



Analysis of Eustatic and Geostatic Changes in the Stability of the Caspian Coastal Plain (Case Study: Chalus coastal region)

Mohammad Fathollahzadeh¹, Mojtaba Yamani^{2*}, Abolghasem Goorabi³,

Mehran Maghsoudi⁴, Mehrnoosh Ghadimi⁵

¹ PhD Student in Geomorphology, Faculty of Geography, University of Tehran, Tehran, Iran

^{2, 4} Professor in Geomorphology, Faculty of Geography, University of Tehran, Tehran, Iran

^{3, 5} Associate Professor in Geomorphology, Faculty of Geography, University of Tehran, Iran

ARTICLE INFO

Article History:

Received: 12 July 2024

Revised: 02 November

Accepted: 04 December 2024

Available Online: 21 March 2025

Keywords:

Caspian sea Coastal Plain

Eustatic Sea Level Changes

Geostatic Land Deformation

Radar Interferometry (InSAR)

ABSTRACT

A series of large-scale and long-term environmental processes, including seismic events, construction activities, land use changes and groundwater extraction, along with climate changes in low-lying coastal areas can lead to deformation, land surface and topographic instabilities. Coastal deltas are part of the landforms and landscapes that, due to the proximity of both land and water environments, leave visible effects against tectonic activities, which are related to things such as changing the pattern and place of formation of deltas due to the change in the course of coastal rivers, the formation of unbalanced coastal terraces in parts of The coast and the emergence of cut beaches in the form of sea loads can be mentioned. In this research, we investigated the geomorphic changes of the coastal plain of Chalus due to eustatic and geostatic activities and their effects on the changes of the plain and coastline in the Chalus region, the results obtained from radar processing, geodynamic data, changes in the level of underground water, geostatic activities, The eustatic changes of the Caspian Sea and the changes in land use show that the Chalus plain has risen under the influence of geostatic activity in the past two decades, and on the other hand, the Chalus coastline has moved towards the sea as a result of the changes in land use and the increase in river sediment load and the decrease in the level of the Caspian Sea. It has been significant that its result is significant in terms of environmental and economic damages.

*Corresponding author : Dr. Mojtaba Yamani

E-mail address: myamani@ut.ac.ir

How to cite this article: Fathollahzadeh, M., Yamani, M., Goorabi, A., Maghsoudi, M., & Ghadimi, M. (2025). Analysis of Eustatic and Geostatic Changes in the Stability of the Caspian Coastal Plain (Case Study: Chalus). *Journal of Geography and Environmental Hazards*, 14(2), 266-286. <https://doi.org/10.22067/geoh.2024.88908.1501>



©2025 The author(s). This is an open access article distributed under Creative Commons Attribution 4.0 International License (CC BY 4.0)

EXTENDED ABSTRACT

Introduction

Environmental transformations, including tectonic activities, climate change, excessive groundwater extraction, and land use changes, significantly impact the stability of coastal plains. Due to its strategic location along the Caspian Sea, the Chalus Plain is affected by geostatic changes (including tectonic and seismic activities) and eustatic changes (related to sea level fluctuations). This study examines the impact of these changes on the stability of the Chalus coastal plain.

Material and Methods

This research utilizes radar remote sensing techniques (specifically SBAS and PS InSAR), geodynamic data, Sentinel-1 and Landsat satellite images, GNSS data, and groundwater level measurements. The data, collected between 2017 and 2024, were analyzed to assess surface displacement, groundwater fluctuations, shoreline changes, and land use transformations.

Results and Discussion

Geostatic Changes and Ground Displacement: InSAR analysis revealed that the Chalus Plain has primarily experienced uplift over the past decades, with an average displacement of +2 to +8 mm per year. Geodynamic data confirmed that tectonic and seismic activities associated with the Khazar and Alborz North faults are the main drivers of this displacement.

Impact of Caspian Sea Eustatic Changes: Satellite data analysis indicated that the Caspian Sea level dropped by approximately 2.1 meters between 1992 and 2024. This decline resulted in a shoreline advance of 22 to 385 meters, with the most significant changes occurring at the Chalus River delta and the Nowshahr Port area.

Role of Land Use Changes: Satellite imagery analysis showed a notable reduction in forest cover and an increase in bare land and built-up areas over the past 23 years. These changes have led to increased surface runoff, accelerated soil erosion, greater sediment loads in the Chalus River, and subsequent delta expansion and shoreline advancement.

Conclusion

The findings indicate that the Chalus Plain has undergone significant geostatic and eustatic changes. Tectonic activities have caused land uplift, while sea level decline and increased river sediment loads have contributed to shoreline expansion. To mitigate the adverse effects of these changes, the following measures are recommended: reforestation and vegetation restoration in the Chalus watershed to reduce erosion and sedimentation; diplomatic efforts to secure Caspian Sea water rights from upstream countries (e.g., Russia); and effective land use planning to prevent unregulated urban expansion along the coast.

This study underscores the importance of integrated coastal management and the need for continuous monitoring of geological, hydrological, and land use changes to ensure the sustainability of coastal plains.



تحلیل تغییرات ائوستاتیک و ژئوستاتیک در پایداری جلگه ساحلی خزر (مطالعه موردی: منطقه ساحلی چالوس)

محمد فتح اله زاده^۱، مجتبی یمانی^{۲*}، ابوالقاسم گورابی^۳، مهران مقصودی^۴،

مهرنوش قدیمی^۵

^۱ دانشجوی دکتری ژئومورفولوژی، دانشکده جغرافیا، دانشگاه تهران

^۲ استاد ژئومورفولوژی، دانشکده جغرافیا، دانشگاه تهران

^۳ دانشیار ژئومورفولوژی، دانشکده جغرافیا، دانشگاه تهران

اطلاعات مقاله	چکیده
تاریخچه مقاله:	مجموعه‌ای از فرآیندهای محیطی بزرگ مقیاس و طولانی مدت، از جمله رخداد های لرزه‌ای، فعالیت های ساختمانی، تغییرات کاربری و برداشت آب های زیرزمینی، به همراه تغییرات اقلیمی در مناطق ساحلی کم ارتفاع می تواند منجر به بروز تغییر شکل، ناپایداری های سطح زمین و توپوگرافیک شود. دلتاهای ساحلی جزء لندفرم ها و چشم اندازهایی هستند که به دلیل مجاورت دو محیط خشکی و آبی در برابر فعالیت های تکتونیکی آثار قابل مشاهده ای از خود برجای می گذارند که به مواردی چون تغییر الگو و مکان شکل گیری دلتاها به دلیل تغییر مسیر رودخانه های ساحلی، شکل گیری تراس های ساحلی نامتوازن در بخش هایی از ساحل و به وجود آمدن سواحل بریده شده به صورت دریابار می توان اشاره کرد. در این پژوهش به بررسی تغییرات ژئومورفیک جلگه ساحلی چالوس ناشی از فعالیت های ائوستاتیک و ژئوستاتیک و آثار آنها در تغییرات جلگه و خط ساحلی در محدوده چالوس با استفاده از سنجش از دور راداری (مدل های SBAS و PS) و داده های ژئودینامیک پرداخته شد که نتایج به دست آمده از پردازش راداری، داده های ژئودینامیک، تغییرات سطح تراز آب های زیرزمینی، فعالیت های ژئوستاتیکی، تغییرات ائوستاتیکی دریای خزر و تغییرات کاربری زمین، نشان می دهد جلگه چالوس در دو دهه گذشته تحت تأثیر فعالیت ژئوستاتیکی دچار بر خاستگی شده است. از طرف دیگر خط ساحلی چالوس در نتیجه تغییرات کاربری و افزایش بار رسوب رودخانه و کاهش تراز سطح دریای خزر به سمت دریا پیشروی قابل توجهی داشته است که نتیجه آن از نظر زیست محیطی و خسارت های اقتصادی قابل توجه است. بنابراین احیای پوشش گیاهی و جنگلی در حوضه آبریز چالوس جهت کاهش فرسایش و تولید رسوب و پیگیری دیپلماسی برای دادن حق آبه دریای خزر توسط کشورهای ذینفع بخصوص کشور روسیه می تواند مشکلات به وجود آمده را برطرف کند.
کلمات کلیدی:	
جلگه ساحلی دریای خزر	
دشت ساحلی	
تغییرات سطح دریا (ائوستاتیک)	
تغییرات زمین شناسی (ژئوستاتیک)	
تداخل سنجی راداری (InSAR)	

مقدمه

مجموعه‌ای از فرآیندهای محیطی بزرگ‌مقیاس و طولانی‌مدت، از جمله رخداد‌های لرزه‌ای، فعالیت‌های ساختمانی، تغییرات کاربری و برداشت آب‌های زیرزمینی، به همراه تغییرات اقلیمی در مناطق ساحلی کم‌ارتفاع می‌تواند منجر به بروز تغییرشکل، ناپایداری‌های سطح زمین و توپوگرافیک شود (لانگ‌بیچ در ایالات متحده، ونیز در ایتالیا، توکیو در ژاپن، بانکوک در تایلند یا شانگهای در چین) و یا شدت این رخدادها را افزایش دهد (Kanwal, Ding, Wu & Sajjad, 2022). عوامل مختلفی از جمله عوامل انسانی و طبیعی می‌تواند باعث فرونشست در مناطق شهری و روستایی شود مانند بارگذاری سازه و ساختمان‌های سنگین (Hussain et al., 2022)، خصوصیات لیتولوژی و خاکشناسی (Stanley & Clemente, 2014)، استخراج و برداشت بی‌ضابطه آب‌های زیرزمینی (Hussain et al., 2022)، فعالیت‌های ژئوستاتیک و بهره‌برداری از معادن (Stanley & Clemente, 2014). هر یک از این عوامل می‌تواند تأثیرات منحصر به فردی بر تغییر شکل سطح زمین داشته باشد. امروزه بخش اعظم جلگه‌ها و دلتاهای رودخانه‌ای در ساحل با فرونشست و تسریع فرسایش ساحلی قابل توجهی مواجه هستند که این مسئله خطر دائمی سیل و تغییرات ائوستاتیک دریا را به دلایلی چون تغییر اقلیم و دخالت‌های انسانی در مصب آنها افزایش می‌دهد (Dai, Mei, Darby, Lou & Li, 2018).

مطالعات مورفوتکتونیک به تفسیر ژئودینامیکی و ژئومورفولوژیکی چشم‌اندازها می‌پردازد و به عنوان مدل مهمی برای تکامل چشم‌اندازها، که اولین بار توسط هاک در سال ۱۹۶۰ پیشنهاد شد، عمل می‌کند (Keller & Pinter, 2002). در پژوهش‌های مورفوتکتونیک، رودخانه‌ها و شبکه‌های زهکشی به عنوان شاخص‌های مهمی شناخته می‌شوند، زیرا به وضوح به فعالیت‌های تکتونیکی واکنش نشان می‌دهند. فعالیت‌های ژئوستاتیک می‌تواند باعث قطع، جدایی، جابجایی یا انحراف مسیر شبکه زهکشی و تغییر الگو و شکل رودخانه‌ها شود (Davis, 1973). شبکه‌های زهکشی قادرند حرکات تکتونیکی اخیر مانند بالاآمدگی و فرونشست را نشان دهند، زیرا کانال‌های رودخانه‌ای به تغییرات شیب توپوگرافیک حساسیت بالایی دارند (Doranti-Tiritan, Hackspacher, de Souza & Siqueira-Ribeiro, 2014).

دلتاهای ساحلی جزء لندفرم‌ها و چشم‌اندازهایی هستند که به دلیل مجاورت دو محیط خشکی و آبی در برابر فعالیت‌های تکتونیکی آثار قابل‌مشاهده‌ای از خود برجای می‌گذارند که به مواردی چون تغییر الگو و مکان شکل‌گیری دلتاها به دلیل تغییر مسیر رودخانه‌های ساحلی، شکل‌گیری تراس‌های ساحلی نامتوازن در بخش‌هایی از ساحل و به وجود آمدن سواحل بریده‌شده به‌صورت دریا بار می‌توان اشاره کرد. ژئومورفولوژی ساحلی در مورد شکل‌گیری اشکال ساحلی (لند فرم‌ها)، فرآیندهای حاکم بر آنها و تغییرات صورت گرفته بر روی آنها بحث می‌کند (Bird, 1999).

ناحیه ساحلی خزر به دلیل شرایط آب‌وهوایی مساعد و بی‌بدیل نسبت به سایر نقاط کشور یعنی اعتدال دمایی در تمام فصول سال یکی از مکانهای با تراکم جمعیت بالا از نظر سکونتگاهی و گردشگری در کشور است. علاوه بر این وجود خاک حاصلخیز و رونق کشاورزی باعث توسعه روزافزون و سریع منطقه و رشد جمعیت در آن شده است. یکی از مسائل طبیعی این ناحیه تغییرات خطوط ساحلی در نتیجه تغییرات تراز آب دریا است که خود نتیجه تغییرات ائوستاتیک و ژئوستاتیک ساحل و دریا است. این تغییرات در یک قرن اخیر بسیار نامنظم بوده است و در برخی اوقات موجب پیشروی ساحل و گاهی نیز موجب عقب‌نشینی قابل توجه ساحل شده است که در هر دو حالت باعث آسیب‌ها و تحمیل هزینه‌هایی به ساکنین این مناطق شده است (Fathollahzadeh, Yamani, Goorabi, Maghsoudi & Ghadimi, 2024).

امروزه، استفاده از تکنیک‌های تداخل‌سنجی راداری (InSAR) امکان شناسایی تغییرات سطح زمین در مناطق ساحلی، نشست ناشی از فعالیت‌های گسلی، پایش تغییر شکل پوسته زمین براساس گرادیان‌های تغییر شکل و شناسایی گسل‌های فعال را فراهم کرده است (Shi, Liao, Li, Zhang & Cunningham, 2016).

روش‌های اصلی برای اندازه‌گیری و مدل‌سازی جابجایی سطح ساحلی شامل استفاده از تکنیک‌های تداخل‌سنجی راداری (InSAR)، تکنیک‌های نقشه‌برداری ژئودتیک و داده‌های سری زمانی است. این روش‌ها امکان پایش دقیق و پیوسته تغییرات ارتفاع سطح زمین را فراهم می‌کند و می‌تواند در مدل‌سازی و پیش‌بینی فرونشست‌ها مورد استفاده قرار گیرد (Lazecký et al., 2020; Shirzaei et al., 2021).

پژوهش‌های مختلفی در زمینه بررسی تغییرات و جابجایی سطح زمین بخصوص در زمینه فرونشست انجام شده است که برخی از آنها عبارتند از: گورابی و همکاران (Goorabi, Karimi, Yamani & Perissin, 2020) در پژوهشی با استفاده از سری تصاویر Sentinel-1 و روش PS به بررسی فرونشست در کلان شهر اصفهان در بازه زمانی ۲۰۱۴ تا ۲۰۱۹ پرداختند. نتایج این تحقیق نشان داد فرونشست سالانه‌ای بین ۵ تا ۱۰۰ میلی‌متر در مدت ۵ سال رخ داده که از سمت جنوب به شمال و شمال شرق و شرق روند افزایشی دارد.

رنجبر و فتح اله زاده (Ranjbar Barough & Fathallahzadeh, 2022) در پژوهشی به بررسی فرونشست زمین با استفاده از سری زمانی تصاویر راداری و ارتباط آن با تغییرات تراز آبهای زیرزمینی در کلان شهر کرج پرداختند که نتایج آن نشان داد بیشترین فرونشست در بخش شمال غربی منطقه مورد مطالعه یعنی مهرشهر رخ داده است و کاهش بارش میانگین در این دوره زمانی در کنار برداشت آب زیرزمینی آثار نامطلوبی بر تغذیه آب‌های زیرزمینی برجای گذاشته و با توجه به خصوصیات بافت خاک منطقه که عمدتاً ریزدانه است در نهایت موجب رخداد فرونشست شده است. در پژوهشی دیگر فتح اله زاده و همکاران (Fathollahzadeh et al., 2024) به شناسایی مناطق فعال تکتونیکی ساحل شرقی خزر با استفاده از سنجش از دور راداری پرداختند که نتایج این تحقیق نشان داد شهرهای گمیشان، بندر ترکمن، بندر گز و لاریم دارای آنومالی قابل توجهی به صورت بالآمدگی و فروافتادگی هستند که علت اصلی این جابجایی‌ها، عملکرد گسل خزر و گسل البرز شمالی است که به صورت شاخه‌های متعدد با سازوکار راندگی (معکوس) و مولفه راستالغز با شیب به سمت جنوب در گستره استان گلستان مشاهده می‌شود.

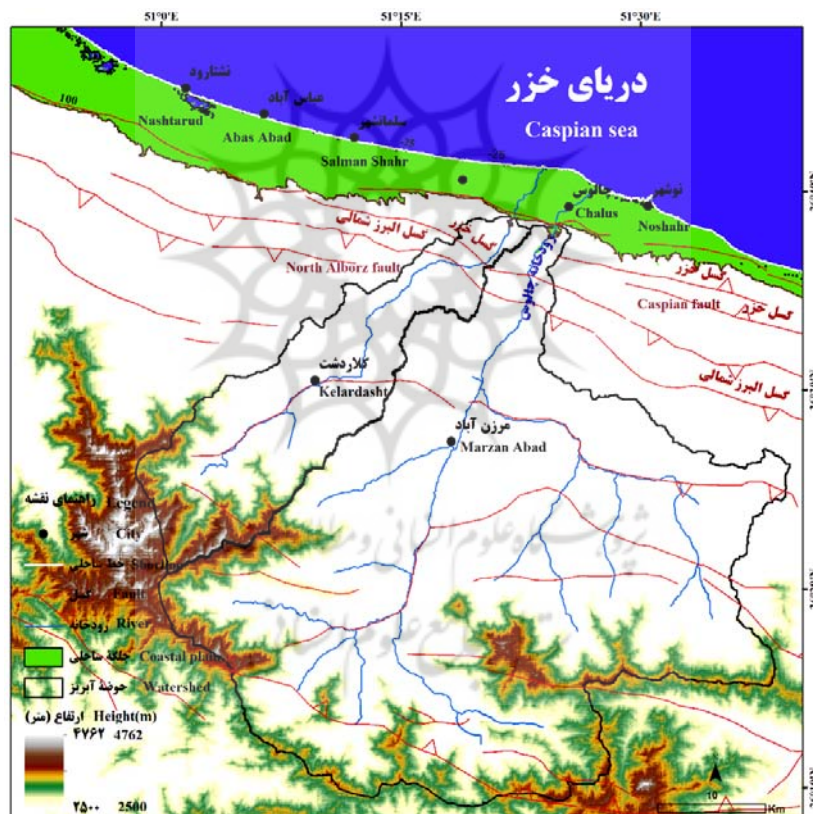
جلگه ساحلی چالوس بدلیل قرارگیری در منطقه فعال تکتونیکی به طور مداوم در معرض تغییرات ژئوستاتیکی قرار دارد از طرفی نوسانات متناوب تراز آب دریای خزر (تغییرات آئوستاتیکی) به عنوان سطح اساس این حوضه آبریز نیز، موجب شده است سواحل منطقه دستخوش تغییرات قابل توجهی شوند که مشکلات زیست محیطی و خسارت‌های اقتصادی زیادی را به همراه داشته است. بنابراین برنامه‌ریزی برای حل این مسائل و ارائه راهکار برای مقابله با اثرات آن انجام این پژوهش علمی را امری ضروری می‌نماید.

این پژوهش به بررسی تغییرات ژئومورفیک جلگه ساحلی چالوس ناشی از فعالیتهای ائوستاتیک و ژئوستاتیک و آثار آنها در تغییر جلگه و خط ساحلی در محدوده چالوس می‌پردازد. برای این امر جابجایی سطح زمین، تغییرات تراز آب زیرزمینی، فعالیتهای ژئوستاتیک (تکتونیک)، تغییرات کاربری اراضی و تغییرات تراز و خط ساحلی دریای خزر (ائوستاتیک) در جلگه چالوس مورد بررسی قرار می‌گیرد.

منطقه مورد مطالعه

جلگه چالوس، واقع در سواحل دریای خزر در شمال ایران و در حد واسط طول جغرافیایی ۵۱ درجه و ۱۸ دقیقه تا ۵۱ درجه و ۲۹ دقیقه شرقی و عرض جغرافیایی ۳۶ درجه و ۳۷ دقیقه تا ۳۶ درجه و ۴۱ دقیقه شمالی قرار گرفته است. این منطقه به دلیل موقعیت جغرافیایی خاص خود تحت تأثیر تغییرات قابل توجهی قرار دارد. این تغییرات شامل تغییرات سطح تراز دریا، تغییرات خط ساحلی و عملکرد تکتونیک فعال است که به نظر می‌رسد پیامدهای گسترده‌ای برای زندگی ساکنان محلی و محیط زیست داشته باشد.

رودخانه چالوس مهم‌ترین رودخانه این منطقه است که از ارتفاعات البرز سرچشمه گرفته و پس از عبور از جلگه ساحلی به دریای خزر می‌ریزد. این رودخانه نقش مهمی در تأمین آب کشاورزی و ایجاد تنوع زیستی در جلگه چالوس دارد. این منطقه دارای جنگل‌های انبوه و سرسبز هیرکانی است که در امتداد کوه‌های البرز به سمت جلگه چالوس گسترده شده‌اند. تراکم جمعیت بالا در این منطقه، به دلیل شرایط آب و هوایی مطلوب و خاک حاصلخیز برای زیرساخت‌های گردشگری و کشاورزی، اهمیت درک این فرآیندها را برای رفاه ساکنان و برنامه‌ریزی مؤثر برجسته می‌کند (شکل ۱).



شکل ۱- موقعیت جغرافیایی منطقه مورد مطالعه

Fig.1. Geographical location of the study area

ویژگی‌های زمین‌شناسی و تکتونیکی: جلگه ساحلی چالوس به دلیل قرارگیری در محل همگرایی صفحات ایران مرکزی و اوراسیا و حرکت شمال غربی حوضه جنوبی خزر از نظر تکتونیکی فعال محسوب می‌شود. این فعالیت‌های تکتونیکی، همراه با خط ساحلی پویای منطقه، باعث دینامیک پیچیده محیطی در این منطقه شده است. گسل خزر و

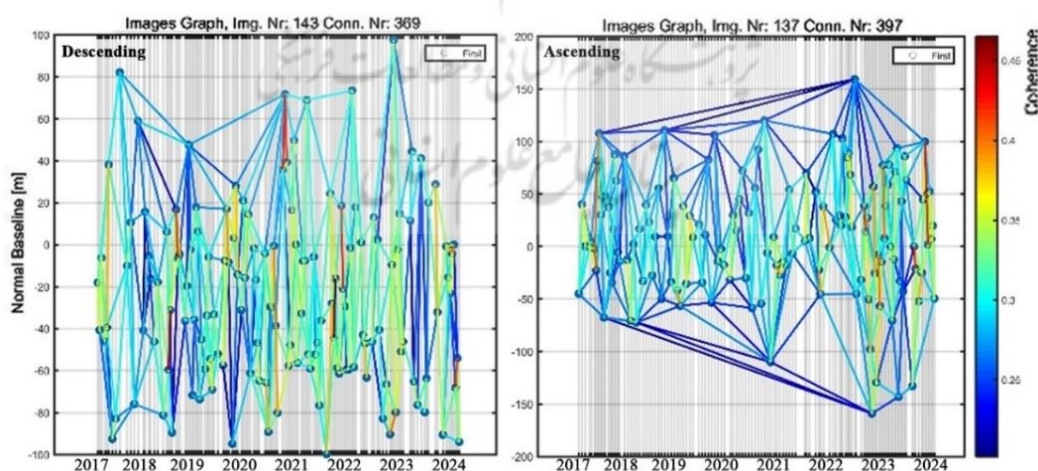
البرز شمالی از جمله گسل‌های فعال منطقه هستند که نقش مهمی در تغییرات سطح زمین و بروز زلزله‌های این منطقه دارند.

ویژگی‌های آب و هوایی و هیدرولوژیکی: آب و هوای معتدل منطقه چالوس با میانگین بارش سالانه ۷۸۵ میلی‌متر و تغییرات دمایی کم، تأثیرات زیادی در فراهم کردن شرایط مطلوب زندگی و رونق کشاورزی داشته است. حوضه‌های آبریز چالوس و سردآبرود نقش مهمی در توسعه جلگه ساحلی چالوس و تغذیه و تأمین منابع آبی منطقه دارند. **تأثیرات انسانی و کشاورزی:** عوامل انسانی، مانند توسعه اقتصادی به واسطه تغییرات کاربری زمین و افزایش زمین‌های کشاورزی و نقاط شهری، یکی از چالش‌های محیطی مهم پیشروی جلگه چالوس است. وابستگی منطقه به کشاورزی آب‌بر مانند کشت برنج و افزایش شهرنشینی و توسعه زیرساخت‌های گردشگری، موجب افزایش فشارهای محیطی در این منطقه شده است. تغییرات کاربری زمین به منظور توسعه کشاورزی، شهری و زیرساخت‌های گردشگری، منجر به افزایش هرچه بیشتر تقاضا برای منابع آب و تخریب محیط زیست طبیعی شده است.

مواد و روش‌ها

داده‌های تحقیق

Sentinel-1 سنجنده راداری شامل ۲ ماهواره با دوره بازگشت ۱۲ روزه (ترکیب A و B ۶ روزه) است که در سال ۲۰۱۶ توسط سازمان فضایی اروپا در مدار زمین قرار گرفت است. در این تحقیق، مجموعاً ۱۳۷ تصویر Ascending و ۱۴۳ تصویر Descending باند C از Sentinel-1A در حالت دریافت تداخل‌سنجی عریض (IW) و حالت مشاهدات زمینی توسط اسکن پیش‌رونده یا حالت (TOPSAR) در مس‌پره‌های ۳۵ و ۲۸ و در دوره زمانی نوامبر ۲۰۱۷ تا ژوئن ۲۰۲۴، جمع‌آوری و استفاده شده است. برای تولید اینترفروگرام‌های تفاضلی و ژئوکدینگ تصاویر از مدل رقومی ارتفاعی (DEM) با دقت ۳۰ متر سنجنده (SRTM) استفاده شد. همچنین در تولید اینترفروگرام‌ها به ترتیب از فواصل زمانی و مکانی ۳۰ روزه و ۸۰ متری استفاده و در مجموع ۳۹۷ اینترفروگرام در مد Ascending و ۳۶۹ در مد Descending تهیه شد (شکل ۲)، (جدول ۱).



شکل ۲- ترکیب تداخل‌سنجی و ارتباط مجموعه تصاویر Ascending و Descending تصاویر Sentinel-1 در تکنیک PS-InSAR
Fig.2. Interferometric combination and correlation of ascending and descending Sentinel-1 image sets in the PS-InSAR technique

جدول ۱- ویژگی‌های داده‌های راداری مورد استفاده

Table 1 - Characteristics of the radar data used

Sentinel-1		Parameters
ASCENDING	DESCENDING	Orbit Direction
2017 - 2024	2017 - 2024	Coverage time
28	28	Path
117	35	Frame

داده‌های GNSS

داده‌های ساعتی ایستگاه‌های GNSS از طریق موقعیت‌یابی استاتیک محل ایستگاه با دقت میلی‌متر، می‌توانند به عنوان داده مرجع برای پایش حرکت سطح زمین در نظر گرفته شوند. جابجایی‌های عمودی روزانه که با تکنیک موقعیت‌یابی دقیق نقطه‌ای (PPP) پردازش می‌شوند می‌توانند برای صحت‌سنجی نتایج بدست آمده از تداخل‌سنجی راداری مورد استفاده قرار گیرند (Wang et al., 2012). در این پژوهش از داده‌های ایستگاه ژئودینامیک نمک‌آبرود به عنوان نزدیک‌ترین ایستگاه GNSS به جلگه چالوس برای صحت‌سنجی نتایج بدست آمده از تداخل‌سنجی راداری استفاده شد.

تغییرات سطح آب‌های زیرزمینی

یکی از اهداف این پژوهش بررسی ارتباط جابجایی‌های مشاهده شده سطح زمین و تغییرات تراز آب‌های زیرزمینی در محدوده جلگه چالوس است. جهت این امر داده‌های چاه‌های مشاهده‌ای (۱۳ چاه) تراز آب زیرزمینی در بازه زمانی ۲۰۱۴ تا ۲۰۲۴ منطقه چالوس از شرکت مدیریت منابع آب ایران تهیه و پهنه‌بندی تغییرات تراز آنها با استفاده از روش درون‌یابی IDW (با توجه به اینکه چاه‌های پیژومتری در منطقه مورد بررسی به صورت نسبتاً یکنواخت پراکنده شده‌اند و بین مقادیر داده‌ها پیوستگی خوبی برقرار است از روش IDW استفاده شد) در محیط نرم‌افزار Arc GIS 8.1 انجام شد. علاوه بر داده‌های راداری Sentinel-1، GNSS و تراز آب زیرزمینی، از مجموعه داده‌های عمومی دیگر شامل نقشه‌های زمین‌شناسی و توپوگرافی، تصاویر اپتیک Sentinel-2 و مجموعه تصاویر Landsat-7,8 (در بازه زمانی ۲۰۰۰ تا ۲۰۲۳) نیز برای ارزیابی و بررسی تغییرات کاربری و خط ساحلی جلگه چالوس استفاده شد. در نهایت ادغام این مجموعه داده‌های متنوع، امکان ارزیابی جامع ژئوستاتیک، ائواستاتیک و دینامیک آب‌های زیرزمینی و تغییرات سطح تراز دریای خزر در محدوده جلگه چالوس را فراهم می‌کند.

روش پژوهش

بررسی جابجایی‌های سطح زمینی در جلگه‌های ساحلی به دلیل حساسیت منطقه به فعالیت‌های نئوتکتونیک، تغییرات تراز آب‌های زیرزمینی، تغییرات پوشش زمین و تغییرات تراز دینامیکی سطح دریای خزر اهمیت زیادی دارد. این عوامل نه تنها بر پایداری ژئومورفولوژیکی منطقه تأثیرگذار است، بلکه پیامدهای عمیقی برای منابع آب‌های زیرزمینی و اکوسیستم‌های محلی نیز دارند. برای تعیین میزان جابجایی و تغییرات سطح زمین در جلگه ساحلی از روش سری زمانی تغییرات به کمک دو تکنیک SBAS در محیط نرم افزار SARscape و روش PS در محیط نرم افزار Matlab استفاده شد. تکنیک‌های SBAS و PS InSAR هر یک نقاط قوت خاص به خود را دارند؛ SBAS InSAR معمولاً برای پایش مناطق وسیع و بدون عوارض انسان ساخت مناسب است و PS InSAR در پایش دقیق و نقطه به نقطه مناطق شهری و دارای پراکنشگرهای دائم و ثابت مانند ساختمان‌ها و سازه‌های ساخت بشر نتایج بسیار خوبی می‌دهد. با توجه به اینکه جلگه چالوس ترکیبی از عوارض طبیعی و انسان‌ساخت است برای نتیجه بهتر از هر دو روش استفاده شد.

در ادامه جهت پایش تغییرات خط ساحلی دریای خزر در جلگه چالوس از افزونه DSAS در محیط نرم افزار Arc GIS که توسط سازمان زمین‌شناسی آمریکا (USGS) برای استخراج پارامترهای آماری در ارزیابی تغییرات خط ساحلی طراحی شده است، در کنار داده‌های تغییرات تراز آب دریای خزر در ۳۰ سال اخیر استفاده کردیم. در نهایت هم با استفاده از سامانه Earth Engine تغییرات کاربری اراضی حوضه آبریز چالوس تعیین و مشخص شد.

تکنیک SBAS InSAR

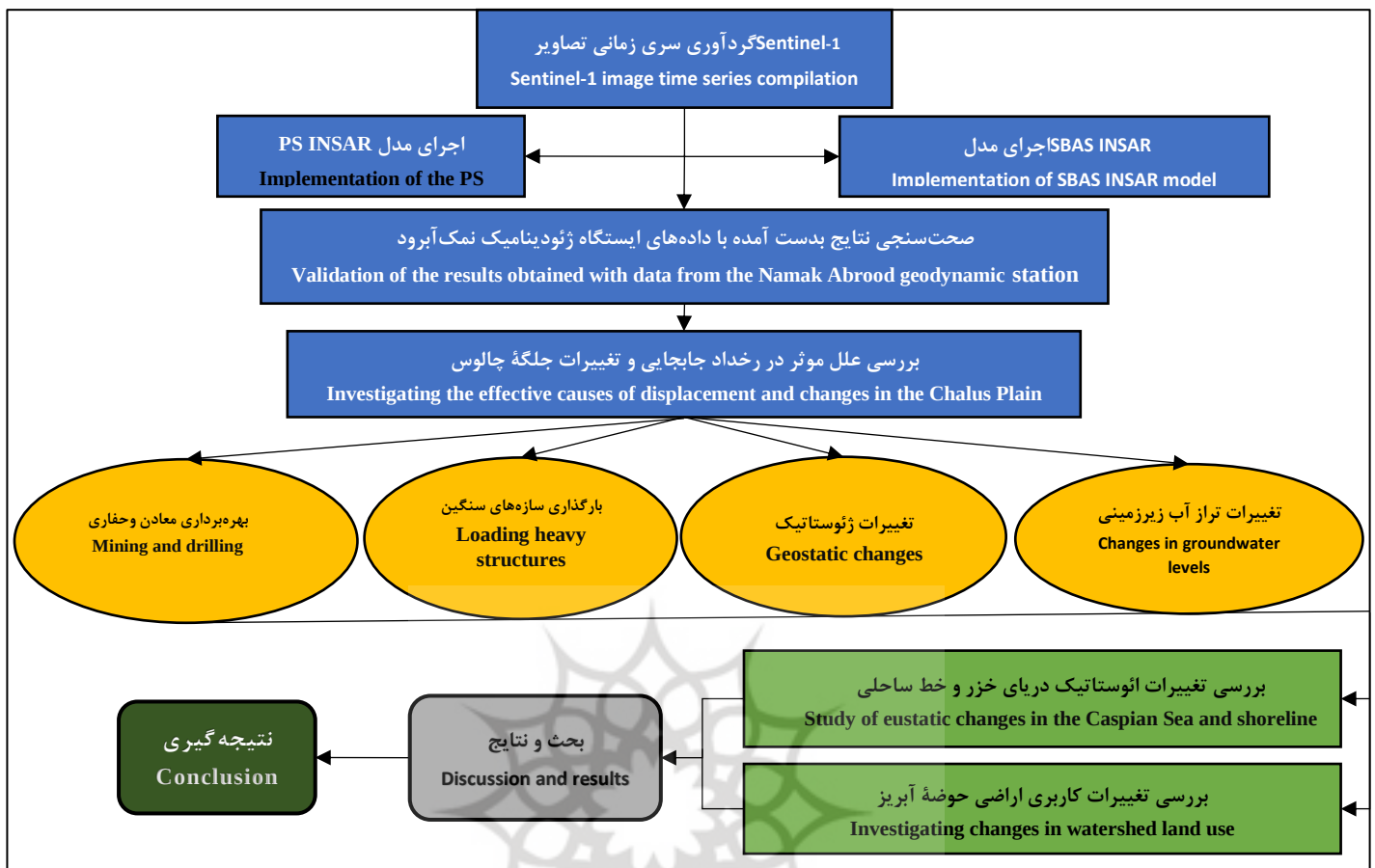
تکنیک SBAS-InSAR که برای اولین بار توسط براردینو (Berardino, Fornaro, Lanari & Sansosti, 2002) براساس تداخل‌سنجی زوج تصاویر راداری با خط مبنای مکانی-زمانی کمتر مطرح شد. SBAS براساس پایش مداوم تغییر فاصله بین سنجنده و سطح زمین، تغییرات رخ داده در سطح توپوگرافیک را با توجه به ثابت بودن مدار حرکت سنجنده اندازه‌گیری می‌کند. در اجرای مدل SBAS-InSAR ابتدا مجموعه تصاویر SLC را با توجه به اختلاف مکانی و زمانی مناسب به تعداد ۱۴۳ تصویر Descending از سایت فضایی اروپا (<https://search.asf.alaska.edu>) دانلود و ابتدا با استفاده از Orbit file تصاویر، تصحیحات مورد نیاز بر روی آنها انجام و پس از آن پردازش بر روی تصاویر Import شده براساس محدوده جلگه ساحلی در محیط نرم افزار SARscape انجام شد. در این مدل مجموعاً ۴۶۲ اینترفروگرام تولید شد و در ادامه برای حذف اثر توپوگرافی از مدل ارتفاعی رقومی ۳۰ متری Aster استفاده و براساس معادله شماره (۱) اختلاف فاز تغییرات بین زوج تصاویر ساخته شد:

$$\Delta\phi_{top}(x,r) = \frac{4\pi}{\lambda} \frac{B \perp(t_A, t_B)}{R \sin(\theta)} \Delta h \quad (1)$$

که در آن $B \perp(t_A, t_B)$ خط مبنای عمودی بین t_A و t_B است، R برد بین هدف زمینی و آنتن سنجنده است، θ زاویه دید و Δh مقدار خطای ارتفاع در هر پیکسل تصویر است که براساس روش تصحیح DEM پیشنهادی توسط براردینو (Berardino et al., 2002) تخمین زده شده است. خطای ارتفاعی فاز با استفاده از معادله (۱) محاسبه و از اینترفروگرام‌ها حذف شده‌اند.

تکنیک PS (Permanent Scattering) Subset InSAR

تکنیک دیگری که برای ارزیابی تغییرات و جابجایی جلگه ساحلی مورد استفاده قرار گرفت، روش پراکنشگرهای دائمی یا PS-InSAR است. این روش بر مبنای شناسایی و ردیابی پراکنشگرهای دائمی سطح زمین مانند ساختمان‌ها، زیرساخت‌ها یا لندفرم‌های طبیعی که خواص بازتابی پایدار در طول زمان دارند تمرکز دارد. با ردیابی این پراکنشگرهای دائمی در تکنیک PS-InSAR، اندازه‌گیری جابجایی‌های زمین با وضوح بسیار بالا و به صورت نقطه‌ای فراهم می‌شود. اجرای مدل PS بر روی داده‌های Sentinel-1A شامل ۱۳۷ تصویر Ascending و ۱۴۳ تصویر Descending و ترکیب نتایج حاصل از دو جهت به دلیل داشتن دو زاویه دید مختلف و افزایش دقت مکانی نتیجه تداخل‌سنجی انجام شد. ترکیب داده‌های Ascending و Descending باعث کاهش خطاهای ناشی از پوشش زمانی و مکانی تصاویر در محیط نرم افزار Mathlab می‌شود (شکل ۳).



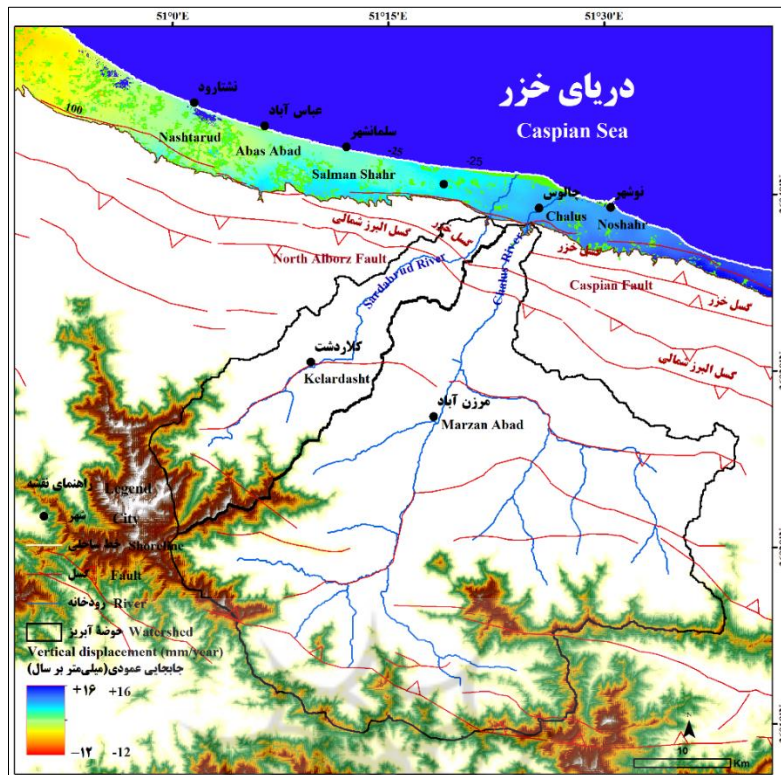
شکل ۳-فلوچارت انجام پژوهش

Fig.3. Research flow chart

نتایج و بحث

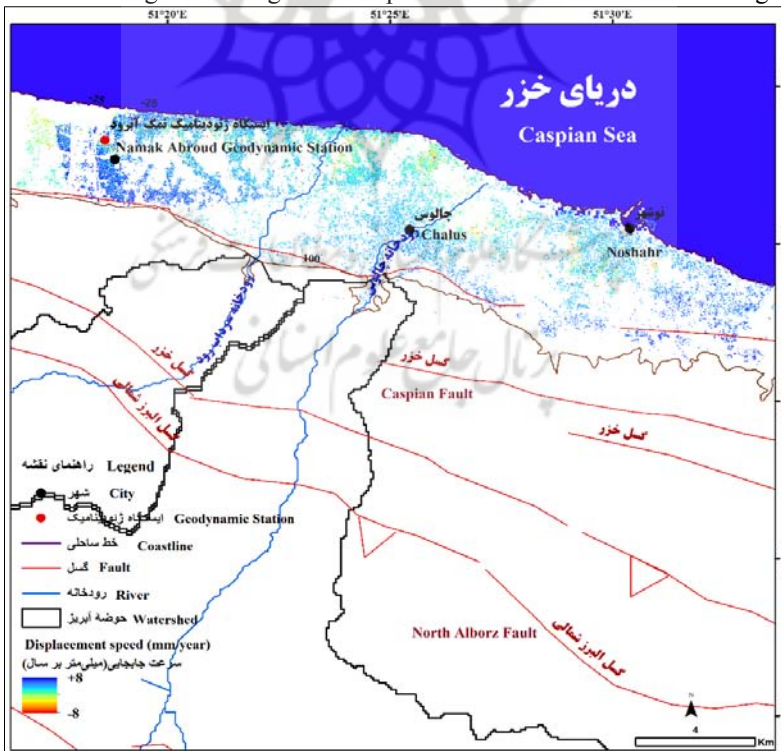
پس از اجرای مدل‌های SBAS و PS InSAR طبق مراحل بیان شده در فلوچارت، نتایج جابجایی‌های رخ داده در سطح جلگه چالوس مشخص شد. همانگونه که در شکل ۴ مشخص است در محدوده جلگه چالوس طبق خروجی تکنیک SBAS InSAR، جابجایی معادل ۲+ تا ۱۰+ میلی‌متر در سال پرخاستگی رخ داده است که این روند به سمت شرق جلگه تشدید شده و به ۱۶+ میلی‌متر در سال هم می‌رسد (شکل ۴).

نتایج بدست آمده از ترکیب مدل PS InSAR در دو مد Ascending و Descending هم پرخاستگی در عمده نقاط جلگه را نشان می‌دهد و تنها در قسمتهایی به صورت پراکنده فرونشست‌های موردی رخ داده است. جابجایی مشخص شده در مدل PS InSAR در جلگه چالوس بین ۸- تا ۸+ میلی‌متر در سال را در بازه زمانی ۲۰۱۷ تا ۲۰۲۴ نشان می‌دهد (شکل ۵).



شکل ۴- نتایج ارزیابی تغییرات و جابجایی زمین در جلگه چالوس با استفاده از SBAS InSAR

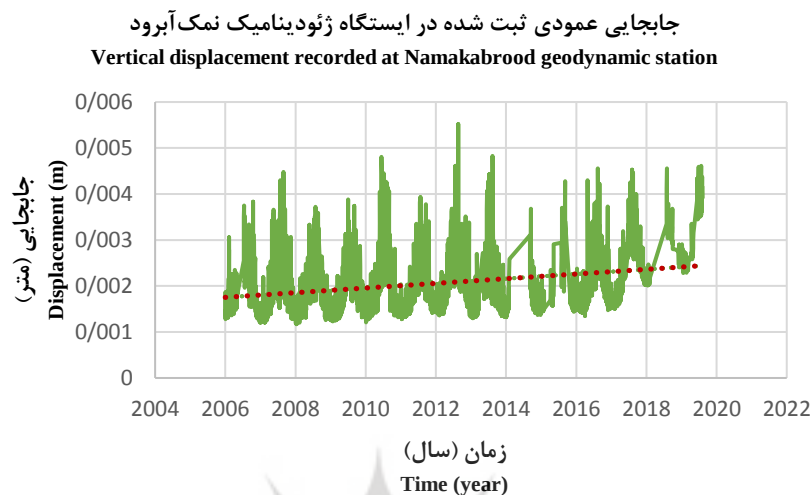
Fig.4. Results of assessing land changes and displacement in the Chalus Plain using SBAS InSAR



شکل ۵- نتایج ارزیابی تغییرات و جابجایی زمین در جلگه چالوس با استفاده از PS InSAR

Fig.5. Results of assessing land changes and displacement in the Chalus Plain using PS InSAR

پس از تعیین تغییرات و جابجایی جلگه چالوس با استفاده از تکنیک‌های SBAS و PS InSAR برای اطمینان و اعتبارسنجی نتایج بدست آمده از تداخل‌سنجی راداری، از داده‌های ایستگاه نمک‌آبرود (به عنوان نزدیکترین ایستگاه ژئودینامیکی به جلگه چالوس) استفاده شد (شکل ۶).



شکل ۶- روند جابجایی زمین در ایستگاه ژئودینامیک نمک‌آبرود

Fig.6. Earth movement trend at Namak Abroud Geodynamic Station

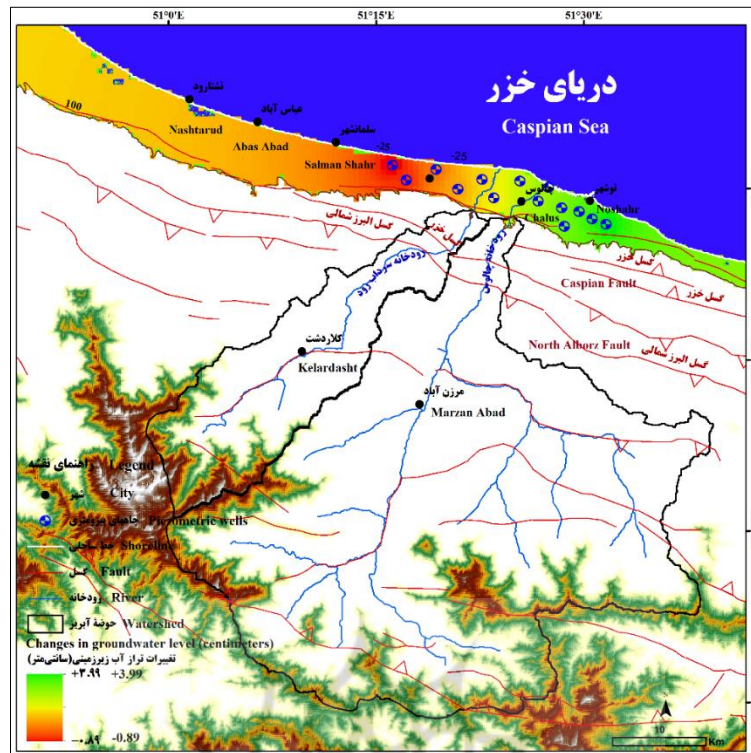
همانطور که در شکل ۶ مشخص است روند جابجایی سطح زمین در محل ایستگاه نمک‌آبرود در ۱۲ سال اخیر به صورت برخاستگی و صعودی بوده است. نتایج بدست آمده از پردازش راداری (شکل ۴ و ۵) هم در هر دو مدل SBAS و PS InSAR روند برخاستگی را در محل ایستگاه ژئودینامیک نمک‌آبرود نشان می‌دهد، بنابراین می‌توان نتیجه گرفت نتایج بدست آمده از تداخل‌سنجی راداری قابل اعتماد و صحیح است.

پس از اطمینان از صحیح بودن نتایج تداخل‌سنجی راداری، برای تعیین علل جابجایی‌های رخ داده در منطقه، عوامل موثر در این تغییرات از جمله کاهش تراز آب زیرزمینی، عامل ژئوستاتیک (تکتونیک فعال)، بهره‌برداری از معادن و منابع زیرزمینی و بارگذاری سازه‌های سنگین و بزرگ در جلگه چالوس مورد بررسی قرار گرفت.

برای بررسی ارتباط بین جابجایی زمین و تغییرات تراز آب زیرزمینی در جلگه چالوس، تغییرات تراز آب در چاه‌های پیژومتری اطراف جلگه چالوس (۱۳ چاه) در بازه زمانی ۲۰۱۴ تا ۲۰۲۴ مورد پایش قرار گرفت (شکل ۷).

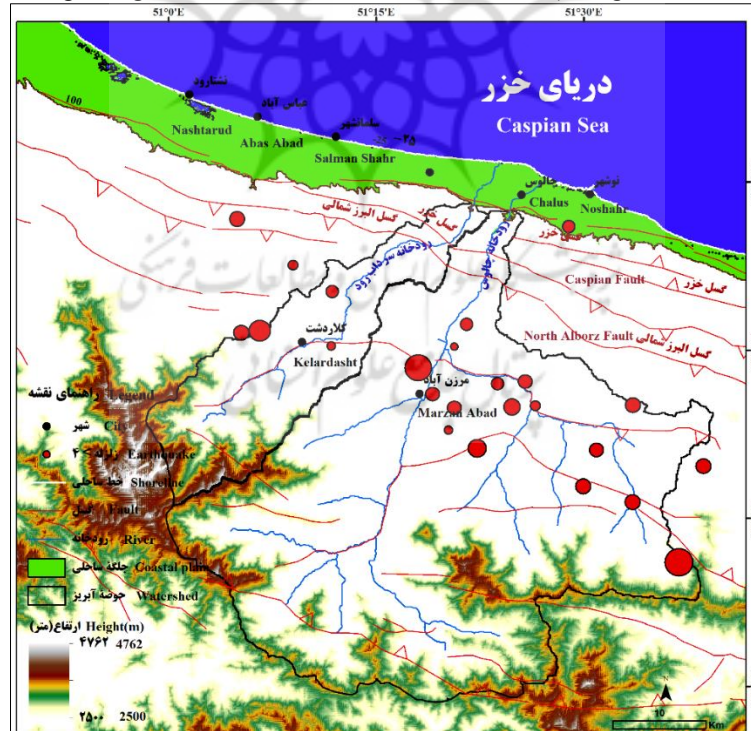
همانطور که در شکل ۷ مشاهده می‌شود تراز آب زیرزمین در جلگه چالوس و اطراف آن در بازه زمانی ۲۰۱۴ تا ۲۰۲۴ بین ۳/۹۹+ تا ۰/۸۹- تغییر کرده است که هر چه به سمت شرق جلگه حرکت می‌کنیم افزایش تراز بیشتر و هر چه به سمت غرب جلگه حرکت کنیم کاهش تراز آب زیرزمینی رخ داده است این در حالی است که در بخش اعظم جلگه چالوس برخاستگی اتفاق افتاده است؛ بنابراین می‌توان نتیجه گرفت تغییرات تراز آب زیرزمینی در جلگه چالوس ارتباط چندانی بر جابجایی سطح زمین نداشته است.

با توجه به اینکه تأثیر بارگذاری سازه‌های سنگین و بهره‌برداری از معادن تنها در فرونشست زمین موثر است و نتایج پایش راداری و ژئودینامیک تنها برخاستگی زمین در محدوده مورد مطالعه را نشان می‌دهد بنابراین این عوامل از فاکتورهای موثر در جابجایی سطح جلگه چالوس حذف و در پژوهش مورد بررسی قرار نمی‌گیرند.



شکل ۷- تغییرات تراز آب زیرزمین در جلگه چالوس (بازه زمانی ۲۰۱۴ تا ۲۰۲۴)

Fig.7. Changes in groundwater levels in the Chalus Plain (time period 2014 to 2024)

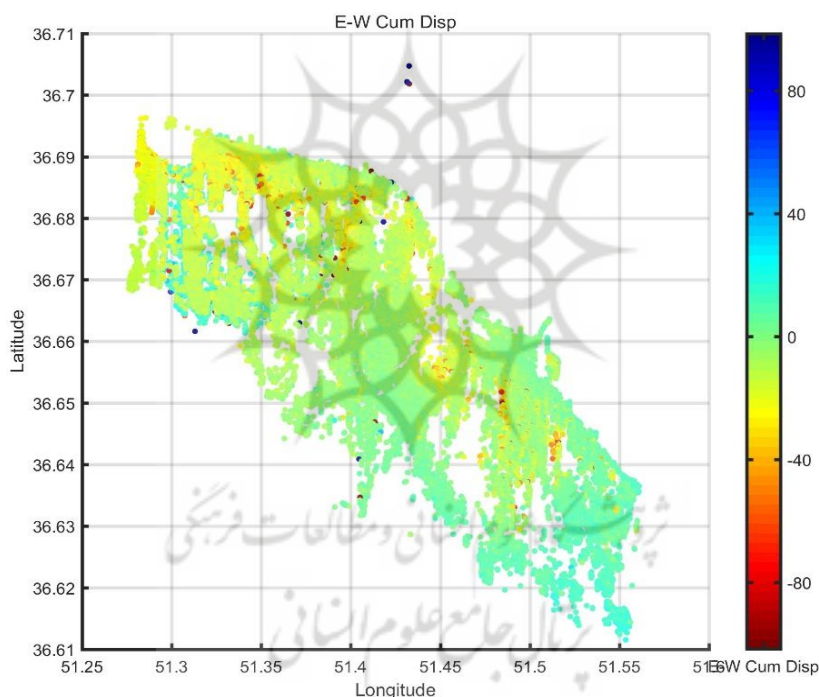


شکل ۸- رخداد زلزله (با بزرگای بیشتر از ۴ ریشتر) در محدوده منطقه مورد مطالعه (بازه زمانی ۱۹۰۰ تا ۲۰۲۴)

Fig.8. Earthquake occurrence (with a magnitude greater than 4 on the Richter scale) within the study area (time period 1900 to 2024)

یکی دیگر از عوامل تأثیرگذار بر جابجایی زمین، تغییرات ژئو استاتیک تحت تأثیر تکتونیک است. برای تعیین تأثیر تکتونیک در جابجایی جلگه چالوس، لرزه‌خیزی و نحوه عملکرد گسل‌های منطقه مورد بررسی قرار گرفت. مهمترین گسل‌های قرار گرفته در محدوده جلگه چالوس دو گسل اصلی خزر والبرز شمالی است که به صورت غربی-شرقی و در جنوب جلگه چالوس قرار گرفته‌اند. از مصادیق تکتونیک فعال در یک منطقه رخداد زلزله در آن منطقه است که معمولاً جابجایی‌های ناشی از آن می‌تواند قبل توجه باشد. برای ارزیابی تکتونیک فعال در جلگه چالوس پیشینه رخداد زلزله‌های با بزرگای بیشتر از ۴ ریشتر از سال ۱۹۰۰ تاکنون مورد بررسی قرار گرفت (شکل ۸).

با توجه به شکل ۸ اکثر کانون‌های زلزله رخ داده در منطقه، اطراف گسل‌های اصلی این ناحیه است که نتیجه آن حرکات صفحات دو طرف گسل و رخداد جابجایی سطح می‌باشد. جلگه چالوس در مرز بین صفحه تکتونیک ایران و صفحه اوراسیا (کف دریای خزر) قرار دارد که همگرایی این صفحات باعث فشارهای تکتونیک و فعالیت‌های لرزه‌ای می‌شود. این فعالیت‌ها به نوبه خود منجر به جابجایی‌های عمودی و افقی زمین در جهت E-W (شرق به غرب) و N-S (شمال به جنوب) می‌شود. براساس نتایج ارزیابی ترکیبی، جابجایی افقی منطقه مورد مطالعه طی بازه زمانی ۲۰۱۷-۲۰۲۴ مشخص شد (شکل ۹).



شکل ۹- جابجایی زمین در جهت شرقی-غربی به کمک تکنیک ترکیبی Ascending و Descending (بازه زمانی ۲۰۱۷-۲۰۲۴)

Fig.9. Earth movement in the east-west direction using the combined Ascending and Descending technique (time period 2017-2024)

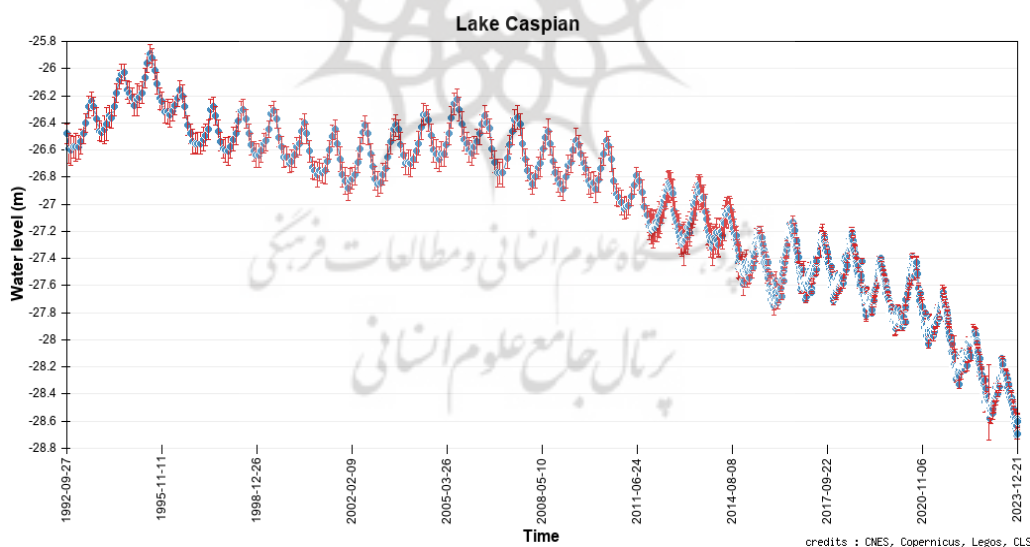
همان‌طور که در شکل ۹ مشخص است بخش عمده جابجایی افقی جلگه چالوس به صورت غربی-شرقی است و تنها بخشهایی به صورت پراکنده دارای جابجایی شرقی-غربی هستند که محدوده این جابجایی‌ها بین ۸۰+ تا ۸۰- میلی‌متر در سال است.

در ادامه برای شناسایی عوامل موثر دیگر در رخداد جابجایی جلگه چالوس، اطلاعات زمین‌شناسی محدوده مورد مطالعه مورد بررسی قرار گرفت که نتایج نشان داد گسل‌های اطراف جلگه چالوس از نوع تراستی هستند که عملکرد آنها موجب برخاستگی منطقه شده است. از طرفی باتوجه به اینکه فرونشستی در منطقه رخ نداده است بنابراین نیازی به بازدید منطقه از نظر بهره‌برداری از معادن و کاربری زمین از جهت بارگذاری سازه‌ها و ساختمان‌های بزرگ و سنگین که از عوامل موثر در رخداد فرونشست زمین هستند، نیست.

تغییرات تراز و خط ساحلی دریای خزر

یکی دیگر از عوامل اثرگذار در تغییر و تحول جلگه ساحلی در منطقه چالوس، تغییرات سطح تراز دریای خزر است که با استفاده از داده‌های تاریخی و مدل‌های پیش‌بینی مورد بررسی قرار گرفت. نتایج بررسی‌ها نشان داد که سطح دریای خزر در طول دوره مطالعه (۲۰۰۰-۲۰۲۳) نوسانات قابل توجهی داشته است. این نوسانات ناشی از تغییرات اقلیمی، میزان بارش، تبخیر و تغییرات ورودی رودخانه‌ها به خصوص رودخانه ولگا به دریای خزر است. افزایش سطح تراز دریا در برخی دوره‌ها منجر به پسروی ساحل شده است، که تأثیرات قابل توجهی بر محیط زیست و زیرساخت‌های ساحلی مانند جاده‌ها، بنادر و تأسیسات گردشگری برجای گذاشته است.

برای ارزیابی تغییرات تراز دریای خزر از سامانه پایش سطح تراز آب دریاها و دریاچه‌های بزرگ جهان (هیدرووب) که توسط داده‌های ارتفاع‌سنج ماهواره‌ای و از طریق الگوریتم خودکار با ترکیب مشاهدات سنجنده‌های مختلف از جمله Sentinel-6، Geosat Follow-On، Jason-1,2,3، SARAL/AltiKa در طول ۳۰ سال، کاهش قابل توجه تراز دریای خزر در کنار تغییرات فصلی پرنوسان را نشان می‌دهد به طوریکه سطح تراز دریا از ۲۶.۶- در سال ۱۹۹۲ به ۲۸.۷- در سال ۲۰۲۳ رسیده است (شکل ۱۰).



شکل ۱۰- تغییرات تراز دریای خزر (سانتی‌متر) مشاهده شده توسط سامانه ارتفاع‌سنج ماهواره‌ای هیدرووب

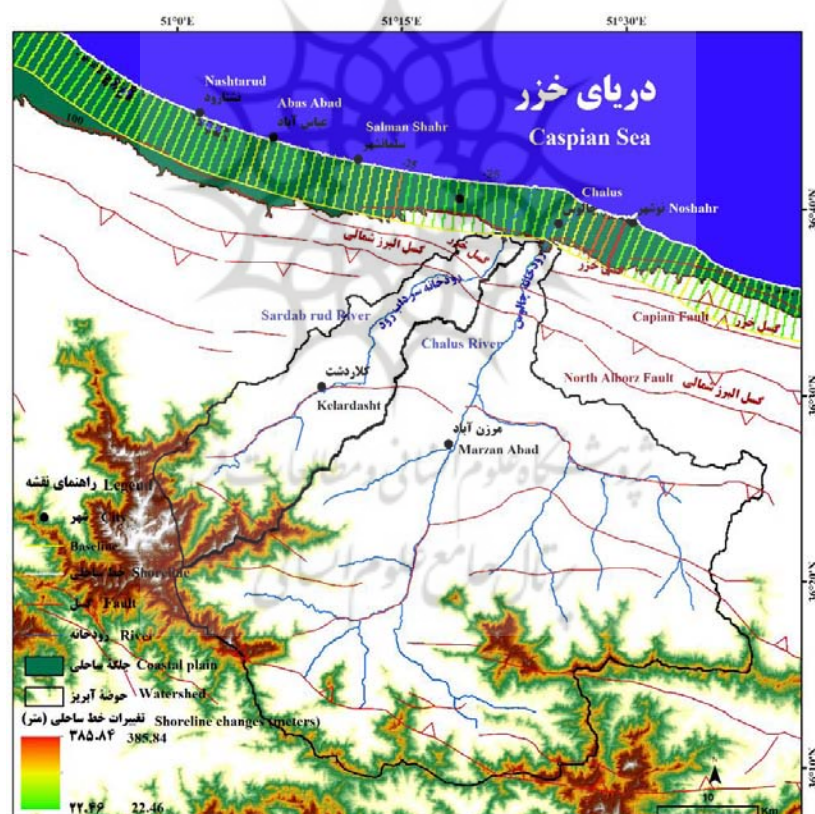
Fig.10. Changes in the level of the Caspian Sea (centimeters) observed by the Hydroweb satellite altimeter system

کاهش تراز دریای خزر در سالهای اخیر که ناشی از کم شدن میلیون‌ها متر مکعب آب دریای خزر است باعث کاهش نیروی فشاری ناشی از آب دریا و شکل گرفتن تعادل ایزوستازی جدیدی در ناحیه شده است.

در سطح جهان نیز مطالعات مشابهی در مناطق ساحلی انجام شده است که بر این موضوع تاکید دارند که نوسانات سطح دریا می‌تواند منجر به تغییرات سطح ساحلی و جابجایی‌های زمین شود. به عنوان مثال، تحقیقات در منطقه دلتای مکونگ توسط سیویتسکی و همکاران (Syvitski et al., 2009) و در منطقه دلتای نیل توسط استنلی و وارن (Stanley & Warne, 1998) نشان داد که افزایش سطح تراز دریا باعث فرسایش ساحلی و جابجایی‌های زمین در این مناطق شده است.

از طرف دیگر کاهش تراز دریای خزر به عنوان سطح اساس رودخانه‌های جلگه خزر باعث افزایش نیروی کاوشی و عمیق شدن کانال رودخانه چالوس و سرداب‌رود شده است که نتیجه آن ورود بیشتر رسوبات به دریای خزر و پیشروی بیشتر ساحل است.

در ادامه برای بررسی اثر کاهش تراز دریای خزر بر تغییرات خط ساحلی در جلگه چالوس با استفاده از افزونه DSAS پرداختیم. برای این امر ابتدا خطی با فاصله یکسان از خطوط ساحلی به عنوان خط مبنا (Baseline) مشخص شد سپس با استفاده از تصاویر ماهواره‌ای Landsat-7,8, Sentinel-2 و آرشیو تصاویر Google earth خطوط ساحلی در بازه زمانی ۱۹۹۲ تا ۲۰۲۴ استخراج و با استفاده از ترانسکت‌های هم فاصله بین خطوط ساحلی و Baseline، تغییرات خط ساحل (SCE^1) در جلگه چالوس تعیین و مشخص شد (شکل ۱۱).

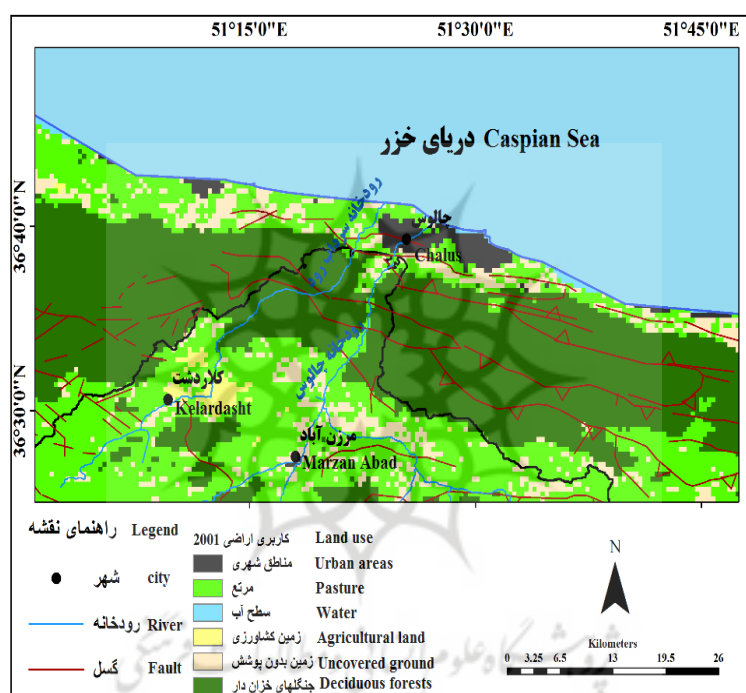


شکل ۱۱- تغییرات خط ساحلی (SCE) در جلگه ساحلی چالوس در بازه زمانی ۱۹۹۲-۲۰۲۴

Fig.11. Shoreline changes (SCALE) in the Chalus coastal plain during the period 1992-2024

1-Shoreline Change Envelope (m)

همانطور که در شکل ۱۰ و شکل ۱۱ مشخص است، همراه با کاهش سطح تراز دریای خزر در ۳۰ سال گذشته، خطوط ساحلی بین ۲۲/۴۶ تا ۳۸۵/۸۴ متر پیشروی کرده است که بیشترین پیشرفت خط ساحلی در دلتای رودخانه چالوس و قسمت شرقی آن تا اسکله نوشهر مشاهده می‌شود. این رویداد نتیجه جریان دینامیک دریای خزر در جهت خلاف عقربه‌های ساعت است که موجب شده جریان‌های رسوبی رودخانه چالوس در پشت دیواره اسکله نوشهر تجمع پیدا کند و پیشروی خط ساحلی در این بخش بیشتر از سایر قسمت‌ها باشد. یکی دیگر از عوامل مؤثر در پیشروی خط ساحلی جلگه چالوس، افزایش بار رسوبی در رودخانه چالوس است که عمدتاً به دلیل تغییرات کاربری زمین و به ویژه تبدیل جنگل‌های انبوه و مراتع به زمین‌های کشاورزی و بدون پوشش رخ داده است. برای بررسی تغییرات کاربری زمین در جلگه چالوس بین سال‌های ۲۰۰۱ تا ۲۰۲۳، از تصاویر سنجنده MODIS و روش نظارت شده (Supervised) در محیط Google Earth Engine استفاده شد (شکل ۱۲ و ۱۳).

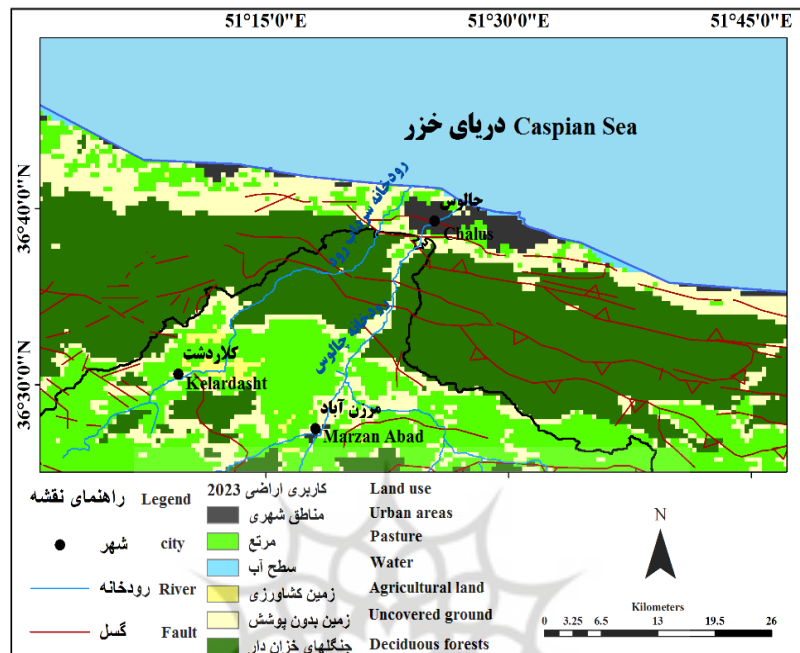


شکل ۱۲- نقشه کاربری اراضی سال ۲۰۰۱ (تصاویر مودیس)

Fig.12. Land use map of 2001 (MODIS images)

همانطور که در شکل ۱۲ و ۱۳ و جدول ۲ مشاهده می‌شود از سال ۲۰۰۱ تا ۲۰۲۳ تغییر پوشش جنگلی به زمین بدون پوشش بخصوص در حاشیه رودخانه چالوس افزایش قابل توجهی داشته است. همچنین توسعه شهری و زیرساخت‌های گردشگری در منطقه نیز گسترش یافته است که این تغییرات به ویژه در مناطق ساحلی و نواحی نزدیک به جاده‌های اصلی مشاهده می‌شود. تحلیل داده‌های Landsat-7,8 و Sentinel-2 نشان داد که مساحت زمین‌های بدون پوشش در دشت چالوس از سال ۲۰۰۱ تا ۲۰۲۳ به شدت افزایش یافته است (جدول ۲). این تغییرات کاربری باعث کاهش نفوذپذیری زمین و افزایش رواناب سطحی شده است. عمده این تغییرات که ناشی از دخالت انسان در تخریب و تغییر کاربری اراضی است در سال‌های اخیر باعث افزایش رخداد سیل و طغیان رودخانه چالوس شده است که نتیجه آن افزایش چشمگیر فرسایش و ورود رسوبات آبرفتی به جریان ورودی دریای خزر بوده است.

بنابراین می‌توان نتیجه گرفت یکی از دلایل پیشروی ساحل و گسترش دلتای رودخانه در جلگه چالوس تغییرات کاربری اراضی و کاهش پوشش گیاهی در حوضه آبریز چالوس است.



شکل ۱۳- نقشه کاربری اراضی سال ۲۰۲۳ (تصاویر مودیس)

Fig.13. Land use map for 2023 (MODIS images)

جدول ۲- تغییرات مساحت کاربری اراضی (کیلومتر مربع)

Table 2- Changes in land use area (KM²)

کاربری اراضی Land use	مساحت سال ۲۰۰۱ Area in 2001	مساحت سال ۲۰۲۳ Area in 2023	تغییر مساحت Change Area
Urban areas مناطق شهری	(0.168)	(0.237)	(0.069)
Pasture مرتع	(3.807)	(2.913)	(-0.894)
Water آب	(3.394)	(3.338)	(-0.056)
Agricultural land زمین کشاورزی	(0.0593)	(0.0448)	(-0.0082)
Uncovered ground زمین بدون پوشش	(0.731)	(1.7305)	(0.9995)
Deciduous forests جنگلهای خزان دار	(4.293)	(4.189)	(-0.104)

نتیجه‌گیری

در این تحقیق، عوامل مختلف تأثیرگذار بر تغییرات جلگه ساحلی چالوس مورد بررسی قرار گرفت. برای این امر ابتدا جلگه ساحلی چالوس با استفاده از تداخل‌سنجی راداری از نظر جابجایی‌ها (فرونشست و بالآمدگی) مورد بررسی و پایش قرار گرفت که نتایج نشان داد به طور میانگین بین ۲+ تا ۸+ میلی‌متر در سال دچار جابجایی شده است و بخش عمده مساحت جلگه دارای برخاستگی است.

با توجه به اینکه تأثیر بارگذاری سازه‌های سنگین و بهره‌برداری از معادن تنها در فرونشست زمین موثر است و نتایج پایش راداری و ژئودینامیک تنها برخاستگی زمین در محدوده مورد مطالعه را نشان می‌دهد بنابراین این عوامل از فاکتورهای موثر در جابجای سطح جلگه چالوس حذف و در پژوهش مورد بررسی قرار نگرفت.

همچنین بررسی وضعیت سطح تراز آبهای زیرزمینی در جلگه چالوس نشان داد که تغییرات سطح تراز آب زیرزمینی در این ناحیه بسیار ناچیز است و در بیشتر قسمت‌ها، به ویژه در جلگه چالوس، سطح آب زیرزمینی در چند سال اخیر حدود ۳/۹۹ سانتی‌متر افزایش یافته است. بنابراین، جابجایی‌های مشاهده شده در جلگه چالوس با تغییرات سطح آب زیرزمینی، به جزء دربرخی پهنه‌های کوچک محلی، ارتباطی ندارد.

در ادامه وضعیت ژئوستاتیک منطقه، شبکه گسل‌ها و تاریخچه زمین‌لرزه‌ها در صده گذشته مورد بررسی قرار گرفت که نتایج نشان داد در سالهای اخیر فعالیت گسلهای فعال خزر و البرز شمالی موجب وقوع زمین‌لرزه‌های متعدد با بزرگای بیش از ۴ ریشتر شده است. مجموع این داده‌ها نشان می‌دهد که جلگه چالوس از نظر ژئوستاتیکی فعال است و سازوکار گسلهای منطقه از نوع تراستی است که نتیجه عملکرد آنها موجب برخاستگی منطقه شده است.

همچنین بررسی تغییرات سطح تراز دریای خزر به عنوان یکی دیگر از عوامل موثر در تغییرات جلگه چالوس در ۳۰ سال گذشته نشان‌دهنده یک روند کاهشی قابل توجه در کنار تغییرات فصلی پرنوسان است به طوریکه سطح تراز دریا از ۲۶/۶- در سال ۱۹۹۲ به ۲۸/۷- در سال ۲۰۲۴ افت کرده است. پیامد این تغییر سطح اساس افزایش عمق بستر رودخانه‌ها و پیشروی خطوط ساحلی در جلگه چالوس بین ۲۲/۴۶ تا ۳۸۵/۸۴ متر بوده است که بیشترین پیشروی در دهانه رودخانه چالوس و بخش شرقی آن تا اسکله نوشهر رخ داده است.

در نهایت تغییرات کاربری زمین در حوضه آبریز چالوس در ۲۳ سال گذشته نشان داد مساحت جنگل‌های متراکم بخصوص در حاشیه رودخانه چالوس کاهش قابل توجه داشته است؛ همچنین مراتع و حاشیه‌های جنگل‌ها به تدریج به زمین‌های بدون پوشش و سازه‌های انسان ساخت تبدیل شده‌اند که باعث افزایش رخداد سیلاب و فرسایش و تولید رسوب بیشتر در رودخانه چالوس شده است که نتیجه آن توسعه و پیشروی دلتای رودخانه چالوس در دریای خزر بوده است.

نتایج به دست آمده از پردازش راداری، داده‌های ژئودینامیک، تغییرات سطح تراز آب‌های زیرزمینی، فعالیت‌های ژئوستاتیکی، تغییرات ژئوستاتیکی دریای خزر و تغییرات کاربری زمین، نشان می‌دهد جلگه چالوس در دو دهه گذشته تحت تأثیر فعالیت ژئوستاتیکی دچار برخاستگی شده و از طرف دیگر خط ساحلی چالوس در نتیجه تغییرات کاربری و افزایش بار رسوب رودخانه و کاهش تراز سطح دریای خزر به سمت دریا پیشروی قابل توجهی داشته است که نتیجه آن از نظر زیست محیطی و خسارت‌های اقتصادی قابل توجه است.

پیشنهادهای: با توجه به اینکه برخی عوامل انسانی ارتباط مستقیم با کاهش تراز دریای خزر (ایجاد سد بر ورودی‌های دریای خزر) و افزایش بار رسوبی رودخانه‌های (تغییرات کاربری و کاهش مساحت پوشش جنگلی) منتهی به جلگه ساحلی خزر دارند بنابراین احیای پوشش گیاهی و جنگلی در حوضه آبریز چالوس جهت کاهش فرسایش و تولید رسوب و پیگیری دیپلماسی برای دادن حق آبه دریای خزر توسط کشورهای ذینفع بخصوص کشور روسیه می‌تواند مشکلات به وجود آمده را برطرف کند.

References

- Berardino, P., Fornaro, G., Lanari, R., & Sansosti, E. (2002). A new algorithm for surface deformation monitoring based on small baseline differential SAR interferograms. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 40(11), 2375-2383. <https://doi.org/10.1109/TGRS.2002.803792>
- Bird, E. (1999). *Coastal geomorphology: an introduction*. Wiley. <https://www.wiley.com/en-ae/Coastal+Geomorphology%3A+An+Introduction%2C+2nd+Edition-p-9780470517291>
- Cigna, F., Osmanoğlu, B., Cabral-Cano, E., Dixon, T. H., Ávila-Olivera, J. A., Garduño-Monroy, V. H., ... & Wdowinski, S. (2012). Monitoring land subsidence and its induced geological hazard with Synthetic Aperture Radar Interferometry: A case study in Morelia, Mexico. *Remote Sensing of Environment*, 117, 146-161. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2011.09.005>
- Dai, Z., Mei, X., Darby, S. E., Lou, Y., & Li, W. (2018). Fluvial sediment transfer in the Changjiang (Yangtze) river-estuary depositional system. *Journal of Hydrology*, 566, 719-734. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2018.09.019>
- Davis, W. M. (1973). The Geographical Cycle. In: Derbyshire, E. (eds) Climatic Geomorphology. The Geographical Readings Series. London: Palgrave. https://doi.org/10.1007/978-1-349-15508-8_2
- Doranti-Tiritan, C., Hackspacher, P. C., de Souza, D. H., & Siqueira-Ribeiro, M. C. (2014). The use of the stream length-gradient index in morphotectonic analysis of drainage basins in Poços de Caldas Plateau, SE Brazil. *International Journal of Geosciences*, 5(11), 1383-1394. <http://dx.doi.org/10.4236/ijg.2014.511112>
- Fathollahzadeh, M., Yamani, M., Goorabi, A., Maghsoudi, M., & Ghadimi, M. (2024). Identifying the active tectonic areas of the eastern Caspian coast using radar remote sensing. *Scientific-Research Quarterly of Geographical Data (SEPEHR)*, 33(130), 65-78. <https://doi.org/10.22131/sepehr.2024.2009124.3010>
- Goorabi, A., Karimi, M., Yamani, M., & Perissin, D. (2020). Land subsidence in Isfahan metropolitan and its relationship with geological and geomorphological settings revealed by Sentinel-1A InSAR observations. *Journal of Arid Environments*, 181, 104238. <https://doi.org/10.1016/j.jaridenv.2020.104238>
- Hussain, M. A., Chen, Z., Shoaib, M., Shah, S. U., Khan, J., & Ying, Z. (2022). Sentinel-1A for monitoring land subsidence of coastal city of Pakistan using Persistent Scatterers In-SAR technique. *Scientific Reports*, 12(1), 5294. <https://doi.org/10.1038/s41598-022-09359-7>
- Kanwal, S., Ding, X., Wu, S., & Sajjad, M. (2022). Vertical ground displacements and its impact on erosion along the Karachi coastline, Pakistan. *Remote Sensing*, 14(9), 2054. <https://doi.org/10.3390/rs14092054>
- Keller, E. A., & Pinter, N. (2002). *Active Tectonics: Earthquakes, Uplift and Landscape*. Prentice Hall. https://books.google.com/books/about/Active_Tectonics.html?id=sXASAQAAIAAJ
- Lazecký, M., Spaans, K., González, P. J., Maghsoudi, Y., Morishita, Y., Albino, F., ... & Wright, T. J. (2020). LiCSAR: An automatic InSAR tool for measuring and monitoring tectonic and volcanic activity. *Remote Sensing*, 12(15), 2430. <https://doi.org/10.3390/rs12152430>
- Ranjbar Barough, Z., & Fathollahzadeh, M. (2022). Investigation of land subsidence, using time series of radar images and its relationship with groundwater level changes (Case study: Karaj metropolis). *Quantitative Geomorphological Research*, 10(4), 138-155. [In Persian] <https://dor.isc.ac/dor/20.1001.1.22519424.1401.10.4.8.3>
- Shi, X., Liao, M., Li, M., Zhang, L., & Cunningham, C. (2016). Wide-area landslide deformation mapping with multi-path ALOS PALSAR data stacks: A case study of three gorges area, China. *Remote Sensing*, 8(2), 136. <https://doi.org/10.3390/rs8020136>

- Shirzaei, M., Freymueller, J. T., Törnqvist, T. E., Galloway, D. L., Dura, T., & Minderhoud, P. S. J. (2021). Measuring, modelling and projecting coastal land subsidence. *Nature Reviews Earth & Environment*, 2(1), 40-58. <https://doi.org/10.1038/s43017-020-00115-x>
- Stanley, D. J., & Warne, A. G. (1998). Nile Delta in its destruction phase. *Journal of Coastal Research*, 14(3), 795-825. <https://www.jstor.org/stable/4298835>
- Stanley, J. D. (2005). Growth faults, a distinct carbonate-siliciclastic interface and recent coastal evolution, NW Nile Delta, Egypt. *Journal of Coastal Research*, 42, 309-318. <https://www.jstor.org/stable/25736997>
- Stanley, J. D., & Clemente, P. L. (2014). Clay distributions, grain sizes, sediment thicknesses, and compaction rates to interpret subsidence in Egypt's northern Nile Delta. *Journal of Coastal Research*, 30(1), 88-101. <https://doi.org/10.2112/JCOASTRES-D-13-00146.1>
- Syvitski, J. P., Kettner, A. J., Overeem, I., Hutton, E. W., Hannon, M. T., Brakenridge, G. R., ... & Nicholls, R. J. (2009). Sinking deltas due to human activities. *Nature Geoscience*, 2(10), 681-686. <https://doi.org/10.1038/ngeo629>
- Wang, H., Wright, T. J., Yu, Y., Lin, H., Jiang, L., Li, C., & Qiu, G. (2012). InSAR reveals coastal subsidence in the Pearl River Delta, China. *Geophysical Journal International*, 191(3), 1119-1128. <https://doi.org/10.1111/j.1365-246X.2012.05687.x>

