوهش با استفاده از بررسی تطبیقی بین شاخص‌های طیفی سطح آب (NDWI، MNDWI، AWEI و NDPI) با کمک تصاویر لندست ۵ و ۸ برای پایش تغییرات سطح آب خلیج گرگان استفاده شده است. یافته‌های این پژوهش نشان می‌دهند که شاخص MNDWI با میانگین RMSE ۲۱/۶۶، دقیق‌ترین روش برای استخراج سطح آب از تصاویر لندست است. در خروجی شاخص MNDWI مساحت سطح آب استخراج‌شده برای سال‌های (۱۹۹۰، ۲۰۰۰، ۲۰۱۰ و ۲۰۲۰) افزایش ۲۳۸۴ هکتاری بین ۱۹۹۰ تا ۲۰۰۰، کاهش ۱۴۸۸ هکتاری بین ۲۰۰۰ تا ۲۰۱۰ و کاهش ۱۱۰۸۰ هکتاری بین ۲۰۱۰ تا ۲۰۲۰ مشاهده می‌شود. کاهش نگران‌کننده ۱۱۰۸۰ هکتاری سطح آب بین سال‌های ۲۰۱۰ تا ۲۰۲۰، بر ضرورت تلاش‌های بیشتر برای پایش و مدیریت سطح آب خلیج گرگان تأکید می‌کند. این مطالعه بر پتانسیل تصاویر ماهواره‌ای و شاخص‌های طیفی آب، به‌ویژه شاخص MNDWI، به عنوان ابزارهای ارزشمند برای پایش و مدیریت مؤثر سطح آب در خلیج گرگان تأکید می‌کند. نهایتاً، نتایج این پژوهش می‌تواند به عنوان یک راهنمای علمی برای مدیریت و برنامه‌ریزی تغییرات مساحت سطح آب خلیج گرگان مورد استفاده قرار گیرد.

کلیدواژه‌ها

تغییرات سطح آب، شاخص طیفی آب، داده‌های ماهواره ای، تصاویر لندست، خلیج گرگان.

تاریخ دریافت: ۱۴۰۳/۰۳/۲۶

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۳/۰۵/۲۷

تاریخ انتشار: ۱۴۰۳/۱۰/۳۰

ارجاع به این مقاله: عمونیا، حمید؛ یوسفی روشن، محمدرضا؛ دیمه ور، محمد (۱۴۰۳). بررسی تطبیقی روش‌های استخراج سطح آب خلیج گرگان و پایش تغییرات آن با استفاده از داده‌های ماهواره ای چند زمانه. هیدروژئومورفولوژی، ۱۱ (۴۱): ۶۶ - ۴۸.

* نویسنده مسئول: حمید عمونیا

رایانامه: h.amoonia@cfu.ac.ir

شناسه دیجیتال مقاله DOI:10.22034/hyd.2024.62117.1743



Copyright: © 2025 by the authors.

Publisher: University of Tabriz

تغییرات زمانی و مکانی سطح آب، به خصوص سطوح دریاها و دریاچه‌ها، با تغییرات در ارتفاع و مساحت آنها نمایان می‌گردد. در سال‌های اخیر، تغییرات تراز آب دریاچه‌ها نشان‌دهنده حساسیت بالای این پدیده‌های ژئومورفولوژیک، به شرایط محیطی بوده است (دسترنج، توکلی و سلطانی‌پور، ۲۰۱۸: ۱۵۰). خلیج گرگان، یکی از مهم‌ترین تالاب‌های شمالی ایران، به دلیل موقعیت جغرافیایی خاص خود در حاشیه دریای خزر و قرارگیری در منطقه کم‌ارتفاع فلات قاره، از لحاظ تغییرات پهنه آبی بسیار حساس است (عبدالهی کاکرودی، ۲۰۱۸: ۳۷؛ شربت‌ی، ۲۰۲۲: ۳). نوسانات سطح آب دریای خزر در طول تاریخ و همچنین در دوره‌های اخیر، پیامدهای قابل توجهی برای خلیج گرگان به همراه داشته است. به عنوان مثال، در دوره افزایش تراز آب دریا بین سال‌های ۱۳۵۶ تا ۱۳۷۴، گسترش قابل توجه مساحت خلیج و افزایش عمق آن مشاهده می‌شود، در حالی که در دوره‌های افت سطح آب، از جمله در سال‌های اخیر، کاهش وسعت و عمق خلیج و همچنین تشدید پدیده رسوب‌گذاری و کم‌آبی در این تالاب نمایان است (عبدالهی کاکرودی، ۲۰۱۸: ۳۵؛ خسروان و همکاران، ۲۰۱۹: ۲۱۳ و خسروان و همکاران، ۲۰۲۲: ۱۸). برخی از محققان، با توجه به سناریوهای پیش‌بینی تغییرات سطح آب خلیج گرگان و احداث سد و کانال‌های انحرافی، خشک‌شدگی خلیج گرگان را محتمل می‌دانند (شربت‌ی و فانقرمه، ۱۳۹۴: ۵۸). تالاب‌های کشور در سال‌های اخیر به شدت تحت تأثیر عوامل مختلفی قرار گرفته‌اند که منجر به کاهش سطح و عمق آن‌ها شده است (حمزه و ترابی، ۲۰۲۱: ۴۷۶). این امر نگرانی‌های زیادی را به وجود آورده و ضرورت اتخاذ تدابیر لازم برای حفظ و احیای این تالاب‌ها را بیش از پیش آشکار کرده است.

افت سطح آب خلیج گرگان پیامدهای زیست‌محیطی متعددی برای مناطق اطراف دارد. این کاهش، علاوه بر تشدید پدیده گرد و غبار و پیامدهای منفی آن، تبعات ناگواری برای تنوع زیستی منطقه نیز به همراه خواهد داشت. این پدیده، با به خطر انداختن حیات گیاهی و جانوری، به نابودی اکوسیستم منحصر به فرد خلیج گرگان منجر خواهد شد (لاهیجانی و همکاران، ۲۰۲۲: ۱۵۸). بنابراین مطالعه در زمینه تغییرات سطح آب این خلیج و روش‌های استخراج بدنه آبی می‌تواند به برنامه ریزان و مدیران مربوطه، داده‌هایی ارائه دهد تا از طریق این داده‌ها و نقشه‌های منتج از آنها بتوانند طرح‌های آمایشی تهیه کنند که آسیب‌های نوسانی سطح آب خلیج را کاهش دهند.

مطالعات بسیاری در ارتباط با روش‌های استخراج و سنجش تغییرات سطح آب دریاها و دریاچه انجام شده است. از جمله روش‌های پرکاربرد در این زمینه استفاده از داده‌های ماهواره‌ای و اعمال شاخص‌های طیفی استخراج پهنه آب است (دوو و همکاران، ۲۰۱۶: ۳۵۴؛ السحابی^۱ و همکاران، ۲۰۱۶: ۱۲۰۵؛ السید^۲ و همکاران، ۲۰۲۱: ۱۰۴۰۸؛ گائو^۳؛ ۲۰۱۵: ۱۴۸؛ هوانگ^۴ و همکاران، ۲۰۱۸: ۳۳۵؛ جواک^۵ و همکاران، ۲۰۱۵: ۱۹۶؛ تیمکو^۶ و همکاران، ۲۰۱۹: ۳۳۸؛ شو^۷ و همکاران، ۲۰۲۱: ۱۲۷۱۸۰). بررسی مطالعات مرتبط با استخراج سطح آب با استفاده از تصاویر ماهواره‌ای نشان می‌دهد که (NDWI) رایج‌ترین شاخص برای استخراج سطح آب با استفاده از تصاویر ماهواره‌ای است. در این شاخص از باندهای سبز و مادون قرمز برای تفکیک آب از سایر پوشش‌های زمین استفاده می‌شود. مطالعات مختلف نشان داده‌اند که NDWI می‌تواند با دقت نسبتاً بالا سطح آب را استخراج کند (لی^۸ و همکاران، ۲۰۱۳: ۵۵۳۰؛ فیسای^۹ و همکاران، ۲۰۱۴: ۲۴؛ فیشر^{۱۰} و همکاران، ۲۰۱۶: ۱۶۷؛ ناندی^{۱۱} و همکاران، ۲۰۱۸: ۴۹۸؛ خسرویان و همکاران، ۲۰۱۸: ۹۹؛ اصغری و همکاران، ۲۰۲۰: ۵۳؛ بونیا^{۱۲}؛ ۲۰۲۱: ۱۴۳۳؛ یوسفی و همکاران، ۲۰۲۲: ۳۰؛ فیض‌اله‌پور، ۱۴۰۳). (MNDWI) نوع دیگری از شاخص آب است که از باندهای سبز، مادون قرمز نزدیک برای استخراج سطح آب استفاده می‌کند. MNDWI به طور کلی دقت بالاتری نسبت به NDWI دارد، به خصوص در مناطقی که پوشش گیاهی متراکم یا سایه وجود دارد (سارپ و اوزچلیک^{۱۳}؛ ۲۰۱۷: ۳۸۱؛ بونیا، ۲۰۲۱: ۱۴۳۳؛ یوسفی و همکاران، ۲۰۲۲: ۳۰).

1- Du
2- Elshahabi
3- Elsayed
4- Gao
5- Huang

6- Jawak
7- Tymków
8- Xu
9- Li
10- Feyisa

11 - Fisher
12 - Nandi
13 - Bhunia
14 - Sarp, G., & Ozcelik

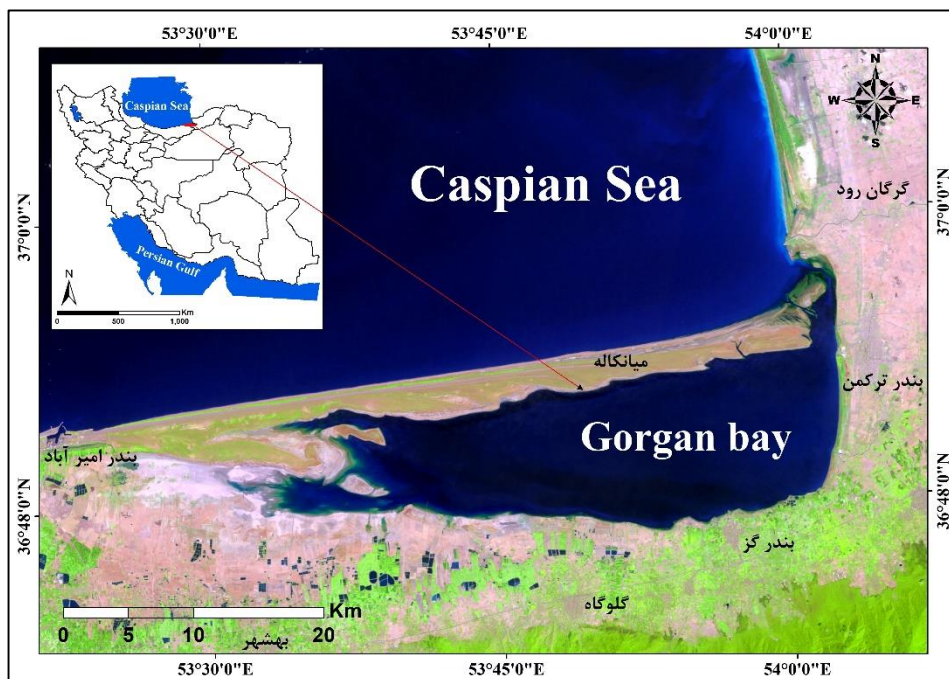
(AWEI) شاخص سوم مورد استفاده در این پژوهش برای استخراج سطح آب است که از باندهای سبز، آبی و مادون قرمز نزدیک (SWIR) استفاده می‌کند. AWEI نشان داده است که در مقایسه با NDWI و MNDWI در مناطق با پوشش گیاهی متراکم و سایه‌های عمیق دقت بالاتری دارد (فیسا و همکاران، ۲۰۱۴: ۲۶ و اصغری و همکاران، ۲۰۲۰: ۵۹). (NDPI) چهارمین شاخص طیفی مورد استفاده در این پژوهش است که برای فنولوژی گیاهی، برف و آب از آن استفاده شده است (وانگ^۱ و همکاران، ۲۰۱۷: ۳ و شو و همکاران، ۲۰۲۱: ۱۱۲۵۷۸).

به هر صورت شناسایی روند تغییرات سطح آب خلیج گرگان با استفاده از شاخص های طیفی آب، می تواند یک داده بسیار موثر در مدیریت و برنامه ریزی درست برای حفاظت از خلیج گرگان و همچنین مناطق متأثر از این خلیج باشد (خوشروان، ۲۰۲۰: ۱۳۰). به نوعی مدیران می توانند با داشتن اطلاعات درست از روند تغییرات پهنه آبی خلیج گرگان، برنامه ریزی مناسب تری، منطبق بر آمایش سرزمین برای این خلیج داشته باشند و کمتر با غافلگیری از جانب رفتارهای محیطی مواجه گردند. همین مساله و کارایی استفاده از تصاویر ماهواره ای موجب شده است تا در این پژوهش به بررسی تطبیقی روش های استخراج مساحت سطح آب خلیج گرگان با استفاده از شاخص های طیفی پرداخته شود تا مناسب ترین روش استخراج سطح آب معرفی گردد. لازم به ذکر است تاکنون مطالعه ای جهت بررسی تطبیقی چند شاخص طیفی در محدوده خلیج گرگان جهت مقایسه کارایی شاخص های طیفی در این محدوده انجام نشده است. البته مطالعه ای برای استخراج سطح آب با استفاده از شاخص MNDWI² انجام شده است (حمزه و ترابی، ۱۴۰۰: ۴۷۵)، که تنها یک شاخص طیفی مورد استفاده قرار گرفته است و فرض در آن پژوهش بر کارایی این روش در استخراج سطح آب بوده است؛ در صورتی که در پژوهش حاضر ابتدا ۴ شاخص طیفی متفاوت برای استخراج پهنه آب مورد آزمون و ارزیابی قرار گرفته اند و سپس روند تغییرات پهنه آب از نظر زمانی مورد تحلیل دقیق کمی قرار گرفته است. هدف از این پژوهش نیز شناسایی مناسب ترین شاخص طیفی سطح آب برای محدوده خلیج گرگان با استفاده از تصاویر ماهواره ای چند زمانه لندست ۵ و ۸ است. نهایتاً، نتایج این پژوهش می تواند به عنوان یک راهنمای علمی برای مدیران و برنامه ریزان جهت پایش تغییرات مساحت سطح آب خلیج گرگان مورد استفاده قرار گیرد.

مواد و روش ها

خلیج گرگان در جنوب شرقی سواحل دریای کاسپین قرار دارد. این خلیج تحت تاثیر رشد زبانه ماسه ای میانکاله شکل گرفته است (نجفی ها و بونیاگریان، ۲۰۱۹: ۳۵). به نظر می رسد در آینده با کاهش سطح تراز دریا و رشد زبانه ماسه ای، خلیج گرگان تنها راه ارتباطی خود از طریق مجرای آشوراده را از دست خواهد داد. از لحاظ موقعیت ریاضی این خلیج تقریباً بین طول های جغرافیای ۵۳ درجه و ۲۳ دقیقه تا ۵۴ درجه و ۲ دقیقه و عرض جغرافیایی ۳۶ درجه و ۴۶ دقیقه تا ۳۶ درجه و ۵۴ دقیقه قرار دارد (شکل ۱). در شمال این خلیج زبانه ماسه ای میانکاله که به شبه جزیره هم معروف است قرار دارد و در شرق نیز به شهر بندر ترکمن نزدیک است و در جنوب شهر های بندر گز و گلوگاه و بهشهر قرار دارند و همچنین در غرب این خلیج به بندر امیر آباد از جمله پایانه های وارداتی مهم کشور در استان مازندران منتهی می شود.

¹ - Wang



شکل (۱): موقعیت منطقه مورد مطالعه

Fig (1): The study area

در این پژوهش جهت محاسبه شاخص‌های سطح آب خلیج از تصاویر ماهواره لندست ۵ و ۸ و سنجنده های TM و OLI در ۴ سری زمانی ۱۹۹۰، ۲۰۰۰، ۲۰۱۰ و ۲۰۲۰ استفاده شده است. این تصاویر از سایت زمین شناسی ایالت متحده آمریکا وابسته به سایت ناسا (USGS) دریافت شده است. در جدول (۱) مشخصات تصاویر ماهواره‌ای که در پژوهش حاضر به کار گرفته شده اند؛ ارائه شده است.

جدول (۱): جزئیات و زمان اخذ تصاویر ماهواره‌ای

Table (1): Details and timing of satellite image acquisition

ماهواره	سنجنده	تاریخ	قدرت تفکیک مکانی (متر)	محل اخذ
لندست ۵	TM	۱۹۹۰/۰۸/۲۵	۳۰	سازمان زمین شناسی ایالت متحده آمریکا
لندست ۵	TM	۲۰۰۰/۷/۱۹	۳۰	سازمان زمین شناسی ایالت متحده آمریکا
لندست ۵	TM	۲۰۱۰/۰۷/۳۱	۳۰	سازمان زمین شناسی ایالت متحده آمریکا
لندست ۸	OLI	۲۰۲۰/۰۸/۱۱	۳۰	سازمان زمین شناسی ایالت متحده آمریکا

پژوهش حاضر از لحاظ هدف، کاربردی و از لحاظ روش، توصیفی - تحلیلی است. داده‌های مورد استفاده در این پژوهش تصاویر ماهواره‌ای لندست طی دوره ۳۰ ساله است. داده‌های ماهواره‌ای لندست به دلیل دارا بودن سری زمانی طولانی و رزولوشن مکانی متوسط، یکی از کاربردی‌ترین داده‌ها در استخراج سطوح آب است (گوتام و سینگهای، ۲۰۲۴: ۱۸۶۹). علاوه بر این وسعت زیاد این تصاویر برای عوارضی که مساحت زیادی دارند بسیار کاربرد دارد؛ چراکه هزینه‌های نقشه برداری زمینی برای بدست آوردن مساحت آنها هزینه‌های بالایی دارد.

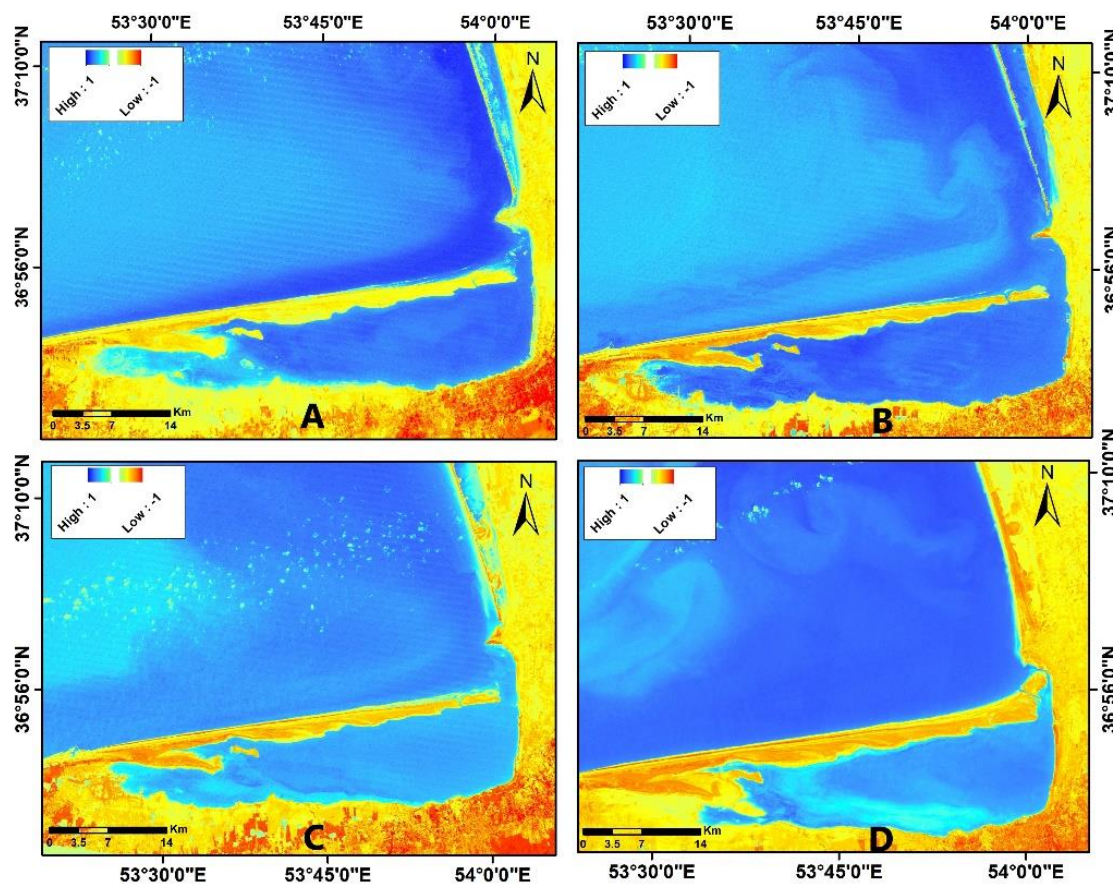
در این پژوهش از شاخص‌های طیفی که مناسب استخراج سطح آب و برای ماهواره لندست هستند؛ استفاده شده است. این شاخص‌ها دارای تنوع بسیاری هستند که در زیر چند شاخص که در این پژوهش مورد استفاده قرار گرفته است؛ به صورت مختصر توضیح داده شده اند:

شاخص NDWI (گائو، ۱۹۹۶: ۲۵۷)، اولین شاخص مورد استفاده در این پژوهش است که از طریق نرم‌افزار TerrSet2020 محاسبه شده است (شکل ۲). مقدار NDWI محاسبه شده در محدوده مورد مطالعه از طریق فرمول ریز به دست آمده است (فرمول شماره ۱):

(1)

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

NDWI یک شاخص بدون بعد است که بین -۱ و +۱ متغیر است. ارزش‌های بالاتر در این شاخص نشان از وجود آب بیشتر است.



شکل (۲): شاخص NDWI برای سال‌های (A) ۱۹۹۰، (B) ۲۰۰۰، (C) ۲۰۱۰ و (D) ۲۰۲۰

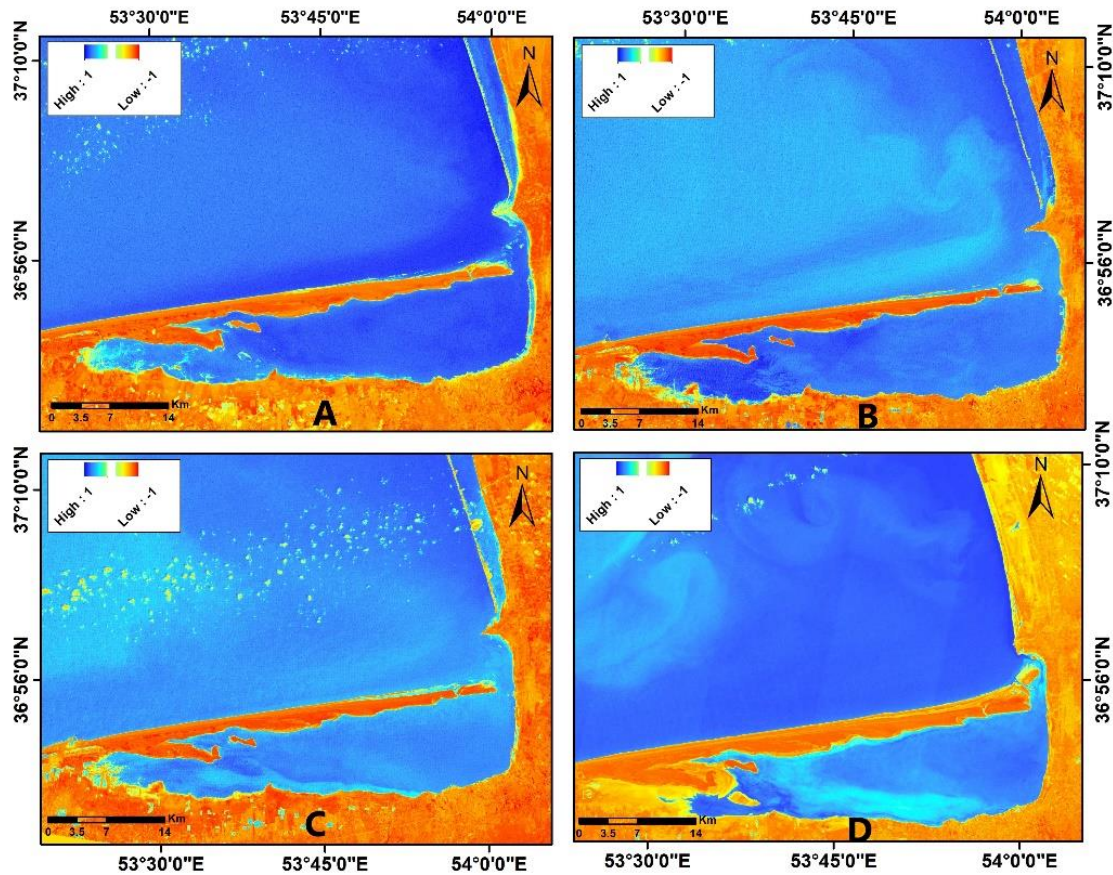
Figure (2): NDWI index for the years (A) 1990, (B) 2000, (C) 2010, and (D) 2020

شاخص MNDWI دومین شاخص مورد استفاده می‌باشد که از روش شو (۲۰۰۶) استفاده شده است (شکل ۳). این شاخص از فرمول زیر محاسبه شده است (فرمول شماره ۲):

(۲)

$$MNDWI = (Green - SWIR)/(Green + SWIR)$$

خروجی MNDWI به دست آمده بازتاب بالای باند سبز مقدار بیشتر آب را در محدوده منعکس می‌کند و باند مادون قرمز موج کوتاه مقدار منفی و مناطق غیرآبی را منعکس می‌کند.



شکل (۳): شاخص MNDWI برای سال‌های (A) ۱۹۹۰، (B) ۲۰۰۰، (C) ۲۰۱۰ و (D) ۲۰۲۰

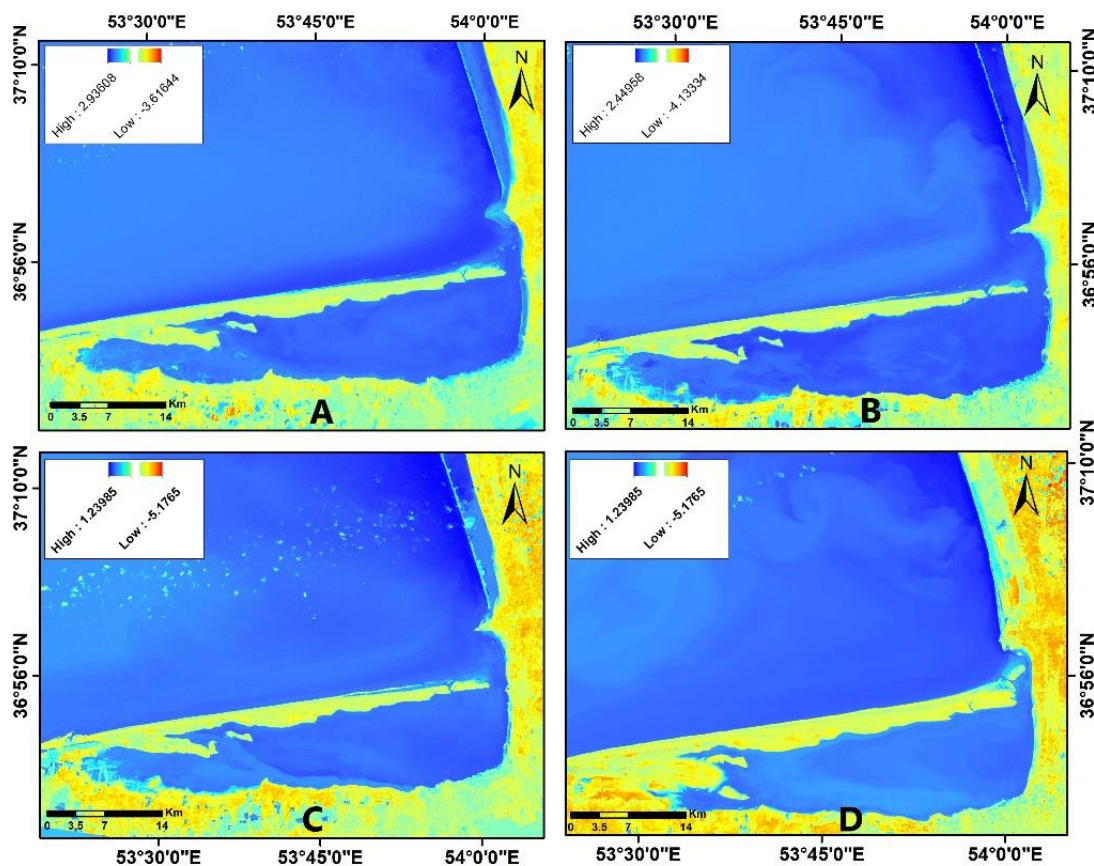
Figure(3): MNDWI index for the years (A) 1990, (B) 2000, (C) 2010, and (D) 2020

سومین شاخص AWEI است. فیسا و همکاران (۲۰۱۴) برای اولین بار از این شاخص به‌عنوان معیاری برای شناسایی توده‌های آبی استفاده کردند. در این پژوهش نیز از خروجی این شاخص برای تعیین مساحت خلیج گرگان استفاده شده است (شکل ۴).

باتوجه به داشتن انعکاس نسبتاً پایین بدنه‌های آبی، به‌ویژه در باندهای NIR به SWIR از ضرایبی در این شاخص استفاده شده و ترکیب باندهای انتخابی برای استخراج توده‌های آبی تعیین شد. تعریف ریاضی AWEI در زیر آورده شده است (فرمول شماره ۳):

(۳)

$$AWEI = 4 * (Green - SWIR1) - (0.25 * NIR4 + 2.75 * SWIR2)$$



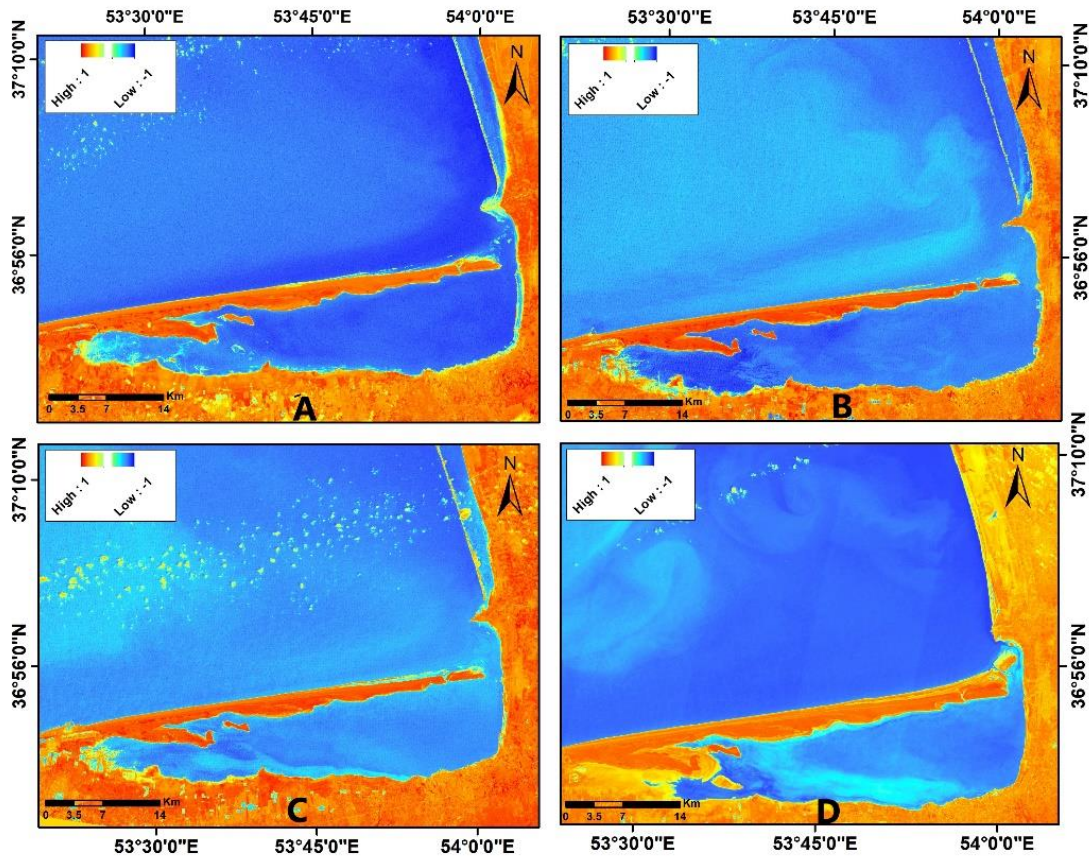
شکل (۴): شاخص AWEI برای سال‌های (A) ۱۹۹۰، (B) ۲۰۰۰، (C) ۲۰۱۰ و (D) ۲۰۲۰

Figure (4): AWEI index for the years (A) 1990, (B) 2000, (C) 2010, and (D) 2020

چهارمین شاخص NDPI است. این شاخص برای اولین بار توسط گونسامو و همکاران (2012)، ارائه شده است. ترکیب شاخص‌های NDVI و NDII موجب پیدایش این شاخص شده است. از آنجا که در سنجش از دور از شاخص‌ها به جای همدیگر استفاده می‌شود و این شاخص هم جزء شاخص‌های جدید محسوب می‌شود (شو و همکاران، ۲۰۲۱: ۱۱۲۵۷۸). در این پژوهش هم سعی شده از این شاخص برای استخراج مساحت خلیج گرگان استفاده شود (شکل ۵) و با سایر شاخص‌ها مورد ارزیابی قرار گیرد. این شاخص برای پوشش گیاهی، برف و خاک هم استفاده شده است (وانگ و همکاران، ۲۰۱۷: ۲). NDPI شاخصی بدون بعد است و بین -۱ و +۱ متغیر است. برعکس شاخص‌های که در بالا معرفی شده‌اند؛ ارزش‌های پایتتر در پیکسل‌های این شاخص نشان از وجود آب بیشتر است. فرمول ریاضی NDPI در زیر آورده شده است (فرمول شماره ۴):

(۴)

$$MNDWI = \frac{NIR - (0.74 \times RED + 0.26 \times SWIR)}{NIR + (0.74 \times RED + 0.26 \times SWIR)}$$



شکل (۵): شاخص NDPI برای سال‌های (A) ۱۹۹۰، (B) ۲۰۰۰، (C) ۲۰۱۰ و (D) ۲۰۲۰

Figure(5): NDPI index for the years (A) 1990, (B) 2000, (C) 2010, and (D) 2020

برای اندازه‌گیری‌های آماری شدت و جهت‌گیری یک پیوند خطی بین دو تصویر (شاخص)، از آزمون همبستگی پیرسون (r) استفاده شد. در بین دو تصویر، مقدار r پیرسون به صورت زیر تعیین می‌شود (فرمول شماره ۵):

$$r(A, B) = \frac{\sum_{m,n} (A_{m,n} - \mu_A)(B_{m,n} - \mu_B)}{\sqrt{\sum_{m,n} (A_{m,n} - \mu_A)^2 \sum_{m,n} (B_{m,n} - \mu_B)^2}} \quad (5)$$

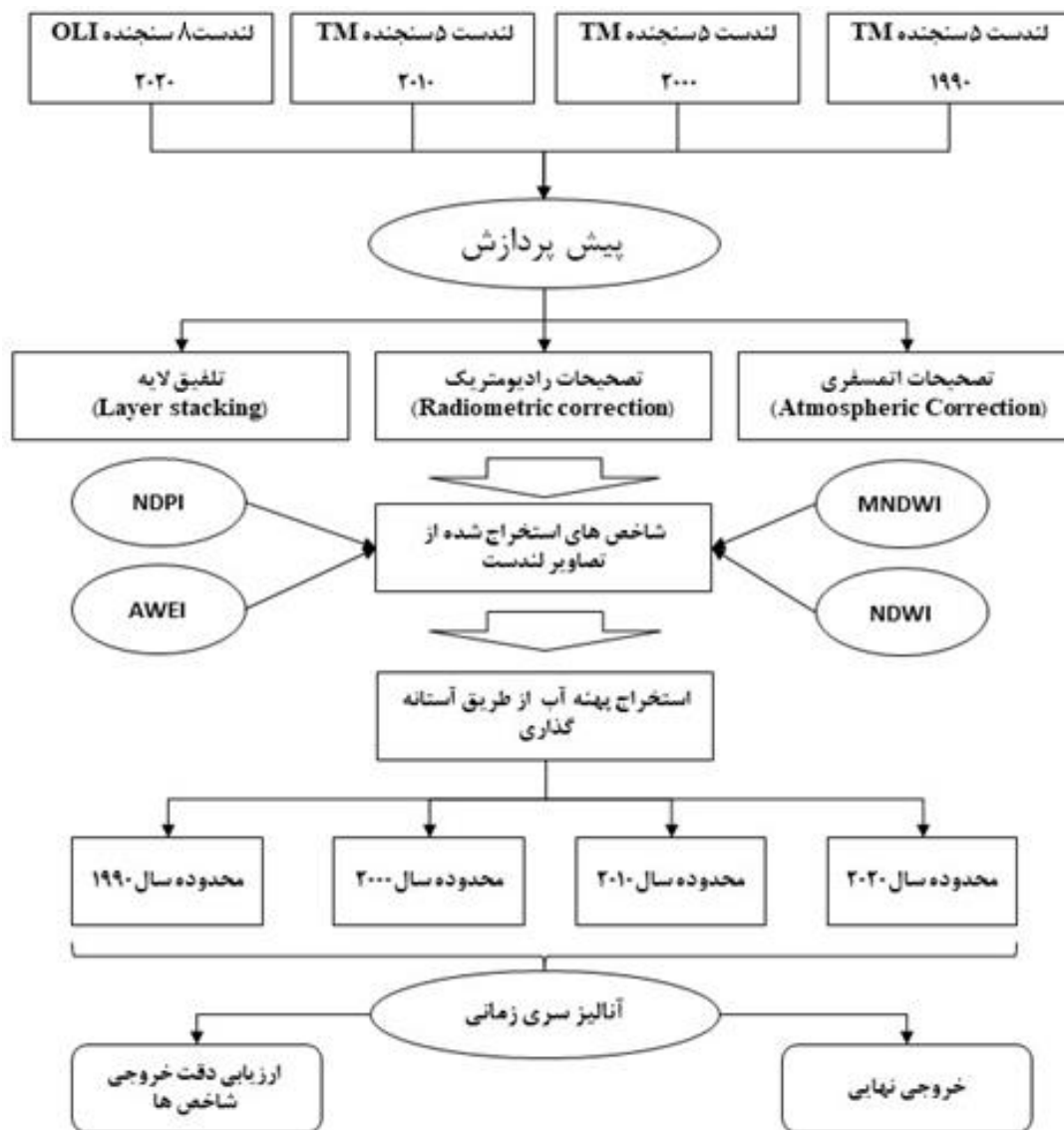
جایی که μ_A (شاخص اول) و μ_B (شاخص دوم) با مقادیر متوسط در دو بازه زمانی مختلف مطابقت دارند. r باید تا حد امکان نزدیک به ۱ باشد. محاسبات مربوط به همبستگی میان شاخص‌های طیفی از طریق نرم افزار SAGA GIS که یک نرم افزار متن باز هست انجام شده است. این نرم افزار قابلیت انجام همبستگی پیکسل مینا را دارد که در علوم جغرافیایی کاربرد های فراوان دارد.

در این پژوهش جهت اعتبارسنجی از RMSE^۱ استفاده شده است. RMSE میزان خطای بین دو مجموعه داده را اندازه‌گیری می‌کند. این پارامتر معمولاً مقادیر پیش‌بینی شده (خروجی شاخص‌ها) و مقادیر اندازه‌گیری شده (تصاویر ماهواره‌ای) را با یکدیگر مقایسه می‌کند (یونیا، ۲۰۲۱: ۱۴۳۹). فرمول RMSE به صورت زیر محاسبه می‌شود (فرمول شماره ۶):

$$RMSE = \sqrt{\sum_{i=1}^n (X_{obs,i} - X_{model,i})^2 / n} \quad (6)$$

^۱-Root Mean Square Error

در رابطه فوق، $X_{obs,i}$ مربوط به مقادیر واقعی و $X_{mod el,i}$ مربوط به مقادیر پیش‌بینی شده (شاخص‌ها) و n تعداد مقادیر است. مقادیر واقعی در این پژوهش همان پیکسل‌های متناظر تصاویر ماهواره‌ای و مقادیر پیش‌بینی مقادیر پیکسل‌های متناظر برداشت شده از شاخص‌ها هستند که با توجه به وسعت منطقه، از حداقل ۱۰۰۰ پیکسل نمونه استفاده شود. در مجموع چارچوب روش‌شناسی پژوهش حاضر در شکل زیر نشان داده شده است (شکل ۶).



شکل (۶): چارچوب روش‌شناسی کلی پژوهش حاضر جهت استخراج و تشخیص تغییرات سطح آب

Figure(6): The general methodological framework of the current research to extract and detect water level changes

یافته‌ها و بحث

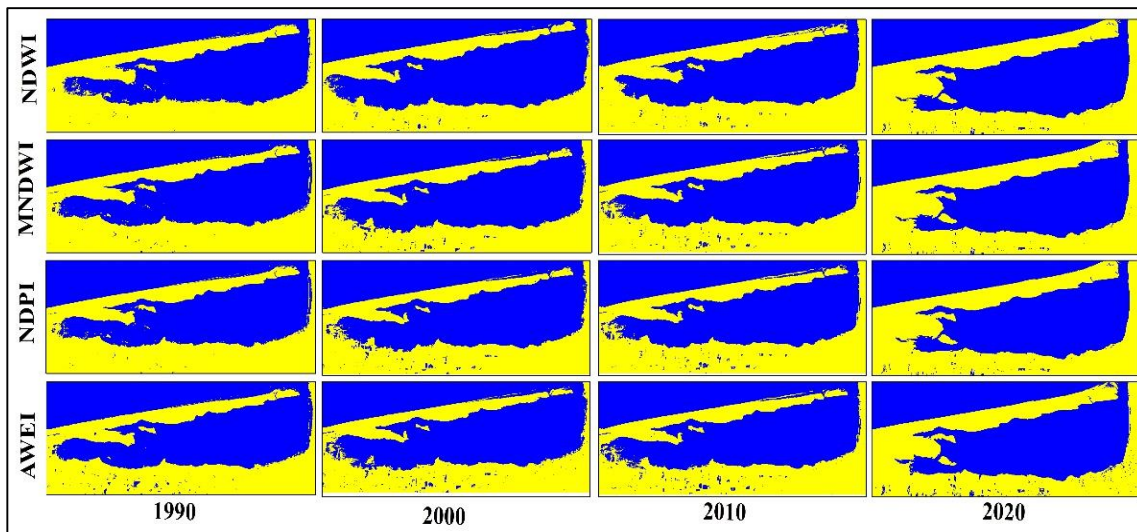
در این پژوهش از چهار شاخص طیفی آب (NDPI، AWEI، MNDWI، NDWI) برای برجسته کردن تفاوت‌های بین مناطق آبی و غیرآبی استفاده شده است. بعد از استخراج هر یک از شاخص‌ها، با آستانه‌گذاری بر روی خروجی شاخص‌ها، محدوده آب و محدوده خشکی نمایان شده است. آستانه‌ها با در نظر گرفتن هیستوگرام تصاویر و بررسی تصاویر گوگل ارث و همچنین سعی و خطا مشخص شده‌اند. برای هر شاخص، مقدار آستانه در جدول زیر مشخص آورده شده است (جدول ۲).

جدول (۲). مقادیر حد آستانه برای هریک از شاخص‌ها در سال‌های مورد استفاده

Table (۲): Threshold values for each of the spectral indices in the years used

شاخص‌ها	سال‌ها	کمترین	بیشترین	میانگین	انحراف معیار
NDWI	۱۹۹۰	-۰/۶۵	۰/۵۷	-۰/۳۹۰	۰/۳۵
	۲۰۰۰	-۰/۶۴	۰/۶۴	-۰/۰۰	۰/۳۷
	۲۰۱۰	-۰/۶۱	۰/۵۳	-۰/۰۴	۰/۳۳
	۲۰۲۰	-۰/۸۴	۰/۶۹	۰/۰۷	۰/۴۴
MNDWI	۱۹۹۰	-۰/۳۶	۰/۸۴	۰/۲۴	۰/۳۵
	۲۰۰۰	-۰/۴۳	۰/۹۹	۰/۲۸	۰/۴۲
	۲۰۱۰	-۰/۵۶	۰/۸۸	۰/۱۶	۰/۴۲
	۲۰۲۰	-۰/۶۵	۰/۸۰	۰/۰۷	۰/۴۲
AWEI	۱۹۹۰	-۱/۱۹	۰/۵۰	-۰/۳۵	۰/۴۹
	۲۰۰۰	-۱/۳۱	۰/۴۹	-۰/۴۱	۰/۵۳
	۲۰۱۰	-۱/۳۵	۰/۴۷	-۰/۴۴	۰/۵۳
	۲۰۲۰	-۲/۴۰	۰/۳۵	-۱/۰۲۸	۰/۸۰
NDPI	۱۹۹۰	-۰/۸۵	۰/۳۵	-۰/۲۵	۰/۳۵
	۲۰۰۰	-۰/۹۹	۰/۴۲	-۰/۲۹	۰/۴۲
	۲۰۱۰	-۰/۸۸	۰/۵۶	-۰/۱۶	۰/۴۲
	۲۰۲۰	-۰/۸۱	۰/۶۳	-۰/۰۸	۰/۴۲

بعد از آستانه‌گذاری و تفکیک نقشه شاخص‌ها به سطوح آب و خشکی (از طریق تبدیل رستر به بردار) قابلیت مساحت‌گیری از هریک از نقشه‌ها فراهم شده است (شکل ۷).



شکل (۷): خروجی‌های پهنه آب خلیج گرگان برای هر سال و شاخص طیفی

Figure(7):Outputs of Gorgan Bay water area for each year and spectral indices

در شاخص NDWI مساحت سطح آب خلیج گرگان، ۴۴۲۱ هکتار از سال ۱۹۹۰ تا سال ۲۰۰۰ افزایش یافته است (جدول ۳). از سال ۲۰۰۰ تا ۲۰۱۰، ۱۷۱۲ هکتار کاهش نشان می‌دهد و در بازه ۲۰۱۰ تا ۲۰۲۰، ۱۱۰۱۶ هکتار کاهش سطح داشته است. در شاخص MNDWI مطابق بازه های زمانی شاخص قبلی، ابتدا افزایش ۲۳۸۴ هکتار و بعد کاهش ۱۴۸۸ هکتار و نهایتاً کاهش ۱۱۰۸۰ هکتار مشاهده می‌شود. در شاخص AWEI نیز در بازه اول افزایش ۳۲۱۰ هکتار، بازه دوم کاهش ۲۳۸۷ هکتار و نهایتاً بازه سوم کاهش ۱۰۸۵۹ هکتار را نشان می‌دهد. شاخص NDPI در بازه زمانی اول افزایش ۲۷۰۸ هکتار، در بازه دوم کاهش ۱۴۹۹ هکتار و در بازه سوم کاهش ۱۱۱۰۳ هکتار را نمایان می‌سازد. بررسی شاخص‌های NDWI، MNDWI، AWEI و NDPI در طول دوره ۱۹۹۰ تا ۲۰۲۰، کاهش معنی‌دار ۲۰ الی ۳۰ درصدی مساحت آب خلیج گرگان را در مجموع نشان می‌دهد.

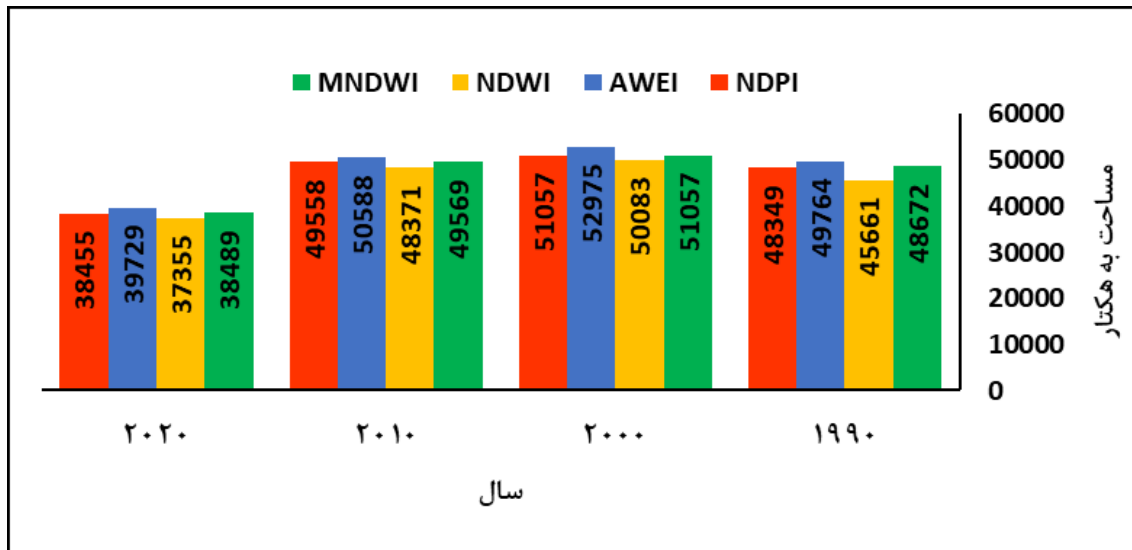
جدول (۳): توزیع تغییرات مساحت پهنه آب خلیج گرگان، طی بازه زمانی ۱۹۹۰ تا ۲۰۲۰

Tabel(3): Distribution of changes in the water area of Gorgan Bay during the period from 1990 to 2020

شاخص / سال	مساحت به هکتار	تغییرات مساحت بین دوره ها
NDWI		
۱۹۹۰	۴۵۶۶۱	
۲۰۰۰	۵۰۰۸۳	۴۴۲۱
۲۰۱۰	۴۸۳۷۱	-۱۷۱۲
۲۰۲۰	۳۷۳۵۵	-۱۱۰۱۶
MNDWI		
۱۹۹۰	۴۸۶۷۲	
۲۰۰۰	۵۱۰۵۷	۲۳۸۴
۲۰۱۰	۴۹۵۶۹	-۱۴۸۸
۲۰۲۰	۳۸۴۸۹	-۱۱۰۸۰
AWEI		
۱۹۹۰	۴۹۷۶۷	
۲۰۰۰	۵۲۹۷۵	۳۲۱۰
۲۰۱۰	۵۰۵۸۸	-۲۳۸۷
۲۰۲۰	۳۹۷۲۹	-۱۰۸۵۹
NDPI		
۱۹۹۰	۴۸۳۴۹	
۲۰۰۰	۵۱۰۵۷	۲۷۰۸
۲۰۱۰	۴۹۵۵۸	-۱۴۹۹
۲۰۲۰	۳۸۴۵۵	-۱۱۱۰۳

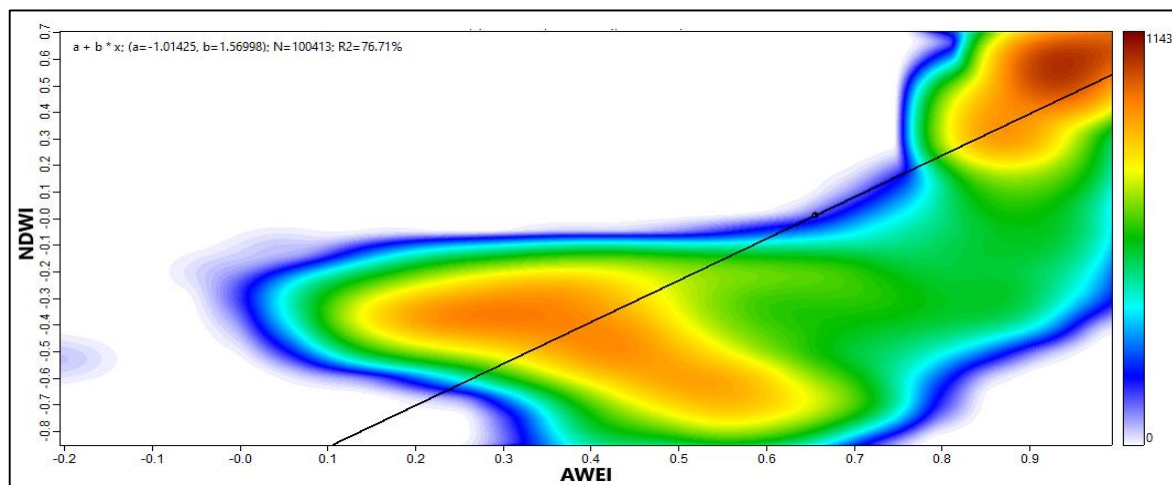
آنچه به صورت بصری از خروجی شاخص‌ها مشخص است تفاوت آنچنانی بین آنها از لحاظ تفاوت در مساحت مشاهده نمی‌شود (شکل ۸). این خود نشانگر این است که در حالت کلی می‌توان به خروجی این شاخص‌ها اعتماد کرد. اما از آنجا که ما با یک فرم ژئومورفولوژیکی سر رو کار داریم که تغییرات این فرم در جهات مختلف جغرافیایی می‌تواند تاثیرپذیری و تاثیر گذاری محیطی متفاوت داشته باشد. به همین علت انتخاب دقیقترین شاخص، مهم می‌نمایند چراکه همین میزان تفاوتی که میان مساحت‌ها وجود دارد گاهی شاید در نقطه ای حساس باشد و اثرات سویی داشته باشد و مدیران را در برنامه ریزی دچار گمراهی کند. مثلاً در غرب خلیج گرگان که عمق آب در

آنجا بسیار پایین است و اتفاقاً زیستگاه پرندگان مهاجر نیز هست اگر به اشتباه محدوده را سطح آب استخراج نموده در صورتی که در واقعیت چنان نباشد می تواند موجب گمراهی مدیران محیط زیست شده و آنها را از برنامه ریزی و مدیریت برای آن منطقه دور نماید.



شکل (۸): مقایسه بصری پهنه آب خلیج گرگان برای هر سال و شاخص طیفی
Figure(8):Outputs of Gorgan Bay water area for each year and spectral indices

در ادامه برای اینکه به صورت کمی تفاوت های میان شاخص ها مشخص شود بین شاخص ها همبستگی از نوع پیرسون و رستر مبنا گرفته شده است (شکل ۹).



شکل (۹). نمونه ای از استخراج رابطه بین شاخص های طیفی در نرم افزار SAGA GIS
Figure(9):An example of extracting the relationship between spectral indices in SAGA GIS software

نرخ همبستگی بین شاخص های طیفی با استفاده از ضریب همبستگی پیرسون تعیین شده است (جدول ۴). بین NDWI و MNDWI، بالاترین مقدار همبستگی در طول بازه زمانی ۳۰ ساله مشاهده شد. برای سایر شاخص ها مقادیر همبستگی کمتری مشاهده می شود.

جدول (۴): میانگین ضریب همبستگی پیرسون برای دوره زمانی ۳۰ ساله

Table (4): Average Pearson's correlation coefficient for a period of 30 years

AWEI	NDPI	MNDWI	NDWI	شاخص ها
۰/۷۶	۰/۷۸	۰/۸۹	۱	NDWI
۰/۷۲	۰/۷۷	۱	*	MNDWI
۰/۸۲	۱	*	*	NDPI
۱	*	*	*	AWEI

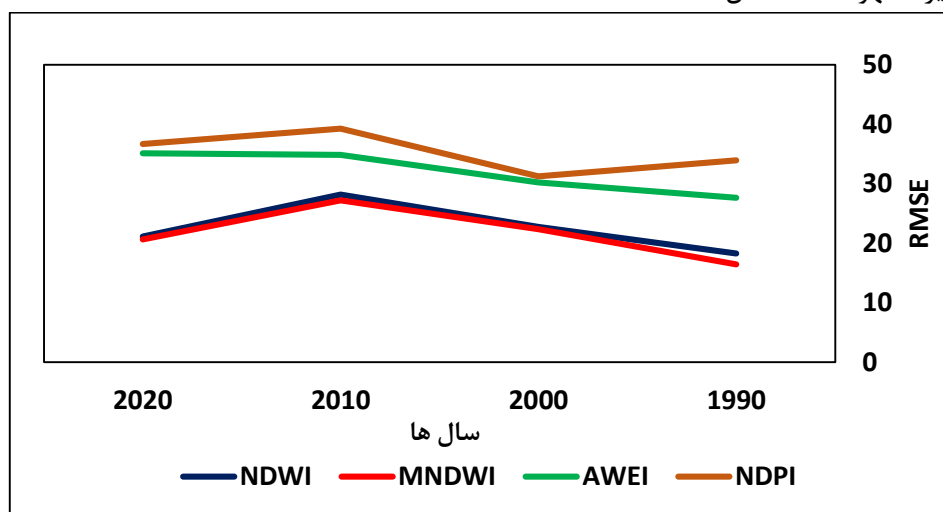
اعتبار خروجی شاخص‌ها مهم‌ترین بخش پژوهش است؛ چرا که برآورد دقیقتر مساحت پهنه آب خلیج و کیفیت این خروجی اساس تصمیم‌گیرها بعدی می‌باشد. سطوح آب مرجع از تصویر Google Earth به صورت دستی برای بررسی دقت خروجی شاخص‌ها استفاده شدند. این مرحله کاملاً وابسته به کاربر و ذهنی انجام گرفته است. RMSE با استفاده از داده‌های مرجع (جدول ۵) محاسبه شد.

جدول (۵): RMSE بین داده‌های مرجع و آب‌های سطحی حاصل شاخص‌های طیفی

Table (5): RMSE between reference data and surface waters resulting from spectral indices

شاخص‌ها	۱۹۹۰	۲۰۰۰	۲۰۱۰	۲۰۲۰	میانگین سال‌ها
NDWI	۱۸/۲۹	۲۲/۷۷	۲۸/۲	۲۱/۱۴	۲۲/۶
MNDWI	۱۶/۴۶	۲۲/۳۶	۲۷/۲۲	۲۰/۶۳	۲۱/۶۶
AWEI	۲۷/۶۷	۳۰/۲۵	۳۴/۸۶	۳۵/۱۴	۳۱/۹۸
NDPI	۳۳/۹۲	۳۱/۲۷	۳۹/۲۴	۳۶/۶۷	۳۵/۲۷

جدول (۵) نشان می‌دهد که دقت به دست آمده در سال‌های ۱۹۹۰، ۲۰۰۰، ۲۰۱۰ و ۲۰۲۰ توسط شاخص‌های NDWI و MNDWI از شاخص‌های دیگر بالاتر است. مقدار RMSE برای شاخص NDWI از سال ۱۹۹۰ تا ۲۰۲۰ نوسان داشته است. بالاترین مقدار RMSE در سال ۲۰۱۰ (۲۸/۲) مشاهده می‌شود که نشان‌دهنده دقت کمتر مدل در این سال نسبت به سایر سال‌ها است. در سال ۲۰۲۰، مجدد مقدار RMSE به ۲۱/۱۴ کاهش یافته است که نشان‌دهنده بهبود دقت مدل نسبت به دوره قبل است. بهترین دقت هم برای سال ۱۹۹۰ با ۱۸/۲۹ برآورد شده است. مقدار RMSE برای شاخص MNDWI نیز نوسان داشته است. بالاترین مقدار RMSE در سال ۲۰۱۰ (۲۷/۲۲) مشاهده می‌شود و پس از آن در سال ۲۰۲۰ مقدار RMSE به ۲۰/۶۳ کاهش یافته است. کمترین میزان RMSE در این شاخص نیز متعلق به سال ۱۹۹۰ با کمیت ۱۶/۴۶ می‌باشد. شاخص AWEI نیز روند نوسانی داشته است. بالاترین مقدار RMSE در سال ۲۰۲۰ (۳۵/۱۴) مشاهده می‌شود که نشان‌دهنده دقت کمتر مدل در این سال است. کمترین مقدار هم برابر ۲۷/۶۷ برای سال ۱۹۹۰ بوده است. شاخص NDPI در تمام سال‌ها دارای مقادیر RMSE بالاتری نسبت به شاخص‌های دیگر بوده است. NDPI نیز روند نوسانی داشته است. بالاترین مقدار RMSE در سال ۲۰۱۰ (۳۹/۲۴) بوده است و پس از آن در سال ۲۰۲۰ مقدار RMSE به ۳۶/۶۷ کاهش یافته است. کمترین میزان خطای این شاخص در سال ۲۰۰۰ مشاهده می‌شود. در کل با مقایسه خروجی RMSE بین شاخص‌ها می‌توان دریافت که شاخص MNDWI در استخراج پهنه آب خلیج گرگان خطای کمتری داشته است؛ این در نمودار مقایسه‌ای-خطی بین شاخص‌ها نیز مشهود است (شکل ۱۰).



شکل (۱۰). نمودار مقایسه‌ای-خطی بین شاخص‌های طیفی طی بازه ۳۰ ساله

Figure(10):A linear comparison chart between spectral indices over a 30-year period

خلیج گرگان از لحاظ میزان بازندگی نسبت به سایر مناطق جنوبی دریای خزر بارندگی کمتری دارد و رودخانه های دائمی و پر آبی به آن نمی ریزد. همین امر موجب وابستگی شدید این خلیج به آب دریا خزر شده است. تغییرات نوسانی تراز دریای خزر باعث خسارات زیست محیطی می شود. از این رو، شاخص های طیفی مورد استفاده در این مطالعه (NDWI، MNDWI، AWEI و NDPI) ممکن است با تعیین مقادیر آستانه بین سطوح آب و غیر آب، به طور موثر و دقیقی پیکسل های آب را از پیکسل های غیر آب تشخیص دهند. با این حال، تعیین آستانه به صورت دستی انجام می شود. در هر صورت، شاخص های طیفی آب برای استخراج خودکار توده های آب سطحی با دقت و صحت بیشتر و هزینه های بسیار کمتر از سایر روشهای استخراج سطوح آب، مفید هستند.

روش پیشنهادی در این پژوهش این مزیت را دارند که با استفاده از تصاویر چندزمانی و بکارگیری شاخص های طیفی سنجش از دوری، به طور خودکار و لحظه ای توده های آب سطحی را تشخیص دهند. نتایج نشان می دهند که عملکرد شاخص های NDWI و MNDWI در منطقه مورد مطالعه، از نظر کارایی تشخیص آب های سطحی بسیار نزدیک به هم هستند. همچنین، دقت به دست آمده از طریق RMSE نشان داد که حداکثر دقت با استفاده از شاخص MNDWI محاسبه شده است. آزمایش های مشابهی را با استفاده از داده های سنجش از دور برای شبیه سازی شرایط طبیعی توده های آب انجام دادند. شاخص MNDWI می تواند ابزاری کارآمد برای پایش تغییرات وسعت آب های سطحی در سرتاسر جهان باشد. چرا که رفتار آب در مناطق مختلف مشابه است و این روش نسبت به تغییرات جزئی در تصاویر ماهواره ای با پهنای باند مشابه، کم حساس تر است (بونیا، ۲۰۲۱: ۱۴۳۴). یافته های این پژوهش با نتایج تحقیق سارپ و اوزچلیک (۲۰۱۷) همراستا و سازگار است.

در حالی که مقالات علمی متعددی به معرفی روش های مختلف برای نقشه برداری از آب های سطحی و سنجش دقت آن ها پرداخته اند، پژوهش های اندکی به بررسی تطبیقی شاخص های مربوط به این موضوع، به طور خاص در سطح زیر پیکسل، اختصاص یافته است. در منطقه مورد مطالعه که تاکنون این پژوهش انجام نشده است. وسعت نسبتاً بزرگ پیکسل های لبه ای در تصاویر ماهواره ای لندست، به دلیل رزولوشن متوسط باندهای طیفی آن، باعث می شود که این پیکسل ها شامل ترکیبی از عناصر آب و غیر آب باشند (بونیا، ۲۰۲۱: ۱۴۳۳). مشکل زمانی خود را نشان می دهد که پس زمینه زمین، شامل سطوح با بازتاب کم نور مانند ابرها، ساختمان ها، سایه ها و موارد مشابه، باشد (یانگ^۱ و همکاران، ۲۰۱۸: ۲۵۹۲۷۰). به دلیل ظرافت و پیچیدگی تنوع طیفی بین پیکسل ها، تشخیص این تفاوت ها به صورت دستی غیرممکن است. تحقیقی در گذشته نشان داده است که NDWI در تشخیص دقیق توده های آب کوچک کارایی لازم را ندارد (هایبو و همکاران، ۲۰۱۱: ۲۶۱۹). به هر حال باید دقت داشت که در مناطق ساحلی سطوح آب امکان مخلوط شدن پیکسلی وجود دارد و با بررسی چشمی نمی توان آنها را از هم تفکیک کرد.

بهبود دقت زیرپیکسلی شاخص های طیفی در تشخیص آب های سطحی، امکان پایش این پدیده را با استفاده از تصاویر لندست به روشی دقیق و مطمئن فراهم می کند. در این مطالعه، اثر تغییرات فصلی بر شناسایی توده های آب در تصاویر ماهواره ای بررسی نشده است. با این وجود، برای ارزیابی جامع عملکرد شاخص های طیفی سنجش از دور، ممکن است لازم باشد موقعیت های جغرافیایی متنوع تری در نظر گرفته شود. یا به نوعی در همان خلیج گرگان در جهات جغرافیای متفاوت و در عمق های مختلف دقت این شاخص ها مورد ارزیابی قرار گیرد و برای هر بخش از خلیج شاخصی که دقت بالاتری دارد انتخاب گردد.

نتیجه گیری

در این مطالعه ۴ شاخص طیفی متفاوت برای استخراج پهنه آب، مورد آزمون و ارزیابی قرار گرفته اند و سپس روند تغییرات پهنه آب از نظر زمانی مورد تحلیل واقع شده است. هدف از این پژوهش نیز شناسایی مناسب ترین شاخص طیفی سطح آب با استفاده از تصاویر ماهواره ای چند زمانه لندست ۵ و ۸ برای محدوده خلیج گرگان است. همانطور که در مطالعات پیشین نیز اشاره شده؛ سطح آب خلیج گرگان نوسانات زیادی را تجربه کرده است (خشروان و همکاران، ۲۰۱۹: ۲۱۳؛ خشروان و همکاران، ۲۰۲۳: ۴۸؛ لاهیجانی و همکاران،

¹ - Yang

۲۰۲۳: ۱۵۸۸۳۳؛ جعفری و همکاران، ۲۰۲۱: ۳۶۱؛ حمزه و ترابی، ۲۰۲۱: ۴۷۵؛ شربتی و قانقرمه، ۱۳۹۴: ۴۵؛ عبدالهی کاکرودی، ۲۰۱۸: ۳۳). این نوسانات همواره خساراتی به همراه داشته است و در آینده نیز می‌تواند خسارات زیادی به بار آورد. از آنجا که برآیند تاثیر پذیری خلیج از عوامل محیطی بر روی وسعت سطح آب خلیج نمایان می‌شود؛ شناسایی مورفولوژی پهنه آب خلیج گرگان در طی زمان می‌تواند اطلاعاتی سودمند از روند و نرخ تغییرات خلیج گرگان را در اختیار مدیران و پژوهشگران علاقمند به محیط‌های جغرافیایی قرار دهد. نتایج پژوهش حاضر ابتدا نشان داد که شاخص‌های طیفی با خطایی پایینی که داشتند مورد اعتماد هستند و نسبت به وسعت منطقه و هزینه‌هایی که سایر روش‌ها دارند بسیار مفید می‌باشند. همچنین نتیجه بررسی‌ها نشان داد که شاخص MNDWI در مقایسه با شاخص‌های NDWI، AWEI، و NDPI در استخراج سطح آب خلیج گرگان قابل اعتمادتر است زیرا این شاخص نسبت به سایر شاخص‌ها خطای کمتری داشته است. علاوه بر این با بررسی همبستگی پیرسون بین شاخص‌ها در زمان‌های مشابه مشخص شد که شاخص‌های NDWI و MNDWI با ضریب ۰٫۸۹، بیشترین میزان همبستگی را با یکدیگر داشته‌اند که این مورد نیز می‌تواند یکی از شواهد کارایی بالاتر این دو شاخص نسبت به دو شاخص دیگر باشد. بررسی تغییرات زمانی مساحت سطح آب خلیج گرگان از طریق شاخص MNDWI روند تغییرات کاهشی را در طول ۳۰ اخیر نشان می‌دهد که این مورد با توجه به خطراتی که برای محیط زیست این خلیج دارد نیازمند مدیریت و برنامه‌ریزی است. نتایج این پژوهش می‌تواند برای مدیران منابع طبیعی و محیط زیست و گردشگری که نسبت به تغییرات سطح آب خلیج گرگان حساس هستند حائز اهمیت باشد.

آنچه که از این پژوهش می‌تواند در آینده مورد توجه پژوهشگران باشد اینست که در هر یک از بازه‌های ۱۰ ساله فوق می‌توان به دنبال چرایی افزایش یا کاهش سطح آب خلیج گرگان بوده و پاسخی برای مدیران و برنامه‌ریزان ارائه نمود تا آنها بدانند متغیر وابسته‌ای به نام سطح آب خلیج گرگان با اهمیت بسیاری که در زمینه‌های زیست محیطی، اقتصادی و حتی اجتماعی دارد می‌تواند بیشتر متأثر از کدام عامل محیطی باشد. در ارتباط با کارایی شاخص‌های طیفی نیز پیشنهاد می‌شود از آنجا که محدوده خلیج گرگان وسعت بسیار دارد با تفکیک مناطق مختلف جغرافیایی بر اساس ویژگی‌های محیطی نظیر عمق و پوشش گیاهی و غیره، هر یک محدوده مطالعاتی مجزا باشند و کارایی و دقت شاخص‌ها برای هر منطقه جداگانه مورد بررسی قرار گیرد برای رسیدن به این هدف ابتدا باید محیط جغرافیایی خلیج گرگان به درستی شناسایی شود تا ناحیه بندی نیز بر اساس آن صورت پذیرد.

References

- Abdollahi Kakroodi, A. A. (2018). Caspian Sea fluctuations and their impact on its southeastern coasts. *Quantitative Geomorphological Research*, 2(3), 33–44. [In Persian]
- Asghari, S., Jalilyan, R., Pirozinehad, N., Madadi, A., & Yadeghari, M. (2020). Evaluation of Water Extraction Indices Using Landsat Satellite Images (Case Study: Gamasiab River of Kermanshah). *Journal of Applied researches in Geographical Sciences*, 20(58), 53–70. [In Persian]
- Bhunia, G. S. (2021). Assessment of automatic extraction of surface water dynamism using multi-temporal satellite data. *Earth Science Informatics*, 14(3), 1433–1446.
- Du, Y., Zhang, Y., Ling, F., Wang, Q., Li, W., & Li, X. (2016). Water Bodies' Mapping from Sentinel-2 Imagery with Modified Normalized Difference Water Index at 10-m Spatial Resolution Produced by Sharpening the SWIR Band. *Remote Sensing*, 8(4).
- Elsahabi, M., Negm, A., & Hamid M.H. El Tahan, A. (2016). Performances Evaluation of Surface Water Areas Extraction Techniques Using Landsat ETM+ Data: Case Study Aswan High Dam Lake (AHD). *Procedia Technology*, 22, 1205–1212.
- Elsayed, S., Gad, M., Farouk, M., Saleh, A. H., Hussein, H., Elmetwalli, A. H., Elsherbiny, O., Moghanm, F. S., Moustapha, M. E., Taher, M. A., Eid, E. M., & Abou El-Safa, M. M. (2021). Using Optimized Two and Three-Band Spectral Indices and Multivariate Models to Assess Some Water Quality Indicators of Qaroun Lake in Egypt. *Sustainability*, 13(18).

- Faizollahi Pour, M. (2024). Changes in the areas of western Afghanistan dams and their impact on the water resources of Zabol's Chahnimeh over a 30-year period using Landsat 5 TM and Landsat 8 OLI and TIRS sensors. *Hydrogeomorphology* [In Persian]. <https://doi.org/10.22034/hyd.2024.59359.1712>
- Feyisa, G. L., Meilby, H., Fensholt, R., & Proud, S. R. (2014). Automated Water Extraction Index: A new technique for surface water mapping using Landsat imagery. *Remote Sensing of Environment*, 140, 23–35.
- Fisher, A., Flood, N., & Danaher, T. (2016). Comparing Landsat water index methods for automated water classification in eastern Australia. *Remote Sensing of Environment*, 175, 167–182.
- Gao, B. (1996). NDWI—A normalized difference water index for remote sensing of vegetation liquid water from space. *Remote Sensing of Environment*, 58(3), 257–266.
- Gao, H. (2015). Satellite remote sensing of large lakes and reservoirs: From elevation and area to storage. *WIREs Water*, 2(2), 147–157.
- Gautam, S., & Singhai, J. (2024). Critical review on deep learning methodologies employed for water-body segmentation through remote sensing images. *Multimedia Tools and Applications*, 83(1), 1869–1889.
- Gonsamo, A., Chen, J. M., Price, D. T., Kurz, W. A., & Wu, C. (2012). Land surface phenology from optical satellite measurement and CO2 eddy covariance technique. *Journal of Geophysical Research: Biogeosciences*, 117(G3).
- Haibo Y, Wang Z, Zhao H, Guo Y.(2011).Water body Extraction Methods Study Based on RS and GIS . 3rd international conference on environmental science and information application technology (ESIAT 2011). *Procedia Environ Sci* 10(2011):2619–2624
- Hamzeh, S., & Torabi, A. (2021). Investigating changes in the water area of Gorgan Bay and its relationship with rainfall changes and Caspian Sea water levels using remote sensing data. *Ecology*, 8(2), 475–484. [In Persian]
- Huang, C., Chen, Y., Zhang, S., & Wu, J. (2018). Detecting, Extracting, and Monitoring Surface Water From Space Using Optical Sensors: A Review. *Reviews of Geophysics*, 56(2), 333–360.
- Jafari, A., Niksokhan, M., & Majdzadeh Tabatabaei, M. (2021). Investigating the flow pattern in Gorgan Bay considering water level changes of the Caspian Sea using a numerical model. *Environmentology*, 47(3), 361–378. [In Persian]
- Jawak, S. D., Kulkarni, K., & Luis, A. J. (2015). A Review on Extraction of Lakes from Remotely Sensed Optical Satellite Data with a Special Focus on Cryospheric Lakes. *Advances in Remote Sensing*, 4(3).
- Khoshravan, H., Alinejad-Tabrizi, T., & Naqinezhad, A. (2022). Hydromorphology and environmental restoration of Gorgan Bay, the Southeast Caspian Sea. *Caspian Journal of Environmental Sciences*, 20(1), 17–28.
- Khoshravan, H., Naqinezhad, A., Alinejad-Tabrizi, T., & Yanina, T. (2019). Gorgan Bay environmental consequences due to the Caspian Sea rapid water level change. *Caspian Journal of Environmental Sciences*, 17(3), 213–226.
- Khoshravan, H., Poursafari Yekrang, P., & Alemi Safaval, P. (2023). Caspian rapid Sea level fluctuation and intensity of shorelines displacement in the Gomishan Lagoon. *International Journal Of Coastal, Offshore And Environmental Engineering(Ijcoe)*, 8(2), 48–55.
- Khosrovan, H. (2020). Spatial and temporal changes in the coastal habitats of Gorgan Bay under the influence of Caspian Sea fluctuations. *Scientific-Research Quarterly of Geographic Information "Sepehr"*, 29(115), 127–138. [In Persian]
- Khosravian, M., Entezari, A., Rahmani, A., & Baaghdeh, M. (2018). Monitoring water level changes in Parishan Lake using remote sensing indices. *Hydrogeomorphology*, 4(13), 99–120. [In Persian]
- Lahijani, H. A. K., Azizpour, J., Arpe, K., Abtahi, B., Rahnama, R., Ghafarian, P., Hamzeh, M. A., Hamzeshpour, A., Penchah, M. M., & Mahmoudof, S. M. (2023). Tracking of sea level impact on Caspian Ramsar sites and potential restoration of the Gorgan Bay on the southeast Caspian coast. *Science of The Total Environment*, 857, 158833.
- Li, W., Du, Z., Ling, F., Zhou, D., Wang, H., Gui, Y., Sun, B., & Zhang, X. (2013). A Comparison of Land Surface Water Mapping Using the Normalized Difference Water Index from TM, ETM+ and ALI. *Remote Sensing*, 5(11), 5530–5549.

- Najafiha, B., & Boungharian, V. (2019). The impact of sea level fluctuations on the geomorphology and morphodynamics of the Caspian Sea coasts (Case study: Gorgan Bay). *Quarterly Journal of Earth Sciences*, 29(113), 35–44.
- Nandi, D., Chowdhury, R., Mohapatra, J., Mohanta, K., & Ray, D. (2018). *International Journal of Scientific Research in Science, Engineering and Technology, IJSRSET*, 4(4), 498-216
- Sarp, G., & Ozcelik, M. (2017). Water body extraction and change detection using time series: A case study of Lake Burdur, Turkey. *Journal of Taibah University for Science*, 11(3), 381–391.
- Sharabati, S. (2022). Investigating the effects of the Caspian Sea water level decline on Gorgan Bay. *Journal of Aquaculture Exploitation and Breeding*, 11(4), 1–22. [In Persian]
- Sharabati, S., & Qanqarmeh, A. (2015). Forecasting the impact of long-term water level decline of the Caspian Sea on the life of Gorgan Bay. *Environmental Science and Technology*, 10(4), 45. [In Persian]
- Tymków, P., Józaków, G., Walicka, A., Karpina, M., & Borkowski, A. (2019). Identification of Water Body Extent Based on Remote Sensing Data Collected with Unmanned Aerial Vehicle. *Water*, 11(2), Article 2.
- Wang, C., Chen, J., Wu, J., Tang, Y., Shi, P., Black, T. A., & Zhu, K. (2017). A snow-free vegetation index for improved monitoring of vegetation spring green-up date in deciduous ecosystems. *Remote Sensing of Environment*, 196, 1–12.
- Xu, D., Wang, C., Chen, J., Shen, M., Shen, B., Yan, R., Li, Z., Karnieli, A., Chen, J., Yan, Y., Wang, X., Chen, B., Yin, D., & Xin, X. (2021). The superiority of the normalized difference phenology index (NDPI) for estimating grassland aboveground fresh biomass. *Remote Sensing of Environment*, 264, 112578.
- Xu, Y., Lin, J., Zhao, J., & Zhu, X. (2021). New method improves extraction accuracy of lake water bodies in Central Asia. *Journal of Hydrology*, 603, 127180.
- Yang X, Qina Q, Grussenmeyer P, Koehl M. (2018). Urban surface water body detection with suppressed built-up noise based on water indices from Sentinel-2 MSI imagery. *Remote Sens Environ* 219:259270
- Yousefi, H., Torabi Poteh, H., Haghhighizadeh, A., Samadi, A., Arshia, A., & Yar Ahmadi, Y. (2022). Monitoring changes in Zarivar Lake, Kurdistan using Normalized Difference Spectral Indices and Landsat images in the Google Earth Engine system. *Hydrogeology*, 6(2), 30–41. [In Persian]