

(OPEN ACCESS)

Assessment of Water Surface and Quality Changes in Gorgan Bay Using Remote Sensing and Meteorological Data

Alireza Yousefi Kebriya¹, Mehdi Nadi^{*2}

1. Ph.D. of Agrometeorology, Dept. of Water Engineering, Sari Agricultural Sciences and Natural Resources University, Sari, Iran. E-mail: alirezau3fikrbriya@gmail.com
2. Corresponding Author, Associate Prof., Dept. of Water Engineering, Sari Agricultural Sciences and Natural Resources University, Sari, Iran. E-mail: mehdi.nadi@gmail.com

Article Info

Article type:
Research Full Paper

Article history:
Received: 12.07.2024
Revised: 01.23.2025
Accepted: 01.31.2025

Keywords:
CDOM index,
MNDWI index,
MODIS satellite,
Water level

ABSTRACT

Background and Objectives: Gorgan Bay, as one of the unique and vital aquatic ecosystems in northern Iran, has faced significant environmental challenges in recent years. These challenges stem from multiple factors, including climate change, the decline in the Caspian Sea water level, increased human activities, and morphological alterations in the region. A precise identification of the factors contributing to the degradation of this ecosystem is crucial for sustainable water resource management and environmental conservation. This study aims to analyze the changes in the water area and water quality of Gorgan Bay from 2000 to 2023 and to identify the key factors influencing these changes.

Materials and Methods: This study investigates the temporal variations in the water extent and quality of Gorgan Bay over the period 2000-2023 using satellite datasets from Landsat, MODIS, Sentinel, and Jason missions. Indicators such as water temperature, turbidity, and colored dissolved organic matter (CDOM) were analyzed to assess water quality. Additionally, the water surface extent of the bay was mapped using the Modified Normalized Difference Water Index (MNDWI) and the Normalized Difference Water Index (NDWI). Pearson's correlation coefficient (r) was employed to examine the linear relationships between meteorological parameters and the bay's water extent. The Shapley value analysis was applied to determine the significance of different features and their impact on the bay's surface area. Furthermore, a linear regression model was utilized to evaluate the direct relationship between input variables and the bay's surface area. Finally, the random forest model was employed to analyze the impact of variables such as the Caspian Sea water level, Caspian Sea surface area, precipitation, temperature, and inflow discharge on the extent of Gorgan Bay.

Results: The results revealed that from 2015 to 2023, the minimum water temperature in Gorgan Bay increased by an average of 2.3 °C, with the most pronounced warming observed in the southern and western regions of the bay. Additionally, the persistent increase in water turbidity, particularly in 2020, 2022, and 2023, reached its highest levels in the western and southern parts of the bay, indicating poor water quality. The CDOM index suggested that water quality in 2020, 2022, and 2023 remained within

acceptable limits, with no significant pollution detected. In 2015, water quality was relatively better compared to recent years; however, certain western sections of the bay were approaching unhealthy conditions. The MNDWI and NDWI indices indicated that over 50% of Gorgan Bay's initial surface area has been lost in recent years, with the most significant reductions occurring in 2020, 2022, and 2023. During these years, extensive areas in the west, south, and north of the bay experienced complete desiccation. The analysis of the relationships between temperature, precipitation, discharge, Caspian Sea surface area, and Caspian Sea water level with the shrinking water area of Gorgan Bay identified the Caspian Sea water level decline as the primary driver of desiccation. The Pearson correlation coefficient between the bay's surface area and the Caspian Sea water level exceeded -0.90, with an R^2 value of 0.82, indicating a strong inverse relationship. The coefficients of determination for other parameters, including the Caspian Sea surface area, inflow discharge, precipitation, and temperature, were 0.43, 0.40, 0.19, and 0.11, respectively, suggesting that temperature had the least impact on the bay's shrinkage. The Shapley value analysis further demonstrated that the Caspian Sea water level exhibited the highest variation across the horizontal axis, highlighting its dominant influence on the bay's surface area, while other factors such as inflow discharge, Caspian Sea surface area, temperature, and precipitation also played notable roles. The regression analysis using Coefficient Value confirmed that the Caspian Sea water level, with a coefficient of 0.54, had the most significant effect on the bay's desiccation, accounting for over 50% of the total impact. The feature importance analysis from the random forest model indicated that the Caspian Sea water level had the highest influence (0.78), followed by the Caspian Sea surface area (0.14), while discharge, temperature, and precipitation had values below 0.1. Additionally, an examination of the Caspian Sea water level and Gorgan Bay's surface area from 2000 to 2023 revealed that the bay's surface area decreased from 400 km² in 2000 to 260 km² in 2023, closely linked to the Caspian Sea water level decline, which dropped by more than 2 meters over the past 23 years. These changes were also associated with regional morphological alterations, including reduced depth and modifications to the coastal shape, exacerbating the desiccation process.

Conclusion: The findings of this study indicate that Gorgan Bay has faced severe challenges related to declining water levels and deteriorating water quality between 2000 and 2023. Correlation analyses and regression models confirmed that the Caspian Sea water level decline is the dominant factor in these changes, with a significant and direct relationship between water level reduction and the shrinking of Gorgan Bay. These findings underscore the urgent need for sustainable water resource management and conservation strategies to protect Gorgan Bay as a fragile ecosystem in the face of water level decline and water quality changes.

Cite this article: Yousefi Kebriya, Alireza, Nadi, Mehdi. 2025. Assessment of Water Surface and Quality Changes in Gorgan Bay Using Remote Sensing and Meteorological Data. *Journal of Water and Soil Conservation*, 32 (2), 1-27.



© The Author(s).

DOI: 10.22069/jwsc.2025.23054.3773

Publisher: Gorgan University of Agricultural Sciences and Natural Resources

ارزیابی تغییرات سطح و کیفیت آب خلیج گرگان با استفاده از داده‌های سنجش از دور و هواشناسی

علیرضا یوسفی کبریا^۱ (id)، مهدی نادی^{۲*} (id)

۱. دکتری هواشناسی کشاورزی، گروه مهندسی آب، دانشکده مهندسی زراعی، دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی ساری، ساری، ایران.
رایانامه: azlirezau3fibrbriya@gmail.com
۲. نویسنده مسئول، دانشیار گروه مهندسی آب، دانشکده مهندسی زراعی، دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی ساری، ساری، ایران.
رایانامه: mehdi.nadi@gmail.com

اطلاعات مقاله	چکیده
نوع مقاله: مقاله کامل علمی - پژوهشی	سابقه و هدف: خلیج گرگان، به‌عنوان یکی از اکوسیستم‌های آبی مهم و منحصر به فرد شمال ایران، در سال‌های اخیر با چالش‌های زیست‌محیطی جدی مواجه شده است. این چالش‌ها ناشی از عوامل متعددی از جمله تغییرات اقلیمی، کاهش تراز آب دریای خزر، افزایش فعالیت‌های انسانی و تغییرات مورفولوژیکی منطقه هستند. شناسایی دقیق‌تر عواملی که به تخریب این اکوسیستم منجر می‌شوند، برای مدیریت پایدار منابع آبی و حفاظت از محیط‌زیست این منطقه ضروری است. این پژوهش با هدف تحلیل تغییرات مساحت آبی و کیفیت آب خلیج گرگان در بازه زمانی ۲۰۰۰ تا ۲۰۲۳ و شناسایی عوامل مؤثر بر این تغییرات انجام شده است.
تاریخ دریافت: ۰۳/۰۹/۱۷ تاریخ ویرایش: ۰۳/۱۱/۰۴ تاریخ پذیرش: ۰۳/۱۱/۱۲	مواد و روش‌ها: این پژوهش به تحلیل تغییرات مساحت آبی و کیفیت آب خلیج گرگان در بازه زمانی ۲۰۰۰ تا ۲۰۲۳ با استفاده از داده‌های ماهواره‌ای لندست، مودیس، سنتینل و جیسون پرداخته است. شاخص‌هایی مانند دمای آب، کدورت و مواد آلی رنگ‌دار محلول ^۱ به‌منظور ارزیابی کیفیت آب در این منطقه مورد بررسی قرار گرفت. همچنین، نقشه پهنه آبی خلیج با استفاده از شاخص تفاضلی نرمال‌شده آب اصلاح‌شده ^۲ و شاخص تفاضلی نرمال‌شده آب ^۳ ترسیم شد. برای تحلیل ارتباط بین پارامترهای هواشناسی و ماهواره‌ای با مساحت آب خلیج، از ضریب همبستگی پیرسون (r) استفاده شد تا ارتباطات خطی میان این متغیرها شناسایی شود. به‌منظور تحلیل اهمیت ویژگی‌ها و بررسی نحوه تأثیر آن‌ها بر مساحت خلیج، نمودار شاپلی به‌کار گرفته شدند تا الگوهای پیچیده تأثیرات را شفاف‌سازی کنند. همچنین، برای ارزیابی
واژه‌های کلیدی: تراز آب، شاخص CDOM، شاخص MNDWI، ماهواره مودیس	

- 1- Colored Dissolved Organic Matter (CDOM)
2- Modified Normalized Difference Water Index (MNDWI)
3- Normalized Difference Water Index (NDWI)

ارتباط خطی بین متغیرهای ورودی و مساحت خلیج، مدل رگرسیون خطی به کار گرفته شد. در نهایت، برای تحلیل تأثیر ویژگی‌هایی هم‌چون تراز آب دریای خزر، مساحت دریای خزر، بارش، دما و دبی ورودی به خلیج بر مساحت خلیج، از مدل جنگل تصادفی بهره گرفته شد.

یافته‌ها: نتایج این پژوهش نشان داد که طی سال‌های ۲۰۱۵ تا ۲۰۲۳، دمای حداقل آب خلیج گرگان به‌طور متوسط $2/3$ درجه سانتی‌گراد افزایش یافته است که این افزایش عمدتاً در نواحی جنوبی و غربی خلیج مشاهده شده است. افزون بر این، افزایش مداوم کدورت آب در سال‌های اخیر، به‌ویژه در سال‌های ۲۰۲۰، ۲۰۲۲ و ۲۰۲۳، در مناطق غربی و جنوبی خلیج به بالاترین میزان خود رسیده است، و در سطح ناسالم قرار دارد. شاخص ماده آلی محلول رنگی خلیج گرگان سال‌های ۲۰۲۰، ۲۰۲۲ و ۲۰۲۳ در وضعیت مناسبی قرار داشته و هیچ آلودگی معناداری مشاهده نشده است. در سال ۲۰۱۵ وضعیت کیفیت آب نسبت به دوره‌های اخیر بالاتر بوده، اما هم‌چنان در کلاس ناسالم قرار نگرفته است، و فقط بخش‌های کوچکی از مناطق غربی خلیج گرگان در آستانه شرایط ناسالم قرار داشته است. شاخص تفاضلی نرمال شده اصلاح شده آب و شاخص تفاضلی نرمال شده آب نشان می‌دهند که بیش از ۵۰٪ از مساحت اولیه خلیج گرگان طی این سال‌ها از دست رفته است. در این تحلیل کاهش مساحت خلیج به‌ویژه در سال‌های ۲۰۲۰، ۲۰۲۲ و ۲۰۲۳ مشهود بوده و در این سال‌ها بخش‌های وسیعی از نواحی غرب، جنوب و شمال خلیج به‌طور کامل خشک شده است. بررسی نقش پارامترهای دما، بارش، دبی، مساحت دریای خزر و تراز دریای خزر با کاهش مساحت آبی خلیج گرگان نشان داد که کاهش تراز آبی دریای خزر به‌عنوان مهم‌ترین عامل در خشک شدن خلیج گرگان شناخته شده است. ضریب همبستگی پیرسون بین مساحت خلیج و تراز آب دریای خزر بیش‌تر از $0/90-$ و ضریب تعیین برابر با $0/82$ محاسبه گردید که بیانگر رابطه قوی و معکوس بین این دو متغیر است، ارتباط سایر پارامترها شامل، مساحت آبی دریای خزر، دبی ورودی، بارش و دما با مساحت خلیج گرگان به ترتیب با ضرایب تعیین $0/43$ ، $0/40$ ، $0/19$ و $0/11$ بود که نشان می‌دهد دما کم‌ترین تأثیر را بر کاهش مساحت سطح خلیج گرگان دارد. علاوه بر این ضریب شاپلی نیز نشان داد که تراز آب دریای خزر دارای بیش‌ترین پراکندگی در سراسر محور افقی است که نشان‌دهنده نقش تراز آب بر مساحت سطح آب خلیج گرگان می‌باشد، سایر پارامترهای مورد بررسی، مانند دبی، مساحت آبی دریای خزر، دما و بارش نیز نقش قابل‌توجهی در این فرآیند داشته است. تحلیل رگرسیونی برای بررسی نقش پارامترهای مورد بررسی بر کاهش مساحت سطح آب خلیج گرگان بر اساس Coefficient Value نشان داد که تراز آب دریای خزر با ضریب $0/54$ نسبت به سایر متغیرها نقش بیش‌تری در خشک شدن خلیج گرگان دارد. در واقع، تراز آب دریای خزر بیش از ۵۰ درصد بیش‌تر از سایر ویژگی‌ها بر فرآیند خشک شدن خلیج گرگان تأثیرگذار بوده است. ضریب تأثیرگذاری (Feature Importance) در روش جنگل تصادفی نشان داد که تراز آب دریای خزر با ضریب $0/78$ ، مساحت دریای خزر با ضریب $0/14$ و دبی، دما و بارش با کم‌تر از $0/1$ به ترتیب بیش‌ترین تأثیر را بر خشک شدن خلیج گرگان بوده است. علاوه بر این بررسی تراز دریای خزر و مساحت سطح آب خلیج گرگان از سال ۲۰۰۰ تا ۲۰۲۳ نشان داد، کاهش مساحت آبی خلیج از ۴۰۰ کیلومترمربع در سال ۲۰۰۰ به ۲۶۰ کیلومترمربع در

سال ۲۰۲۳ رسیده است. ارتباط تنگاتنگی با کاهش تراز آب دریای خزر، که بیش از ۲ متر در طی ۲۳ سال اخیر کاهش یافته است، دارد. این تغییرات مستقیماً با مورفولوژی منطقه‌ای خلیج گرگان نیز در ارتباط می‌باشد، به‌ویژه کاهش عمق و تغییرات در شکل ساحلی این منطقه باعث تشدید فرآیند خشک شدن و کاهش مساحت آبی شده است.

نتیجه‌گیری: نتایج این پژوهش نشان داد که خلیج گرگان در بازه زمانی ۲۰۰۰ تا ۲۰۲۳ با چالش‌های جدی ناشی از کاهش سطح آب و کیفیت آب مواجه شده است. تحلیل‌های همبستگی و مدل‌های رگرسیونی نشان دادند که تراز آب دریای خزر به‌عنوان عامل اصلی در این تغییرات نقش دارد، به‌طوری‌که کاهش تراز آب با کاهش مساحت آبی خلیج ارتباط مستقیم و معنی‌داری دارد. یافته‌های این پژوهش نشان‌دهنده لزوم مدیریت پایدار منابع آبی و حفاظت از خلیج گرگان به‌عنوان یک اکوسیستم حساس در مواجهه با کاهش سطح آب و تغییرات کیفیت آب است.

استناد: یوسفی کبریا، علیرضا، نادى، مهدى (۱۴۰۴). ارزیابی تغییرات سطح و کیفیت آب خلیج گرگان با استفاده از داده‌های سنجش‌ازدور و هواشناسی. پژوهش‌های حفاظت آب و خاک، ۳۲ (۲)، ۱-۲۷.

DOI: 10.22069/jwsc.2025.23054.3773



© نویسندگان.

ناشر: دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی گرگان

مقدمه

با تسریع گرمایش جهانی و تشدید فعالیت‌های انسانی، نواحی آبی متعددی در سراسر جهان در حال کاهش سطح آب خود هستند. خشک شدن خلیج‌ها و نواحی آبی در سطح جهانی به یک معضل جدی تبدیل شده است (۲۱). بدنه‌های آبی عملکردهای اساسی بسیاری دارند که شامل تنظیم آب‌وهوای منطقه، مستندسازی تغییرات محیطی، حفظ تعادل اکوسیستم‌های منطقه‌ای و افزایش تنوع زیستی می‌شود (۶). این نواحی نه تنها خدمات اکولوژیکی متنوعی مانند تصفیه آب، تغذیه آبخوان، کاهش سیل، چرخه مواد مغذی و حفظ تنوع زیستی را ارائه می‌دهند، بلکه نقش‌های اجتماعی-اقتصادی مهمی از جمله تأمین محیط‌های زندگی، حمایت از کشاورزی و فراهم آوردن فضاهای تفریحی و آموزشی دارند. با این حال، بدنه‌های آبی و خلیج‌ها در سراسر جهان به دلیل تغییرات آب و هوایی و افزایش فعالیت‌های انسانی، از دست دادن و تخریب گسترده منطقه را تجربه کرده‌اند (۱۸). این تغییرات نه تنها بر اکوسیستم‌های محلی تأثیر می‌گذارد، بلکه پیامدهای اجتماعی و اقتصادی عمیقی نیز به همراه دارد (۲۳). کاهش اندازه خلیج‌ها منجر به کاهش کیفیت و کمیت منابع آب و در نتیجه مشکلات اکولوژیکی مانند شور شدن آب، بیابان‌زایی زمین و کاهش زیستگاه حیوانات می‌شود (۳). بنابراین، پیش‌گیری از تغییرات مکانی و زمانی در نواحی مناطق آبی برای حفاظت از اکولوژی منطقه و مدیریت مؤثر منابع آب، به‌ویژه در زمینه تغییرات اقلیمی و اختلالات فعالیت‌های انسانی، حیاتی و دارای اهمیت است (۷).

فناوری سنسور از دور به‌طور گسترده‌ای برای نظارت بر تغییرات در مناطق آبی به دلیل کارایی بالا، پوشش وسیع و هزینه اثربخشی آن مورد استفاده قرار می‌گیرد. این فناوری امکان بررسی نظارت مداوم بر مناطق آبی را در دهه‌های گذشته تا حال را فراهم

می‌کند. برنامه ماهواره‌ای امکان نظارت پیوسته بر تغییرات سطح آب دریاچه‌ها، تالاب‌ها، خلیج‌ها، رودخانه‌ها و منابع آبی را فراهم می‌کند (۲۴). این نظارت به شناسایی روندهای بلندمدت و تغییرات ناگهانی کمک می‌کند. بسیاری از برنامه‌های ماهواره‌ای مانند، سنجنده مودیس، لندست و سنتینل ۲، داده‌هایی از دهه‌های گذشته و سال‌های اخیر جمع‌آوری کرده‌اند که برای تحلیل تغییرات زمانی در مناطق آبی بسیار ارزشمند است (۳). این داده‌ها به پژوهش‌گران کمک می‌کند تا تأثیرات تغییرات اقلیمی و فعالیت‌های انسانی را بهتر درک کنند. علاوه بر این با استفاده از شاخص‌های ماهواره‌ای می‌توان درک بهتری در کیفیت مناطق آبی دست یافت (۲۶).

پژوهش‌های متعددی در زمینه کاهش منابع آبی و خشک شدن مناطق آبی صورت گرفته است، در پژوهشی تغییرات بلندمدت و فصلی پهنه آبی خلیج گرگان و ارتباط آن با بارش و تراز آب دریای خزر بررسی شده است. نتایج نشان می‌دهد، تغییرات پهنه آبی خلیج گرگان همبستگی بالایی (۰/۹۲) با نوسان‌های تراز آب دریای خزر و همبستگی متوسطی با بارش‌ها در بازه کوتاه‌مدت دارد (۱۲). در مطالعه‌ای به بررسی کاهش تراز آب دریای خزر و تأثیر آن بر الگوی جریان خلیج گرگان پرداخته شد. نتایج نشان می‌دهد که جریان کلی دریای خزر به‌صورت پادساعت‌گرد است و جریان‌های ناشی از باد در سواحل تأثیر زیادی بر الگوی جریان در خلیج دارد (۱۳). در پژوهشی به بررسی تغییرات سطح آب دریاچه ییلونگ واقع در فلات یونان-گویژو چین با استفاده از داده‌های چندمنبعی ماهواره‌ای از سال ۱۹۶۵ تا ۲۰۲۲ پرداخته شد، نتایج، کاهش ۸/۳۳ کیلومترمربعی سطح آب دریاچه را نشان می‌دهد، که عوامل مؤثر در این تغییرات شامل مدت‌زمان تابش آفتاب، جمعیت و مساحت اراضی زراعی بوده است

خلیج گرگان به‌عنوان یکی از خلیج‌های مهم دریای خزر، به‌ویژه در سال‌های اخیر، تحت تأثیر این تغییرات قرار گرفته است. این تغییرات ناشی از عوامل مختلفی از جمله تغییرات اقلیمی و فعالیت‌های انسانی است که موجب خشک شدن تدریجی آن شده‌اند (۱۲). کاهش تراز آب دریای خزر و افزایش تبخیر از یک‌سو، و همچنین فعالیت‌های انسانی مانند استخراج بی‌رویه آب از منابع آبی، آلودگی‌های ناشی از صنایع و کشاورزی، و تغییر کاربری زمین‌ها از سوی دیگر، چالش‌های جدی برای اکوسیستم خلیج گرگان به‌وجود آورده است.

برای بررسی این چالش‌ها و تحلیل دقیق‌تر تغییرات خلیج گرگان، مطالعات قبلی معمولاً براساس داده‌های ماهواره‌ای و استفاده از شاخص NDWI برای پایش سطح آب خلیج انجام شده‌است. این مطالعات به تحلیل تغییرات تراز آب دریای خزر و مساحت تالاب پرداخته، اما عمدتاً از یک ماهواره و یک شاخص برای ارزیابی سطح خلیج استفاده کرده و این روش‌ها بیش‌تر شامل فواصل زمانی محدودی می‌باشد. به همین دلیل، این روش‌ها قادر به ثبت برخی از تغییرات حیاتی در تکامل خلیج گرگان نبوده است. علاوه بر این، بسیاری از این پژوهش‌ها فاقد داده‌های مربوط به شاخص‌های کنترل کیفیت آب خلیج گرگان بوده است، درحالی‌که این داده‌ها برای ارزیابی وضعیت اولیه و روند تغییرات اکوسیستم خلیج ضروری است.

در این پژوهش علاوه بر بررسی شاخص‌های کنترل کیفیت و پایش مساحت آب خلیج گرگان، به بررسی متغیرهای مؤثر بر خشک شدن خلیج گرگان پرداخته می‌شود و با آنالیز و تحلیل پارامترهای هواشناسی شامل دما و بارش، دبی ورودی خلیج گرگان، تراز آبی دریای خزر و تغییرات آبی مساحت دریای خزر به بررسی نقش هر یک از این عوامل

(۳). در پژوهشی کیفیت آب، مساحت تالاب و تأثیر طوفان‌های گردوغبار بر تالاب شادگان در ایران طی سال‌های ۲۰۱۸ تا ۲۰۲۳ با استفاده از داده‌های ماهواره‌ای بررسی شده است. نتایج نشان‌دهنده چالش‌های جدی این تالاب، از جمله افزایش آلودگی آب به‌ویژه در سال‌های ۲۰۲۲ و ۲۰۲۳ است. شاخص‌های کیفیت آب، مانند دما، کدورت و سطح CDOM، به‌طور قابل‌توجهی افزایش یافته‌اند و دماهای آب به ۵۲ درجه سانتی‌گراد رسیده است (۲۶). در بررسی‌ای که بر روی تالاب گاوخونی با استفاده از تصاویر ماهواره‌ای لندست در دوره ۱۳۶۵ تا ۱۳۹۸ شد، نتایج نشان داد که در سال ۱۳۹۱-۱۳۹۲، سطح آبدار تالاب به کم‌تر از ۱۰ درصد کاهش یافته و از آن زمان تا سال ۱۳۹۷-۱۳۹۸، کاملاً خشک شده است (۱۵). پژوهش‌های انجام شده بر روی رودخانه کارون طی دوره‌های زمانی ۱۳۶۴ تا ۱۳۹۴ بیانگر آن است که در دوره پس از گرمایش جهانی (۱۳۷۵-۱۳۹۴) نسبت به دوره قبل از آن (۱۹۸۵-۱۹۹۵)، دبی رودخانه به میزان ۱۷۱ مترمکعب در ثانیه کاهش یافته است (۵). در پژوهش دیگری بر روی بستر دریاچه ارومیه کاهش معنی‌دار سطح آب دریاچه ارومیه از سال ۱۳۷۹ تا ۱۳۹۴ مشاهده شد (۴). درمجموع، این پژوهش‌ها نشان‌دهنده چالش‌های جدی بر منابع آبی است و ضرورت اقدامات فوری برای حفاظت و مدیریت منابع آب را تأکید می‌کند.

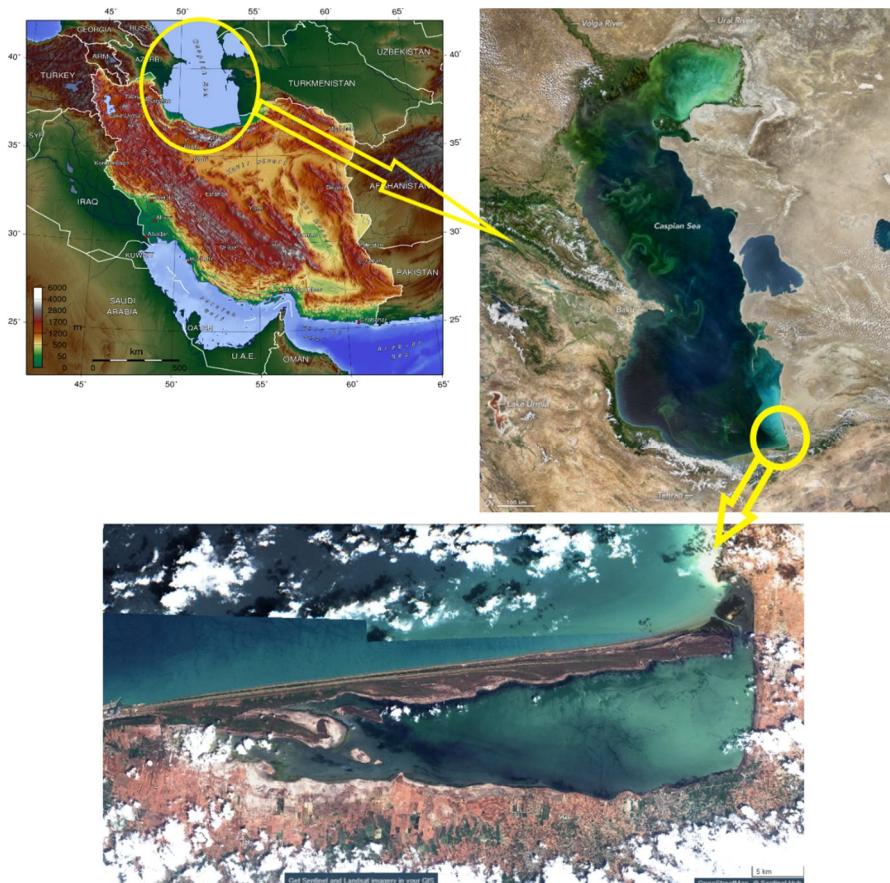
دریای خزر به‌عنوان بزرگ‌ترین دریاچه جهان، به‌دلیل وسعت و ویژگی‌های خاص خود، تأثیرات قابل‌توجهی بر اکوسیستم‌های اطراف خود دارد. این دریاچه در قرن بیستم شاهد تغییرات قابل‌توجهی در تراز آب خود بوده است، به‌طوری‌که در برخی مقاطع زمانی، تراز آب دریای خزر به میزان ۳ متر کاهش یافته است که این تغییرات تأثیرات عمیقی بر تالاب‌ها و خلیج‌های متعددی که در سواحل آن قرار دارند، گذاشته است (۲).

جنوب تا جنوب شرقی و شرق با استان‌های گلستان و مازندران به ترتیب در سه حوزه شهرستان بندرترکمن، بندرگز و بهشهر و از غرب با اراضی کشاورزی زاغمرز و نواحی صنعتی شیلاتی و مراکز تجاری امیرآباد و از طریق دهانه‌های در قسمت شمال شرقی با دریای خزر در ارتباط است. حدود ۲۵ رود و نهر کوچک از دامنه شمالی البرز وارد خلیج گرگان می‌شوند، بنابراین اکولوژی این بدنه آبی تحت تأثیر دریای خزر، رودهای مجاور و شبه‌جزیره میانکاله قرار گرفته است (۲۵).

با استفاده از ماهواره‌های مختلف سنجش‌ازدوری پرداخته می‌شود.

مواد و روش‌ها

خلیج گرگان با مساحتی بیش از ۴۰۰ کیلومترمربع، بزرگ‌ترین خلیج دریای خزر در سواحل جنوبی این دریا است که طول حدود ۶۰ کیلومتر و عرض حدود ۱۲ کیلومتر دارد. و عمق آن به‌طور تقریبی بین ۱ تا ۶ متر متغیر است. خلیج گرگان خلیج گرگان در مختصات جغرافیایی بین ۳۶ تا ۳۷ درجه شمالی و ۵۳ تا ۵۴ درجه شرقی قرار دارد که در شکل ۱ قابل مشاهده است. از شمال با شبه‌جزیره میانکاله، از



شکل ۱- موقعیت جغرافیایی خلیج گرگان و دریای خزر.

Figure 1. The geographical location of Gorgan Bay and the Caspian Sea.

می‌رود. این ماهواره‌ها به پژوهش‌گران در جمع‌آوری داده‌های دقیق برای مدیریت منابع طبیعی و حفاظت از محیط زیست یاری می‌رساند (۸).

کنترل کیفیت آب: در این پژوهش، برای محاسبه شاخص‌های کیفیت آب (از جمله دمای سطح آب، کدورت و CDOM) از تصاویر ماهواره‌ای Landsat 8 سطح ۲ استفاده شده است. تمامی مراحل پردازش و محاسبه شاخص‌ها با استفاده از Google Earth Engine (GEE) و بر اساس کدنویسی انجام شده است.

شاخص دمای سطح آب (Sea Surface Temperature) با استفاده از تصاویر ماهواره‌ای Landsat 8 و باند حرارتی ST_B10 محاسبه می‌شود. دمای آب^۴ به شدت بر فعالیت‌های زیستی ارگانیسم‌های آبی تأثیر می‌گذارد. دمای آب معمولاً بین ۰ تا ۳۰ درجه سلسیوس اندازه‌گیری می‌شود، اگرچه در برخی محیط‌ها ممکن است این مقادیر متفاوت باشد که از طریق رابطه ۱ محاسبه می‌شود.

$$T_B = \frac{K_2}{\ln\left(\frac{K_1}{L_\lambda} + 1\right)} \quad (1)$$

که در رابطه ۱، T_B دمای روشنایی بر حسب کلونین، K_1 و K_2 ثابت‌های کالیبراسیون (از متادیتای تصویر که به ترتیب برابر ۷۷۴/۸۸۵۳ و ۱۳۲۱/۰۷۸۹ می‌باشند) بر حسب وات بر مترمربع بر استر بر میکرومتر ($W m^{-2} sr^{-1} \mu m^{-1}$) و L_λ تابش طیفی بر حسب وات بر مترمربع بر استر بر میکرومتر می‌باشد، در ادامه با تبدیل دمای روشنایی به دمای سطح آب (درجه سانتی‌گراد)، با استفاده از رابطه ۲ محاسبه می‌شود (۲۲).

$$SST = T_B - 273.15 \quad (2)$$

4- Water Temperature

داده‌های مورد استفاده: در این پژوهش، به منظور بررسی پارامترهای هواشناسی مانند دما و بارش، از داده‌های ایستگاه هواشناسی سینوپتیک گرگان (هاشم‌آباد، که دارای داده‌های کامل و بلند مدت بوده) واقع در استان گلستان استفاده شد. این ایستگاه در محدوده خلیج گرگان قرار دارد و داده‌ها برای سال‌های آماری ۲۰۰۰ تا ۲۰۲۳ جمع‌آوری گردید. همچنین، برای تجزیه و تحلیل دبی رودخانه‌های منتهی به خلیج گرگان، از داده‌های سازمان‌های آب منطقه‌ای استان‌های گلستان و مازندران استفاده شد. برای بررسی مساحت پهنه آبی خلیج گرگان و دریای خزر، همچنین شاخص‌های کیفیت آب خلیج گرگان و تراز آب دریای خزر، از داده‌های ماهواره‌ای متنوعی استفاده شد. این داده‌ها شامل تصاویر و اطلاعات ماهواره‌های مودیس^۱، لندست^۲، جیسون^۳ ۱ و ۳ می‌باشد. این رویکرد چندوجهی این امکان درک بهتر از تغییرات محیطی و تأثیرات آن بر کیفیت و کمیت آب و اکوسیستم‌های آبی در خلیج گرگان فراهم می‌کند.

داده‌های ماهواره‌ای: ماهواره‌های مودیس به عنوان ابزارهای کلیدی در پایش محیط زیست و اقلیم شناخته می‌شوند که توسط NASA و NOAA طراحی شده‌اند، تصاویر با وضوح متوسطی را در باندهای مختلف ارائه می‌دهند و اطلاعاتی درباره دما، برف، گردوغبار و گیاهان را فراهم می‌کند (۲۰). لندست، پروژه‌ای مشترک بین NASA و USGS، تصاویر با وضوح بالا (تا ۳۰ متر) را برای پایش تغییرات کاربری اراضی و منابع طبیعی فراهم می‌کند. ماهواره‌های جیسون ۱ و ۳ برای پایش تراز آب دریا و اندازه‌گیری تغییرات سطح آب اقیانوس‌ها به کار

- 1- MODIS (Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer)
- 2- Landsat
- 3- Jason 1-3

جانوری ناشی می‌شوند و می‌توانند از طریق فعالیت‌های کشاورزی و تخلیه فاضلاب شهری و صنعتی به آب‌ها وارد شوند (۱۷). که از رابطه ۴ نسبت بازتابندگی در باند Coastal Aerosol (SR_B1) به باند سبز (SR_B3) را محاسبه می‌کند. هرچه این نسبت بیش‌تر باشد، غلظت مواد آلی حل‌شده رنگی (CDOM) بیش‌تر است.

$$CDOM = \frac{SR_B1(Coastal\ Aerosol)}{SR_B3(Green)} \quad (4)$$

در مجموع، این شاخص‌ها به ما کمک می‌کنند تا وضعیت کیفیت آب را ارزیابی کرده و تأثیرات ناشی از تغییرات محیطی و فعالیت‌های انسانی را در اکوسیستم‌های آبی شناسایی شود. در جدول ۱ محدوده شاخص‌های مربوط به کنترل کیفیت آب مشخص شده است. هم‌چنین شاخص‌های فوق با استفاده از ماهواره لندست و کد نویسی در سامانه گوگل ارث انجین به‌دست آمد (۱۱).

کدورت (Turbidity) نیز به عنوان یک شاخص مهم برای ارزیابی کیفیت آب شناخته می‌شود و به درجه کدورت یا روشنی آب اشاره دارد. این پارامتر به‌طور غیرمستقیم وجود ذرات معلق مانند رسوبات و فیتوپلانکتون را نشان می‌دهد و معمولاً با استفاده از تکنیک‌های اپتیکی یا تصاویری از ماهواره اندازه‌گیری می‌شود. کدورت با استفاده از نسبت بازتابندگی در باندهای مختلف تصاویر ماهواره‌ای Landsat 8 و رابطه ۳ محاسبه می‌شود.

$$Turbidity = \frac{SR_B3(Green)}{SR_B2(Blue)} \quad (3)$$

که در رابطه ۳، SR_B3 انعکاس طیفی در باند سبز و SR_B2 بازتابندگی در باند آبی می‌باشد (۱۰)، که هرچه این نسبت بیش‌تر باشد، آب کدرتر است.

مواد آلی حل‌شده رنگی (CDOM) به ترکیبات آلی طبیعی و مصنوعی اشاره دارد که در آب حل شده و قادر به جذب نور در محدوده‌های طیفی خاص هستند. این مواد عمدتاً از تجزیه مواد آلی گیاهی و

جدول ۱- حدود طبقات مختلف شاخص‌های آلودگی آب Turbidity و CDOM.

Table 1. Different Level of water pollution indicators Turbidity and CDOM.

شاخص کدورت Turbidity Index	شاخص مواد آلی CDOM Index	سطوح نگرانی Levels of Concern
0-1	0-0.5	خوب Good
1-5	0.5-1.5	متوسط Moderate
5-10	1.5 <	ناسالم Unhealthy

این شاخص از اختلاف بین باندهای سبز (Green) و مادون قرمز میانی (Middle-Infrared) استفاده می‌کند و به عنوان یک شاخص برای تفکیک آب از سایر اشیاء مانند خاک و گیاهان استفاده می‌شود و با استفاده

شاخص طیفی MNDWI و NDWI: شاخص MNDWI¹ برای تشخیص مناطق آبی در تصاویر ماهواره‌ای و تصاویر سنجنش از دور استفاده می‌شود.

1- Modified Normalized Difference Water Index

در این مطالعه، برای تحلیل اهمیت ویژگی‌ها و درک نحوه تأثیر آنها بر مساحت خلیج گرگان، از نمودارهای SHAP^۱ استفاده شد. این روش، مقادیر ضریب شاپلی را برای هر ویژگی محاسبه می‌کند و تأثیر مثبت یا منفی هر ویژگی بر خروجی مدل را به صورت عددی نشان می‌دهد. با استفاده از کتابخانه SHAP در پایتون، مقادیر شاپلی برای هر نمونه و ویژگی محاسبه شد و سپس یک نمودار خلاصه SHAP رسم گردید. این نمودار امکان بررسی میزان تأثیرگذاری و جهت اثرگذاری (مثبت یا منفی) هر ویژگی را فراهم می‌کند، که به ویژه در شناسایی ویژگی‌های کلیدی و درک رفتار تأثیرگذاری پارامترها موثر می‌باشد.

برای بررسی ارتباط خطی بین متغیرهای ورودی و مساحت خلیج گرگان، از مدل رگرسیون خطی^۲ استفاده شد. این مدل به عنوان یک تکنیک ساده و قابل تفسیر برای تحلیل داده‌ها به کار رفت تا ضرایب تأثیر هر ویژگی بر خروجی مشخص شود. مدل رگرسیون خطی با استفاده از داده‌های مقیاس‌بندی شده آموزش داده شد و ضرایب رگرسیون به عنوان نماینده‌ای از اهمیت هر ویژگی محاسبه گردید. سپس این ضرایب به صورت نمودار نمایش داده شد تا بتوان میزان تأثیر و اهمیت هر متغیر را در تغییرات مساحت خلیج گرگان تحلیل کرد. استفاده از این مدل، دید روشنی از اثرگذاری مستقیم و خطی متغیرها بر تغییرات منطقه مورد مطالعه ارائه می‌دهد و به شناسایی عوامل کلیدی کمک می‌کند.

برای ارزیابی تأثیر و اهمیت ویژگی‌هایی شامل، تراز آب دریای خزر، مساحت دریای خزر، بارش، دما و دبی ورودی به خلیج گرگان بر مساحت خلیج گرگان، از مدل رگرسیون جنگل تصادفی^۳ نیز استفاده

از رابطه ۵ محاسبه می‌شود. در این رابطه، Green بیانگر شدت نور در باند سبز تصویر است و Middle Infrared بیانگر شدت نور در باند مادون قرمز میانه تصویر است (۹).

همچنین برای محاسبه تغییرات در مساحت آبی حوضه آبریز، از شاخص تفاوت نرمال شده آب (NDWI) به عنوان فرمولی برای تغییرات فضایی و زمانی سطح حوضه آبریز در بازه زمانی مشخص شده استفاده می‌شود، که به صورت رابطه ۶ می‌باشد (۲۴). هر دو شاخص MNDWI و NDWI با استفاده از کدنویسی در سامانه گوگل ارث انجین محاسبه شد و تصاویر مربوط به پهنه‌های آبی در این سامانه استخراج گردید، که به ترتیب از رابطه ۵ و ۶ محاسبه می‌شود.

$$MNDWI = \frac{(Green + Middle\ Infrared)}{(Green + Middle\ Infrared)} \quad (5)$$

$$NDWI = \frac{(Green - NIR)}{(Green + NIR)} \quad (6)$$

ارزیابی رابطه بین متغیرها: برای بررسی ارتباط بین پارامترهای هواشناسی و ماهواره‌ای با مساحت آب خلیج گرگان، از ضریب همبستگی پیرسون (r) استفاده شد. ضریب همبستگی پیرسون بین بازه ۱- و ۱ قرار می‌گیرد. مقدار r برابر با ۱ نشان‌دهنده یک رابطه خطی مستقیم کامل بین دو متغیر است، به این معنی که اگر یک متغیر افزایش (کاهش) یابد، دیگری نیز هم‌زمان افزایش (کاهش) می‌یابد (۲۵). در این معادله، x و y متغیرهایی هستند که همبستگی آنها مورد بررسی قرار می‌گیرد و n تعداد جفت داده‌هایی است که مقایسه می‌شوند (یوسفی کبریا و همکاران، ۲۰۲۲)، که از رابطه ۷ به دست می‌آید.

$$r = \frac{n(\sum xy) - (\sum x)(\sum y)}{\sqrt{[n(\sum x^2) - (\sum x)^2][n(\sum y^2) - (\sum y)^2]}} \quad (7)$$

1- Shapley Additive explanations
2- Linear Regression
3- Random Forest Regression

به‌ویژه اطراف میانکاله، دمای بالاتری نسبت به سایر نقاط داشتند، اما در مجموع تغییرات دمایی غیرمعمول یا ناهنجاری قابل‌توجهی مشاهده نشد. با این‌حال، سال ۲۰۲۳ اوج تنش دمایی در خلیج گرگان بود. این سال شاهد دمای حداکثری در بخش‌های شرقی، نواحی ورودی‌های جنوبی و شمالی و حتی برخی مناطق غربی خلیج بود. در مقابل، بخش‌های مرکزی خلیج، که به‌دلیل ویژگی‌های فیزیکی مانند جریان‌های آبی و اختلاط کم‌تر دمایی متفاوتی داشتند، تغییرات کم‌تری نشان دادند. به‌طورکلی، روند گرم شدن آب در سراسر خلیج محسوس بود. افزایش دمای سطح آب خلیج گرگان می‌تواند به ترکیبی از عوامل طبیعی و انسانی مرتبط باشد. پدیده گرمایش جهانی یکی از عوامل کلیدی افزایش دمای سطح آب است. تخلیه آب گرم از صنایع و نیروگاه‌ها به داخل خلیج می‌تواند موجب افزایش دمای آب شود. همچنین، کاهش پوشش گیاهی طبیعی اطراف خلیج و تخریب اکوسیستم‌های بومی منجر به افزایش تبخیر و افزایش دمای آب می‌شود (۲۷، ۱۴). از سوی دیگر، استفاده بی‌رویه از منابع آبی خلیج برای مقاصد کشاورزی می‌تواند حجم آب را کاهش دهد و منجر به افزایش دمای آب باقی‌مانده شود. این افزایش دما، پیامدهای ناگواری برای اکوسیستم آبی خلیج به همراه دارد. دماهای بالاتر باعث کاهش میزان اکسیژن محلول در آب می‌شود که برای بقای آبزیان ضروری است. شرایط گرم‌تر می‌تواند رشد جلبک‌ها و فیتوپلانکتون‌ها را تسریع کند که ممکن است منجر به شکوفایی‌های مضر جلبکی شود (۱۶). این پدیده می‌تواند تنوع زیستی را تهدید کرده و گونه‌های حساس را به مرگ یا مهاجرت به مکان‌های دیگر مجبور کند. علاوه بر این، افزایش تبخیر و کاهش سطح آب می‌تواند منابع آبی موجود برای کشاورزی و آشامیدنی را نیز کاهش دهد، که این امر خود تهدیدی برای امنیت غذایی و

شد. این مدل از مجموعه‌ای از درختان تصمیم‌گیری برای خروجی استفاده می‌کند و اهمیت هر ویژگی را بر اساس میزان مشارکت آن در کاهش خطای مدل ارزیابی می‌کند. با رسم نمودار اهمیت ویژگی‌ها، میزان تأثیر هر متغیر بر مساحت خلیج گرگان مشخص شد. این تحلیل به شناسایی ویژگی‌های مؤثرتر و بررسی تأثیر آن‌ها در مقایسه با سایر ویژگی‌ها کمک می‌کند، که در نهایت به درک بهتر از عوامل تأثیرگذار بر تغییرات منطقه مورد مطالعه منجر می‌شود.

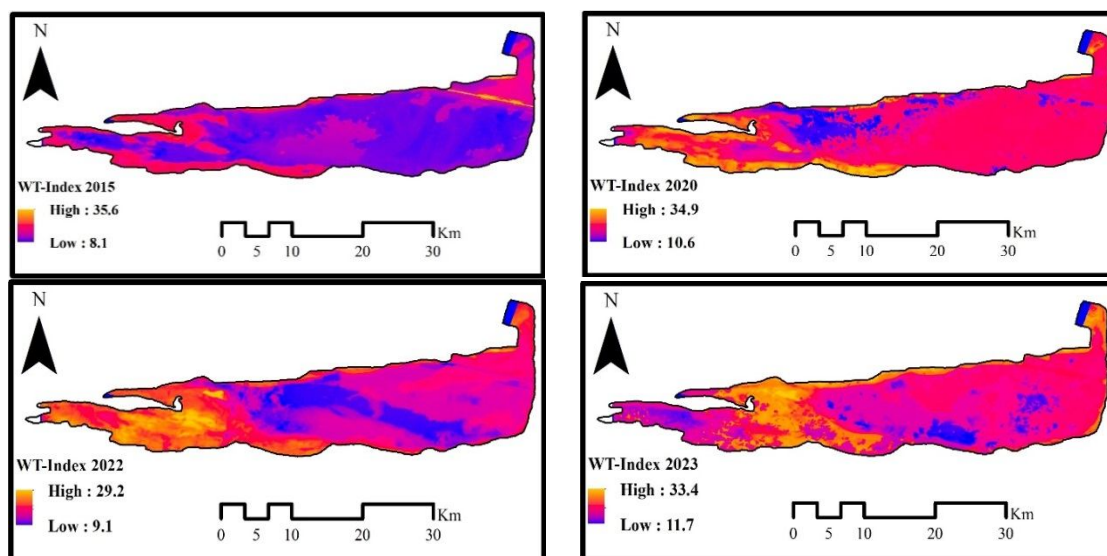
نتایج و بحث

بررسی شاخص کیفیت آب

شاخص دمای آب: نقشه شاخص دمای سطح آب خلیج گرگان طی سال‌های ۲۰۱۵ تا ۲۰۲۳، که در شکل ۲ با فاصله زمانی پنج ساله ارائه شده است، تغییرات قابل‌توجهی را در این بازه زمانی نشان می‌دهد. براساس این نقشه‌ها، در سال ۲۰۱۵ میانگین دمای سالانه خلیج گرگان به حالت نرمال و پایدار بود و هیچ تغییرات دمایی قابل‌توجهی یا آنومالی دمایی مشهودی مشاهده نمی‌شد. دمای بخش‌های مرکزی نیز در محدوده مناسبی قرار داشت که نشان‌دهنده ثبات زیست‌محیطی در آن زمان است. اما در سال ۲۰۲۰، وضعیت تغییر یافت و بخش‌های جنوبی، غربی، و بخش کوچکی از شمال خلیج، به‌ویژه در مناطق مجاور میانکاله، با تنش دمایی مواجه شدند. طی این پنج سال، دمای حداقل آب خلیج به‌طور متوسط ۲/۳ درجه افزایش یافته و مساحت مناطقی که دمای حداقل داشتند، به‌طور چشمگیری کاهش پیدا کرد. این تغییرات می‌تواند به‌دلیل افزایش فعالیت‌های کشاورزی در حاشیه خلیج و ورود سموم شیمیایی و همچنین کاهش سطح آب خلیج باشد، که خود ناشی از برداشت بیش از حد آب برای مصارف کشاورزی است. در سال ۲۰۲۲، مناطق غربی خلیج گرگان،

آلودگی‌های کشاورزی و صنعتی و حفاظت از اکوسیستم‌های اطراف خلیج را نمایان می‌سازد.

معیشت جوامع محلی محسوب می‌شود. به‌طورکلی، افزایش تنش دمایی خلیج گرگان در سال‌های اخیر، ضرورت اقدام فوری برای مدیریت منابع آبی، کاهش



شکل ۲- نقشه شاخص میانگین دمای سطح آب سالانه خلیج گرگان طی سال‌های ۲۰۲۳-۲۰۱۵.

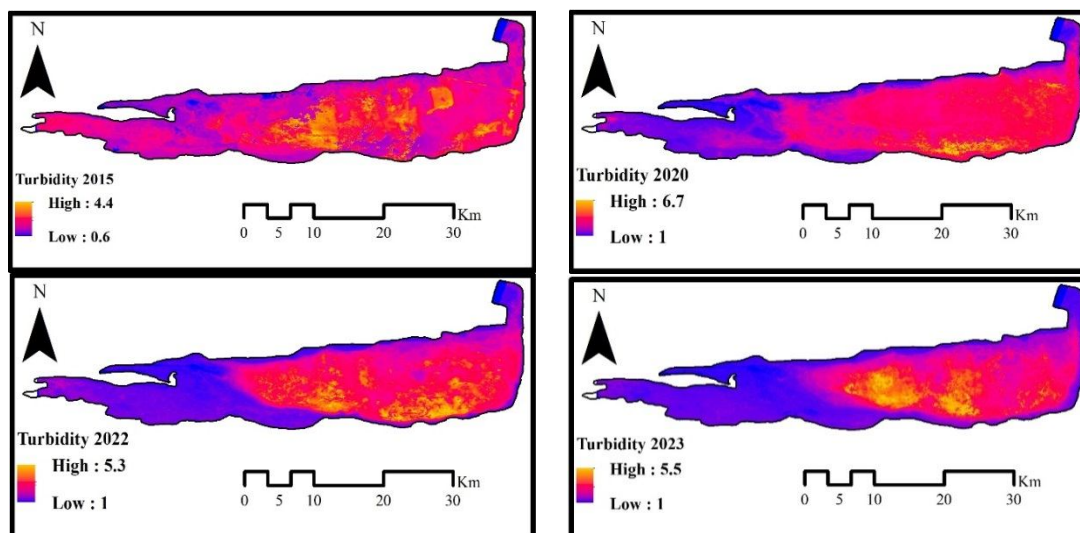
Figure 2. Map of the Water Temperature Index of Gorgan Bay during the years 2015-2023.

افزایش شدید کدورت عمدتاً به دلیل ورود گسترده سموم و مواد شیمیایی کشاورزی به آب خلیج رخ داده است که تأثیرات مخربی بر سلامت آبزیان و کیفیت آب بر جای گذاشته است. در سال ۲۰۲۲، آلودگی و افزایش شاخص کدورت با گسترش بیشتری در مناطق مرکزی و جنوبی خلیج مشاهده شد، به‌طوری‌که این مناطق به‌طور گسترده‌تری نسبت به سال‌های پیشین دچار آلودگی شدند و تقریباً تمامی مناطق جنوبی خلیج در معرض تهدیدات جدی قرار گرفتند. روند افزایشی آلودگی تا سال ۲۰۲۳ ادامه یافت و حتی شدت بیشتری پیدا کرد، به‌نحوی‌که بخش‌های وسیعی از مرکز خلیج و همچنین مناطق جنوبی و شرقی به شدت تحت‌تأثیر قرار گرفتند. این امر بار دیگر نشان‌دهنده افزایش ورود آلاینده‌های کشاورزی به خلیج و ضعف مدیریت زیست‌محیطی منطقه است. بیش‌ترین میزان آلودگی در سال‌های اخیر

شاخص کدورت: نتایج تحلیل نقشه شکل ۳ نشان می‌دهد که شاخص کدورت آب خلیج گرگان طی هشت سال اخیر به‌طور مداوم افزایش یافته است. این روند نگران‌کننده، وضعیت خلیج را به مراتب وخیم‌تر کرده و آن را با تهدیدی جدی مواجه ساخته است. در سال ۲۰۱۵، بیش‌تر مناطق خلیج از نظر شاخص کدورت در وضعیت مطلوب قرار داشتند و تنها بخش‌های مرکزی و شرقی خلیج نشانه‌هایی از کدورت متوسط و سطح قابل‌قبولی از آلودگی را نشان می‌دهد. با این‌حال، در سال ۲۰۲۰ شرایط به طرز چشمگیری تغییر کرد و خلیج گرگان، به ویژه در بخش‌های جنوبی و شرقی، با افزایش قابل‌توجه شاخص کدورت مواجه شد. این سال بالاترین میزان آلودگی را در مقایسه با سال‌های پیشین تجربه کرد و بخش‌های جنوبی خلیج، که مجاورت نزدیکی با اراضی کشاورزی دارند، به اوج آلودگی رسیدند. این

انسان‌ها و حیات وحش این منطقه به همراه دارد. این وضعیت نشان‌دهنده نیاز فوری به اقدامات جامع برای کنترل ورود آلاینده‌ها به خلیج گرگان است. همچنین، ضرورت بازنگری در شیوه‌های کشاورزی و مدیریت منابع آلودگی را آشکار می‌کند.

مربوط به سال ۲۰۲۰ بود و آلوده‌ترین مناطق به طور مداوم در بخش‌های جنوبی خلیج دیده شده‌اند. این روند افزایشی کدورت آب نه تنها به تهدیدی جدی برای اکوسیستم‌های آبی خلیج گرگان تبدیل شده، بلکه خطرات جدی و غیرقابل جبرانی برای سلامت



شکل ۳- نقشه شاخص کدورت خلیج گرگان طی سال‌های ۲۰۱۵-۲۰۲۳.

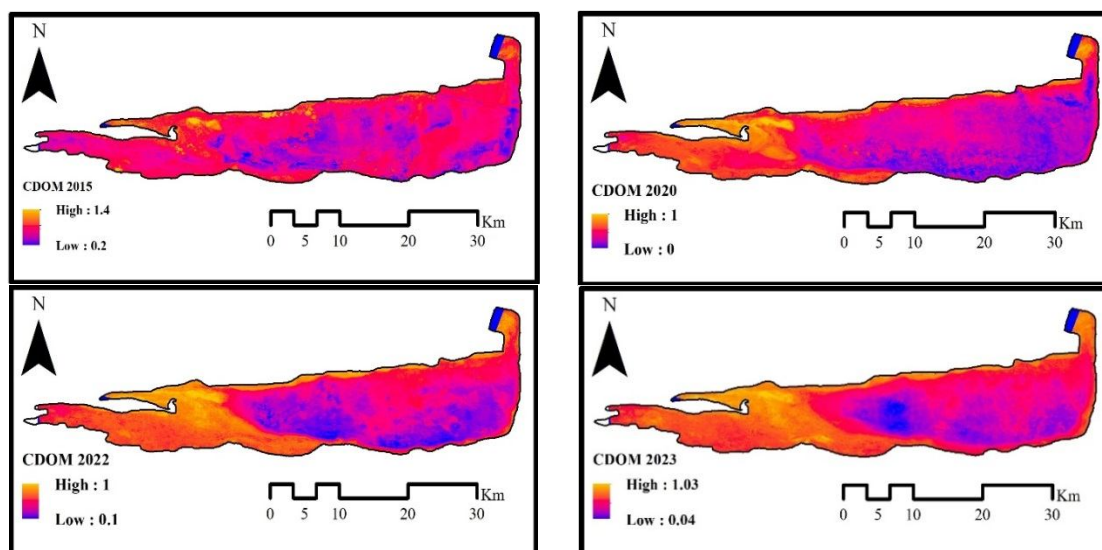
Figure 3. Map of the Turbidity Index of Gorgan Bay during the years 2015-2023.

آلودگی‌های صنعتی و کشاورزی، و عدم مدیریت صحیح منابع آب باشد (۲۶). افزایش شاخص مواد آلی محلول رنگی (CDOM) نشانگر ورودی‌های قابل توجهی از مواد آلی به سیستم‌های آبی است که از طریق فرآیندهای پیچیده تجزیه و تحلیل می‌رود. این فرآیندها از تجزیه برگ‌ها و شاخه‌های گیاهان، همراه با سایر مواد گیاهی که به خلیج ریخته می‌شود، آغاز می‌شود. این مواد آلی به واسطه فعالیت‌های میکروبی و شیمیایی، تجزیه می‌گردد و نتیجه آن، افزایش قابل توجه CDOM در آب است. بارندگی‌ها نیز نقش کلیدی در انتقال این مواد از خاک‌ها و پوشش‌های گیاهی به رودخانه‌ها و خلیج‌ها دارد، به طوری که سیلاب‌ها به عنوان واسطه‌ای برای شستن و افزایش سطح مواد آلی محلول عمل می‌کنند. همچنین،

شاخص کیفیت آب: بر اساس نقشه شاخص CDOM خلیج گرگان که در شکل ۴ ارائه شده است، کیفیت آب خلیج در سال‌های ۲۰۲۰، ۲۰۲۲ و ۲۰۲۳ در وضعیت مناسبی قرار داشته و هیچ آلودگی معناداری مشاهده نشده است. این دوره زمانی نشان‌دهنده بهبود کیفیت آب و کاهش عوامل آلاینده است که می‌تواند ناشی از اقدامات حفاظتی یا تغییرات در الگوهای مصرف و تخلیه آب باشد. در سال ۲۰۱۵ کیفیت آب نسبت به دوره‌های اخیر بالاتر بوده، اما همچنان در کلاس ناسالم قرار نگرفته است، و فقط بخش‌های کوچکی از مناطق غربی خلیج گرگان، به ویژه در مناطق اطراف تالاب میانکاله، در آستانه شرایط ناسالم و نامطلوب قرار داشته است. این وضعیت می‌تواند ناشی از فعالیت‌های انسانی، ورود

آبی وارد می‌نماید که باعث پیچیده‌تر شدن این مسأله می‌شود. افزایش شاخص CDOM اثرات جدی بر کیفیت آب دارد. این مواد می‌توانند با فلزات سنگین و دیگر آلاینده‌ها واکنش داده و به شکل‌گیری مشکلات زیست‌محیطی منجر شود (۲۶). علاوه بر این، CDOM میزان نفوذ نور به لایه‌های عمیق‌تر آب را کاهش می‌دهد، که این امر به‌طور مستقیم فرآیندهای فتوسنتزی و فعالیت‌های زیستی آبزیان را تحت‌تأثیر قرار می‌دهد.

فعالیت‌های زیستی در خود خلیج مانند تجزیه مواد آلی توسط باکتری‌ها و دیگر میکروارگانیسم‌ها، موجب تشدید این روند می‌شود. اما تأثیرات انسانی نیز نمی‌تواند نادیده گرفته شود. تخلیه فاضلاب‌های شهری و صنعتی، که غالباً حاوی مقادیر زیادی از مواد آلی محلول هست، به‌طور مستقیم به افزایش CDOM در آب‌های سطحی کمک می‌کند. در عین حال، استفاده از کودها و آفت‌کش‌های شیمیایی در بخش کشاورزی، ورودی بیشتری از مواد آلی را به منابع



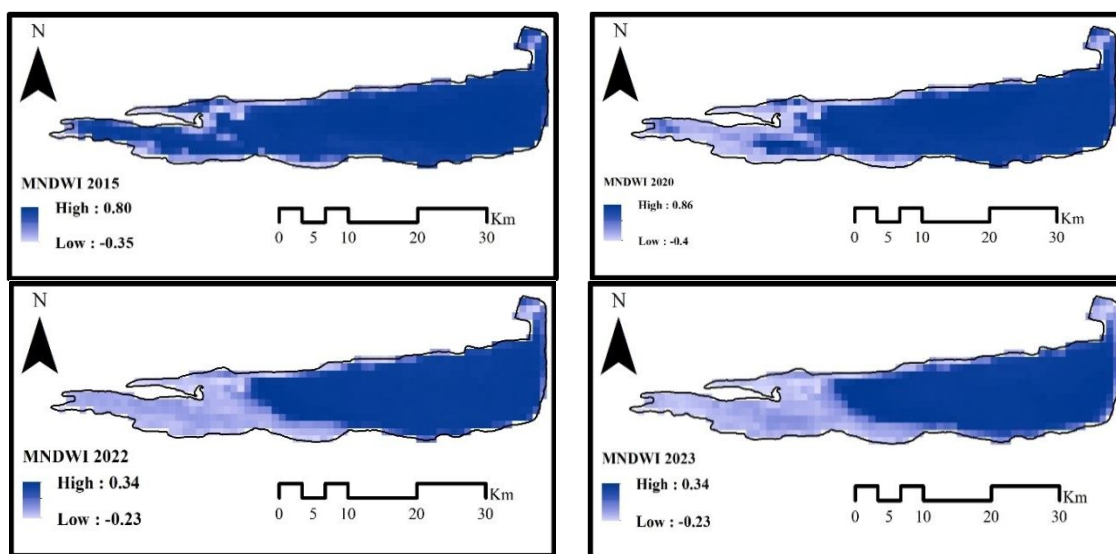
شکل ۴- نقشه شاخص CDOM خلیج گرگان طی سال‌های ۲۰۱۵-۲۰۲۳.
Figure 4. Map of the CDOM Index of Gorgan Bay during the years 2015-2023.

مرکزی آن باقی مانده است. در سال ۲۰۱۵، شرایط آبی خلیج گرگان براساس شاخص‌های MNDWI و NDWI به مراتب بهتر بوده و پهنه آبی گسترده‌تری را در مقایسه با سال‌های بعد به‌ویژه ۲۰۲۳ حفظ کرده بود. با این حال، طی این سال‌ها، روند مستمر کاهش آب به اوج خود رسید و خلیج به وضعیت بحرانی و ناپایدار فعلی رسیده است. در سال ۲۰۲۳، بخش‌های وسیعی از غرب، جنوب و حتی نواحی شمالی خلیج کاملاً خشک شده‌اند و این تغییرات به وضوح در شکل‌های ۵ و ۶ دیده می‌شود. یکی از مسائل بحرانی

شاخص MNDWI و NDWI: تغییرات مساحت آبی خلیج گرگان طی سال‌های اخیر (۲۰۱۵ تا ۲۰۲۳) با استفاده از شاخص‌های MNDWI و NDWI به‌طور تصویری نمایش داده شده است. همان‌طور که در شکل‌های ۵ و ۶ مشخص است، طی این بازه زمانی، خلیج گرگان به‌ویژه در سال‌های ۲۰۲۰، ۲۰۲۲ و ۲۰۲۳ دچار روند شدید کاهش پهنه آبی شده و به خشک‌ترین حالت خود رسیده است. تحلیل داده‌ها نشان می‌دهد که بیش از ۵۰ درصد از مساحت اولیه خلیج از دست رفته و در حال حاضر تنها بخش‌های

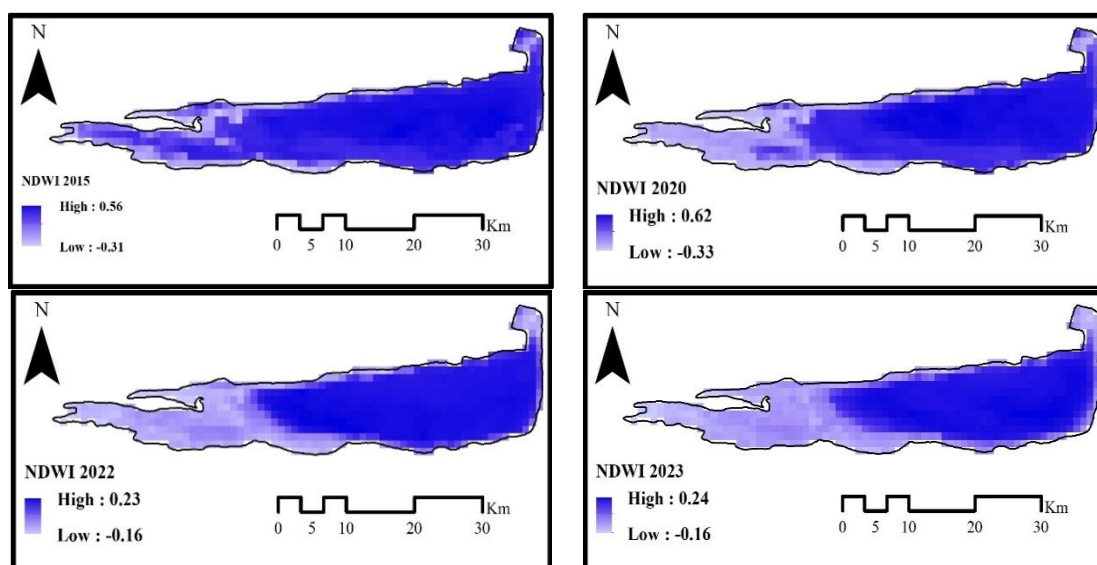
خواهد داشت. این تغییرات شدید بیانگر آن است که عوامل اقلیمی مانند کاهش تراز آب دریای خزر و تغییرات آب و هوایی تأثیرات مخربی بر پهنه‌های آبی خلیج گرگان گذاشته است. ادامه این وضعیت می‌تواند منجر به از بین رفتن کامل این زیست‌بوم مهم شده و ضرورت اقدام فوری برای احیای خلیج گرگان و بازسازی ارتباط آن با دریای خزر را بیش از پیش نمایان می‌کند.

مشاهده شده، کاهش تدریجی کانال ارتباطی میان دریای خزر و خلیج گرگان است. این کانال که از سال ۲۰۱۵ تاکنون کم و کم‌تر شده، در نهایت در سال‌های ۲۰۲۲ و ۲۰۲۳ به‌طور کامل از بین رفته است. قطع این کانال ارتباطی نه تنها بر روی اکوسیستم آبی و حیات وحش خلیج تأثیر گذاشته، بلکه موجب شده تا خلیج گرگان به سمت خشک شدن پیش برود و این روند کاهش آب در سال‌های آتی نیز به احتمال فراوان ادامه



شکل ۵- نقشه شاخص MNDWI خلیج گرگان طی سال‌های ۲۰۲۳-۲۰۱۵.

Figure 5. Map of the MNDWI Index of Gorgan Bay during the years 2015-2023.



شکل ۶- نقشه شاخص NDWI خلیج گرگان طی سال‌های ۲۰۲۳-۲۰۱۵.

Figure 6. Map of the NDWI Index of Gorgan Bay during the years 2015-2023.

نقش حیاتی در کاهش اثرات مخرب بر خلیج داشته باشد و به حفظ پایداری این زیستگاه طبیعی ارزشمند و حساس کمک کند. تنها از طریق رویکردی جامع و چندجانبه، که شامل کنترل منابع آلاینده، مدیریت دقیق منابع آبی و حفظ تنوع زیستی است، می‌توان به بهبود شرایط زیست‌محیطی خلیج گرگان و جلوگیری از بروز بحران‌های زیست‌محیطی گسترده‌تر امیدوار بود.

بررسی عوامل مؤثر بر خشک شدن خلیج گرگان:

در این پژوهش به‌منظور تحلیل و بررسی عوامل مؤثر بر خشک شدن خلیج گرگان، از داده‌های هواشناسی شامل دما (T) و بارش (R)، داده‌های ماهواره‌ای مرتبط با تراز دریای خزر و مساحت آب دریای خزر، و همچنین داده‌های دبی (Q) ورودی به خلیج گرگان از سال ۲۰۰۰ تا ۲۰۲۳ استفاده شده است. نتایج حاصل از تجزیه و تحلیل داده‌ها و هم‌چنین جدول ۲ و شکل ۷ نشان می‌دهد که تغییرات تراز و مساحت آبی دریای خزر و دبی ورودی به خلیج گرگان در سطح تفاوت معنی‌داری ۰/۰۱ معنی‌دار بوده و تأثیر مستقیم و قابل‌توجهی بر تغییرات مساحت آبی خلیج گرگان داشته است، در حالی که دما و بارش در سطح تفاوت معنی‌داری ۰/۰۵ معنادار و ارتباط کم‌تری با مساحت خلیج گرگان^۱ نشان داده است.

براساس نتایج جدول ۲، مشخص شد که بیشترین همبستگی بین خشک شدن خلیج گرگان و تغییرات تراز آبی دریای خزر وجود داشته است؛ به‌گونه‌ای که ضریب پیرسون بیش از ۰/۹۰ و ضریب تعیین R^2 برابر با ۰/۸۲ بوده است. این امر نشان‌دهنده رابطه مستقیم و قوی بین افزایش یا کاهش تراز آب دریای خزر و تغییرات مساحت خلیج گرگان است، به‌طوری‌که با افزایش تراز آب دریای خزر، مساحت

بررسی وضعیت شاخص‌های مختلف در خلیج گرگان طی سال‌های ۲۰۱۵ تا ۲۰۲۳، نمایانگر تغییرات قابل‌توجهی در کیفیت آب، دما و کدورت این منطقه است. نقشه‌های ارائه‌شده نشان می‌دهند که خلیج گرگان در سال‌های اخیر با چالش‌های متعددی از جمله افزایش دما، کاهش کیفیت آب، و تغییرات در میزان کدورت مواجه بوده است. از جمله این چالش‌ها می‌توان به افزایش تنش دمایی در مناطق جنوبی و غربی خلیج، تغییرات در شاخص‌های CDOM و هم‌چنین کاهش پیوسته پهنه آبی اشاره کرد. این تغییرات به وضوح نشان‌دهنده تأثیرات ترکیبی عوامل طبیعی و انسانی، مانند گرمایش جهانی، تغییر در الگوهای آب‌وهوایی، ورود آلودگی‌های کشاورزی و صنعتی، و کاهش سطح آب دریاچه‌ها و تالاب‌های اطراف است.

ضرورت بررسی دقیق‌تر و عمیق‌تر تأثیر شاخص‌های مختلف مانند دما، بارش، تراز آب و مساحت پهنه آب دریای خزر بر تنش آبی و روند خشک شدن خلیج گرگان بسیار حیاتی و ضروری است. چنین مطالعاتی به درک بهتری از علل و عوامل مؤثر بر این تغییرات کمک کرده و می‌تواند اطلاعات لازم برای تدوین راهکارهای مدیریتی مؤثرتر را فراهم کند. با درک دقیق‌تر از این شاخص‌ها، امکان ارائه راهکارهای پیشگیرانه و سازگار با شرایط طبیعی منطقه به وجود خواهد آمد که به بهبود وضعیت زیست‌محیطی و حفظ منابع آبی کمک می‌کند. با توجه به اهمیت استراتژیک خلیج گرگان برای اکوسیستم‌های محلی و نقش آن در تأمین معیشت و حیات اجتماعی جوامع پیرامون، مدیریت صحیح منابع آبی، کنترل ورود آلاینده‌ها و برنامه‌ریزی دقیق برای بهینه‌سازی مصرف آب در بخش‌های مختلف ضروری است. اقدامات هماهنگ و برنامه‌ریزی‌شده می‌تواند

دما، اثرگذاری کم‌تری بر مساحت آبی خلیج داشتند، به‌طوری‌که ضریب پیرسون برای میزان بارش برابر ۰/۴۳ و ضریب تعیین آن ۰/۱۹ محاسبه شد. نهایتاً، کم‌ترین میزان ارتباط در این پژوهش مربوط به دما بود که با ضریب پیرسون ۰/۳۴- و ضریب تعیین برابر ۰/۱۱ می‌باشد. این نتایج نشان می‌دهد که خشک شدن خلیج گرگان بیش‌تر تحت‌تأثیر تغییرات تراز آبی دریای خزر قرار دارد و کاهش تراز آب به‌عنوان عامل اصلی خشکی خلیج در سال‌های اخیر نقش مهمی ایفا کرده است. علاوه‌بر این، ضرورت توجه به ارتباط میان تغییرات اقلیمی و مدیریت منابع آبی در منطقه برای جلوگیری از وخامت بیش‌تر وضعیت خلیج و اکوسیستم وابسته به آن نیز مورد تأکید قرار گرفته است.

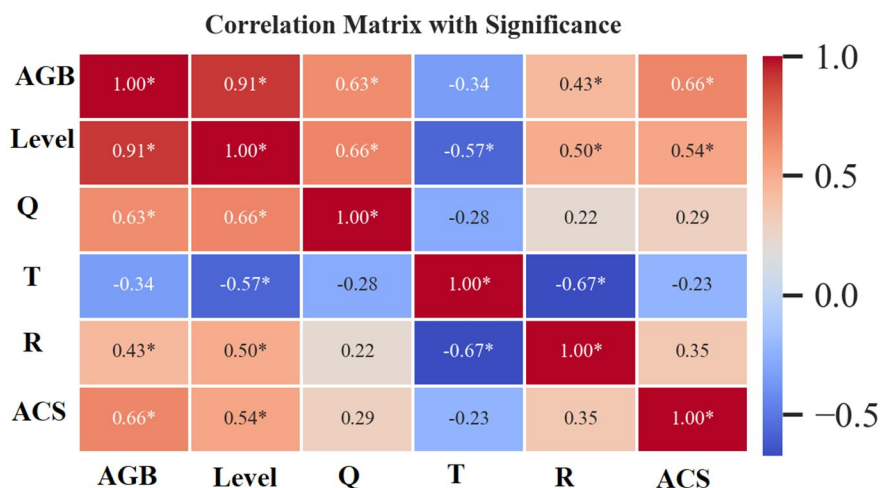
خلیج نیز افزایش یافته است. با توجه به شکل‌های ۵ و ۶، روند تغییرات اخیر نشان می‌دهد که کانال ارتباطی میان دریای خزر و خلیج گرگان در حال قطع شدن است که یکی از دلایل اصلی آن کاهش تراز آب دریای کاسین می‌باشد. این کاهش تراز به‌طور مشهودی در نمودارهای شکل ۸ قابل‌مشاهده است. در بررسی سایر پارامترها، ارتباط آن‌ها با خشک شدن خلیج گرگان نسبت به تراز آب دریای خزر ضعیف‌تر ارزیابی شد. برای نمونه، تغییرات مساحت دریای خزر با خشک شدن خلیج گرگان ضریب پیرسون ۰/۶۶ و ضریب تعیین برابر با ۰/۴۳ را نشان داده است. از سوی دیگر، دبی ورودی به خلیج گرگان با ضریب پیرسون ۰/۶۳ و ضریب تعیین برابر ۰/۴۰، تأثیر نسبی قابل توجهی داشته است. اما میزان بارش و

جدول ۲- همبستگی مساحت خلیج گرگان و پارامترهای مورد بررسی.

Table 2. Correlation of Gorgan Bay area and the studied parameters.

ضریب تعیین R ²	درصد اطمینان P-value	ضریب پیرسون Pearson	پارامترها Parameters
0.82	0.0001	0.91	تراز دریای خزر Level
0.40	0.001	0.63	دبی دریای خزر Q
0.11	0.064	-0.34	دما T
0.19	0.03	0.43	بارش R
0.43	0.0001	0.66	مساحت دریای خزر ACS ¹

1- Area Caspian Sea (ACS)



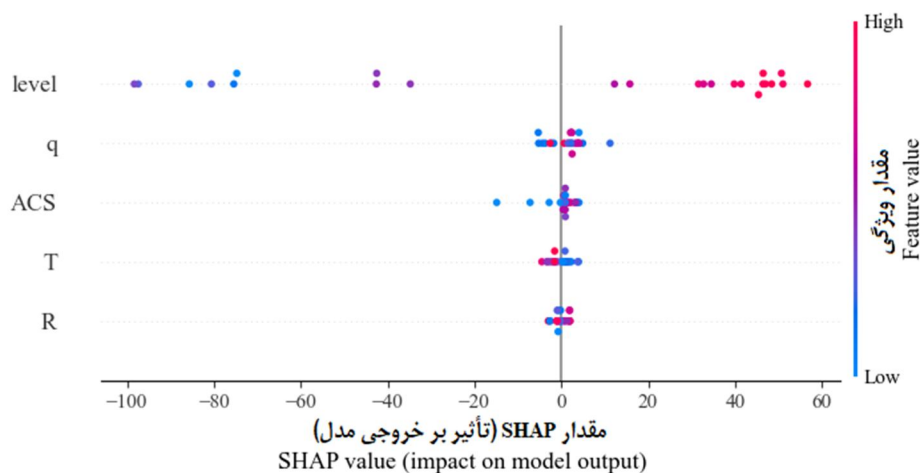
شکل ۷- ماتریس همبستگی و معنی‌داری (*) مساحت خلیج گرگان با پارامترهای مورد بررسی.

Figure 7. Correlation and significance (*) matrix of the Gorgan Bay area with the studied parameters under.

روی مساحت خلیج گرگان اثرگذار بوده است. بعد از آن، ویژگی‌های دیگری مانند دبی، مساحت آبی دریای خزر، دما و بارش نیز نقش قابل‌توجهی در این فرآیند داشته است، اما میزان تأثیرگذاری آن‌ها کم‌تر از تراز آب دریای خزر بوده است. این را می‌توان از پراکندگی کم‌تر نقاط مربوط به این ویژگی‌ها در نمودار مشاهده کرد. در مجموع، نمودار SHAP به خوبی نشان می‌دهد که تراز آب دریای خزر مهم‌ترین عامل تأثیرگذار بر خشک شدن خلیج گرگان بوده است. این اطلاعات می‌تواند برای مدیریت و حفاظت از این منطقه بسیار راهگشا باشد.

برای بررسی بیش‌تر نقش پارامترهای مورد بررسی بر خشک شدن خلیج گرگان از سه نمودار شامل، نمودار SHAP، نمودار مدل رگرسیون خطی و نمودار درخت تصمیم یا جنگل تصادفی استفاده شد، که در شکل‌های ۸، ۹ و ۱۰ مشاهده می‌شود.

نمودار SHAP در شکل ۸ مشاهده می‌شود که تراز آب دریای خزر دارای بیش‌ترین پراکندگی در سراسر محور افقی است. این به معنای آن است که تراز آب دریای خزر بیش‌ترین تأثیر را بر کاهش مساحت خلیج گرگان داشته است. به عبارت دیگر، تغییرات در تراز آب دریای خزر به‌طور چشمگیری بر



شکل ۸- نمودار SHAP مؤلفه‌های مؤثر بر خشکی خلیج گرگان.

Figure 8. SHAP Plot of Key Factors Influencing the Drying of Gorgan Bay.

تراز آب دریای خزر، ویژگی‌های دما، مساحت آبی دریای خزر، بارش و در نهایت دبی ورودی به خلیج به ترتیب اهمیت بیش‌تری داشته‌است. هر چند این ویژگی‌ها نیز نقش قابل‌توجهی در کاهش مساحت خلیج گرگان دارد، اما میزان تأثیرگذاری آن‌ها به شدت کم‌تر از تراز آب دریای خزر بوده است. در مجموع، این تحلیل نمودار رگرسیون خطی به درک عمیق‌تری از علل خشک شدن خلیج گرگان کمک می‌کند و می‌تواند راهنمای ارزشمندی برای سیاست‌گذاری و تصمیم‌گیری‌های مرتبط با این منطقه باشد.

نمودار رگرسیونی در شکل ۹ نشان می‌دهد، چقدر هر یک از ویژگی‌های داده‌ها در مدل رگرسیون خطی مهم می‌باشد و از رابطه ۸ محاسبه می‌شود. تأثیرگذاری هر ویژگی در این مدل نشان می‌دهد که بیش‌ترین تأثیر بر خشک شدن خلیج گرگان را تراز آبی دریای خزر دارد. این بدان معنی است که با تغییر یک واحد در تراز آب دریای خزر، مساحت خلیج گرگان به‌طور چشمگیری تغییر می‌کند. در واقع، تراز آب دریای خزر بیش از ۵۰ درصد بیش‌تر از سایر ویژگی‌ها بر این فرآیند تأثیرگذار بوده است. پس از

$$AGB = 342.5 + (51.9 \times \text{level}) + (2.9 \times q) + (17.3 \times T) + (6.5 \times R) + (12.2 \times ACS) \quad (8)$$



شکل ۹- نمودار ضرایب رگرسیون خطی مؤلفه‌های مؤثر بر خشکی خلیج گرگان.

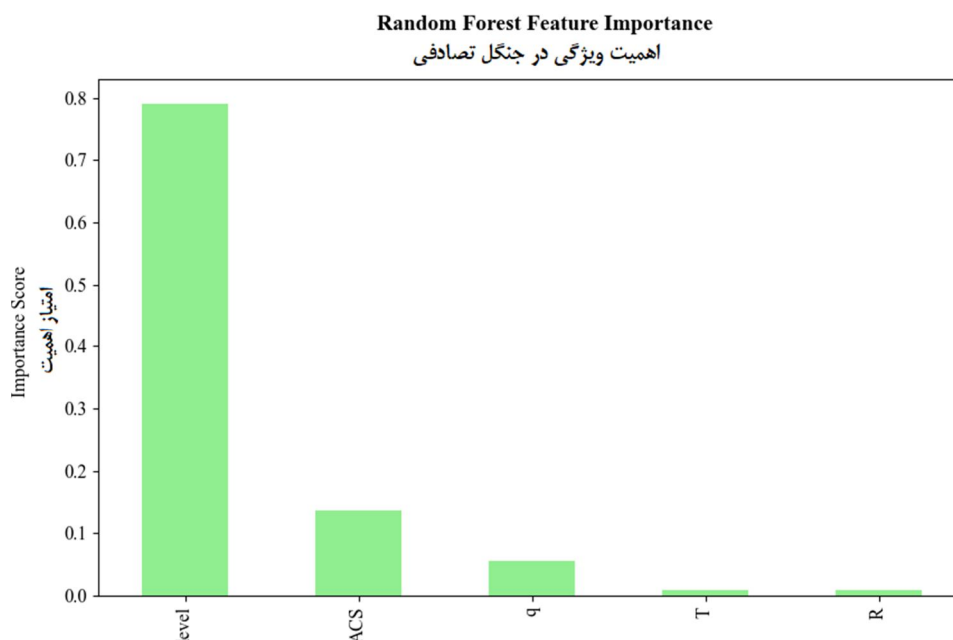
Figure 9. Linear Regression coefficient Plot of Key Factors Influencing the Drying of Gorgan Bay.

معنی است که تراز آب دریای خزر بیش از ۷۰٪ بر تغییرات مساحت خلیج گرگان تأثیرگذار بوده است. این نتیجه کاملاً همسو با تحلیل نمودار رگرسیونی قبلی است که به همین نتیجه رسید. پس از تراز آب دریای خزر، ویژگی مساحت آبی دریای خزر در اولویت بعدی قرار دارد و تأثیر قابل‌توجهی بر

نمودار جنگل تصادفی به خوبی نشان می‌دهد که تراز آب دریای خزر مهم‌ترین ویژگی است که بر کاهش مساحت خلیج گرگان تأثیر گذاشته است. همان‌طور که از شکل ۱۰ مشخص است، در این نمودار، ویژگی تراز آب دریای خزر دارای بیش از ۷۰٪ از مجموع اهمیت ویژگی‌ها است. این بدین

پیش‌بینی و شبیه‌سازی می‌تواند به درک بهتر تأثیرات آتی تغییرات آب و هوایی و فعالیت‌های انسانی بر روی اکوسیستم خلیج گرگان کمک کند. به‌علاوه، اطلاعات حاصل از این تحلیل‌ها می‌تواند به تصمیم‌گیرندگان و مدیران محیط‌زیست در تدوین سیاست‌های مناسب برای حفاظت از این منطقه حساس یاری رساند. از طریق شناسایی و ارزیابی عوامل مؤثر بر تراز آب، می‌توان استراتژی‌های مؤثری برای کاهش اثرات منفی بر روی زیستگاه‌های طبیعی و تنوع زیستی منطقه تدوین کرد. در نهایت، این نتایج نه‌تنها برای حفاظت از خلیج گرگان، بلکه برای ارتقاء آگاهی عمومی و جلب مشارکت جامعه محلی در برنامه‌های حفاظتی نیز حیاتی است. تجزیه و تحلیل‌های پیش‌تر و مطالعات پیوسته در این زمینه می‌تواند به درک عمیق‌تری از وضعیت و چالش‌های موجود کمک کند.

مساحت خلیج گرگان داشته است. این نشان می‌دهد که تغییرات در حجم و مساحت آب دریای خزر، عامل مهمی در کاهش پهنه آبی خلیج گرگان بوده است. در مقابل، ویژگی‌های دبی ورودی، بارش و دما به‌ترتیب کم‌ترین تأثیرگذاری را بر مساحت خلیج گرگان داشته است. این نتایج با تحلیل قبلی نمودار رگرسیون نیز همخوانی دارد. به‌طورکلی، تحلیل نمودار جنگل تصادفی به موازات نتایج رگرسیون خطی و نمودار SHAP، تأکید می‌کند که تراز آب دریای خزر به‌عنوان عامل اصلی و کلیدی در کاهش مساحت خلیج گرگان شناخته می‌شود. این یافته‌ها می‌تواند به‌طور قابل‌توجهی در طراحی و اجرای برنامه‌های حفاظتی و مدیریتی در منطقه خلیج گرگان تأثیرگذار باشد. با در نظر گرفتن اهمیت تراز آب دریای خزر، پیشنهاد می‌شود که برنامه‌های مدیریتی به‌گونه‌ای طراحی شود که تغییرات این تراز را تحت کنترل قرار دهد. هم‌چنین، استفاده از مدل‌های



شکل ۱۰- نمودار تحلیل جنگل تصادفی خطی مؤلفه‌های مؤثر بر خشکی خلیج گرگان.

Figure 10. Random forest feature importance analysis of key factors affecting the Gorgan Bay Drying.

برای درک جامع‌تر از تأثیر تراز آبی دریای خزر بر مساحت خلیج گرگان، نمودار خطی دوگانه‌ای در شکل ۱۱ ارائه شده است که تغییرات تاریخی مساحت این خلیج و تراز آب دریای خزر را طی بیست و سه سال گذشته به تصویر می‌کشد. نتایج نشان می‌دهند که مساحت خلیج گرگان در این دوره زمانی تغییرات چشمگیری را تجربه کرده است. در ابتدای دوره بررسی، یعنی در سال ۲۰۰۰، مساحت خلیج گرگان حدود ۴۰۰ کیلومترمربع بود، اما این مقدار تا سال ۲۰۲۳ به حدود ۲۶۰ کیلومترمربع کاهش یافت که معادل با کاهش تقریبی ۴۵ درصدی در مساحت این پهنه آبی است. این تغییرات نشان‌دهنده کاهش قابل‌توجهی در وسعت خلیج گرگان بوده و به‌طور مشخص، در طول دو دهه گذشته نقش عوامل متعددی در این روند تأثیرگذار بوده است. به عبارت دیگر، خلیج گرگان طی این بازه زمانی حدود ۴۵٪ از مساحت اولیه خود را از دست داده است.

بر اساس نمودار، بیش‌ترین مساحت ثبت‌شده برای خلیج گرگان به سال ۲۰۰۴ بازمی‌گردد، جایی که مساحت آبی این خلیج به بیش از ۴۰۰ کیلومترمربع رسیده است. این امر با دوره‌ای همزمان شده که تراز آبی دریای خزر نیز به اوج خود رسیده و در فاصله زمانی بین سال‌های ۲۰۰۰ تا ۲۰۰۵، سطح آب دریای خزر در بالاترین مقادیر تاریخی خود قرار داشته است. پس از این دوره، کاهش پیوسته و معناداری در تراز آب دریای خزر مشاهده می‌شود که تأثیر مستقیمی بر خلیج گرگان داشته است. به‌طوری‌که از سال ۲۰۰۵ به بعد، با کاهش تدریجی تراز آب، مساحت خلیج گرگان نیز با روند نزولی مواجه شد و این کاهش تا سال ۲۰۱۸ به‌طور مداوم ادامه داشت.

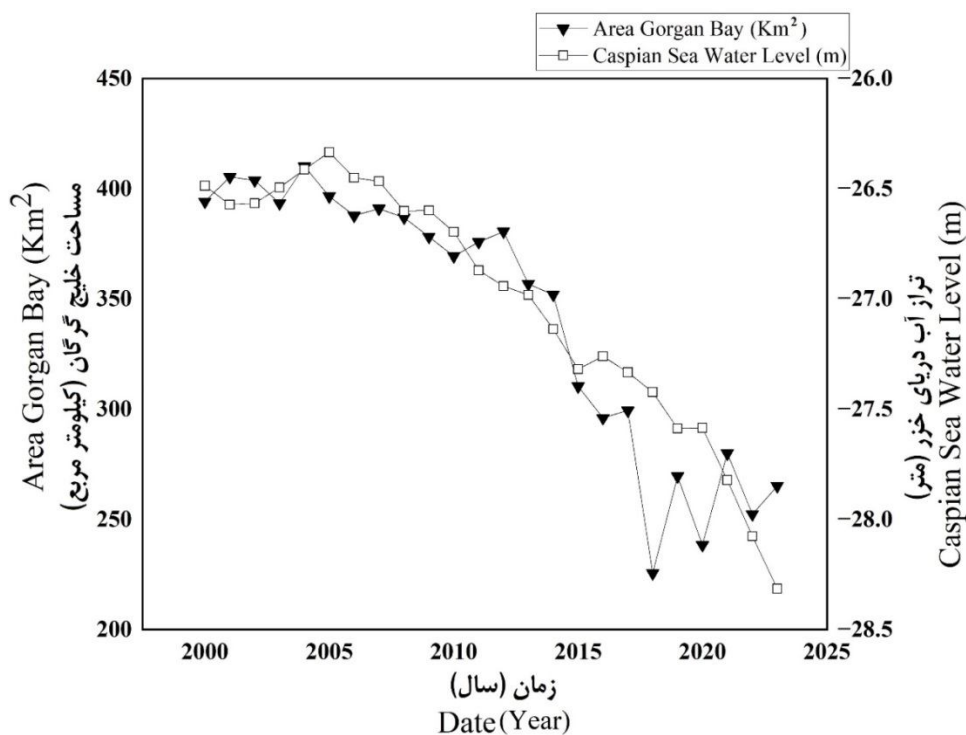
در سال ۲۰۱۸، خلیج گرگان به خشک‌ترین وضعیت خود در دو دهه اخیر رسید و بیش از ۵۰ درصد از مساحت خود را از دست داد. این کاهش

شدید نشان‌دهنده اثرات مخرب کاهش تراز آب دریای خزر بر پایداری این اکوسیستم آبی حساس است. با این حال، از سال ۲۰۱۸ تا ۲۰۲۳، مساحت خلیج گرگان دچار نوساناتی بوده و تغییرات اندکی در روند کاهش مشاهده شد که این خود نشانگر نوعی بی‌ثباتی در شرایط اکولوژیکی و آبی خلیج می‌باشد. مطالعه تغییرات تراز آبی دریای خزر نشان می‌دهد که در طول بیست و سه سال گذشته، سطح آب این دریا بیش از ۲ متر کاهش یافته است. به‌طور دقیق‌تر، تراز آبی دریای خزر که در سال ۲۰۰۰ برابر با ۲۶/۴۸- متر بود، تا سال ۲۰۲۳ به ۲۸/۳۱- متر رسید. این کاهش دو متری، اثرات و پیامدهای عمده‌ای برای مناطق ساحلی و پهنه‌های آبی مرتبط مانند خلیج گرگان به‌همراه داشته است.

در سال‌های اخیر مطالعات مختلفی در زمینه خشک شدن خلیج گرگان انجام شده است، حمزه و ترابی (۱۲)، تغییرات بلندمدت و فصلی پهنه آبی خلیج گرگان و ارتباط آن با بارش و تغییرات تراز آب دریای خزر مورد بررسی داد. نتایج این پژوهش نشان می‌دهد که تغییرات پهنه آبی خلیج گرگان همبستگی بالایی (۰/۹۲) با نوسانات تراز آب دریای خزر دارد و همچنین ارتباط متوسطی با بارش‌ها در بازه‌های زمانی کوتاه‌مدت برقرار است. جعفری و همکاران (۱۳)، تأثیر کاهش تراز آب دریای خزر بر الگوی جریان در خلیج گرگان مورد تجزیه و تحلیل قرار داد. نتایج این پژوهش نشان می‌دهد که جریان اصلی دریای خزر به‌صورت پادساعتگرد است و جریان‌های باد در سواحل تأثیر زیادی بر الگوی جریان در خلیج دارد. عابدین‌پور و همکاران (۱)، در پژوهشی تغییرات خط ساحلی خلیج میانکاله در سواحل جنوب شرقی دریای خزر را با استفاده از داده‌های سنجنش از دور طی ۴۴ سال (۱۹۷۲ تا ۲۰۱۶) بررسی کردند. با استفاده از تصاویر ماهواره‌ای لندست (سنجنده‌های TM، MSS،

کدرت و کیفیت آب (CDOM) است و به علاوه، نقش سایر عوامل مؤثر بر مساحت خلیج گرگان هم چون تراز آب دریای خزر، مساحت دریای خزر، دبی ورودی، دما و بارش مورد تحلیل قرار گرفت. برای تحلیل داده‌ها، علاوه بر استفاده از شاخص‌های همبستگی پیرسون، ضریب تبیین و سطح معنی‌داری، از روش‌های پیشرفته‌ای چون ضرایب شاپلی، رگرسیون و مدل تأثیرگذاری جنگل تصادفی در بازه زمانی ۲۰۰۰ تا ۲۰۲۳ استفاده گردید. در این پژوهش هم‌چنین از دو شاخص NDWI و MNDWI برای تحلیل وضعیت خلیج گرگان در بازه زمانی ۲۰۱۵-۲۰۲۳ بهره گرفته شد. به منظور درک بهتر و تحلیل جامع‌تر روندها، بررسی این عوامل در کنار یکدیگر و ارزیابی تأثیر متقابل آن‌ها نه تنها به شفافیت وضعیت کنونی خلیج گرگان کمک می‌کند، بلکه راهکارهای مؤثری را برای مدیریت منابع آبی و پیشگیری از روند خشک شدن کامل آن در آینده فراهم می‌آورد.

RVB، OLI و ETM+)، ابتدا پسروى خط ساحلى مشاهده شد، اما پس از سال ۱۹۷۷ این روند معکوس گردید. میانگین‌گیری وزنی تغییرات خط ساحلى نشان داد که در کل دوره، خط ساحلى پیشروى داشته است. در بسیاری از پژوهش‌های پیشین، عمدتاً به تأثیر کاهش تراز آب دریای خزر بر خلیج گرگان پرداخته شده است و سایر عوامل مؤثر بر این روند، کم‌تر مورد بررسی قرار گرفته‌اند. هم‌چنین، موضوع تأثیر تراز آب بر مساحت خلیج گرگان در پژوهش‌های اخیر به‌طور جامع مورد تحلیل قرار نگرفته و تنها در یک یا چند مورد با استفاده از شاخص همبستگی مورد ارزیابی قرار گرفته است. علاوه بر این، هیچ مطالعه‌ای به‌طور خاص به بررسی کیفیت آب خلیج گرگان نپرداخته است. در این پژوهش، به‌طور جامع و سیستماتیک به ارزیابی وضعیت کیفی آب خلیج گرگان در بازه زمانی ۲۰۱۵ تا ۲۰۲۳ پرداخته شد. این پژوهش شامل بررسی شاخص‌های دمای سطح آب،



شکل ۱۱- نمودار خطی دوگانه تراز آب دریای خزر و مساحت خلیج گرگان در بازه زمانی ۲۰۰۰-۲۰۲۳.

Figure 11. Dual Line Chart of the Caspian Sea Water Level and the Area of Gorgan Bay from 2000 to 2023.

نتیجه‌گیری کلی

با توجه به تسریع روند گرمایش جهانی و افزایش فعالیت‌های انسانی، بسیاری از پهنه‌های آبی در سراسر جهان با کاهش سطح آب مواجه شده است. خلیج گرگان، به عنوان یکی از اکوسیستم‌های آبی مهم ایران، در سال‌های اخیر با چالش‌های جدی ناشی از کاهش مساحت و کیفیت آب روبرو شده است. در این پژوهش، کیفیت آب و تغییرات پهنه آبی خلیج گرگان و همچنین نقش عوامل مختلفی از جمله بارش، دما، تراز آبی دریای خزر، مساحت آبی دریای خزر و دبی ورودی به خلیج، با استفاده از داده‌های ماهواره‌ای لندست، مودیس، جیسون ۱ و ۳ در بازه زمانی ۲۰۰۰ تا ۲۰۲۳ مورد بررسی قرار گرفت. علاوه بر این، نقشه‌های شاخص‌های کیفیت آب مانند دمای آب، کدورت و CDOM در بازه زمانی ۲۰۱۵ تا ۲۰۲۳ تحلیل شد و نقشه‌های پهنه آبی خلیج گرگان با استفاده از شاخص‌های MNDWI و NDWI ترسیم گردید. برای تحلیل اهمیت متغیرها و تأثیر آن‌ها بر مساحت خلیج گرگان، از روش‌هایی مانند ضریب پیرسون، ضریب تعیین (R^2)، نمودار SHAP، ضریب شاپلی، مدل رگرسیون جنگل تصادفی و مدل رگرسیون خطی استفاده شد.

نتایج بررسی کیفیت آب خلیج گرگان در بازه زمانی ۲۰۱۵ تا ۲۰۲۳ نشان داد که دمای حداقل آب به‌طور متوسط $2/3$ درجه سانتی‌گراد افزایش یافته است، به‌طوری‌که بیش‌ترین تنش دمایی در مناطق جنوبی و غربی خلیج مشاهده شد. همچنین، نقشه‌های کدورت آب بیانگر افزایش مداوم و نگران‌کننده این شاخص در سال‌های ۲۰۲۰، ۲۰۲۲ و ۲۰۲۳ بود، به‌ویژه در بخش‌های مرکزی، جنوبی و شرقی خلیج. از نظر شاخص CDOM، کیفیت آب در بخش‌های غربی خلیج، به‌خصوص اطراف تالاب میانکاله، در سال ۲۰۱۵ در وضعیت نامناسبی قرار داشت، اما در

سایر سال‌ها شرایط مطلوب بود و آلودگی معناداری مشاهده نشد.

تغییرات مساحت آبی خلیج گرگان نیز نشان داد که بیش از ۵۰ درصد از مساحت اولیه آن از بین رفته است. به‌ویژه در سال‌های ۲۰۲۰، ۲۰۲۲ و ۲۰۲۳، بخش‌های وسیعی از مناطق غربی، جنوبی و شمالی خلیج کاملاً خشک شدند. علاوه بر این، کانال ارتباطی بین دریای خزر و خلیج گرگان از سال ۲۰۱۵ تا ۲۰۲۳ نابود شد. بررسی نقش عوامل مختلف در خشک شدن خلیج گرگان طی بازه زمانی ۲۰۰۰ تا ۲۰۲۳ نشان داد که تمامی پارامترهای مورد مطالعه از نظر آماری معنادار بوده‌اند. بیش‌ترین همبستگی بین خشک شدن خلیج گرگان و تغییرات تراز آبی دریای خزر مشاهده شد، به‌طوری‌که ضریب پیرسون بیش از $0/90$ و ضریب تعیین (R^2) برابر با $0/82$ بود. در مقابل، ارتباط بین خشک شدن خلیج گرگان با مساحت آبی دریای خزر، دبی ورودی، بارش و دما به ترتیب با ضرایب تعیین $0/43$ ، $0/40$ ، $0/19$ و $0/11$ بود که نشان می‌دهد دما کم‌ترین تأثیر را بر این پدیده داشته است.

ارزیابی ضریب شاپلی، نمودارهای رگرسیونی و مدل جنگل تصادفی نشان داد که کاهش تراز آب دریای خزر مهم‌ترین عامل کاهش مساحت خلیج گرگان بوده است. بررسی ارتباط بین تراز آب دریای خزر و مساحت آبی خلیج گرگان نشان داد که مساحت خلیج از حدود ۴۰۰ کیلومتر مربع در سال ۲۰۰۰ به ۲۶۰ کیلومتر مربع در سال ۲۰۲۳ که معادل ۴۵ درصد کاهش است. این کاهش به‌طور مستقیم با کاهش بیش از ۲ متری تراز آبی دریای خزر در طی ۲۳ سال گذشته مرتبط است. به‌ویژه از سال ۲۰۰۵ به بعد، با کاهش مداوم تراز آب، خلیج گرگان به وضعیت بحرانی و ناپایدار رسیده است.

تعارض منافع

در این مقاله تعارض منافع وجود ندارد و این مسأله مورد تأیید همه نویسندگان است.

مشارکت نویسندگان

نویسنده اول: جمع‌آوری داده، دانلود تصاویر، کدنویسی، آنالیز و تحلیل داده‌ها و نگارش پیش‌نویس مقاله.

نویسنده دوم: طرح تحقیق، نظارت بر آنالیز و تحلیل داده‌ها، نگارش پژوهش، اصلاح و بازبینی مقاله.

اصول اخلاقی

نویسندگان اصول اخلاقی را در انجام و انتشار این اثر رعایت نموده‌اند و این موضوع مورد تأیید همه نویسندگان هست.

حمایت مالی

این مقاله با حمایت مالی دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی ساری انجام شده است.

این پژوهش بر نقش عوامل مختلف در خشک شدن خلیج گرگان تأکید دارد و بر لزوم اقدامات فوری برای مدیریت منابع آب و احیای اکوسیستم‌های آبی اشاره می‌کند. نتایج این مطالعه نشان داد که برای جلوگیری از تشدید بحران‌های زیست‌محیطی، برنامه‌ریزی‌های جامع و هماهنگ در سطح ملی و بین‌المللی ضروری است.

تقدیر و تشکر

این مقاله مستخرج از طرح پژوهشی با شماره ۰۶-۱۴۰۳-۰۲ دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی ساری می‌باشد و مراتب تشکر و قدردانی از حمایت مادی و معنوی معاونت پژوهشی دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی ساری به جا آورده می‌شود.

داده‌ها و اطلاعات

در این پژوهش از داده‌های ایستگاه‌های هواشناسی استان گلستان و داده‌های ماهواره‌ای استفاده شده است.

منابع

1. Abedinpour, M., Norooz Valashedi, R., Khoshhravesh, M., Mokari, M., & Ghorbani, D. (2020). Investigating the climatology of coastal changes in Gulf of Miankaleh. *Irrigation and Water Engineering*, 10(3), 188-200. <https://doi.org/10.22125/iwe.2020.107101>.
2. Akbari, E., Hamzeh, S., Abdolahi Kakroodi, A., & Maanan, M. (2022). Time series analysis of the Caspian Sea shoreline in response to sea level fluctuation using remotely sensed data. *Regional Studies in Marine Science*, 45 (15), 150-170. <https://doi.org/10.1016/j.rsma.2022.102672>.
3. Bao, N., Song, W., Ma, J., & Chu, Y. (2024). Multi-source remote sensing analysis of Yilong Lake's surface water dynamics (1965–2022): A temporal and spatial investigation. *Water*, 16(14), 2058. <https://doi.org/10.3390/w16142058>.
4. Barani Pesyan, V., Porakrami, M., Fotouhi Mehrbani, B., & Porakrami, S. (2019). The investigation of Lake Urmia drying trend and its important consequence on the surrounding settlements. *Journal of Rural Research*, 8(3), 438-453. <http://dx.doi.org/10.22059/JRUR.2017.63473>.
5. Basak, A., Arabi Moghadam, H., Hejazizadeh, Z., & Toolabinejad, M. (2018). The effects of water transfer projects of Karun tributaries in creating or intensifying dust centers in Khuzestan using GIS & RS technologies. *Journal of Geography*, 16(56), 20-35.

6. Cao, H., Han, L., Liu, Z., & Li, L. (2021). Monitoring and driving force analysis of spatial and temporal change of water area of Hongjiannao Lake from 1973 to 2019. *Ecological Informatics*, 61, 101230. <https://doi.org/10.1016/j.ecoinf.2021.101230>.
7. Dervisoglu, A., Yağmur, N., Firatli, E., Musaoğlu, N., & Tanik, A. (2022). Spatio-temporal assessment of the shrinking Lake Burdur, Turkey. *International Journal of Environmental Geoinformatics*, 9(3), 169-176. <https://doi.org/10.30897/ijgeo.1060077>.
8. Esri. (2018). Sentinel-2, 10m multispectral, multitemporal, 13-band images with visual renderings and indices. Retrieved from 2022, <https://www.arcgis.com/home/item.html?id=fd61b9e0c69c4e14bebd50a9a968348c>.
9. Gautama, V., Gaurava, P., Murugana, P., & Annadurai, M. (2015). Assessment of surface water dynamics in Bangalore using WRI, NDWI, MNDWI, supervised classification and K-T transformation. *Aquatic Procedia*, 4, 739-746. <https://doi.org/10.1016/j.aqpro.2015.02.095>.
10. Goździejewska, A. M., & Kruk, M. (2022). Zooplankton network conditioned by turbidity gradient in small anthropogenic reservoirs. *Scientific Reports*, 12, 3938. <https://doi.org/10.1038/s41598-022-08045-y>.
11. Gullian-Klanian, M., Gold-Bouchot, G., & Sánchez-Solís, M. J. (2022). Characteristics of chromophoric dissolved organic matter (CDOM) produced by heterotrophic bacteria isolated from aquaculture systems. *Journal of Marine Science and Engineering*, 10(5), 672. <https://doi.org/10.3390/jmse10050672>.
12. Hamzeh, S., & Torabi, O. (2021). Investigating the changes in the water body of Gorgan Bay and its relationship with precipitation and water level of the Caspian Sea by using remote sensing data. *Iranian Journal of Ecohydrology*, 8(2), 475-484. <https://doi.org/10.22059/ije.2021.302811.1335>.
13. Jafari, A., Niksokhan, M. H., & Majdzadeh Tabatabai, M. R. (2021). Investigation of flow pattern in Gorgan Gulf considering changes in water level of the Caspian Sea and using numerical model. *Journal of Environmental Studies*, 47(3), 361-378. <https://doi.org/10.22059/jes.2021.331569.1008236>.
14. Kamangar, M., & Hazbavi, Z. (2023). Spatial-temporal analysis of chlorophyll changes and their spatial correlation with sea surface temperature in the Persian Gulf. *Extension and Development of Watershed Management*, 11(42), 250-265. https://www.wmji.ir/article_710718.html.
15. Khosroshahi, M., Ebrahimi Khusfi, Z., Gohardoust, Z., Lotfi Nasab Asl, S., Dargahian, F., & Zenouzi, L. (2020). *Desert management*, 15(8), 139-160. <https://doi.org/10.22034/JDMAL.2020.44935>.
16. Kumar, P., Kumar, R., Thakur, K., Mahajan, D., Brar, B., Sharma, D., Kumar, S., & Sharma, A. K. (2023). Impact of pesticides application on aquatic ecosystem and biodiversity: A review. *Biology Bulletin*, 50, 1362-1375. <https://doi.org/10.1134/S1062359023601386>.
17. Lapiere, J. F., Collins, S. M., Seekell, D. A., Cheruvelil, K. S., Tan, P. N., Skaff, N. K., Taranu, Z. E., Fergus, C. E., & Soranno, P. A. (2018). Similarity in spatial structure constrains ecosystem relationships: Building a macroscale understanding of lakes. *Global Ecology and Biogeography*, 27(10), 1251-1263. <https://doi.org/10.1111/geb.12781>.
18. Liu, H., Zheng, L., Jiang, L., & Liao, M. (2020). Forty-year water body changes in Poyang Lake and the ecological impacts based on Landsat and HJ-1 A/B observations. *Journal of Hydrology*, 589, 125161. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2020.125161>.
19. Nadi, M., & Yousefi Kebriya, A. (2024). A method for correction of tropical rainfall measuring mission satellite

- temperature network in Mazandaran Province. *Iranica Journal of Energy & Environment*, 15(1), 100-110. <https://doi.org/10.5829/ijee.2024.15.01.10>.
20. NOAA (National Oceanic and Atmospheric Administration). (2020). NOAA ESRL global monitoring laboratory: SURFRAD aerosol optical depth. Retrieved from <https://gml.noaa.gov/grad/surfrad/aod/>.
21. Pi, X., Luo, Q., Feng, L., Xu, Y., Tang, J., Liang, X., Ma, E., Cheng, R., Fensholt, R., & Brandt, M. (2022). Mapping global lake dynamics reveals the emerging roles of small lakes. *Nature Communications*, 13, 5777. <https://doi.org/10.1038/s41467-022-33239-3>.
22. Sundermann, A., Müller, A., & Halle, M. (2022). A new index of a water temperature equivalent for summer respiration conditions of benthic invertebrates in rivers as a bio-indicator of global climate change. *Limnologica*, 95, 125980. <https://doi.org/10.1016/j.limno.2022.125980>.
23. Woolway, R. I., Kraemer, B. M., Lenters, J. D., Merchant, C. J., O'Reilly, C. M., & Sharma, S. (2020). Global lake responses to climate change. *Nature Reviews Earth & Environment*, 1, 388-403. <https://doi.org/10.1038/s43017-020-0067-5>.
24. Yang, S., Wan, R., Yang, G., Li, B., & Dong, L. (2023). Combining historical maps and Landsat images to delineate the centennial-scale changes of lake wetlands in Taihu Lake Basin, China. *Journal of Environmental Management*, 329, 117110. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2022.117110>.
25. Yousefi Kebriya, A., Nadi, M., & Jamei, M. (2022). Combining interpolation methods and precipitation products of TRMM satellite to increase the accuracy of rainfall maps in Mazandaran province. *Water and Soil Conservation*, 28(3), 49-70. <https://doi.org/10.22069/JWSC.2022.19286.3477>.
26. Yousefi Kebriya, A., Nadi, M., Ghanbari Parmehr, E., & Sun, Z. (2025). Assessment of some environmental stresses in the Shadegan wetland: Analysis of satellite data, water quality indicators, and dust storm pathways. *Iranica Journal of Energy and Environment*, 16(2), 372-388. <https://doi.org/10.5829/ijee.2025.16.02.17>.
27. Zakerinejad, R., Jahanian, E., & Movagdi, S. (2022). Investigation of trend changes in the Caspian Sea surface temperature from 1989 to 2019. *Journal of Irrigation and Water Engineering*, 12(2), 271-290. <https://doi.org/10.22125/iwe.2021.142414>.

