



Landslide monitoring of Tefin-Dagaga axis in Kurdistan province using radar interferometric techniques

Omid Ebrahimi¹ , Asadollah Hejazi²  , Shahram Roostaei³ 

1. Department of Geomorphology, Faculty of Geographical Sciences, Tabriz University, Tabriz, Iran.

Email: omide1984@gmail.com

2. (Corresponding Author) Department of Geomorphology, Faculty of Geographical Sciences, Tabriz University, Tabriz, Iran.

Email: s.hejazi@tabrizu.ac.ir

3. Department of Geomorphology, Faculty of Geographical Sciences, Tabriz University, Tabriz, Iran.

Email: roostaei@tabrizu.ac.ir

Article Info

Article Type:

Research Article

Article History:

Received:

5 May 2025

Received in revised form:

22 July 2025

Accepted:

4 September 2025

pp. 125-146

Keywords:

Radar interferometry,
landslide, sentinel,
satellite images

ABSTRACT

Landslides, among other natural hazards, have had very devastating effects on lives and finances, especially in the mountainous regions of Iran and all over the world. Radar interferometry is an efficient and highly accurate method for monitoring small movements and measuring displacements in a wide area of the earth, including landslides. In this study, the radar interferometry (InSAR) technique was used to monitor the Tefin-Dagaga axis landslide in Kurdistan province from Sentinel-1 satellite data to measure ground displacement during the years 2017 to 2019. By comparing multi-temporal radar images, this method detects the changes of the earth's surface with high accuracy and calculates the amount of displacements. Radar images were collected and analyzed in different time intervals to accurately evaluate land elevation changes, settlements and landslides. The results of this method showed that the ground displacement data during 2018 and 2019 indicate important changes in the ground condition along the Tefin to Dagaga road. In 2018, the ground displacements were mostly reported as minor settlements, with an average displacement of -0.0235 meters. In August, which showed a relative improvement in the condition of the land compared to 2017. Also, limited settlements with a minimum displacement of -0.0501 m were observed, which showed instability in some specific places. On the contrary, in 2019 the situation of displacements became more severe. The average displacement reached -0.0376 m, which indicated an increase in land subsidence compared to 2018. The minimum displacement this year reached -0.1094 m, raising further concerns about ground instability in some areas

Cite this article: Dr.Asadollah Hejazi, Dr.Shahram Roostaei, Omid Ebrahimi, (2025). Landslide monitoring of Tefin-Dagaga axis in Kurdistan province using radar interferometric techniques (case study of Tefin-Dagaga axis in Kurdistan province). *Quantitative Geomorphological Research*, 14(3). 125-146.

Doi: [10.22034/gmpj.2025.486482.1530](https://doi.org/10.22034/gmpj.2025.486482.1530)

Extended Abstract

Introduction

Landslide is the falling down or integrated and often rapid movement of a volume of sedimentary materials along the slopes. The speed of their operation and their extent often creates spectacular and sometimes catastrophic phenomena, and tens or hundreds of thousands of cubic meters of rock and soil may be removed at once. This phenomenon works mostly in separate granular rocks and the presence of water is necessary for its occurrence. There are many examples of landslides in nature and they operate in very different dimensions, small or large. The deadly flood of Lon Garn, Italy in 1963 can be a specific example of it. (Mohammedzadeh, 1401) Landslides play an important geomorphological role in the evolution of landscapes. It affects the natural environment (soil, ecosystems, aquatic habitats, etc.) and built environment (residential areas, roads, pipelines, etc.). (Turner and others, 2015) Landslide is one of the most widespread geomorphological hazards, which is considered a great threat to human life, infrastructure and natural environment in most mountainous areas with steep slopes.

Methodology

Since the 1980s, the interferometric technique of synthetic aperture radar (InSAR) has been used to monitor land surface deformation and to detect hazards, for example, earthquakes, ice movement, volcanoes, landslides, and groundwater flow (Jia et al. , 2016). There are important challenges related to the practical use of satellite radar data in landslide research

(Kalu et al., 2012). In this study, the InSAR technique was used with Sentinel-1 satellite data to measure ground displacement during the years 2017 to 2019. By comparing multi-time radar images, this method detects the changes of the ground surface with high accuracy and calculates the amount of displacements. Radar images were collected and analyzed in different periods of time to accurately evaluate land elevation changes, settlements, and landslides. Also, from topographic maps 1/50000 related to the country's mapping organization and geological maps 1/100000 related to The Organization of Geology and Mineral Exploration of the country was used to investigate the geology and morphology of the region. The software used in this research are: scape Sar version 5.2, ArcGIS version 6.10, ENVI version 5.3 and Google Earth, which are used to prepare and process radar images and prepare displacement maps related to landslides. was used.

Results and discussion

Review and comparison of ground displacement data during several time periods (from 2017 to 2019) show significant changes in ground behavior along the Tafin-Dagaga road. This comparative analysis can clearly determine the process of land subsidence and other geographical changes during these years. In 2017, the average land displacement in this area was -0.0561 meters, which indicates extensive land subsidence. The minimum displacement recorded this year was -0.0845 m, representing the most severe subsidence along the route. Also, the dispersion of displacements in this year is more than in other years, which can mean diversity in the behavior of the ground. Most of the displacements in 2017 are in the range of -0.0584 to -0.0538 m. In 2018, the ground displacement was measured in

two different time periods (July and August): in July 2018, the average displacement was -0.0248 m, which is It has been reduced to 2017. However, the minimum recorded displacement is -0.0449 m, which indicates the continuation of subsidence, but with less intensity. In August 2018, the average displacement slightly improved to -0.0235 m. The minimum recorded displacement of -0.0501 m indicates that some points are still affected by severe ground subsidence, but the subsidence is generally less and more uniform. 2019 has seen a further decrease in ground displacement, with the average displacement dropping to -0.0376 m. However, contrary to the reduction of the average settlement, the minimum displacement reached -0.1094 meters, which is the most severe amount of settlement among the compared years. This shows that although the subsidence process has improved in general, some places have experienced severe subsidence that needs immediate attention. According to the displacement data from 2017 to 2019, it can be concluded that the subsidence along the Tefin to Dagaga road is a The trend is continuous and worrying. Although the average displacement has improved in 2018, in 2019, some places have experienced more severe settlement. These data show that the region is still exposed to the risks of land subsidence and continuous monitoring and protection measures are necessary.

Conclusion

One of the key factors in the occurrence of landslides in these areas is the type and density of geological layers. Areas with high density of soil layers and unstable sedimentary rocks are more prone to landslides. Also, the presence of steep slopes in some areas provides the conditions for the occurrence of wider landslides. In addition, heavy rains and changes in underground water are also important environmental factors that have a great impact on the stability of the earth. Runoff can put more pressure on the upper layers of the earth and intensify instabilities. The distribution of land

displacements in this map shows that the subsidence and landslides did not occur uniformly and some areas were affected more than others. This dispersion may be caused by a combination of different factors such as soil type, land slope, and seismic activity. The pattern of displacements also specifically helps us to identify the higher risk areas more accurately and take the necessary measures to stabilize the land in those areas. To reduce the risks of landslides in this area, it is suggested that in addition to stabilizing the soil and building structures Resistant, early warning systems for residents and road users should also be installed. Applying methods to control underground water and prevent water accumulation in high-risk areas is also of particular importance. Also, educational programs should be implemented for local residents so that they are aware of landslide hazards and how to deal with them. The final landslide map extracted by the fuzzy method has well separated high-risk and low-risk areas and provides a powerful tool for managing landslide risks in this area. gives The results of this analysis can help future planning to reduce risks and protect critical infrastructure. Due to its ability to manage uncertain data and better separation of high-risk areas, the fuzzy method is a suitable method for landslide analysis in this area and has been able to provide accurate results.

Funding

There is no funding support.

Authors' Contribution

Authors contributed equally to the conceptualization and writing of the article. All of the authors approved the content of the manuscript and agreed on all aspects of the work declaration of competing interest none.

Conflict of Interest

Authors declared no conflict of interest.

Acknowledgments

We are grateful to all the scientific consultants of this paper.

نقش زمین لرزه در وقوع زمین لغزش‌های محور تفرین-دگاگا در استان کردستان با استفاده از تکنیک‌های تداخل‌سنجی راداری

امید ابراهیمی^۱، اسداله حجازی^۲، شهرام روستایی^۳

۱- گروه ژئومورفولوژی، دانشگاه تبریز، ایران. رایانامه omide1984@gmail.com

۲- نویسنده مسئول، گروه ژئومورفولوژی، دانشگاه تبریز، ایران. رایانامه: s.hejazi@tabrizu.ac.ir

۳- گروه ژئومورفولوژی، دانشگاه تبریز، ایران. رایانامه: roostaei@tabrizu.ac.ir

چکیده

اطلاعات مقاله

زمین لغزش از جمله مخاطرات طبیعی است که تأثیرات بسیار ویرانگر جانی و مالی به ویژه در مناطق کوهستانی ایران و جهان را به همراه داشته است. لذا تمهیدات لازم برای کاهش خسارات ناشی از وقوع زمین لغزش ضروری است. هدف این پژوهش بررسی نقش زمین لرزه در تعیین میزان جابه‌جایی زمین لغزش در محور تفرین-دگاگا در استان کردستان با استفاده از تکنیک-های تداخل‌سنجی راداری می‌باشد. در این مطالعه، از داده‌های تصاویر ماهواره‌ای سنتینل-۱ برای اندازه‌گیری جابه‌جایی زمین در طول سال‌های ۲۰۱۷ تا ۲۰۱۹ استفاده شد. به این منظور تصاویر راداری در بازه‌های زمانی مختلف جمع‌آوری و در فرآیند آنالیز تداخل‌سنجی راداری (InSAR) پردازش شده و سپس تغییرات ارتفاعی زمین، نشست‌ها و لغزش‌ها با دقت ارزیابی و محاسبه شدند. نتایج حاصل از این روش نشان داد که داده‌های جابه‌جایی زمین نشان‌دهنده تغییرات مهمی در وضعیت زمین در مسیر جاده تفرین به دگاگا هستند. در سال ۲۰۱۸، جابه‌جایی‌های زمین بیشتر به صورت نشست‌های جزئی گزارش شدند، با میانگین جابه‌جایی -۰.۲۳۵ متر در ماه اوت که نشان‌دهنده بهبود نسبی وضعیت زمین نسبت به سال ۲۰۱۷ بود. در نتیجه، مقایسه داده‌های جابه‌جایی نشان می‌دهد که منطقه مورد مطالعه، به ویژه در مسیر جاده تفرین به دگاگا، در معرض تغییرات مستمر زمین‌شناسی و تکتونیک منطقه (گسل اصلی زاگرس) قرار دارد. در حالی که سال ۲۰۱۸ بهبود نسبی در وضعیت زمین نشان می‌داد، داده‌های سال ۲۰۱۹ از بازگشت نشست‌های شدیدتر و ناپایداری گسترده‌تر خبر می‌دهند. این امر نشان می‌دهد که نظارت مداوم و دقیق به همراه اقدامات حفاظتی فوری برای جلوگیری از خطرات بیشتر در این منطقه ضروری است.

نوع مقاله:

مقاله پژوهشی

تاریخ دریافت:

۱۴۰۴/۰۲/۱۰

تاریخ بازنگری:

۱۴۰۴/۰۴/۳۱

تاریخ پذیرش:

۱۴۰۴/۰۶/۱۳

صص. ۱۴۶-۱۲۵

واژگان کلیدی:

تداخل‌سنجی راداری، زمین لغزش، سنتینل، تصاویر ماهواره‌ای

استناد: حجازی، اسداله، روستایی، شهرام، ابراهیمی، امید (۱۴۰۴) نقش زمین لرزه در وقوع زمین لغزش‌های محور تفرین-دگاگا در استان کردستان با استفاده از تکنیک‌های تداخل‌سنجی راداری (مطالعه موردی: تفرین-دگاگا در استان کردستان). پژوهش‌های ژئومورفولوژی کمی، ۱۴(۳)، ۱۴۶-۱۲۵.

Doi: 10.22034/gmpj.2025.486482.1530

مقدمه

بطور کلی به حرکت مواد تشکیل دهنده زمین اعم از خاک و سنگ که در مناطق شیب‌دار تحت تاثیر نیروی ثقل زمین به طرف پایین صورت می‌گیرد زمین لغزش گفته می‌شود (این تعریف انواع ریزش، لغزش، جریان و ... را شامل می‌گردد). بطور کلی طبقه‌بندی‌های مختلفی برای نام‌گذاری و اصطلاحات زمین لغزش وجود دارد ولی اولین طبقه‌بندی به وارنر (به نقل از روستایی، شهرام، ۲۰۰۴) مربوط می‌گردد. با طبقه‌بندی‌های بعد از وارنر تغییرات بسیار اندکی در واژه‌شناسی زمین لغزش ایجاد شد. در طبقه‌بندی وارنر به نوع مواد جابجا شده و نوع لغزش اشاره شده است. لذا هر لغزش به دو گونه می‌توان نام‌گذاری و دسته‌بندی شود: اول نام‌گذاری که نوع مواد جابجا شده را بیان می‌کند و دوم نام‌گذاری که ساز و کار و نوع حرکت را توصیف می‌کند. روش‌های مختلفی برای اندازه‌گیری حرکات پوسته زمین، ناشی از وقوع زمین لغزش وجود دارد. از آن جمله می‌توان به روش‌های ژئودزی با بهره‌گیری از ترازبایی دقیق و مشاهدات GPS اشاره نمود. کاربرد مدرن چندین فناوری سنجش از دور از جمله رادار درپچه مصنوعی (SAR)، اندازه‌گیری‌های نوری و همچنین تشخیص نور و محدوده (LiDAR)، که نشان دهنده منابع داده مکمل بسیار ارزشمند نسبت به روش‌های نقشه برداری مرسوم است. به ویژه، صنعت فضایی در حال ظهور و فناوری‌های جدید به کاهش زمان و منابع برای به‌روزرسانی سیستماتیک فهرست زمین لغزش در مناطق بسیار بزرگ کمک می‌کند (اصلان و دیگران، ۱، ۲۰۲۰). استفاده از تکنیک‌های تداخل‌سنجی راداری (InSAR) برای تشخیص و نظارت بر حرکات توده‌ای بلند مدت به دلیل پوشش فضایی وسیع، وضوح مکانی-زمانی بالا و توانایی عملیاتی آن در تمام شرایط آب‌وهوایی برای انواع مختلف زمین لغزش در دهه گذشته متداول شده است. (کاسوو دیگران، ۲، ۲۰۰۶). در ایران پژوهش‌های مختلفی در این خصوص صورت گرفته است از آن جمله: شیرانی و خوش باطن (۱۳۹۵) زمین لغزش فعال نقل سمیرم را با استفاده از روش تداخل‌سنجی تفاضلی راداری بررسی کردند. نتایج پردازش تصاویر راداری نشان داد که، بیشترین میزان جابجایی صورت گرفته در سطح توده لغزشی نقل مربوط به زوج تصویری ۳ آگوست ۲۰۱۱ و ۳۱ دسامبر ۲۰۱۱ با بازه زمانی ۱۵۰ روزه، معادل هشت سانتی‌متر مشاهده شد. یاراحمدی و همکاران (۱۳۹۹) رفتارسنجی توده لغزشی دوپیق در حوزه آبخیز اهرچای با استفاده از روش پردازش پراکنش‌گرهای ثابت تداخل‌سنجی راداری و GPS سه فرکانسه را مورد بررسی قرار دادند. نتایج مشاهدات نشان دهنده عدم فعالیت توده لغزشی دوپیق بود، در حالی که نتایج پردازش اینترفرومتری بیانگر فعال بودن سطح توده لغزشی دوپیق بود. میانگین سالانه میزان تغییرات سطح زمین در این توده لغزشی ۱۲/۴ میلی‌متر در بازه زمانی ۲۰۱۰-۲۰۰۳ به دست آمد. ندف و همکاران (۱۴۰۰) با استفاده از تکنیک سنجش از دور راداری الگوریتم PS نسبت به بررسی تغییرات توپوگرافی معادن روباز در منطقه: معدن سنگ آهن سنگان خواف پرداختند. برای بررسی و اندازه‌گیری میزان این تغییرات در معدن سنگان از روش تداخل‌سنجی راداری الگوریتم PS با ۴۷ تصویر ماهواره‌ای سنتینل ۱ مربوط به سال‌های ۲۰۱۴ تا ۲۰۲۰، پالریزاسیون VV با استفاده از نرم‌افزار تجاری SARPROZ در محیط Matlab انجام شده است. عابدینی و همکاران (۱۴۰۱) به ارزیابی زمین لغزش حوضه نیر چای با استفاده از تصاویر راداری و روش تداخل‌سنجی راداری پرداختند. نتایج بیشترین میزان زمین لغزش ۳۴ سانتی‌متر به دست آمد. نقشه کاربری اراضی محدوده مورد مطالعه با استفاده از تصویربرداری ۸ و طبقه‌بندی شی‌گرا تهیه گردید حجازی و همکاران (۱۴۰۱). آشکارسازی فرونشست زمین جهت پایداری دشت هریس با استفاده از تداخل‌سنجی از استفاده از تکنیک‌های sbas و psi مورد بررسی قرار گرفت پردازش‌های اولیه در نرم افزارهای GIS و سنجش از دور انجام و از فیلترهای goldstin و adaptive برای بررسی نتایج به دست آمده استفاده شد. محدوده زمانی مورد بررسی از سال ۲۰۱۲ تا ۲۰۱۹ بوده است. در منابع لاتین نیز در این خصوص

¹.Aslan & et al

².Casu & et al

پژوهش های مختلفی صورت گرفته است که از آن جمله: هو و همکاران^۱ (۲۰۱۹) از تکنیک تداخل سنجی راداری زمینی به منظور نظارت بر زمین لغزش شبه جزیره لیوشاوپل رودخانه بایشاژویانگتسه استفاده کردند. مشاهدات سیستم موقعیت-یاب جهانی یک مقایسه تقریبی بین جابجایی حاصل از اندازه گیری غیرتماسی و درجا ارائه کرد، که نشان می دهد روند تغییر شکل عمودی برخی نقاط خاص (T3،T2) به طور کلی پایدار است. وانگ و همکاران^۲ (۲۰۱۹) مکانیابی و پایش زمین لغزش ها در مناطق کوهستانی و دره ای بر اساس رادار دریاچه مصنوعی تداخل سنجی مبتنی بر طول خط مبنای کوتاه را مورد بررسی قرار دادند. در این مطالعه، تکنیک InSAR SBAS برای شناسایی و پایش زمین لغزش ها در منطقه دره آلپ واقع در مجاورت مخزن برق آبی وادونگ در رودخانه جینشا استفاده شد. جیا و همکاران^۳ (۲۰۱۹) به بررسی و زمین لغزش توسط روش تداخل سنجی راداری مبتنی بر پراکنش گر توزیع شده تطبیق (ADS-InSAR) پرداختند. در این مطالعه از ۱۸ تصویر Sentinel-1A (مارس ۲۰۱۶ تا آوریل ۲۰۱۷)، استفاده شد. داده های زمین لغزش از منطقه شیوبایا، استان هوبی، چین استخراج و با استفاده از روش مذکور تجزیه و تحلیل شد که منجر به شناسایی سه منطقه لغزش و چندین نقطه مشکوک به زمین لغزش شد. ویکاریو همکاران^۴ (۲۰۱۹) تکنیک های تداخل سنجی چندزمانی (MTI) برای ارزیابی حساسیت زمین لغزش در منطقه شهری استیلیانو، جنوب ایتالیا را مورد مقایسه قرار دادند. نتایج نشان داد که تکنیک های PS و SBAS از نظر مناطق منسجم و الگوهای جابجایی به دست آمده، با مقادیر سرعت کم متفاوت برای نقاط جداگانه قابل مقایسه هستند. به طور خاص، PS محدوده ای از سرعت را بین ۲۵-/-۵ میلی متر در سال ارائه می دهد. اور یحمان^۷ و همکاران (۲۰۲۰) تجزیه و تحلیل حرکات زمین لغزش در دره هونزا-ناگر، پاکستان با استفاده از تداخل سنجی راداری دریاچه مصنوعی را مورد بررسی قرار دادند. نرخ تغییر شکل به دست آمده در امتداد خط دید (VLOS) از ۱۱۴- تا ۲۰ میلی متر در سال متغیر بود. نرخ تغییر شکل سرعت پایین شیب (Vslope) از صفر تا ۳۰۰ میلی متر در سال متغیر بود. آستانه پایداری Vslope برای منطقه مورد مطالعه ۱۴ میلی متر در سال محاسبه شد.

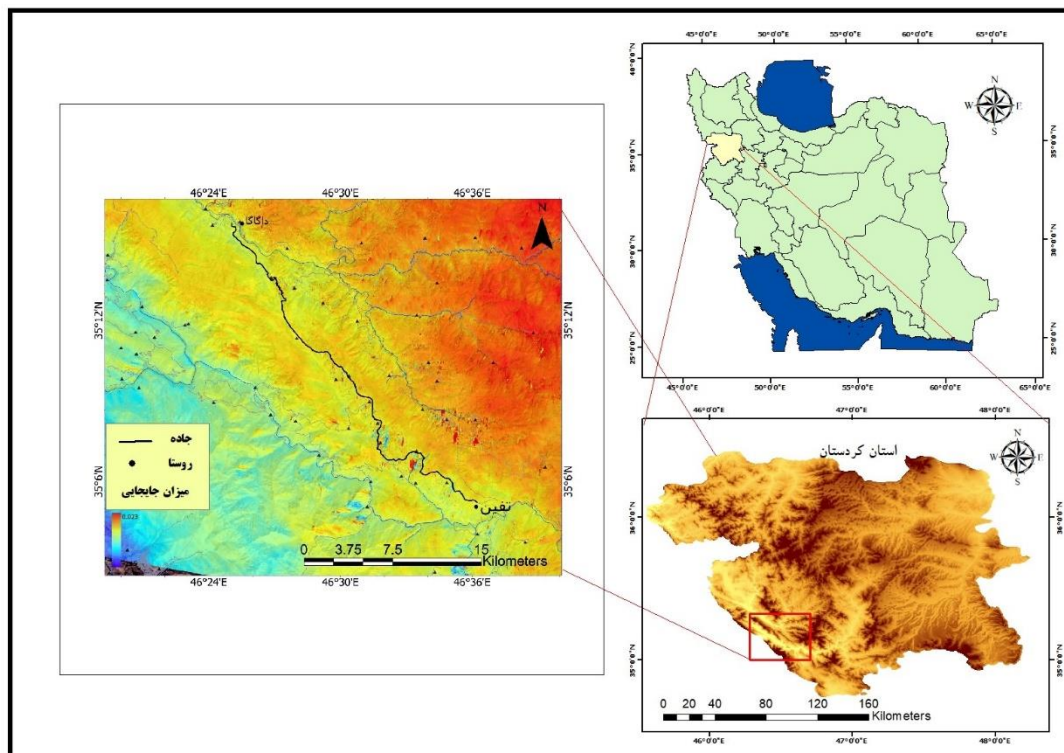
بنابراین شناسایی مناطقی که پتانسیل بالایی برای زمین لغزش دارند و کاهش خسارت ناشی از زمین لغزش بسیار مهم است. بطوری که زمین لغزش در روستای تفرین موجب سلب آرامش از ساکنین روستا شده است و پدیده زمین لغزش در محور تفرین-دگاگا به عنوان مخاطره شاخص و یک تهدید طبیعی فعال قلمداد می شود، به طوریکه تجربه این رخداد می-تواند خسارت جانی و مالی بسیاری را برای ساکنین منطقه (مناطق روستایی) به همراه آورد. لذا بهره گیری از روش های غیرمستقیم و بدون نیاز به بازدید میدانی جهت پایش و تغییرات سطح زمین به ویژه در مناطق کوهستانی و با توجه به شرایط خشن طبیعی می تواند امتیاز بزرگی برای پژوهش در این موضوع باشد. این مطالعه، با هدف بررسی امکان آشکارسازی زمین لغزش های فعال در محور تفرین-دگاگا با تکنیک تداخل سنجی راداری انجام خواهد گرفت. در این پژوهش، ضمن آشکارسازی توزیع مکانی زمین لغزش های به وقوع پیوسته در محدوده مورد مطالعه، با استفاده از تکنیک تداخل سنجی راداری میزان جابجایی ناشی از حرکت زمین لغزش ها در فاصله زمانی دو تصویر راداری پردازش و محاسبه خواهد شد.

محدوده مطالعاتی

محدوده مورد مطالعه مسیر ارتباطی شهرستان کامیاران به میروان است که در شمال غربی شهرستان کامیاران و جنوب شرقی شهرستان سروآباد در طول های "۴۶°۴۳'۵۲" الی "۴۶°۲۱'۱۲" شرقی و عرض های "۳۵°۰۶'۰۳" الی "۳۵°۱۱'۳۴" شرقی

1. Hu & et al
2. Wang et al
3. Jia & et al
4. Vicari & et al

شمالی با طول تقریباً ۲۰ کیلومتر قرار گرفته است (شکل ۱). در عرض حدوداً ۱/۵ کیلومتر در مسیر مورد مطالعه روستاهای تفین، ده‌گاگا، سوره‌توو، کانی‌حسین‌بک، ژیریژه، سرومال واقع شده است. حداکثر و حداقل ارتفاع منطقه به ترتیب ۲۹۸۲ (جنوب منطقه) و ۷۴۸ (شمال غربی) متر است و این امر اختلاف ارتفاعی ۲۲۳۴ متری را نشان می‌دهد. (شکل ۱)



شکل ۱: نقشه موقعیت محدوده مورد مطالعه

مواد و روش

در این پژوهش از انواع مختلف داده شامل تصاویر راداری ماهواره Sentinel-1 سنجنده InSAR و داده‌های برداشت شده از سیستم موقعیت‌یاب جهانی (GPS) در طی عملیات میدانی استفاده شد. همچنین از نقشه‌های توپوگرافی ۱/۵۰۰۰۰ مربوط به سازمان نقشه‌برداری کشور و نقشه‌های زمین‌شناسی ۱/۱۰۰۰۰۰ مربوط به سازمان زمین‌شناسی و اکتشافات معدنی کشور جهت بررسی زمین‌شناسی و مرفولوژی منطقه استفاده می‌گردد. نرم‌افزارهای مورد استفاده در این پژوهش عبارتند از: scapeSAR نسخه ۵/۲، ArcGIS نسخه ۱۰/۶، ENVI نسخه ۵/۳ که به منظور آماده‌سازی و پردازش تصاویر راداری و تهیه نقشه جابه‌جایی مربوط به زمین لغزش‌ها مورد استفاده قرار خواهد گرفت. در این بررسی خط مبنای زمانی و مکانی برای تصاویر SAR تصویر مربوط به سال‌های ۲۰۱۷ تا ۲۰۱۹ پس از کنترل پارامترهای حاصل از خط مبنا و هم‌دوسی برای پردازش‌های بعدی تشخیص داده شده است و مبنای تهیه نقشه جابه‌جایی سطح زمین در دامنه‌های ناپایدار در محدوده مورد مطالعه قرار خواهد گرفت و در نهایت نرخ جابه‌جایی برای سال‌های مذکور محاسبه شد.

در تحلیل تداخل‌سنجی راداری (InSAR) برای بررسی زمین‌لغزش‌ها، داده‌های سنتینل-۱ که توانایی اندازه‌گیری جابه‌جایی‌های سطح زمین را دارند، نقش کلیدی ایفا می‌کنند. در این مطالعه با توجه به قدرت زلزله و شرایط سطح زمین،

داده‌های مربوط به زلزله‌هایی را انتخاب شده است که می‌توانند بهترین نتایج را برای تداخل‌سنجی ارائه دهند. در جدول (۱) زلزله‌های بزرگ‌تر مانند زلزله ۷٫۳ ریشتری کرمانشاه در تاریخ ۲۰۱۷/۱۱/۱۲ و زلزله ۶٫۰ ریشتری جوانرود (۲۰۱۸/۰۸/۲۵) به دلیل ایجاد جابجایی‌های شدیدتر در سطح زمین، داده‌های با کیفیت‌تری برای تحلیل InSAR را فراهم کرده‌اند. این جابجایی‌های بزرگ معمولاً وضوح و کیفیت تصاویر راداری را افزایش می‌دهند و امکان تشخیص دقیق تغییرات سطح زمین و لغزش‌های احتمالی را فراهم می‌کنند. در مقابل، برخی از زلزله‌های کوچک‌تر یا آن‌هایی که در شرایط جوی نامناسب رخ داده‌اند، مانند زلزله ۴٫۶ ریشتری در ۲۰۲۰/۰۱/۰۹ در نزدیکی قصر شیرین که همراه با پوشش برفی بود، برای تحلیل استفاده نشدند. پوشش برفی می‌تواند باعث ایجاد نویز در داده‌های راداری شود و تشخیص تغییرات سطحی زمین را دشوارتر کند. علاوه بر این، زلزله‌هایی با بزرگای کمتر مانند زلزله ۴٫۹ ریشتری در شمال شرق سرپل‌ذهاب نیز ممکن است جابجایی‌های کافی برای ایجاد نتایج دقیق در تصاویر راداری نداشته باشند. بنابراین، عدم انتخاب این رویدادها به دلیل تأثیر کمتر آن‌ها بر سطح زمین و ایجاد مشکلات احتمالی در داده‌های راداری منطقی بوده است. این انتخاب‌های دقیق به ما کمک کرده‌اند تا تنها از داده‌هایی استفاده کنیم که به لحاظ علمی و فنی مناسب‌تر هستند و به بهبود کیفیت تحلیل‌های InSAR برای شناسایی زمین لغزش‌ها در منطقه کمک می‌کنند.

جدول ۱: مشخصات زمین لرزه‌های مورد بررسی در محدوده مورد مطالعه

شماره	گستره	زمان رخداد	بزرگی	تصاویر راداری
۱	کرمانشاه	۷/۲۲/۲۰۱۸	۵٫۶	تحلیل شده
۲	عراق جنوب کلارزپ	۱۱/۲۲/۲۰۱۳	۵٫۴	تحلیل نشده
۳	عراق غرب کلارزپ	۴/۱/۲۰۱۹	۵٫۴	تحلیل نشده
۴	۲۱ کیلومتری جنوب غرب سرپل‌ذهاب	۱۱/۲۵/۲۰۱۸	۶٫۴	تحلیل نشده
۵	شمال شرق سرپل‌ذهاب	۸/۳۱/۲۰۱۸	۴٫۹	تحلیل شده
۶	جنوب غرب جوانرود	۸/۲۵/۲۰۱۸	۶٫۰	تحلیل شده
۷	تازه‌آباد کرمانشاه	۱۱/۱۲/۲۰۱۷	۷٫۳	تحلیل شده
۸	غرب سرپل‌ذهاب کرمانشاه	۱۱/۲۵/۲۰۱۹	۶٫۴	تحلیل نشده
۹	کلارزپ - کرمانشاه	۱/۶/۲۰۱۹	۵٫۹	تحلیل شده
۱۰	عراق - ۲۴ کیلومتری شمال قصر شیرین	۱/۰۹/۲۰۲۰	۴٫۶	تحلیل نشده
۱۱	کرمانشاه	۰۶/۰۵/۲۰۱۹	۴٫۷	تحلیل نشده
۱۲	۳۷ کیلومتری غرب کلارزپ	۰۱/۱۴/۲۰۱۹	۴٫۶	تحلیل نشده

ماخذ: گزارش طرح تثبیت زمین لغزش روستای تفرین

برای دانلود تصاویر ماهواره‌ای مورد نیاز از سایت سازمان فضایی اروپا استفاده گردید، تاریخ‌های تصاویر راداری قبل و بعد از رخداد زلزله‌ها برای تحلیل تداخل‌سنجی مشخص شده‌اند. (جدول ۲) برای هر زلزله، تصاویر با فاصله زمانی مناسب از رخداد زمین لرزه انتخاب شده‌اند تا جابجایی‌های سطح زمین به‌طور دقیق ثبت و تحلیل شوند. به عنوان مثال، برای زلزله ۲۲ ژوئیه ۲۰۱۸ در کرمانشاه، تصویر قبل از زلزله در تاریخ ۴ ژوئیه ۲۰۱۸ و تصویر بعد از زلزله در تاریخ ۲ اوت ۲۰۱۸

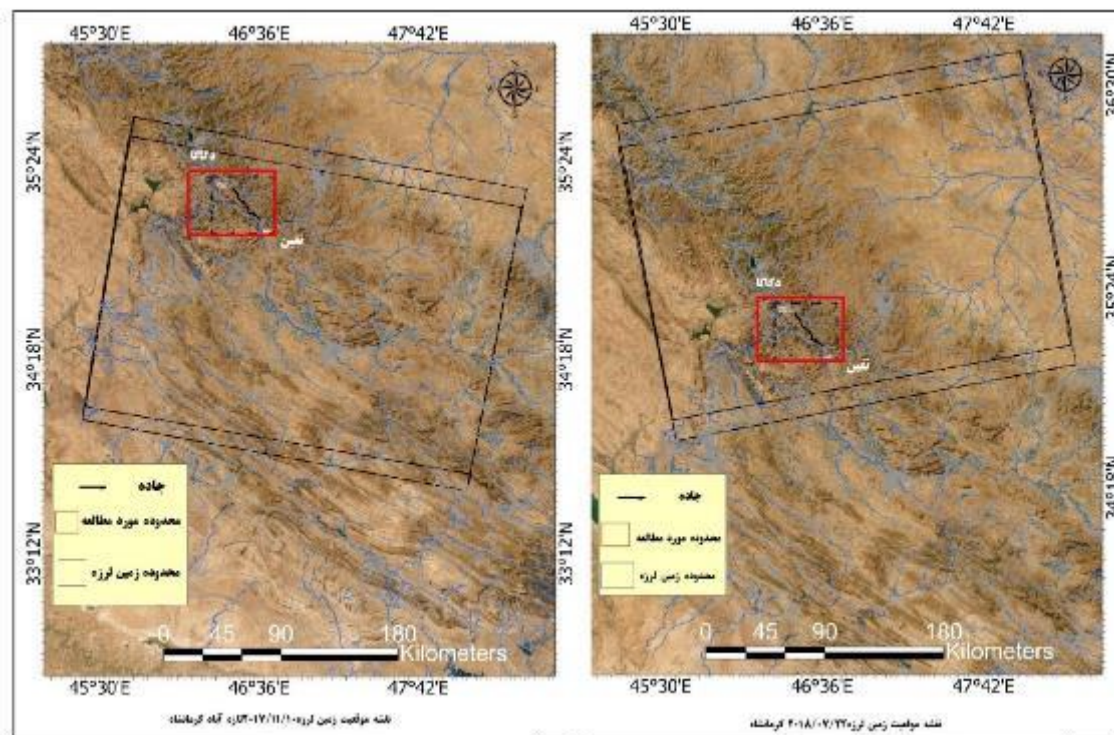
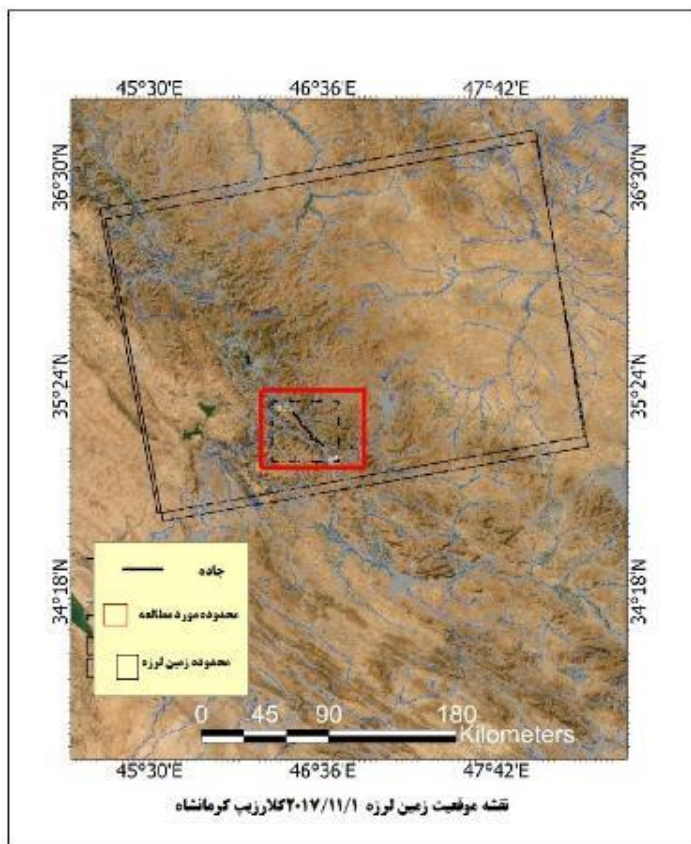
ثبت شده است. این فاصله زمانی ۱۸ تا ۲۰ روزه بین تصاویر، انتخاب خوبی برای تحلیل دقیق تغییرات سطح زمین است. با توجه به قدرت زلزله و شرایط جوی، این تصاویر می‌توانند داده‌های مناسبی برای بررسی زمین‌لغزش‌ها ارائه دهند.

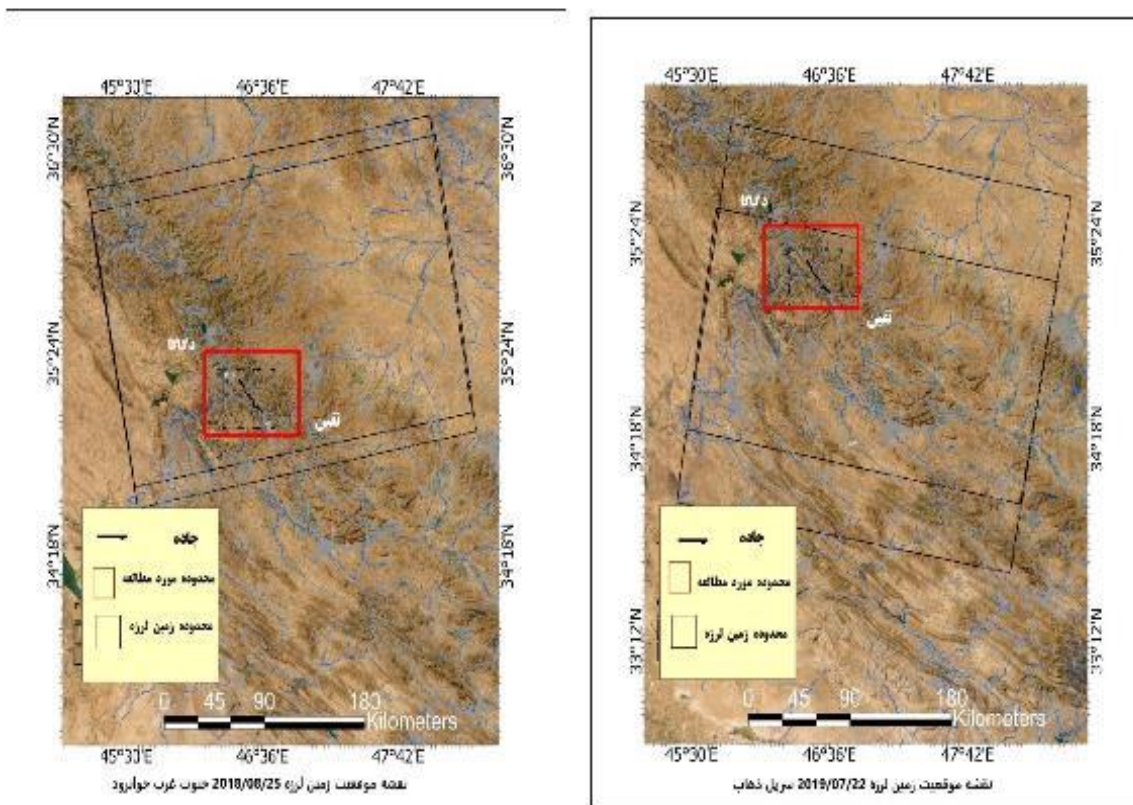
در دیگر موارد نیز تصاویر راداری به دقت انتخاب شده‌اند. به عنوان مثال، برای زلزله ۲۵ نوامبر ۲۰۱۸ در سرپل ذهاب، تصویر قبل از زلزله در ۸ نوامبر و تصویر بعد از زلزله در ۲۶ نوامبر ثبت شده است که فاصله زمانی حدود ۱۸ روزه را پوشش می‌دهد. همچنین، برای زلزله جنوب غرب جوانرود (۲۵ اوت ۲۰۱۸)، تصاویر در تاریخ‌های ۸ اوت و ۲ سپتامبر انتخاب شده‌اند که فاصله مناسبی برای تحلیل تغییرات سطحی ناشی از زلزله است. این انتخاب‌های دقیق باعث می‌شوند که داده‌های به‌دست‌آمده از تداخل‌سنجی، تحلیل‌هایی قابل اعتماد و دقیق ارائه دهند. (شکل ۲)

جدول ۲: زلزله‌های مورد بررسی در محدوده مورد مطالعه

شماره	گستره	زمان رخداد	تصاویر قبل زلزله	تصاویر بعد زلزله
۱	کرمانشاه	۲۲/۷/۲۰۱۸	۰۷/۲۰۱۸ ۰۴/	۰۸/۲۰۱۸ ۰۲/
۴	۲۱ کیلومتری جنوب غرب سرپل ذهاب	۲۵/۱۱/۲۰۱۸	۱۱/۲۰۱۸ ۰۸/	۱۱/۲۰۱۸ ۲۶/
۶	جنوب غرب جوانرود	۲۵/۰۸/۲۰۱۸	۰۸/۲۰۱۸ ۰۸/	۰۹/۲۰۱۸ ۰۲/
۷	تازه‌آباد کرمانشاه	۱۲/۱۱/۲۰۱۷	۱۱/۲۰۱۷ ۱۰/	۱۱/۲۰۱۷ ۹/
۹	کلارزیپ - کرمانشاه	۰۱/۰۶/۲۰۱۹	۰۵/۲۰۱۹ ۱۲/	۰۶/۲۰۱۹ ۱۵/

ماخذ: گزارش طرح تثبیت زمین لغزش روستای تفتین





شکل ۲: موقعیت مکانی زمین لرزه‌های محدوده مورد مطالعه

پردازش و تحلیل مراحل تداخل سنجی سینپل ۱

در فرآیند آنالیز تداخل سنجی (InSAR) با استفاده از داده‌های سنتینل-۱، ابتدا دو تصویر راداری از منطقه مورد مطالعه، یکی قبل و دیگری بعد از رخداد مورد نظر (مثل زلزله یا زمین لغزش) انتخاب می‌شود. این تصاویر باید با یکدیگر هم‌پوشانی زمانی و مکانی داشته باشند. سپس، با استفاده از تکنیک تداخل سنجی، اختلاف فاز بین این دو تصویر محاسبه می‌شود که نشان‌دهنده تغییرات جزئی در ارتفاع سطح زمین است. در ادامه، پردازش‌های مختلفی مانند حذف نویزهای جوی، صاف‌سازی داده‌ها، و تبدیل اختلاف فاز به جابجایی‌های دقیق انجام می‌شود. در نهایت، نتایج به صورت نقشه‌های جابجایی مدل‌های ارتفاعی ارائه می‌شود.

انتخاب خط مبنای عمودی

در جفت تصویر، تصویر مرجع (master) در تاریخ ۸ نوامبر ۲۰۱۸ و تصویر پیرو (slave) در تاریخ ۲۶ نوامبر ۲۰۱۸ گرفته شده است. این تصاویر در Track 6 ثبت شده‌اند. فاصله زمانی بین تصاویر (Btemp) برابر با ۱۸ روز است و فاصله عمودی بین مدارهای ماهواره (Bperp) برابر با -۱۴,۰۸ متر است. همبستگی مدلسازی شده (Modeled Coherence) برای این جفت تصویر ۰,۹۷ است که نشان‌دهنده کیفیت بالای هم‌پوشانی تصاویر است. مقدار Height Ambiguity برای تصویر مرجع برابر با ۱۱۱۴,۹۳ متر و Delta fDC برابر با ۲,۴۶ هرتز است. تصویر پیرو (slave) با Height Ambiguity بی‌نهایت و Delta fDC برابر ۰ است که نشان‌دهنده جابجایی جزئی در این تصاویر است. (جدول ۳)

جدول ۳: مقادیر خطر مبنی محاسباتی زوج تصویر راداری انتخابی

Ref/Sec	Acquisition	Track	Orbit	Bperp (m)	Btemp (days)	Modeled Coherence	Height Ambg (m)	Delta fDC (Hz)
master	08Nov2018	6	13507	-14.08	18	0.97	1114.93	2.46
slave	26Nov2018	6	24753	0	0	1	∞	0
master	07Nov2017	6	19153	-14.44	12	0.97	1087.6	-3.72
slave	19Nov2017	6	19328	0	0	1	∞	0
master	04Jul2018	174	22646	14.3	24	0.97	1097.78	-1.96
slave	28Jul2018	174	22996	0	0	1	∞	0
master	09Aug2018	174	23171	0	0	1	∞	0
slave	02Sep2018	174	23521	-145.62	-24	0.86	107.83	-2.85
master	12May2019	174	27196	-27.62	48	0.93	568.45	0.57
slave	29Jun2019	174	27896	0	0	1	∞	0

مرحله coregistration یا هم ترازی

مرحله coregistration یا هم ترازایی از مراحل حیاتی در تحلیل تداخل سنجی راداری (InSAR) است. در این مرحله، دو تصویر راداری که از منطقه یکسان و در زمان های متفاوت گرفته شده اند، باید به دقت بر روی یکدیگر هم تراز شوند. این هم ترازی به این دلیل انجام می شود که تصاویر راداری که توسط ماهواره ها ثبت می شوند، به دلیل تفاوت های کوچک در زاویه دید ماهواره، ممکن است از نظر موقعیت پیکسل ها اندکی تفاوت داشته باشند. اگر این تفاوت ها اصلاح نشوند، محاسبه دقیق تغییرات فاز (اختلاف ارتفاع یا جابجایی سطح زمین) با خطا مواجه خواهد شد. بنابراین، هدف اصلی این مرحله آن است که پیکسل های متناظر در دو تصویر دقیقاً روی هم منطبق شوند.

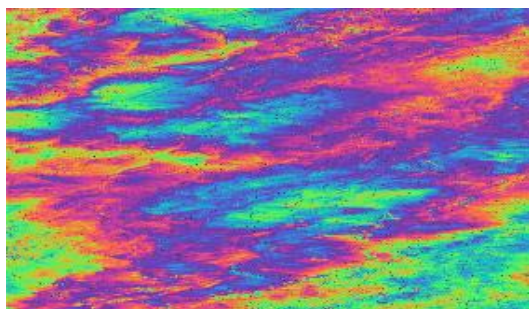
مرحله ایجاد اینترفروگرام

مرحله ایجاد اینترفروگرام (Interferogram) یکی از بخش های کلیدی در فرآیند تداخل سنجی راداری (InSAR) است که به تحلیل جابجایی های سطح زمین کمک می کند. در این مرحله، اختلاف فاز بین دو تصویر راداری که به طور دقیق هم تراز (coregistration) شده اند، محاسبه می شود. این اختلاف فاز به دلیل تغییرات جزئی در موقعیت سطح زمین بین زمان ثبت دو تصویر رخ می دهد و به صورت نقشه ای از تغییرات فاز یا 'اینترفروگرام' نمایش داده می شود. اینترفروگرام اساساً یک نقشه دوبعدی است که مقادیر فاز را در هر پیکسل نشان می دهد. فاز ثبت شده در هر پیکسل ترکیبی از چند

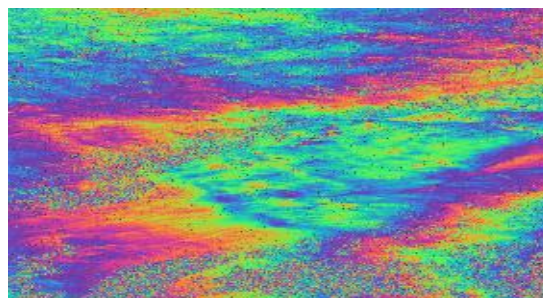
عامل مختلف است. تغییرات سطح زمین، اثرات جوی (مانند تغییرات فشار و رطوبت)، تغییرات ارتفاعی، و نویز سیستم راداری برای محاسبه اینترفروگرام، اختلاف فاز بین دو تصویر به صورت زیر بیان می‌شود (متولی^۱ و دیگران، ۲۰۰۹).

$$\Delta\varphi = \varphi_1 - \varphi_2$$

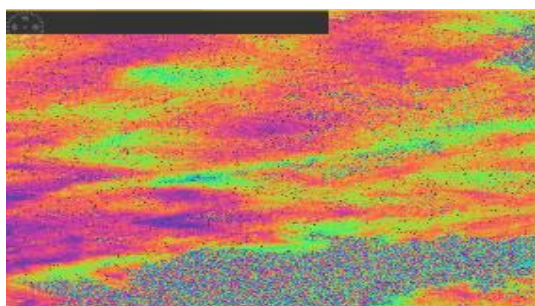
در این فرمول، φ_1 و φ_2 به ترتیب فازهای ثبت شده در هر پیکسل از دو تصویر راداری هستند و $\Delta\varphi$ اختلاف فاز نهایی است که در اینترفروگرام به عنوان جابجایی سطح زمین تفسیر می‌شود. پس از ایجاد اینترفروگرام، نیاز است که اثرات جوی و نویزهای مختلف از این تصویر حذف شوند تا نقشه نهایی جابجایی سطح زمین دقیق تر باشد (اشکال ۳ تا ۷)



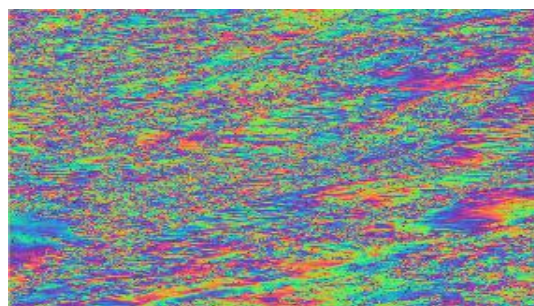
شکل ۴- اینترفروگرام زمین لرزه کرمانشاه تاریخ
۲۲/۰۷/۲۰۱۸



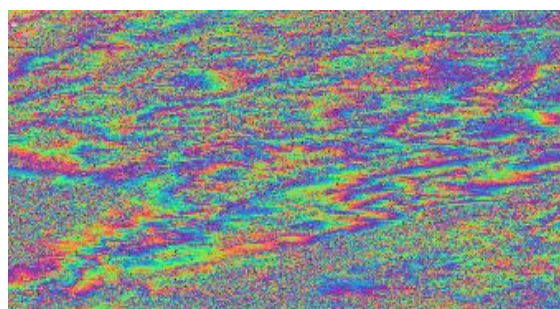
شکل ۳- اینترفروگرام زمین لرزه تازه آباد کرمانشاه تاریخ
۲۵/۱۱/۲۰۱۷



شکل ۶- اینترفروگرام زمین لرزه سرپل ذهاب ۲۵/۱۱/۱۸



شکل ۵- اینترفروگرام زمین لرزه جوانرود ۲۵/۰۸/۲۰۱۸



شکل ۷- اینترفروگرام زمین لرزه کلارزپ - کرمانشاه ۱/۰۶/۲۰۱۹

حذف خطای ناشی از توپوگرافی

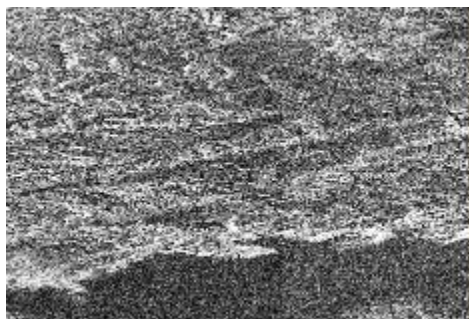
حذف خطای ناشی از توپوگرافیا به عبارتی Removal of Topographic Phase یکی از مراحل مهم در پردازش تداخل سنجی راداری (InSAR) است. در این مرحله، اثرات ناشی از ارتفاعات و پستی های سطح زمین (توپوگرافی) که در فاز اینترفروگرام وجود دارند، حذف می شوند. این کار برای جلوگیری از تداخل اثرات توپوگرافی با جابجایی های سطح زمین ضروری است، زیرا فاز ثبت شده توسط ماهواره علاوه بر جابجایی های سطحی، شامل اطلاعات مربوط به تغییرات ارتفاعی سطح زمین نیز می باشد. (شکل ۸ تا ۱۲)



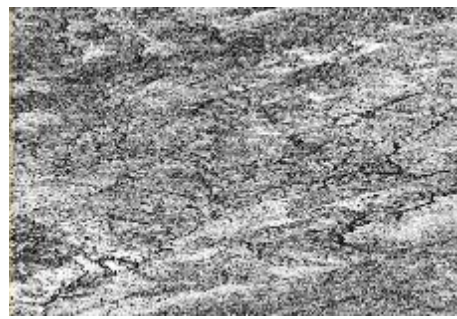
شکل ۹- تصویر همدوسی زمین لرزه کرمانشاه تاریخ
۲۲/۰۷/۲۰۱۸



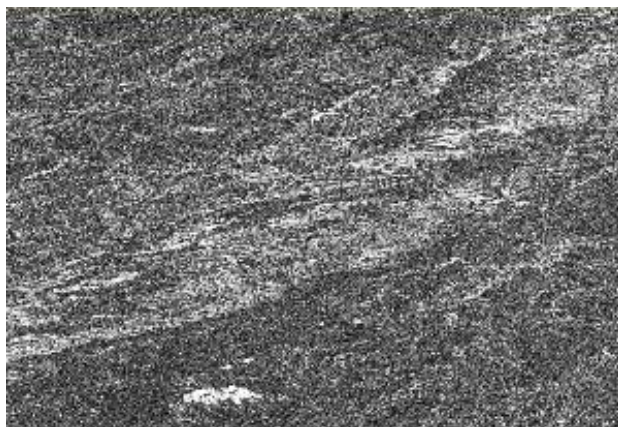
شکل ۸- تصویر همدوسی زمین لرزه تازه آباد
کرمانشاه تاریخ ۱۲/۱۱/۲۰۱۷



شکل ۱۱- تصویر همدوسی زمین لرزه ۲۱ کیلومتری جنوب
غرب سرپل ذهاب ۲۵/۱۱/۰۱۸



شکل ۱۰- تصویر همدوسی زمین لرزه جوانرود
۲۵/۰۸/۲۰۱۸



شکل ۱۲- تصویر همدوسی زمین لرزه کلارزب - کرمانشاه ۱۹/۲۰۰۶/۱

یافته ها و بحث

بررسی و مقایسه داده‌های جابجایی زمین در طول چندین بازه زمانی (از سال ۲۰۱۷ تا ۲۰۱۹) نشان‌دهنده تغییرات چشمگیری در رفتار زمین در طول جاده تفین به دگاگا است. این تحلیل مقایسه‌ای می‌تواند روند نشست زمین و دیگر تغییرات جغرافیایی را در طول این سال‌ها به خوبی مشخص کند.

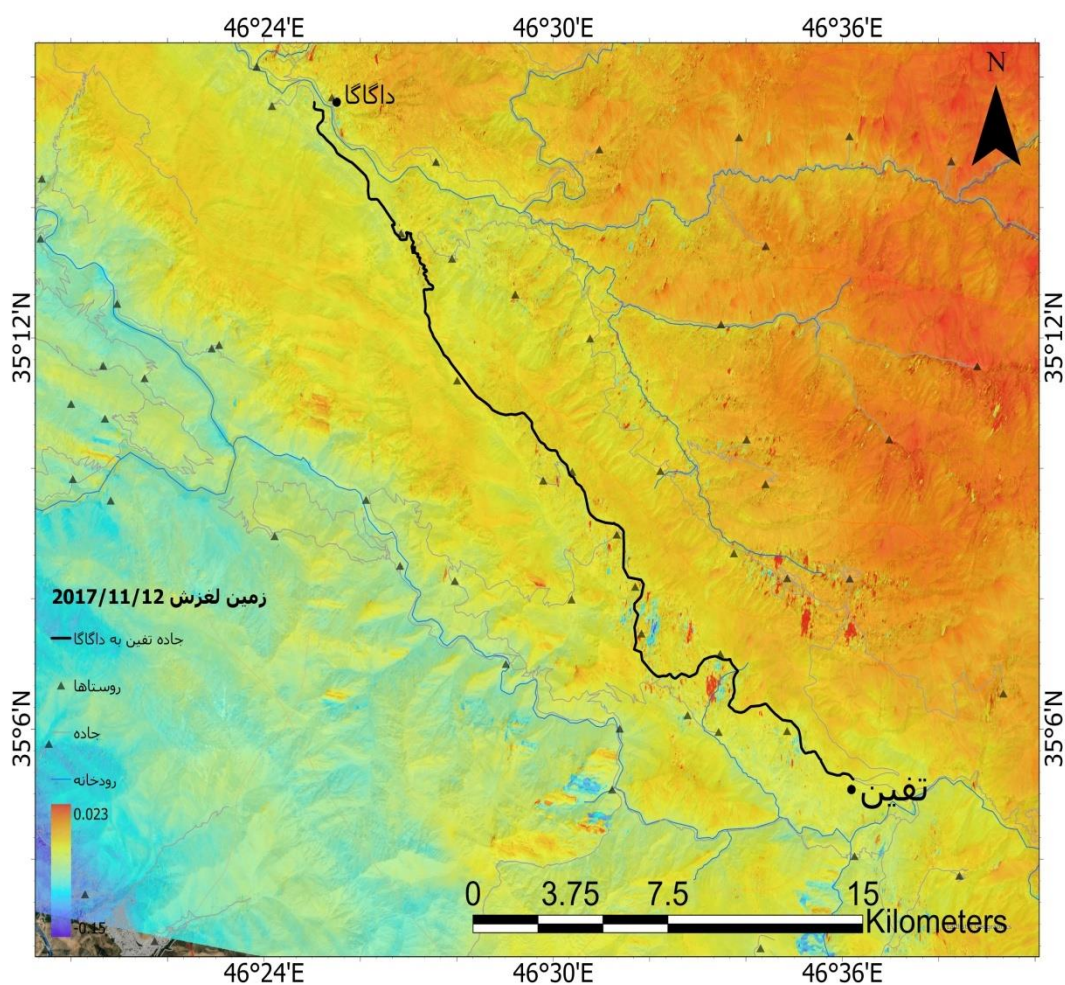
در سال ۲۰۱۷، میانگین جابجایی زمین در این منطقه برابر با $-۰,۰۵۶۱$ متر بوده که نشان‌دهنده نشست گسترده زمین است. حداقل جابجایی ثبت شده در این سال $-۰,۰۸۴۵$ متر بوده است که شدیدترین نشست را در طول مسیر نشان می‌دهد. همچنین، پراکندگی جابجایی‌ها در این سال نسبت به سال‌های دیگر بیشتر است که می‌تواند به معنای تنوع در رفتار زمین باشد. بخش عمده جابجایی‌های سال ۲۰۱۷ در محدوده $-۰,۰۵۸۴$ تا $-۰,۰۵۳۸$ متر قرار دارد. در سال ۲۰۱۸، جابجایی زمین در دو دوره زمانی مختلف (ژوئیه و اوت) اندازه‌گیری شده است: در ژوئیه ۲۰۱۸، میانگین جابجایی برابر با $-۰,۰۲۴۸$ متر بوده که نسبت به سال ۲۰۱۷ کاهش یافته است. با این حال، حداقل جابجایی ثبت شده $-۰,۰۴۴۹$ متر است، که نشان‌دهنده ادامه روند نشست زمین است، اما با شدت کمتر. در اوت ۲۰۱۸، میانگین جابجایی کمی بهبود یافته و به $-۰,۰۲۳۵$ متر رسیده است. حداقل جابجایی ثبت شده $-۰,۰۵۰۱$ متر نشان می‌دهد که برخی نقاط همچنان تحت تأثیر نشست شدید زمین قرار دارند، اما این نشست به طور کلی کمتر و یکنواخت‌تر است.

سال ۲۰۱۹ شاهد کاهش بیشتری در میزان جابجایی زمین بوده است، به طوری که میانگین جابجایی به $-۰,۰۳۷۶$ متر کاهش یافته است. اما برخلاف کاهش میانگین نشست، حداقل جابجایی به $-۰,۱۰۹۴$ متر رسیده که شدیدترین میزان نشست در بین سال‌های مقایسه شده است. این نشان می‌دهد که هرچند به طور کلی روند نشست بهبود یافته، اما برخی نقاط دچار نشست‌های شدیدی شده‌اند که نیاز به توجه فوری دارد.

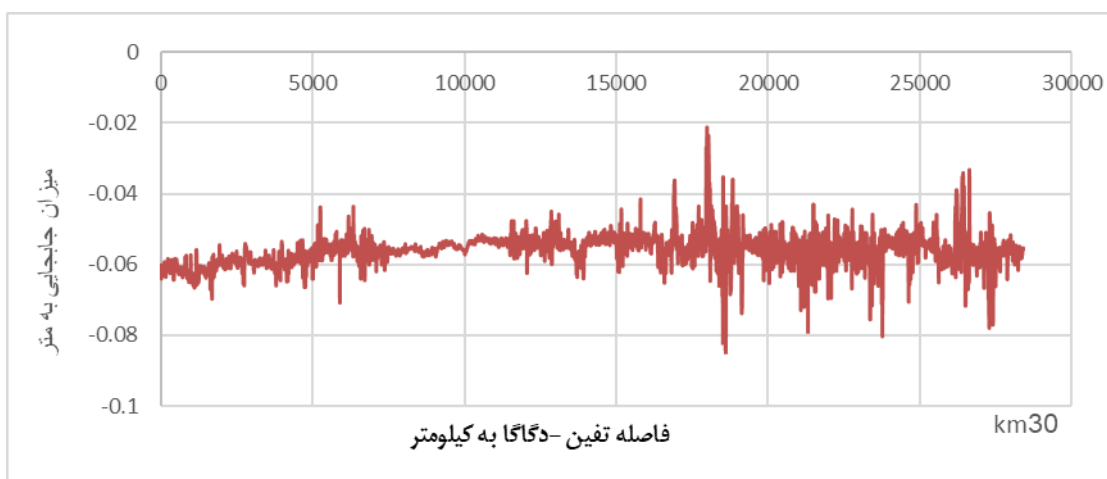
با توجه به داده‌های جابجایی سال‌های ۲۰۱۷ تا ۲۰۱۹، می‌توان نتیجه گرفت که نشست زمین در طول مسیر جاده تفین به دگاگا یک روند مداوم و نگران‌کننده است. هرچند میانگین جابجایی در سال ۲۰۱۸ بهبود یافته است، اما در سال ۲۰۱۹ برخی نقاط دچار نشست شدیدتری شده‌اند. این داده‌ها نشان می‌دهند که منطقه همچنان در معرض خطرات ناشی از فرونشست زمین قرار دارد و اقدامات نظارتی و حفاظتی مستمر ضروری است.

محاسبه میزان جابه‌جایی زمین لرزه تازه آباد کرمانشاه تاریخ ۱۲/۱۱/۲۰۱۷

زلزله‌ای که در تاریخ ۱۲ نوامبر ۲۰۱۷ رخ داده، با توجه به داده‌های جابه‌جایی زمین در منطقه‌ی بین تفین و دگاگا، نشان‌دهنده یک تغییر محسوس در سطح زمین است (شکل ۱۳ و ۱۴). زلزله‌ها معمولاً از انتشار موج‌های لرزه‌ای ناشی می‌شوند که منجر به تغییرات فیزیکی در سطح زمین می‌شود. یکی از نتایج این تغییرات می‌تواند نشست زمین یا بلند شدن سطح در نواحی مختلف باشد. در اینجا داده‌های ما نشان می‌دهد که نشست غالب بوده است؛ چرا که مقادیر جابه‌جایی منفی هستند، به این معنا که سطح زمین در برخی نقاط تا حدود ۶ سانتی‌متر پایین‌تر آمده است. در کل، تحلیل عمیق داده‌های جابه‌جایی و نقشه ارائه شده، نشان‌دهنده تأثیرات قابل توجه زلزله ۲۰۱۷ بر ساختار زمین‌شناسی منطقه است. این اطلاعات می‌تواند به برنامه‌ریزی برای بازسازی، ارزیابی خطرات آینده و مدیریت بهتر بلایای طبیعی کمک کند.



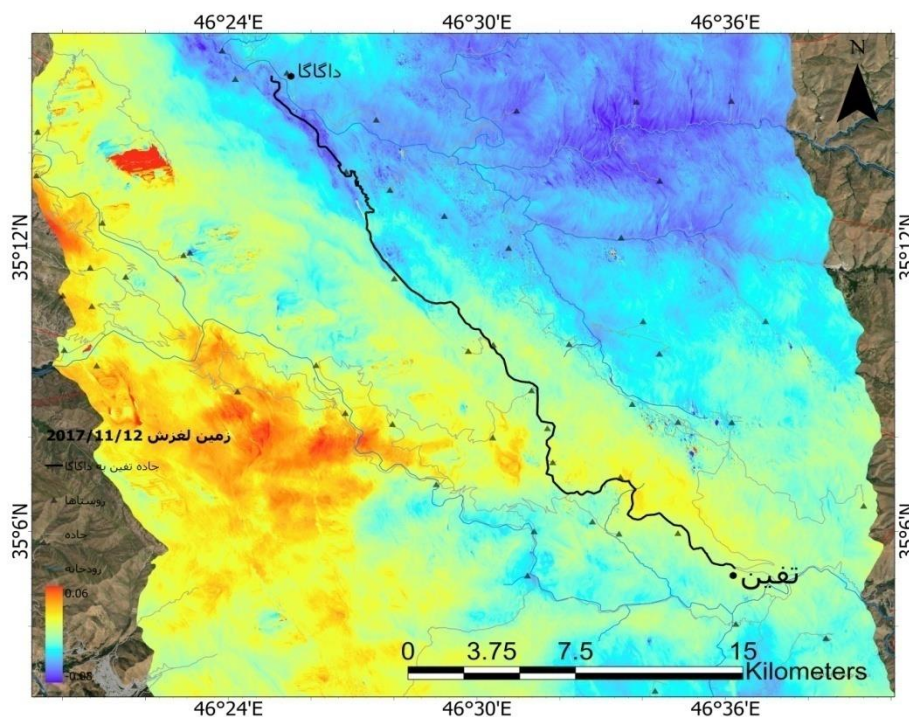
شکل ۱۳: نقشه زمین لغزش تاریخ ۲۰۱۷/۱۱/۱۲



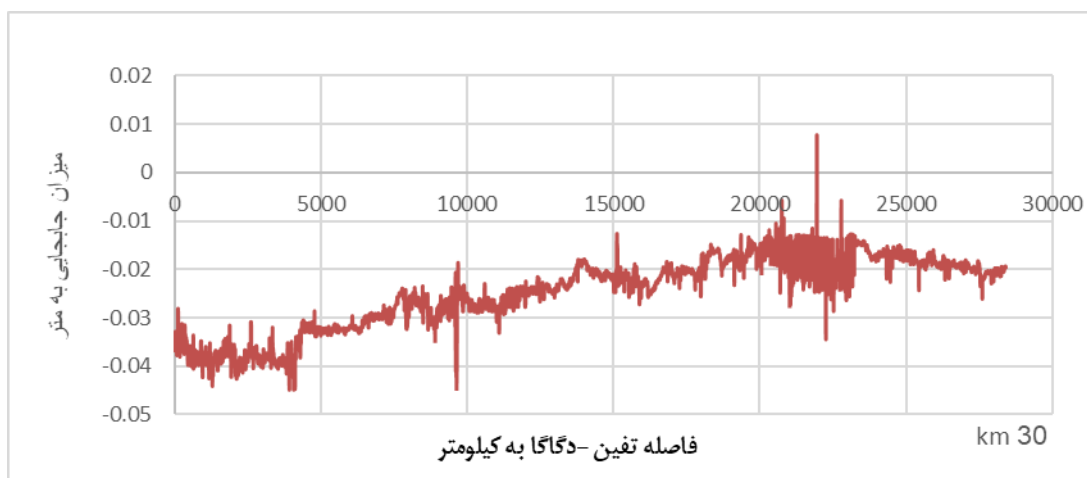
شکل ۱۴- نمودار تغییرات جابجایی در زلزله ۱۲/۱۱/۲۰۱۷ تازه‌آباد کرمانشاه

محاسبه میزان جابه‌جایی زمین لرزه کرمانشاه تاریخ ۲۲/۷/۲۰۱۸

تحلیل جابجایی زمین در امتداد جاده تفین به دگاگا با استفاده از داده‌های تداخل‌سنجی راداری (Sentinel-1) نشان‌دهنده چندین الگوی قابل‌توجه از جابجایی است که نیازمند بررسی دقیق‌تر می‌باشد. همان‌طور که در داده‌ها مشخص شد، میانگین جابجایی حدود 0.0248 متر است که نشان‌دهنده فرونشست کلی زمین در منطقه است. این موضوع ممکن است به دلیل عواملی مانند فعالیت‌های زمین‌لرزه‌ای، لغزش‌های سطحی یا تراکم خاک باشد. مقدار جابجایی به طور کلی منفی بوده، که نشان می‌دهد فرو رفتگی زمین گسترده‌تر از بالا آمدن آن است. این مساله اهمیت زیادی برای منطقه‌ای دارد که در آن فعالیت‌های زیرساختی یا شهری در حال انجام است، زیرا نشست زمین می‌تواند منجر به تخریب زیرساخت‌ها یا ناپایداری‌های محلی شود. (شکل ۱۵ و ۱۶)



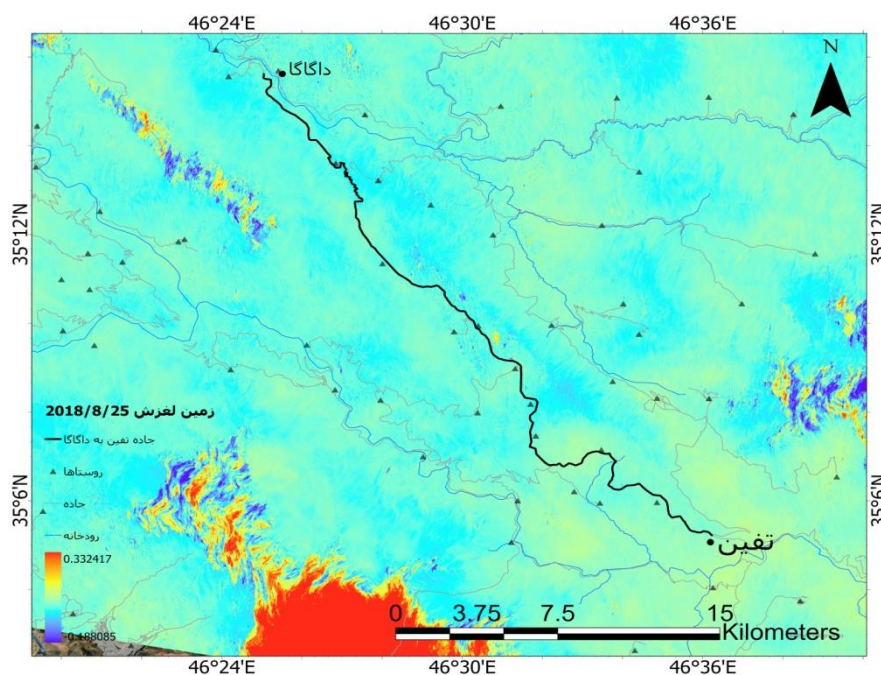
شکل ۱۵: نقشه زمین لغزش تاریخ ۲۰۱۸/۷/۲۲



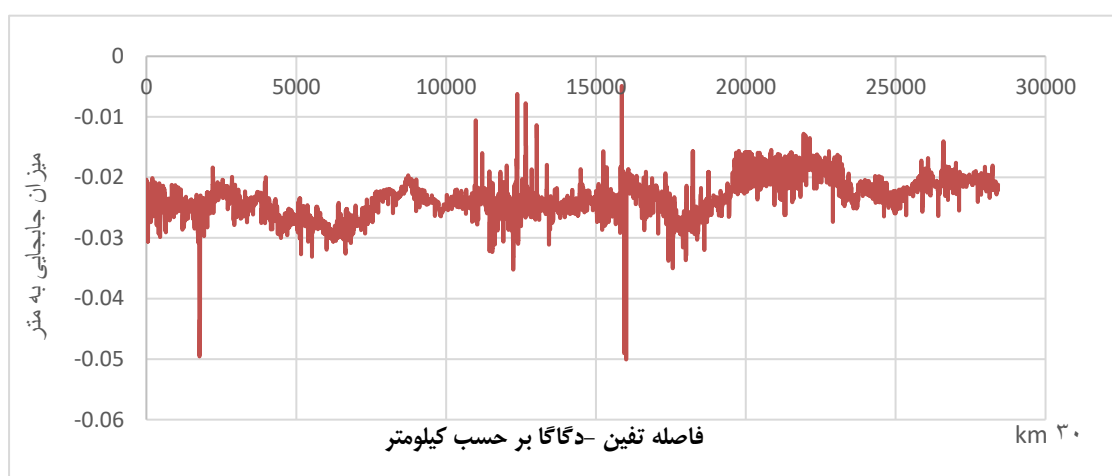
شکل ۱۶- نمودار تغییرات جابه‌جایی در زلزله ۲۲/۷/۲۰۱۸ کرمانشاه

محاسبه میزان جابه‌جایی زمین لرزه جوانرود ۲۵/۰۸/۲۰۱۸

تحلیل دقیق‌تر جابه‌جایی زمین برای تاریخ ۲۵ آگوست ۲۰۱۸ بر اساس داده‌های تداخل‌سنجی سنتینل-۱، نکات عمیق‌تری از وضعیت زمین و میزان نشست را آشکار می‌کند که نشان‌دهنده پایداری کمتر منطقه و تاثیرات احتمالی زمین لرزه‌ها فرآیندهای ژئومورفولوژیکی دیگری است. در این تحلیل، میانگین جابه‌جایی معادل $-0,0235$ متر است، که مشابه با داده‌های قبلی است و نشانه‌ای از نشست مداوم زمین در این منطقه دارد. با این حال، انحراف معیار $0,0034$ متر است که کمتر از مقدار قبلی ($0,0075$ متر) بوده و نشان‌دهنده تنوع کمتر در جابه‌جایی‌ها است. این بدین معنی است که تغییرات جابه‌جایی در طول مسیر یکنواخت‌تر بوده و از پراکندگی کمتری برخوردار است. می‌توان نتیجه گرفت که این بازه زمانی ممکن است تأثیر کمتری از پدیده‌های شدید مانند زمین لرزه یا فعالیت‌های ناگهانی داشته باشد، اما روند نشست زمین به شکل آهسته و پیوسته ادامه داشته است. (شکل ۱۷ و ۱۸)



شکل ۱۷: نقشه زمین لغزش تاریخ ۲۰۱۸/۰۸/۲۵

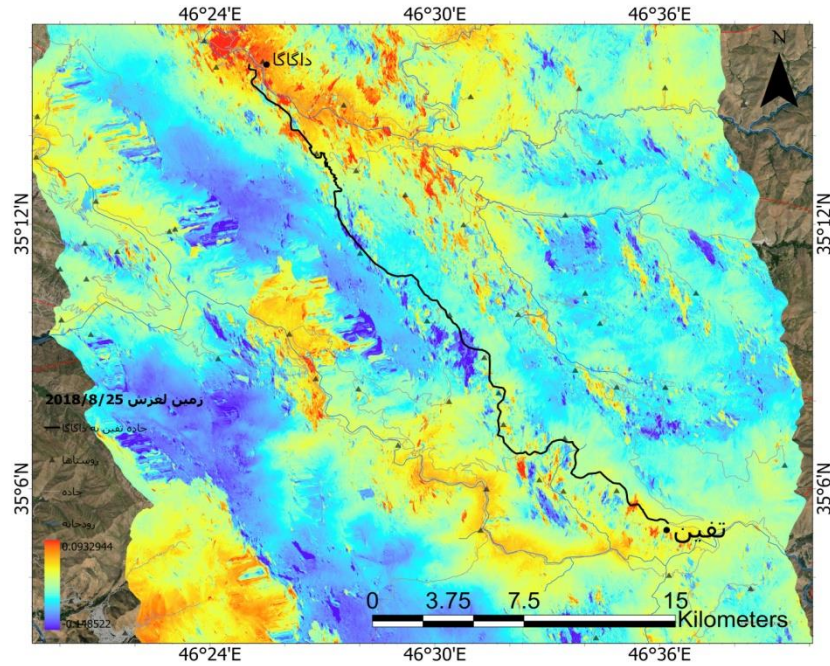


شکل ۱۸- نمودار تغییرات جابه‌جایی در زمین لرزه جوانرود ۲۵/۰۸/۲۰۱۸

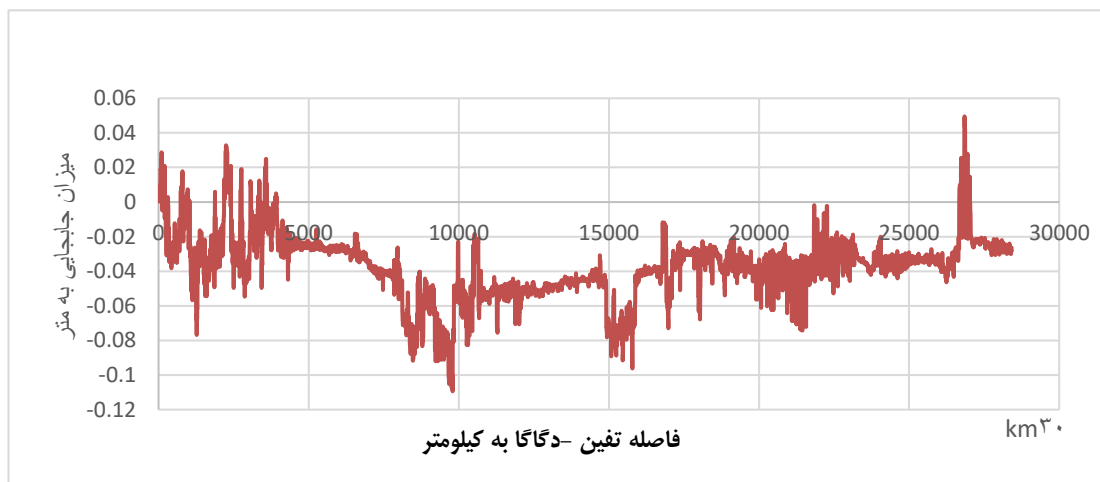
محاسبه میزان جابه‌جایی زمین لرزه کلارزپ - کرمانشاه ۱/۰۶/۲۰۱۹

تحلیل داده‌های جابه‌جایی زمین برای تاریخ ۱۱ ژوئن ۲۰۱۹ نشان‌دهنده تغییرات قابل توجهی در میزان و نوع جابجایی‌ها در منطقه مورد بررسی است. این جابجایی‌ها که با استفاده از تکنیک تداخل‌سنجی راداری (Sentinel-1) محاسبه شده‌اند، به وضوح نشان‌دهنده افزایش نشست زمین در بخش‌های مختلفی از مسیر جاده‌ای تفین به دگاگا است. میانگین جابجایی در این دوره برابر با -0.0376 متر است که نسبت به داده‌های قبلی افزایش قابل توجهی در نشست زمین را نشان

می دهد. این مقدار منفی به طور عمده نشان دهنده فرو رفتن زمین در طول مسیر است و بیانگر این است که منطقه در حال تجربه تغییرات زمین ساختی و فرسایشی قابل توجهی است. (شکل ۱۹ و ۲۰)



شکل ۱۹: نقشه زمین لغزش تاریخ ۲۰۱۹/۰۶/۱



شکل ۲۰- نمودار تغییرات جابه جایی در زلزله کلارزب- کرمانشاه ۲۰۱۹/۰۶/۱

نمونه‌هایی از رفتار سنجی زمین لغزش‌های متاثر از زمین لرزه و عوامل تکتونیکی منطقه

ساختارهای تکتونیکی مانند گسل، چین خوردگی و زونهای برشیبیطور معنی داری باعث ایجاد زمین لغزش میشوند. گسل‌ها به دلیل تنش برشی شدید و ضعیف شدن سنگ‌شناسی نزدیک باعث افزایش حساسیت‌پذیری به زمین لغزش می‌شود. هردو گسل‌های فرعی و اصلی نقش معنی داری در ناپایداری دامنه‌ها می‌گردد. گسل اخیر اصلی (Main Recent Fault) و گسل معکوس اصلی زاگرس (Main Zagros Reverse Fault) دو گسل مهم و تاثیرگذار بر زمین لغزش‌های حوضه دگاگا و بطور کلی رشته کوه زاگرس هستند. مجموعه زمین لغزش حوضه دگاگا در پهله ساختاری سنندج - سیرجان قرار دارد که در آن سرپانتینیت‌های افیولیت‌های سروآباد (سولوا) به اصطلاح افیولیت کردستان در امتداد گسل اصلی اخیر زاگرس نقش مهمی در وقوع آنها دارد. این سرپانتینیت‌ها در امتداد جاده سنندج - مریوان آشکار شده‌اند و در زیر تخته‌های کرتاسه و فیلیت‌های سنندج - سیرجان رانده شده‌اند. شاخه‌های گسل اصلی اخیر و شاخه‌های آن با مکانیزم شیب-لغز و امتداد لغز در امتداد رودخانه آزاد و سیروان مشاهده می‌شود. این گسل‌ها باعث شکستگی و خرد شدن سرپانتینیت‌ها و سایر سنگ‌ها شده است. در بعضی از زمین لغزش‌هایمسیر مریوان به سروآباد به نظر می‌رسد کنترل اصلی در وقوع آن، فعالیت‌های گسل اصلی معکوس زاگرس بریده شده توسط گسل اصلی امتداد لغز جوان و شاخه‌های آن باشد. که جذب آب توسط سرپانتینیت‌های خرد شده را تشدید می‌کند. به دلیل حرکت مداوم این زمین لغزش‌ها جاده مریوان دائماً در حال تخریب است. تصویر (شکل ۲۱)



شکل ۲۱- نمونه ای از زمین لغزش حاصل گسل اصلی زاگرس در مسیر جاده مریوان به سروآباد

درکل محدوده مورد بررسی از گردنه ورودی به روستای پالنگان تا خروجی شهر سروآباد دارای چندین مجموعه زمین لغزش قدیمی است. مجموعه اول حدفاصل بین روستای تفین تا روستای کاکلیک آباد می‌باشد. اولین مرحله رخداد این لغزش باستانی از لحاظ سنی دارای ۱۴ کیلومتر طول و ۶۰۴ متر عرض اسکارپ است. ویژگی‌های این زمین لغزش باستانی در پاشنه‌های زمین لغزش، و سیستم زهکشی هویدا است. در مقیاس زمین‌شناسی دوره یا دوران چندین بار در این دامنه لغزش اتفاق افتاده است و در هرمرحله آثار زمین لغزش قبلی مدفون شده است. در مواردی این زمین لغزش‌ها متروکه شده و نیروهای محرک به وجود آورنده آنها کاملاً از بین رفته‌اند. به دلیل روراندگی ناشی از گسل اصلی زاگرس، پاشنه این زمین لغزش باستانی و فسیل به یک دیوار محکم از سازند برخورد کرده و بطور دائم متوقف شده است. برونزد این دیواره ضخیم و صخره آهکی بیومیکرواسپارایتی در روبروی روستای پالنگان قابل مشاهده است (شکل ۲۲)



شکل ۲۲- نمونه‌ای از زمین لغزش حاصل روراندگی گسل اصلی زاگرس در روستای پالنگان

این سازند از روستای پالنگان تا روستای کاکلیک آباد در نقش کنترلی در پاشنه زمین لغزش فسیل را دارد. اما حدفاصل روستای دگاگا تا روستای تفرلی، این سازند که به دلیل گسل معکوس زاگرس در سطحی بالاتر قرار می‌گیرد موجب ایجاد لغزش‌های بزرگی مانند روستای رزاب شده است. تصویر (شکل ۲۳) نمای کلی از زمین لغزش رزاب را نشان داده است. این حرکت توده‌ای از نوع افتان غیرفعال با جنس مواد سنگی، سرعت زیاد و خشک است که مواد ریزشی آن بصورت فن کوهرفتی نمایان شده است.



ای از زمین لغزش حاصل گسل معکوس زاگرس در روستای رزاب شکل ۲۳- نمونه

نتیجه گیری

از آنجاکه محاسبه نرخ جابجایی‌های عمودی در جهت دید سنجنده راداری با دقت بالا با استفاده از تکنیک تداخل سنجی راداری (InSAR) وجود دارد، بنابراین از این تکنیک در شناسایی و پایش زمین لغزش های فعال منطقه با هدف تکمیل بانک اطلاعاتی زمین لغزش‌ها استفاده شده است، که در نوع خود از جنبه کمی و نیز با رویکرد پژوهش کاربردی محسوب می‌شود. برای این منظور در این پژوهش، از تکنیک تداخل سنجی راداری (InSAR) با داده‌های ماهواره‌ای

سنتینل ۱- برای اندازه‌گیری جابه‌جایی زمین در طول سال‌های ۲۰۱۷ تا ۲۰۱۹ استفاده شد. این روش با مقایسه تصاویر راداری چندزمانه، تغییرات سطح زمین را با دقت بالا شناسایی و میزان جابه‌جایی‌ها را محاسبه می‌کند. تصاویر راداری در بازه‌های زمانی مختلف جمع‌آوری و تحلیل شدند تا تغییرات ارتفاعی زمین، نشست‌ها و لغزش‌ها با دقت ارزیابی شوند. نتایج حاصل از این روش نشان داد که داده‌های جابجایی زمین طی سال‌های ۲۰۱۸ و ۲۰۱۹ نشان‌دهنده تغییرات مهمی در وضعیت زمیندر مسیر جاده تفین به دگاگا هستند. در سال ۲۰۱۸، جابجایی‌های زمین بیشتر به صورت نشست‌های جزئی گزارش شدند، با میانگین جابجایی -۰,۰۲۳۵ متر در ماه اوت که نشان‌دهنده بهبود نسبی وضعیت زمین نسبت به سال ۲۰۱۷ بود. همچنین، نشست‌های محدودی با حداقل جابجایی -۰,۰۵۰۱ متر مشاهده شد که ناپایداری در برخی نقاط خاص را نشان می‌داد. در مقابل، در سال ۲۰۱۹ وضعیت جابجایی‌ها شدیدتر شد. میانگین جابجایی به -۰,۰۳۷۶ متر رسید که نشان‌دهنده افزایش نشست‌های زمین در مقایسه با سال ۲۰۱۸ بود. حداقل جابجایی در این سال به -۰,۱۰۹۴ متر رسید، که نگرانی‌های بیشتری درباره ناپایداری زمین در برخی نقاط ایجاد کرد. انحراف معیار بیشتر در سال ۲۰۱۹ (با مقدار ۰,۰۱۸۹ متر) نیز نشان داد که تغییرات جابجایی در این سال متنوع‌تر و ناپایداری زمین گسترده‌تر شده است. ساختارهای تکتونیکی مانند گسل، چین خوردگی و زونهای برشیبطور معنی داری باعث ایجاد زمین لغزش می‌شوند. گسل‌ها به دلیل تنش برشی شدید و ضعیف شدن سنگ‌شناسی نزدیک باعث افزایش حساسیت پذیری به زمین لغزش می‌شود. هردو گسل‌های فرعی و اصلی نقش معنی‌داری در ناپایداری دامنه‌ها می‌گردد. گسل اخیر اصلی (Main Recent Fault) و گسل معکوس اصلی زاگرس (Main Zagros Reverse Fault) دو گسل مهم و تاثیر گذار بر زمین لغزش‌های حوضه دگاگا و بطور کلی رشته کوه زاگرس هستند. مجموعه زمین لغزش حوضه دگاگا در پهنه ساختاری سنندج - سیرجان قرار دارد که در آن سرپانتینیت‌های افیولیت‌های سروآباد (سولوا) به اصطلاح افیولیت کردستان در امتداد گسل اصلی اخیر زاگرس نقش مهمی در وقوع آنها دارد. نتیجه، مقایسه داده‌های جابجایی و تحلیل‌های رگرسیون نشان می‌دهد که منطقه مورد مطالعه، به ویژه در مسیر جاده تفین به دگاگا، در معرض تغییرات مستمر زمین‌شناسی قرار دارد. در حالی که سال ۲۰۱۸ بهبود نسبی در وضعیت زمین نشان می‌داد، داده‌های سال ۲۰۱۹ از بازگشت نشست‌های شدیدتر و ناپایداری گسترده‌تر خبر می‌دهند. این امر نشان می‌دهد که نظارت مداوم و دقیق به همراه اقدامات حفاظتی فوری برای جلوگیری از خطرات بیشتر در این منطقه ضروری است.

منابع

- بنیاد مسکن انقلاب اسلامی شهرستان سروآباد، ۱۳۹۸ طرح، مطالعات زمین‌شناسی مهندسی وزمین لغزش جهت ایمن سازی روستای تفین (شهرستان سرو آباد استان کردستان)، پژوهشکده سوانح طبیعی
- حجازی، سید اسداله و همتی، فریبا (۱۳۹۵)، پهنه‌بندی خطر زمینلغزش با استفاده از روش آماری رگرسیون لجستیک در حوضه آبریز لواسانات، نشریه تحقیقات کاربردی علوم جغرافیایی، سال ۱۷، شماره ۴۵، تابستان ۶۹
- روستایی، شهرام، روستایی، مهاسا، شریفی‌کیا، محمد، و یار احمدی، جمشید. (۱۳۹۲). کاربرد تداخل سنجی تفاضلی راداری در شناسایی وپایش زمین لغزش‌ها، مطالعه موردی: حوضه آبخیز گرم چای میانه. مهندسی و مدیریت آبخیز، جلد ۵، شماره ۳، ص ۱۹۰-۱۹۸
- شیرانی، کورش. و خوش باطن، محبوبه. (۱۳۹۵). بررسی و پایش زمین لغزش فعال با استفاده از روش تداخل سنجی تفاضلی راداری (مطالعه موردی: زمین لغزش نقل، سمیرم). کوآترنری ایران، دوره ۳، شماره ۱، ص ۵۳-۶۵
- صادقی علی و همکاران، ۱۴۰۱، رفتار سنجی زمین لغزش با استفاده از روش اینترفرومتری (Interferometry) (منطقه مورد مطالعه : شهرستان اردل)، پژوهش‌های ژئومورفولوژی کمی، سال یازدهم، شماره 1، تابستان ۱۴۰۱ صص. ۱۵۳-۱۳۳

عابدینی، موسی. و محمدزاده شیشه‌گران، مریم. (۱۴۰۱). ارزیابی زمین لغزش با استفاده از تصاویر راداری و تداخل سنجی راداری منطقه موردی: حوضه نیرچای. مطالعات علوم محیط زیست، دوره ۷، شماره ۳، ص ۵۲۶۱-۵۱۷۱.

نصیری، شهرام و همکاران (۱۳۸۳) نگرشی بر زمین لغزش در ایران (بررسی موردی: ناپایداری شیب‌ها در جاده هراز، پایگاه داده های علوم زمین کشور، صفحه ۱.

نداف مهوش، سیدرضا حسین‌زاده، ناصر حافظی مقدس، خوزه فرانسسیکو مارتین‌داک، کاپیل مالیک، مهناز جهادی طرقي (۱۴۰۰) بررسی تغییرات توپوگرافی معادن روباز با استفاده از تداخل سنجی راداری الگوریتم PS مطالعه موردی: معدن سنگ آهن سنگان خواف فصلنامه علمی - پژوهشی اطلاعات جغرافیایی دوره ۳۰، شماره ۱۲۰، زمستان ۱۴۰۰ ص ۶۵ - ۷۶.

یاراحمدی، جمشید، حبیب زاده، احد، رفیعی، مالک. و عباس زاده، کریم. (۱۳۹۹). رفتار سنجی توده لغزشی دوپیکر حوزه آبخیز اهر جای با استفاده از روش پردازش پراکنش گرهای ثابت تداخل سنجی راداری و GPS سه‌مفتر کانسسه. فضای جغرافیایی، سال ۲۰، شماره ۶۹، ص ۱۵۲-۱۶۴.

سایت سازمان فضایی اروپا (<https://browser.dataspace.copernicus.eu>)

- Aslan, C., Fumeless, M., Raucous, D., De Michele, M., Bernardine, S. and Cakir, Z. (2020). Landslide Mapping and Monitoring Using Persistent Scatterer Interferometry (PSI) Technique in the French Alps. *Remote Sens*, 12(1305): 1-32.
- Akgun, A., Turk, N., 2010. Landslide susceptibility mapping for Avail (Western Turkey) and its vicinity by multicriteria decision analysis. *Environmental Earth Science* 61: 5
- Casu, F., Manzo, M. and Lanari, R. (2006). A quantitative assessment of the SBAS algorithm performance for surfacedeformation retrieval from Dinar data. *Remote Sens. Environ*, 102, 195-210
- Jia, H. and Liu, L. (2016). A technical review on persistent scatterer interferometry. *J. Mod. Transport*, 24(2): 153-158.
- Hu, J., Guo, J., Xu, Y., Zhou, L., Zhang, S. and Fan, K. (2019). Differential Ground-Based Radar Interferometry for Slope and Civil Structures Monitoring: Two Case Studies of Landslide and Bridge. *Remote Sens*, 11(2887): 1-17.
- Jia, H., Zhang, H., Liu, L. and Liu, G. (2019). Landslide Deformation Monitoring by Adaptive Distributed Scatterer Interferometric Synthetic Aperture Radar. *Remote Sens*, 11(2273): 1-18.
- Jia, H. and Liu, L. (2016). A technical review on persistent scatterer interferometry. *J. Mod. Transport*, 24(2): 153-158.
- Liu, Z., Xu, B., Wang, Q., Yu, W. and Miao, Z. (2022). Monitoring landslide associated with reservoir impoundment using synthetic aperture radar interferometry: A case study of the Yalong reservoir. *Geodesy and Geodynamics*, 13, 138-150.
- Lee, E.M., Jones, D.K.C., 2004. Landslide risk assessment. Thomas Telford, London, p 454
- Luigi Lombardo, b, *, P. Martin Maib (2018) Presenting logistic regression-based landslide susceptibility results, *Engineering Geology*
- Pour Ghasemi, H.R., B. Pradhan, and C. Gockel. 2012. Application of fuzzy logic and analytical hierarchy process (AHP) to landslide susceptibility mapping at Haraz watershed, Iran. *Natural Hazards* 63: 965-996. doi:10.1007/s11069-012-0217-2.
- Mutawalli, S., Esmaili, R., Hosseinzadeh, M.M., (2009), The Signification of Sensitive Regions in the Vaz Catchment by Logistic Regression, *Journal of Physiography*, Volume 2, Number 5, Autumn, PP. 73-83
- Rostami Sh. (2004), Evaluation of Landslide Occurrence in Nasir Abad Village Várzea (Province of East Azarbayjan) by Using Quantitative Methods, *Journal of Humanity*, Vol. 8, No. 1: PP. 45.06
- Turner, D., Lucier, A. and De Jong, S.M. (2015). Time Series Analysis of Landslide Dynamics Using an Unmanned Aerial Vehicle (UAV). *Remote Sens*, 7, 1736-1757.

- Tee Xiong, I Ged Budi Indrawn*, and Doni Prakasa Eka Putra (2017), Landslide Susceptibility Mapping Using Analytical Hierarchy Process, Statistical Index, Index of Entropy, and Logistic Regression Approaches in the Tinapa Watershed, Yogyakarta. *Journal of Applied Geology*, vol. (1), 2017, pp. 78–93
- Ur Rehman, M., Zhang, Y., Meng, X., Su, X., Catani, F., Rehman, G., Yue, D., Khalid, Z., Ahmad, S. and Ahmad, I. (2020). Analysis of Landslide Movements Using Interferometric Synthetic Aperture Radar: A Case Study in Hunza Nagar Valley, Pakistan. *Remote Sens.*, 12(2054): 1-20.
- Wang, G., Wang, Y., Zang, X., Zhu, J. and Wu, W. (2019). Locating and monitoring of landslides based on small baseline subset interferometric synthetic aperture radar. *Journal of Applied Remote Sensing*, 13(4): 1-20.
- Wenchao Huangfu 1, Weicheng Wu 1, *, Xiaojing Zhou 1, Ziyu Lin 1, Guoliang Zhang 2 , Renxiang Chen 2 , Yong Song 2 , Tao Lang 2 , Yaozu Qin 1 , Penghu Ou 1 , Xiaofeng Zhang 3 , Xiang tong Liu 4 and Wenchang Liu 1(2021), Landslide Geo-Hazard Risk Mapping Using Logistic Regression Modeling in Guidi, Jiangxi, China, *Sustainability* 2021, 13, 4830
- Wu, W.; Ai, G. Risk assessment of natural disasters in the course of selection of nuclear waste disposal. *J. East China Geol. Inst.* 1995, 18, 260–265. (In Chinese with English abstract)
- Vicari, A., Angelo Famiglietti, N., Colangelo, G. and Cecere, G. (2019). A comparison of multi temporal interferometry techniques for landslide susceptibility assessment in urban area: an example on Stagliano (MT), a town of Southern of Italy. *Geomatics, Natural Hazards and Risk*, 10(1): 836-852.