https://doi.org/10.22131/SEPEHR.2024.2009124.3010

Scientific - Research Quarterly

Geographical Data (SEPEHR) Vo.33,No.130, Summer 2024

P.P 65-78

Identifying the active tectonic areas of the eastern Caspian coast using radar remote sensing

Mohamad Fathallahzadeh*[1] , Mojtaba Yamani[2] , Abolghasem Goorabi[3], Mehran Maghsoodi[4], Mehrnoosh Ghadimi[5]

Date of receive:
2023/09/01
Date of last review:
2024/01/26
Date of accept:
2024/04/16
Date of online publication:
2024/04/20

Keywords:
Morphotectonics,
Coast,
Caspian plain,
Radar interferometry,
Geodynamics

Extended Abstract

Introduction

The landforms created by tectonic processes are studied by morphotectonics, in other words, morphotectonics is the science of applying geomorphic principles in solving tectonic problems. Quantitative landscape measurements are usually based on the calculation of geomorphic indices, using topographic maps, satellite images aerial photographs, and field visits. Coastal deltas are part of landforms and landscapes that, due to the proximity of two environments, land, and water, leave visible effects against tectonic activities, such as changing the pattern and location 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 seawalls.One of the methods of identifying and measuring land changes is using radar remote sensing. The principles of this technique were first described by Graham in 1974 (Pacheco et al., 2006). Interferometry using radar images with an artificial window or SAR is a precise method based on the use of at least two radar images of the same area, which measures the height displacement changes in wide areas and during different time intervals with a significant accuracy of millimeters (Dong et al., 2018).The coastal areas of northern Iran are of great importance due to the high population density and the ability to grow and develop economically and agriculturally, so monitoring geomorphic changes in the direction of sustainable development of these areas is particularly important. In this research, the eastern coast of the Caspian Sea from Gomishan to Joibar is investigated in terms of subsidence and uplift using radar remote sensing techniques to determine the active tectonic zones of the coast in terms of temporal and spatial changes.

Materials & Methods

The Eastern Caspian Plain is the border between the Caspian Sea and West Gorgan and includes the cities of Gomishan, Bandare Turkman, Bandare Gaz, Gulugah, Khazarabad, and Joybar. The absolute height of the Caspian Plain along the coastline is determined according to the sea level, based on the hydrographic data of the Baku station, since 1850, the Caspian sea level has varied between -25.4 and -29.4 (Abdolhi Kakrodi, 2012). ... Page 66

1- (*Corresponding author) Phd Student, Geomorphology, University of Tehran, fathallahzadeh.m@ut.ac.ir
2- Professor, Geomorphology, University of Tehran, myamani@ut.ac.ir
3- Associate Professor, Geomorphology, Tehran University,goorabi@ut.ac.ir
4- Associate Professor, Geomorphology, Tehran University,maghsoud@ut.ac.ir
5- Assistant Professor, Geomorphology, Tehran University,ghadimi@ut.ac.ir

The history of seismic activity in North Alborz shows that cities like Rasht, Lahijan, Amol, and Gorgan, have been destroyed many times due to destructive earthquakes (Aqhanbati, 2013). The Alborz fault is an active fault that is stretched in a clockwise direction in the southern Caspian basin.In this research, according to the desired goals and radar remote sensing techniques, a series of Sentinel-1 radar images with a suitable time and space difference (maximum 30 days and maximum 150 meters respectively) including 61 images in time from 2014 to 2021 were prepared and processed.

Results

The results obtained from the SBAS model indicate that the eastern part of the Caspian coast is more affected by the uplift and this trend continues up to Gorgan Bay. The Gorgan city has an uplift between 20 and 40 mm/ year, which is reversed towards the coastal area, and subsidence of 10 to 52 mm/year occurs, which decreases as it approaches the coast and reaches 10 mm /year.

Discussion, Conclusion

According to the results obtained from radar interferometry, the eastern coast of the Caspian Sea is more affected by uplifting. The Gorgan city has an uplift between 20 and 40 mm/year, which is reversed towards the coastal area, and subsidence of 10 to 52 mm/year occurs, which decreases as it approaches the coast and reaches 10 mm/year. To verify the results obtained, the data of the Gorgan geodynamic station was used, which shows subsidence of about 90 to 100 mm in a 6-year period, which is consistent with the values obtained from radar interferometry Based on comments Shahpasandzadeh (2013) and the reports of Nazari et al (2021), active tectonics caused by the Caspian fault that indicates the horizontal geodynamic displacement diagram of Gorgan, the small area towards the north and east during this time, which is observed in the form of numerous branches with a thrust (reverse) mechanism and a right-slip component with a slope to the south in Golestan province.

Considering that the main feature of the coast of the Caspian Sea is the Surface rivers and the use of groundwater is very little and also the extraction of gas, oil, and mining resources, which is another factor in the occurrence of land subsidence, does not exist in this area, and there isn't also huge and heavy structure in the study area that affects the subsidence of the surface; so displacement in the study area is the result of active tectonics.

https://doi.org/10.22131/SEPEHR.2024.2009124.3010

فصلنامه علمی - پژوهشی

اطلاعات جغرافیایی (سپهر) دوره۳۳، شماره ۱۳۰، تابستان ۱۴۰۳

صفحات ۷۸ - ۶۵

شناسایی مناطق فعال تکتونیکی ساحل شرقی خزر با استفاده از سنجش از دور راداری

محمد فتح‌اله‌زاده[۱]، مجتبی یمانی[۲]، ابوالقاسم گورابی[۳]، مهران مقصودی[۴]، مهرنوش قدیمی[۵]

تاریخ دریافت:
۱۴۰۲/۰۶/۱۰
تاریخ آخرین بازنگری:
۱۴۰۲/۱۱/۰۶
تاریخ پذیرش:
۱۴۰۳/۰۱/۲۸
تاریخ انتشار:
۱۴۰۳/۰۲/۰۱

چکیده

مورفوتکتونیک، دانش کاربرد اصول ژئومورفیک در حل مسائل تکتونیکی است. رقابت مداوم بین فرآیندهای تکتونیکی که تمایل به ایجاد توپوگرافی دارند و فرآیندهای سطحی که تمایل به فرسایش و متلاشی کردن آن‌ها دارند، اساس علم مورفوتکتونیک است. جلگه‌های ساحلی به‌دلیل عملکرد همزمان فعالیت‌های تکتونیکی بر دو محیط خشکی_آبی، دارای لندفرم‌ها و چشم‌اندازهای نوزمین‌ساختی قابل تمایزی هستند. مناطق ساحلی شمال ایران به‌دلیل تراکم بالای جمعیت و قابلیت رشد و توسعه اقتصادی و کشاورزی، از اهمیت بسیاری برخوردار است. یکی از روش‌های شناسایی و اندازه‌گیری تغییرات زمین استفاده از دورسنجی راداری است. اصول این تکنیک برای اولین بار توسط گراهام در سال ۱۹۷۴ بیان شد. در این پژوهش نوار ساحل شرقی دریای خزر از گمیشان تا جویبار از نظر فعالیت‌های تکتونیکی با استفاده از تکنیک‌های دورسنجی راداری در بازهٔ زمانی ۲۰۱۴ تا ۲۰۲۱ مورد پایش قرار گرفت. اگرچه بازه زمانی انتخابی در مقیاس زمانی زمین‌شناسی کوچک محسوب می‌شود، اما شدت عملکرد فرایندهای تکتونیک در منطقه امکان تمایز مناطق فعال ساحلی را مشخص می‌کند. نتایج به‌دست آمده از تداخل‌سنجی راداری بیانگر آن است که بخش شرقی ساحل خزر بیشتر تحت‌تأثیر بالاآمدگی بوده و این روند تا خلیج گرگان ادامه دارد به‌طوری‌که محدودهٔ شهر گرگان نرخ بالا آمدگی ۲۰ تا ۴۰ میلی‌متر در سال را تجربه کرده است. روند تغییر شکل به سمت ناحیه ساحلی معکوس شده و فرونشستی معادل ۱۰ تا ۵۲ میلی‌متر در سال را داشته است. با نزدیک شدن به کرانه خزر این نرخ کمتر شده و به ۱۰ میلی‌متر در سال می‌رسد. با توجه به اینکه در نوار ساحلی خزر آب‌های سطحی فراوان بوده و بهره‌برداری از آب زیرزمینی در این مناطق بسیار اندک است، از این رو با اطمینان بالایی می‌توان عامل رخداد بالاآمدگی و فروافتادگی (گمیشان) در این مناطق را به سازو کار تکتونیک و فعالیت گسل‌های فعال منطقه نسبت داد.

****

واژه‌های کلیدی:
مورفوتکتونیک،
ساحل،
جلگه خزر،
تداخل‌سنجی راداری،
ژئودینامیک

۱- دانشجوی دکتری ژئومورفولوژی گروه جغرافیای طبیعی، دانشکده جغرافیا، دانشگاه تهران (نویسنده مسئول) fathallahzadeh.m@ut.ac.ir
۲- استاد گروه جغرافیای طبیعی، دانشکده جغرافیا، دانشگاه تهران myamani@ut.ac.ir
۳- دانشیار گروه جغرافیای طبیعی، دانشکده جغرافیا، دانشگاه تهران goorabi@ut.ac.ir
۴- دانشیار گروه جغرافیای طبیعی، دانشکده جغرافیا، دانشگاه تهران maghsoud@ut.ac.ir
۵- استادیار گروه جغرافیای طبیعی، دانشکده جغرافیا، دانشگاه تهران ghadimi@ut.ac.ir

مقدمه

لندفرم‌های ایجادشده از طریق فرآیندهای تکتونیکی توسط علم ژئومورفولوژی تکتونیک یا مورفوتکتونیک مطالعه می‌شود، به‌عبارت دیگر مورفوتکتونیک، علم کاربرد اصول ژئومورفیک در حل مسائل تکتونیک است.

اندازه‌گیری‌های کمّی چشم‌اندازها معمولاً براساس محاسبهٔ شاخص‌های ژئومورفیک و با استفاده از نقشه‌های توپوگرافی، تصاویر ماهواره‌ای و عکس‌های هوایی و بازدیدهای میدانی صورت می‌گیرد. رقابت مداوم بین فرآیندهای تکتونیکی که تمایل به ایجاد توپوگرافی دارند و فرآیندهای سطحی که تمایل به فرسایش و متلاشی کردن آن‌ها دارند، اساس علم مورفوتکتونیک است ***(Burbank&Anderson, 2001)***.

دلتاهای ساحلی جزء لندفرم‌ها و چشم‌اندازهایی هستند که به‌دلیل 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 به‌دلیل تغییر مسیر رودخانه‌های ساحلی، شکل‌گیری تراس‌های ساحلی نامتوازن در بخش‌هایی از ساحل و به‌وجود آمدن سواحل بریده‌شده به‌صورت دریا بار می‌توان اشاره کرد. ژئومورفولوژی ساحلی در مورد شکل‌گیری اشکال ساحلی (لندفرم‌ها)، فرآیندهای حاکم بر آن‌ها و تغییرات صورت گرفته بر روی آن‌ها بحث می‌کند ***(Bird, 1999)***. خطوط ساحلی برای مطالعات تکتونیک فعال بسیار کاربردی هستند، زیرا بسیاری از لندفرم‌های ساحلی به‌صورت خطوط ایزوکرون (خطوط زمان) عمل می‌کنند و به ما اجازه می‌دهند تا سن گسل خوردگی یا سایر رویدادهای دگرشکلی را تخمین بزنیم.

ویژگی یک خط ساحلی تابع متغیرهای زیادی است، اما چهار مورد از آن‌ها به این شرح برجسته‌تر هستند: ۱- وضعیت تکتونیک محلی ۲- عرضهٔ رسوب ۳- مقدار انرژی فرسایشی و ٤- ماهیت و مقدار فعالیت‌های زیستی ***(Keller&Pinter, 1996)***. بیش از نیمی از جمعیت جهان در نواحی ساحلی زندگی می‌کنند و عدهٔ زیادی از مردم برای تفریح به ساحل می‌روند چرا که چشم‌اندازهای ساحلی برای برخی از آن‌ها بسیار شگفت‌انگیز است ***(Bird, 1999)***. محیط‌های ساحلی از حساس‌ترین سیستم‌های محیطی به‌شمار می‌روند که تحت‌تأثیر فرآیندهای هیدرودینامیکی حاکم، تغییر و تحول در آن‌ها نسبتاً سریع بوده و شاید از این نظر قابل‌مقایسه با سایر سیستم‌های ژئومورفولوژی نباشند ***(نوحه‌گر و یمانی، ۱۳۸٦)***.

سرزمین ایران، به‌عنوان بخشی از زون فعال تکتونیکی آلپ–هیمالیا، طرح پیچیده‌ای از مجموعهٔ پوسته‌ها، قطعات تکتونیکی و زون‌های متفاوت تکتونیکی است که از نگاه تکتونیکی ویژگی‌های خاصی دارد و دارای پوسته‌ای به‌شدت خردشده و تکتونیزه است که در دوره‌های مختلف زمین‌شناسی فعالیت‌های کوه‌زایی عمده‌ای را پشت سر گذاشته است. عوارض ناشی از این حرکات کوه‌زایی در دوران کواترنری، سبب ایجاد شمار زیادی گسل جوان و پویا در بخش‌های مختلف آن شده است ***(روستایی و همکاران، ۱۳۹٤)***. یکی از مکان‌هایی که در نتیجهٔ این فعالیت‌های تکتونیکی تحت‌تأثیر قرار می‌گیرد سواحل هستند که بسته به خصوصیات زمین‌شناسی و موقعیت آن‌ها می‌تواند مانند سواحل مکران بسیار فعال باشند و یا فعالیت و لندفرم‌های ناشی از آن همانند سواحل دریای خزر چندان چشمگیر و به وضوح قابل رؤیت نباشند. از شواهدی که تکتونیک فعال را در سواحل دریای خزر به اثبات می‌رساند، می‌توان به‌وجود شبکهٔ گسلی نسبتاً متراکم و فعال در این ناحیه و رخداد زمین‌لرزه‌های متناوب و گاهی باقدرت تخریبی بالا اشاره کرد.

ناحیهٔ ساحلی خزر به‌دلیل 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 توسعهٔ روزافزون و سریع منطقه و رشد جمعیت در آن شده است. یکی از مسائل طبیعی این ناحیه تغییرات خطوط ساحلی در نتیجهٔ تغییرات تراز آب دریا است که خود نتیجهٔ تغییرات

ائوستاتیک و ژئوستاتیک ساحل و دریا است. این تغییرات در یک قرن اخیر بسیار نامنظم بوده و در برخی اوقات موجب پیشروی و گاهی نیز موجب عقب‌نشینی ساحل شده است که در هر دو حالت باعث آسیب‌ها و تحمیل هزینه‌هایی به ساکنین این مناطق شده است.

یکی از روش‌های شناسایی و اندازه‌گیری تغییرات زمین استفاده از دورسنجی راداری است. اصول این تکنیک برای اولین بار توسط گراهام در سال ۱۹۷٤ بیان شد (*Pacheco et al., 2006*) تداخل‌سنجی با بهره‌گیری از تصاویر راداری با پنجرهٔ مصنوعی یا SAR[1] روش دقیقی مبتنی بر استفاده از حداقل دو تصویر راداری از یک منطقه بوده و قادر است با دقت قابل‌توجهی در حد میلی‌متر تغییرات جابه‌جایی ارتفاعی در سطوح وسیع و در طی بازه‌های زمانی مختلف را اندازه‌گیری نماید (*Dong et al., 2018*). به‌منظور اندازه‌گیری جابه‌جایی سطح زمین، روش تداخل‌سنجی راداری با پنجره مصنوعی (InSAR[2]) در سال‌های اخیر به‌عنوان یکی از روش‌های غیر ژئودیتیک مورد توجه بسیاری قرارگرفته است (*Prati et al., 2010*). با توجه به اهمیت موضوع پایش تغییرات سواحل در طی سال‌های اخیر تحقیقات متعددی در سطح ایران و جهان صورت گرفته است که در ادامه به تشریح پاره‌ای از آن‌ها پرداخته خواهد شد:

در سطح بین‌المللی پژوهشگرانی از جمله (Alexakis et al., 2019) در تحقیقی به پایش تغییرات سطح آب دریاچه‌های آجیا و کورناس در غرب یونان با استفاده از تداخل‌سنجی راداری پرداختند. آن‌ها در پژوهش خود از سری تصاویر Sentinel_1 و Landsat_8 استفاده کردند که نتایج به‌دست‌آمده قابل‌قبول بود و نشان داد از این روش می‌توان در مطالعات هیدرولوژیک بخصوص در بحث بررسی تغییرات تراز آب استفاده کرد.

(Goorabi et al., 2020) در پژوهشی با استفاده از سری تصاویر Sentinel-1 و روش PS به بررسی فرونشست در کلان‌شهر اصفهان در بازهٔ زمانی ۲۰۱٤ 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 شمال‌شرق و شرق روند افزایشی دارد.

(Haghshenas Haghighi& Motagh, 2021) به بررسی خطر فرونشست زمین در ایران براساس تحلیل مقیاس کشوری پرداختند. در این تحقیق با استفاده از ٦٦ تصویر Sentinel-1 از سال ۲۰۱٤ تا ۲۰۱۷ ، فرونشست زمین در سراسر ایران بررسی و برای اولین بار نقشهٔ جامعی از فرونشست زمین در ایران تهیه شد و توزیع فضایی بزرگی آن را تشخیص داده و به تحلیل سری زمانی تغییر شکل بصورت کمی پرداختند. نتایج این تحقیق نشان داد بخش‌هایی از جاده‌ها و راه‌آهن در دو شهر پر جمعیت کشور، تهران و مشهد در معرض خطر فرونشست قرار دارند.

در سطح کشور نیز پژوهشگرانی از جمله پیری و رحمانی (۱۳۹۵) به بررسی میزان فرونشست شمال دریاچهٔ ارومیه با استفاده از روش تداخل‌سنجی راداری پرداختند. در این تحقیق از تصاویر Envisat در بازهٔ زمانی ۲۰۱۰-۲۰۰۹ استفاده شد که نتایج حاصل از آن میزان حداکثر ٦ سانتی‌متر و حداقل ۳ سانتی‌متر فرونشست را در دشت تسوج در بازهٔ زمانی یک‌ساله را نشان می‌دهد.

تورانی و همکاران (۱۳۹۷) به ارزیابی فرونشست شهر گرگان با استفاده از روش تداخل‌سنجی راداری پرداختند. در این تحقیق تصاویر راداری Envisat مورد استفاده قرار گرفت. نتایج تحقیق بیانگر آن است که میزان فرونشست منطقه از سال ۱۳۸۵ تا ۱۳۸۹ حدود ٤/۸ سانتی‌متر بوده است که با توجه به اینکه نمودارهای تراز سطح آب و میزان بارندگی گرگان در سال‌های ۱۳۸۵ تا ۱۳۸۹ روند نزولی داشته، می‌توان گفت یکی از علل اصلی فرونشست رخ داده، ناشی از افت سطح آب‌های زیرزمینی شهر گرگان است.

حاج کریمی و همکاران (۱۳۹۹) به ارزیابی تکتونیک فعال حوضه آبریز گرگان‌رود در دامنهٔ شرقی تالش با استفاده از شاخص‌های ژئومورفیک پرداختند. مقادیر به‌دست آمدهٔ شاخص (Iat) حوضهٔ گرگان‌رود نشان می‌دهد این

1- Synthetic Aperture Radar
2- Interfrometric Synthetic Aperture Radar

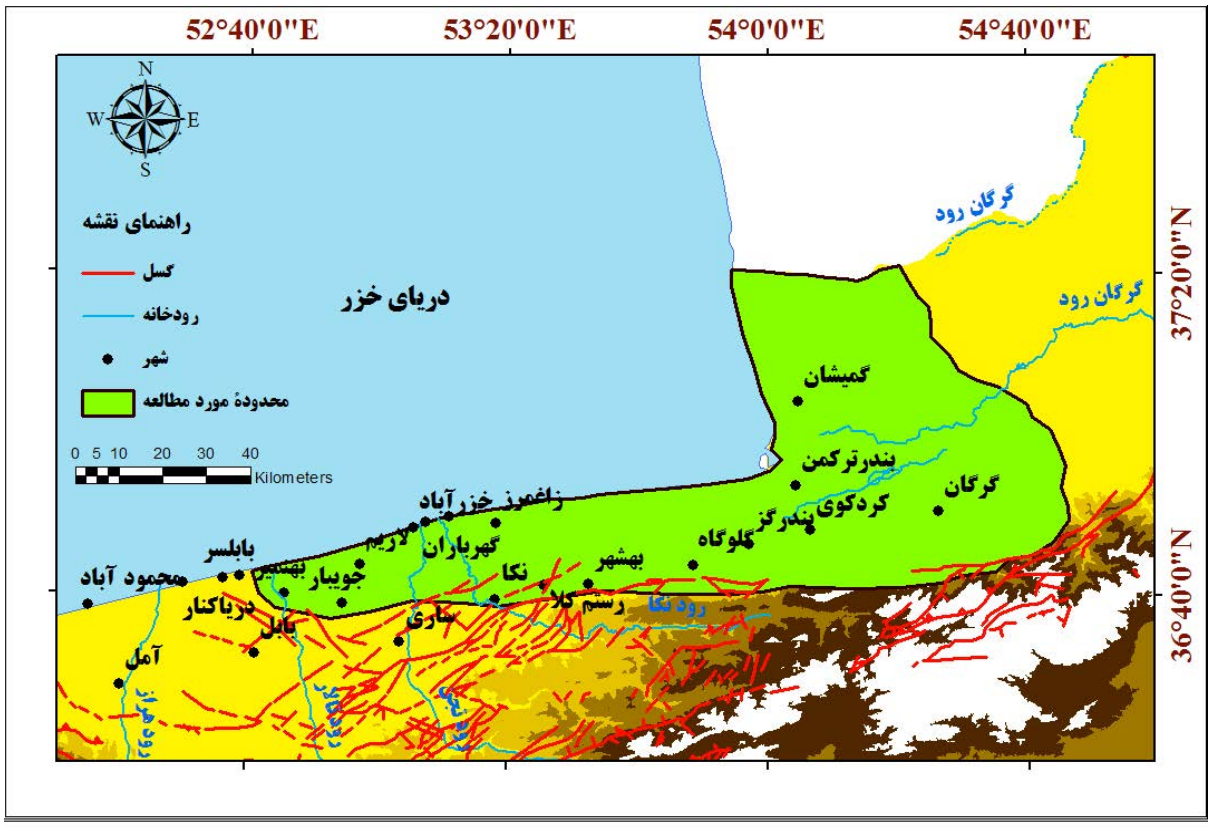
حوضه در کلاس فعالیت‌های نئوتکتونیکی زیاد قرار دارد و پادگانه‌های رودخانه‌ای ارتفاع یافته، وجود تراس‌های قدیمی و آبراهه‌های عمیق شده و دره‌های V شکل شواهد ژئومورفولوژیکی به‌دست آمده در این حوضه است که فعال بودن منطقه از نظر تکتونیکی را تأیید می‌کند.

در این پژوهش نوار ساحل شرقی دریای خزر از گمیشان تا جویبار از نظر فرونشست و بالاآمدگی با استفاده از تکنیک‌های سنجش از دور راداری به منظور مشخص کردن پهنه‌های فعال تکتونیکی این بخش از ساحل، از نظر دامنه تغییرات زمانی و مکانی مورد بررسی قرار می‌گیرد.

منطقه مورد مطالعه

جلگهٔ شرقی خزر محدودهٔ بین دریای خزر و غرب گرگان است که شامل شهرهای گمیشان، بندر ترکمن، بندر گز، گلوگاه، خزرآباد و جویبار است (نگاره۱). به‌طورکلی جلگهٔ خزر از آبرفت‌گذاری رودهای این ناحیه در حاشیهٔ دریای خزر به‌وجود آمده و سطح هموار و یکنواخت از ویژگی‌های آن است. ارتفاع مطلق جلگهٔ خزر در کنارهٔ خط ساحلی با توجه به تراز آب دریا تعیین می‌شود که براساس داده‌های آب‌نگاری ایستگاه باکو از ۱۸۵۰ تاکنون تراز آب دریای خزر بین ۲۵/٤- تا ۲۹/٤- متغیر بوده است *(عبدالهی کاکرودی، ۱۳۹۲)*.

زمین‌شناسی: جلگهٔ خزر در تقسیم‌بندی‌های ساختمانی ایران، جزئی از البرز شمالی یعنی واحد گرگان-رشت است *(درویش‌زاده، ۱۳۸۲)*. این واحد توسط گسل البرز، گسل لاهیجان و گسل تالش از واحد البرز مرکزی جدا می‌شود *(علایی طالقانی، ۱۳۹٤)*. تاریخچهٔ فعالیت لرزه‌خیزی البرز شمالی نشان می‌دهد شهرهایی مانند رشت، لاهیجان، آمل، گرگان و.. در اثر زمین‌لرزه‌های مخرب بارها ویران شده‌اند *(آقانباتی، ۱۳۸۳)*. گسل البرز یک گسل فعال است که



نگاره۱: موقعیت جغرافیایی منطقهٔ مورد مطالعه

به‌صورت رشته‌ای ساعتگرد در حوضهٔ جنوبی خزر کشیده شده است. نتایج به‌دست آمده از سن‌سنجی رادیو کربن از یک تراس بالا آمدهٔ آن نشان می‌دهد متوسط حرکت عمودی سالانه آن بین ۱/۵ تا ۲/۵ میلی‌متر و میانگین حرکت افقی آن ۳ میلی‌متر و نرخ لغزش آن ۳/٦ میلی‌متر در سال است *(نظری و همکاران، ۲۰۲۱)*.

اقلیم: ناحیهٔ ساحلی دریای خزر تابستان‌ها و زمستان‌ها از هوای معتدلی برخوردار است و رطوبت خاک در تمام سال وجود دارد. مقدار بارندگی سالانه برای رشد درختان کافی است به‌ویژه اینکه تمرکز تابستانه بارندگی حدود ۲۵درصد است. میانگین بارش سالانه در این ناحیه حدود ۱۱۷۰ میلی‌متر است. پایین‌ترین دمای مطلق زمستان‌ها از ۸-درجه کمتر نبوده و در تابستان‌ها دماهای بیش از ۳۹ درجه مشاهده نمی‌شود و به طورکلی تمام عناصر آب‌وهوایی در سراسر ناحیه از ثبات و یکدستی قابل قبولی برخوردار است *(علیجانی، ۱۳۹۲)*.

عوامل انسانی: موقعیت سیاسی این محدوده از شرق به غرب شامل شهرهای مهم بندر ترکمن، گرگان، بندر گز، گلوگاه، بهشهر، ساری و جویبار است که شرایط مساعد اقلیمی در کنار پتانسیل بالای کشاورزی به دلیل وجود خاک حاصلخیز و جاذبه‌های توریستی و گردشگری باعث شکل‌گیری شهرهای متعدد و مراکز جمعیتی با تراکم بالا در این منطقه شده است.

مواد و روش ها

در این پژوهش با توجه به اهداف مورد نظر و تکنیک‌های مورد استفاده، بخش عمدهٔ داده‌های مورد نیاز با رجوع به منابع اسنادی شامل رساله‌ها و پایان‌نامه‌ها، کتب و مقالات علمی، طرح‌ها و گزارش‌ها و همچنین از طریق مراجعه به سازمان‌ها و ادارات و سایت‌های اینترنتی مرتبط گردآوری شد. داده‌های آماری، تصویری و رقومی بخش دیگری از داده‌های مورد نیاز این پژوهش است که شامل مجموعه اطلاعات ژئودینامیکی منطقه مورد مطالعه متعلق به سازمان نقشه‌برداری کشور، داده‌ها و اطلاعات رقومی زمین‌شناسی و شبکهٔ گسل‌های منطقه با دقت ۱/۱۰۰۰۰۰ و ۱/۲۵۰۰۰۰ منطقه مورد مطالعه متعلق به سازمان زمین‌شناسی کشور و داده‌های دورسنجی شامل سری تصاویر راداری Sentinel_1 و مدل رقومی ارتفاعی(DEM) با دقت ۱۲/۵ متر متعلق به سنجندهٔ ALOS PALSAR است که از سایت اینترنتی سازمان فضایی اروپا[1] جمع‌آوری‌شده است.

تداخل‌سنجی راداری یکی از ابزارهای توانمند برای پایش پدیده تغییرات سطح زمین است. این روش با مقایسه فازهای دو تصویر راداری که از یک منطقه در دو زمان مختلف اخذ شده‌اند، قادر به تعیین تغییرات سطح زمین در آن بازه زمانی است. در یک تداخل نگار اطلاعات اختلاف فاز دو تصویر که گویای اختلاف فاصله عارضه تا سنجنده در دو زمان تصویربرداری است، وجود دارد. اما با توجه به اینکه هر تداخل نگار شامل منطقه بزرگی با همبستگی پایین است، بنابراین نتایج آن قابل اعتماد نیست به همین دلیل روش تداخل‌سنجی راداری به تنهایی نمی‌تواند تغییرات صورت گرفته را نشان دهد.

در این راستا برای حل مشکل، روش‌های مختلفی پیشنهاد شده است که یکی از آن‌ها روش سری زمانی SBAS است *(ژائو[2]، ۲۰۱۳)*. در این روش تنها زوج تصاویری مورد استفاده قرار می‌گیرند که مؤلفه قائم خط مبنای آن‌ها کم‌تر از مقدار بحرانی خط مبنا باشد، همچنین خط مبنای زمانی[3] آن‌ها نیز همزمان کمینه باشد. به این ترتیب، فقط تداخل نگارهایی تشکیل می‌شوند که کیفیت مناسبی داشته باشند. پس از تشکیل این تداخل‌نگارها، یک شبکه از تصاویر ایجاد می‌شود، سپس با استفاده از روش کمترین مربعات، مقدار جابه‌جایی هر پیکسل تخمین زده می‌شود *(دونگ[4]، ۲۰۱٤)*.

برای پایش منطقهٔ مورد مطالعه از نظر تغییرات ناشی از فروافتادگی و یا برخاستگی زمین با استفاده از سنجش‌ازدور

1- https://search.asf.alaska.edu
2- Zhou.
3- Temporal baseline
4- Dong

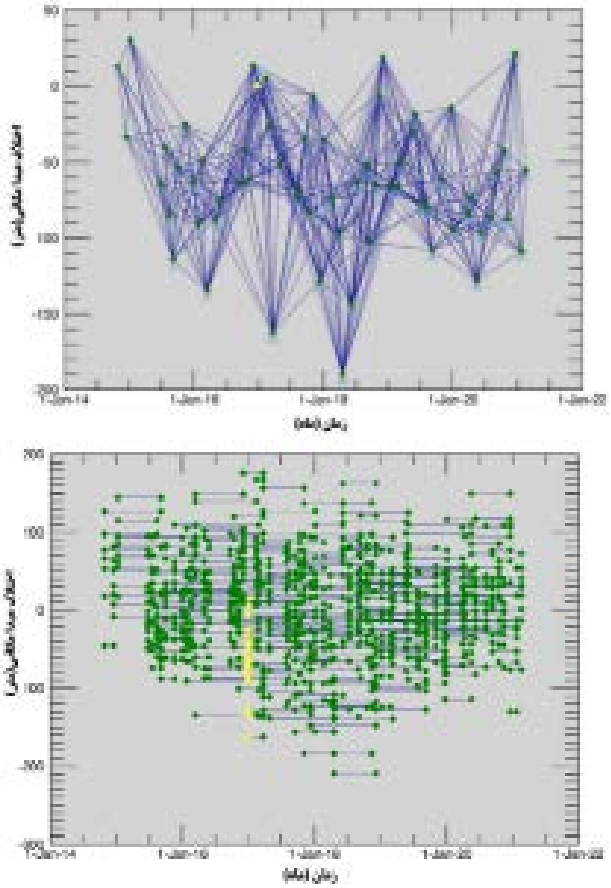
راداری، در گام نخست سری تصاویر راداری Sentinel-1 با حداکثر ۱۵۰متر) شامل ٦١ تصویر (جدول۱) در بازهٔ زمانی اختلاف‌زمانی و مکانی مناسب (به‌ترتیب حداکثر ۳۰روز و سال‌های ۲۰۱٤ تا ۲۰۲۱ با جهت برداشت Descending تهیه شد.

جدول۱: مشخصات تصاویر مورداستفاده در سری زمانی

ردیف	Polarization	تاریخ	ردیف	Polarization	تاریخ
1	VV	2014/10/27	32	VV	2018/06/08
2	VV	2014/12/14	33	VV	2018/07/14
3	VV	2015/01/07	34	VV	2018/08/31
4	VV	2015/01/31	35	VV	2018/09/12
5	VV	2015/06/24	36	VV	2018/10/18
6	VV	2015/07/18	37	VV	2018/11/11
7	VV	2015/08/11	38	VV	2018/12/05
8	VV	2015/09/04	39	VV	2019/01/10
9	VV	2015/09/28	40	VV	2019/02/27
10	VV	2015/11/15	41	VV	2019/03/11
11	VV	2016/01/02	42	VV	2019/05/22
12	VV	2016/02/19	43	VV	2019/06/03
13	VV	2016/03/14	44	VV	2019/07/21
14	VV	2016/05/01	45	VV	2019/08/02
15	VV	2016/05/25	46	VV	2019/09/07
16	VV	2016/09/22	47	VV	2019/10/12
17	VV	2016/10/16	48	VV	2019/11/06
18	VV	2016/11/09	49	VV	2019/12/24
19	VV	2016/12/03	50	VV	2020/01/05
20	VV	2016/12/27	51	VV	2020/03/29
21	VV	2017/02/13	52	VV	2020/04/10
22	VV	2017/07/31	53	VV	2020/05/16
23	VV	2017/08/12	54	VV	2020/06/09
24	VV	2017/09/17	55	VV	2020/08/08
25	VV	2017/10/11	56	VV	2020/09/13
26	VV	2017/11/04	57	VV	2020/10/19
27	VV	2017/12/10	58	VV	2020/11/12
28	VV	2018/01/03	59	VV	2020/12/18
29	VV	2018/02/20	60	VV	2021/01/23
30	VV	2018/03/28	61	VV	2021/02/16
31	VV	2018/04/21			

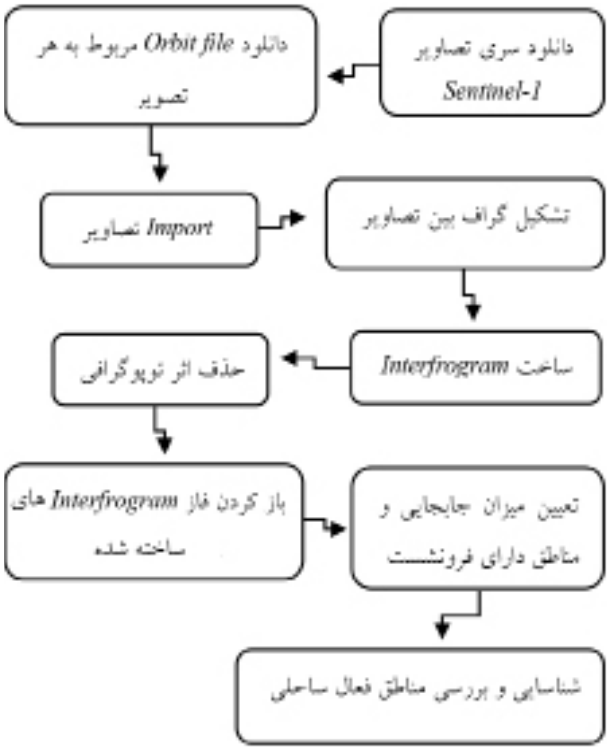
در ادامه با استفاده از داده‌های گردش مداری[1]، تصحیحات رادیومتری ناشی از خطای مداری سنجنده انجام شد. برای حذف خطای ناشی از اثر اتمسفری از فیلتر گولدشتاین[2] و برای حذف اثر توپوگرافی در اینترفروگرام‌های ساخته شده از مدل رقومی ارتفاعی منطقه (Dem) با دقت ۳۰ متر مربوط به سنجندهٔ Aster استفاده شد.

پس از تهیهٔ سری تصاویر راداری و انجام تصحیحات رادیومتری روی تصاویر با استفاده از Orbit file مربوط به هر تصویر، تعداد و نوع ارتباط بین تصاویر به‌صورت گراف در محیط نرم افزار SARscape مشخص شد (نگاره۲).



نگاره۲: شبکهٔ گراف تشکیل اینترفروگرام براساس اختلاف مکانی و زمانی بین تصویر پایه و تصاویر پیرو

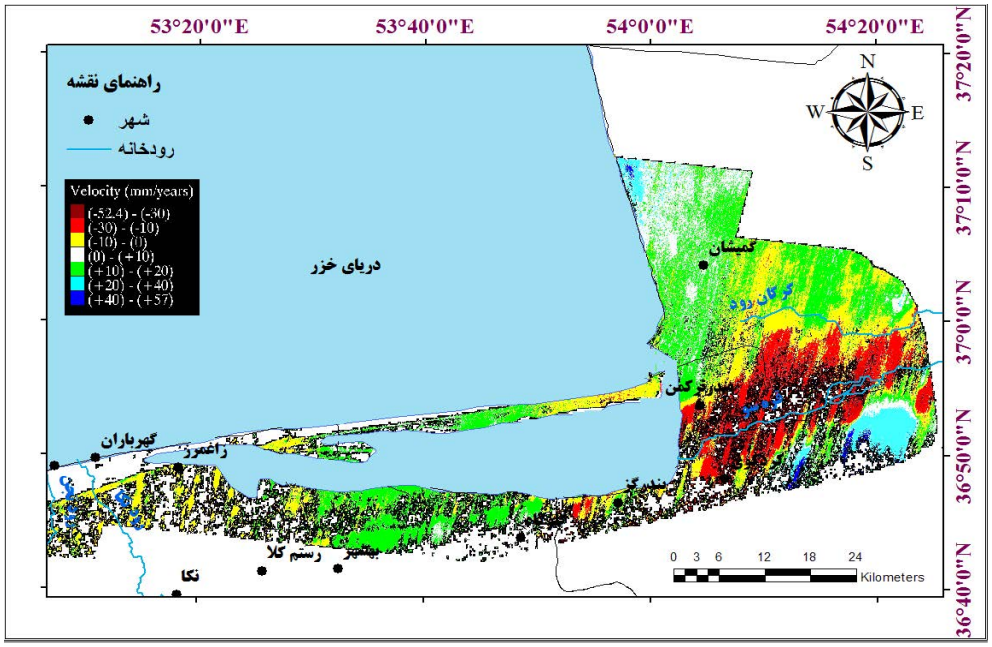
همانطور که در نگاره(۲) نمایان است با توجه به گراف‌های تشکیل شده، حداکثر اختلاف مکانی بین تصویر پایه و پیرو ۲۰۰ متر است که با توجه به تعداد و اختلاف زمانی بین تصاویر، مقدار قابل‌قبولی برای ساخت سری زمانی است. پس از تعیین نحوهٔ ارتباط تصاویر با هم، برای تشکیل اینترفروگرام با استفاده از تکنیک سری زمانی SBAS که براساس مربع کمترین فاصله بین تصاویر عمل می‌کند طبق فلوچارت مراحل پردازش روی تصاویر انجام شد (نگاره۳).



نگاره۳: فلوچارت انجام تحقیق

در نهایت پس از پایان پردازش تصاویر راداری، میزان تغییرات رخداده سطح زمین در محدودهٔ منطقه مطالعاتی طی بازه زمانی هفت‌ساله (۲۰۱٤/۱۰/۲۷ تا ۲۰۲۱/۰۲/۱٦) به‌صورت فروافتادگی و برخاستگی مشخص شد (نگاره٤).

1- Orbit file
2- Goldstein



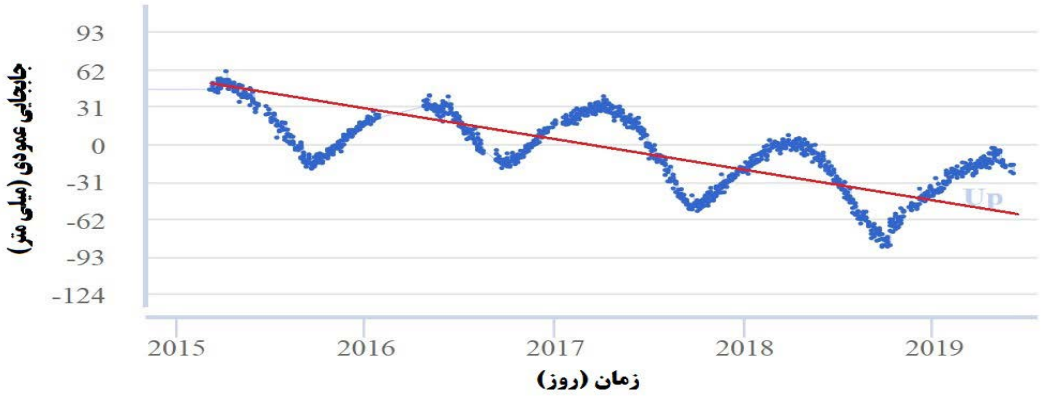
نگاره٤: نقشهٔ سرعت میانگین جابه‌جایی سطح زمین منطقهٔ مورد مطالعه از سال ۲۰۱٤ تا سال ۲۰۲۱ برحسب میلی‌متر در سال

نتایج تحقیق

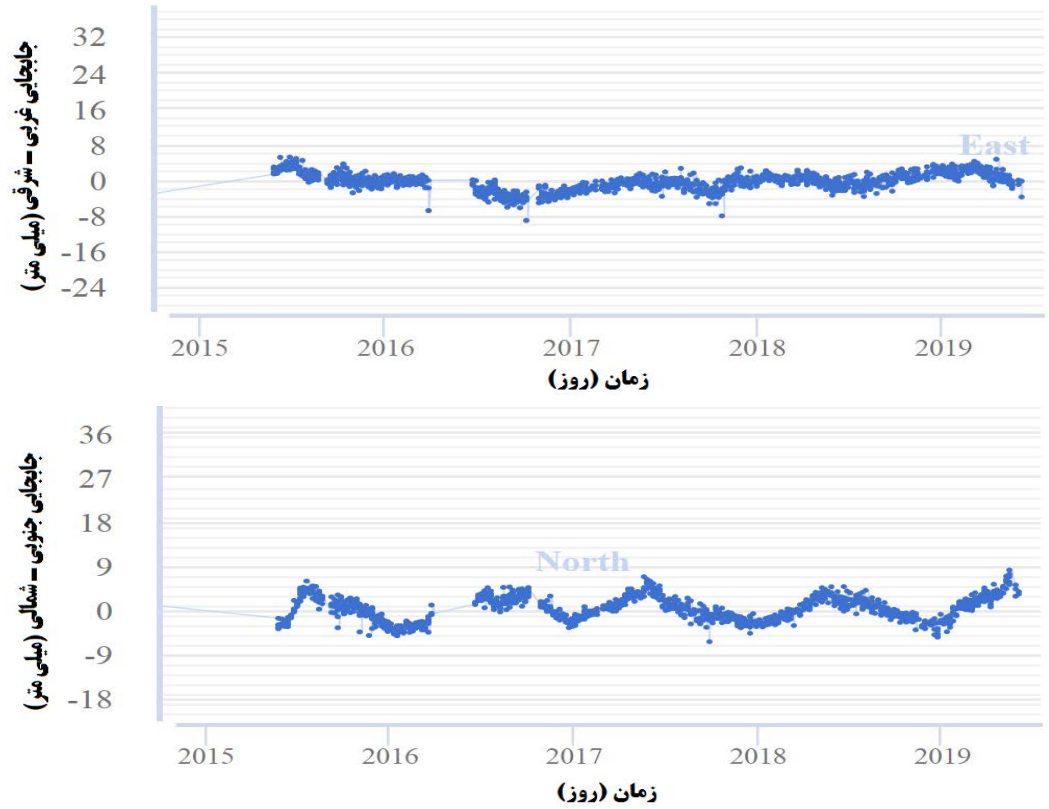
طبق نقشهٔ به‌دست آمده از مدل SBAS نتایج بیانگر آن است که بخش شرقی ساحل بیشتر تحت‌تأثیر برخاستگی قرارگرفته و این روند تا خلیج گرگان ادامه دارد به‌طوری‌که محدودهٔ شهر گرگان دارای بالا آمدگی بین ۲۰ تا ٤۰ میلی‌متر در سال است که به سمت ناحیهٔ ساحلی این روند معکوس شده و فروافتادگی معادل ۱۰ تا ۵۲ میلی‌متر در سال رخ می‌دهد که با نزدیک شدن به ساحل این عدد کمتر شده و در نهایت به۱۰میلی‌متر در سال می‌رسد. برای صحت‌سنجی نتایج به‌دست آمده از دورسنجی در این قسمت‌ها، از داده‌های ایستگاه ژئودینامیک گرگان به‌عنوان تنها ایستگاه ثابت موجود در این ناحیه از منطقه در بازهٔ زمانی مورد نظر استفاده شد (نگاره‌های ٥،٦).

همان‌گونه که در نمودار مشخص است در بازهٔ زمانی ۲۰۱٤ تا ۲۰۲۱ محل قرارگیری ایستگاه ژئودینامیک گرگان دارای روند فرونشینی نوسانی و نزولی است که در یک بازهٔ ٦ ساله فرونشینی تقریبی ۹۰ تا ۱۰۰ میلی‌متر را نشان می‌دهد و با مقادیر به‌دست‌آمده از تداخل‌سنجی راداری (نگاره٤) مطابقت و همسانی دارد. بنابراین می‌توان نتایج حاصل از تداخل‌سنجی را قابل‌اطمینان دانست و بر مبنای آن تحلیل‌های بعدی تحقیق را انجام داد. از طرفی نمودار ژئودینامیک افقی گرگان بیانگر جابه‌جایی اندک منطقه به سمت شمال و شرق در طی این بازهٔ زمانی است که می‌توان آن را نتیجهٔ عملکرد گسل خزر و شمال البرز دانست که به‌صورت شاخه‌های متعدد با سازوکار راندگی(معکوس) و مؤلفه راستالغز با شیب به سمت جنوب در گسترهٔ استان گلستان است.

این دو گسل با روند شمال‌غرب ـ جنوب‌شرق و سازوکار راندگی عمقی و کمی راستالغز چپ‌بر در پهنه ساختاری البرز قرار گرفته‌اند *(شاه‌پسندزاده، ۱۳۸۳)*.



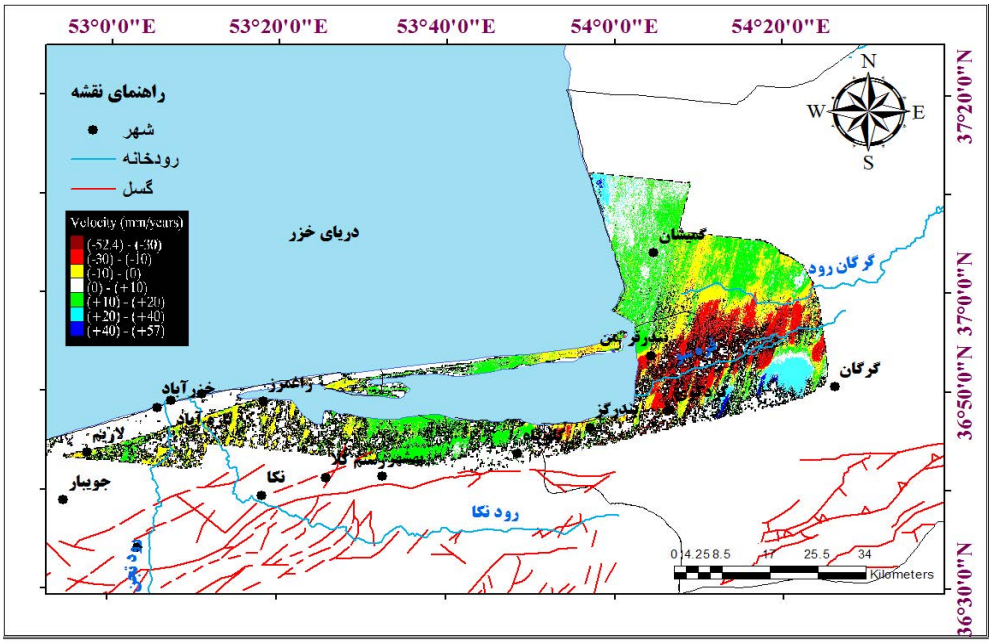
نگاره۵: نمودار جابه‌جایی عمودی ایستگاه ژئودینامیک شهر گرگان(سازمان نقشه‌برداری کشور)



نگاره٦: نمودار جابه‌جایی غربی-شرقی(بالا)، جابه‌جایی جنوبی-شمالی(پایین)
ایستگاه ژئودینامیک شهر گرگان(سازمان نقشه‌برداری کشور)

بحث

پس از صحت‌سنجی نقشهٔ نهایی تغییرات سطح زمین توسط داده‌های ژئودینامیک، بخش‌هایی از ساحل که دارای مقادیر قابل‌توجه فروافتادگی و یا برخاستگی بودند به‌عنوان مناطق هدف برای بررسی بیشتر انتخاب شدند و نحوهٔ اثرگذاری این تغییرات بر ژئومورفولوژی منطقه مورد تجزیه‌وتحلیل قرار گرفت. از مناطق ساحلی دریای خزر، شهرهای گمیشان، بندر ترکمن، بندر گز و لاریم دارای آنومالی قابل‌توجه به‌صورت بالاآمدگی و فروافتادگی هستند. ویژگی اصلی نوار ساحلی وجود آب‌های سطحی فراوان در



نگاره۷: ارتباط جابه‌جایی سطح زمین در ناحیه ساحلی و قرارگیری شبکه گسلی

دسترس است و برداشت آب زیرزمینی در این مناطق بسیار کم اتفاق می‌افتد؛ از طرفی سازۀ عظیم و با وزن زیادی هم در محدودۀ مورد نظر وجود ندارد که در فروافتادگی سطح تأثیرگذار باشد.

یکی‌دیگر از عواملی که می‌تواند موجب تغییرات سطح زمین به‌صورت فرونشست شود، بهره‌برداری از معادن و استخراج نفت و گاز است که طبق بررسی‌های انجام شده در محدودۀ شرقی ساحل خزر هیچ بهره‌برداری از معادن و میدان نفتی صورت نمی‌گیرد. بنابراین می‌توان با اطمینان بالایی علت رخداد فروافتادگی‌ها و بالاآمدگی(گمیشان) در این مناطق را به عملکرد تکتونیک و فعالیت گسل‌های فعال منطقه نسبت داد (نگاره۷).

نتیجه‌گیری

در این پژوهش نوار ساحل شرقی دریای خزر از گمیشان تا جویبار از نظر فروافتادگی و بالاآمدگی با استفاده از تکنیک‌های دورسنجی در بازۀ زمانی سال‌های ۲۰۱٤ تا ۲۰۲۱ مورد پایش قرار گرفت و مناطق فعال ساحلی مشخص و بررسی شد. نتایج به‌دست آمده از تداخل‌سنجی راداری بیانگر آن است که بخش شرقی ساحل بیشتر تحت‌تأثیر بالاآمدگی قرار گرفته و این روند تا خلیج گرگان ادامه دارد به‌طوری‌که محدودۀ شهر گرگان دارای بالاآمدگی بین ۲۰ تا ٤۰ میلی‌متر در سال است که به سمت ناحیه ساحلی این روند معکوس شده و فروافتادگی معادل ۱۰ تا ۵۲ میلی‌متر در سال رخ می‌دهد. با نزدیک شدن به ساحل این عدد کمتر شده و در نهایت به ۱۰ میلی‌متر در سال می‌رسد.

برای صحت‌سنجی نتایج به‌دست آمده، از داده‌های ایستگاه ژئودینامیک گرگان استفاده شد که در یک بازۀ شش‌ساله فرونشینی تقریبی ۹۰ تا ۱۰۰ میلی‌متر را نشان می‌دهد و با مقادیر به‌دست آمده از تداخل‌سنجی راداری مطابقت و همسانی دارد. از طرفی یافته‌های شاه‌پسندزاده(۱۳۸۳) و گزارش‌های نظری و همکاران(۲۰۲۱) در مورد تکتونیک فعال ناشی از گسل خزر بیانگر آن است که نمودار ژئودینامیک افقی گرگان جابه‌جایی اندک منطقه به سمت شمال و شرق در طی این بازۀ زمانی دارد که می‌توان آن را نتیجۀ عملکرد گسل خزر و شمال البرز دانست که به‌صورت شاخه‌های متعدد با سازوکار راندگی(معکوس) و مولفۀ راستالغز با شیب به سمت جنوب در گسترۀ استان گلستان

مشاهده می‌شود. بررسی نوار ساحلی دریای خزر نشان می‌دهد شهرهای گمیشان، بندر ترکمن، بندر گز و لاریم دارای آنومالی قابل‌توجه به‌صورت بالاآمدگی و فروافتادگی هستند. با توجه به اینکه ویژگی اصلی نوار ساحل شمالی کشور وجود آب‌های سطحی فراوان در دسترس است و برداشت و استخراج از آب زیرزمینی در این مناطق بسیار کم است و از طرفی استخراج منابع گاز و نفت و معدن که یکی‌دیگر از عوامل رخداد فرونشست زمین است در این ناحیه وجود ندارد همچنین سازهٔ عظیم و با وزن زیادی هم در محدودهٔ مورد نظر وجود ندارد که در فروافتادگی سطح تأثیرگذار باشد، می‌توان با اطمینان بالایی علت رخداد فروافتادگی‌ها و بالاآمدگی(گمیشان) در این مناطق را به عملکرد تکتونیک و فعالیت گسل‌های فعال منطقه نسبت داد.

منابع و مآخذ

۱- آقانباتی،ع. زمین‌شناسی ایران، انتشارات سازمان زمین‌شناسی و اکتشافات معدنی کشور، ص ۵۷٤، ۱۳۸۳.

۲- برد، الف. ژئومورفولوژی ساحلی، ترجمهٔ مجتبی یمانی و وحید محمدنژاد، انتشارات دانشگاه تهران چاپ دوم، صص ۷۳-۵۳، ۱۳۹۲.

۳- پیری، ح. رحمانی، الف. بررسی میزان فرونشست شمال دریاچه ارومیه با استفاده از روش تداخل سنجی راداری اینترفرومتری InSAR، (مطالعه موردی: دشت تسوج)، کنفرانس بین‌المللی پیامدهای جغرافیایی و اثرات زیست محیطی شرایط دریاچه ارومیه،۱۳۹۵.

٤- تورانی، م. آق‌آتابای، م. روستایی، م. مطالعه فرونشست در شهر گرگان با استفاده از روش تداخل سنجی راداری، مجلهٔ آمایش جغرافیایی فضا، دوره ۸، شماره ۲۷، صص ۱۲۸-۱۱۷، ۱۳۹۷.

۵- حاجی کریمی، ز. شایان، س. خوش رفتار، ر. ارزیابی تکتونیک فعال حوضهٔ آبریز گرگانرود در دامنهٔ شرقی تالش (بغروداغ)، با استفاده از شاخص‌های ژئومورفیک، مجلهٔ پژوهش‌های ژئومورفولوژی کمی، سال ۹، شماره ۱، صص ۲۳٦-۲۱۷، ۱۳۹۹.

٦- درویش‌زاده، ع. زمین‌شناسی ایران، انتشارات امیر کبیر، چاپ سوم، ص ۹۰۱، ۱۳۸۲.

۷- روستایی، م. زمانی، ب. نواب‌پور، پ. موید، م.. بررسی سازوکار و نوتکتونیک پهنهٔ گسلی سیه‌چشم-خوی، مجلهٔ علوم زمین، سال ۲٤، شماره ۹٦، صص ۲۳٤-۲۲۱، ۱۳۹٤.

۸- شاه‌پسندزاده، م. زلزله‌خیزی و لرزه زمین‌ساخت گستره استان گلستان، شمال خاور ایران، کنفرانس بین‌المللی زلزله بم، دانشگاه شهید باهنر کرمان، ۱۳۸۳.

۹- عبدالهی کاکرودی، ع. نوسانات دریای خزر و تأثیر آن بر سواحل جنوب‌شرقی دریای کاسپین، پژوهش‌های ژئومورفولوژی کمّی، سال دوم، شماره ۳، صص٤٤-۳۳، ۱۳۹۲.

۱۰- علایی طالقانی، م. ژئومورفولوژی ایران، انتشارات قومس، چاپ نهم، صص ۳۰۳-۲۹۷، ۱۳۹٤.

۱۱- علیجانی، ب. آب و هوای ایران، انتشارات دانشگاه پیام نور، چاپ دوازدهم، صص ۱٦۷-۱۵۹، ۱۳۹۲.

۱۲- کلر، الف. پینتر، ن. تکتونیک فعال (زمین‌لرزه‌ها، بالاآمدگی و چشم‌انداز)، ترجمه ابوالقاسم گورابی، انتشارات انتخاب، ۱۳۹۵.

۱۳- نوحه‌گر، الف. یمانی، م. ژئومرفولوژی جلگه ساحلی شرق تنگه هرمز با تأکید بر فرایند فرسایش بادی، انتشارات دانشگاه هرمزگان، ص ۱۱۹، ۱۳۸٦.

14-Alexakis, D. D. Stavroulaki, E. G. Tsanis, I.K. Using Sentinel-1A DInSAR interferometry andLandsat 8 data for monitoring water level changesin two lakes in Crete, Greece, Geocarto International, Vol: 34, Issue 7, pp: 703-721, 2019.

15-Bird, E. Coastal geomorphology, Second edition, pp. 53-73, 1999.

16-Burbank, D.W. Anderson, R.S. Tectonic geomorphology, Blackwell Science,Oxford, 2001.

17-Dong, J. Zhang, L. Tang, M. Liao, M. Xu, Q. Gong, J. Ao, M. Mapping landslide surface displacements with

time series SAR interferometry by combining persistent and distributed scatterers: A case study of Jiaju landslide in Danba, China. Remote Sensing of Environment, 205,180–198, 2018.

18-Goorabi, A. Karimi, M. Yamani, M. Perissin, D. Land subsidence in Isfahan metropolitan and its relationship with geological and geomorphological settings revealed by Sentinel-1A InSAR observations, Journal of Arid Environments, Vol: 181, pp:104-238, 2020.

19-Haghshenas Haghighi, M . Motagh, M. Land subsidence hazard in Iran revealed by country-scale analysis of Sentinel-1 INSAR, Remote Sensing and Spatial Information Sciences, Volume XLIII-B3-2021 XXIV ISPRS Congress, https://doi.org/10.5194/isprs-archives-XLIII-B3-2021-155-2021.

20-Nazari, H. Ritz, J-F. Burg, J-P. Shokri, M. Haghipour, N. Vizheh, M. Avagyan, A. Fazeli

Nashli, H. Ensani, M. Active tectonics along the Khazar fault (Alborz, Iran), Journal of Asian Earth Sciences,V: 219, 104893, 2021.

21-Pacheco, J, J. Arzate, E. Rojas, M. Arroyo, Yutsis G. Delimitation of ground failure zones due to land subsidence using gravity data. Engineering Geology, 84(40636): 143-160, 2006.

22-Prati, C. Ferretti, A. Perissin, D. Recent advances on surface ground deformation measurement by means of repeated space-borne SAR observations. Geodynamics, 49 (3–4), 161-170, 2010.

23-Yu, L. Yang, T. Zhao, Q. Liu, M. Pepe, A. The 2015–2016 GroundDisplacements of the Shanghai Coastal Area Inferred from a CombinedCOSMO-SkyMed/Sentinel-1 DInSAR Analysis, Remote Sensing, 9(11), 1194, 2017.

COPYRIGHTS

©2024 by the authors. Published by National Geographical Organization. This article is an open access article distributed under the terms and conditions of the Creative Commons Attribution-NoDerivs 3.0 Unported (CC BY-ND 3.0)