



<https://gep.ui.ac.ir/?lang=fa>

Geography and Environmental Planning

E-ISSN: 2252- 0910

Document Type: Research Paper

Vol. 36, Issue 1, No.97, 2025, pp. 89- 114

Received: 21/11/2024 Accepted: 07/06/2025

Assessment of Shoreline Retreat and Dust Source Potential in the Southeastern Caspian Sea Coastline from 1995 to 2022

Abdolazim Ghanghermeh  *

Associate professor of Climatology, Department of Geography, Golestan University, Gorgan, Iran
a.ghangherme@gu.ac.ir

Gholamreza Roshan

Associate professor of Climatology, Department of Geography, Golestan University, Gorgan, Iran
ghr.roshan@gu.ac.ir

Ziauddin Esfandiari

Master student of Climatology, Golestan University, Gorgan, Iran
ziyaesfandiyary1996@gmail.com

Abstract

The Caspian Sea, the world's largest enclosed lake, has experienced significant fluctuations in water levels in recent years, primarily driven by climate change and unsustainable human exploitation of water resources. These changes have resulted in declining water levels, substantial coastal retreat—especially along the southeastern shores—and expansion of arid regions. This study examined the trends of desertification and the potential emergence of dust sources in the area from 1995 to 2022. For this analysis, we utilized Landsat satellite data along with vegetation (NDVI) and water (NDWI) indices. Statistical analyses revealed a consistent decline in the water level of the Caspian Sea since 1995, reaching its lowest point in the 185-year instrumental record, particularly between 2020 and 2022. The findings indicated that this decrease in water levels had led to significant changes in local vegetation. In regions, such as the Gorgan Gulf, the advance of vegetation had mitigated the formation of dust sources, whereas in Gomishan Wetland, insufficient vegetation cover had heightened the potential for dust source formation. Furthermore, analyses showed that since 2011, the trend of desertification had accelerated with notable increases in vegetation, particularly in herbaceous and shrub areas. Overall, the results suggested that if the downward trend in the water level of the Caspian Sea persists, desertification in coastal areas will intensify and more regions of Gomishan Wetland will face an increased risk of becoming dust sources.

Keywords: Shoreline Retreat, Dust Sources, Caspian Water Level Fluctuations, Gomishan Wetland, Gorgan Bay.

*Corresponding Author

Ghanghermeh, A. , Roshan, G. and Esfandiari, Z. (2025). Assessment of Shoreline Retreat and Dust Source Potential in the Southeastern Caspian Sea Coastline from 1995 to 2022. *Geography and Environmental Planning*, 36 (1), 89 - 114 .



2252-0910 © University of Isfahan

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



10.22108/gep.2025.143462.1684

Introduction

The Caspian Sea, the world's largest enclosed lake, has undergone significant fluctuations in water levels in recent years, primarily due to climate change and unsustainable exploitation of water resources. Factors, such as reduced precipitation, rising temperatures, and excessive extraction from the Volga River—which supplies approximately 80% of the Caspian's water—have exacerbated these fluctuations. As a result, water levels have declined, leading to substantial shoreline retreat, particularly along the southeastern coast, and expansion of arid zones. These changes have triggered severe environmental and ecological consequences, including accelerated desertification, shoreline erosion, and an increased risk of dust hotspots, especially in areas like Gorgan Bay and Gomishan Wetland. This study aimed to investigate the trends of desertification and the potential formation of dust sources along the southeastern coastline of the Caspian Sea from 1995 to 2022.

Materials & Methods

This study utilized satellite imagery from Landsat 5, 7, and 8, along with water level data from the Caspian Sea sourced from reputable institutions, including the Caspian National Studies Center, ECMWF, and DAHITI. The satellite imagery was processed using the Google Earth Engine platform, where vegetation (NDVI) and water (NDWI) indices were calculated to analyze shoreline changes and desertification trends. The NDVI was classified into 4 categories: water bodies, barren land, grassy-shrubby vegetation, and forests, while the NDWI was employed to delineate water-land boundaries. The coastal area was segmented into 6 zones based on slope and width to evaluate regions prone to desertification. To assess changes in water levels, the Standard Normal Homogeneity Test (SNHT) was applied to detect abrupt shifts and the Mann-Kendall test was utilized to confirm the significance of trends. The expansion of vegetation cover and the potential for dust hotspots in newly exposed lands were analyzed using statistical methods and 5-year interval maps.

Research Findings

The results indicated that the water level of the Caspian Sea had steadily declined since 1995, reaching its lowest point at -28.5 m in 185 years between 2020 and 2022. This decline had intensified from 2006, with a notable drop of 64 cm during the period from 2020 to 2022. The Standard Normal Homogeneity Test (SNHT) confirmed abrupt changes in water levels, showing reductions of 102 cm from 1995 to 2022 and 88 cm from 2005 to 2022, while the Mann-Kendall test validated a significant downward trend. These changes had resulted in shoreline retreat covering 460.51 km² with the most pronounced impacts in Gomishan Wetland (225.71 km²) and the western parts of Gorgan Bay (202.03 km²).

NDVI analysis revealed that from 1995 to 2010, desertification and vegetation changes had been minimal with annual increases of 4.54 km² in barren land and 4.71 km² in grassy-shrubby vegetation. However, since 2011, desertification had accelerated, with grassy-shrubby vegetation expanding by 20.84 km² and barren land by 5.84 km² annually. In Gorgan Bay, particularly in its western regions and the Caspian-Gorgan intersection, rapid vegetation expansion—such as an 80.88 km² surge post-2013—had mitigated the formation of dust hotspots. Conversely, Gomishan Wetland, which had experienced a greater increase in barren land (70.769 km² post-2013) compared to vegetation (59.778 km²), demonstrated a higher potential for dust source formation. Statistical analyses confirmed that vegetation changes were significant and often abrupt in most zones, while changes in barren land were less statistically significant in areas, such as the northern shore of Gorgan Bay.

Discussion of Results & Conclusion

The decline in Caspian Sea water levels and the resulting shoreline retreat have significantly impacted southeastern coastal ecosystems. In Gorgan Bay, the rapid expansion of grassy-shrubby vegetation in newly exposed areas has reduced the risk of dust hotspots, challenging earlier predictions of dust source formation in this region. Conversely, in Gomishan Wetland, the prevalence of barren land over vegetation cover increases its vulnerability to becoming a dust source, posing a threat to surrounding areas. These differences can be attributed to variations in coastal slope, soil characteristics, and ecosystem resilience. If the decline in water levels continues, desertification is likely to intensify, particularly in Gomishan Wetland, thereby elevating the risk of dust source formation. This study highlighted the critical importance of restoring vegetation cover with resilient native species, such as grasses and shrubs, and implementing sustainable water management practices in the Caspian basin to prevent the emergence of dust hotspots. Continuous monitoring and protective measures are essential for maintaining the ecological balance of the Caspian coast.

مقاله پژوهشی

بررسی خشکی‌زایی و احتمال ایجاد کانون‌های ریزگردی در سواحل جنوب شرقی دریای خزر دوره زمانی ۱۹۹۵ لغایت ۲۰۲۲

عبدالعظیم قانقرمه* ، دانشیار اقلیم‌شناسی، گروه جغرافیا، دانشگاه گلستان، گرگان، ایران

a.ghangherme@gu.ac.ir

غلامرضا روشن، دانشیار اقلیم‌شناسی، گروه جغرافیا، دانشگاه گلستان، گرگان، ایران

ghr.roshan@gu.ac.ir

ضیاءالدین اسفندیاری، دانشجوی کارشناسی ارشد آب و هواشناسی، دانشگاه گلستان، گرگان، ایران

ziyaesfandiyary1996@gmail.com

چکیده

دریای خزر بزرگ‌ترین دریاچه بسته جهان، در سال‌های اخیر با نوسانات شدیدی در سطح آب مواجه شده است که عمدتاً به دلیل تغییرات اقلیمی و بهره‌برداری بی‌رویه از منابع آبی است. این تغییرات به کاهش سطح آب و پسروری چشمگیر خط ساحلی، به‌ویژه در سواحل جنوب شرقی و گسترش مناطق خشک منجر شده است. این پژوهش روند خشکی‌زایی و احتمال شکل‌گیری کانون‌های گرد و غبار در این منطقه را بین سال‌های ۱۹۹۵ تا ۲۰۲۲ تحلیل می‌کند. برای این منظور، داده‌های ماهواره‌ای لندست و شاخص‌های پوشش گیاهی (NDVI) و پوشش آبی (NDWI) استفاده شد. تحلیل‌های آماری نشان می‌دهند که سطح آب دریای خزر از سال ۱۹۹۵ به‌طور مداوم کاهش یافته و به‌ویژه بین سال‌های ۲۰۲۰ تا ۲۰۲۲ به پایین‌ترین سطح خود در دوره ۱۸۵ ساله ثبت ابزاری تراز دریا رسیده است. نتایج نشان می‌دهد که این کاهش سطح آب باعث تغییرات عمده در پوشش گیاهی منطقه شده است. در مناطقی مانند خلیج گرگان، پسروری پوشش گیاهی مانع از تشکیل کانون‌های گرد و غبار شده است، درحالی‌که در تالاب گمیشان به دلیل کمبود پوشش گیاهی، احتمال ایجاد کانون‌های ریزگرد بیشتر است. تحلیل‌ها همچنین نشان می‌دهد که از سال ۲۰۱۱ روند خشکی‌زایی تسریع یافته و پوشش گیاهی به‌ویژه در مناطق علفی و بوته‌ای افزایش درخور توجهی داشته است. به‌طور کلی، نتایج حاکی از آن است که در صورت ادامه روند کاهش تراز آب دریای خزر، خشکی‌زایی در مناطق ساحلی افزایش خواهد یافت و مناطق بیشتری از تالاب گمیشان با خطر تبدیل شدن به کانون‌های ریزگرد روبه‌رو خواهند شد.

واژه‌های کلیدی: خشکی‌زایی، کانون‌های ریزگرد، نوسانات سطح آب خزر، تالاب گمیشان، خلیج گرگان

*نویسنده مسئول

قانقرمه، عبدالعظیم، روشن، غلامرضا و اسفندیاری، ضیاءالدین. (۱۴۰۴). بررسی خشکی‌زایی و احتمال ایجاد کانون‌های ریزگردی در سواحل جنوب شرقی دریای خزر دوره زمانی ۱۹۹۵ لغایت ۲۰۲۲، جغرافیا و برنامه‌ریزی محیطی، ۳۶ (۱)، ۸۹-۱۱۴.



مقدمه

دریای خزر به‌عنوان بزرگ‌ترین دریاچه بسته جهان، با نوسانات درخور توجه سطح آب در طول تاریخ خود شناخته شده است (Sands et al., 2019). این نوسانات، که گاه با افزایش و گاه با کاهش سطح آب همراه بوده، پیامدهای اقتصادی، اجتماعی و زیست‌محیطی درخور توجهی برای کشورهای ساحلی این دریاچه به همراه داشته است (Yazdanpanah Dero et al., 2020; Lattuada et al., 2019). در سال‌های اخیر، شواهد علمی نشان می‌دهد که تغییرات اقلیمی نقش فزاینده‌ای در این نوسانات ایفا می‌کند. ازجمله علل نوسانات و تغییرات افزایشی و کاهش‌ی را دانشمندان مختلف به عامل تغییرات اقلیمی ربط می‌دهند (Akbari et al., 2020؛ قانقرمه، ۱۳۷۶؛ اسلامی و همکاران، ۱۴۰۱). به این شکل که گرمایش زمین، تبخیر فزاینده آب دریا و تغییرات الگوهای بارشی ازجمله عوامل کلیدی مؤثر بر نوسانات تراز آب خزر هستند. گرمایش زمین از طریق مکانیسم‌های مختلف می‌تواند بر نوسانات سطح آب خزر تأثیر بگذارد؛ گرم شدن تدریجی هوا به افزایش نرخ تبخیر از سطح آب دریاچه منجر می‌شود. این امر به‌طور مستقیم سطح آب خزر را کاهش می‌دهد (Klink et al., 2022; Khoshhravan et al., 2019). مطالعات نشان داده است که بین نرخ تبخیر از سطح خزر و دمای هوا در منطقه همبستگی قوی وجود دارد (Lahijani et al., 2023). تغییرات اقلیمی همچنین می‌تواند به تغییر در الگوهای بارش در حوضه آبریز خزر منجر شود. افزایش یا کاهش بارش در این منطقه می‌تواند به‌طور مستقیم بر میزان ورودی آب و در نتیجه سطح آب آن تأثیر بگذارد؛ برای مثال، برخی مطالعات نشان داده‌اند که کاهش بارش در حوضه‌های غربی خزر می‌تواند عامل اصلی افت سطح آب این دریاچه در دهه‌های اخیر باشد (نجفی‌ها و همکاران، ۱۳۹۸). رودخانه ولگا به‌عنوان بزرگ‌ترین منبع تأمین‌کننده آب دریای خزر، نقش مهمی در تنظیم سطح آب آن دارد. کاهش آبدهی ولگا به‌طور مستقیم به کاهش ورودی آب به خزر و افت سطح آب آن منجر می‌شود (Akbari et al., 2020). مطالعات نشان داده است که بین آبدهی ولگا و سطح آب خزر همبستگی قوی وجود دارد. همچنین مطالعه‌ای درباره رژیم یخبندان در خزر شمالی در شرایط گرمایش زمین انجام شده است. یافته‌های این تحقیق نشان می‌دهد که با کاهش تراز آب دریا در بخش شمالی، الگوی یخ‌زدن نیز دستخوش تغییر شده است (Kholoptsev & Naurozbayeva, 2022). گرم شدن زمین همچنین می‌تواند باعث ذوب شدن یخ‌ها و یخچال‌های طبیعی در کوه‌های اطراف خزر شود. این امر می‌تواند به افزایش ورودی آب شیرین به دریاچه و افزایش موقت سطح آب آن منجر شود؛ با این حال، در بلندمدت، ذوب شدن یخ‌ها و یخچال‌های طبیعی می‌تواند به کاهش روان آب رودخانه‌ها و در نتیجه افت سطح آب خزر منجر شود. یکی از مهم‌ترین عوامل مرتبط با تغییرات اقلیمی که بر نوسانات سطح آب خزر تأثیر می‌گذارد، ذوب شدن و یخبندان در حوضه آبریز رودخانه ولگا است (Safarov et al., 2024). رودخانه ولگا که بزرگ‌ترین منبع ورودی آب به دریای خزر است، بخش درخور توجهی از آب خود را در فصل سرد به‌صورت بارش‌های منجمد تأمین می‌کند و در دوره گرم سال ذوب اتفاق می‌افتد. این موضوع رژیم برفی خاصی در این رودخانه ایجاد می‌کند، اما باتوجه به گرمایش جهانی متأثر از تغییر اقلیم این رژیم در حال دگرگونی است؛ براین اساس می‌توان گفت که تأثیر ذوب و یخبندان طبیعی بر دریای خزر به دو صورت موقت و بلندمدت است، به‌طوری که ذوب شدن یخ‌ها و برف در کوتاه‌مدت می‌تواند به افزایش ورودی آب به رودخانه ولگا و در نتیجه افزایش موقت سطح آب دریای خزر منجر شود. درحالی که در بلندمدت، کم شدن پهنه‌های برفی و یخی می‌تواند پیامدهای

منفی برای دریای خزر به همراه داشته باشد. از آنجایی که پهنه‌های برفی و یخی مانند مخزنی طبیعی عمل می‌کنند و آب را در طول فصل‌های گرم سال به تدریج آزاد می‌کنند، ذوب‌شدن آنها می‌تواند به کاهش روان‌آب رودخانه‌ها در فصل تابستان و در نتیجه کاهش ورودی آب به دریای خزر منجر شود (Robinson & Frei, 2000). این امر به همراه افزایش نرخ تبخیر ناشی از گرم‌شدن هوا می‌تواند در بلندمدت به کاهش تدریجی سطح آب دریای خزر منجر شود. مطالعات علمی نشان داده است که تأثیر منفی ذوب‌شدن یخ‌ها و یخچال‌های طبیعی بر روان‌آب رودخانه‌ها و سطح آب خزر می‌تواند از افزایش موقت سطح آب ناشی از ذوب‌شدن یخ‌ها در کوتاه‌مدت پیشی بگیرد. برداشت بی‌رویه از آب‌های ورودی به دریای خزر در کنار تغییرات اقلیمی نقش مهمی در کاهش تراز آب این دریاچه ایفا می‌کند و به‌عنوان عاملی انسانی، کاهش تراز آب دریای خزر را تشدید می‌کند (رنجبر، ۱۳۸۸). دریای خزر از طریق حدود ۱۳۰ رودخانه تغذیه می‌شود که از مساحت پنج میلیون کیلومتری حوضه آبریز آن عبور می‌کنند. رودخانه ولگا با تأمین حدود ۸۰ درصد از ورودی آب به این دریاچه، نقش حیاتی در حفظ تعادل هیدرولوژیکی آن دارد. رودخانه‌های اورال، کورا، ترک، سفیدرود، سولاک، سمور و گرگان‌رود نیز از جمله دیگر رودخانه‌های مهمی هستند که به دریای خزر می‌ریزند (Kalugin & Morozova, 2023). تأثیرات برداشت بی‌رویه از طریق احداث سدها و برداشت بی‌رویه از آب برای مصارف کشاورزی، صنعتی و شرب در حوضه آبریز دریای خزر، حجم ورودی آب به این دریاچه را به‌طور چشمگیری کاهش می‌دهد (Ghassabian et al., 2024). این امر، به‌عنوان عامل اصلی در کاهش تراز آب در سال‌های اخیر شناخته می‌شود. در کل برداشت بیش‌ازحد از آب رودخانه‌های ورودی به دریای خزر، تعادل هیدرولوژیکی این حوضه را برهم زده و به کاهش تراز آب دامن می‌زند (Akbari et al., 2020; Kosarev et al., 2013). از طرف دیگر احداث سدها، زهکشی اراضی و تغییر کاربری اراضی از جمله دیگر فعالیت‌های انسانی هستند که می‌توانند در نوسانات تراز آب خزر نقش داشته باشند (Sharifi et al., 2024)؛ در نتیجه کاهش تراز آب، خط ساحلی را به عقب می‌راند و بر اراضی ساحلی تأثیر می‌گذارد؛ این امر، تهدیدی برای سکونتگاه‌های انسانی، زیرساخت‌ها و منابع طبیعی ساحلی به شمار می‌رود (Isaie-Moghaddam et al., 2021; Mahdian et al., 2024; Rezaee et al., 2022). نفوذ آب شور دریا به تالاب‌های ساحلی، شوری آنها را افزایش می‌دهد و حیات موجودات و تنوع زیستی را به خطر می‌اندازد (Filizadeh, 2010; Klink et al., 2022). نوسانات تراز آب، زیستگاه‌های حیات وحش از جمله تالاب‌ها، سواحل و جزایر را تخریب می‌کند و به‌طور فزاینده‌ای سبب از بین رفتن تنوع زیستی در این مناطق می‌شوند (Mahdian et al., 2024; خوشروان، ۱۳۹۹؛ عبدالحی، ۱۳۹۲). عقب‌نشینی آب دریا و افزایش شوری خاک، فرسایش خاک در سواحل را تشدید می‌کند (Isaie-Moghaddam et al., 2021؛ نجفی‌ها و همکاران، ۱۳۹۸)؛ براین‌اساس یکی از موضوعات مهم در پسروری دریای خزر به‌خصوص در نواحی با شیب بسیار کم، تشکیل کانون‌های ریزگردی است. به این موضوع در سال‌های اخیر به‌خصوص در مجامع علمی، اجتماعی و در رسانه‌های عمومی توجه شده است. همچنین بعضی از سازمان‌های دولتی مانند شرکت آب منطقه‌ای استان گلستان اقداماتی همچون کارگروه‌هایی با عنوان «نجات خلیج گرگان و تالاب میانکاله» ایجاد کردند که در ادامه این موضوع و باتوجه‌به شدت عقب‌نشینی خزر با حمایت دولت و استانداری گلستان کانال انتقال آب دریای خزر به خلیج گرگان را احداث کردند. البته نکته مهم در این است که ایجاد این کانال می‌تواند ارتباط آبی خلیج گرگان با دریای خزر را حفظ کند، اما نمی‌تواند تأثیر پسروری

دریای خزر را کنترل کند. در حال حاضر با توجه به کاهش شدید تراز آب دریای خزر به‌خصوص از سال ۱۹۹۵ به بعد، یکی از نگرانی‌هایی که در سواحل جنوبی دریای خزر به‌خصوص در جنوب شرق آن وجود دارد، امکان شکل‌گیری کانون‌های ریزگردزایی است. طبق نظر **لاهیجانی و همکاران (۲۰۲۳)** در صورت خشک‌شدن کامل خلیج گرگان، این منطقه به منبعی برای گرد و غبار تبدیل می‌شود و بر نواحی اطراف تا شعاع ۶۰ کیلومتری تأثیر می‌گذارد؛ براین اساس هدف از این مطالعه ارزیابی امکان شکل‌گیری کانون ریزگردزایی با بررسی پسروری دریا و خشکی‌زایی ساحلی با روند گسترش یا عدم پوشش سطحی از طریق برآورد شاخص پوشش گیاهی توسط داده‌های ماهواره‌ای است.

مواد و روش‌ها

در این مطالعه، عقب‌نشینی دریا و خشکی‌زایی در جنوب شرقی دریای خزر و همچنین پتانسیل ایجاد کانون‌های ریزگرد ساحلی در این منطقه پس از عقب‌نشینی دریا بررسی شد. برای انجام این کار، از تصاویر ماهواره‌ای لندست ۵، ۷ و ۸ و همچنین داده‌های تراز آب خزر استفاده شده است. داده‌های تراز آب خزر نیز از منابع مختلفی شامل مرکز ملی مطالعات و نوسانات خزر، پایگاه ECMWF و پایگاه داده سری زمانی هیدرولوژیکی آب‌های داخلی (DAHITI) دانشگاه فنی مونیخ جمع‌آوری شده‌اند و همچنین تصاویر ماهواره‌ای لندست ۵، ۷ و ۸ از پایگاه Google Earth Engine دریافت شده‌اند. در ادامه به منظور ارزیابی نوسانات و عقب‌نشینی سطح آب دریای خزر از دو روش آزمون همگنی^۱ برای شناسایی جهش ناگهانی تراز آب و از روش منکندال نیز برای صحت معنی‌داری روند تغییرات استفاده شد. آزمون‌های همگنی، شامل تعداد زیادی آزمون است که فرضیه صفر آن، این است که یک سری زمانی بین دو زمان معین همگن است. تنوع آزمون‌ها از این واقعیت ناشی می‌شود که فرضیه‌های جایگزین زیادی وجود دارد: تغییر در توزیع، تغییر در میانگین (یک یا چند بار) یا وجود روند. در این مطالعه به منظور تغییرات جهشی تراز آب دریای خزر از آزمون SNHT (تست استاندارد همگنی نرمال) استفاده شد. این آزمون توسط الکساندرسون (۱۹۸۶) برای تشخیص تغییر در یک سری داده‌های بارندگی ایجاد شده است. این روش می‌تواند زمان گسستگی و بروز ناهمگنی را در داده‌ها تشخیص دهد؛ براین اساس شناسایی شروع و پایان ناهمگنی (جهش) امکان پذیر است (Alexanderson, 1986 به نقل از **مرتضی‌پور و همکاران، ۱۳۹۹**)؛ براین مبنا «هدف اصلی به‌کارگیری این روش این است که آیا روند کاهشی تراز آب خزر به‌صورت یکنواخت است یا اینکه حالت جهشی نیز اتفاق افتاده است». در صورت جهشی بودن کاهش تراز (کاهش سریع) فرصت تعادل‌سازی اکوسیستمی در نواحی ساحلی به حداقل خود می‌رسد و در نتیجه امکان ریزگردزایی وجود خواهد داشت. در کل این آزمون برای یک سری نسبت‌ها اعمال می‌شود که مشاهدات اندازه‌گیری شده را با میانگین چندین نمونه مقایسه می‌کند. سپس نسبت‌ها استاندارد می‌شوند. سری X_i در اینجا با نسبت‌های استاندارد شده مطابقت دارد. فرضیه‌های صفر و جایگزین به‌صورت زیر تعیین می‌شوند:

H_0 : T متغیرهای X_i از توزیع $N(0,1)$ پیروی می‌کنند.

H_a : بین زمان ۱ و v متغیرها از توزیع $N(\mu_1, 1)$ پیروی می‌کنند و بین $v+1$ و T از توزیع $N(\mu_2, 1)$ پیروی می‌کنند.

¹ homogeneity test

آمار الکساندرسون به صورت زیر تعریف می‌شود:

$$T_0 \equiv \max_{1 \leq t \leq T} \left[\nu z_1^2 \cdot (n - \nu) z_2^2 \right] \quad \text{معادله ۱}$$

با

$$\begin{aligned} \bar{z}_1 &\equiv \frac{1}{\nu} \left| \sum_{t=1}^{\nu} x_t \right| \\ \bar{z}_2 &\equiv \frac{1}{\nu} \left| \sum_{t=\nu+1}^{\nu} x_t \right| \end{aligned} \quad \text{معادله ۲}$$

آمار T از محاسبه مقایسه احتمال دو مدل جایگزین ناشی می‌شود. مدل مربوط به H_a نشان می‌دهد که μ_1 و μ_2 در حین تعیین پارامتر ν تخمین زده می‌شوند و احتمال را به حداکثر می‌رسانند. در روش منکنندال نیز ابتدا اختلاف بین هریک از مشاهدات با تمام مشاهدات پس از آن محاسبه می‌شود و پارامتر S مطابق رابطه زیر به دست می‌آید (Ghanghermeh et al., 2024):

$$S \equiv \left| \sum_{k=1}^n \sum_{j=k+1}^n \text{sgn}(x_j - x_k) x_k \right|, \quad \text{معادله ۳}$$

که n تعداد مشاهدات سریاست و x_j و x_k به ترتیب داده‌های زام k و j سری هستند. تابع sgn نیز به صورت زیر محاسبه می‌شود:

$$\text{sgn}(x_j - x_k) \equiv \begin{cases} 1 & \text{for } x_j - x_k > 0 \\ 0 & \text{for } x_j - x_k = 0 \\ -1 & \text{for } x_j - x_k < 0 \end{cases} \quad \text{معادله ۴}$$

در مرحله بعد محاسبه واریانس S توسط یکی از روابط زیر محاسبه می‌شود:

$$\text{Var}(S) \equiv \frac{n(n-1) + 2n \cdot 5 + 0}{18} \sum_{i=1}^m t_i(t_i+1) + 2t_i \cdot 5, \quad \text{for } n \leq 10 \quad \text{معادله ۵}$$

$$\text{Var}(S) \equiv \frac{n(n-1) + 2n \cdot 5 + 0 + 2 \cdot 5}{18} \quad \text{for } n > 10 \quad \text{معادله ۶}$$

که n و m معرف تعداد دنباله‌هایی است که در آنها حداقل یک داده تکراری وجود دارد. t نیز بیانگر فراوانی داده‌های با ارزش یکسان در یک دنباله است و در نهایت نیز آماره Z به کمک یکی از روابط زیر استخراج می‌شود:

$$\begin{aligned} Z &\equiv \frac{S - 1}{\sqrt{\text{Var}(S)}} & \text{for } S > 0 \\ Z &\equiv 0 & \text{for } S = 0 \\ Z &\equiv \frac{S + 1}{\sqrt{\text{Var}(S)}} & \text{for } S < 0 \end{aligned} \quad \text{معادله ۷}$$

با فرض دو دامنه آزمون روند، فرضیه صفر در صورتی پذیرفته می‌شود که شرط زیر برقرار باشد:

معادله ۸

$$|Z| \geq Z_{a/2}$$

که a سطح معنی‌داری است که برای آزمون در نظر گرفته می‌شود و Z_a آماره توزیع نرمال استاندارد در سطح معنی‌داری a است که باتوجه به دو دامنه‌بودن آزمون، $a/2$ استفاده می‌شود.

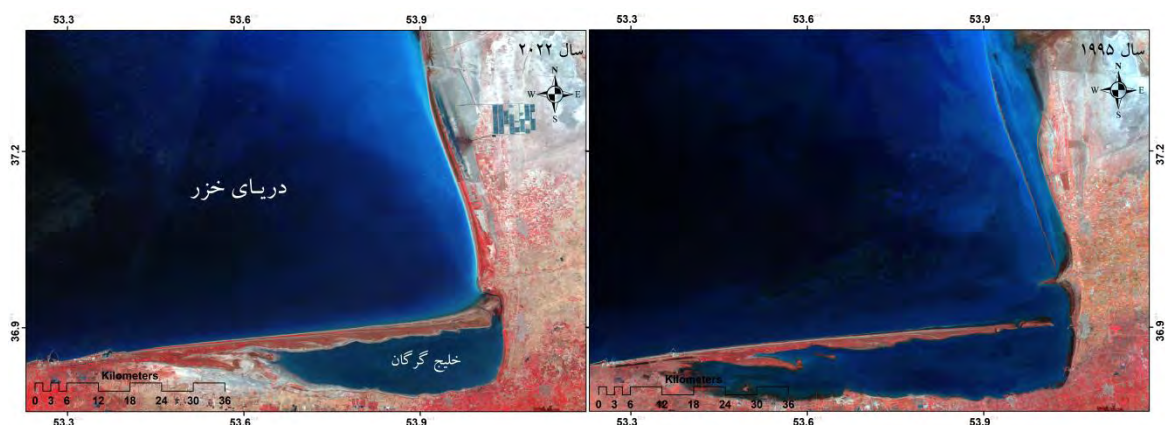
همچنین به منظور شناسایی کانون‌های ریزگرد ساحلی در جنوب شرقی خزر، از تصاویر لندست ۵، ۷ و ۸ در محیط Google Earth Engine استفاده شد و برای دوره زمانی ۱۹۹۵ تا ۲۰۲۲ دو شاخص NDVI و NDWI برای تعیین خط ساحلی و پوشش اراضی محاسبه و تولید شد. در این مطالعه دامنه شاخص NDVI به چهار طبقه توده آبی، اراضی بایر، پوشش گیاهی علفی و بوته‌ای و اراضی جنگلی گروه‌بندی شد (جدول ۱).

جدول ۱: کلاس‌های منتخب برای شاخص پوشش گیاهی (NDVI)

Table 1: Selected Classes for the Vegetation Index (NDVI)

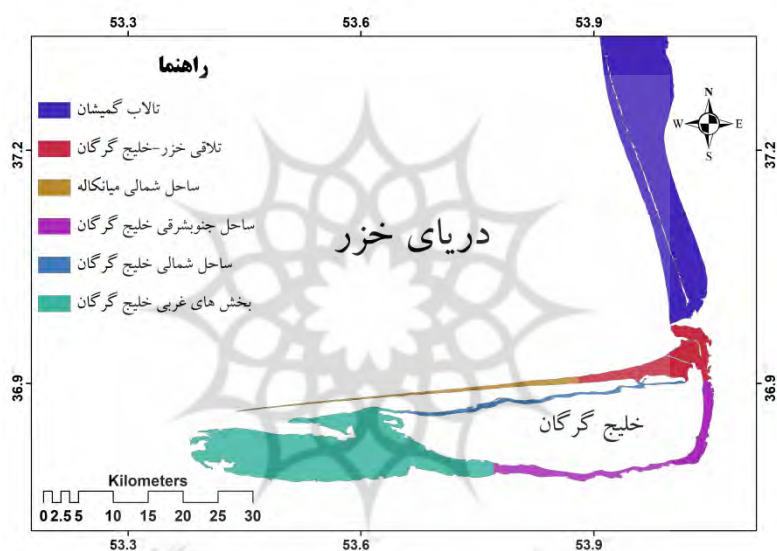
شماره	نام کلاس	طبقه پایین	طبقه بالا
۱	توده آبی	-۱	۰
۲	اراضی بایر	۰	۰٫۱
۳	اراضی علفی و بوته‌ای	۰٫۱	۰٫۵
۴	اراضی جنگلی و درختی	۰٫۵	۱

در این مطالعه برای تشخیص مرز آب و خشکی از شاخص پوشش آبی (NDWI) استفاده شد. در این شاخص مقادیر بزرگ‌تر از صفر نشان‌دهنده توده آبی است. برای این هدف مرز آبی سال‌های ۱۹۹۵ تا ۲۰۲۲ به عنوان مبنای ارزیابی در نظر گرفته شد (شکل ۱). سپس مطابق شکل ۲ محدوده خشکی‌زایی ساحلی به شش پهنه باتوجه به شیب و عرض ساحلی منطقه بندی شدند. همان‌طور که از جدول ۲ ملاحظه می‌شود، بیشترین عرض نوسانی خزر با کمترین شیب در منطقه تالاب گمیشان و بخش‌های غربی خلیج گرگان است که مساحت این محدوده ۲۲۵٫۷۱ و ۲۰۲٫۰۳ کیلومتر مربع است. کمترین عرض‌های نوسانی نیز در بخش‌های شمالی و جنوبی میانکاله و همچنین جنوب شرقی خلیج گرگان اتفاق می‌افتد؛ اما یکی از مناطق حساس از نظر پیشروی و پسروی تلاقی خزر و خلیج گرگان است که مساحتی معادل ۴۳٫۴۱ کیلومتر مربع را به خود اختصاص داده است. در کل از سال ۱۹۹۵ به بعد عقب‌نشینی خزر شروع شد و تا سال ۲۰۲۲ در حدود ۴۶۰٫۵۱ کیلومتر مربع در این منطقه عقب‌نشینی دریا انجام گرفت.



شکل ۱: ترکیب میجازی باندهای ماهواره لندست ۵ و ۸ برای سال ۱۹۹۵ و ۲۰۲۲

Figure 1: Band Combination of Landsat 5 and Landsat 8 for the Years 1995 and 2022



شکل ۲: نقشه منطقه‌بندی ساحلی جنوب شرقی دریای خزر

Figure 2: Zoning Map of the Southeastern Caspian Sea Coastal Region

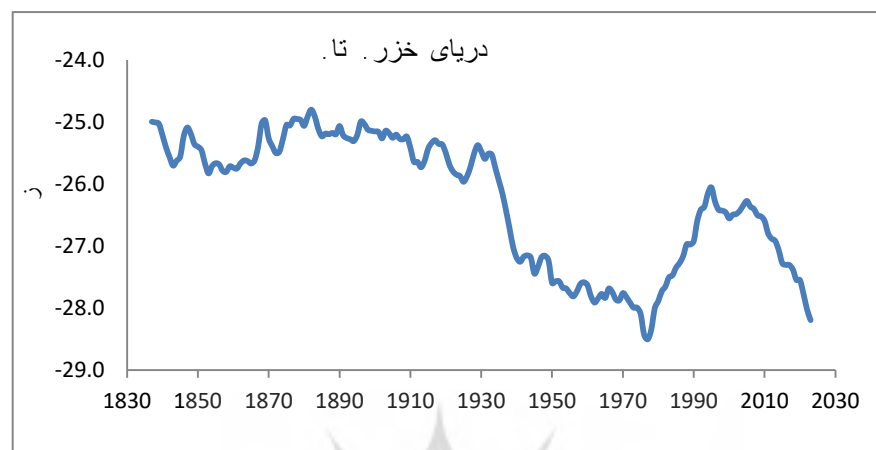
جدول ۲: مساحت منطقه مطالعه‌شده

Table 2: Area of the Study Region

شماره	مناطق	مساحت به کیلومتر مربع
۱	تالاب گمیشان	۲۲۵.۷۱
۲	تلاقی خزر-خلیج گرگان	۴۳.۴۱
۳	ساحل شمالی خلیج گرگان	۱۵.۰۲
۴	ساحل شمالی میانکاله	۱۴.۴۹
۵	ساحل جنوب شرقی خلیج گرگان	۳۳.۵۴
۶	بخش‌های غربی خلیج گرگان	۲۰۲.۰۳

یافته‌ها

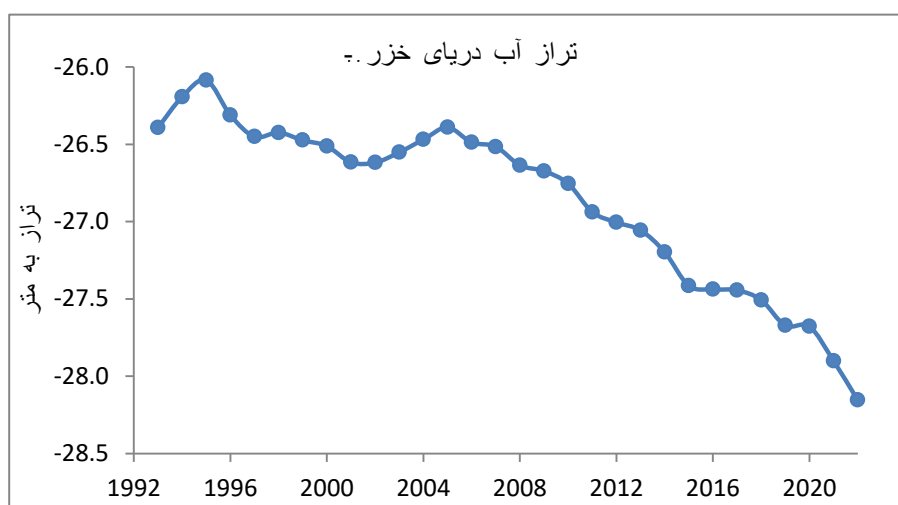
بررسی‌ها نشان می‌دهد که در ۱۸۵ سال اخیر، بالاترین تراز آب دریای خزر ۲۴٫۸- متر و کمترین آن ۲۸٫۵- متر بوده است. تراز آب دریای خزر در حال حاضر در نزدیک‌ترین حالت به پایین‌ترین سطح ۱۸۵ سال گذشته در سال ۱۹۷۶ است.



شکل ۳: نمودار نوسانات تراز آب دریای خزر در دوره آماری ۱۸۳۷ تا ۲۰۲۲ میلادی.

Figure 3: Water Level Fluctuation Chart of the Caspian Sea during the Period 1837 to 2022

شکل ۳ نشان می‌دهد که در طول دوره ۱۸۳۷ تا ۲۰۲۲، چندین دوره تغییر روند کلی در تراز آب دریای خزر رخ داده است. از سال ۱۸۳۷ تا ۱۹۲۹، تراز آب بین ۲۴٫۹۹۵- تا ۲۵٫۳۷۲- متر در نوسان بود. بین سال‌های ۱۹۳۰ تا ۱۹۴۱، کاهش شدیدی در تراز آب به میزان ۱۶۰ سانتیمتر (۱۳٫۵ سانتیمتر در سال) اتفاق افتاد. از سال ۱۹۴۲ تا ۱۹۷۷، عقب‌نشینی تراز آب با سرعت کمتری، به میزان ۱۴۰ سانتیمتر (۳٫۶ سانتیمتر در سال) ادامه یافت. از سال ۱۹۷۸ تا ۱۹۹۵، افزایش درخور توجهی در تراز آب به میزان ۲۴۰ سانتیمتر (۱۳ سانتیمتر در سال) رخ داد. پس از این دوره، روند کاهشی شروع شد. در طی این دوره، روندهای مختلفی در تغییرات تراز آب مشاهده شد. از سال ۱۹۹۵ تا ۱۹۹۷، تراز آب به میزان ۳۷ سانتیمتر در دو سال کاهش یافت. این روند کاهشی تا سال ۲۰۰۱ با شدت ضعیف‌تر ادامه داشت؛ اما از سال ۲۰۰۲ تا ۲۰۰۵، تراز آب به میزان ۲۳ سانتیمتر افزایش یافت. مهم‌ترین روند کاهشی تراز آب دریای خزر از سال ۲۰۰۶ آغاز شد و تا سال ۲۰۲۲ ادامه داشت. شدیدترین افت تراز آب در این دوره، بین سال‌های ۲۰۲۰ تا ۲۰۲۲ رخ داد که به ۶۴ سانتیمتر در طی دو سال رسید (شکل ۴). لازم به ذکر است که برای تکمیل دوره مشاهداتی تراز آب، از ارتفاع‌سنجی ماهواره‌ای (Schwatke et al, 2015) استفاده شده است.



شکل ۴: تغییرات سطح آب دریای خزر از سال ۱۹۹۳ لغایت ۲۰۲۲

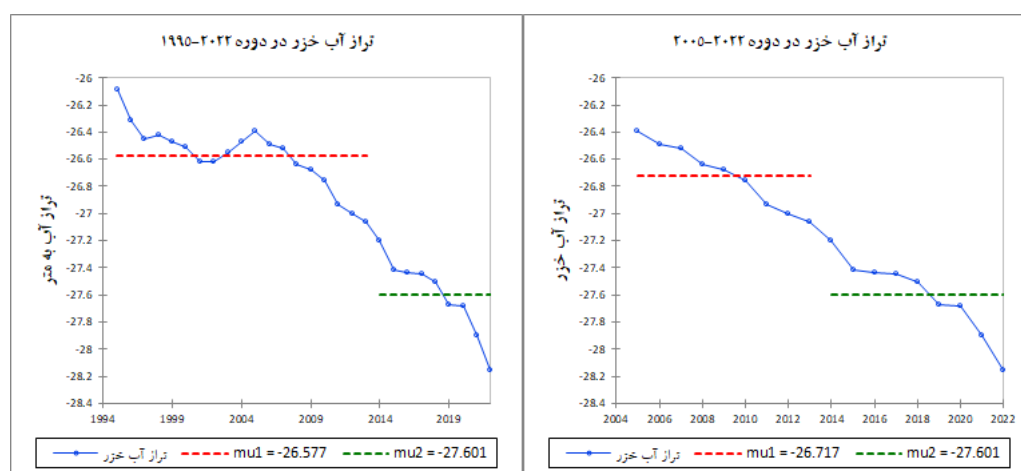
Figure 4: Caspian Sea Water Level Changes from 1993 to 2022

به‌منظور بررسی دقیق‌تر روند تغییرات تراز آب دریای خزر و همچنین شناسایی نقاط عطف در این روند، این دوره به دو بخش ۱۹۹۵ تا ۲۰۲۲ و ۲۰۰۵ تا ۲۰۲۲ تقسیم‌بندی و به‌طور جداگانه بررسی شد. همان‌طور که در شکل ۵ و جدول ۳ مشاهده می‌شود، تراز آب در هر دو دوره زمانی به‌طور ناگهانی کاهش یافته است. میزان جهش تراز آب در دوره اول (۱۹۹۵-۲۰۲۲) در مقایسه با دوره یکنواخت اولیه ۱۰۲ سانتیمتر و در دوره دوم (۲۰۰۵-۲۰۲۲) ۸۸ سانتیمتر است؛ علاوه‌براین، روش منکندال در هر دو دوره زمانی روند کاهشی معنی‌دار تراز آب را تأیید می‌کند. نکته درخور توجه در ضریب تغییرپذیری سالانه تراز آب در دوره ۱۹۹۵-۲۰۲۲ معادل ۲,۲۱٪ و در دوره ۲۰۰۵-۲۰۲۲ نیز معادل ۲,۱۱٪ است. این دو ضریب تفاوت اندکی با یکدیگر دارند. به‌طورکلی می‌توان نتیجه گرفت که از سال ۱۹۹۵ به بعد، نه‌تنها شاهد سیر کاهشی تراز آب بوده‌ایم، بلکه جهش معنی‌داری نیز در این زمینه رخ داده است.

جدول ۳: خلاصه آمار توصیفی سالانه، آزمون منکندال و آزمون همگنی پسروی سطح دریای خزر

Table 3: Summary of Annual Descriptive Statistics, Mann-Kendall Test, and Homogeneity Test for Caspian Sea Water Level Retreat

سالانه	Summary statistics		Mann-Kendall trend tests			homogeneity test (SNHT)		
	Mean	CV%	Kendall's tau	p-value (Two-tailed)	Sen's slope	t	T0	p-value (Two-tailed)
تراز آب دریای خزر								
دوره ۱۹۹۵-۲۰۲۲	-۲۶.۹۰۱	۲.۲۱	-۰.۸۸۷	۰.۰۰۰	-۰.۶۶۶	۲۰۱۳	۲۴.۴۶۱	۰.۰۰۰
دوره ۲۰۰۵-۲۰۲۲	-۲۷.۲۲۰	۲.۱۱	-۱.۰۰۰	۰.۰۰۰	-۰.۰۹۶	۲۰۱۴	۱۳.۲۹۲	۰.۰۰۰

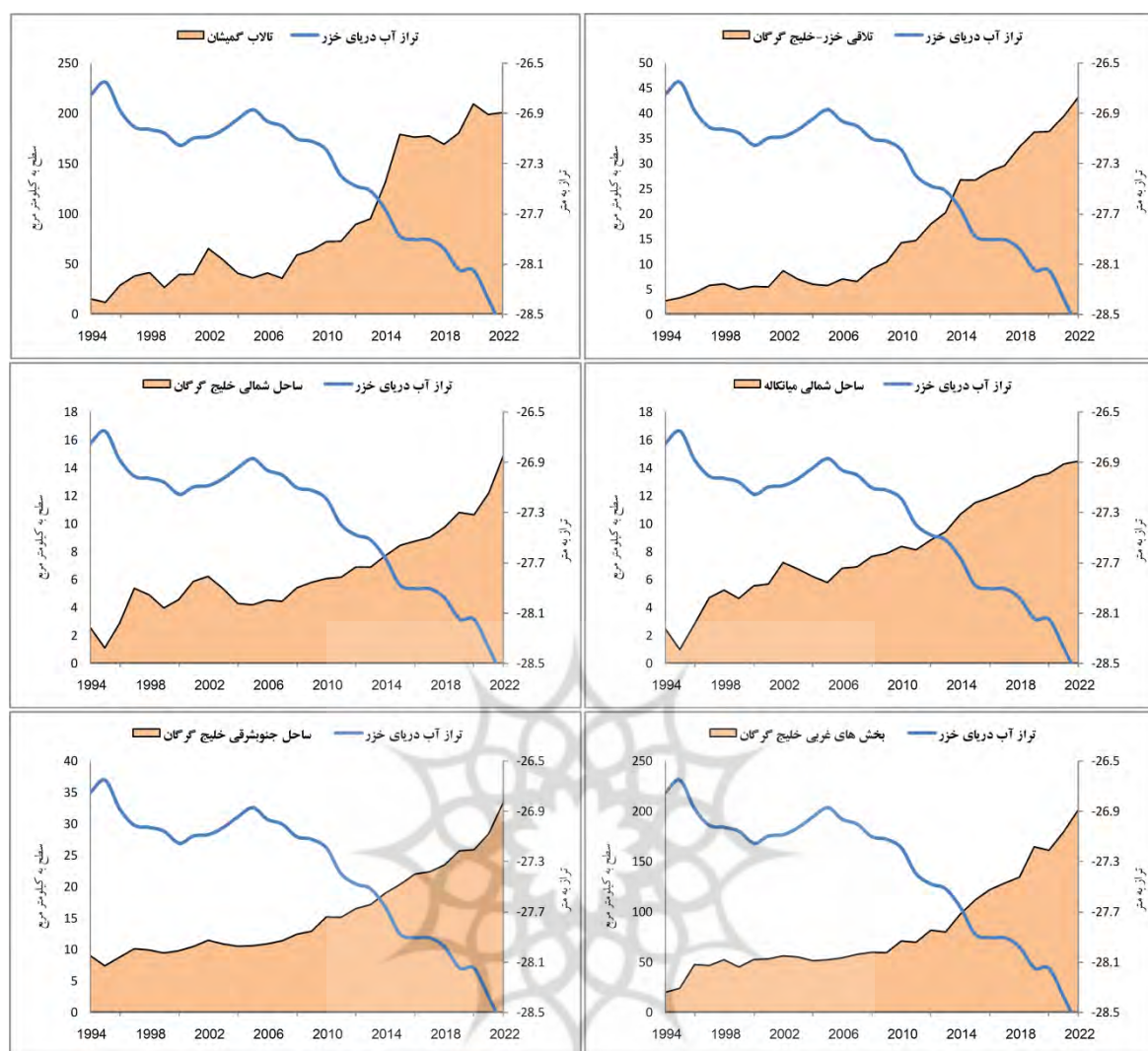


شکل ۵: تغییرات جهشی بر مبنای آزمون همگنی پسروری سطح دریای خزر

Figure 5: Abrupt Changes Based on the Homogeneity Test for Caspian Sea Water Level Retreat

روند خشکی‌زایی در پهنه‌های ساحلی

شکل ۶ روند خشکی‌زایی شش پهنه منطقه ساحل جنوب شرقی خزر را با تغییرات تراز آب دریای خزر از سال ۱۹۹۴ تا ۲۰۲۲ نشان می‌دهد. همان‌طور که قبلاً نیز ذکر شد، روند کاهشی تراز آب دریای خزر از سال ۱۹۹۵ به بعد آغاز شد و با افت‌وخیزهایی همراه بود؛ براین‌اساس، تراز آب دریا از سال ۱۹۹۵ تا ۲۰۰۶ با یک روند کاهشی ضعیف، دوره ثبات را طی کرد و از سال ۲۰۰۶ به بعد، روند کاهشی آن شدت گرفت. باتوجه‌به این رفتار تراز آب خزر، خشکی‌زایی در کل ساحل مطالعه‌شده مشاهده می‌شود. بیشترین تغییرات در محدوده تالاب گمیشان و بخش‌های غربی خلیج گرگان دیده می‌شود؛ باین‌وجود رفتار کاهشی در این دو محدوده متفاوت است. در محدوده تالاب گمیشان، الگوی خشکی‌زایی از سال ۱۹۹۵ تا ۲۰۰۶ مطابق با نوسانات تراز آب خزر بود؛ درحالی‌که در بخش‌های غربی خلیج گرگان، خشکی‌زایی ضعیف و یکنواختی مشاهده می‌شد. از سال ۲۰۰۶ به بعد، هم‌زمان با شدت گرفتن کاهش تراز آب خزر، روند خشکی‌زایی در هر دو محدوده افزایش یافت. در سواحل غربی خلیج گرگان، این روند تا سال ۲۰۲۲ ادامه داشت و به‌طور متوسط سالانه ۹,۱۲ کیلومتر مربع به خشکی ساحلی افزوده شد. در تالاب گمیشان، از سال ۲۰۱۶ تا ۲۰۲۰ خشکی‌زایی به ثبات رسید؛ باین‌حال، کاهش شدید تراز دریا بین سال‌های ۲۰۲۰ تا ۲۰۲۲ دوباره باعث خشکی‌زایی شد. درمجموع، از سال ۲۰۰۶ تا ۲۰۲۲ به‌طور متوسط سالانه ۱۱,۹۲ کیلومتر مربع از تالاب گمیشان عقب‌نشینی کرد. در پهنه تلاقی خزر و خلیج گرگان، از سال ۱۹۹۶ تا ۲۰۰۶ روند خشکی‌زایی با افت‌وخیزهای ضعیف، افزایشی بود. از سال ۲۰۰۶ تا ۲۰۲۲ این روند با شدت بیشتری ادامه یافت و به‌طور متوسط سالانه ۲,۳۶ کیلومتر مربع به خشکی ساحلی افزوده شد.

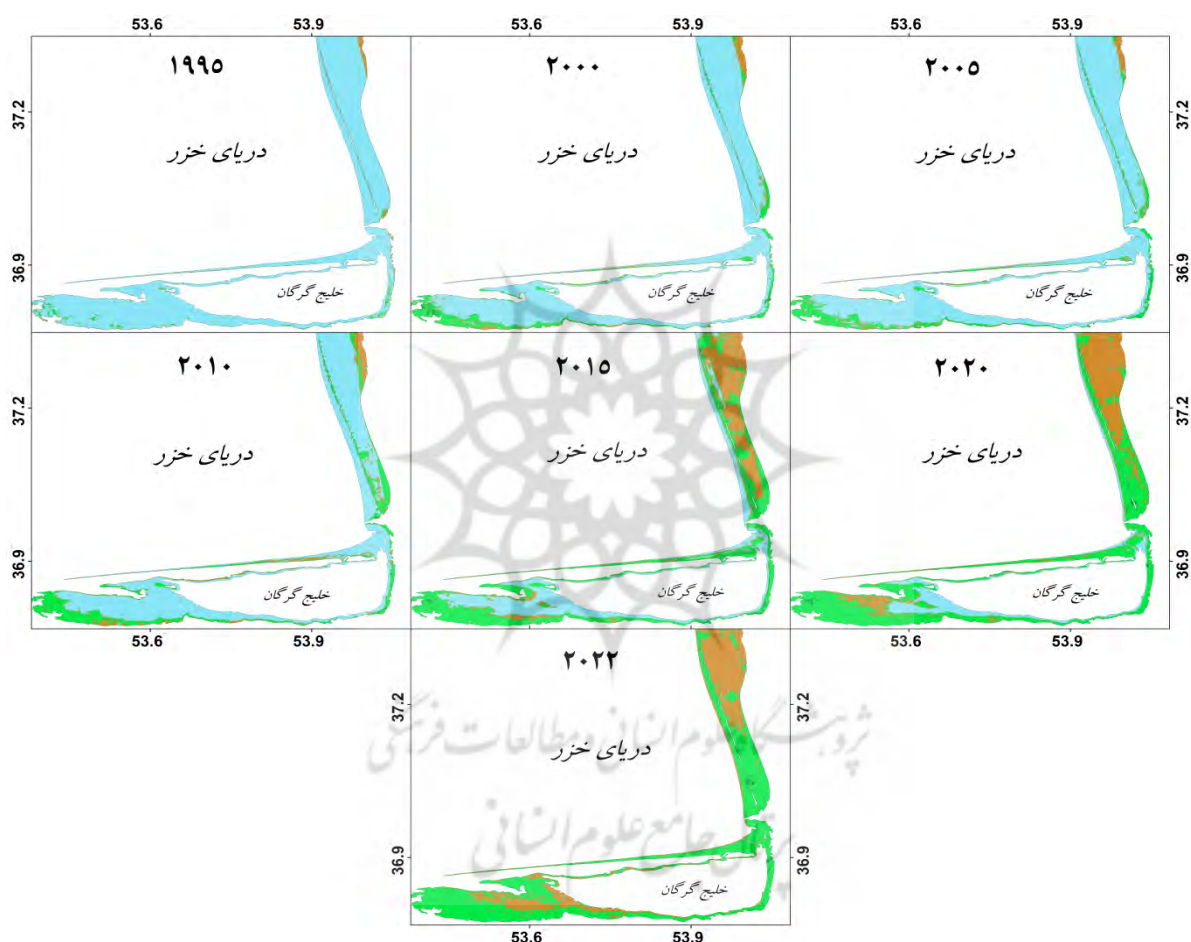


شکل ۶: روند خشکی‌زایی سواحل جنوب شرقی دریای خزر از سال ۱۹۹۴ لغایت ۲۰۲۲

Figure 6: Shoreline Retreat Trend of the Southeastern Caspian Sea Coastline from 1994 to 2022

بررسی تغییرات شاخص پوشش گیاهی (NDVI) یکی از اهداف اصلی بررسی تغییرات شاخص پوشش گیاهی (NDVI) پاسخ به این پرسش است که آیا پیشروی پوشش گیاهی ساحلی در جنوب شرقی دریای خزر، در اثر عقب‌نشینی و خشکی‌زایی این سواحل می‌تواند از ایجاد کانون‌های ریزگرد جلوگیری کند یا خیر. شکل ۷ نقشه‌های تغییرات شاخص پوشش گیاهی سالانه و همچنین خشکی‌زایی منطقه مطالعه‌شده را در بازه‌های زمانی ۵ ساله، از سال ۱۹۹۵ تا ۲۰۲۲ نشان می‌دهد. همان‌طور که در شکل مشاهده می‌شود، از سال ۱۹۹۵ تا ۲۰۱۰ تغییرات شاخص پوشش گیاهی و خشکی‌زایی در منطقه بسیار ناچیز بوده است. در این دوره، مساحت اراضی بایر به میزان ۶۸,۰۶ کیلومتر مربع و اراضی علفی و بوته‌ای به میزان ۷۰,۶۴ کیلومتر مربع افزایش یافته است؛ درحالی‌که مساحت اراضی جنگلی و درختی ۰,۰۶ کیلومتر مربع کاهش یافته است. به‌طور متوسط، مساحت اراضی بایر سالانه ۴,۵۴ کیلومتر مربع و اراضی علفی و بوته‌ای ۴,۷۱ کیلومتر مربع افزایش

یافته است. از سال ۲۰۱۱ تا ۲۰۲۲، شدت خشکی‌زایی در منطقه افزایش یافته است. در این دوره، مساحت اراضی بایر به میزان ۷۰,۰۹ کیلومتر مربع، اراضی علفی و بوته‌ای به میزان ۲۵۰,۱۰ کیلومتر مربع و اراضی جنگلی و درختی ۱,۶۴ کیلومتر مربع افزایش یافته است؛ به عبارت دیگر، مساحت اراضی بایر سالانه ۵,۸۴ کیلومتر مربع، اراضی علفی و بوته‌ای ۲۰,۸۴ کیلومتر مربع و اراضی جنگلی و درختی ۰,۱۴ کیلومتر مربع افزایش یافته است. در مجموع، مشاهده می‌شود که اراضی بایر در طول دوره بررسی شده تغییرات یکنواختی را تجربه کرده‌اند. در مقابل، اراضی با پوشش گیاهی به دلیل افزایش خشکی‌زایی، شاهد رشد درخور توجهی در مساحت خود بوده‌اند.



شکل ۷: نقشه‌های تغییرات طبقات شاخص پوشش گیاهی (NDVI) سالانه با دوره‌های ۵ سال برای دوره ۱۹۹۵ لغایت ۲۰۲۲

Figure 7: Maps of Annual Vegetation Index (NDVI) Class Changes with 5-Year Intervals for the Period 1995 to 2022

رفتار زمانی شاخص پوشش گیاهی

در این بخش، به منظور بررسی روند تغییرات شاخص پوشش گیاهی در دوره زمانی ۱۹۹۵ تا ۲۰۲۲، دو کلاس پوشش گیاهی «اراضی علفی و بوته‌ای» و «اراضی جنگلی و درختی» ادغام شدند. در ادامه، تغییرات دو پارامتر پوشش گیاهی به عنوان عامل مانع برای ایجاد کانون‌های ریزگردزایی و همچنین توسعه اراضی بایر به عنوان کانون‌های احتمالی

ریزگردزایی بررسی می‌شود. همچنین، به‌منظور ارزیابی تغییرات ناگهانی یا جهشی در عقب‌نشینی دریای خزر از آزمون همگنی استفاده شد. هدف از این آزمون، تعیین یکنواختی یا ناگهانی بودن تغییرات پوشش گیاهی و اراضی بایر بود. همچنین از آزمون روند منکندال برای ارزیابی سطح معنی‌داری تغییرات مساحتی ساحلی بهره گرفته شد. نتایج این آزمون‌ها در **جدول ۴** خلاصه شده‌اند. همان‌طور که مشاهده می‌شود، روند کلی تغییرات اراضی بایر و پوشش گیاهی در کل منطقه از سطح معنی‌داری پیروی می‌کند. با این تفاوت که در اراضی بایر ساحل شمالی خلیج گرگان، ساحل شمالی میانکاله و ساحل جنوب شرقی خلیج گرگان، این روند از سطح معنی‌داری برخوردار نیست. ارزیابی جهش تغییرات کلی منطقه نیز نشان می‌دهد که پوشش گیاهی و اراضی بایر روند تغییرات خود را به‌طور ناگهانی (جهشی) تغییر داده‌اند. البته لازم به ذکر است که اراضی بایر ساحل شمالی خلیج گرگان و ساحل جنوب شرقی خلیج گرگان، جهش خاصی در روند خود نشان نمی‌دهند.

جدول ۴: خلاصه آمار توصیفی سالانه، آزمون منکندال و آزمون همگنی سواحل جنوب شرقی دریای خزر

Table 4: Summary of Annual Descriptive Statistics, Mann-Kendall Test, and Homogeneity Test for the Southeastern Caspian Sea Coastline

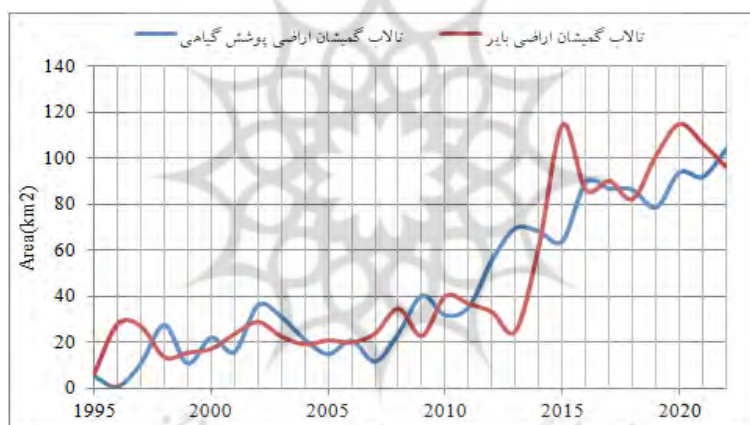
سالانه	Summary statistics		Mann-Kendall trend tests			homogeneity test (SNHT)		
	Mean	CV%	Kendall's tau	p-value (Two-tailed)	Sen's slope	t	T0	p-value (Two-tailed)
منطقه - پوشش اراضی								
تالاب گمیشان_اراضی پوشش گیاهی	۴۴.۶۸۵	۷۲.۲۵۴	۰.۷۵۱	*۰.۰۰۰	۳.۶۳۹	۲۰۱۱	۲۲.۸۹۴	*۰.۰۰۰
تالاب گمیشان_اراضی بایر	۴۶.۹۵۹	۷۵.۷۳۲	۰.۶۷۷	*۰.۰۰۰	۳.۳۶۵	۲۰۱۳	۲۴.۱۸۴	*۰.۰۰۰
تلاقی خزر-خلیج گرگان_اراضی پوشش گیاهی	۱۳.۱۲۴	۹۲.۳۸۲	۰.۸۴۱	*۰.۰۰۰	۱.۲۷۶	۲۰۱۳	۲۳.۲۲۰	*۰.۰۰۰
تلاقی خزر-خلیج گرگان_اراضی بایر	۳.۳۶۳	۵۴.۲۶۰	۰.۳۷۶	*۰.۰۰۵	۰.۱۱۸	۲۰۰۷	۱۵.۹۴۷	*۰.۰۰۰
ساحل شمالی خلیج گرگان_اراضی پوشش گیاهی	۳.۷۳۶	۸۱.۴۶۴	۰.۶۴۶	*۰.۰۰۰	۰.۳۳۳	۲۰۱۲	۲۴.۰۸۴	*۰.۰۰۰
ساحل شمالی خلیج گرگان_اراضی بایر	۲.۹۴۴	۴۲.۳۰۸	۰.۰۰۰	۰.۹۸۴	۰.۰۰۱	۲۰۲۱	۴.۲۵۲	۰.۳۰۵
ساحل شمالی میانکاله_اراضی پوشش گیاهی	۴.۵۳۷	۷۶.۴۹۹	۰.۸۷۸	*۰.۰۰۰	۰.۴۰۱	۲۰۱۲	۲۳.۷۵۵	*۰.۰۰۰
ساحل شمالی میانکاله_اراضی بایر	۳.۸۳۷	۲۵.۱۷۵	۰.۱۴۶	۰.۲۸۶	۰.۰۲۰	۱۹۹۵	۹.۶۲۷	*۰.۰۴۴
ساحل جنوب شرقی خلیج گرگان_اراضی پوشش گیاهی	۱۳.۴۰۱	۵۳.۸۵۷	۰.۹۳۱	*۰.۰۰۰	۰.۸۱۷	۲۰۱۲	۲۲.۴۱۲	*۰.۰۰۰
ساحل جنوب شرقی خلیج گرگان_اراضی بایر	۲.۳۵۹	۵۰.۲۸۹	-۰.۱۹۶	۰.۱۵۱	-۰.۰۲۵	۱۹۹۶	۴.۸۰۹	۰.۲۵۶
بخش‌های غربی خلیج گرگان_اراضی پوشش گیاهی	۶۴.۴۳۹	۶۵.۶۰۲	۰.۷۳۵	*۰.۰۰۰	۴.۶۱۷	۲۰۱۳	۲۲.۳۵۵	*۰.۰۰۰
بخش‌های غربی خلیج گرگان_اراضی بایر	۲۰.۲۱۶	۵۱.۷۸۷	۰.۳۶۰	*۰.۰۰۷	۰.۵۱۰	۲۰۱۸	۱۰.۸۴۱	*۰.۰۱۵
منطقه مطالعه‌شده_اراضی پوشش گیاهی	۱۴۳.۸۶۵	۶۸.۹۶۹	۰.۸۲۵	*۰.۰۰۰	۱۱.۲۶۴	۲۰۱۲	۲۲.۸۷۴	*۰.۰۰۰
منطقه مطالعه‌شده_اراضی بایر	۷۹.۷۰۳	۵۳.۸۹۴	۰.۶۷۲	*۰.۰۰۰	۴.۴۹۷	۲۰۱۴	۲۰.۹۷۴	*۰.۰۰۰

معنی‌دار *

بررسی تغییرات مساحتی پوشش گیاهی و اراضی بایر

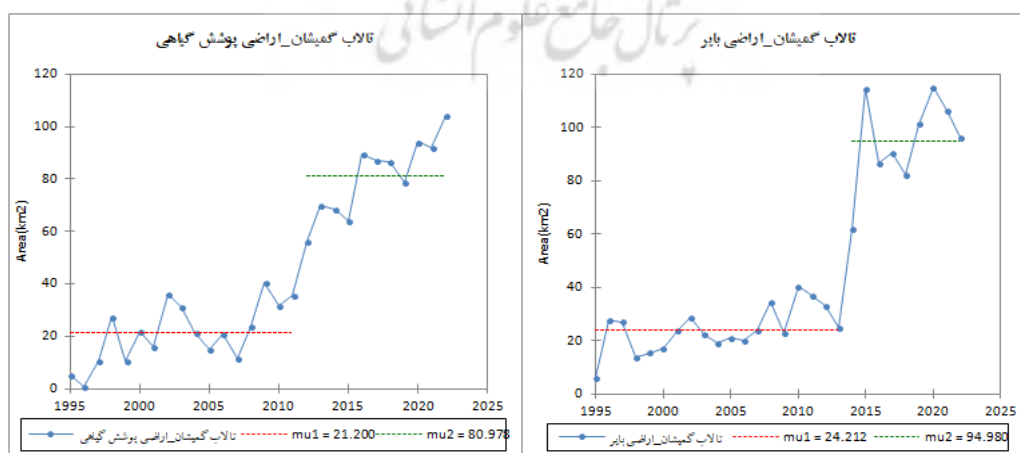
منطقه تالاب گمیشان

شکل ۸ روند تغییرات مساحتی دو متغیر پوشش گیاهی و اراضی بایر منطقه تالاب گمیشان را نشان می‌دهد. همان‌طور که ملاحظه می‌شود، مساحت هر دو متغیر در یک دامنه خاص نوسان دارد و با یکدیگر رابطه معکوسی دارند. در بلندمدت، هر دو متغیر روندی افزایشی نشان می‌دهند. شکل ۹ نیز نشان می‌دهد که اراضی پوشش گیاهی تا سال ۲۰۱۱ از نظر زمانی یکنواخت بوده است. از این سال به بعد، جهش ناگهانی در مساحت این نوع اراضی رخ داده است که تا پایان دوره مطالعه، روند کاهشی مشاهده نشده است. اختلاف میانگین مساحتی دوره جهش با دوره یکنواختی، ۵۹,۷۷۸ کیلومتر مربع است. همچنین اراضی بایر تا سال ۲۰۱۳ از نظر زمانی یکنواخت بوده است. از این سال به بعد، جهش ناگهانی در مساحت این نوع اراضی نیز رخ داده است که تا پایان دوره مطالعه، روند کاهشی مشاهده نشده است. اختلاف میانگین مساحتی دوره جهش با دوره یکنواختی، ۷۰,۷۶۹ کیلومتر مربع است. این موضوع نشان می‌دهد که شدت افزایش اراضی بایر در منطقه تالاب گمیشان بیشتر از اراضی پوشش گیاهی است.



شکل ۸: روند تغییرات اراضی پوشش گیاهی و اراضی بایر تالاب گمیشان برای دوره ۱۹۹۵ لغایت ۲۰۲۲

Figure 8: Trend of Vegetation and Barren Land Changes in the Gomishan Wetland from 1995 to 2022

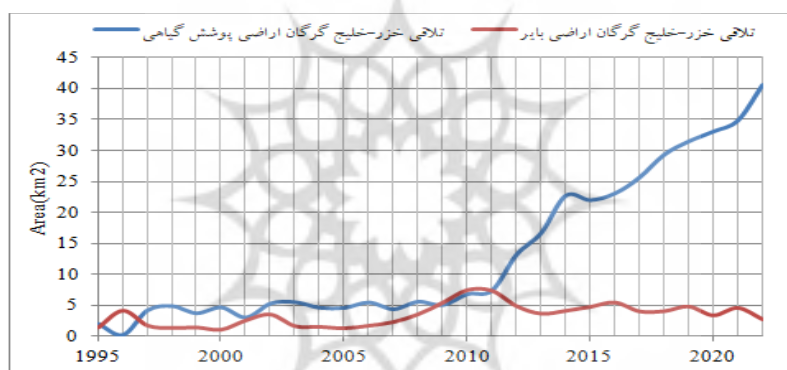


شکل ۹: تغییرات جهشی بر مبنای آزمون همگنی اراضی پوشش گیاهی و اراضی بایر تالاب گمیشان

Figure 9: Abrupt Changes Based on the Homogeneity Test for Vegetation and Barren Lands in the Gomishan Wetland

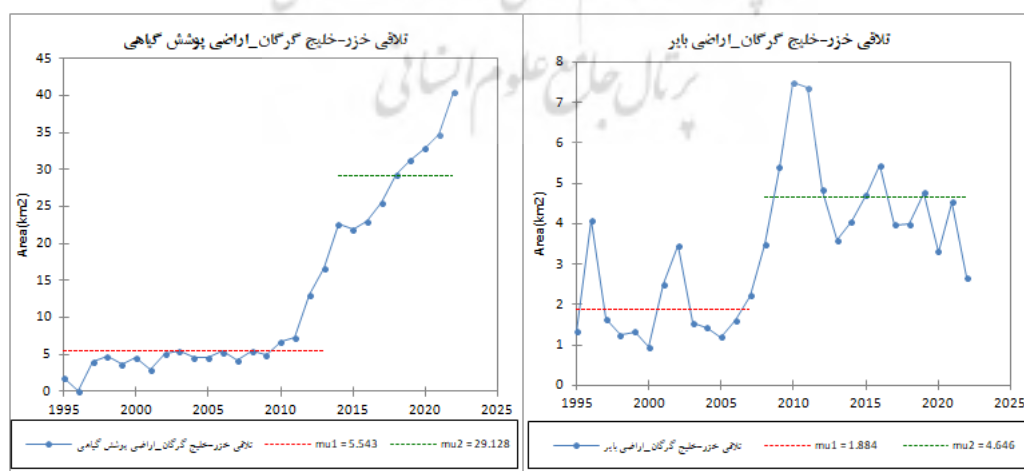
تلاقی خزر-خلیج گرگان

شکل ۱۰: روند تغییرات مساحتی دو متغیر پوشش گیاهی و اراضی بایر را در منطقه تلاقی خزر-خلیج گرگان نشان می‌دهد. همان‌طور که مشاهده می‌شود، تا سال ۲۰۱۱ مساحت این دو متغیر در یک دامنه خاص با نوساناتی همراه بود که نشان‌دهنده رابطه معکوس بین آنها است؛ اما از سال ۲۰۱۱ به بعد، پوشش گیاهی با شتابی چشمگیر گسترش یافت، درحالی‌که اراضی بایر روندی بسیار ضعیف‌تر از این روند را تجربه کرد. نکته درخور توجه این است که هر دو متغیر در بلندمدت جهش را نشان می‌دهند. **شکل ۱۱:** نشان می‌دهد که تا سال ۲۰۱۳ پوشش گیاهی از نظر زمانی رفتاری یکنواخت داشت، اما از آن سال به بعد جهشی ناگهانی اتفاق افتاد که تا پایان دوره مطالعه‌شده ادامه داشت. اختلاف مساحت بین دوره جهش و دوره یکنواخت ۲۳,۵۸ کیلومتر مربع است. اراضی بایر نیز تا سال ۲۰۰۷ رفتاری یکنواخت از نظر زمانی داشتند، اما از آن سال به بعد جهشی ضعیف اتفاق افتاد که تا پایان دوره مطالعه‌شده ادامه داشت. اختلاف میانگین مساحت بین دوره جهش و دوره یکنواخت ۲,۵۸ کیلومتر مربع است. این موضوع نشان می‌دهد که شدت افزایش اراضی پوشش گیاهی در منطقه تلاقی خزر-خلیج گرگان در حال حاضر بیشتر از اراضی بایر است.



شکل ۱۰: روند تغییرات اراضی پوشش گیاهی و اراضی بایر تلاقی خزر-خلیج گرگان برای دوره ۱۹۹۵ لغایت ۲۰۲۲

Figure 10: Trend of Vegetation and Barren Land Changes in the Caspian Sea-Gorgan Gulf Intersection from 1995 to 2022

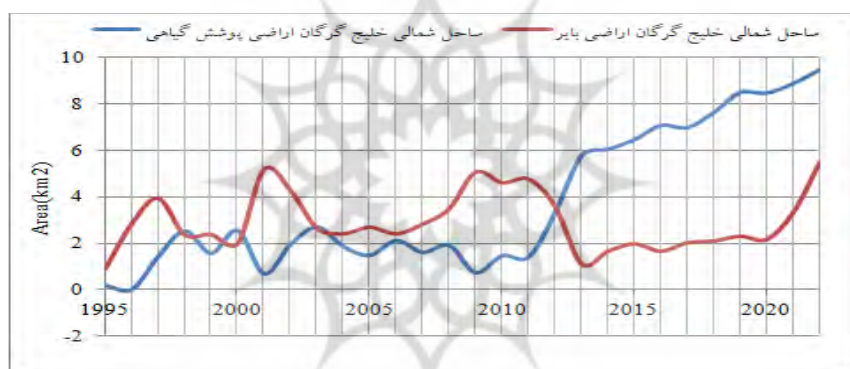


شکل ۱۱: تغییرات جهشی بر مبنای آزمون همگنی اراضی پوشش گیاهی و اراضی بایر تلاقی خزر-خلیج گرگان

Figure 11: Abrupt Changes Based on the Homogeneity Test for Vegetation and Barren Lands in the Caspian Sea-Gorgan Gulf Intersection

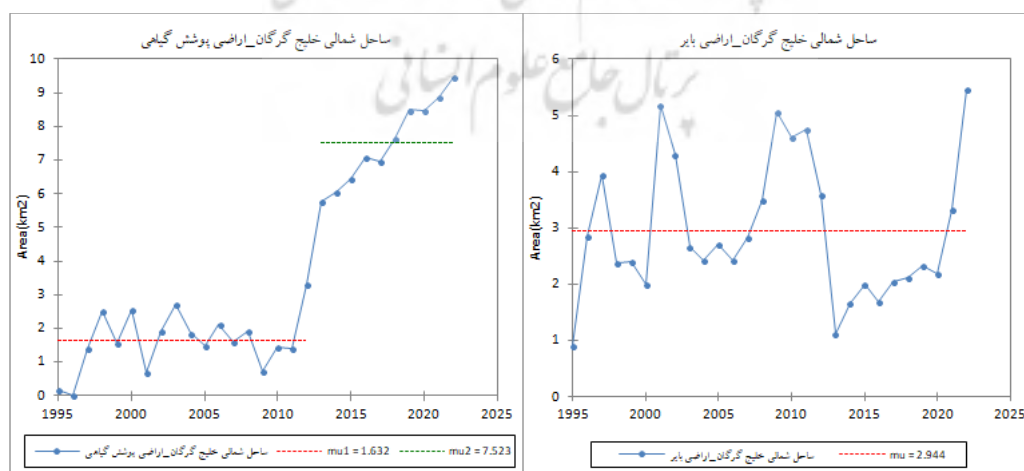
ساحل شمالی خلیج گرگان

شکل ۱۲ روند تغییرات مساحتی دو متغیر پوشش گیاهی و اراضی بایر ساحل شمالی خلیج گرگان را نشان می‌دهد. همان‌طور که ملاحظه می‌شود، از نظر مساحت دو متغیر تا سال ۲۰۱۱ در یک دامنه خاصی نسبت به هم رفتار معکوسی نوسانی نشان می‌دهند؛ اما از این سال به بعد پوشش گیاهی با روند افزایشی شدیدی گسترش پیدا کرد، در حالی که وسعت اراضی بایر تا سال ۲۰۲۰ کاهش پیدا کرد. نکته درخور توجه در ارتباط با روند تغییرات گسترش اراضی، پوشش گیاهی معنی‌دار است، در حالی که گسترش اراضی بایر ناشی از خشکی‌زایی هیچ‌گونه معنی‌داری خاصی ندارد. همان‌طور که از شکل ۱۳ مشخص می‌شود، اراضی پوشش گیاهی تا سال ۲۰۱۱ از نظر رفتار زمانی از یکنواختی برخوردار بود؛ اما از این سال به بعد جهش ناگهانی اتفاق افتاد و تا پایان دوره، برگشتی انجام نشده است. اختلاف میانگین مساحتی دوره جهش با دور یکنواختی معادل ۵٫۸۹۱ کیلومتر مربع است. البته لازم به ذکر است که فاصله مساحتی اراضی پوشش گیاهی در دوره زمانی بعد از سال ۲۰۱۱ شدیداً افزایش یافت. یعنی اینکه بیشترین پوشش خشکی‌زایی با پوشش گیاهی گسترده شده است.



شکل ۱۲: روند تغییرات اراضی پوشش گیاهی و اراضی بایر ساحل شمالی خلیج گرگان برای دوره ۱۹۹۵ لغایت ۲۰۲۲

Figure 12: Trend of Vegetation and Barren Land Changes on the Northern Shore of Gorgan Gulf from 1995 to 2022

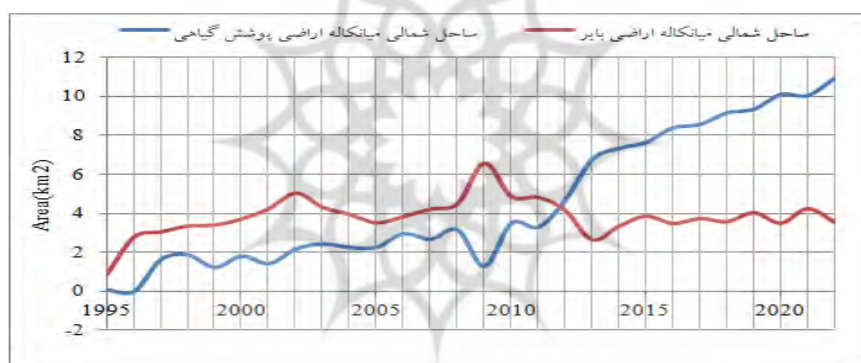


شکل ۱۳: تغییرات جهشی بر مبنای آزمون همگنی اراضی پوشش گیاهی و اراضی بایر ساحل شمالی خلیج گرگان

Figure 13: Abrupt Changes Based on the Homogeneity Test for Vegetation and Barren Lands on the Northern Shore of Gorgan Gulf

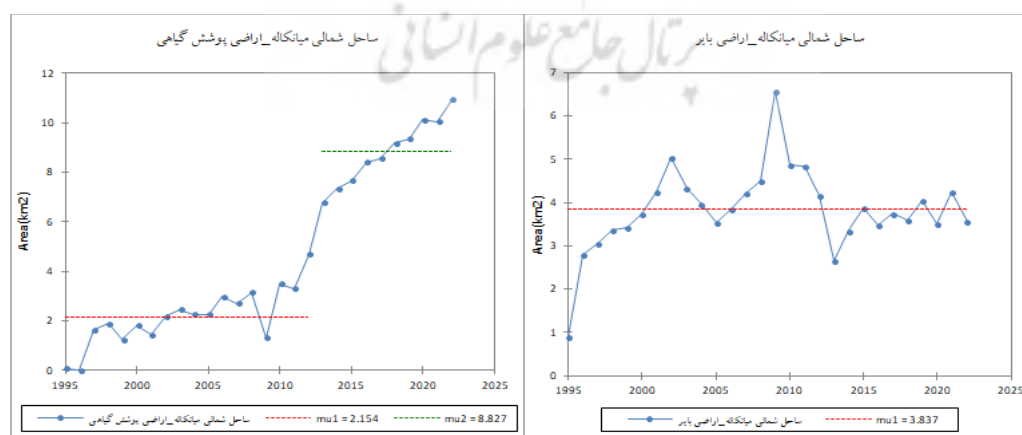
ساحل شمالی میانکاله

شکل ۱۴ روند تغییرات مساحتی دو متغیر پوشش گیاهی و اراضی بایر ساحل شمالی میانکاله را نشان می‌دهد. همان‌طور که ملاحظه می‌شود، از نظر مساحت هر دو متغیر تا سال ۲۰۱۲ در یک دامنه خاصی نسبت به هم رفتار معکوس نوسانی را نشان می‌دهند. در این شکل مشخص می‌شود که از سال ۱۹۹۵ تا سال ۲۰۱۲ مساحت اراضی بایر بیشتر از اراضی پوشش گیاهی است؛ در حالی که از این سال به بعد پوشش گیاهی با روند افزایشی شدیدی گسترش پیدا کرد، اراضی بایر تا سال ۲۰۲۲ کاهش پیدا کرد. نکته درخور توجه در ارتباط با روند تغییرات گسترش اراضی پوشش گیاهی معنی دار است؛ در حالی که گسترش اراضی بایر ناشی از خشکی‌زایی هیچ‌گونه معنی‌داری خاص ندارد. همان‌طور که از شکل ۱۵ مشخص می‌شود، اراضی پوشش گیاهی تا سال ۲۰۱۲ از نظر رفتار زمانی از یکنواختی بر خوردار بود؛ اما از این سال به بعد جهش ناگهانی اتفاق افتاد و تا پایان دوره، برگشتی انجام نشده است. اختلاف میانگین مساحتی دوره جهش با دوره یکنواختی معادل ۶,۶۷۳ کیلومتر مربع است. البته لازم به ذکر است که فاصله مساحتی اراضی پوشش گیاهی در دوره زمانی بعد از سال ۲۰۱۲ شدیداً افزایش یافت؛ یعنی اینکه بیشترین پوشش خشکی‌زایی با پوشش گیاهی گسترده شده است.



شکل ۱۴: روند تغییرات اراضی پوشش گیاهی و اراضی بایر ساحل شمالی میانکاله برای دوره ۱۹۹۵ لغایت ۲۰۲۲

Figure 14: Trend of Vegetation and Barren Land Changes on the Northern Shore of Miankaleh from 1995 to 2022

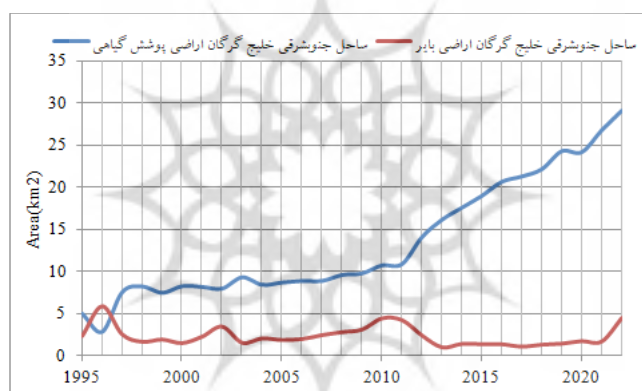


شکل ۱۵: تغییرات جهشی بر مبنای آزمون همگنی اراضی پوشش گیاهی و اراضی بایر ساحل شمالی میانکاله

Figure 15: Abrupt Changes Based on the Homogeneity Test for Vegetation and Barren Lands on the Northern Shore of Miankaleh

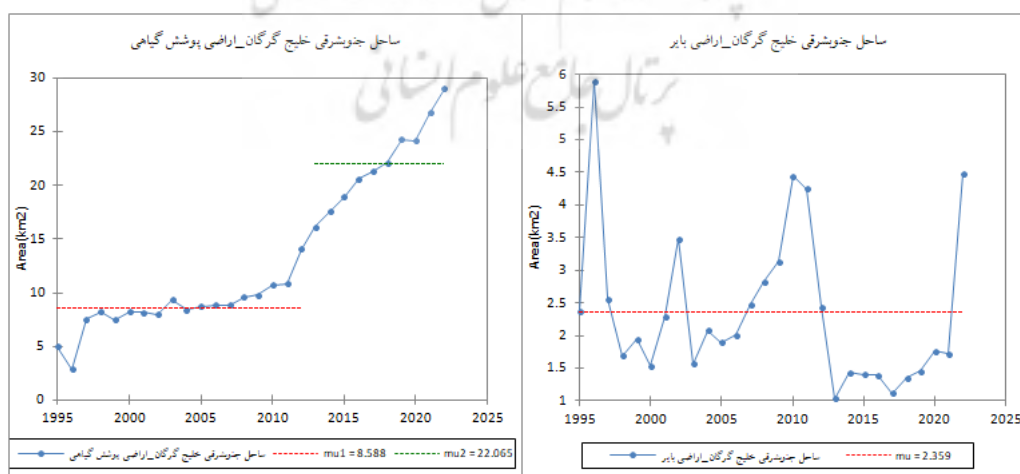
ساحل جنوب شرقی خلیج گرگان

شکل ۱۶ روند تغییرات مساحتی دو متغیر پوشش گیاهی و اراضی بایر ساحل جنوب شرقی خلیج گرگان را نشان می‌دهد. همان‌طور که ملاحظه می‌شود، از نظر مساحت دو متغیر تا سال ۲۰۱۲ در یک دامنه خاصی نسبت به هم رفتار معکوسی نوسانی نشان می‌دهد. در کل از این شکل مشخص می‌شود که تمامی دوره زمانی مساحت اراضی پوشش گیاهی بیشتر از اراضی بایر است. نکته درخور توجه در ارتباط با روند تغییرات گسترش اراضی پوشش گیاهی معنی‌دار است؛ در حالی که گسترش اراضی بایر ناشی از خشکی‌زایی هیچ‌گونه معنی‌داری خاصی ندارد. همان‌طور که از شکل ۱۷ مشخص می‌شود، اراضی پوشش گیاهی تا سال ۲۰۱۲ از نظر رفتار زمانی از یکنواختی برخوردار بود؛ اما از این سال به بعد جهش ناگهانی اتفاق افتاد و تا پایان دوره، برگشتی انجام نشده است. اختلاف میانگین مساحتی دوره جهش با دوره یکنواختی معادل ۱۳،۴۷۷ کیلومتر مربع است. لازم به ذکر است که فاصله مساحتی اراضی پوشش گیاهی از اراضی بایر در دوره زمانی بعد از سال ۲۰۱۲ شدیداً افزایش یافت. در واقع بیشترین پوشش خشکی‌زایی با پوشش گیاهی گسترده شده است؛ به عبارت دیگر در این منطقه با پسروری دریای خزر اراضی بایری تقریباً ایجاد نشده است.



شکل ۱۶: روند تغییرات اراضی پوشش گیاهی و اراضی بایر ساحل جنوب شرقی خلیج گرگان برای دوره ۱۹۹۵ لغایت ۲۰۲۲

Figure 16: Trend of Vegetation and Barren Land Changes on the Southeastern Shore of Gorgan Gulf from 1995 to 2022

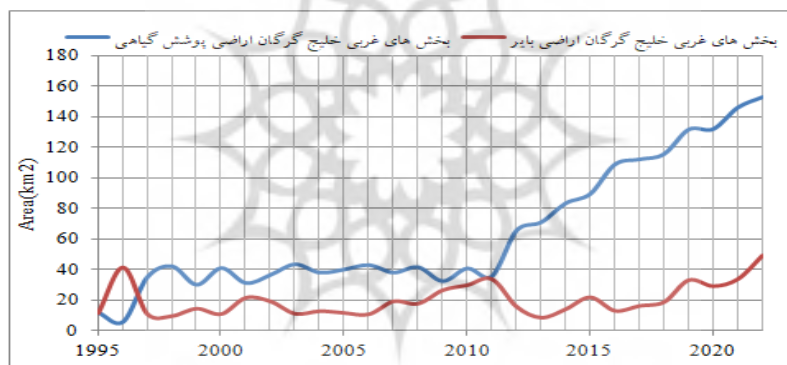


شکل ۱۷: تغییرات جهشی بر مبنای آزمون همگنی اراضی پوشش گیاهی و اراضی بایر ساحل جنوب شرقی خلیج گرگان

Figure 17: Abrupt Changes Based on the Homogeneity Test for Vegetation and Barren Lands on the Southeastern Shore of Gorgan Gulf

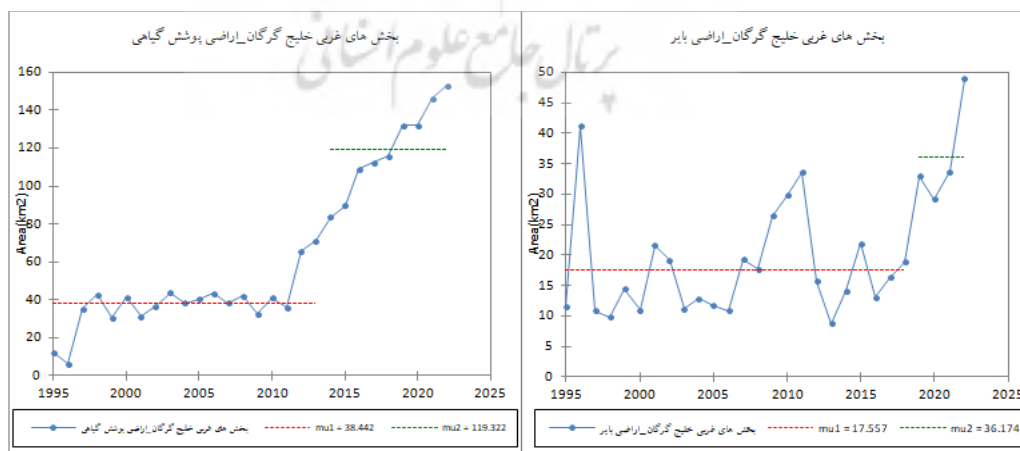
بخش‌های غربی خلیج گرگان

شکل ۱۸ روند تغییرات مساحتی دو متغیر پوشش گیاهی و اراضی بایر بخش‌های غربی خلیج گرگان را نشان می‌دهد. همان‌طور که ملاحظه می‌شود، از نظر مساحت هر دو متغیر تا سال ۲۰۱۲ در یک دامنه خاصی نسبت به هم رفتار معکوسی نوسانی نشان می‌دهند. درکل از این شکل مشخص می‌شود که بیشتر دوره زمانی مساحت اراضی پوشش گیاهی بیشتر از اراضی بایر است. نکته درخور توجه در ارتباط با روند تغییرات هر دو متغیر معنی‌دار است. البته لازم به ذکر است که روند طولانی مدت هر دو متغیر جهش را نشان می‌دهد. همان‌طور که از شکل ۱۹ مشخص می‌شود، اراضی پوشش گیاهی تا سال ۲۰۱۳ از نظر رفتار زمانی از یکنواختی برخوردار بود؛ اما از این سال به بعد جهش ناگهانی اتفاق افتاد و تا پایان دوره، برگشتی انجام نشده است. اختلاف میانگین مساحتی دوره جهش با دوره یکنواختی معادل ۸۰٫۸۸ کیلومتر مربع است. همچنین اراضی بایر تا سال ۲۰۱۸ از نظر رفتار زمانی از یکنواختی برخوردار بود؛ اما از این سال به بعد جهش ناگهانی اتفاق افتاد و تا پایان دوره، برگشتی انجام نشده است. اختلاف میانگین مساحتی دوره جهش با دوره یکنواختی معادل ۱۸٫۱۷۴ کیلومتر مربع است. این موضوع حاکی از آن است که شدت افزایش اراضی پوشش گیاهی در بخش‌های غربی خلیج گرگان در حال افزایش بیشتری از اراضی بایر است.



شکل ۱۸: روند تغییرات اراضی پوشش گیاهی و اراضی بایر بخش‌های غربی خلیج گرگان برای دوره ۱۹۹۵ لغایت ۲۰۲۲

Figure 18: Trend of Vegetation and Barren Land Changes in the Western Parts of Gorgan Gulf from 1995 to 2022

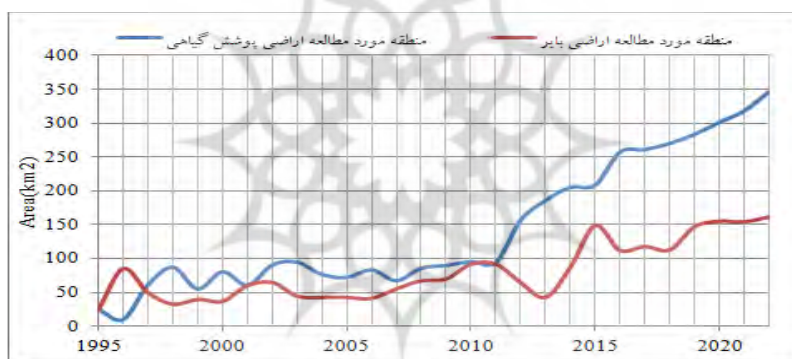


شکل ۱۹: تغییرات جهشی بر مبنای آزمون همگنی اراضی پوشش گیاهی و اراضی بایر بخش‌های غربی خلیج گرگان

Figure 19: Abrupt Changes Based on the Homogeneity Test for Vegetation and Barren Lands in the Western Parts of Gorgan Gulf

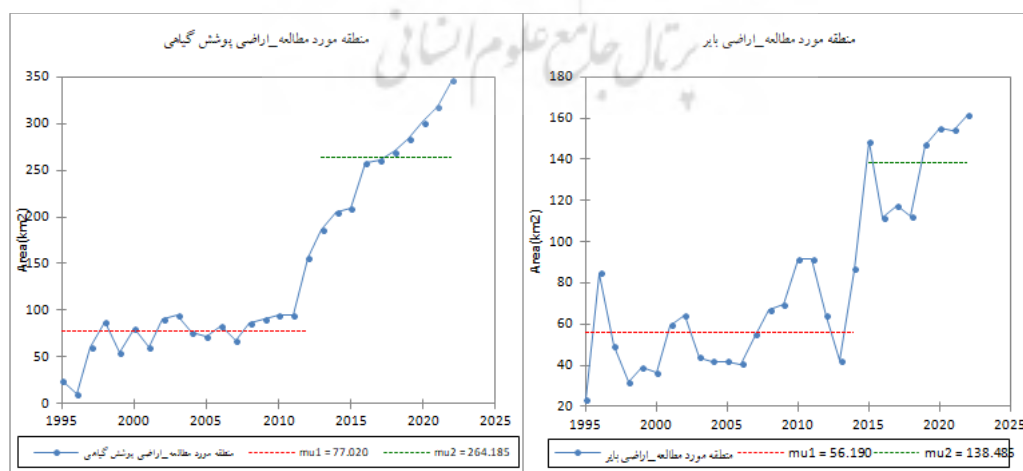
کل منطقه مطالعه شده

شکل ۲۰ روند تغییرات مساحتی دو متغیر پوشش گیاهی و اراضی بایر را در کل منطقه مطالعه شده نشان می‌دهد. همان‌طور که ملاحظه می‌شود، از نظر مساحت دو متغیر تا سال ۲۰۱۲ در یک دامنه خاصی نسبت به هم رفتار معکوسی نوسانی نشان می‌دهند. در کل از این شکل مشخص می‌شود که بیشتر دوره زمانی مساحت اراضی پوشش گیاهی بیشتر از اراضی بایر است. نکته درخور توجه در ارتباط با روند تغییرات هر دو متغیر معنی‌دار است. لازم به ذکر است که روند طولانی مدت هر دو متغیر رفتار جهشی را نشان می‌دهد. همان‌طور که از شکل ۲۱ مشخص می‌شود، اراضی پوشش گیاهی تا سال ۲۰۱۲ از نظر رفتار زمانی از یکنواختی بر خوردار بود؛ اما از این سال به بعد جهش ناگهانی اتفاق افتاد و تا پایان دوره، برگشتی انجام نشده است. اختلاف میانگین مساحتی دوره جهش با دوره یکنواختی معادل ۱۸۷،۱۶۵ کیلومتر مربع است. همچنین اراضی بایر تا سال ۲۰۱۴ از نظر رفتار زمانی از یکنواختی بر خوردار بود؛ اما از این سال به بعد جهش ناگهانی اتفاق افتاد و تا پایان دوره، برگشتی انجام نشده است. اختلاف میانگین مساحتی دوره جهش با دوره یکنواختی معادل ۸۲،۲۹۵ کیلومتر مربع است. این موضوع حاکی از آن است که شدت افزایش اراضی پوشش گیاهی در کل منطقه مطالعه شده در حال افزایش بیشتری از اراضی بایر است.



شکل ۲۰: روند تغییرات اراضی پوشش گیاهی و اراضی بایر منطقه مطالعه شده برای دوره ۱۹۹۵ لغایت ۲۰۲۲

Figure 20: Trend of Vegetation and Barren Land Changes in the Study Area from 1995 to 2022



شکل ۲۱: تغییرات جهشی بر مبنای آزمون همگنی اراضی پوشش گیاهی و اراضی بایر منطقه مطالعه شده

Figure 21: Abrupt Changes Based on the Homogeneity Test for Vegetation and Barren Lands in the Study Area

نتیجه‌گیری

بررسی تغییرات شاخص پوشش گیاهی و خشکی‌زایی در منطقه مطالعه‌شده در دوره‌های پنج‌ساله از سال ۱۹۹۵ تا ۲۰۲۲ نشان داد که از ۱۹۹۵ تا ۲۰۱۰ تغییرات این شاخص‌ها بسیار ناچیز بود. در این دوره، سالانه به‌طور متوسط ۴,۵۴ کیلومتر مربع به اراضی بایر و ۴,۷۱ کیلومتر مربع به اراضی دارای پوشش گیاهی علفی و بوته‌ای اضافه شد، درحالی‌که ۰,۰۶ کیلومتر مربع از اراضی جنگلی و درختی کاسته شد؛ اما از سال ۲۰۱۱ به بعد، شدت خشکی‌زایی افزایش یافت و درنتیجه، سالانه به‌طور متوسط ۵,۸۴ کیلومتر مربع به اراضی بایر، ۲۰,۸۴ کیلومتر مربع به اراضی دارای پوشش گیاهی علفی و بوته‌ای و ۰,۱۴ کیلومتر مربع به اراضی جنگلی و درختی اضافه شد. درکل، اراضی بایر در طول دوره بررسی‌شده تغییرات یکنواختی داشتند، درحالی‌که اراضی دارای پوشش گیاهی به دلیل افزایش خشکی‌زایی به همان میزان نیز افزایش یافتند؛ به عبارت دیگر، در این دوره، سالانه به‌طور متوسط ۱۱,۱۶ کیلومتر مربع به اراضی بایر، ۲۰,۰۱ کیلومتر مربع به اراضی دارای پوشش گیاهی علفی و بوته‌ای و ۰,۱۶ کیلومتر مربع به اراضی جنگلی و درختی اضافه شد؛ بنابراین، می‌توان نتیجه گرفت که باتوجه‌به عقب‌نشینی دریای خزر، پیشروی پوشش گیاهی به نواحی آزادشده توسط عقب‌نشینی دریا بیشتر از اراضی بایر و لخت بوده است.

بررسی روند تغییرات نیز نشان داد که دو پهنه بخش‌های غربی خلیج گرگان و منطقه تالاب گمیشان بیشترین حساسیت را به خشکی‌زایی دارند. در بخش‌های غربی خلیج گرگان، تا سال ۲۰۱۲ مساحت پوشش گیاهی و اراضی بایر در یک دامنه خاص نوسان معکوسی داشتند. در بیشتر دوره زمانی، وسعت پوشش گیاهی از اراضی بایر بیشتر بوده است. روند تغییرات هر دو متغیر معنی‌دار است، شدت افزایش اراضی پوشش گیاهی در این بخش بیشتر از اراضی بایر است. این موضوع نشانگر آن است که اراضی آزادشده از دریا به‌سرعت با پوشش گیاهی احیا می‌شوند و در صورت عدم دخالت انسان، کانون‌های ریزگرد ایجاد نمی‌شود؛ بنابراین، این موضوع باتوجه‌به واقعیت اتفاق افتاده در محدوده خلیج گرگان، نتایج مدل‌سازی لاهیجانی و همکاران (۲۰۲۳) را رد می‌کند؛ اما در منطقه تالاب گمیشان هر دو متغیر پوشش گیاهی و اراضی بایر در یک دامنه خاص نوسان معکوسی کوتاه‌مدت و روند افزایشی بلندمدت نشان می‌دهند. اراضی پوشش گیاهی تا سال ۲۰۱۱ از نظر رفتار زمانی ثابت بود؛ اما از این سال به بعد جهشی ناگهانی اتفاق افتاد و تا پایان دوره مطالعه‌شده به حالت اولیه بازنگشته است. اختلاف میانگین مساحتی دوره جهش با دوره یکنواختی برای اراضی پوشش گیاهی معادل ۵۹,۷۷۸ کیلومتر مربع است. همچنین اراضی بایر تا سال ۲۰۱۳ از نظر رفتار زمانی ثابت بود؛ اما از این سال به بعد جهشی ناگهانی اتفاق افتاد و تا پایان دوره مطالعه‌شده به حالت اولیه بازنگشته است. اختلاف میانگین مساحتی دوره جهش با دوره یکنواختی برای اراضی بایر معادل ۷۰,۷۶۹ کیلومتر مربع است. این موضوع نشان می‌دهد که شدت افزایش اراضی بایر در منطقه تالاب گمیشان در حال افزایش بیشتری از اراضی پوشش گیاهی است. در مجموع، این یافته‌ها نشان می‌دهد که امکان ایجاد کانون‌های ریزگرد در منطقه آزادشده از عقب‌نشینی دریا در تالاب گمیشان وجود دارد.

منابع

اسلامی، زهرا، و قانقرمه، عبدالعظیم (۱۴۰۱). پیش‌یابی تراز آب دریای خزر بر اساس مدل‌های اقلیمی گزارش ششم IPCC. پژوهش‌های جغرافیای طبیعی، ۵۴(۲)، ۲۵۷-۲۷۲.

<https://doi.org/10.22059/jphgr.2022.342669.1007701>

خوشروان، همایون (۱۳۹۹). تغییرات مکانی و زمانی زیستگاه‌های ساحلی خلیج گرگان تحت تأثیر نوسانات دریای خزر. اطلاعات جغرافیایی سپهر، ۲۹(۱۱۵)، ۱۲۷-۱۳۸.

<https://doi.org/10.22131/sepehr.2020.47885>

رنجبر، محسن (۱۳۸۸). نوسان سطح آب دریای خزر و تأثیر آن در شکل‌گیری لندفرم‌های ناشی از دینامیک دریا و رودخانه‌ها (مطالعه موردی شهرستان تالش). سرزمین، ۶(۳)، ۱۱۹-۱۳۴. <https://ensani.ir/fa/article/487603>

عبداللهی کاکرودی، عطاله (۱۳۹۲). نوسانات دریای خزر و تأثیر آن بر سواحل جنوب شرقی آن. پژوهش‌های ژئومورفولوژی کمی، ۲(۳)، ۳۳-۴۴. https://www.geomorphologyjournal.ir/article_77919.html

قانقرمه، عبدالعظیم (۱۳۷۶). تغییرات اقلیمی و رفتار نوسانی سطح دریای خزر. اطلاعات جغرافیایی سپهر، ۶(۲۲)، ۱۹-۲۲. https://www.sepehr.org/article_29254.html

مرتضی‌پور، سامان، اسعدی اسکویی، ابراهیم، و عباسی، فائزه (۱۳۹۹). ارزیابی کارایی چند آزمون همگنی در شناسایی جهش در داده‌های اقلیمی دما، بارش و فشار؛ مطالعه موردی: ایستگاه فرودگاهی رشت. نیوار، ۴۴(۱۰۸-۱۰۹)، ۳۲-۱۲. <https://doi.org/10.30467/nivar.2020.188070.1132>

نجفی‌ها، بابک، و بونیاگریان، ولادیمیر (۱۳۹۸). تأثیر نوسانات سطح آب دریا بر روی ژئومورفولوژی و مورفودینامیک سواحل دریای خزر (مطالعه موردی خلیج گرگان). فصلنامه علمی علوم زمین، ۲۹(۱۱۳)، ۳۵-۴۴.

<https://doi.org/10.22071/gsj.2018.128457.1457>

References

- Abdollahi Kakroudi, A. (2014). Caspian Sea fluctuations and their impact on its southeastern coasts. *Quantitative Geomorphological Research*, 2(3), 33-44. https://www.geomorphologyjournal.ir/article_77919.html [In Persian].
- Akbari, M., Baubekova, A., Roozbahani, A., Gafurov, A., Shiklomanov, A., Rasouli, K., Ivkina, N., Kløve, B., & Haghighi, A. T. (2020). Vulnerability of the Caspian Sea shoreline to changes in hydrology and climate. *Environmental Research Letters*, 15(11), 115002. <https://doi.org/10.1088/1748-9326/abaad8>
- Eeslami, Z., & Ghanghermeh, A. (2022). Forecast of water levels in the Caspian Sea based on the sixth IPCC report. *Physical Geography Research*, 54(2), 257-272. <https://doi.org/10.22059/jphgr.2022.342669.1007701> [In Persian].
- Filizadeh, Y. (2010). Possible Impact of Caspian Sea level rise on the natural habitat of the Anzali lagoon in the north of Iran. *Environmental Sciences*, 7(3), 91-102. https://envs.sbu.ac.ir/article_96158.html
- Ghassabian, S., Tayari, O., Momeni-Roghabadi, M., & Irandoost, M. (2024). Investigating the vulnerability of the northern coasts of Iran due to changes in the water level of the Caspian Sea by considering the effects of climate change. *Journal of Water and Climate Change*, 15(2), 407-430. <https://doi.org/10.2166/wcc.2024.400>
- Ghanghermeh, A. (1997). Climate Change and Fluctuating Behavior of the Level of the Caspian Sea. *Scientific- Research Quarterly of Geographical Data (SEPEHR)*, 6(22), 19-22. https://www.sepehr.org/article_29254.html [In Persian].

- Ghanghermeh, A., Roshan, G., Asadi, K., & Attia, S. (2024). Spatiotemporal Analysis of Urban Heat Islands and Vegetation Cover Using Emerging Hotspot Analysis in a Humid Subtropical Climate. *Atmosphere*, 15(2), 161. <https://doi.org/10.3390/atmos15020161>
- Isaie-Moghaddam, E., Allahdadi, M. N., Ashrafi, A., & Chaichitehrani, N. (2021). Coastal system evolution along the southeastern Caspian Sea coast using satellite image analysis: response to the sea level fall during 1994–2015. *Arabian Journal of Geosciences*, 14, 771. <https://doi.org/10.1007/s12517-021-07106-2>
- Kalugin, A., & Morozova, P. (2023). Hydrometeorological conditions of the volga flow generation into the Caspian Sea during the last glacial maximum. *Climate*, 11(2), 36. <https://doi.org/10.3390/cli11020036>
- Kholoptsev, A. V., & Naurozbayeva, Z. K. (2022). The Northern Caspian levels and its ice regime changing during current climate warming. In V.I. Karev (Ed.), *In Physical and Mathematical Modeling of Earth and Environment Processes* (pp. 133-146). Springer Proceedings in Earth and Environmental Sciences. Springer, Cham. https://doi.org/10.1007/978-3-030-99504-1_15
- Khoshnavan, H. (2020). Spatial and temporal variations of Coastal habitats in Gorgan Bay resulting from fluctuations in the Caspian Sea. *Scientific- Research Quarterly of Geographical Data (SEPEHR)*, 29(115), 127-138. <https://doi.org/10.22131/sepehr.2020.47885> [In Persian].
- Khoshnavan, H., Naqinezhad, A., Alinejad-Tabrizi, T., & Yanina, T. (2019). Gorgan Bay environmental consequences due to the Caspian Sea rapid water level change. *Caspian Journal of Environmental Sciences*, 17(3), 213-226. <https://doi.org/10.22124/cjes.2019.3664>
- Klink, G. V., Semenov, I. N., Nukhimovskaya, Y. D., Gasanova, Z. U., Stepanova, N. Y., & Konyushkova, M. V. (2022). Temporal change in plant communities and its relationship to soil salinity and microtopography on the Caspian Sea coast. *Scientific Reports*, 12, 18082. <https://doi.org/10.1038/s41598-022-19863-5>
- Kosarev, A. N., Kostianoy, A. G., Zonn, I. S., & Zhiltsov, S. S. (2013). The caspian sea and Karabogaz-gol Bay. In I. Zonn, & A. Kostianoy, (Eds), *In The Turkmen Lake Altyn Asyr and Water Resources in Turkmenistan* (PP. 69-94). The Handbook of Environmental Chemistry, vol 28. Springer, Berlin, Heidelberg. https://doi.org/10.1007/698_2013_228
- Lahijani, H. A. K., Azizpour, J., Arpe, K., Abtahi, B., Rahnema, R., Ghafarian, P., Hamzeh, M. A., Hamzehpour, A., Penchah, M. M., & Mahmoudof, S. M. (2023). Tracking of sea level impact on Caspian Ramsar sites and potential restoration of the Gorgan Bay on the southeast Caspian coast. *Science of the Total Environment*, 857, 158833. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2022.158833>
- Lattuada, M., Albrecht, C., & Wilke, T. (2019). Differential impact of anthropogenic pressures on Caspian Sea ecoregions. *Marine Pollution Bulletin*, 142, 274-281. <https://doi.org/10.1016/j.marpolbul.2019.03.046>
- Mahdian, M., Noori, R., Salamattalab, M. M., Heggy, E., Bateni, S. M., Nohegar, A., Hosseinzadeh, M., Siadatmousavi, S. M., Fadaei, M. R., & Abolfathi, S. (2024). Anzali wetland crisis: Unraveling the decline of Iran's ecological gem. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 129(4), e2023JD039538. <https://doi.org/10.1029/2023JD039538>
- Mortezapoor, S., Asadi Oscouei, E., & Abasi, F. (2020). Evaluation of some homogeneity tests on mutation detection in climatic data, case study: Rash Station. *Nivar*, 44(108-109), 12-32. <https://doi.org/10.30467/nivar.2020.188070.1132> [In Persian].
- Najafiha, B., & Boynagryan, V. V. R. (2019). The sea level fluctuations effects on geomorphology and morphodynamics of the Caspian Sea Coasts (Case study of Gorgan Bay). *Scientific Quarterly Journal of Geosciences*, 29(113), 35-44. <https://doi.org/10.22071/gsj.2018.128457.1457> [In Persian].
- Ranjbar, M. (2009). Caspian Sea water level fluctuations and their impact on the formation of landforms resulting from sea and river dynamics (Case study: Talesh County). *Geographical Land*, 6(3), 119–134. <https://ensani.ir/fa/article/487603> [In Persian].
- Rezaee, S. M., Golshani, A., & Abedi, S. (2022). Shoreline changes at Fereydounkenar Port in light of Csstnn s wtrr lvll flttt tt i.... *Regional Studies in Marine Science*, 53, 102393. <https://doi.org/10.1016/j.rsma.2022.102393>

- Robinson, D. A., & Frei, A. (2000). Seasonal variability of Northern Hemisphere snow extent using visible satellite data. *The Professional Geographer*, 52(2), 307-315. <https://doi.org/10.1111/0033-0124.00226>
- Safarov, E., Safarov, S., & Bayramov, E. (2024). Changes in the hydrological regime of the Volga River and their influence on Caspian Sea level fluctuations. *Water*, 16(12), 1744. <https://doi.org/10.3390/w16121744>
- Sands, A. F., Neubauer, T. A., Nasibi, S., Harandi, M. F., Anistratenko, V. V., Wilke, T., & Albrecht, C. (2019). Old lake versus young taxa: A comparative phylogeographic perspective on the evolution of Caspian Sea gastropods (Neritidae: Theodoxus). *Royal Society Open Science*, 6(10), 190965. <https://doi.org/10.1098/rsos.190965>
- Schwatke, C., Dettmering, D., Bosch, W., & Seitz, F. (2015). DAHITI—an innovative approach for estimating water level time series over inland waters using multi-mission satellite altimetry. *Hydrology and Earth System Sciences*, 19(10), 4345-4364. <https://doi.org/10.5194/hess-19-4345-2015>
- Sharifi, A., Baubekova, A., Patro, E. R., Klöve, B., & Haghighi, A. T. (2024). The combined effects of anthropogenic and climate change on river flow alterations in the Southern Caspian Sea Iran. *Heliyon*, 10(11), e31960. <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2024.e31960>
- Yazdanpanah-Dero, Q., Yari, E., & Charrahy, Z. (2020). Global warming, environmental security and its geo-economic dimensions case study: Caspian Sea level changes on the balance of transit channels. *Journal of Environmental Health Science and Engineering*, 18, 541-557. <https://doi.org/10.1007/s40201-020-00481-0>

