ASPI | Afarand Scholarly Publishing Institute; Turkey
ISSN: 2538-4384; Geographical Research. 2026;41(1):31-40. 10.58209/geores.41.1.31

Forty-Year (1986-2025) Monitoring of Gorgan Bay Surface Area and Its Relationship with Caspian Sea Level Fluctuations

ARTICLE INFO

Article Type
Original Research

Authors
Ebadi L.[1]* *PhD*
Baghani A.[1] *PhD*

How to cite this article
Ebadi L, Baghani A. Forty-Year (1986-2025) Monitoring of Gorgan Bay Surface Area and Its Relationship with Caspian Sea Level Fluctuations. Geographical Research. 2026;41(1):31-40.

[1]"Department of Surveying Engineering, Faculty of Engineering" and "Environmental Hazard Institute", Golestan University, Gorgan, Iran

***Correspondence**
Address: Environmental Hazard Institute, Golestan University, Shahid Beheshti Street, Gorgan, Golestan, Iran. Postal Code: 1575949138
Phone: +98 (17) 34266235
ladanebadi@gmail.com

Article History
Received: December 19, 2025
Accepted: January 21, 2026
ePublished: May 15, 2026

ABSTRACT

Aims In light of the alarming desiccation trend of Gorgan Bay, the primary objective of this research is to conduct long-term monitoring of the bay's water surface area changes over a 40-year period (1986-2025) and to investigate the determining roles of Caspian Sea level (CSL) oscillations and precipitation in the Qarasu watershed on these morphological variations.

Methodology This study utilized a time series of 36 Landsat satellite images. For precise water body extraction, the Modified Normalized Difference Water Index was applied. To evaluate the accuracy of the area results, a classification map was generated from a Sentinel-2 image using the Support Vector Machine method, followed by error matrix calculations. Water level data were retrieved and harmonized by integrating Baku station records with the DAHITI database. Additionally, precipitation data for the Qarasu basin were obtained from the CHIRPS database. Statistical analyses were performed using the Pearson correlation coefficient.

Findings The area of Gorgan Bay decreased from a maximum of 565.48km2 in 1995 to a minimum of 275.12km2 in 2023, indicating a loss of more than 50% of its peak area. The area of Gorgan Bay was significantly positively correlated with the level of the Caspian Sea ($p<0.001$; $r=0.9419$), but not with the rainfall of the basin ($p=0.2142$; $r=0.2121$).

Conclusion As a semi-closed ecosystem, Gorgan Bay is subject to the hydrodynamic regime of the Caspian Sea and, due to the gentle slope of the bed, acts as a sensitive indicator of sea level changes. Local precipitation in the catchment area cannot compensate for the coastline's retreat caused by a fall in the Caspian Sea level.

Keywords Gorgan Bay; Caspian Sea Level; Remote Sensing; Landsat; Modified Normalized Difference Water Index

CITATION LINKS

[Aghighi *et al.*, 2009] Estimation of water turbidity in Gorgan Bay ...; [Amiri *et al.*, 2021] Study and monitoring of wetland area changes and its ...; [Behzadnia & Dorbeiki, 2020] Carrying capacity of nature-tourism in Ashooradeh Island ...; [Climate Hazards Center, University of California Santa Barbara (UCSB), n.d.] CHIRPS data (Climate Hazards Group Infrared Precipitation ...; [Deutsches Geodätisches Forschungsinstitut, Technical University of Munich (DGFI-TUM), n.d.] DAHITI-Database for Hydrological Time ...; [Ebadi, 2022] Optimum method for water body ...; [European Space Agency, n.d.] Copernicus Sentinel-2 data collection ...; [Gharibreza *et al.*, 2018] Evolutionary trend of the Gorgan Bay (southeastern Caspian Sea) during ...; [Ghayoumi, 2017] Environmental challenges of Gorgan Bay and Miankaleh Wetland and providing ...; [Hamzeh & Torabi, 2021] Investigating the changes in the water body of Gorgan Bay and ...; [Jafari *et al.*, 2021] Investigation of flow pattern in Gorgan Gulf considering ...; [Khoshravan, 2018] Fluctuations in the Caspian Sea's water ...; [Khoshravan & Rohanizadeh, 2021] Rapid fluctuations in the water level of the ...; [Mansouri & Sarbazi, 2017] Study of changes and developments in Gorgan Bay during ...; [McFeeters, 1996] The use of the Normalized Difference Water ...; [Parsaee & Mofidi Khajeh, 2009] Management of the Gorgan Bay ...; [Pourimani *et al.*, 2023] Absorption dose distribution pattern and radiological ...; [Rahimi *et al.*, 2019] Miankaleh Peninsula coastline changes ...; [Sabaee *et al.*, 2011] Caspian Sea level fluctuation and ...; [Sharbaty, 2019] Investigation of locating a new communication channel in the Gorgan ...; [Sharbaty, 2023] Investigation of the Caspian Sea water level decreasing effects ...; [Sharbaty & Ghanghermeh, 2016] Forecasting the effect of decreasing long ...; [Sharbaty & Nasimi, 2018] Modeling of possible dredging effects of Khozeini channel on the ...; [Shayan *et al.*, 2013] Detection of changing the northern coastline using RS and GIS ...; [U.S. Geological Survey, n.d.] Earth Explorer ...; [Xu, 2006] Modification of normalised difference water index (NDWI) to enhance ...; [Yousefi Roshan, 2015] Caspian Sea water level fluctuations during the instrumental recording period from ...;

Copyright© 2026, the Authors | Publishing Rights, ASPI. This open-access article is published under the terms of the Creative Commons Attribution-NonCommercial 4.0 International License which permits Share (copy and redistribute the material in any medium or format) and Adapt (remix, transform, and build upon the material) under the Attribution-NonCommercial terms.

پایش چهل‌ساله (۱۴۰۴-۱۳۶۵) مساحت پهنه آبی خلیج گرگان و ارتباط آن با نوسانات تراز دریای خزر

لادن عبادی* PhD
"گروه نقشه‌برداری، دانشکده فنی و مهندسی" و "پژوهشکده مخاطرات محیطی"، دانشگاه گلستان، گرگان، ایران
امین باغانی PhD
"گروه نقشه‌برداری، دانشکده فنی و مهندسی" و "پژوهشکده مخاطرات محیطی"، دانشگاه گلستان، گرگان، ایران

چکیده

اهداف: با توجه به روند خشک‌زایی خلیج گرگان، هدف اصلی این پژوهش پایش بلندمدت تغییرات مساحت پهنه آبی خلیج در یک بازه زمانی ۴۰ساله (۱۳۶۵ تا ۱۴۰۴) و واکاوی نقش نوسانات تراز دریای خزر و بارش‌های حوضه آبریز قره‌سو در این تغییرات مورفولوژیک بود.

روش‌شناسی: در این مطالعه از سری زمانی ۳۶ تصویر ماهواره‌ای لندست استفاده شد. برای استخراج پهنه آبی، شاخص اصلاح‌شده اختلاف آب نرمال‌شده به کار گرفته شد. به منظور ارزیابی دقت نتایج مساحت، از نقشه طبقه‌بندی تولیدشده از تصویر سنتینل ۲ به روش طبقه‌بندی ماشین بردار پشتیبان و سپس محاسبه ماتریس خطا استفاده شد. داده‌های تراز آب از تلفیق آمارهای ایستگاه باکو و پایگاه داده داهیتی استخراج و همسان‌سازی گردید. همچنین داده‌های بارش حوضه قره‌سو از پایگاه چیرپس فراخوانی شد. تحلیل‌های آماری با استفاده از ضریب همبستگی پیرسون انجام شد.

یافته‌ها: مساحت خلیج گرگان از حداکثر ۵۶۵/۴۸ کیلومتر مربع در سال ۱۳۷۴ (۱۹۹۵) به کمترین میزان خود یعنی ۲۷۵/۱۲ کیلومتر مربع در سال ۱۴۰۲ (۲۰۲۳) رسید که گویای نابودی بیش از ۵۰% وسعت دوران اوج آن بود. مساحت خلیج گرگان همبستگی مثبت معنی‌داری با تراز دریای خزر داشت ($p<۰/۰۰۱$؛ $r=۰/۹۴۱۹$)، اما با میزان بارش حوضه همبستگی معنی‌داری نداشت ($p=۰/۲۱۴۲$؛ $r=۰/۲۱۲۱$).

نتیجه‌گیری: خلیج گرگان به عنوان یک اکوسیستم نیمه‌بسته، تابع رژیم هیدرودینامیکی دریای خزر است و به دلیل شیب ملایم بستر، به عنوان یک نمایشگر حساس نسبت به تغییرات تراز دریا عمل می‌کند. بارش‌های محلی حوضه آبریز توان جبران پسروی خط ساحلی ناشی از اُفت تراز خزر را ندارند.

کلیدواژگان: خلیج گرگان، تراز آب دریای خزر، سنجش از دور، لندست، شاخص اصلاح‌شده اختلاف آب نرمال‌شده

تاریخ دریافت: ۱۴۰۴/۰۹/۲۸
تاریخ پذیرش: ۱۴۰۴/۱۱/۰۱
*نویسنده مسئول: ladanebadi@gmail.com

مقدمه

خلیج گرگان به عنوان بزرگ‌ترین خلیج دریای خزر، یکی از حیاتی‌ترین اکوسیستم‌های ساحلی ایران و یک محیط نیمه‌بسته رسوبی محسوب می‌شود [Gharibreza *et al.*, 2018; Khoshravan & Rohanizadeh, 2021; Ghayoumi, 2017; Hamzeh & Torabi, 2021; Parsaee & Mofidi Khajeh, 2009]. این حوضه به دلیل برخورداری از شرایط بیولوژیکی ایده‌آل، زیستگاه طبیعی گونه‌های متنوعی از جانوران بوده و به عنوان پرورشگاه اصلی بسیاری از ماهیان جوان و مکانی امن برای تولید مثل و زمستان‌گذرانی پرندگان آبی در بخش جنوبی دریای خزر شناخته می‌شود [Gharibreza *et al.*, 2018; Ghayoumi, 2017]. از منظر اقتصادی، جزیره آشوراده در ورودی این خلیج، به عنوان یک مرکز پیشرفته ملی در صنعت ماهیگیری و تولید خاویار شهرت بین‌المللی داشته و جاذبه‌های طبیعی و حیات وحش آن، پتانسیل‌های گردشگری منحصربه‌فردی را ایجاد کرده است [Gharibreza *et al.*, 2018; Parsaee & Mofidi Khajeh, 2009; Ghayoumi, 2017; Behzadnia & Dorbeiki, 2020].

با این وجود، پیوند هیدرولوژیکی مستقیم این خلیج با دریای خزر و تالاب میانکاله، آن را به سامانه‌ای به‌شدت حساس و پویا تبدیل کرده است که پایداری آن مستقیماً به نوسانات تراز آب دریا وابسته است [Hamzeh & Torabi, 2021; Sharbaty, 2019]. در سال‌های اخیر، روند کاهشی تراز آب دریای خزر (بالغ بر ۱۲۰ سانتی‌متر در ۲۰ سال گذشته) منجر به پسروی شدید خط ساحلی و خشک‌زایی در بخش‌های وسیعی از خلیج گشته است [Hamzeh & Torabi, 2021; Khoshravan & Rohanizadeh, 2021]. این پدیده نه‌تنها مساحت پهنه آبی را به‌شدت کاهش داده، بلکه با تسریع فرآیند جانشینی بوم‌شناختی، موجب تبدیل محیط‌های آبی به پهنه‌های گلی و اراضی خشکی شده است [Khoshravan & Rohanizadeh, 2021; Ghayoumi, 2017]. در کنار نوسانات تراز دریا، متغیرهای اقلیمی حوضه آبریز نیز نقشی تعیین‌کننده در تعادل هیدرولوژیکی خلیج دارند. با توجه به اینکه رودخانه قره‌سو اصلی‌ترین منبع تامین آب شیرین خلیج گرگان محسوب می‌شود، تغییرات میزان بارندگی در این حوضه می‌تواند بر دبی ورودی و در نتیجه بر نوسانات مساحت پهنه آبی در مقیاس‌های کوتاه‌مدت تاثیرگذار باشد [Hamzeh & Torabi, 2021; Pourimani *et al.*, 2023]. لذا تحلیل همزمان تاثیر نوسانات تراز آب دریای خزر و بارش‌های حوضه آبریز قره‌سو بر تغییرات مساحت خلیج گرگان، مساله‌ای کلیدی برای پیش‌بینی آینده این اکوسیستم و تدوین راهکارهای مدیریتی جهت جلوگیری از نابودی کامل آن است.

از این رو، پایش مستمر و دقیق تغییرات مورفولوژیکی و پهنه آبی خلیج گرگان به دلیل ماهیت پویا و حساسیت بالای این اکوسیستم نسبت به نوسانات محیطی، از اهمیت حیاتی برخوردار است [Shayan *et al.*, 2013; Rahimi *et al.*, 2019; Ghayoumi, 2017]. در این میان، فناوری سنجش از دور به دلیل ویژگی‌هایی نظیر دید گسترده، تکرارپذیری، هزینه پایین و دقت بالا، ابزاری بی‌بدیل در پایش مستمر تغییرات خطوط ساحلی و مدیریت بهینه مناطق حساس شناخته می‌شود [Rahimi *et al.*, 2019; Khoshravan & Rohanizadeh, 2021]. به‌ویژه تصاویر ماهواره‌ای سری لندست با ارایه یک آرشیو تاریخی ارزشمند از دهه ۱۹۷۰ تاکنون، امکان تحلیل دقیق روندهای زمانی تغییرات پهنه‌های آبی را فراهم کرده و اطلاعات پایه‌ای مهمی برای مدیریت منابع طبیعی و برنامه‌ریزی‌های زیست‌محیطی در مقیاس وسیع ارایه

می‌دهند [Mansouri & Sarbazi, 2017; Hamzeh & Torabi, 2021; Rahimi *et al.*, 2019].

بنابراین، هدف از پژوهش حاضر، پایش و تحلیل تغییرات مساحت خلیج گرگان در یک بازه زمانی بلندمدت با بهره‌گیری از سری زمانی تصاویر ماهواره‌ای لندست و تکنیک‌های پردازش رقومی است. در این راستا، تلاش شده است تا ضمن آشکارسازی تغییرات و شناسایی روندهای زمانی حاکم بر این پهنه آبی، نقش عوامل کلیدی به‌ویژه نوسانات سطح تراز آب دریای خزر که طبق مطالعات پیشین همبستگی بسیار بالایی با تغییرات مساحت خلیج دارد مورد واکاوی قرار گیرد.

تحقیقات گسترده‌ای نشان داده‌اند که خلیج گرگان به دلیل عمق کم و شیب بسیار ملایم بستر، به‌شدت نسبت به تغییرات تراز آب دریای خزر واکنش نشان می‌دهد [Sharbaty & Ghanghermeh, 2016; Mansouri & Sarbazi, 2017]. مطالعه‌ای بر سری زمانی بیست‌ساله (۲۰۱۹-۱۹۹۹) نشان داد که همبستگی بسیار بالایی (۹۲%) بین تغییرات مساحت پهنه آبی خلیج و نوسانات تراز آب دریای خزر وجود دارد [Hamzeh & Torabi, 2021]. براساس یافته‌های این پژوهش، در حالی که تراز آب دریا در این دوره حدود ۱۲۰ سانتی‌متر کاهش یافته، مساحت خلیج نیز روند نزولی مشابهی را طی کرده است. در مقابل، همبستگی مساحت پهنه آبی با میزان بارندگی در مقیاس بلندمدت بسیار ناچیز (حدود ۱۰%) برآورد شده است. با این حال، در تحلیل‌های کوتاه‌مدت و فصلی، تاثیر بارندگی با یک تاخیر زمانی یک‌ماهه بر مساحت خلیج مشهود است، به طوری که بیشترین مساحت پهنه آبی معمولاً یک ماه پس از وقوع حداکثر بارش‌ها مشاهده می‌شود.

در مطالعات تاریخی دیگر، محققین با بررسی چهار دوره زمانی بین ۱۹۵۵ تا ۲۰۱۱ دریافتند که مساحت خلیج در سال ۲۰۰۵ به بالاترین میزان خود (۵۱۸ کیلومتر مربع) و در سال ۱۹۵۵ به کمترین میزان (۴۰۳ کیلومتر مربع) رسیده بود که مستقیماً با تراز آب دریا در آن سال‌ها پیوند داشت [Shayan *et al.*, 2013]. همچنین در پژوهشی دیگر گزارش شد که تنها در سال ۱۳۹۳، کاهش ۱۲سانتی‌متری تراز آب منجر به کاهش مساحتی حدود ۴۸ کیلومتر مربع از پهنه آبی خلیج شده است [Yousefi Roshan, 2015]. در تحقیقی در سال ۲۰۱۷ محققین تاکید کردند که در پی پسروی‌های اخیر، حدود ۳۵% از وسعت خلیج گرگان و بخش‌های وسیعی از شمال شرقی تالاب میانکاله خشک شده و به پهنه‌های گلی تبدیل شده‌اند [Mansouri & Sarbazi, 2017].

استفاده از فناوری سنجش از دور به دلیل پوشش وسیع، توالی بالا و دسترسی رایگان، به عنوان روشی کارآمد در پایش تغییرات خطوط ساحلی و پهنه‌های آبی خلیج گرگان شناخته می‌شود [Rahimi *et al.*, 2019; Khoshravan & Rohanizadeh, 2021]. در تحقیقات مختلف، از تصاویر ماهواره‌های متنوعی از جمله لندست (Landsat)، سنتینل-۲ (Sentinel-2) و آی‌آراس لیس-۳ (IRS LISS-III) استفاده شده است [Aghighi *et al.*, 2009; Hamzeh & Torabi, 2021]. استخراج پهنه‌های آبی از تصاویر ماهواره‌ای یکی از کاربردهای مهم سنجش از دور در مطالعات محیط زیستی و منابع آب است. در این زمینه، روش‌های متعددی توسعه یافته‌اند که هر یک دارای مزایا و محدودیت‌های خاص خود هستند. یکی از رایج‌ترین رویکردها، استفاده از روش‌های طبقه‌بندی نظیر طبقه‌بندی نظارت‌شده و نظارت‌نشده است که براساس ویژگی‌های طیفی پیکسل‌ها، کلاس‌های مختلف از جمله آب و خشکی را تفکیک می‌کنند. اگرچه این روش‌ها در بسیاری از موارد دقت مناسبی دارند، اما وابسته به داده‌های آموزشی و تنظیم پارامترها و زمان‌بر بوده و ممکن است در مناطق پیچیده عملکرد مطلوبی نداشته باشند.

از دیگر روش‌ها، بهره‌گیری از ویژگی جذب بالای آب در طیف مادون قرمز نزدیک (NIR) و حدگذاری بر روی باند ۵ لندست (در سنجنده‌های تی‌ام و ایی‌تی‌ام+) برای تمایز خشکی و دریا است [Shayan *et al.*, 2013]. در تحقیقات گذشته، از روش تفریق باندی و چگالی‌سنجی نیز برای آشکارسازی تغییرات خط ساحلی میانکاله و خلیج گرگان استفاده شده است [Rahimi *et al.*, 2019].

در بسیاری از منابع، شاخص‌های طیفی به عنوان روشی ساده، سریع و کارآمد برای استخراج پهنه‌های آبی به طور گسترده مورد استفاده قرار گرفته‌اند. شاخص اختلاف آب نرمال‌شده (NDWI; Normalized Difference Water Index) یکی از نخستین شاخص‌ها در این زمینه است که با استفاده از باندهای سبز و مادون قرمز نزدیک، امکان تفکیک آب از سایر کاربری‌ها را فراهم می‌کند [McFeeters, 1996]. با این حال، این شاخص در برخی موارد، به‌ویژه در مناطق شهری یا دارای پوشش گیاهی متراکم، دچار خطا می‌شود. به منظور بهبود عملکرد NDWI، شاخص اصلاح‌شده‌ای تحت عنوان شاخص اصلاح‌شده اختلاف آب نرمال‌شده (MNDWI; Modified Normalized Difference Water Index) ارایه شد که در آن به جای باند مادون قرمز نزدیک، از باند مادون قرمز کوتاه‌موج (SWIR) استفاده می‌شود [Xu, 2006]. این تغییر موجب افزایش دقت در تفکیک پهنه‌های آبی، به‌ویژه در مناطق دارای نویز پس‌زمینه مانند اراضی شهری و خاک‌های مرطوب می‌شود. علاوه بر این، ترکیب شاخص‌های طیفی با روش‌های آستانه‌گذاری و تحلیل چندزمانه، امکان پایش دقیق‌تر تغییرات پهنه‌های آبی را فراهم کرده و به عنوان یک رویکرد موثر در مطالعات تغییرات محیطی شناخته می‌شود.

در پژوهشی به منظور پایش تغییرات مساحت تالاب‌های هورالعظیم و شادگان، کارآیی شاخص‌های طیفی مختلف مورد ارزیابی قرار گرفت [Amiri *et al.*, 2021]. یافته‌های این مطالعه نشان داد که MNDWI عملکرد به‌مراتب برتری نسبت به NDWI و شاخص خودکار استخراج آب (Automatic Water Extraction Indicator; AWEI) در تفکیک پهنه‌های آبی از محیط‌های پیچیده ساحلی و تالابی دارد. این پژوهشگران تاکید کردند که

MNDWI به دلیل بهره‌گیری از باند مادون قرمز کوتاه‌موج، در حذف نویزهای ناشی از اختلاط پیکسل‌های آبی با پوشش گیاهی و خاک‌های مرطوب موفق‌تر عمل کرده و تکرارپذیری بالاتری در استخراج مساحت پهنه‌های آبی از تصاویر لندست نشان می‌دهد.

برای استخراج پهنه آبی خلیج گرگان نیز MNDWI به کار برده شده و برتری آن نسبت به NDWI در تفکیک آب از محیط‌های پیچیده ساحلی تایید شده است [Hamzeh & Torabi, 2021]. مرور مطالعات پیشین نشان می‌دهد که MNDWI، به دلیل توانایی در تفکیک پهنه آبی از محیط‌های پیچیده ساحلی و سرعت بالا، ابزاری مناسب برای پایش نوسانات خلیج گرگان است [Hamzeh & Torabi, 2021; Ebadi, 2022]. با این حال، واکاوی متون علمی دو خلا اصلی نقص در پیوستگی زمانی (اغلب پژوهش‌های گذشته بر بازه‌های زمانی گسسته یا فواصل ۱۰ تا ۲۰ساله متمرکز بوده‌اند که این رویکرد امکان تحلیل دقیق روندهای سالانه و شناسایی نوسانات لحظه‌ای و میان‌دوره‌ای مساحت خلیج را سلب کرده است [Shayan *et al.*, 2013; Rahimi *et al.*, 2019; Hamzeh & Torabi, 2021]) و کمبود تحلیل‌های کمی بلندمدت (علی‌رغم اثبات تاثیرپذیری خلیج از تراز دریای خزر، اکثر مطالعات بر تحلیل‌های کیفی، مدل‌سازی‌های هیدرودینامیکی یا اثرات لایروبی تمرکز داشته‌اند و تحلیل آماری کمی‌سازی شده که همبستگی ریاضی بین مساحت و تراز دریا را در یک سیر زمانی منسجم و چنددهه‌ای استخراج کند، همچنان محدود است [Sharbaty & Nasimi, 2018; Sharbaty, 2019; Hamzeh & Torabi, 2021]) را در پژوهش‌های این حوزه نمایان می‌سازد..

در همین راستا، هدف اصلی پژوهش حاضر پرکردن این خلاهای علمی از طریق پایش پیوسته و سالانه مساحت پهنه آبی خلیج گرگان در یک بازه زمانی نزدیک به ۴۰ سال (۱۳۶۵ تا ۱۴۰۴) با بهره‌گیری از تصاویر لندست بود.

روش‌شناسی

پژوهش حاضر از نوع کاربردی و بر پایه پژوهش موردی است که در آن چارچوب کلی بر استفاده از روش‌های کمّی، پردازش تصویر و تحلیل‌های آماری استوار شد. محدوده مورد مطالعه، خلیج گرگان به عنوان بزرگ‌ترین خلیج دریای خزر است که در منتهی‌الیه جنوب شرقی این دریا، بین طول‌های جغرافیایی '۰۶ °۵۴ - '۲۵ °۵۳ شرقی و عرض‌های جغرافیایی '۰۰ °۳۷ - '۴۶ °۳۶ شمالی واقع شده است (شکل ۱).

مساحت آن در منابع مختلف بین ۴۰۰ تا ۵۵۰ کیلومتر مربع ذکر شده و بیشترین طول آن حدود ۶۰ تا ۷۰ کیلومتر و عرض آن بین ۱۲ تا ۱۴ کیلومتر گزارش شده است. از نظر هیدرومورفولوژی، خلیج گرگان حوضه‌ای بسیار کم‌عمق محسوب می‌شود که میانگین ژرفای آن کمتر از ۲ متر است. بیشترین عمق خلیج در بخش‌های شرقی و در مجاورت دهانه ورودی حدود ۴/۵ تا ۵ متر ثبت شده است که این مقدار با حرکت به سمت غرب و به دلیل نرخ بالای رسوب‌گذاری آورد رودخانه‌ای و کاهش اثر تبادل با دریا، به‌تدریج کاهش یافته و در سواحل غربی به صفر می‌رسد. بندر ترکمن به عنوان مهم‌ترین بندر ناوبری منطقه، در فاصله ۵کیلومتری از کانال ورودی در گوشه شمال شرقی ساحل خلیج مستقر شده است. این خلیج از طریق کانال‌های ارتباطی آشوراده (چاپقلی) و خزینی با دریای خزر تبادل آبی دارد که پویایی هیدرولوژیک آن را تضمین می‌کنند [Sharbaty & Nasimi, 2018; Sharbaty, 2019; Gharibreza *et al.*, 2018; Mansouri & Sarbazi, 2017; Ghayoumi, 2017; Khoshravan & Rohanizadeh, 2021].

شکل ۱) منطقه مورد مطالعه

برای پایش مستمر تغییرات مساحت پهنه آبی در یک بازه زمانی نزدیک به ۴۰ سال (۱۹۸۶ تا ۲۰۲۵)، تعداد ۳۶ تصویر طیفی ماهواره لندست شامل سنجنده‌های تی‌ام و ایی‌تی‌ام+ و اُال‌آی (OLI) با ردیف ۳۴ و عبور ۱۶۳ اکثراً در فصل تابستان (به دلیل پایداری شرایط جوی و ابرناکی حداقلی) از پایگاه داده ارث اکسپلورر (Earth Explorer) استخراج گردید. در موارد معدودی به دلیل نقص داده در آرشیو، از نزدیک‌ترین تصویر باکیفیت در سایر ماه‌ها استفاده شد [U.S. Geological Survey, n.d.].

برای آشکارسازی دقیق مرزهای آبی که در سطح تولیدی ۲ و دارای تصحیحات لازم بودند، MNDWI با ترکیب باندهای سبز و مادون قرمز کوتاه‌موج (SWIR) (فرمول ۱) به کار گرفته شد تا نویزهای محیطی (پوشش گیاهی و خاک‌های مرطوب) حذف گردند.

فرمول ۱)

$$\mathrm{MNDWI} = \frac{\mathrm{Green} - \mathrm{SWIR}}{\mathrm{Green} + \mathrm{SWIR}}$$

فرآیند پردازش در محیط نرم‌افزار انوی (ENVI 5.6) با اعمال حدگذاری آستانه صفر روی هیستوگرام تصاویر MNDWI جهت تولید نقشه‌های باینری (آب و غیرآب) انجام شد؛ سپس لایه‌ها به آرک‌جی‌آی‌اِس (ArcGIS 10.8.2) منتقل گردید تا مساحت محاسبه شود و در نهایت برای رفع مشکل نواری در تصاویر لندست ۷ (خطوط سیاه و بدون داده)، هندسه پلیگون‌ها در نرم‌افزار اتوکد مورد بازبینی و تدقیق قرار گرفت.

داده‌های تراز آب دریای خزر برای بازه زمانی ۱۹۹۳ به بعد از پایگاه داهیتی (DAHITI) (حاصل ماموریت‌های ارتفاع‌سنجی نظیر جیسون و تاپکس/پوزیدون) و برای سال‌های ۱۳۶۵ تا ۱۳۷۱ از طریق استخراج داده از نمودارهای نوسانات ایستگاه باکو تامین گردید [Saeed Sabaee *et al.*, 2011; DGFI-TUM, n.d.]. به منظور اعتبارسنجی و اطمینان از پیوستگی داده‌های تراز آب در طول دوره ۴۰ساله پژوهش، مقادیر استخراج‌شده از پایگاه داده داهیتی با آمارهای ثبت ابزاری [Saeed Sabaee *et al.*, 2011] در بازه هم‌پوشانی (سال‌های دارای تصویر لندست بین ۱۹۹۳ تا ۲۰۰۰) مورد تطبیق قرار گرفت. نتایج نشان داد که میانگین تراز در داده‌های داهیتی (۲۶/۲۲- متر) با میانگین متناظر در منحنی نوسانات ایستگاه ترازسنجی باکو (۲۶/۲۳- متر) انطباق بسیار بالایی دارد.

جدول ۱) نتایج به‌دست‌آمده برای مساحت خلیج گرگان، تراز آب دریای خزر، و بارندگی تجمعی شش‌ماهه

ردیف	ماهواره	تاریخ تصویربرداری	سال شمسی	مساحت خلیج گرگان (km^2)	تراز آب دریای خزر (m)	بارندگی تجمعی شش‌ماهه (mm)
۱	لندست ۵	۱۹۸۶/۰۸/۱۴	۱۳۶۵	۴۲۸/۲۲۱۴	-۲۷/۴	۲۲۵/۶۱۱۱
۲	لندست ۵	۱۹۸۷/۰۶/۱۴	۱۳۶۶	۴۵۰/۹۸۲۸	-۲۷/۳	۳۶۷/۳۳۴۲
۳	لندست ۵	۱۹۸۸/۱۲/۲۵	۱۳۶۷	۴۸۴/۸۷۵۹	-۲۷/۲	۲۸۰/۳۶۲۳
۴	لندست ۵	۱۹۸۹/۰۵/۰۲	۱۳۶۸	۴۶۸/۶۳۹۰	-۲۷/۱	۲۷۶/۳۳۵۷
۵	لندست ۵	۱۹۹۰/۰۸/۲۵	۱۳۶۹	۴۸۳/۴۹۲۲	-۲۷	۱۳۰/۵۶۹۰
۶	لندست ۵	۱۹۹۱/۰۶/۲۵	۱۳۷۰	۵۳۰/۳۶۹۱	-۲۶/۸	۳۷۰/۰۳۳۱
۷	لندست ۵	۱۹۹۲/۰۶/۱۱	۱۳۷۱	۵۴۸/۷۳۴۸	-۲۶/۷	۴۴۸/۴۲۴۷
۸	لندست ۵	۱۹۹۳/۰۶/۱۴	۱۳۷۲	۵۴۱/۹۲۰۶	-۲۶/۲۳۶	۳۴۳/۳۵۳۴
۹	لندست ۵	۱۹۹۴/۰۷/۰۳	۱۳۷۳	۵۵۴/۵۰۷۰	-۲۶/۰۳۴	۲۱۰/۳۱۵۲
۱۰	لندست ۵	۱۹۹۵/۰۶/۲۰	۱۳۷۴	۵۶۵/۴۷۹۵	-۲۵/۸۷۶	۲۱۳/۶۵۳۰
۱۱	لندست ۵	۱۹۹۷/۰۵/۰۸	۱۳۷۶	۵۱۸/۸۸۶۸	-۲۶/۴۵۹	۲۶۴/۸۸۴۳
۱۲	لندست ۵	۱۹۹۸/۰۴/۰۹	۱۳۷۷	۵۲۳/۳۵۲۱	-۲۶/۴۴۶	۴۱۹/۱۵۲۲
۱۳	لندست ۵	۲۰۰۰/۰۷/۱۹	۱۳۷۹	۵۰۵/۸۶۲۱	-۲۶/۳۰۲	۱۵۷/۲۶۶۳
۱۴	لندست ۵	۲۰۰۱/۰۹/۰۸	۱۳۸۰	۵۰۰/۱۲۴۷	-۲۶/۶۴۱	۱۳۱/۴۶۳۳
۱۵	لندست ۵	۲۰۰۲/۰۶/۲۳	۱۳۸۱	۵۲۳/۸۳۴۵	-۲۶/۴۰۳	۳۰۵/۴۶۲۶
۱۶	لندست ۷	۲۰۰۳/۰۸/۰۵	۱۳۸۲	۵۳۴/۴۵۸۸	-۲۶/۴۰۶	۳۰۶/۴۹۷۰
۱۷	لندست ۷	۲۰۰۴/۰۶/۰۴	۱۳۸۳	۵۳۳/۴۴۳۴	-۲۶/۲۳۷	۳۴۳/۵۱۹۷
۱۸	لندست ۷	۲۰۰۵/۰۷/۲۵	۱۳۸۴	۵۱۶/۳۵۶۶	-۲۶/۱۱۸	۲۸۵/۱۰۹۲
۱۹	لندست ۷	۲۰۰۶/۰۶/۱۰	۱۳۸۵	۵۰۱/۵۷۵۴	-۲۶/۲۶۳	۲۹۲/۱۲۹۹
۲۰	لندست ۷	۲۰۰۷/۰۷/۱۵	۱۳۸۶	۴۹۸/۵۱۲۹	-۲۶/۳۸۲	۳۴۳/۶۹۱۴
۲۱	لندست ۷	۲۰۰۸/۰۶/۱۵	۱۳۸۷	۴۹۷/۱۸۲۵	-۲۶/۵۵۸	۲۲۰/۵۴۹۵
۲۲	لندست ۵	۲۰۰۹/۰۶/۲۶	۱۳۸۸	۴۹۷/۹۷۴۰	-۲۶/۴۹۶	۳۷۷/۶۲۹۱
۲۳	لندست ۵	۲۰۱۰/۰۶/۱۳	۱۳۸۹	۴۹۲/۵۶۴۳	-۲۶/۵۰۲	۴۴۴/۹۷۶۸
۲۴	لندست ۸	۲۰۱۳/۰۷/۰۷	۱۳۹۲	۴۷۶/۶۹۲۴	-۲۶/۸۲۸	۲۶۵/۸۲۵۳
۲۵	لندست ۸	۲۰۱۴/۰۷/۲۶	۱۳۹۳	۴۶۲/۵۹۱۲	-۲۷/۰۷۶	۲۶۵/۹۲۶۹
۲۶	لندست ۸	۲۰۱۵/۰۷/۲۹	۱۳۹۴	۴۳۱/۰۷۱۲	-۲۷/۲۷۰	۲۲۸/۲۹۷۹
۲۷	لندست ۸	۲۰۱۶/۰۶/۲۹	۱۳۹۵	۴۴۳/۱۷۶۹	-۲۷/۱۵۷	۳۹۲/۹۶۴۱
۲۸	لندست ۸	۲۰۱۷/۰۷/۱۸	۱۳۹۶	۴۳۱/۷۸۴۵	-۲۷/۲۸۲	۲۰۳/۰۰۴۶
۲۹	لندست ۸	۲۰۱۸/۰۷/۰۵	۱۳۹۷	۴۲۱/۸۱۶۸	-۲۷/۲۴۳	۲۴۴/۰۶۱۶
۳۰	لندست ۸	۲۰۱۹/۰۶/۲۲	۱۳۹۸	۳۷۵/۷۲۹۳	-۲۷/۵۰۰	۵۷۸/۴۹۴۵
۳۱	لندست ۸	۲۰۲۰/۰۶/۰۸	۱۳۹۹	۳۷۹/۹۵۹۹	-۲۷/۴۲۸	۳۰۸/۰۰۴۵
۳۲	لندست ۸	۲۰۲۱/۰۶/۲۷	۱۴۰۰	۳۵۲/۷۲۲۵	-۲۷/۶۲۶	۲۴۳/۱۶۸۲
۳۳	لندست ۹	۲۰۲۲/۰۶/۰۶	۱۴۰۱	۳۲۵/۴۷۱۴	-۲۷/۸۴۴	۲۵۰/۴۷۴۸
۳۴	لندست ۸	۲۰۲۳/۰۸/۱۲	۱۴۰۲	۲۷۵/۱۲۵۷	-۲۸/۱۶۷	۲۰۸/۷۱۴۰
۳۵	لندست ۹	۲۰۲۴/۰۷/۰۵	۱۴۰۳	۳۰۵/۸۳۵۸	-۲۸/۱۷۵	۲۰۶/۶۷۳۳
۳۶	لندست ۹	۲۰۲۵/۰۷/۱۶	۱۴۰۴	۲۹۶/۱۵۸۰	-۲۸/۳۸۲	۱۳۳/۳۶۰۰

این نزدیکی حداکثری میانگین‌ها در بازه مشترک، اثبات می‌کند که هر دو منبع داده از مبنای ارتفاعی واحدی (تراز دریای بالتیک) پیروی می‌کنند. بنابراین، جهت حفظ اصالت داده‌ها، نیازی به اعمال ضریب تصحیح یا فرآیند همسان‌سازی اضافی دیده نشد. این موضوع امکان ایجاد یک سری زمانی یکپارچه و فاقد خطای سیستماتیک را برای کل دوره پژوهش فراهم آورد تا تحلیل‌های همبستگی بین تراز دریا و مساحت خلیج با ضریب اطمینان بالایی صورت گیرد.

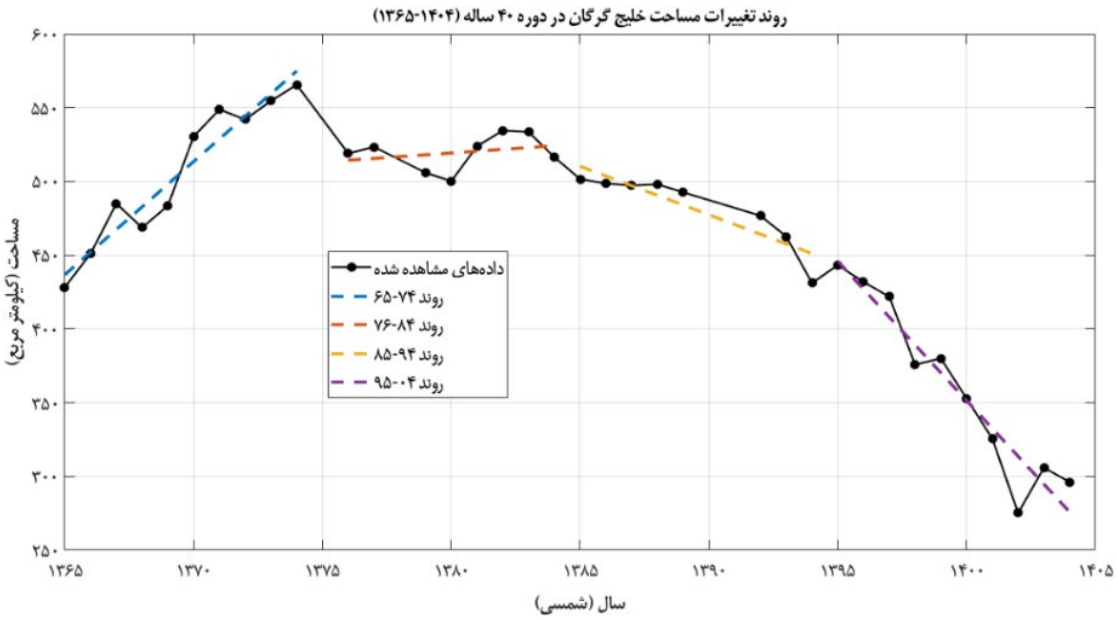
به منظور واکاوی تاثیرات اقلیمی، داده‌های بارش تجمعی از پایگاه داده چیرپس (CHIRPS) فراخوانی شد [Climate Hazards Center, n.d.]. میزان بارندگی تجمعی شش‌ماهه منتهی به ماه تصویربرداری (براساس فرضیه وجود تاخیر زمانی در پاسخ خلیج) استخراج گردید و لایه‌های رستری بارش در محیط آرک‌جیس براساس مرز جغرافیایی حوضه آبریز قره‌سو به عنوان اصلی‌ترین منبع تامین آب شیرین خلیج، برش داده و میانگین‌گیری شد.

برای ارزیابی میزان اعتبار مساحت‌های استخراج‌شده، از تصویر ماهواره‌ای سنتینل ۲ با قدرت تفکیک مکانی ۱۰ متر و روش طبقه‌بندی ماشین بردار پشتیبان (SVM) استفاده شد [European Space Agency, n.d.]. انتخاب سری لندست برای پایش ۴۰ساله به جای سنتینل، به دلیل نبود آرشیو تاریخی سنتینل در دهه‌های ۱۹۸۰ و ۱۹۹۰ میلادی بوده است. همچنین MNDWI بر روش‌های طبقه‌بندی ترجیح داده شد، چرا که این شاخص علاوه بر سرعت پردازش بالا در سری‌های زمانی طولانی، بر پایه بازتابندگی فیزیکی پدیده‌ها عمل کرده و برخلاف روش‌های طبقه‌بندی، فاقد سوگیری و خطای انسانی در انتخاب نمونه‌های آموزشی است.

یافته‌ها

مشخصات تصاویر ماهواره‌ای، تراز آب دریا و بارش‌های حوضه در جدول ۱ آمده است.

براساس محاسبات انجام‌شده، وسعت خلیج در این چهار دهه نوسانات شدیدی را تجربه کرد که در چهار دوره مشخص قابل دسته‌بندی بود (نمودار ۱).



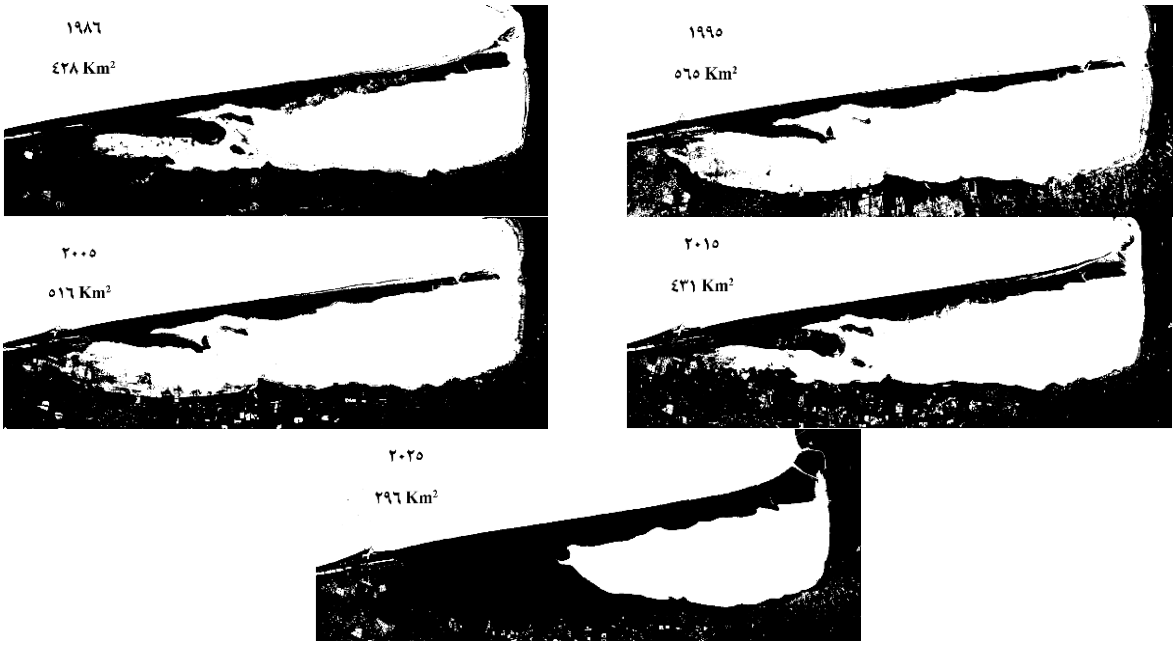
نمودار ۱) تغییرات زمانی مساحت خلیج گرگان به همراه روندهای تغییر آن

در دوره نخست که از سال ۱۳۶۵ تا ۱۳۷۴ (۱۹۸۶ تا ۱۹۹۵) به طول انجامید، مساحت خلیج روندی افزایشی داشت و در سال ۱۳۷۴ (۱۹۹۵) به بیشترین میزان خود یعنی ۵۶۵/۴۸ کیلومتر مربع رسید. این افزایش وسعت، با دوره پیشروی آب دریای خزر در آن سال‌ها انطباق کامل داشت. در دوره دوم، یعنی بین سال‌های ۱۳۷۶ تا ۱۳۸۹ (۱۹۹۷ تا ۲۰۱۰)، وسعت خلیج در محدوده ۵۰۰ کیلومتر مربع ثابت ماند و نوسانات محدودی را نشان داد.

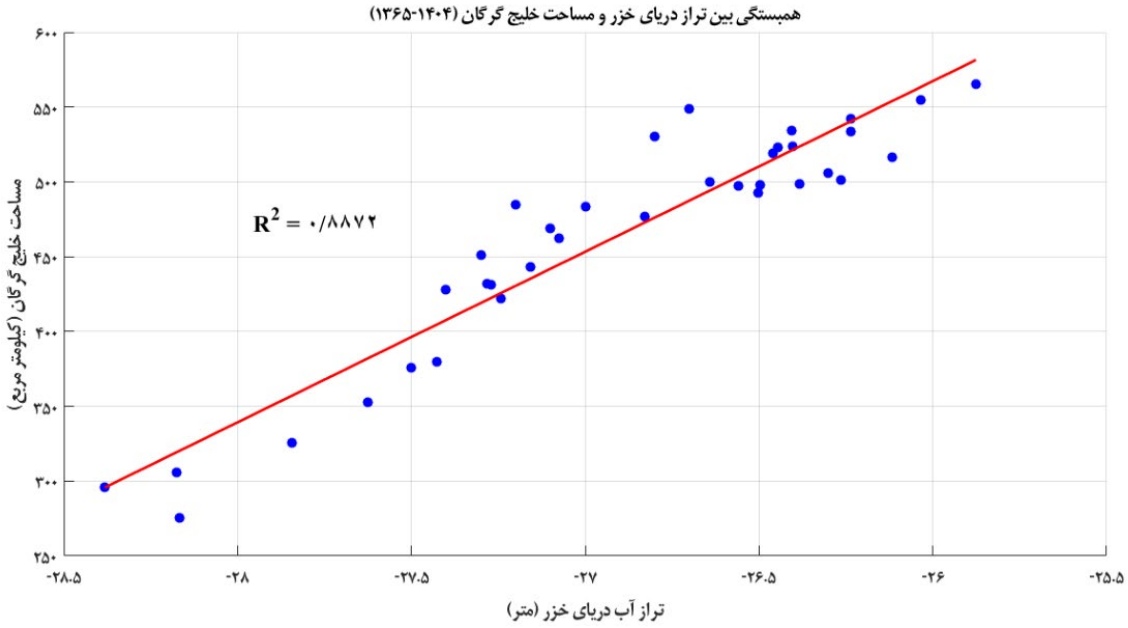
دوره سوم که از سال ۱۳۹۲ آغاز شد و تا سال ۱۴۰۴ ادامه یافت (۲۰۱۳ تا ۲۰۲۵)، زمان اُفت شدید و نگران‌کننده وسعت خلیج بود. در این بازه، پهنه آبی با سرعتی زیاد منقبض شد و در سال ۱۴۰۲ (۲۰۲۳) به کمترین میزان تاریخی خود یعنی ۲۷۵/۱۲ کیلومتر مربع رسید که نشان داد خلیج بیش از نیمی از وسعت دوران اوج خود را از دست داده است. در نهایت، در دو سال اخیر (۱۴۰۳ و ۱۴۰۴) بازگشت بسیار جزیی در مساحت مشاهده شد و وسعت خلیج به حدود ۳۰۰ کیلومتر مربع رسید. تصاویر استخراج‌شده در مقاطع ده ساله (شکل ۲) به‌خوبی روند تبدیل‌شدن پهنه‌های آبی به اراضی خشک را در جبهه غربی و جنوبی نشان داد.

نمودار پراکنش حاصل از همبستگی پیرسون بین تراز آب دریای خزر و مساحت پهنه آبی خلیج گرگان در بازه زمانی ۴۰ساله پژوهش نشان داد که با کاهش تراز آب دریا، مساحت خلیج با حساسیت بسیار بالایی منقبض شده و روند کاهشی را طی کرد. نتایج وجود همبستگی مثبت، مستقیم و قوی (r=۰/۹۴۱۹) میان این دو متغیر

را تایید نمود. بیش از ۸۸% از تغییرات وسعت خلیج گرگان در طول چهار دهه اخیر (١٣٦٥ تا ١٤٠٤)، مستقیماً توسط نوسانات تراز آب دریای خزر تبیین شد. این همبستگی معنادار، گویای ارتباط هیدرولیکی مستقیم و تنگاتنگ بین پیکره آبی خلیج گرگان و دریای خزر از طریق کانال‌های ارتباطی (نظیر آشوراده و چپقلی) بود (نمودار ۲).



شکل ۲) پهنه آبی خلیج گرگان در مقاطع زمانی چهل‌ساله ۱۳۶۵ تا ۱۴۰۴ (با استفاده از MNDWI بر روی تصاویر لندست)



نمودار ۲) همبستگی بین مقادیر مساحت خلیج گرگان و تراز آب دریای خزر

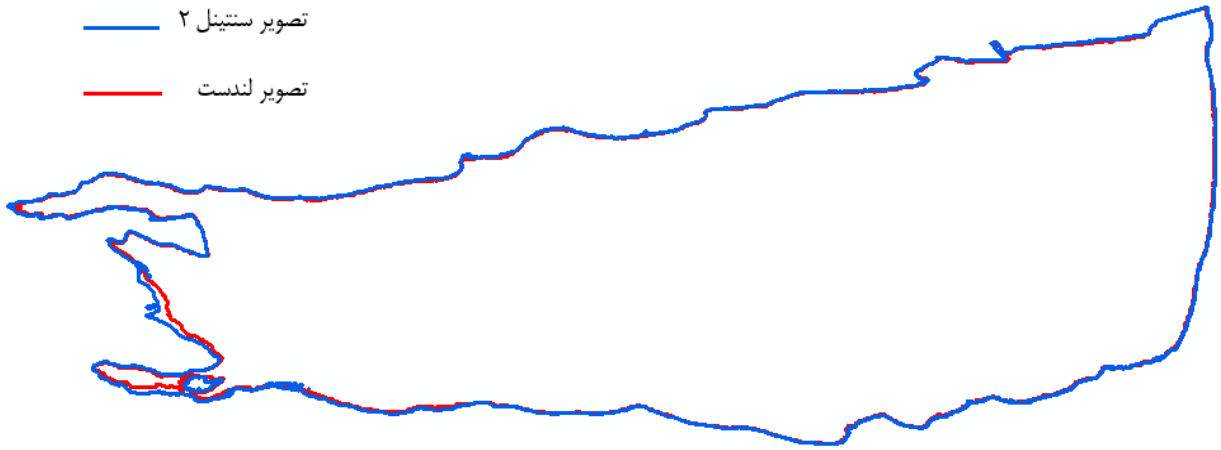
عقب‌نشینی خط ساحلی در مناطق کم‌عمق غربی کاملاً با اُفت تراز دریا مطابقت داشت. در مقابل، بررسی‌های مربوط به بارش‌های حوضه قره‌سو نشان داد که نوسانات بارندگی تجمعی، تاثیر تعیین‌کننده‌ای بر تغییرات وسعت خلیج در مقیاس بلندمدت نداشت و رابطه‌ای میان این دو مشاهده نشد (شکل ۳).

نتایج حاصل از تشکیل ماتریس خطا، میزان انطباق نقشه استخراج شده با MNDWI در مقابل نقشه مرجع SVM مورد سنجش را ٩٩/٧٦% (ضریب کاپا معادل ٠/٩٩٦) نشان داد. همچنین مقایسه کمی مساحت‌ها نشان داد که وسعت خلیج در تصویر لندست برابر با ٣٥٢/٧٢٢٥ کیلومتر مربع و در تصویر مرجع سنتینل برابر با ٣٥٨/٢١٠٨ کیلومتر مربع و بنابراین اختلاف نسبی آنها حدود ١/٥% بود. این اختلاف عمدتاً در نواحی کم‌عمق و گل‌آلود غربی خلیج متمرکز بود؛ مناطقی که به دلیل وجود پیکسل‌های ترکیبی و ابهام طیفی، تفکیک دقیق مرز آب و خشکی با چالش بیشتری همراه بود.

در باقی مناطق این دو منبع انطباق هندسی بالایی در مرزهای آبی داشتند (شکل ٤).

بارندگی تجمعی شش‌ماهه حوضه قره‌سو با مساحت پهنه آبی خلیج گرگان همبستگی معنی‌داری نداشت (r=۰/۲۱۲۱؛ p=۰/۲۱۴۲).

شکل ۳) نقشه هم‌پوشانی نوسانات خط ساحلی خلیج گرگان در طول چهار دهه اخیر (۲۰۲۵-۱۹۸۶)



شکل ۴) محدوده خلیج گرگان در سال ۲۰۲۱ مستخرج از دو تصویر لندست و سنتینل ۲

بحث

هدف اصلی این پژوهش، پایش پیوسته و چهل‌ساله نوسانات مساحت پهنه آبی خلیج گرگان (۱۳۶۵ تا ۱۴۰۴) و واکاوی سهم تعیین‌کننده نوسانات تراز دریای خزر و بارش‌های حوضه آبریز قره‌سو در تحولات مورفولوژیکی این اکوسیستم حساس بود. یافته‌های این مطالعه نشان داد که خلیج گرگان در بازه زمانی مورد مطالعه، بیش از ۵۰% وسعت خود را از دست داده و از ٥٦٥/٤٨ کیلومتر مربع در سال ۱۳۷٤ (۱۹۹۵) به ۲۷۵/۱۲ کیلومتر مربع در سال ۱٤۰۲ (۲۰۲۳) رسیده است. این نرخ کاهش مساحت، بسیار فراتر از آمارهای ۳۰ تا ۳۵درصدی است که در مطالعات پیشین گزارش شده [Khoshravan & Rohanizadeh, 2021; Mansouri & Sarbazi, 2017] که نشان‌دهنده شتاب‌گرفتن فرآیند خشک‌زایی در دهه اخیر و ورود خلیج به یک فاز بحرانی است. بر اساس یافته‌های جدید، تداوم روند کاهشی تراز آب، نه تنها منجر به انقباض پهنه آبی شده، بلکه با برهم زدن توازن بیولوژیکی، حیات گونه‌های بومی خلیج را با تهدید جدی مواجه کرده است [Sharbaty, 2023]. همچنان مطابق با سناریوهای مطرح‌شده توسط *خوشروان* [Khoshravan, 2018]، این روند کاهشی تراز، خلیج گرگان را به سمت خشک‌زایی کامل و تبدیل‌شدن به پهنه‌های گِلی سوق می‌دهد، پدیده‌ای که در این پژوهش با انقباض شدید جبهه غربی خلیج به وضوح مشاهده شد.

تحلیل همبستگی ۹۴درصدی بین تراز دریا و مساحت خلیج در این پژوهش، فرضیه حاکمیت مطلق رژیم هیدرودینامیکی خزر بر هندسه خلیج را به‌شدت تقویت می‌کند. این نتیجه با یافته‌های مطالعات قبلی که همبستگی ۹۲درصدی را در بازه‌ای ۲۰ساله گزارش کرده بودند، همخوانی دارد و ثابت می‌کند که در مقیاس چهل‌ساله نیز تراز دریا متغیر حاکم است [Hamzeh & Torabi, 2021]. این وابستگی شدید فیزیکی به دلیل عمق بسیار کم و شیب فوق‌العاده ملایم بستر خلیج است که آن را به یک نمایشگر حساس برای وضعیت تراز دریای خزر تبدیل کرده است. در تایید این موضوع، *جعفری* و همکاران [Jafari *et al.*, 2021] با استفاده از مدل‌سازی عددی نشان دادند که تغییرات تراز آب دریای خزر به طور مستقیم بر الگوی جریان و چرخش آب در داخل خلیج تاثیر می‌گذارد. به عبارتی، افت تراز دریا نه تنها باعث کاهش مساحت پهنه آبی

می‌شود، بلکه با تغییر ساختار هیدرودینامیکی، منجر به کاهش تبادل آب بین خلیج و دریا گشته و فرآیند خودپالایی را مختل می‌کند. این یافته با مشاهدات بصری این تحقیق مبنی بر انسداد کانال‌های ارتباطی آشوراده و چپقلی همخوانی دارد.

در مقابل، عدم معناداری رابطه بین بارش‌های حوضه قره‌سو و مساحت خلیج نشان می‌دهد که آوردهای جوی و جریان‌های رودخانه‌ای محلی توان جبران عقب‌نشینی آب ناشی از افت تراز خزر را ندارند. این نتیجه با یافته‌های *حمزه* و *ترابی* [Hamzeh & Torabi, 2021] که همبستگی بارش را در بلندمدت بسیار ناچیز گزارش کرده بودند، انطباق کامل دارد. تفسیر این پدیده بدین معناست که خلیج گرگان بیش از آنکه تابعی از بیلان آب شیرین حوضه آبریز خود باشد، تحت کنترل بیلان آبی دریای خزر قرار دارد. بنابراین، حتی در سال‌هایی که بارش در حوضه قره‌سو در حد نرمال یا فراتر از آن بوده، به دلیل افت تراز تجمعی خزر، روند پسروی خلیج متوقف نشده است طبق تحلیل‌های *شربتی* [Sharbaty, 2023]، کاهش عمق ناشی از افت تراز، حساسیت خلیج را نسبت به تبخیر نیز افزایش داده و فرآیند جانشینی بوم‌شناختی را تسریع نموده است. تصاویر استخراج‌شده در این پژوهش همچنین پدیده انسداد مجاری ارتباطی را آشکار کرد؛ *خوشروان* [Khoshravan, 2018] معتقد است که بسته شدن دهانه ارتباطی بعلت رسوب‌گذاری شدید، شرایط را برای جانشینی بوم‌شناختی فراهم کرده و اکوسیستم آبی را به سمت تبدیل شدن به تالاب‌های مرده و در نهایت خشکی پیش می‌برد. بر اساس نتایج این پژوهش، جابه‌جایی عرضی خط ساحلی در برخی نقاط غربی به چندین کیلومتر رسیده است که این امر تاییدکننده هشدارهای علمی در خصوص فروپاشی قریب‌الوقوع حیات خلیج است. انسداد کامل کانال خزینی و تنگ‌شدگی شدید دهانه آشوراده (چاپقلی) که در مطالعات پیشین نیز به عنوان زنگ خطری برای قطع ارتباط هیدرولیکی خلیج مطرح شده بود، در نتایج بصری این پژوهش تا سال ۲۰۲۵ به‌خوبی مشهود است [Sharbaty & Nasimi, 2018; Sharbaty, 2019]. پیشروی زبانه ماسه‌ای میانکاله با سرعت متوسط ۶۸ متر در سال که در برخی نقاط این تحقیق مشاهده شد، با یافته‌های تحقیقات قبلی همخوانی داشته و فرآیند جانشینی بوم‌شناختی و تبدیل اکوسیستم آبی به پهنه‌های گلی و خشکی را تایید می‌کند [Khoshravan & Rohanizadeh, 2021].

نقص داده‌های ماهواره‌ای در اوایل دهه ۹۰ میلادی به دلیل مشکلات فنی سنجنده لندست ۷ و همچنین دشواری در دسترسی به آمار دقیق برداشت‌های انسانی از حق‌آبه‌های رودخانه‌ای، از محدودیت‌های اصلی این مطالعه در تحلیل دقیق‌تر سهم منابع آب شیرین بود. با توجه به وابستگی ۹۴درصدی تغییرات وسعت خلیج به تراز دریا، اتخاذ سیاست‌های سازگاری محیطی به جای مداخلات سخت‌افزاری صرف، توصیه می‌شود. با این حال، جهت جلوگیری از انسداد کامل هیدرولیکی، لایروبی دهانه آشوراده و بررسی امکان احداث کانال‌های جدید نظیر کانال انزان در عمیق‌ترین بخش خلیج جهت بهبود خودپالایی و تعویض آب می‌تواند در اولویت برنامه‌های حفاظتی قرار گیرد. همچنین کنترل فرسایش خاک در بالادست حوضه قره‌سو جهت کاهش بار رسوبی ورودی و حفظ عمق باقی مانده خلیج ضرورتی اجتناب‌ناپذیر است.

نتیجه‌گیری

خلیج گرگان به عنوان یک اکوسیستم نیمه‌بسته، تابع رژیم هیدرودینامیکی دریای خزر است و به دلیل شیب ملایم بستر، به عنوان یک نمایشگر حساس نسبت به تغییرات تراز دریا عمل می کند. بارش‌های محلی حوضه آبریز توان جبران پسروی خط ساحلی ناشی از اُفت تراز خزر را ندارند.

تشکر و قدردانی: موردی از سوی نویسندگان گزارش نشده است.

تاییدیه اخلاقی: با توجه به نوع پژوهش نیاز نداشت.

تعارض منافع: موردی از سوی نویسندگان گزارش نشده است.

سهم نویسندگان: لادن عبادی (نویسنده اول)، نگارنده مقدمه/روش‌شناس/پژوهشگر اصلی (۵۰%)؛ امین باغانی (نویسنده دوم)، پژوهشگر کمکی/تحلیلگر آماری/نگارنده بحث (۵۰%)

منابع مالی: موردی از سوی نویسندگان گزارش نشده است.

منابع

- Aghighi H, Alimohammadi A, Saradjian MR, Ashourloo D (2009). Estimation of water turbidity in Gorgan Bay by using IRS-ILSS-III images. The Journal of Spatial Planning and Geomatics. 13(2):55-72. [Persian]
- Amiri Kh, Seyed Kaboli H, Mahmoodi-Kohan F (2021). Study and monitoring of wetland area changes and its impact on wetland surface temperature using NDWI, MNDWI, and AWEI indices (case study: Hor-Alazim and Shadegan wetlands). Irrigation Sciences and Engineering. 44(4):59-74. [Persian]
- Behzadnia M, Dorbeiki M (2020). Carrying capacity of nature-tourism in Ashooradeh Island in Miankaleh biosphere reserve, Iran. Geographical Research. 35(3):205-213. [Persian]
- Climate Hazards Center, University of California Santa Barbara (UCSB) (n.d.). CHIRPS data (Climate Hazards Group Infrared Precipitation with Station data) [Internet]. Santa Barbara: Climate Hazards Center [cited 2026 Apr 24]. Available from: https://www.chc.ucsb.edu/data/chirps
- Deutsches Geodätisches Forschungsinstitut, Technical University of Munich (DGFI-TUM) (n.d.). DAHITI-Database for Hydrological Time Series of Inland Waters [Internet]. Munich: Technical University of Munich [cited 2026 Apr 24]. Available from: https://dahiti.dgfi.tum.de/en/39/
- Ebadi L (2022). Optimum method for water body extraction from multispectral satellite images. Geographical Research. 37(3):351-360. [Persian]
- European Space Agency (n.d.). Copernicus Sentinel-2 data collection [Internet]. Paris: ESA [cited 2026 Apr 24]. Available from: https://dataspace.copernicus.eu/data-collections/copernicus-sentinel-missions/sentinel-2
- Gharibreza M, Nasrollahi A, Afshar A, Amini A, Eisaei H (2018). Evolutionary trend of the Gorgan Bay

wetland, north of Iran. Iranian Journal of Physics Research. 22(4):933-948. [Persian]
- Rahimi E, Joudaki M, Lak R, Shahsavari A (2019). Miankaleh Peninsula coastline changes and assessment of water-level fluctuations of Gorgan Bay. Proceedings of the First National Biennial Conference on Geological Survey of Alborz Mountains and Caspian Sea. Gorgan: Golestan University. [Persian]
- Saeed Sabaee M, Danehkar A, Darvishsefat AA, Ghanghermeh A, Abdi O, Azarmdel H (2011). Caspian Sea level fluctuation and determination of setback line. Caspian Journal of Environmental Sciences. 9(2):199-210. [Persian]
- Sharbaty S (2019). Investigation of locating a new communication channel in the Gorgan Bay cased on water exchange time. Hydrophysics. 5(1):97-109. [Persian]
- Sharbaty S (2023). Investigation of the Caspian Sea water level decreasing effects on the Gorgan Bay. Journal of Utilization and Cultivation of Aquatics. 11(4):1-22. [Persian]
- Sharbaty S, Ghanghermeh A (2016). Forecasting the effect of decreasing long time trend of Caspian Sea water level on the life of Gorgan Bay. Journal of Environmental Science and Technology. 17(4):45-59. [Persian]
- Sharbaty S, Nasimi S (2018). Modeling of possible dredging effects of Khozeini channel on the water renewal time in Gorgan Bay, southeast of the Caspian Sea. Journal of Environmental Science and Technology. 20(1):15-28. [Persian]
- Shayan S, Yamani M, Khalili Y (2013). Detection of changing the northern coastline using RS and GIS techniques (Case Study: Gorgan Bay). Proceedings of the International Congress on Environmental Crises and its Solutions. Kish: The Islamic Azad University, Ahvaz Branch. [Persian]
- U.S. Geological Survey (n.d.). Earth Explorer [Internet]. Reston, Va: USGS [cited 2026 Apr 24]. Available from: https://earthexplorer.usgs.gov/
- Xu H (2006). Modification of normalised difference water index (NDWI) to enhance open water features in remotely sensed imagery. International Journal of Remote Sensing. 27(14):3025-3033.
- Yousefi Roshan MR (2015). Caspian Sea water level fluctuations during the instrumental recording period from 1837 to 2014. Proceedings of the National Conference on Spatial Sustainable Development in the Caspian Sea Coasts. Babolsar: University of Mazandaran. [Persian]
(southeastern Caspian Sea) during and post the last Caspian Sea level rise. CATENA. 166:339-348.
- Ghayoumi R (2017). Environmental challenges of Gorgan Bay and Miankaleh Wetland and providing optimal conservation and management solutions. Proceedings of the 4th Conference on Environmental Planning and Management. Tehran: Tehran University. [Persian]
- 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. Journal of Ecohydrology. 8(2):475-484. [Persian]
- Jafari A, Niksokhan MH, Majdzadeh Tabatabai MR (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. [Persian]
- Khoshravan H (2018). Fluctuations in the Caspian Sea's water level and strategies for saving Gorgan Bay. Proceedings of the 4th International Conference on Oceanographic Oceanography in the Persian Gulf. Tehran: I.R. of Iran Meteorological Organization. [Persian]
- Khoshravan H, Rohanizadeh S (2021). Rapid fluctuations in the water level of the Caspian Sea and the intensity of the shoreline movements of the Gulf of Gorgan and the Miankaleh coast. Proceedings of the 20th Iranian Hydraulic Conference. Gorgan: Gorgan University of Agricultural Sciences and Natural Resources. [Persian]
- Mansouri R, Sarbazi Z (2017). Study of changes and developments in Gorgan Bay during the period 1357-1395. Proceedings of the 5th National Conference of Iranian Association of Geomorphology (Geomorphology and Environmental Challenges). Mashhad: Ferdowsi University of Mashhad. [Persian]
- McFeeters SK (1996). The use of the Normalized Difference Water Index (NDWI) in the delineation of open water features. International Journal of Remote Sensing. 17(7):1425-1432.
- Parsaee L, Mofidi Khajeh AM (2009). Management of the Gorgan Bay watershed, challenges, goals and prospects. Proceedings of the 5th National Conference on Watershed Management Science and Engineering of Iran. Gorgan: Gorgan University of Agricultural Sciences and Natural Resources. [Persian]
- Pourimani R, Mortazavishahroudi S, Ghorbani R (2023). Absorption dose distribution pattern and radiological risk assessment in sediments of Miankaleh international