

Assessment of Shoreline Changes in Mazandaran Province Using Remote Sensing Data

Javad Karami¹, Majid Habibi Nokhandan^{1*} , Majid Azadi¹ and Akbar Rashidi Ebrahim Hesari²

(Received: February 10-2025 ; Revised: April 23-2025 ; Accepted: July 2-2025)

1. Research Institute of Meteorology and Atmospheric Science, Tehran, Iran.

2. Department of Marine Physics, Faculty of Marine Sciences, Tarbiat Modares University, Noor, Iran.

*: Corresponding author, Email: habibi3558@gmail.com

Abstract

The present study investigates shoreline changes along the southern Caspian Sea coast in Mazandaran Province over 24 years (2000-2023) using Landsat 8 and Sentinel-2 satellite imagery. The images were obtained from the USGS and Google Earth Engine platforms, and after geometric and radiometric corrections were processed using near-infrared and shortwave Infrared bands to accurately detect the boundary between land and water. Shorelines were visually extracted from the imagery and digitized for each time interval. Spatial variations in the shoreline were analyzed using the Digital Shoreline Analysis System (DSAS) within the ArcGIS environment, applying statistical methods including Net Shoreline Movement (NSM), Shoreline Change Envelope (SCE), End Point Rate (EPR), and Linear Regression Rate (LRR). The results indicate a significant shoreline retreat in many areas of the study region, alongside a continuous decline in the Caspian Sea water level during the last decade. The integration of remote sensing analyses with atmospheric and hydrological data (temperature, precipitation, and river discharge) improved the accuracy of the results and suggests that the southern coastlines—particularly in Mazandaran—may experience more severe retreat by 2050, if current trends continue. These findings underscore the need for intelligent water resource management and the adoption of climate-adaptive policies in the region.

Keywords: Sentinel, Landsat satellite imagery, Sea-level fluctuations, Digital Shoreline Analysis System (DSAS)

How to cite this article: Karami, J., Habibi Nokhandan, M., Azadi, M. and Rashidi Ebrahim Hesari, A. 2025. Assessment of Shoreline Changes in Mazandaran Province Using Remote Sensing Data. *J. Water and Soil Sci.* 29(3): 49-71. DOI: [10.47176/jwss.29.3.67641](https://doi.org/10.47176/jwss.29.3.67641)

Copyright © 2025 Karami et al. Published by Isfahan University of Technology.



This work is licensed under a Creative Commons Attribution-Noncommercial 4.0 International license (<https://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/>). Non-commercial uses of the work are permitted, provided the original work is properly cited.

بررسی تغییرات خط ساحلی بخش جنوبی دریای خزر با استفاده از داده‌های سنجش از دور

جواد کرمی^۱، مجید حبیبی نوخندان^{۱*} , مجید آزادی^۱ و اکبر رشیدی ابراهیم حصار^۲

(تاریخ دریافت: ۱۴۰۳/۱۱/۲۲؛ تاریخ بازنگری: ۱۴۰۴/۲/۳، تاریخ پذیرش: ۱۴۰۴/۴/۱۱)

۱. پژوهشگاه هواشناسی و علوم جو، تهران، ایران.

۲. گروه فیزیک دریا، دانشکده علوم دریایی، دانشگاه تربیت مدرس، نور، ایران.

*: مسئول مکاتبات: پست الکترونیکی: habibi3558@gmail.com

چکیده

پژوهش حاضر به بررسی تغییرات خط ساحلی بخش جنوبی دریای خزر در استان مازندران در بازه زمانی ۲۴ ساله (۲۰۰۰-۲۰۲۳) با استفاده از تصاویر ماهواره‌ای لندست ۸ و ستینل-۲ پرداخته است. تصاویر از پایگاه‌های USGS و Google Earth Engine تهیه و پس از تصحیحات هندسی و رادیومتریک، با بهره‌گیری از باندهای Near-Infrared و Shortwave Infrared برای تشخیص مرز بین خشکی و آب استفاده شدند. خط ساحلی به صورت بصری از تصاویر استخراج و برای هر بازه زمانی ترسیم شد. تغییرات مکانی خطوط ساحلی با استفاده از ابزار DSAS در محیط ArcGIS و به کمک روش‌های آماری شامل حرکت خالص خط ساحلی (NSM)، پوشش تغییر خط ساحلی (SCE)، نرخ نقطه پایانی (EPR) و نرخ رگرسیون خطی (LRR) تحلیل شد. نتایج حاکی از پسروری قابل توجه خط ساحلی در بسیاری از نواحی مورد مطالعه و کاهش مداوم سطح آب دریای خزر در دهه اخیر است. ترکیب تحلیل‌های سنجش از دور با داده‌های جوی (دما، بارندگی و دبی رودخانه‌ها) دقت نتایج را افزایش داده و نشان می‌دهد در صورت تداوم روند کنونی، احتمال پسروری شدیدتر سواحل جنوبی تا سال ۲۰۵۰ وجود دارد. این یافته‌ها بر ضرورت مدیریت هوشمند منابع آبی و اتخاذ سیاست‌های سازگار با تغییر اقلیم در منطقه تأکید دارند.

واژه‌های کلیدی: ستینل، تصاویر ماهواره‌ای لندست، نوسانات سطح آب، سیستم تحلیل خط ساحلی دیجیتال (DSAS)

حق انتشار این مستند، متعلق به دانشگاه صنعتی اصفهان است. ۱۴۰۴ ©.

این مقاله تحت گواهی زیر منتشر شده و هر نوع استفاده غیرتجاری از آن مشروط به استناد صحیح به مقاله و با رعایت

شرایط مندرج در آدرس زیر مجاز است: (<https://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/>)



مقدمه

دریای خزر به عنوان بزرگ‌ترین بدنه آبی بسته در جهان، تراز هیدرولوژیک حساسی دارد که دچار نوسانات دوره‌ای می‌شود (۱۱). در حال حاضر، سطح دریای خزر بین ۲۶- و ۲۷- متر نسبت به سطح دریای بالتیک قرار دارد؛ اما در طول قرن بیستم حدود ۳ متر نوسان را تجربه کرده است (۱۰). این در حالی است که در همین بازه زمانی، تراز جهانی اقیانوس‌ها تنها حدود ۲ میلی‌متر در سال تغییر داشته است (۱۰). بین سال‌های ۱۹۳۰ تا ۱۹۷۷، تراز دریای خزر به‌طور ناگهانی ۳ متر کاهش یافت و به پایین‌ترین سطح خود در ۴۰۰ سال اخیر یعنی ۲۹- متر رسید (۱۲). این کاهش، خروج بخش‌های زیادی از زمین‌های ساحلی از زیر آب را به همراه داشت و فرصتی برای گسترش فعالیت‌های اقتصادی و اجتماعی در این مناطق فراهم کرد. سپس، در فاصله سال‌های ۱۹۷۷ تا ۱۹۹۵، تراز دریا حدود ۵/۲ متر افزایش یافت و به ۵/۲۶- متر رسید که موجب معکوس شدن این روند شد (۱۴). خط ساحلی به جایی گفته می‌شود که آب دریا با خشکی تلاقی می‌کند (۳). دریاها، آزاد، خط ساحلی را به عنوان خطی تعریف می‌کنند که نقاط معدل بین بیشینه مد و کمینه جزر را به هم وصل می‌کند. به دلیل پویایی آب و خشکی، موقعیت خط ساحلی در بازه‌های زمانی کوتاه‌مدت و بلندمدت همواره پایدار نمی‌ماند. این تغییرات در خط ساحلی می‌تواند اثرهای جانبی متعددی بر محیط‌زیست، منابع طبیعی، اکوسیستم‌ها، ابعاد اقتصادی - اجتماعی، فرهنگی و حتی امنیت دفاعی ایجاد کند (۱۸).

در گذشته، تغییرات تراز دریا با تحلیل داده‌های محدود ساحلی مشخص می‌شد که اطلاعات محدودی از مناطق دور از ساحل ارائه می‌داد. اما امروزه، استفاده از داده‌های ماهواره‌ای امکان پایش دقیق پارامترهایی مانند تراز دریا، دمای سطح آب، باد و امواج را فراهم آورده است. دریای خزر به دلیل نوسانات دوره‌ای سطح آب، محیطی منحصر به فرد با تغییرات قابل توجه در خط ساحلی ایجاد کرده است. این تغییرات که به صورت کاهش یا افزایش سطح دریا رخ می‌دهد، باعث پیشروی و

پسروی خط ساحلی می‌شود؛ بنابراین، بررسی و پیش‌بینی این تغییرات از اهمیت زیادی برخوردار است (۲ و ۵). پژوهش‌های جهانی متعددی به دلیل اهمیت تغییرات خط ساحلی و تأثیر آن بر فعالیت‌های انسانی و اقتصادی انجام شده است. این پژوهش‌ها به روش‌های مختلفی برای درک تغییرات خط ساحلی منجر شده‌اند. از قدیمی‌ترین روش‌ها می‌توان به اندازه‌گیری فاصله نقاط ساحلی نسبت به نقاط کنترلی ثابت اشاره کرد. افزایش سطح آب دریاها می‌تواند تأثیرات قابل توجهی بر زندگی ساکنان ساحلی و ثبات اقتصادی این مناطق داشته باشد. ارزیابی آسیب‌پذیری مناطق ساحلی تحت تأثیر افزایش سطح دریا، به همراه اجرای استراتژی‌های مناسب برای کاهش پیامدهای تغییرات اقلیمی، بسیار ضروری است (۹). کوارت و همکاران با استفاده از روش نقطه به نقطه به تحلیل تغییرات ساحلی در مقیاس وسیع در طول مصب رودخانه نیوس در کارولینای شمالی پرداختند و علاوه بر بررسی تغییرات ساحلی، به تجزیه و تحلیل پارامترهای مؤثر بر فرسایش ساحلی نیز پرداختند (۴). لرستانی و همکاران در پژوهش خود به بررسی تغییرات خط ساحلی دریای خزر در مصب رودخانه هراز پرداختند. نتایج این مطالعه نشان داد که تغییر مساحت بازه‌های ساحلی تحت تأثیر مستقیم نوسانات سطح آب دریا قرار دارد (۱۳). عمونیا و همکاران اثرهای تغییرات خط ساحلی خزر در بابل‌رود را تحلیل کردند. نتایج پژوهش آنان نشان داد که فعالیت‌های انسانی بیش از نوسانات تراز آب دریا، بر تغییرات زمانی خط ساحلی مؤثر بوده است (۱). ثروتی و همکاران تغییرات خط ساحلی کرانه‌های جنوب شرقی دریای خزر را در دوره ۲۰۱۵-۱۹۸۷ بررسی کردند. یافته‌ها نشان داد که خط ساحلی در بیشتر نقاط این کرانه‌ها به سوی دریا پیشروی داشته است (۱۷). ون بی و ون بینخ با تمرکز بر خور زونین در ویتنام، به شناسایی تغییرات خط ساحلی و مدیریت منطقه ساحلی با استفاده از سنجش از دور (RS) و سیستم‌های اطلاعات جغرافیایی (GIS) پرداختند. این پژوهشگران با استفاده از روش نسبت نواری روی تصاویر استر و لندست، تغییرات خط ساحلی بین

این پژوهش به بررسی تغییرات خط ساحلی بخش جنوبی دریای خزر در بازه زمانی ۱۰ ساله با استفاده از تصاویر ماهواره‌های لندست ۸ و سنتینل ۲- از پایگاه USGS و گوگل ارث پرداخته است. تصاویر ماهواره‌ای پس از تصحیحات رادیومتریک و هندسی و استفاده از باندهای حساس به آب و خشکی، مانند Near-Infrared و Shortwave Infrared، به‌عنوان مرجع دقیق زمین استفاده شدند (۸ و ۱۶). تصاویر استفاده‌شده از نوع LITP هستند که شامل تصحیحات هندسی دقیق و اصلاح توپوگرافی هستند. این تصاویر به‌صورت پیش‌فرض با استفاده از نقاط کنترل زمینی و مدل ارتفاعی دیجیتال اصلاح شده‌اند. برای یکسان‌سازی مکان تصاویر و افزایش دقت تحلیل‌ها، تبدیل و هماهنگ‌سازی سیستم مختصات با استفاده از ابزار Project Raster در ArcGIS به سیستم UTM مربوط به منطقه انجام شد. بررسی انطباق مکانی تصاویر نشان داد که بیشترین اختلاف مکانی کمتر از یک پیکسل (حدود ۳۰ متر) بوده است. تصحیح رادیومتریک تصاویر لندست ۸ به‌منظور حذف اثرهای جوی و تبدیل بازتاب اولیه (TOA) به بازتاب سطحی (Surface Reflectance) با استفاده از الگوریتم LaSRC در نرم‌افزار SNAP انجام شده است. این فرایند شامل اصلاح جذب گازهای جوی، پراکندگی نور و اثر آئروسول است و باعث بهبود کیفیت داده‌ها شده است. مقایسه مقادیر بازتاب سطحی با بازتاب اولیه نشان داد که میزان اصلاح در باندهای مختلف بین ۵ تا ۱۵ درصد بوده است که نشان‌دهنده کاهش قابل توجه تأثیرات جوی در داده‌های استفاده‌شده است.

استخراج خط ساحلی به‌صورت بصری انجام و بررسی تغییرات خط ساحلی طی سال‌های ۲۰۰۰ تا ۲۰۲۳ با استفاده از داده‌های جوی، شامل بارش و دمای آب، و ابزار تحلیل رقومی خط ساحلی (DSAS) و روش‌های آماری مانند حرکت خالص خط ساحل (NSM)، پوشش تغییر خط ساحل (SCE)، آهنگ نقطه پایانی (EPR) و آهنگ تغییر وایزش خطی (LRR) انجام شد. تحلیل‌ها با استفاده از ArcGIS افزونه DSAS و

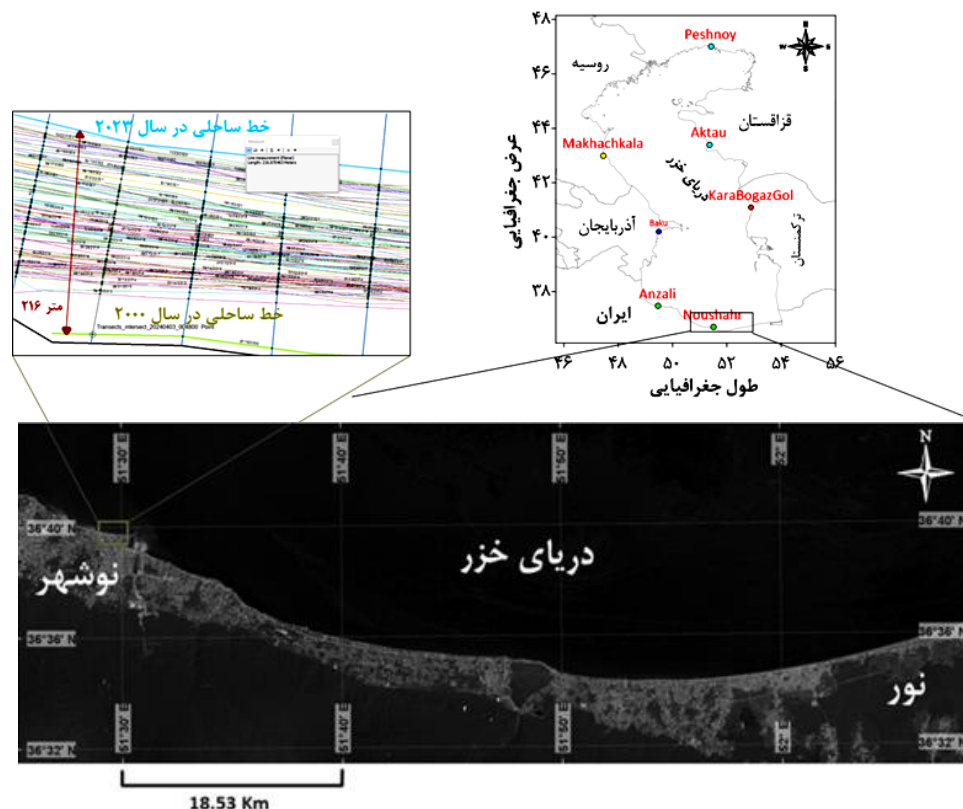
سال‌های ۱۹۸۹ و ۲۰۰۴ را تجزیه و تحلیل و نتایج را به‌صورت نقشه‌هایی ارائه کردند (۱۹). اقتصادی و زاهدی عوامل مؤثر بر نوسانات تراز آب در سواحل جنوبی دریای خزر را بررسی کردند (۷). صفری و همکاران با استفاده از داده‌های ارتفاع‌سنجی ماهواره‌ای، به مدل‌سازی تغییرات لحظه‌ای سطح آب دریای خزر بر اساس پنج سال مشاهدات ماهواره جیسون ۲- پرداختند (۱۵).

در مجموع، مناطق ساحلی به‌دلیل تأثیرپذیری از فرایندهای موفوژنز دریایی همچون جریان‌ات، امواج، و تغییرات آب‌وهوایی، به‌طور پیوسته در حال تغییر و تحول هستند و با شرایط جدید سازگار می‌شوند. تغییرات سریع خطوط ساحلی و سطوح موفولوژیکی به‌ویژه در اطراف بنادر و سازه‌های انسان‌ساخت از ویژگی‌های بارز این مناطق است (۶). این پژوهش به بررسی تأثیر تغییرات اقلیمی بر نوسانات سطح آب دریای خزر و پسروری خط ساحلی در بخش جنوبی آن پرداخته است. با استفاده از تصاویر ماهواره‌ای لندست ۸ و سنتینل ۲- و ابزارهای تحلیل جغرافیایی، تغییرات خط ساحلی و سطح آب از سال ۲۰۰۰ تا ۲۰۲۱ تحلیل شده و پیش‌بینی‌هایی برای آینده ارائه شده است.

مواد و روش‌ها

منطقه مورد مطالعه

در این پژوهش، منطقه‌ای به طول حدود ۶۰ کیلومتر در بخش جنوبی دریای خزر، بین شهرستان‌های نور و نوشهر در استان مازندران، مورد مطالعه قرار گرفت (شکل ۱). این منطقه بین طول‌های جغرافیایی ۵۱°۲۵' تا ۵۲°۰۸' درجه شرقی و عرض‌های جغرافیایی ۳۶°۳۱' تا ۳۶°۴۳' درجه شمالی محدود است و به‌دلیل وجود اسکله‌ها و بنادر متعدد، به‌ویژه بندر نوشهر، و تمرکز زیاد جمعیتی، از لحاظ اقلیمی و زیست‌محیطی از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است. گفتنی است که به‌دلیل عدم دسترسی به تصاویر مناسب در طول سال، از سال ۲۰۰۰ تنها یک تصویر برای این منطقه در دسترس بود.



شکل ۱. منطقه‌ی مورد مطالعه در جنوب دریای خزر حدفاصل نور تا نوشهر به طول تقریبی ۶۰ کیلومتر

انجام شد. افزونه DSAS ابزاری کارآمد برای ارزیابی دینامیک مناطق ساحلی و اندازه‌گیری تغییرات خط ساحلی در طول زمان است. بررسی دقیق این تغییرات نقش مهمی در فهم الگوهای فرسایش و گسترش سواحل دارد و نظارت مستمر بر این تغییرات برای مدیریت پایدار سواحل و حفاظت از اکوسیستم‌ها و زیرساخت‌های ساحلی ضروری است.

استفاده از شاخص‌های طیفی برای استخراج مرز بین خشکی و آب

برای استخراج دقیق مرز بین نواحی خشکی و آب در تصاویر ماهواره‌ای لندست، از تفاوت بازتاب طیفی میان این دو سطح در باندهای مادون قرمز نزدیک (NIR) و مادون قرمز کوتاه‌موج (SWIR) استفاده شد. به‌طور کلی، آب در این باندها دارای بازتاب بسیار اندکی است و به‌صورت پیکسل‌هایی با مقادیر کم در تصویر ظاهر می‌شود؛ درحالی‌که سطوح خشکی (شامل خاک، پوشش گیاهی یا زیرساخت‌های انسانی) بازتاب

نرم‌افزارهای SNAP، ENVI و ArcMap برای تشخیص مرز آب و خشکی و ارزیابی تغییرات خط ساحلی در طول زمان انجام شد. تخمین تغییرات خط ساحلی در طول سال‌های ۲۰۰۰ و ۲۰۱۳ تا ۲۰۲۳ که در شکل ۱ نشان داده شده است، با استفاده از سیستم تجزیه و تحلیل دیجیتالی خط ساحلی (DSAS) انجام شد. افزونه DSAS یک ابزار مؤثر برای اندازه‌گیری تغییرات خط ساحلی در طول زمان است که به ما این امکان را می‌دهد تا دینامیک مناطق ساحلی را ارزیابی کنیم. تغییرات خط ساحلی از اهمیت برجسته‌ای برای درک الگوهای فرسایش و افزایش در سواحل برخوردارند. نظارت دقیق بر این تغییرات برای مدیریت سواحل و حفاظت از بخش‌های مهمی از اکوسیستم‌ها و زیرساخت‌های ساحلی ضروری است.

استخراج خط ساحلی

تخمین تغییرات خط ساحلی در سال‌های ۲۰۰۰ و ۲۰۱۳ تا ۲۰۲۳ با استفاده از سامانه تحلیل دیجیتالی خط ساحلی (DSAS)

تجزیه و تحلیل تغییرات خط ساحلی با استفاده از سامانه DSAS

در این پژوهش، برای تخمین تغییرات خط ساحلی از افزونه تحلیل دیجیتالی خط ساحلی (DSAS) در محیط نرم افزار ArcMap استفاده شد. این افزونه امکان تحلیل کمی تغییرات خط ساحلی را از طریق مقایسه خطوط ساحلی در تاریخ‌های مختلف فراهم می‌کند. تصاویر ماهواره‌ای به صورت ماهانه دریافت شد و در هر ماه، تصویری با وضوح و پوشش بهینه برای منطقه مورد مطالعه انتخاب شد. گفتنی است که در چهار ماه نخست سال ۲۰۱۳، هیچ تصویری از منطقه در بانک داده‌های ماهواره لندست ۸ موجود نبود. از ماه پنجم به بعد، تصاویر این ماهواره در دسترس قرار گرفته و استفاده شدند. در ماه‌های یازدهم و دوازدهم سال ۲۰۱۳ نیز، تصویری که بتواند کل منطقه خط ساحلی بین نور تا نوشهر را به طور کامل و بدون ابر پوشش دهد، موجود نبود؛ بنابراین، تصاویری با کمترین میزان ابر انتخاب شد که تنها قادر به پوشش حدود ۳۰ کیلومتر از خط ساحلی، در بازه توسکاتک تا نوشهر، بودند. برای تحلیل تغییرات خط ساحلی، ابتدا تصاویر ماهانه در ArcMap بارگذاری و خطوط ساحلی به صورت Polyline استخراج شدند. سپس بر اساس این خطوط، خط مبنا (Baseline) ترسیم شد. در ادامه، ترنسکت‌هایی عمود بر Baseline ایجاد شد تا میزان جابه‌جایی خط ساحلی اندازه‌گیری شود. نرخ تغییرات خط ساحلی با استفاده از روش اختلاف ساده بین موقعیت قدیمی‌ترین و جدیدترین خط ساحلی (NSM) محاسبه شد. در خروجی‌های افزونه DSAS، ترنسکت‌های متمایل به رنگ آبی نشان‌دهنده عقب‌نشینی خط ساحلی و ترنسکت‌های متمایل به رنگ قرمز بیانگر پیشروی آن به سمت خشکی هستند. ترنسکت‌های ترسیم‌شده در فواصل صد متری از خط مبنا، با دقت زیادی قابل مشاهده و تحلیل هستند.

روش‌های آماری تحلیل تغییرات خط ساحلی توسط سامانه دیجیتالی تحلیل رقومی خط ساحلی (DSAS)

هر روشی که برای محاسبه نرخ تغییرات خطوط ساحلی استفاده می‌شود، بر اساس تفاوت‌های اندازه‌گیری شده بین موقعیت‌های

بیشتری دارند. این تفاوت طیفی، مبنای شاخص‌های مختلف برای تشخیص سطح آب در تصاویر ماهواره‌ای قرار گرفته است.

در این پژوهش، از دو شاخص پرکاربرد برای شناسایی نواحی آبی استفاده شد:

شاخص استاندارد آب (NDWI) به صورت معادله (۱) بر پایه نسبت تفاوت بازتاب بین باند سبز و باند مادون قرمز نزدیک تعریف می‌شود:

$$(1) \quad \frac{Green - NIR}{Green + NIR}$$

که در تصاویر لندست ۸ و ۹ با استفاده از باندهای B3 (سبز) و NIR (B5) محاسبه شد.

شاخص اصلاح شده آب (MNDWI) که باند SWIR را جایگزین باند NIR می‌کند تا دقت تشخیص در مناطق شهری و دارای پوشش گیاهی افزایش یابد، با استفاده از معادله (۲) حاصل می‌شود:

$$(2) \quad MNDWI = \frac{Green - SWIR}{Green + SWIR}$$

که در این مطالعه با استفاده از باندهای B3 (سبز) و B6 (SWIR1) لندست محاسبه شد.

فرایند محاسبه این شاخص‌ها در محیط نرم افزار ArcGIS و SNAP انجام شد. در هر دو نرم افزار، ابتدا باندهای مورد نیاز فراخوانی و شاخص‌های NDWI و MNDWI با استفاده از ابزارهای محاسباتی مانند Raster Calculator در ArcGIS و Band Maths در SNAP تولید شدند. پس از تولید نقشه‌های شاخص، آستانه‌گذاری بر مبنای مقدار صفر انجام شد؛ به طوری که پیکسل‌هایی با مقدار شاخص بیشتر از صفر به عنوان نواحی آبی و مقادیر کمتر از صفر به عنوان خشکی طبقه‌بندی شدند.

در گام نهایی، برای استخراج مرز برداری (وکتوری) بین خشکی و آب، از ابزارهایی مانند Raster to Polygon, Reclassify (در ArcGIS) یا Mask Creation و Vectorization (در SNAP) استفاده شد. این روش امکان تفکیک دقیق مرزهای آبی را با دقت مکانی زیاد فراهم کرده و به عنوان مبنای تحلیل‌های بعدی استفاده شد.

خط ساحلی در طول زمان استوار است. نرخ‌های گزارش شده تغییرات خط ساحلی به متر، در هر سال به عنوان جابه‌جایی خط ساحلی در امتداد خطوط عرضی اعلام می‌شوند.

حرکت خط ساحلی خالص (NSM)

حرکت خط ساحلی خالص (NSM) فاصله بین قدیمی‌ترین و جوان‌ترین خطوط ساحلی برای هر محدوده (شکل ۲) است؛ بنابراین واحدها به متر هستند. اگر این فاصله توسط زمان گذشته بین دو اندازه‌گیری موقعیت خط ساحلی تقسیم شود، نتیجه نرخ نقطه پایانی است.

پوشش تغییر خط ساحلی (SCE)

پوشش تغییر خط ساحلی (SCE) یک فاصله (به متر) را گزارش می‌دهد، نه نرخ. مقدار SCE بیانگر بزرگ‌ترین فاصله بین تمام خطوط ساحلی است که یک محدوده داده شده را قطع می‌کنند (شکل ۲)؛ زیرا مجموع فاصله بین دو خط ساحلی علامتی ندارد، مقدار SCE همیشه مثبت است. در این پژوهش، یکی از روش‌های آماری مورد استفاده برای تحلیل تغییرات خط ساحلی، روش (Shoreline Change Envelope) SCE یا «پوشش تغییر خط ساحلی» بود. در این روش، بیشترین فاصله بین خطوط ساحلی ثبت شده در دوره‌های مختلف زمانی، در امتداد هر ترنسکت اندازه‌گیری می‌شود. این فاصله که همواره به صورت مقدار مثبت گزارش می‌شود، به عنوان شاخصی از نوسانات و دامنه تغییرات مکانی خط ساحلی در طول بازه زمانی مورد مطالعه استفاده می‌شود. ترنسکت‌ها به صورت عمود بر خط مبنا و با فواصل منظم رسم شدند و برای هر ترنسکت، بیشترین فاصله بین موقعیت‌های مختلف خط ساحلی طی سال‌های ۲۰۱۳ تا ۲۰۲۳ محاسبه شد.

نرخ نقطه پایانی (EPR)

نرخ نقطه پایانی (EPR) با تقسیم فاصله حرکت خط ساحلی بر زمان گذشته بین قدیمی‌ترین و جدیدترین خط ساحلی (شکل ۲) محاسبه می‌شود. مزایای اصلی EPR سادگی محاسبه و نیاز کم به تنها دو

تاریخ خط ساحلی است. معایب آن این است که در مواردی که داده‌های بیشتری در دسترس است، اطلاعات اضافی چشم‌پوشی می‌شوند. تغییرات در علامت (به عبارت دیگر، رشد به فرسایش)، مقدار یا روندهای چرخشی ممکن است از دست رفته باشند.

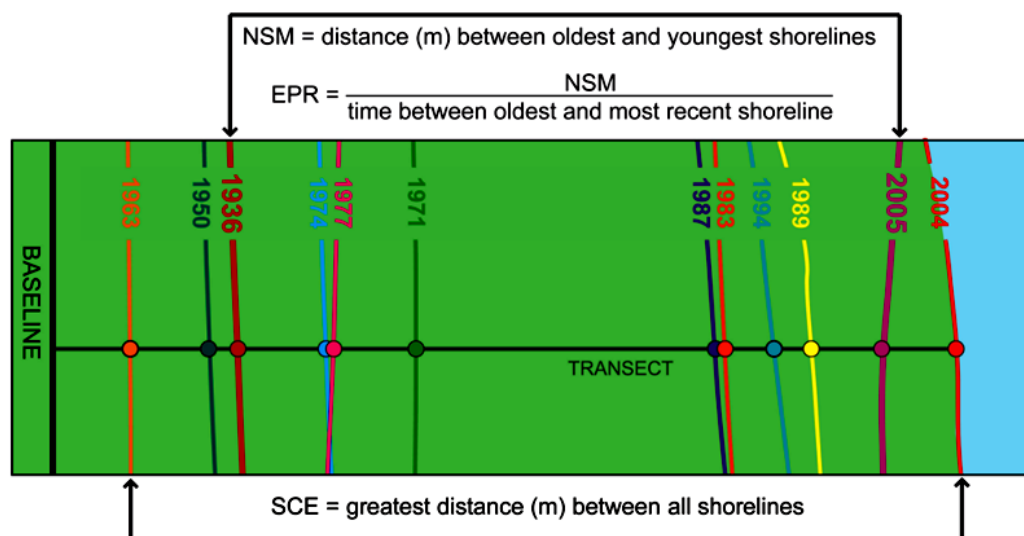
شکل ۲ سه مجموعه داده‌ای از خط ساحلی شامل خط مبنا، خطوط ترنسکت و خطوط ساحلی را با رنگ‌های مختلف نشان می‌دهد که برای تحلیل تغییرات ساحلی استفاده می‌شود. سه شاخص اصلی در این تحلیل عبارتند از: - حرکت خط ساحلی خالص (NSM): فاصله بین قدیمی‌ترین (۱۹۳۶) و جدیدترین خط ساحلی (۲۰۰۵) به متر در امتداد خطوط عرضی.

- نرخ نقطه پایانی (EPR): تقسیم فاصله NSM بر زمان ۶۹ سال. - پوشش تغییر خط ساحلی (SCE): بزرگ‌ترین فاصله بین خطوط ساحلی بدون توجه به تاریخ

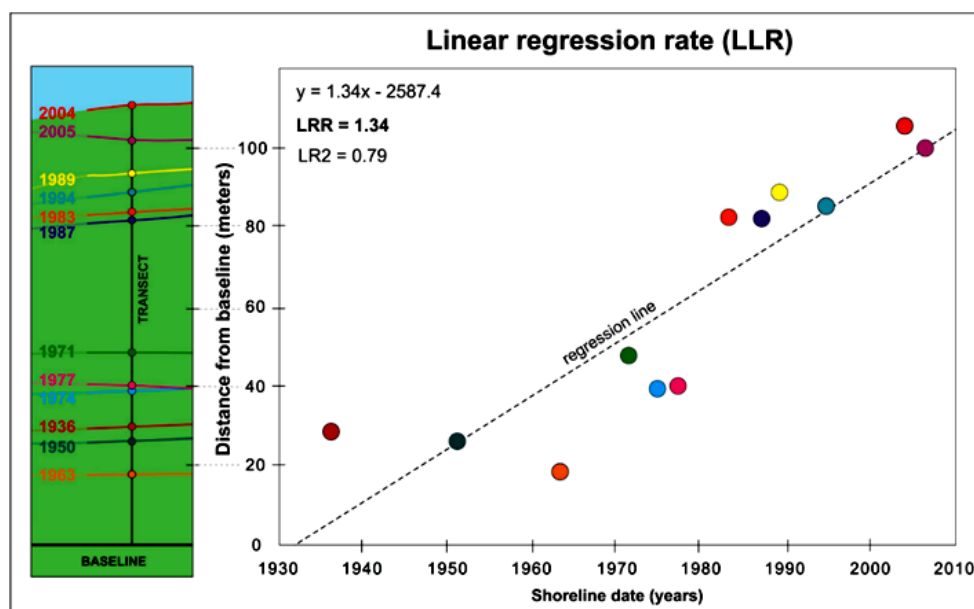
آهنگ تغییر وایزش خطی (LRR)

نرخ تغییر رگرسیون خطی از طریق تنظیم یک خط رگرسیون بر نقاط خط ساحلی در یک بازه مشخص تعیین می‌شود. این خط به گونه‌ای محاسبه می‌شود که جمع مربعات باقی‌مانده‌ها کمینه شود و شیب آن به عنوان نرخ تغییر ثبت شود. از ویژگی‌های روش رگرسیون خطی می‌توان به استفاده از تمام داده‌ها بدون در نظر گرفتن نوسانات، مبتنی بودن بر مفاهیم آماری معتبر، محاسبات کاملاً عددی و سهولت در اجرا اشاره کرد. با این حال، این روش به داده‌های پرت حساس بوده و معمولاً نرخ تغییر را کمتر از واقعیت برآورد می‌کند (۳).

یک مجموعه داده ساحلی (خط مبنا [سیاه]، خطوط عرضی ترنسکت [خاکستری] و خطوط ساحلی و تقاطع‌ها [چندرنگ]) برای توصیف ارتباط بین داده‌های زمانی و مکانی در نقشه، و همچنین به شکل گرافیکی به عنوان فاصله از خط مبنا در مقایسه با تاریخ خط ساحلی در شکل ۳ ارائه شده است. شکل ۴ ترنسکت‌های عمود بر Baseline به طول پانصد متر در فواصل صد متری را نشان می‌دهد. نرخ تغییر رگرسیون خطی (LRR) با



شکل ۲. مجموعه داده‌های خط ساحلی دریای خزر



شکل ۳. یک مجموعه داده ساحلی برای توصیف ارتباط بین داده‌های زمانی و مکانی

۲۰۱۳ تا ۲۰۲۳ نشان می‌دهد. در این بازه، تصاویر ماهواره‌ای مختلف، به ویژه لندست ۸ و سنتینل-۲، برای تحلیل تغییرات خط ساحلی به کار گرفته شدند. این تصاویر از طریق Google Earth Engine پردازش و تحلیل شدند.

برای افزایش دقت تحلیل‌ها، تصاویر ماهواره‌ای تحت تصحیحات هندسی و رادیومتریکی قرار گرفتند و باندهای مناسب مانند Near-Infrared و Shortwave Infrared برای

ترسیم موقعیت‌های تقاطع خط ساحلی (فاصله از خط مبنا) نسبت به زمان (سال) و محاسبه معادله رگرسیون خطی با مقدار $y = 1.34x - 2587.4$ تعیین شد. شیب معادله که خط را توصیف می‌کند، نرخ (۱/۳۴ متر در سال) است.

مقایسه تصاویر و اندازه‌گیری تغییرات

جدول ۱، زمان‌بندی ماهانه جمع‌آوری داده‌ها را بین سال‌های

جدول ۱. جزئیات تصاویر دریافت شده در ماه‌های مختلف از سال ۲۰۱۳ تا ۲۰۲۳

سال	ژانویه	فوریه	مارس	آوریل	می	ژوئن	جولای	اگوست	سپتامبر	اکتبر	نوامبر	دسامبر
۲۰۱۳	x	x	x	x	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓
۲۰۱۴	✓	✓	✓	x	✓	✓	✓	✓	x	✓	✓	✓
۲۰۱۵	✓	x	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓
۲۰۱۶	✓	✓	✓	✓	x	✓	✓	✓	✓	x	✓	✓
۲۰۱۷	✓	✓	✓	x	✓	✓	x	✓	✓	✓	✓	✓
۲۰۱۸	✓	✓	✓	x	✓	✓	✓	✓	✓	x	✓	✓
۲۰۱۹	✓	✓	x	✓	x	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓
۲۰۲۰	✓	✓	x	✓	✓	✓	✓	✓	✓	x	✓	✓
۲۰۲۱	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	x	x	✓
۲۰۲۲	✓	✓	x	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓
۲۰۲۳	x	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓

تحلیل تأثیر عوامل اقلیمی مانند بارش‌های فصلی و جریان آب رودخانه‌ها بر تغییرات خط ساحلی کمک کردند. همچنین داده‌های دبی رودخانه‌ها برای شبیه‌سازی جریان‌های آبی و بررسی اثر آن‌ها بر تغییرات سطح آب دریا و خط ساحلی استفاده شدند.

تحلیل الگوهای زمانی و مکانی: به کمک ترکیب داده‌های سنجش از دور، داده‌های میدانی و GIS، الگوهای زمانی و مکانی پستی خط ساحلی تحلیل شده و تأثیر عوامل اقلیمی و اقتصادی - اجتماعی بر تغییرات خط ساحلی ارزیابی شد. علاوه بر این، نقشه‌های احتمالی پستی بر اساس سناریوهای تغییرات اقلیمی مختلف تهیه شد که میزان پستی را در شرایط مختلف اقلیمی پیش‌بینی می‌کند.

برای محاسبه فاصله بین نقطه سوم و نقطه اول و به‌دست‌آوردن مقدار تقریبی پستی خط ساحلی تا سال ۲۰۵۰، مراحل زیر انجام می‌شود:

در ابتدا شیب (S) را با استفاده از تغییرات عمق و فاصله بین نقطه اول و نقطه دوم با استفاده از معادله (۳) محاسبه می‌کنیم:

$$(S) = \frac{\text{عمق نقطه دوم} - \text{عمق نقطه اول}}{\text{فاصله بین دو نقطه (200)}} = \frac{10-0}{200} = 0.05 \quad (3)$$

استخراج دقیق‌تر مرز خشکی و آب استفاده شد. استخراج خط ساحلی با استفاده از روش‌های مختلفی از جمله آستانه‌گذاری Otsu و افزونه DSAS در محیط ArcGIS انجام شد. این روش‌ها دقت نتایج را در ارزیابی تغییرات خط ساحلی و دینامیک مناطق ساحلی به‌طور قابل توجهی افزایش دادند.

استخراج خط ساحلی و تحلیل تغییرات: پس از زمین مرجع کردن تصاویر و اصلاحات لازم، خطوط ساحلی استخراج و تغییرات آنها با استفاده از برش‌های عرضی (Transects) که عمود بر خط مبنا بودند، ثبت شد. برای مقایسه خطوط ساحلی در زمان‌های مختلف، از اندازه‌گیری فاصله بین خطوط قدیمی‌تر و جدیدتر استفاده شد. اندازه‌گیری میزان پیشروی پستی خط ساحلی به‌صورت خودکار و با استفاده از معیار Net Shoreline Movement (NSM) انجام شد. این شاخص فاصله بین قدیمی‌ترین و جدیدترین موقعیت‌های ثبت‌شده خط ساحلی را اندازه‌گیری کرده و نرخ جابه‌جایی را به‌صورت میانگین سالانه محاسبه می‌کند.

داده‌های میدانی و ترکیبی: برای افزایش دقت تحلیل‌ها، داده‌های میدانی مانند بارش و دبی رودخانه‌ها نیز از ایستگاه‌های هواشناسی و منابع محلی جمع‌آوری شدند (جداول ۲، ۳ و ۴). این داده‌ها به

جدول ۲. میانگین بارندگی سالانه حوضه رود اورال، کورا و ولگا در بازه زمانی ۲۰۱۳ تا ۲۰۲۳

سال	مقدار بارندگی حوضه ولگا	مقدار بارندگی حوضه کورا	مقدار بارندگی حوضه اورال
۲۰۱۳	۱۰۰۰	۷۹۰	۴۴۰
۲۰۱۴	۷۱۳	۸۰۰	۴۶۰
۲۰۱۵	۹۷۱	۸۵۰	۴۵۵
۲۰۱۶	۹۱۸	۸۲۰	۴۲۰
۲۰۱۷	۹۸۸	۷۸۰	۴۴۵
۲۰۱۸	۷۵۵	۸۱۰	۴۴۵
۲۰۱۹	۹۸۲	۸۴۰	۴۵۰
۲۰۲۰	۸۸۹	۸۲۰	۴۲۵
۲۰۲۱	۸۸۹	۷۷۵	۴۳۵
۲۰۲۲	۹۷۷	۸۱۵	۴۵۰
۲۰۲۳	۹۱۶	۸۰۵	۴۴۵

جدول ۳. میانگین دمای سالانه در بخش‌های مختلف دریای خزر بر اساس نتایج sst از سال ۲۰۱۳ تا ۲۰۲۳

ردیف	سال	دما در حوضه جنوبی (درجه سلسیوس)	دما در حوضه میانی (درجه سلسیوس)	دما در حوضه شمالی (درجه سلسیوس)	دما در خلیج غزه بغازگل (درجه سلسیوس)
۱	۲۰۱۳	۱۹	۱۵	۱۲/۵	۱۷
۲	۲۰۱۴	۱۹/۵	۱۶/۵	۱۲/۵	۱۶/۵
۳	۲۰۱۵	۱۹/۵	۱۷	۱۴	۱۶/۵
۴	۲۰۱۶	۱۹/۵	۱۷	۱۵/۵	۱۷
۵	۲۰۱۷	۱۹/۶	۱۷	۱۴	۱۶/۵
۶	۲۰۱۸	۲۰	۱۷/۸	۱۴	۱۶/۵
۷	۲۰۱۹	۲۰	۱۷/۸	۱۵	۱۷
۸	۲۰۲۰	۲۰	۱۷/۸	۱۵	۱۷
۹	۲۰۲۱	۲۰/۱	۱۷/۸	۱۶	۱۷
۱۰	۲۰۲۲	۲۰/۲	۱۷/۸	۱۳/۳	۱۷
۱۱	۲۰۲۳	۲۰/۷	۱۷/۸	۱۶/۳	۱۷/۳

جدول ۴. میانگین تبخیر سالانه در بخش‌های مختلف دریای خزر از سال ۲۰۱۳ تا ۲۰۲۳

ردیف	سال	تبخیر در حوضه جنوبی (mm)	تبخیر در حوضه میانی (mm)	تبخیر در حوضه شمالی (mm)	تبخیر در خلیج غزه بغازگل (mm)
۱	۲۰۱۳	۳۷۰	۳۰۰	۲۰۰	۴۸۰
۲	۲۰۱۴	۳۲۰	۲۹۰	۲۰۰	۵۲۰
۳	۲۰۱۵	۳۵۰	۳۰۰	۲۵۰	۴۶۰
۴	۲۰۱۶	۳۳۰	۳۲۰	۲۵۰	۴۸۰
۵	۲۰۱۷	۳۵۰	۳۱۰	۲۵۰	۴۶۰
۶	۲۰۱۸	۳۷۰	۳۰۰	۳۰۰	۴۶۰
۷	۲۰۱۹	۳۵۰	۴۰۰	۳۰۰	۴۸۰
۸	۲۰۲۰	۳۵۰	۳۳۰	۳۰۰	۴۸۰
۹	۲۰۲۱	۳۵۰	۳۳۰	۳۰۰	۴۶۰
۱۰	۲۰۲۲	۳۶۰	۳۶۰	۳۰۰	۴۲۰
۱۱	۲۰۲۳	۳۵۰	۳۳۰	۳۰۰	۴۲۰

این شیب نشان‌دهنده تغییر عمق به‌ازای هر متر فاصله است. برای محاسبه فاصله نقطه سوم از نقطه اول که عمق آن ۲۳ متر است، از معادله شیب (معادله ۴) استفاده می‌کنیم. با استفاده از معادله شیب داریم:

$$(۴) \quad \text{متر} = \frac{\text{عمق تغییر}}{\text{شیب}} = \frac{23}{0.05} = 460$$

نتایج و بحث

بررسی و اندازه‌گیری جابه‌جایی خط ساحلی در سال‌های ۲۰۱۳ تا ۲۰۲۳

تحلیل تغییرات خط ساحلی در بازه زمانی ۲۰۱۳ تا ۲۰۲۳ نشان داد که الگوی جابه‌جایی در بیشتر سال‌ها نسبتاً پایدار بوده و تغییرات محدود به نوسانات جزئی بوده‌اند. با این حال، در برخی سال‌های خاص، مانند ۲۰۱۹ و ۲۰۲۲، تغییرات چشمگیری دیده شد. برای نمونه، در سال ۲۰۱۹، میانگین NSM حدود ۱۲/۵- متر محاسبه شد که بیانگر پیشروی قابل

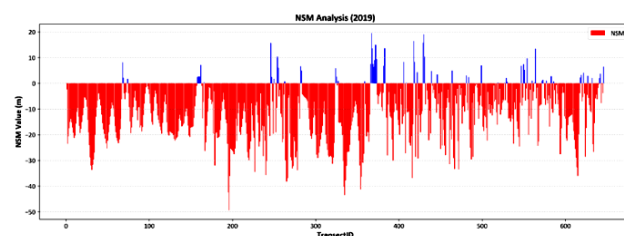
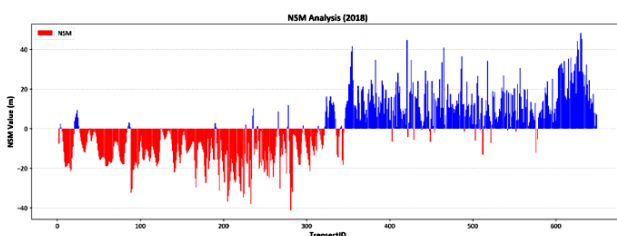
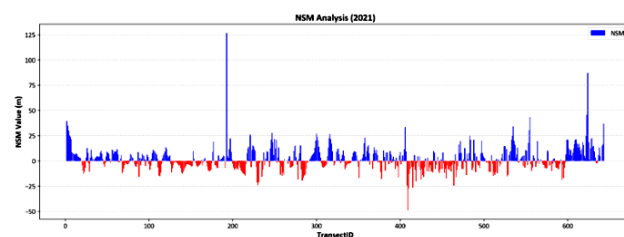
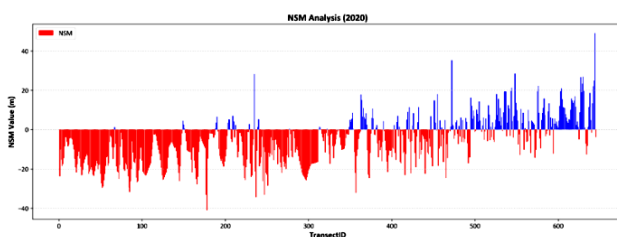
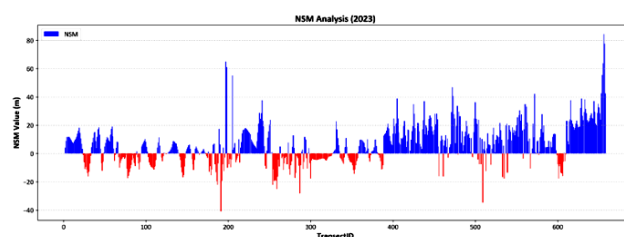
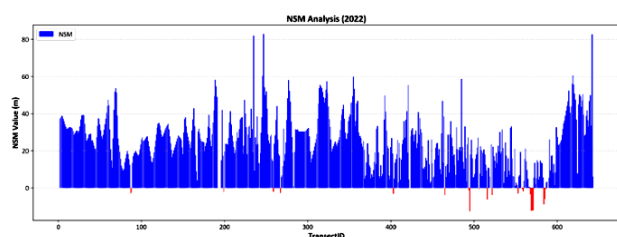
توجه خط ساحلی به سمت خشکی است. در مقابل، در سال ۲۰۲۲ میانگین NSM به حدود ۲۵ متر رسید که نشان‌دهنده پسروی شدید خط ساحلی است. در سایر سال‌ها، میزان جابجایی‌ها اندک بوده و نشان‌دهنده ثبات نسبی خط ساحلی است. همچنین، برخی عوامل موضعی مانند احداث اسکله، در بعضی از ترنسکت‌ها باعث ایجاد تغییرات محلی محسوس شده‌اند که گاهی بر میانگین سالانه نیز اثرگذار بوده‌اند. به‌منظور نمایش دقیق‌تر تغییرات، در شکل ۵ فاصله بین قدیمی‌ترین و جدیدترین خطوط در دو ترنسکت شاخص (یکی دارای پیشروی و دیگری دارای پسروی محسوس) ارائه شده است.

همچنین شکل ۶، جابه‌جایی بین دورترین خطوط ساحلی در ترنسکت‌های مختلف با توجه به روش SCE در سال‌های ۲۰۱۴ تا ۲۰۲۳ را نشان می‌دهد. نتایج حاصل از تحلیل SCE نشان داد که میانگین جابه‌جایی سالانه خط ساحلی در دوره‌های مختلف بین ۲۰ تا ۳۳ متر متغیر بوده است. این دامنه نشان‌دهنده نوسانات قابل توجه در موقعیت مکانی خط ساحلی

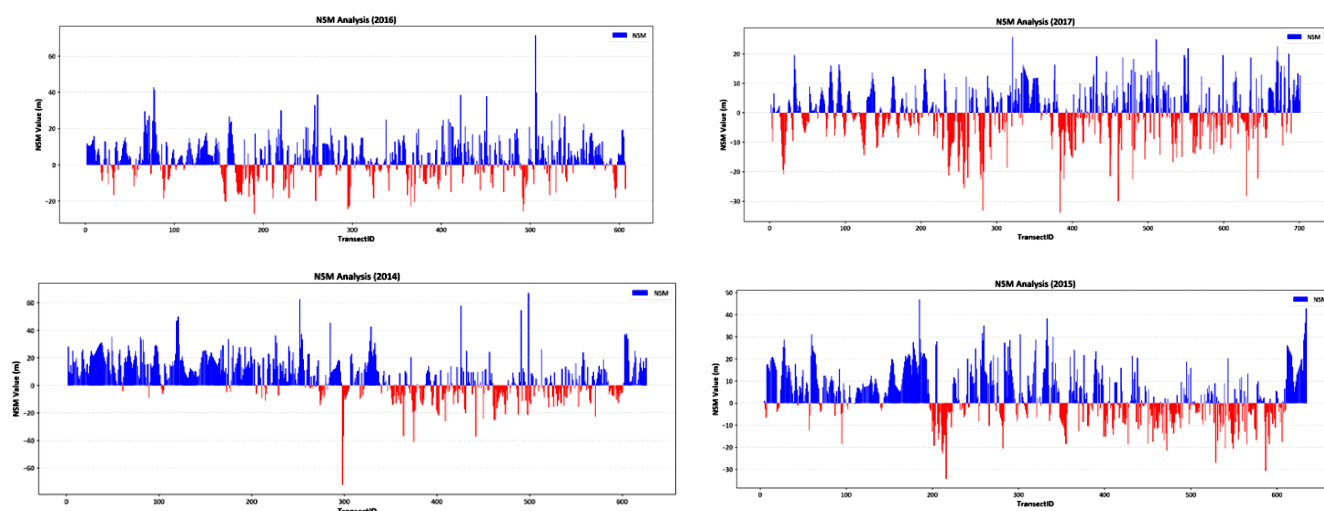


شکل ۴. ترنسکت‌های عمود بر Baseline به طول پانصد متر در فواصل صد متری

* جابه‌جایی خط ساحلی، افزایش تدریجی رنگ‌های مایل به آبی تا آبی پررنگ به‌ترتیب نشان‌دهنده افزایش مقدار پسروی خط ساحلی هستند و افزایش تدریجی رنگ‌های مایل به قرمز تا قرمز پررنگ به‌ترتیب نشان‌دهنده افزایش مقدار پیشروی خط ساحلی هستند.



شکل ۵. مقدار پیشروی و پسروی خط ساحلی در ترنسکت‌های مختلف با توجه به روش NSM در سال‌های ۲۰۱۳ تا ۲۰۲۳



شکل ۵. مقدار پیشروی و پسروی خط ساحلی در ترنسکت‌های مختلف با توجه به روش NSM در سال‌های ۲۰۱۳ تا ۲۰۲۳ (ادامه)

روش SCE کمک کرده تا الگوی مکانی تغییرات بهتر شناسایی شده و مناطقی که نیاز به مدیریت یا پایش بیشتری دارند، مشخص شوند.

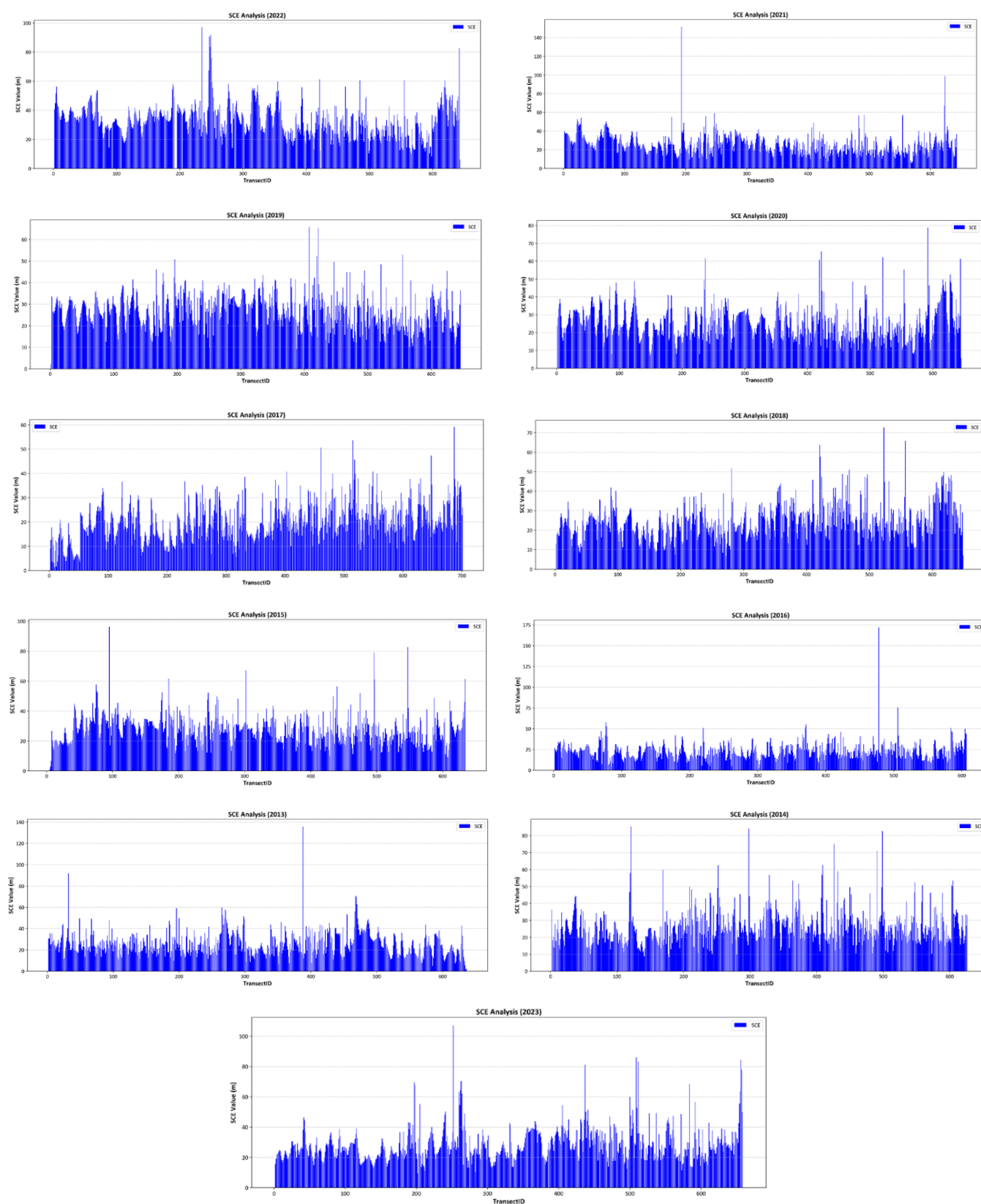
تراز آب دریای خزر در سال‌های اخیر روندی کاهشی را نشان داده است (شکل ۷). در سال ۲۰۱۳، تراز آب بین ۲۶/۵۸- متر (بیشینه) و ۲۷/۳۳- متر (کمینه) اندازه‌گیری شد که تغییرات آن قابل مشاهده است. در سال ۲۰۱۴، سطح آب در بیشترین حالت به ۲۷/۰۳- متر و در کمترین حالت به ۲۷/۶۰- متر رسید که روند کاهش نسبت به سال پیش را نشان می‌دهد. سال ۲۰۱۵ نیز با کاهش بیشتر، بیشینه تراز آب به ۲۷/۱۸- متر و کمینه آن به ۲۷/۷۵- متر رسید.

این کاهش ادامه یافت؛ به‌طوری که در سال ۲۰۱۶ سطح آب بین ۲۷/۱۲- متر و ۲۷/۷۴- متر متغیر بود و در سال ۲۰۱۷ این مقادیر به ۲۷/۲۱- متر و ۲۷/۷۱- متر کاهش یافت. در سال ۲۰۱۸، بیشترین و کمترین مقادیر به ترتیب ۲۷/۲۰- و ۲۷/۸۲- متر ثبت شد. روند کاهشی همچنان ادامه یافت و در سال ۲۰۱۹ تراز آب بین ۲۷/۰۴- متر و ۲۷/۹۲- متر متغیر بود. در سال ۲۰۲۰، مقادیر به ۲۷/۳۹- متر و ۲۷/۹۷- متر کاهش یافتند و در سال ۲۰۲۱ نیز این روند با مقادیر ۲۷/۷- متر و ۲۸/۳- متر ادامه یافت. در سال ۲۰۲۲، سطح آب دریای خزر بین ۲۷/۹۴- و

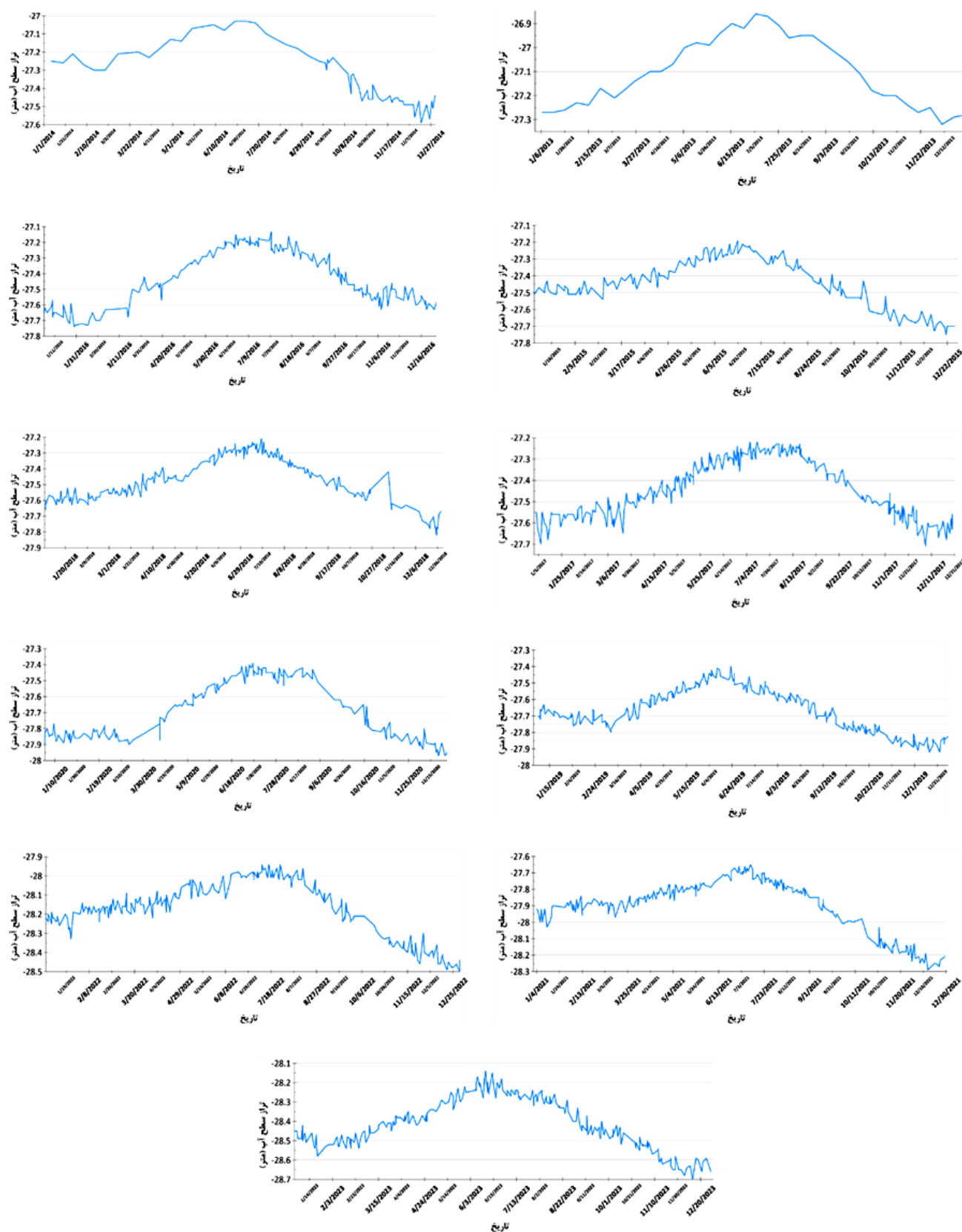
طی دهه گذشته است. تغییرات به‌طور یکنواخت در تمام مناطق دیده نشده‌اند؛ بلکه در برخی نواحی، دامنه جابه‌جایی بیشتر بوده که می‌تواند به عوامل متعددی نسبت داده شود.

در مناطقی که فعالیت‌های انسانی مانند احداث اسکله یا سازه‌های ساحلی وجود داشته، جابه‌جایی‌های چشمگیری ثبت شده است. این مداخلات می‌تواند باعث تمرکز یا تفرق رسوبات و در نتیجه تغییر در الگوی فرسایش یا رسوب‌گذاری شوند. عوامل محیطی مانند نوسانات سطح آب دریای خزر، بارش‌های فصلی و دبی رودخانه‌ها نیز تأثیر قابل توجهی در جابه‌جایی خط ساحلی داشته‌اند. به‌عنوان نمونه، در سال‌هایی با بارش زیاد یا دبی زیاد رودخانه‌ها، پیشروی خط ساحلی بیشتر بوده و در مقابل، در سال‌های خشک‌تر، پسروی بیشتری دیده شده است. همچنین در برخی دوره‌ها، با وجود ثبات نسبی شرایط اقلیمی، کاهش یا افزایش میانگین جابه‌جایی به دلیل پایداری یا ناپایداری موضعی بستر ساحلی دیده شده است.

به‌طور کلی، نتایج روش SCE بیانگر آن است که اگرچه خط ساحلی در بسیاری از مناطق دارای ثبات نسبی بوده، اما در برخی بخش‌ها به دلیل شرایط موضعی یا عوامل انسانی و طبیعی، نوسانات دامنه‌داری تجربه کرده است. استفاده از



شکل ۶. جابه‌جایی بین دورترین خطوط ساحلی در ترنسکت‌های مختلف با توجه به روش SCE در سال‌های ۲۰۱۴ تا ۲۰۲۳



شکل ۷. تغییرات تراز آب دریای خزر در سال‌های ۲۰۱۳ تا ۲۰۲۳ با توجه به داده‌های پایگاه Hydroweb

وجود داده‌های بیشتر، برخی اطلاعات مانند تغییرات علامت و روندهای چرخه‌ای نادیده گرفته می‌شوند. در این مطالعه، نرخ EPR بر اساس فاصله زمانی ۲۴ سال بین خطوط ساحلی سال‌های ۲۰۰۰ و ۲۰۲۳ محاسبه شد و در نمودار زیر نمایش داده شده است (شکل ۱۰).

با توجه به نتایج بررسی جابه‌جایی خط ساحلی در مناطق مختلف، بیشترین میزان جابه‌جایی و پسروی خط ساحلی در ترنسکت‌های ۶۰۰ به بعد که در منطقه بندر نوشهر هستند، دیده شد. مقدار پسروی خط ساحلی در این منطقه حدود ۲۱۰ متر یا بیشتر محاسبه شد که در شکل ۱۱ جزئیات خطوط ساحلی و میزان جابه‌جایی قابل مشاهده است. خط ساحلی سال ۲۰۰۰ به رنگ سبز پسته‌ای و خط ساحلی سال ۲۰۲۳ با رنگ آبی کمرنگ به صوت بولد شده در شکل قابل مشاهده هستند.

تغییرات تراز آب در طول ۲۴ سال

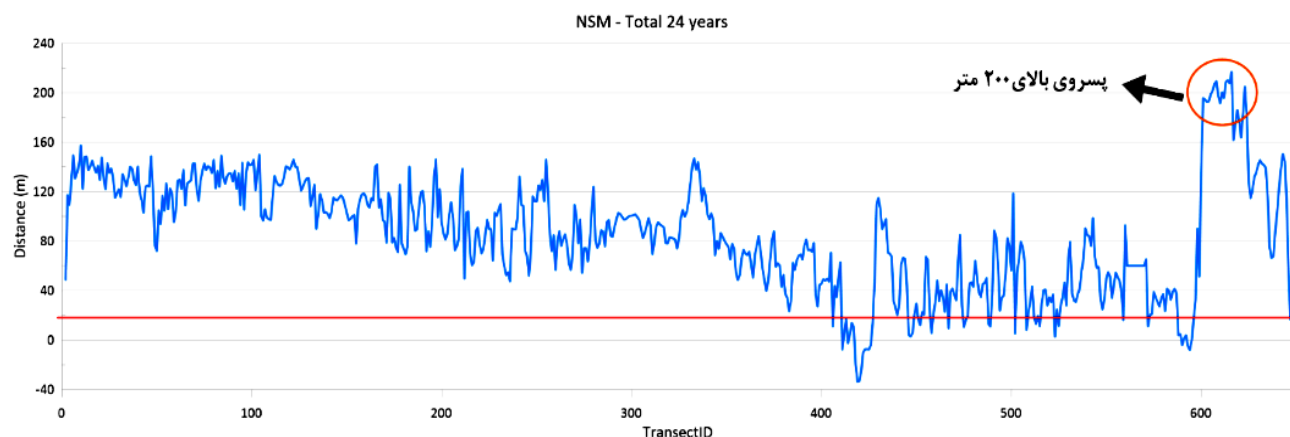
با توجه به ارتباط سطح تراز آب با جابه‌جایی‌های خط ساحلی، تغییرات تراز آب دریای خزر از ابتدای سال ۲۰۰۰ تا پایان سال ۲۰۲۳ ارزیابی شد. نتایج این ارزیابی، روند کاهشی تدریجی سطح آب دریای خزر طی این ۲۳ سال را نشان داد (شکل ۱۲). بررسی‌ها نشان داد که در این بازه زمانی، بیشترین سطح تراز آب در سال ۲۰۰۵ با مقدار ۲۶/۲۳- متر و کمترین سطح آن برابر با ۲۸/۷- متر بوده است؛ به این ترتیب، افتی حدود ۲/۵ متر در تراز آب دریای خزر دیده شد. کاهش تراز آب دریای خزر طبیعتاً به پسروی خط ساحلی منجر می‌شود که این امر می‌تواند مشکلاتی را به همراه داشته باشد. نتایج این پژوهش نشان داد که بیشترین میزان عقب‌نشینی خط ساحلی در بخش غربی اسکله اصلی شهر نوشهر رخ داده است (شکل ۱۳). نوسانات سالانه تراز آب دریای خزر معمولاً دارای مقادیر بیشینه و کمینه هستند؛ به‌طوری که بیشینه تراز آب بیشتر در ماه‌های میانی سال (حدود ماه ششم) و کمینه آن در حوالی ماه دوازدهم رخ می‌دهد.

۲۸/۵- متر اندازه‌گیری شد و درنهایت در سال ۲۰۲۳، تراز آب به بیشترین و کمترین مقادیر ۲۸/۱۴- و ۲۸/۷- متر رسید که همچنان بیانگر ادامه کاهش نسبت به سال‌های قبل است.

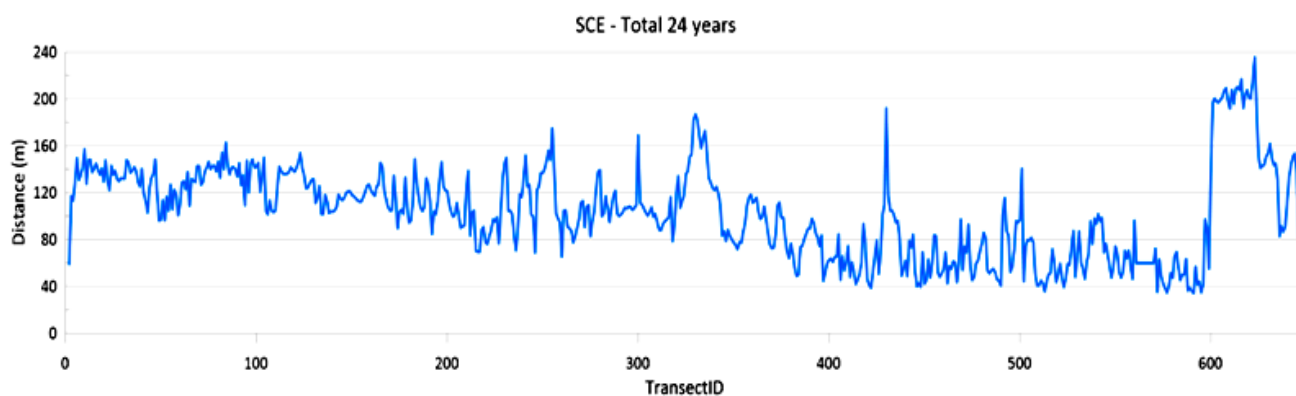
بررسی و اندازه‌گیری جابه‌جایی خط ساحلی در مجموع

۲۴ سال

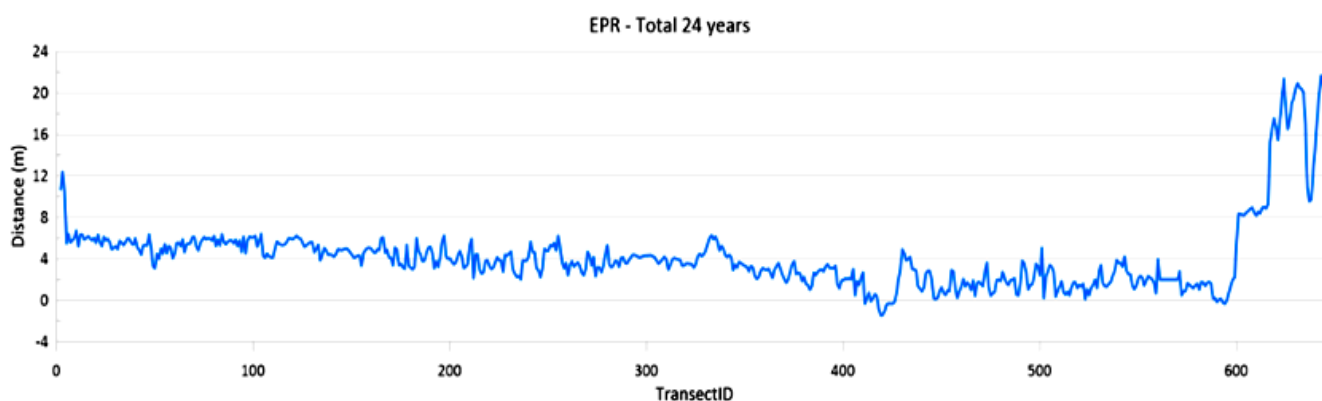
در این مطالعه داده‌های ۲۴ ساله مربوط به جابه‌جایی خط ساحلی بررسی شد و نتایج در سه نمودار (NSM) تغییر خالص خط ساحلی، (SCE) محدوده تغییر خط ساحلی و (EPR) نرخ نقطه پایانی ارائه شدند. NSM یا تغییر خالص خط ساحلی، میزان تغییرات خط ساحلی را بین قدیمی‌ترین و جدیدترین موقعیت آن، به متر، نشان می‌دهد و به تحلیل میزان پیشروی یا پسروی خط ساحلی در این بازه زمانی کمک می‌کند. با حذف داده‌های پرت و محاسبه میانگین پیشروی و پسروی در تمام ترنسکت‌های رسم‌شده، می‌توان وضعیت کلی پیشروی یا پسروی را به‌دست آورد. مقادیر مثبت نشان‌دهنده پسروی و مقادیر منفی نشان‌دهنده پیشروی هستند. در این مطالعه، میانگین NSM در طول ۲۴ سال، حدود ۸۶ متر پسروی نشان داده که این مقدار در برخی مناطق مانند اطراف بندر نوشهر بیش از ۲۰۰ متر بوده و در برخی دیگر از مناطق نیز پسروی از ۱۰۰ متر فراتر رفته است (شکل ۸). در روش SCE، جابه‌جایی خط ساحلی به‌عنوان بیشترین فاصله بین تمامی خطوط ساحلی که از یک ترانسکت خاص عبور می‌کنند، محاسبه می‌شود. از آنجا که فاصله‌ها بدون علامت هستند، مقدار SCE همیشه مثبت است و نشان‌دهنده بیشترین دامنه جابه‌جایی در طول سال‌هاست. میانگین جابه‌جایی خط ساحلی با این روش طی ۲۴ سال حدود ۱۰۳ متر بوده که نشان‌دهنده نوسانات قابل‌توجه است (شکل ۹). در روش ERP، نرخ نقطه پایانی، جابه‌جایی خط ساحلی از طریق تقسیم فاصله کل حرکت خط ساحلی بر بازه زمانی بین قدیمی‌ترین و جدیدترین خط محاسبه می‌شود. این روش به‌دلیل سهولت محاسبه و نیاز به تنها دو تاریخ کاربردی است؛ اما در صورت



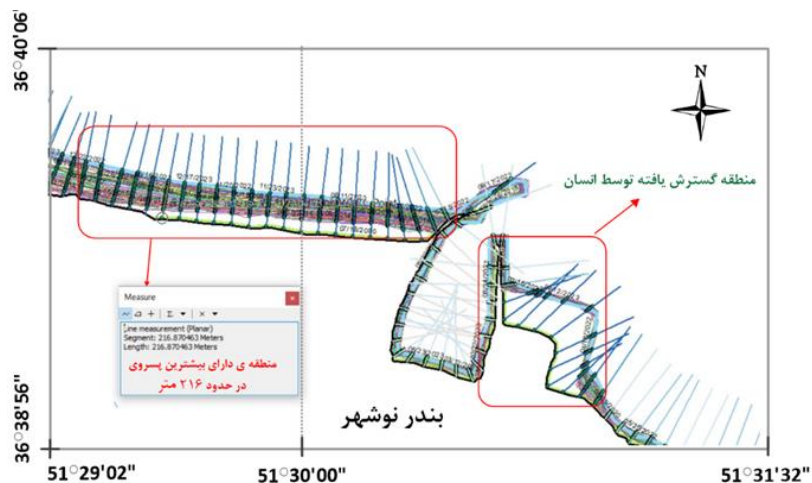
شکل ۸. مقدار پیشروی و پسروی خط ساحلی در ترنسکتهای مختلف با توجه به روش NSM در مجموع ۲۴ سال



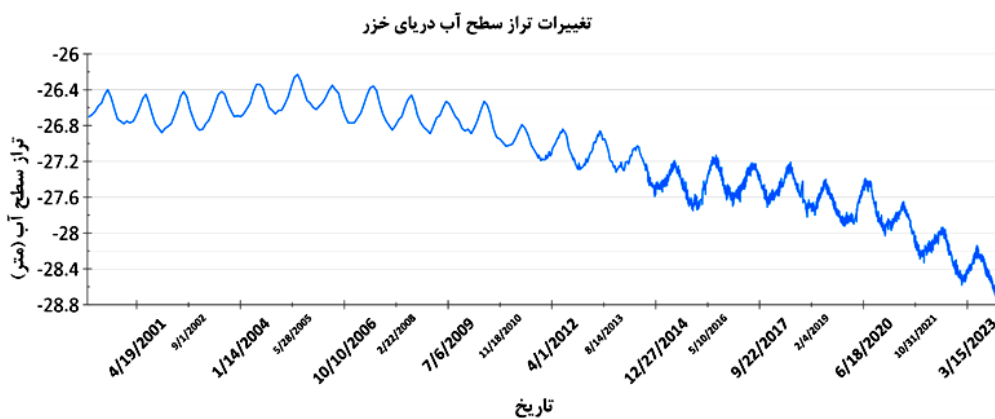
شکل ۹. مقدار جابه‌جایی بین دورترین خطوط ساحلی در ترنسکتهای مختلف با توجه به روش SCE در مجموع ۲۴ سال



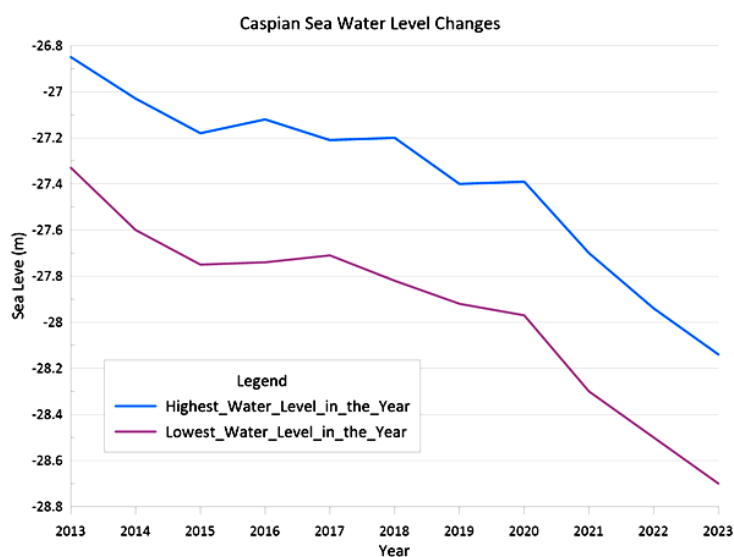
شکل ۱۰. مقدار نرخ نقطه پایانی حاصل از تقسیم مقادیر NSM بر اختلاف بین قدیمی‌ترین و جدیدترین خطوط ساحلی در ترنسکتهای مختلف با توجه به روش EPR در مجموع ۲۴ سال



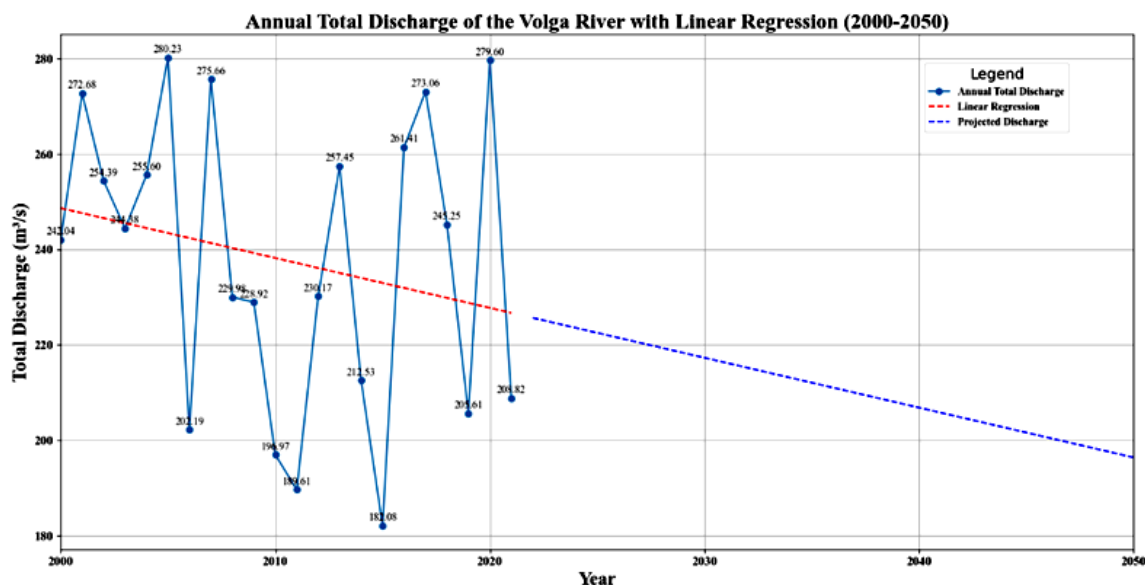
شکل ۱۱. خطوط ساحلی در ماه‌ها و سال‌های مختلف و تغییرات و جابه‌جایی خط ساحلی در قسمت غربی و شرقی بندر نوشهر در طول ۲۴ سال



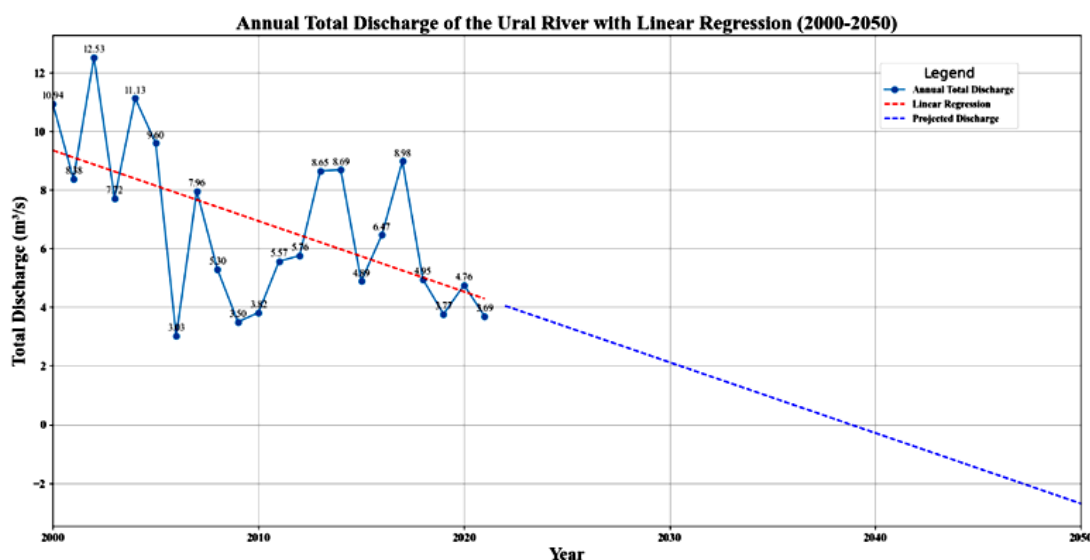
شکل ۱۲. تغییرات تراز آب دریای خزر از سال ۲۰۰۰ تا ۲۰۲۳



شکل ۱۳. روند کاهشی تراز آب دریای خزر از سال ۲۰۱۳ تا انتهای سال ۲۰۲۳ در دو حالت بیشینه و کمینه تراز آب در هر سال



شکل ۱۴. میانگین سالانه روند تغییرات حجم ورودی رودخانه ولگا از سال ۲۰۰۰ تا ۲۰۲۱ و پیشبینی ادامه روند تا سال ۲۰۵۰



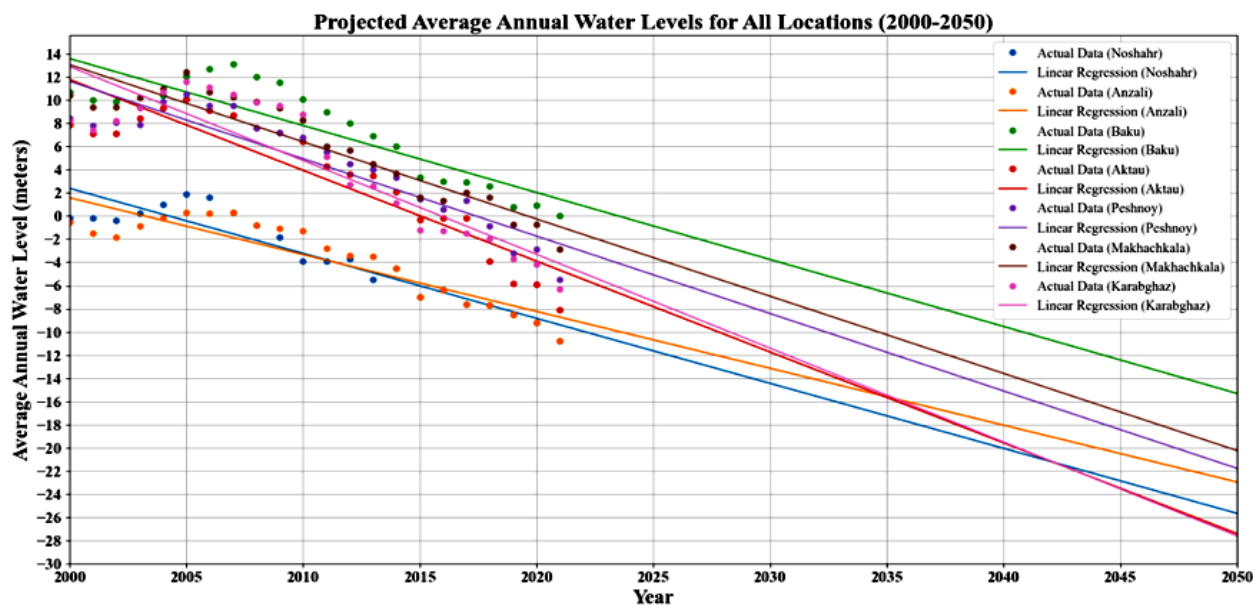
شکل ۱۵. میانگین سالانه تغییرات حجم ورودی رودخانه اورال از سال ۲۰۰۰ تا ۲۰۲۱ و پیشبینی ادامه روند تا سال ۲۰۵۰

رودخانه‌ها به دریای خزر را از سال ۲۰۰۰ تا ۲۰۲۱ نشان می‌دهد. در صورتی که شرایط اقلیمی بدون تغییر خاصی ادامه یابد و الگوی کاهشی فعلی ثابت بماند، پیش‌بینی می‌شود که تا سال ۲۰۵۰ میزان ورودی این رودخانه‌ها به سطحی کمی بیش از نصف مقدار حداقلی ثبت‌شده در سال ۲۰۲۱ کاهش یابد.

بررسی تغییرات تراز آب دریای خزر در نقاط مختلف، مطابق شکل ۱۶، نشان‌دهنده روندی یکنواخت در کاهش تراز آب در تمامی

همبستگی بین ورودی رودخانه‌های اورال و ولگا و سطح آب

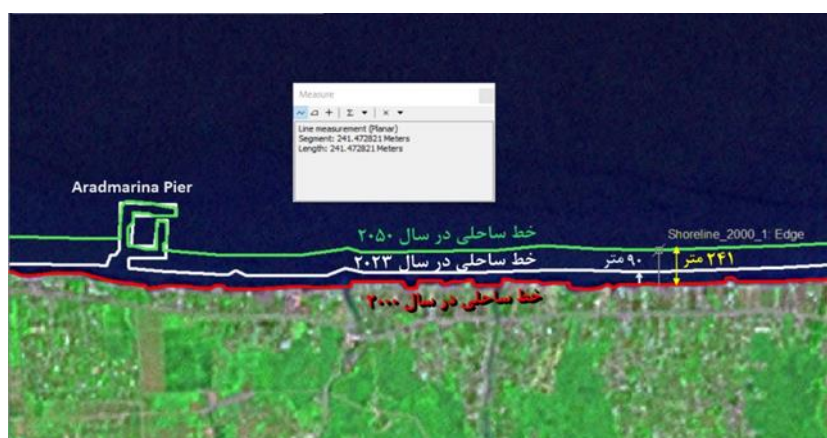
در مناطق آکاتو، قره‌بغاز، ماخاج‌قلعه، پشنو و نوشهر، افزایش ورودی رودخانه‌ها تأثیر مستقیمی بر افزایش سطح آب دریای خزر دارد. در شکل‌های ۱۴ و ۱۵، به‌ترتیب میانگین سالانه ورودی رودخانه‌های ولگا و اورال به تصویر کشیده شده است. نتایج حاصل از تحلیل رگرسیون خطی، روند کاهشی در میزان ورودی این



شکل ۱۶. میانگین سالانه روند سطح تراز آب دریای خزر از سال ۲۰۰۰ تا ۲۰۲۱ و پیش‌بینی ادامه روند تا سال ۲۰۵۰



شکل ۱۷. پیش‌بینی مقدار پسروی خط ساحلی تا سال ۲۰۵۰ در اطراف بندر نوشهر



شکل ۱۸. پیش‌بینی مقدار پسروی خط ساحلی تا سال ۲۰۵۰ در سایر نقاط مابین نور تا نوشهر

خط ساحلی تا نقطه‌ای با عمق ۲۳ متر به حدود ۴۶۰ متر رسیده است. این مقدار نشان‌دهنده بیشترین نرخ عقب‌نشینی در منطقه بوده و تهدیدی جدی برای زیرساخت‌هایی چون اسکله بندر نوشهر به شمار می‌رود. در دیگر نواحی، به‌ویژه بین شهرهای نور و نوشهر، این فاصله در حال حاضر به‌طور میانگین حدود ۲۶۰ متر است.

بر اساس داده‌های ایستگاه‌های ساحلی و بررسی نقشه‌های سری زمانی تغییرات خط ساحلی، اگر روند فعلی فرسایش ادامه یابد، پیش‌بینی می‌شود که تا سال ۲۰۵۰، پسروری در برخی نقاط به حدود ۴۲۴ متر برسد. همچنین در یک نمونه‌گیری تصادفی از نقشه پسروری، مقدار پیش‌بینی شده برای سال ۲۰۵۰ در یکی از نقاط به ۲۴۱ متر رسید که نشان‌دهنده تأثیر شدید این پدیده بر تأسیسات ساحلی مانند اسکله تجاری مجتمع "آرادمینا" است.

داده‌های پایگاه Hydroweb نیز با ثبت میانگین کاهش عمق حدود ۳.۵ متر تا سال ۲۰۲۳، پسروری‌هایی در حدود ۴۰۰ متر در بندر نوشهر و ۲۳۰ متر بین نور و نوشهر را گزارش کرده‌اند که این نتایج همسو با یافته‌های Caspcom هستند. در مجموع، این تحلیل‌ها تأکید می‌کنند که در صورت تداوم شرایط فعلی، عقب‌نشینی قابل‌توجهی در خط ساحلی منطقه رخ خواهد داد و لزوم تدوین و اجرای اقدامات مدیریتی و حفاظتی جهت کاهش آسیب‌های ناشی از این پدیده ضروری است. شکل ۱۷، پیش‌بینی مقدار پسروری خط ساحلی تا سال ۲۰۵۰ در اطراف بندر نوشهر و شکل ۱۸، پیش‌بینی مقدار پسروری خط ساحلی تا سال ۲۰۵۰ در سایر نقاط مابین نور تا نوشهر را نشان می‌دهد.

برای کاهش آسیب‌پذیری مناطق ساحلی در برابر تغییرات اقلیمی و پسروری خط ساحلی، ضرورت اقدامات سیاستی جدی احساس می‌شود. راهکارهای مؤثر در این زمینه شامل مدیریت استفاده از سواحل با وضع محدودیت‌های ساخت‌وساز، توسعه زیرساخت‌های مقاوم مانند دیوارهای حفاظتی و برنامه‌ریزی شهری مبتنی بر پیش‌بینی تغییرات خطوط ساحلی است. همچنین، ترویج استفاده از انرژی‌های تجدیدپذیر و توسعه

این مناطق است. از سال ۲۰۰۰ تا ۲۰۲۱، سطح تراز آب در تمامی نقاط مورد مطالعه حدود ۱۰ متر کاهش یافته است. در صورت تداوم این روند بدون تغییر، پیش‌بینی می‌شود که تا سال ۲۰۵۰، تراز آب نسبت به سال ۲۰۲۱ حدود ۱۳ متر دیگر کاهش یابد. چنین کاهش می‌تواند موجب پسروری بسیار بیشتری در خط ساحلی نسبت به وضعیت کنونی شود.

نقشه احتمالاتی میزان پسروری خط ساحلی تا سال ۲۰۵۰

به‌منظور برآورد میزان پسروری خط ساحلی تا سال ۲۰۵۰، از داده‌های اندازه‌گیری شده از سال ۲۰۰۰ تا ۲۰۲۳ استفاده شده است. در این تخمین، فرض بر آن است که عمق بستر دریایی در یک ترنسکت مشخص در نزدیکی ساحل به‌طور یکنواخت افزایش یابد که این روند در سواحل شنی متداول است.

در محاسبات، نقطه اول خط ساحلی با عمق صفر در سال ۲۰۰۰ در نظر گرفته شده و نقطه دوم، با عمق ۱۰ متر، نشان‌دهنده پسروری حدود ۲۰۰ متری خط ساحلی تا سال ۲۰۲۳ است. با فرض ادامه‌ی این روند، نقطه سوم با عمق تقریبی ۲۳ متر تا سال ۲۰۵۰ پیش‌بینی شده است. محاسبه فاصله بین نقاط اول و سوم بر اساس شیب میانگین دریا (معادله ۳ و ۴) نشان می‌دهد که فاصله این نقاط به حدود ۴۶۰ متر می‌رسد که بیشترین میزان پسروری را در اطراف بندر نوشهر نشان می‌دهد. این مقدار در سایر نقاط دریای خزر با میانگین حدود ۲۶۰ متر کمتر است.

بر اساس محاسبات انجام‌شده، مشخص شد که در صورت تداوم روند فعلی فرسایش، خط ساحلی تا سال ۲۰۵۰ می‌تواند حدود ۴۶۰ متر پسروری داشته باشد. این مقدار بیانگر عقب‌نشینی قابل‌توجه خط ساحلی در منطقه مورد مطالعه است و لزوم اقدامات مدیریتی و حفاظتی برای کاهش اثرات ناشی از فرسایش ساحلی را برجسته می‌کند.

بر اساس داده‌های پایگاه‌های Caspcom و Hydroweb، بیشترین میزان پسروری خط ساحلی در اطراف بندر نوشهر دیده شده است؛ به‌گونه‌ای که در برخی نقاط، فاصله موقعیت فعلی

روند کلی کاهش سطح آب، پسروری خط ساحلی را به همراه داشته و مساحت قابل توجهی از بستر دریا به خشکی تبدیل شده است. این نتایج با یافته‌های لرستانی و همکاران (۱۳) که در مصب رودخانه هراز تغییرات مشابهی را گزارش کرده‌اند، همخوانی دارد. همچنین، عمونیا و همکاران (۱) تأکید کرده‌اند که فعالیت‌های انسانی در کنار نوسانات سطح آب بر تغییرات خط ساحلی تأثیرگذار بوده‌اند. موضوعی که در این مطالعه نیز شواهدی از آن دیده شد؛ به ویژه در مناطقی که توسعه شهری یا فعالیت‌های اقتصادی ساحلی در حال گسترش بوده‌اند.

مطالعه حاضر نیز مانند پژوهش صفری و همکاران (۱۵) اهمیت سنجش از دور را در پایش و تحلیل تغییرات محیطی به خوبی نشان داد. استفاده از تصاویر ماهواره‌ای لندست ۸ همراه با ابزارهای تحلیل جغرافیایی امکان بررسی دقیق‌تر و گسترده‌تر تغییرات مکانی و زمانی خط ساحلی را فراهم کرد. در مقایسه با نتایج ثروتی و همکاران (۱۷) که پسروری خط ساحلی را در کرانه‌های جنوب شرقی خزر گزارش کرده‌اند، یافته‌های این پژوهش حاکی از آن است که در بخش‌هایی از سواحل جنوبی، پسروری غالب بوده است که ممکن است ناشی از تفاوت‌های منطقه‌ای در شرایط توپوگرافی، هیدرولوژیکی و انسانی باشد.

با توجه به نتایج به‌دست‌آمده، لازم است اقدامات مدیریتی مؤثر به‌منظور سازگاری با تغییرات سطح آب و جابه‌جایی خط ساحلی در دستور کار قرار گیرد. استفاده از مدل‌های پیش‌بینی مبتنی بر داده‌های ماهواره‌ای، تحلیل‌های سناریویی برای آینده و ترکیب اطلاعات مکانی با سیاست‌های کاربری زمین می‌تواند در برنامه‌ریزی بلندمدت نواحی ساحلی بسیار مفید باشد. همچنین، پایش مستمر با استفاده از داده‌های سنجش از دور می‌تواند به‌عنوان ابزاری مؤثر برای مدیریت ریسک و آمادگی در برابر اثرهای ناشی از تغییرات اقلیمی استفاده شود. پژوهش‌های آینده می‌توانند با تمرکز بر مدل‌سازی عددی همراه با داده‌های میدانی و تحلیل دقیق‌تر نقش فعالیت‌های انسانی، درک بهتری از تعاملات بین مؤلفه‌های محیطی و انسانی در تغییرات ساحلی دریای خزر ارائه دهند.

اکوتوریسم می‌تواند هم در حفاظت از محیط‌زیست و هم در ایجاد فرصت‌های اقتصادی پایدار مؤثر باشد. به‌علاوه، ایجاد سامانه‌های هشدار زودهنگام برای حوادث طبیعی، سرمایه‌گذاری در پژوهش‌های جدید و آموزش جامعه درباره تغییرات اقلیمی می‌تواند آگاهی و مشارکت اجتماعی را ارتقا دهد. اجرای همزمان این راهکارها، گامی مهم در مدیریت خط ساحلی و کاهش آسیب‌پذیری آن در برابر تغییرات اقلیمی خواهد بود.

نتیجه‌گیری و پیشنهادها

یکی از مهم‌ترین جنبه‌های این پژوهش، بررسی پسروری خط ساحلی با استفاده از تصاویر ماهواره‌ای از سال ۲۰۰۰ تا ۲۰۲۳ بوده است. تصاویر ماهواره‌ای به‌عنوان ابزاری دقیق و مؤثر برای رصد تغییرات خط ساحلی و تحلیل تأثیرات اقلیمی استفاده شدند. نتایج حاصل از تحلیل این تصاویر نشان داد که پسروری خط ساحلی در بسیاری از مناطق دریای خزر به‌طور مداوم افزایش یافته است؛ به‌ویژه در اطراف بندر نوشهر که بیشترین پسروری در حدود ۲۱۶ متر تا سال ۲۰۲۳ ارزیابی شد و میانگین پسروری در حد فاصل بین نور و نوشهر حدود ۹۰ متر محاسبه شد. این تغییرات به وضوح نشان‌دهنده تأثیرات تغییرات اقلیمی و الگوهای بارش و تبخیر بر تراز آب دریا هستند. درنهایت، با توجه به تحلیل‌های آماری و روندهای مشاهده شده، پیش‌بینی شد که میزان پسروری خط ساحلی تا سال ۲۰۵۰ به‌طور قابل توجهی افزایش خواهد یافت و ممکن است برخی مناطق ساحلی از جمله بندر نوشهر و اسکله‌های کوچک‌تر در سایر نقاط به شدت تحت تأثیر قرار گیرند. این نتایج نشان می‌دهد که مدیریت بهینه منابع آبی و کاهش انتشار گازهای گلخانه‌ای ضروری است تا از اثرهای منفی تغییرات اقلیمی بر منطقه دریای خزر جلوگیری شود.

نتایج این پژوهش نشان داد که نوسانات سطح آب دریای خزر طی دو دهه اخیر (۲۰۰۰ تا ۲۰۲۱) منجر به تغییرات قابل توجهی در موقعیت خط ساحلی در سواحل جنوبی این دریا شده است.

References

منابع مورد استفاده

1. Amounia, H., S. Shayan and M. Yamani. 2021. Analysis of the impact of coastal changes of the Caspian Sea related to land-use changes, Case study: Babolrud coastal line. *Hydrogeomorphology* 8(26): 61–78 (in Farsi).
2. Ataei S., M. Ajami, A. Lashteh Neshaei and H. Yasoubi. 2016. The impact of sea level fluctuations on the coastal line changes of the Caspian Sea. *Marine Engineering Research Journal* 12(24): 103–113 (in Farsi).
3. Bird, E. 2008. Coastal Geomorphology: An Introduction. John Wiley & Sons Ltd, Chichester.
4. Cowart, L., D. R. Corbett and J. P. Walsh. 2011. Shoreline change along. *Remote Sensing* 3(7): 1516–1534.
5. Crowell, M., B. C. Douglas and S. P. Leatherman. 1997. On forecasting future U.S. shoreline positions—A test of algorithms. *Journal of Coastal Research* 13(4): 1245–1255.
6. Dolan, R., M. S. Fenster and S. J. Holme. 1991. Temporal analysis of shoreline recession and accretion. *Journal of Coastal Research* 7(3): 723–744.
7. Eghtesadi Shahid, R. and R. Zahedi. 2012. Study of factors influencing water level fluctuations in the southern Caspian Sea. *Journal of Marine Sciences and Technology* 10(3): 4–13 (in Farsi).
8. Genz, A. S., CH. Fletcher, R. A. Dunn, L. N. Frazer and J. J. Rooney. 2007. The predictive accuracy of shoreline change rate methods and alongshore beach variation on Maui, Hawaii. *Journal of Coastal Research* 23(1): 87–105.
9. Goharnejad, H., A. Shamsai and S. A. Hosseini. 2013. Vulnerability assessment of southern coastal areas of Iran to sea level rise: evaluation of climate change impact. *Oceanologia* 55(3): 611–637.
10. Haghani, S., S. A. G. Leroy, F. Wesselingh and N. Rose. 2016. Rapid evolution of coastal lagoons in response to human interference under rapid sea level change: A south Caspian Sea case study. *Quaternary International* 408: 93–112.
11. Kazenci, N., T. Gulbabazadeh, S. A. G. Leroy and O. Ileri. 2004. Sedimentary and environmental characteristics of the Gilan–Mazenderan plain, northern Iran: influence of long- and short-term Caspian water level fluctuations on geomorphology. *Journal of Marine Systems* 46: 145–168.
12. Kosarev, A. N. 2005. Physico-Geographical Conditions of the Caspian Sea. PP. 5-31. In: A. G. Kostianoy and A. N. Kosarev (Eds.), *The Caspian Sea Environment*, Springer, Heidelberg.
13. Loristani, Q., R. Esmaili and F. Ettehadi. 2015. Analysis of coastal line changes of the Caspian Sea at river mouths (Case study: Haraz, Babolrud, and Talar river mouths). *Journal of Spatial Planning* 5(18): 123–136 (in Farsi).
14. Panin, G. N. 2007. Caspian Sea Level Fluctuations as a consequence of regional Climatic Change. PP. 216-219. In: J. L. Lozán, H. Grassl, P. Hupfer, L. Menzel and C.-D. Schönwiese (Eds.), *Global Change: Enough water for all?*, Wissenschaftliche Auswertungen, Humburg.
15. Safari, A., M. Sharifi and S. Zarei. 2015. Assessment of methods for calculating gravity anomalies in the sea using satellite altimetry observations in the Oman Sea. *Journal of Geospatial Engineering and Mapping* 5(2): 19–26 (in Farsi).
16. Sharifi Kia, M., V. Shayyan and A. Maisa. 2017. Determining the dynamic changes of the eastern Caspian Sea coastline using multi-temporal/multi-sensor data. *Spatial Planning and Development* 21(4): 122-139 (in Farsi).
17. Servati, M., R. Mansouri, M. Ghaerodi and A. Naeimi. 2017. Study of coastal line changes of the southeastern Caspian Sea during 1987-2015. *Quantitative Geomorphology Research* 6(2): 15–28 (in Farsi).
18. Thoai, D. T., A. N. Dang and N. T. K. Oanh. 2019. Analysis of coastline change in relation to meteorological conditions and human activities in Ca Mau cape, Viet Nam. *Ocean and Coastal Management* 171(1): 56–65.
19. Van Be, T., T. Van Binh, N. Binh, T. Q. Tuan, H. Nghia and B. M. Hien. 2011. Current status of hematopoietic stem cell transplantations in Vietnam. *Bone Marrow Transplant* 42(1): 146–148.