



University of Tehran Press

Environmental

Hazards

Management



Iranian Hazardology Association
Online ISSN: 2383-0530

Home Page: <https://jhsci.ut.ac.ir>

Assessment of land subsidence in the Persepolis region and its hazards

Roghieh Nejad Hosseini¹ | Ebrahim Moghimi² | Abolghasem Gorabi^{3*} | Mousa Hosseini⁴ | Mansour Jafarbigloo⁵

1. Department of Physical Geography, PhD student, Faculty of Geography, University of Tehran, Tehran, Iran. Email: nejadhoseyni@ut.ac.ir
2. Department of Physical Geography, Geomorphology, Faculty of Geography, University of Tehran, Tehran, Iran. Email: emoghimi@ut.ac.ir
3. Corresponding Author, Department of Physical Geography, Geomorphology, Faculty of Geography, University of Tehran, Tehran, Iran. Email: gorabi@ut.ac.ir
4. Department of Physical Geography, Water Resources Engineering, Faculty of Geography, University of Tehran, Tehran, Iran. Email: smhosseini@ut.ac.ir
5. Department of Physical Geography, Geomorphology, Faculty of Geography, University of Tehran, Tehran, Iran. Email: mjbeiglou@ut.ac.ir

ARTICLE INFO

Article type:
Research Article

Article History:

Received 27 November 2024
Revised 14 December 2024
Accepted 18 December 2024
Published 20 December 2024

Keywords:

Persepolis,
Land subsidence,
Overexploitation of groundwater,
Protection of historical heritage,
Scatterer Interferometry.

ABSTRACT

The Persepolis World Heritage Site, located in the northern part of Fars Province, is one of Iran's most significant historical landmarks, dating back to the Achaemenid period (300–560 BC). Studies have shown that the surrounding areas are experiencing land subsidence due to prolonged drought, dam construction, and excessive groundwater extraction. Therefore, this study aims to investigate and map the stability/instability patterns of Persepolis from October 27, 2016, to February 22, 2020, using radar interferometry. To analyze the time series of subsidence in the study area, we applied Persepolis Time Series Analysis (PS-InSAR). The analysis was based on 180 SENTINEL-1A images, covering both ascending and descending orbits, to assess the rate of land deformation at the Persepolis archaeological site. Specifically, we focused on the Takht-e Jamshid region, located on the southern slope of Mount Ko Rahmat, and identified and measured land deformation phenomena there. Our results show that Takht-e Jamshid has not experienced significant subsidence during the observation period (2016–2020), with an estimated rate of -5 to -10 mm per year. This study provides evidence that the observed deformation at the site is not related to the subsidence of the Marvdasht aquifers, which are underlain by Quaternary sediments. These findings contribute to a deeper understanding of land subsidence dynamics in the Takht-e Jamshid region and underscore the need for continued monitoring and management of this invaluable archaeological site.

Cite this article: Nejad Hosseini, R.; Moghimi, E.; Gorabi, A.; Hosseini, M. & Jafarbigloo, M. (2024). Assessment of land subsidence in the Persepolis region and its hazards. *Environmental Hazards Management*, 11 (3), 225-242.
DOI: <http://doi.org/10.22059/jhsci.2024.386086.853>



© The Author(s). **Publisher:** University of Tehran Press.
DOI: <http://doi.org/10.22059/jhsci.2024.386086.853>

1. Introduction

Persepolis, also known as Takht-e Jamshid in modern Persian, was the prominent capital of the Achaemenid Empire and remains one of the world's most renowned archaeological sites. Built approximately 2,500 years ago during the reign of Darius I, it served as a vital commercial and administrative hub in the Achaemenid era. In recent decades, persistent droughts, excessive groundwater extraction, and climate change have led to a decline in water resources in the Marvdasht plain and the surrounding areas of Persepolis. These changes have caused land subsidence in the region, posing a significant threat to the site's ancient infrastructure. Previous studies have established

a direct link between land subsidence and declining groundwater levels, particularly in areas with high concentrations of soft sediments, such as the Marvdasht Plain. Given these findings, land subsidence is recognized as one of the most critical threats to archaeological sites, emphasizing the importance of careful monitoring. Considering the historical significance of Persepolis and the ongoing droughts and environmental changes affecting Iranian plains, it is essential to address the risk of subsidence at this World Heritage Site. Therefore, this study aims to fill the existing gap by identifying and evaluating subsidence patterns in the Persepolis region. It uses radar interferometry techniques, specifically the PS-InSAR method, with data spanning from 2016 to 2020 to provide accurate and up-to-date information.

2. Materials and methods

This study utilized the PS-InSAR technique to monitor and quantify ground deformation at the Persepolis World Heritage Site, a UNESCO World Heritage Site of significant global and national importance in Iran. The objective was to examine the spatial and temporal changes in land subsidence and geomorphological variations within the Persepolis site over five years, from 2016 to 2020. A comparison of InSAR measurements from different orbits revealed a correlation of approximately 0.73 between the measurements, with an RMSE of 1.86 mm per year, indicating strong consistency in the InSAR data. The results showed that subsidence at the Persepolis site remained largely stable from 2016 to 2020, with an average rate of ≤ -0.107 mm/year based on 26 permanent scatterers (PS). The estimated subsidence rate for the 2016–2020 period, derived from Permanent Scatterer Interferometry (PSI), aligns with the geological setting and land use. Given these findings, it can be concluded that an integrated approach—considering the geological context along with surface and groundwater management—is essential for evaluating subsidence rates and implementing effective environmental management strategies.

3. discussion and Results

According to the results derived from the radar images, the southern and western regions surrounding the Persepolis World Heritage Site are among the areas experiencing the highest rates of land subsidence, ranging from -200 mm per year to -100 mm per year. These regions, which rely heavily on groundwater exploitation for agricultural activities, are particularly vulnerable. In the vicinity of Persepolis, several villages and towns, including Vali Asr (southeast), Kenare (south), Firuzi (east), and Talar Dehkadeh (northwest), are located in areas prone to significant subsidence. Notably, Kenare village, situated 3.5 km southwest and south of the Persepolis site, has experienced subsidence rates exceeding 130 mm yearly. The deposits in these areas consist of silt, sand, and floodplain clay, scattered across the villages and especially susceptible to subsidence.

During the study period (October 2016 to March 2020), the average annual subsidence rate in the western Persepolis region was more than -100 mm per year. However, the Persepolis complex itself showed no significant subsidence. To investigate the rate of subsidence in the broader Persepolis area, land deformation measurements obtained in the GIS environment were integrated with other parameters. The region was classified based on geological units, and the resulting subsidence data were compared with the classified geological map. The comparison revealed a clear correlation between the subsidence rate and the geological units in the study area, highlighting the role of underlying soil and sediment composition in influencing land deformation patterns.

4. Conclusion

The study employed the PS-InSAR technique to monitor and quantify ground deformation at the Persepolis World Heritage Site, a UNESCO World Heritage Site of significant global importance located in Iran. The spatial and temporal variations in land subsidence and geomorphological changes were analyzed across the site over five years, from 2016 to 2020. A comparison of InSAR measurements from different orbits revealed a correlation of approximately 0.73 between these measurements, with an RMSE of 1.83 mm per year, indicating strong consistency in the InSAR data.

The results showed that subsidence at the Persepolis site remained relatively stable from 2016 to 2020, with an average rate of ≤ -0.107 mm/year, based on the analysis of 26 permanent scatterers (PS).

The estimated subsidence rate for the 2016–2020 period, obtained using Permanent Scatterer Interferometry (PSI), was consistent with the area's geological setting and land use patterns.

In light of these findings, it can be concluded that effectively assessing subsidence rates requires an integrated approach that takes into account both the geological context and the management of surface and groundwater resources.

References

- Akhoondzadeh, M. (2015). (PDF) Principles of Remote Sensing [WWW Document]. ResearchGate. URL https://www.researchgate.net/publication/366592510_Principles_of_Remote_Sensing (accessed 12.13.24).
- Dehghan-Soraki, Y., Sharifikia, M., & Sahebi, M.R. (2015). A comprehensive interferometric process for monitoring land deformation using ASAR and PALSAR satellite interferometric data. *GIScience Remote Sens.* 52, 58–77. <https://doi.org/10.1080/15481603.2014.989774>
- Kehl, M., Skowronek, A., & Frechen, M. (2009). Nature and age of Late Quaternary basin fill deposits in the Basin of Persepolis/Southern Iran | Request PDF [WWW Document]. URL https://www.researchgate.net/publication/222130117_Nature_and_age_of_Late_Quaternary_basin_fill_deposits_in_the_Basin_of_PersepolisSouthern_Iran (accessed 11.12.24).
- Moghimi, E. (2012). *Urban geomorphology*, University of Tehran Press, ISBN 978-964-03-6276-1.
- Perissin, D. (2016a). Interferometric SAR Multitemporal Processing: Techniques and Applications, in: Ban, Y. (Ed.), *Multitemporal Remote Sensing, Remote Sensing and Digital Image Processing*. Springer International Publishing, Cham, pp. 145–176. https://doi.org/10.1007/978-3-319-47037-5_8
- Rajabi, A., & Ghorbani, E. (2016). Land subsidence due to groundwater withdrawal in Arak plain, Markazi province, Iran. *Arab. J. Geosci.* 9, 738. <https://doi.org/10.1007/s12517-016-2753-7>



ارزیابی فرونشست زمین در منطقه تخت جمشید و مخاطرات آن

رقیه نژادحسینی^۱ | ابراهیم مقیمی^۲ | ابوالقاسم گورابی^{۳*} | موسی حسینی^۴ | منصور جعفریگللو^۵

۱. گروه جغرافیای طبیعی، دانشجوی دکتری ژئومورفولوژی، دانشکده جغرافیا، دانشگاه تهران، تهران، ایران. رایانامه: nejadhoseyni@ut.ac.ir
۲. گروه جغرافیای طبیعی، ژئومورفولوژی، دانشکده جغرافیا، دانشگاه تهران، تهران، ایران. رایانامه: emoghimi@ut.ac.ir
۳. نویسنده مسئول، گروه جغرافیای طبیعی، ژئومورفولوژی، دانشکده جغرافیا، دانشگاه تهران، تهران، ایران. رایانامه: goorabi@ut.ac.ir
۴. گروه جغرافیای طبیعی، مهندسی منابع آب، دانشکده جغرافیا، دانشگاه تهران، تهران، ایران. رایانامه: smhosseini@ut.ac.ir
۵. گروه جغرافیای طبیعی، ژئومورفولوژی، دانشکده جغرافیا، دانشگاه تهران، تهران، ایران. رایانامه: mjbeiglou@ut.ac.ir

چکیده

اطلاعات مقاله

این پژوهش با هدف بررسی و ترسیم الگوهای پایداری / ناپایداری برای منطقه تخت جمشید در دامنه زمانی ۲۷ اکتبر ۲۰۱۶ تا ۲۲ فوریه ۲۰۲۰ با استفاده از تداخل سنجی راداری انجام گرفت. برای آنالیز سری زمانی فرونشست رخ داده در منطقه از آنالیز سری زمانی پراکنشگر دائمی (PS-InSAR) استفاده شد. داده‌ها ۱۸۰ تصویر SENTINEL-1 A بود که مدارهای صعودی و نزولی را پوشش می‌دهند. از این داده‌ها برای ارزیابی نرخ تغییر شکل زمین در سایت میراث باستان‌شناسی تخت جمشید استفاده شد. بدین منظور پدیده تغییر شکل زمین در منطقه تخت جمشید شناسایی و اندازه‌گیری شد. یافته‌ها نشان می‌دهد که فرونشست در محوطه تخت جمشید در طول دوره مشاهده (۲۰۱۶-۲۰۲۰) تقریباً پایدار بوده است ($-0/107 \geq$ میلی‌متر / سال، میانگین ۲۶ پراکنشگر دائمی (PS) در سایت). نرخ فرونشست تخمینی برای دوره ۲۰۱۶-۲۰۲۰، به‌دست‌آمده با استفاده از تداخل سنجی پراکنشگر دائمی (PSI) نشان داد که تغییر شکل مشاهده‌شده در سایت با بستر زمین‌شناسی و کاربری زمین مطابقت دارد و با سفره‌های زیرزمینی مرودشت که روی رسوبات کواترنر قرار دارند ارتباطی ندارد. این نتایج به درک بهتر پویایی فرونشست زمین در منطقه تخت جمشید کمک کرده و بر لزوم نظارت و مدیریت مستمر این محوطه باستانی ارزشمند تأکید می‌کند.

نوع مقاله:

مقاله پژوهشی

تاریخ‌های مقاله:

تاریخ دریافت: ۱۴۰۳/۰۹/۰۷

تاریخ بازنگری: ۱۴۰۳/۰۹/۲۴

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۳/۰۹/۲۸

تاریخ انتشار: ۱۴۰۳/۰۹/۳۰

کلیدواژه:

تخت جمشید،

فرونشست زمین،

بهره‌برداری بی‌رویه از آب‌های زیرزمینی،

حفاظت از میراث تاریخی،

تداخل سنجی پراکنشگرهای دائمی.

استناد: نژادحسینی، رقیه؛ مقیمی، ابراهیم؛ گورابی، ابوالقاسم؛ حسینی، موسی و جعفریگللو، منصور (۱۴۰۳). ارزیابی فرونشست زمین در منطقه تخت جمشید و مخاطرات آن. *مدیریت مخاطرات محیطی*، ۱۱ (۳)، ۲۲۵-۲۴۲.

DOI: <http://doi.org/10.22059/jhsci.2024.386086.853>

© نویسندگان

ناشر: مؤسسه انتشارات دانشگاه تهران.

DOI: <http://doi.org/10.22059/jhsci.2024.386086.853>



مقدمه

تحقیقات متعدد نشان داده‌اند که فرونشست زمین در مناطقی با رسوبات نرم متراکم مانند دشت مرودشت، ارتباط مستقیم با افت سطح آب‌های زیرزمینی دارد [۲۱، ۲۰، ۱۳، ۱۲]. پژوهش‌های مشابه در نقاط دیگر نیز نشان داده‌اند که کاهش منابع آب زیرزمینی به‌ویژه در مناطقی با فعالیت‌های کشاورزی و بهره‌برداری از چاه‌های عمیق، سبب تسریع فرایند فرونشست زمین می‌شود [۴۰، ۳۴، ۲، ۴، ۷، ۸، ۱]. پژوهش‌ها درباره مناطق میراث جهانی مانند پترا نیز نشان داده است که استفاده از روش‌های PS-InSAR می‌تواند به شناسایی دقیق فرونشست در محیط‌های باستانی کمک کند و اطلاعات ارزشمندی برای مدیریت بهتر منابع فراهم آورد [۹]. با توجه به نتایج پژوهش‌های پیشین، فرونشست زمین از جدی‌ترین تهدیدها برای مناطق باستانی است و پایش دقیق این پدیده اهمیت بسیار زیادی دارد. با توجه به اهمیت سایت تاریخی تخت جمشید و خشکسالی‌های مداوم و تغییرات محیطی در دشت‌های ایران در دهه‌های اخیر، توجه به این سایت جهانی از منظر مخاطره فرونشست ضروری است. علی‌رغم تحقیقات متعدد در زمینه فرونشست زمین و تأثیرات آن در نقاط مختلف ایران تا کنون پژوهشی درباره پیامدهای فرونشست در محوطه‌های میراث جهانی، به‌ویژه تخت جمشید انجام نگرفته است. این خلأ در پژوهش‌ها به‌ویژه در زمینه ارزیابی فرونشست در مناطق تحت تأثیر تغییرات اقلیمی و بهره‌برداری بی‌رویه از منابع آبی به‌وضوح مشاهده می‌شود. این پژوهش با شناسایی و ارزیابی الگوهای فرونشست در منطقه تخت جمشید با استفاده از روش تداخل‌سنجی راداری در دامنه زمانی ۲۰۱۶ تا ۲۰۲۰ و ارائه داده‌های دقیق و به‌روز، در پی جبران این خلأ است. تداخل‌سنجی راداری با درجهٔ مصنوعی^۱ یکی از روش‌های سنجش از دور است که به‌منظور بررسی حرکات سطح زمین در زمین‌لرزه ۱۹۹۲ لندرز کالیفرنیا ابداع شد. در این روش، دو یا چند تصویر راداری برای تولید مدل رقومی ارتفاعی یا تهیه نقشه جابه‌جایی سطح زمین به‌کار می‌روند. در این روش، اختلاف فاز بین دو موج متفاوت اندازه‌گیری شده و این اختلاف فاز به تغییر فاصله بین سنجنده و هدف زمینی یا جابه‌جایی سطح زمین نسبت داده می‌شود. تداخل‌سنجی با درجهٔ مصنوعی، از فاز تشعشع بازتابیده‌شده استفاده کرده و تصاویر مختلط حاوی مقادیر فاز و دامنه موج برگشتی از عارضه به سنجنده را با یکدیگر ترکیب می‌کند که در نهایت تصویری به نام اینترفروگرام تولید می‌شود [۳]. ثبت هندسی تصاویر لازمه تشکیل اینترفروگرام در مرحلهٔ بعدی است که تضمین می‌کند هر هدف زمینی به پیکسلی مشابه، با مختصات آزیموت و دامنهٔ یکسان در هر دو تصویر پایه و پیرو مربوط است [۲۳]. پس از ثبت هندسی تصاویر، اینترفروگرام‌ها تولید می‌شوند. از آنجا که اینترفروگرام‌های اولیه افزون‌بر مؤلفه فاز جابه‌جایی دارای مؤلفه‌های دیگری از جمله فاز توپوگرافی، نویز، اتمسفر و خطاهای مداری است [۲۵]، باید به‌منظور دستیابی به فاز جابه‌جایی و در نتیجه برآورد مقدار جابه‌جایی سطح زمین، همهٔ این مؤلفه‌ها حذف یا حداقل کسر شود تا فاز نهایی که تنها حاصل تغییرات جابه‌جایی زمین است به‌دست آید [۲۳]. برای انجام دادن این موارد ابتدا به‌منظور تعدیل اثر توپوگرافی از روی اینترفروگرام‌ها از مدل رقومی SRTM استفاده می‌شود. با حذف اثر توپوگرافی، اینترفروگرام‌ها تا حدودی اصلاح فاز می‌شوند، اما مؤلفه فاز نویز هنوز روی آنها باقی مانده و حذف نشده است. برای حذف اثر نویز، با اعمال فیلتر گلدشتاین که فیلتری تطبیقی است اثر نویز و نویزهای مربوط به دوره‌های زمانی خط مبنا کاهش می‌یابد [۱۹]. پس از حذف مؤلفه‌های دیگر از اینترفروگرام عملیات بازبینی فاز انجام می‌گیرد. به‌طور کلی روش‌های توسعه‌یافته در حوضهٔ تداخل‌سنجی راداری شامل تداخل‌سنجی راداری (InSAR)، تداخل‌سنجی راداری تفاضلی^۲، تداخل‌سنجی راداری مبتنی بر پراکنشگرهای دائمی^۳ هستند. روش‌های سنتی از دو تصویر SAR به‌منظور تشکیل اینترفروگرام و تولید مدل رقومی یا برآورد جابه‌جایی استفاده می‌کنند؛ اما با توجه به اینکه هر اینترفروگرام شامل منطقهٔ بزرگی با همبستگی کم است، نتایج آن قابل اعتماد نیست [۱۰] و این محدودیت‌ها سبب می‌شود روش تداخل‌سنجی به تنهایی ابزاری کامل برای نظارت و اندازه‌گیری اعوجاجات سطح زمین و تغییرات توپوگرافی نباشد [۴۲]. همچنین تأثیرات اتمسفر دقت نتایج را به‌شدت کاهش می‌دهد [۴۲، ۳۰]. برای غلبه بر این محدودیت‌ها و افزایش صحت نتایج، از روش‌های تحلیل سری زمانی مانند سری زمانی پراکنشگرهای دائمی و سری زمانی خط مبنای کوتاه استفاده می‌شود. در این پژوهش از روش PS-InSAR برای پایش تغییر شکل سطح محوطه

1. InSAR
2. DInSAR
3. PSInSAR

میراث تخت جمشید در استان فارس استفاده شد. این روش با بهره‌گیری از نقاط پراکنشگر دائمی^۱ ضمن غلبه بر محدودیت‌های روش‌های سنتی امکان پردازش سری زمانی بلندمدت جابه‌جایی را با استفاده از مؤلفه‌های اختلاف فاز مربوط به فاصله‌های زمانی مختلف فراهم می‌کند. این پژوهش از PSInSAR برای اندازه‌گیری تغییرات سطح زمین و پایش فرونشست استفاده کرده است.

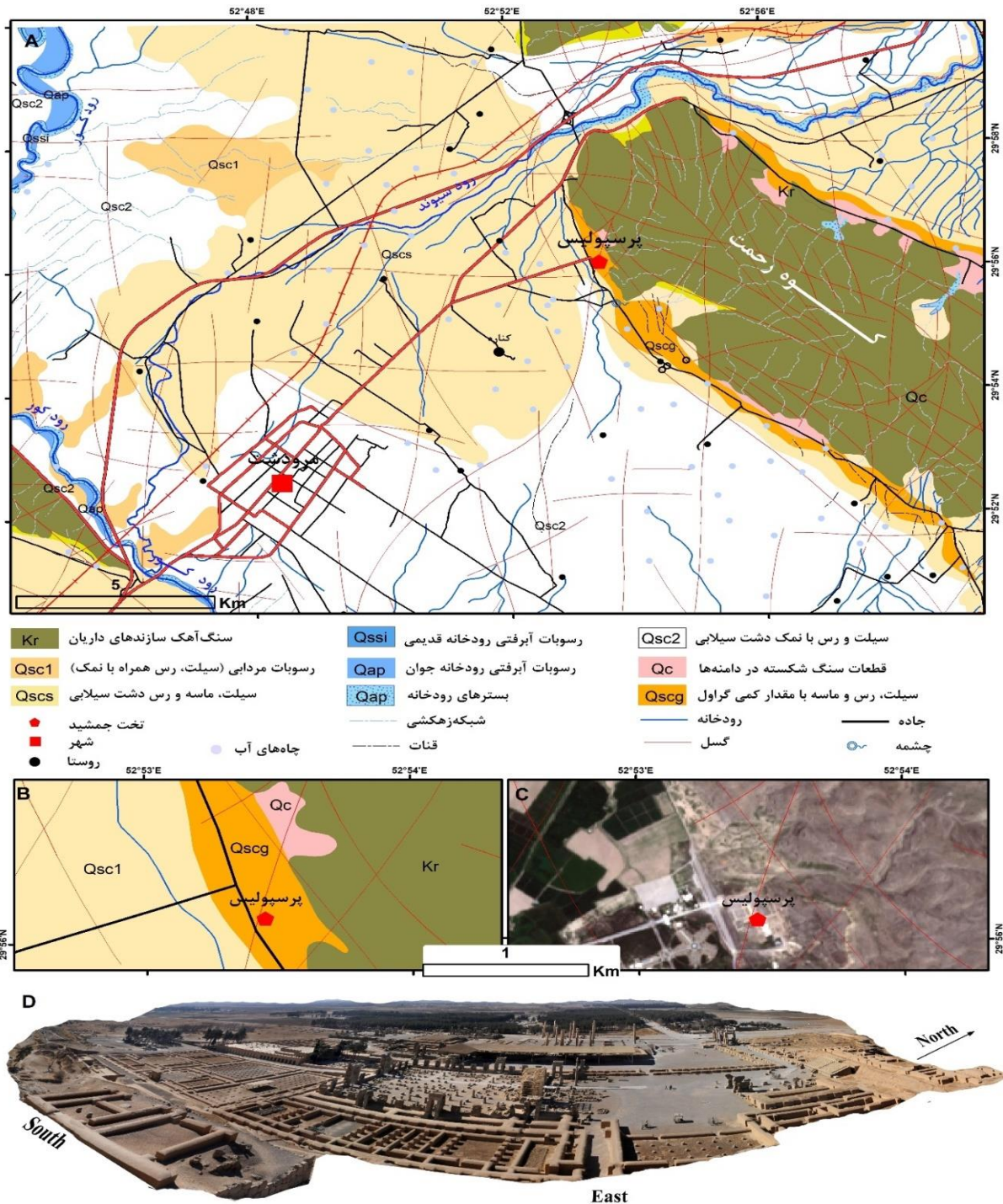
مواد و روش‌ها

منطقه پژوهش

تخت جمشید روی صخره‌ای از کوه رحمت در ۶۵ کیلومتری شمال شرقی شیراز و ۱۰ کیلومتری شمال مرودشت ساخته شده است. ارتفاع این سازه از سطح دریا ۱۷۷۰ متر است. از نظر زمین‌شناسی، زیربنای محوطه تخت جمشید از خاک رس، سیلت، ماسه، شن و رس‌های فشرده تشکیل شده است. لایه بالایی تا ۲۰۰ متر ضخامت دارد [۲۸]. این لایه‌های رسوبی دارای محتوای آب و تراکم‌پذیری زیاد با نسبت فضای خالی به نسبت بزرگ هستند. بستر زیرین از سنگ آهک‌های کرتاسه، سازند داریان به‌ویژه تاقدیس کوه رحمت تشکیل شده است. فعالیت‌های تکتونیکی از جمله گسل‌هایی همچون گسل پرسپولیس بر پیچیدگی زمین‌شناسی منطقه افزوده است (شکل ۱). سفره‌های کارستی در درون تاقدیس توسط این سیستم‌های گسلی بریده شده و چشمه‌های زیادی را ایجاد کرده‌اند که به سمت دشت مرودشت جریان دارند.

داده‌های پژوهش

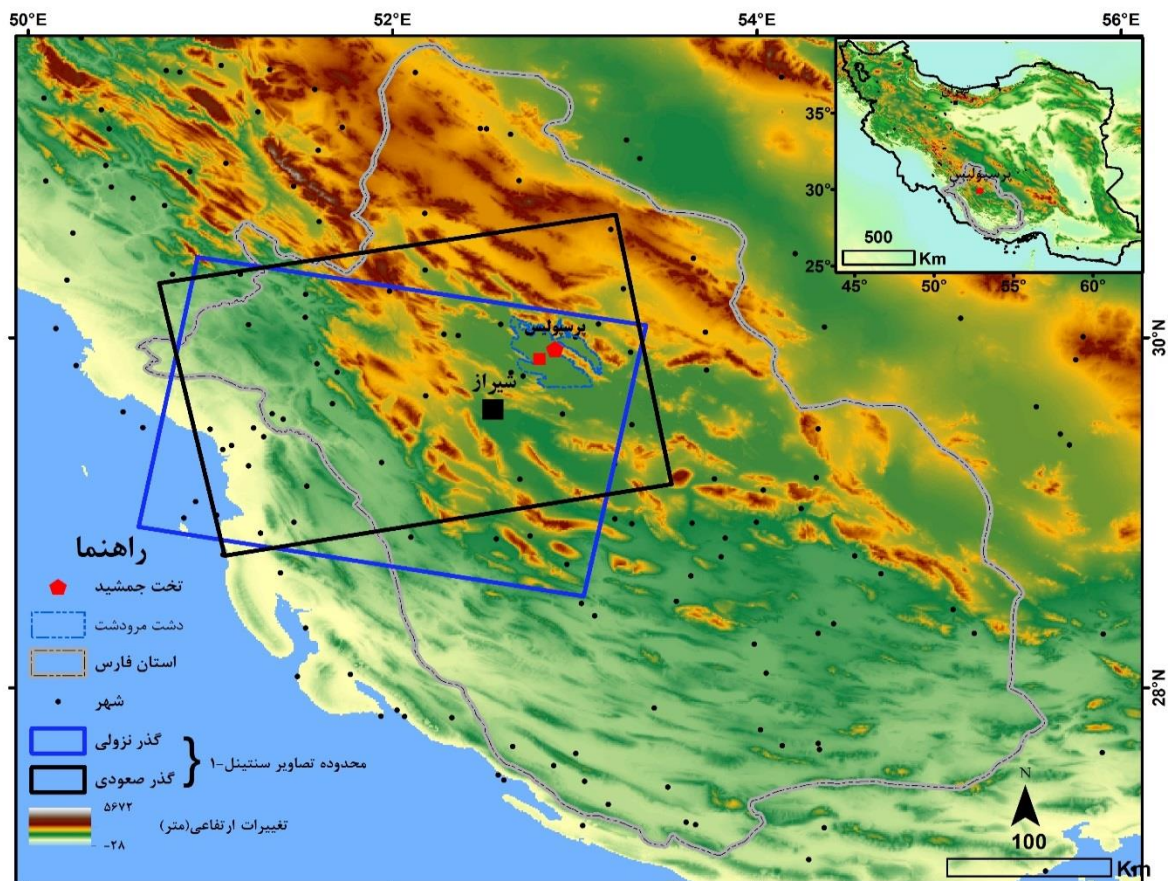
به علت حساسیت موضوع پژوهش و برای کسب نتایج دقیق‌تر، تلفیقی از اطلاعات رقومی و داده‌های هیدرولوژیکی به همراه تصاویر رادار منطقه و داده‌های میدانی پردازش و تحلیل شد. اساس کار در اندازه‌گیری تغییرات سطح زمین، استفاده از تصاویر تکراری رادار است. تصویری که از یک منطقه در یک زمان مشخص برداشت می‌شود، با تصویری که در زمان دیگر توسط همان سنجنده رادار برداشت می‌شود، تلفیق می‌شود. در این پژوهش از ۱۸۰ تصویر راداری با روزه مجازی SAR شامل ۸۱ مسیر نزولی و ۹۹ مسیر صعودی مربوط به دوره زمانی ۲۰۱۶ تا ۲۰۲۰ که محدوده شهر مرودشت را پوشش می‌دهد استفاده شد. ترکیب داده‌های راداری از مدارهای صعودی و نزولی می‌تواند برای بهبود مدل‌های رقومی زمین با به‌دست آوردن جابه‌جایی‌ها در جهات مختلف و با استفاده از اینترفرومتری به کار گرفته شود. این تصاویر مربوط به ماهواره Sentinel-1A است که از سازمان فضایی اروپا با فرمت SLS با پلاریزاسیون VV اخذ شد. این سنجنده دارای قدرت تفکیک نزدیک به ۵ متر در برد و ۲۰ متر در آزیموت است [۴۱]. عامل مؤثر در انتخاب تصاویر این ماهواره، جدید بودن زمان اخذ آنها نسبت به ماهواره‌های دیگر است. برای حذف فاز ایجادشده ناشی از خطاهای توپوگرافی باید از مدل ارتفاعی رقومی منطقه استفاده کرد. در این تحقیق، از مدل ارتفاعی رقومی سنجنده SRTM با قدرت تفکیک مکانی ۳۰ متر استفاده شد. همچنین برای حذف فاز مداری ناشی از خطاهای مداری باید از اطلاعات مداری دقیق استفاده کرد. جزئیات تصاویر راداری استفاده‌شده برای تجزیه و تحلیل سری زمانی تغییر شکل در جدول ۱ و شکل ۲ آمده است. یکی از عواملی که در رخداد فرونشست زمین به‌ویژه در مناطقی با ویژگی‌های اقلیمی خشک بسیار مؤثر است، افت سطح آب‌های زیرزمینی در نتیجه رخداد خشکسالی و کاهش دبی تغذیه آبخوان‌ها در کنار برداشت غیراصولی از این منابع است. در کنار داده‌های راداری، داده‌های هیدرولوژیکی برای پایش نرخ برداشت آب‌های زیرزمینی و داده‌های زمین‌شناسی برای تحلیل ویژگی‌های زیرسطحی، نوع لیتولوژیکی و گسل‌ها به ترتیب از شرکت مدیریت منابع آب کشور و سازمان زمین‌شناسی کشور تهیه شد. پس از گردآوری داده‌های راداری و بررسی نرم‌افزارهای موجود، نرم‌افزار تحت متلب سارپروز به‌منظور اجرای فرایند تداخل سنجی راداری و مدل سری زمانی جابه‌جایی از الگوریتم مبنی بر پراکنشگرهای دائمی انتخاب شد [۳۷]. از نرم‌افزار ArcMap 10.8 برای ایجاد نقشه‌های فرونشست دقیق و تحلیل، از Google Earth engine برای مدیریت داده‌های ماهواره‌ای، تولید نقشه‌ها و پیش‌پردازش داده‌های بزرگ و از SPSS برای تحلیل‌های آماری از جمله تحلیل روند و مدل‌سازی چندمتغیره و ... استفاده شد. برای اطمینان از نتایج تحقیق و تفسیر آنها با عملیات پیمایشی و میدانی از ابزار GPS استفاده شد.



شکل ۱. الف) نقشه زمین‌شناسی منطقه پژوهش ساده‌شده از نقشه زمین‌شناسی GSI - نقشه‌برداری زمین‌شناسی و اکتشافات معدنی ایران در مقیاس ۱/۱۰۰۰۰؛ ب) نقشه زمین‌شناسی محوطه تخت جمشید؛ ج) نقشه گوگل از منطقه تخت جمشید؛ د) نمای مجموعه تاریخی تخت جمشید از شرق.

جدول ۱. ویژگی‌های داده‌های SAR استفاده‌شده در پژوهش

Sensor	Temporal coverage	Track/Frame	Pass	SLC number	Polarization	Mode
Sentinel-1 A	2017-03-21~2020-02-22	137/494	Descending	81	VV	IW
Sentinel-1 A	2016-11-13~2020-03-21	28 /92	Ascending	99	VV	IW

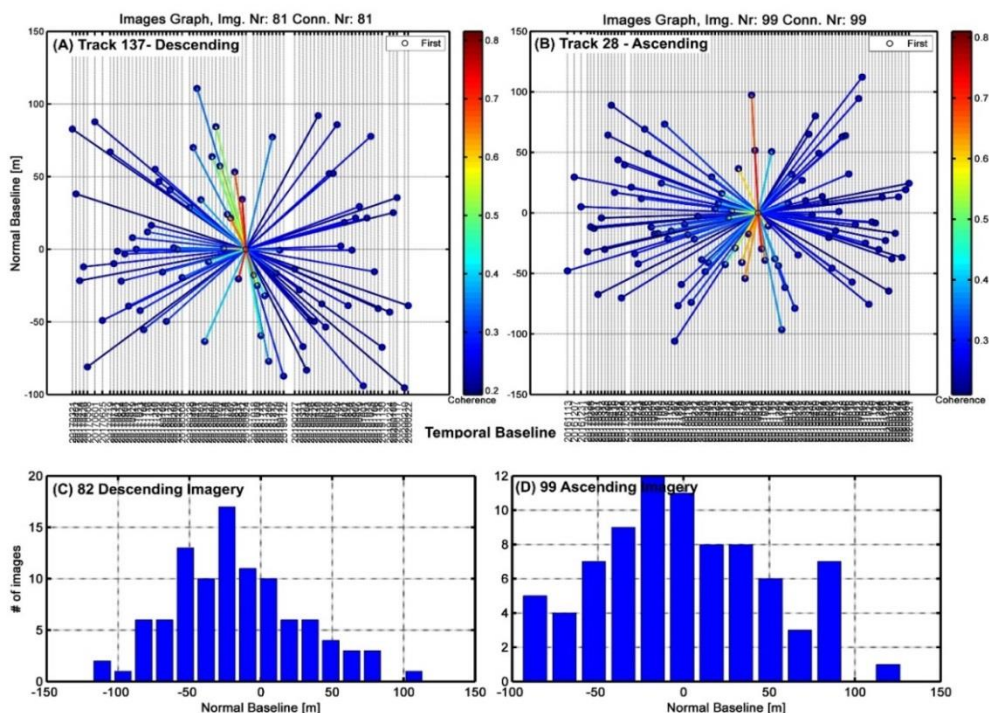


شکل ۲. نقشه توپوگرافی منطقه پژوهش. کادراهای مستطیلی آبی و سیاه نشان دهنده داده‌های نزولی و صعودی هستند که روی مدل ارتفاع رقومی منطقه (SRTM۹۰ متر) رسم شده‌اند. نقشه درونی موقعیت منطقه پژوهش در ایران را نشان می‌دهد.

روش پژوهش

تداخل‌سنجی راداری مبتنی بر PS-INSAR

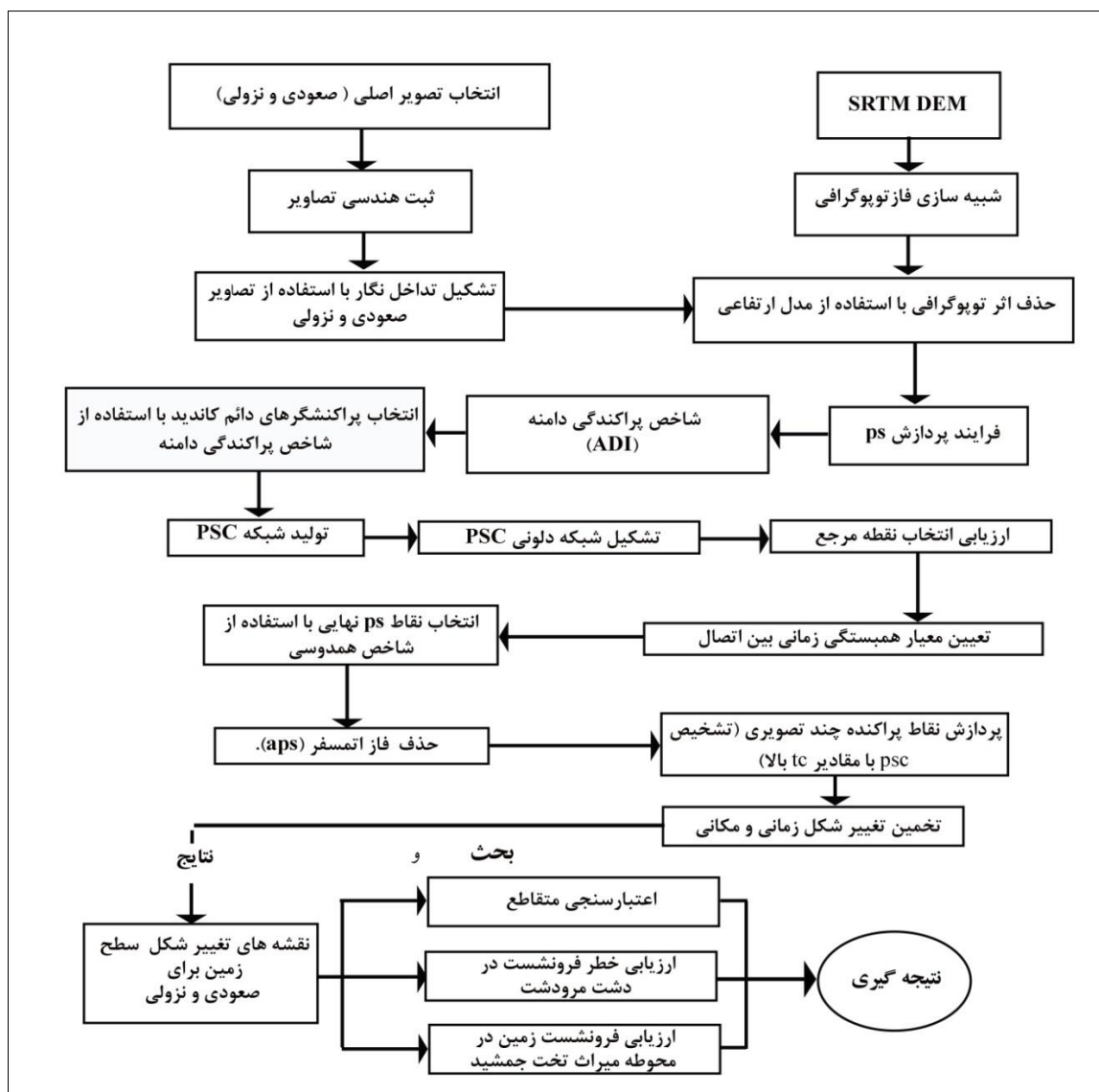
در سال‌های اخیر تداخل‌سنجی راداری برای نمایش، شناسایی و اندازه‌گیری تغییرات زمین مورد توجه قرار گرفته است. [۲۴]. مزایای این روش عبارت است از پوشش وسیع و دقت قابل قبول و قدرت تفکیک زیاد تصاویر رادار، فرکانس بالای مشاهدات مکانی و زمانی روش تداخل‌سنجی راداری و صرفه‌جویی در زمان و هزینه [۷]. منطقه پژوهش در بخش مرکزی ایران با اقلیمی خشک واقع شده است. در این پژوهش با استفاده از داده‌های راداری و به‌کارگیری روش تداخل‌سنجی راداری و تحلیل سری زمانی پراکنشگرهای دائمی، فرونشست زمین در تخت جمشید پایش و اندازه‌گیری شد. کاربرد روش PS-InSAR برای ساختارهای انسانی (مانند سایت میراث فرهنگی)، بدون پوشش گیاهی که کاندیدای PS (PSC) دارای پراکنندگی معکوس قوی هستند، با اعمال خطوط مبنای زمانی کوچک پشتیبانی می‌شود. در روش PS-InSAR ایده اصلی شناسایی نقاط همبسته با رفتاری ثابت و پایدار در طول زمان با استفاده از سیگنال استخراج‌شده از داده‌های راداری است که از این پس آنها را PS می‌نامیم. این روش توسط فریتی و همکاران ارائه شد [۱۶]. برای تحلیل مجموعه زمانی، تصاویر مختلط پردازش‌نشده که تصویر مختلط تک‌منظر^۱ نامیده می‌شوند، در قیاس با تصویر پایه یا اصلی ثبت هندسی می‌شوند (شکل ۴). تصویر پایه (مستر) تصویری خواهد بود که هم‌دوسی تجمعی کل اینترفروگرام‌ها نسبت به آن تصویر بیشترین مقدار باشد [۱۶،۲۰]. هم‌دوسی تجمعی تابعی از خط مبنای مکانی قائم، خط مبنای زمانی و فرکانس مرکز داپلر است. شبکه ایجادشده بین تصویر اصلی و تصویرهای فرعی برای تولید اینترفروگرام در شکل ۳ نشان داده شده است.



شکل ۳. ویژگی‌های مجموعه داده‌های استفاده‌شده: تداخل‌نگارهای انتخاب‌شده برای تحلیل سری زمانی PS-InSAR از (A) مسیر نزولی و (B) صعودی؛ دایره‌ها تصاویر و خطوط رنگی تداخل‌نگارها را برحسب میزان کوهرنسی آنها نشان می‌دهند. محورهای عمودی نمایانگر خط مبنای مکانی و محورهای افقی مبنای زمانی تصاویر در تداخل‌نگارها را نشان می‌دهند.

با توجه به گراف ایجادشده اقدام به تشکیل اینترفروگرام، تصحیح فازی و بازیابی فاز شد. SARPROZE امکان شناسایی PSها را با استفاده از اطلاعات دامنه و فاز فراهم می‌کند [۳۸] که در این پژوهش از شاخص پراکندگی دامنه^۱ در تحلیل دامنه به‌منظور انتخاب ps های کاندید و ایجاد یک شبکه با استفاده از نقاط پراکنشگر دائمی PS (PSC) استفاده شد [۸]. مقدار آستانه به‌منظور محاسبه شاخص پراکندگی دامنه $0/4$ انتخاب شد تا احتمال انتخاب پیکسل‌های PS واقعی افزایش یابد و سهم پیکسل‌های دارای فاز تصادفی که به‌اشتباه شناسایی شده‌اند کاهش پیدا کند. پیکسل‌های نقطه‌ای PS در ناحیه پوشش گیاهی و مزارع کشاورزی در منطقه پژوهش حذف شده و در نهایت، PSها براساس احتمال PS بودن که به کمک شاخص پراکندگی دامنه محاسبه می‌شوند انتخاب می‌شوند. با انتخاب پراکنشگرهای دائمی اینترفروگرام تمام تصاویر SAR نسبت به یک تصویر پایه در نقاط PS محاسبه می‌شوند. بنابراین می‌توان اهدافی را که در کل دوره دریافت داده SAR پایدار می‌مانند شناسایی کرد. اگر منطقه تحت پردازش از ۱ کیلومتر مربع بزرگ‌تر باشد، نمی‌توان از فاز اتمسفر چشم پوشید؛ از این‌رو از یک شبکه مکانی یا شبکه مثلث‌بندی دلونی بین نقاط پراکنشگرهای دائم و محاسبه اختلاف فاز بین PSهای مجاور استفاده می‌شود [۲۷]. با انتخاب یک نقطه مرجع، مقادیر برآوردشده برای هر یال تجمیع می‌شوند تا برآوردی از مقادیر پارامترهای مجهول در هر نقطه از شبکه حاصل شود. در نهایت به‌منظور تخمین آثار اتمسفری، با توجه به اینکه اتمسفر در مکان همبسته و نویز یعنی هر گونه عامل ناهمبستگی مکانی و زمانی در مکان ناهمبسته است، با به‌کارگیری فیلتر پایین‌گذر مکانی، آثار نویز از سیگنال اتمسفر جدا می‌شود. پس از جداسازی سهم فاز اتمسفر در نقاط پراکنشگر دائمی و حذف تصویر اثر اتمسفر از روی مجموعه تداخل‌نماها، حد آستانه بالاتری روی شاخص پراکندگی دامنه اعمال می‌شود. این بار پارامترهای مجهول سرعت جابه‌جایی و تصحیح ارتفاعی، برای نقاط بیشتری، دوباره برآورد خواهند شد و با استفاده از معیار همدوسی، زمانی و اعمال حد آستانه روی آنها، نقاط نویزی حذف و نقاط پراکنشگر دائمی نهایی انتخاب می‌شوند. نقشه‌های تغییر شکل سطحی در سایت میراث فرهنگی توسط مسیرهای صعودی و نزولی تهیه شدند.

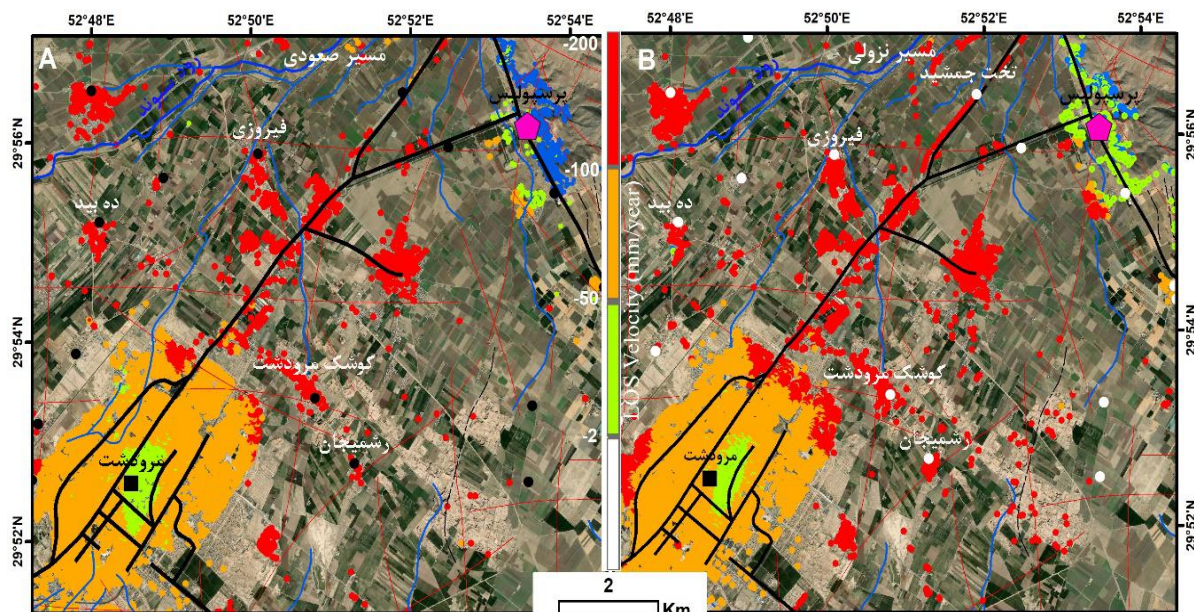
1. ADI (Amplitude Dispersion Index)



شکل ۴. نمودار روش تحقیق

تحلیل داده‌ها

براساس روش تحلیل سری‌های زمانی Ps-InSAR برای سایت تخت جمشید و محوطه اطراف آن، جابه‌جایی در راستای خط دید سنجنده (LOS) در حدود -200 تا $+40$ میلی‌متر در سال برای هر دو مسیر صعودی و نزولی برآورد شد (شکل ۵). علامت منفی نشان‌دهنده فرونشست و مقادیر مثبت نشان‌دهنده بالا رفتن است. از آنجا که میدان‌های سرعت هر دو مسیر الگوهای فضایی مشابهی را نشان می‌دهند، سرعت‌های LOS اغلب تغییر شکل عمودی با حرکت افقی ناچیز را نشان می‌دهند. در مناطق جنوبی و غربی (تخت جمشید) با بیش از -200 تا -100 میلی‌متر در سال، بیشترین فرونشست زمین مشاهده می‌شود (در شکل ۵ با رنگ قرمز نشان داده شده است). فعالیت کشاورزی متکی بر بهره‌برداری از آب‌های زیرزمینی است و این منطقه به دلیل داشتن سفره‌های زیرزمینی و منابع آب سطحی غنی (مانند رودخانه سیوند) و خاک حاصلخیز از قابلیت مناسبی برای کشاورزی برخوردار است (شکل‌های ۱ و ۵).



شکل ۵. نرخ فرونشست LOS در منطقه مروتش بین ۱۳ نوامبر ۲۰۱۶ تا ۲۱ مارس ۲۰۲۰ از طریق تجزیه و تحلیل PSI تصاویر Sentinel-1A در امتداد مدارهای صعودی (A) و نزولی (B) به دست آمده است.

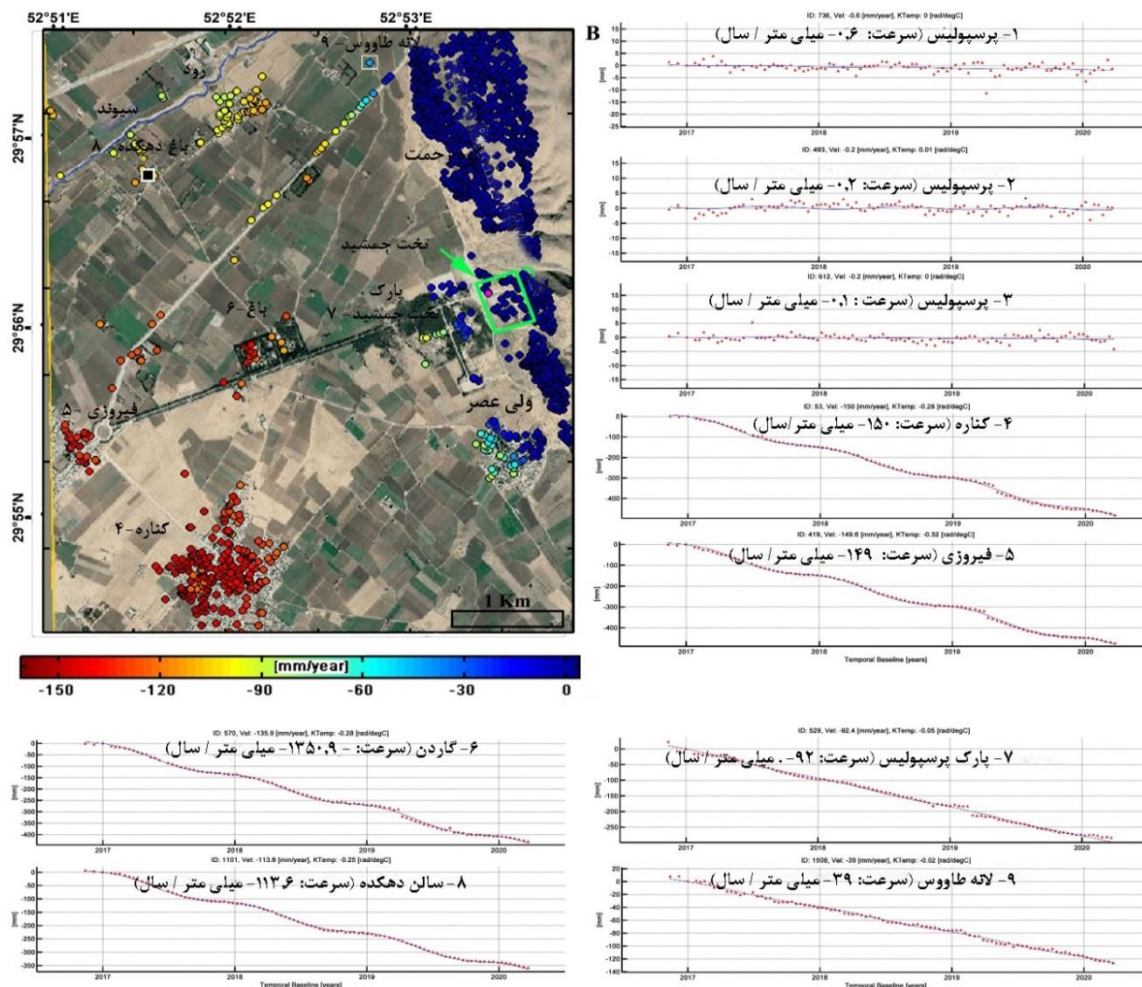
ارزیابی تغییر شکل زمین در محوطه میراث تخت جمشید

فرونشست زمین در محیط‌های سایت میراث جهانی یونسکو جنبه برجسته‌تر در نظارت و حفظ بنیادهای محوطه باستان‌شناسی است. میانگین نرخ‌های تغییر شکل عمودی سالانه طی سال‌های ۲۰۱۶ تا ۲۰۲۰ و سری‌های زمانی انتخابی PSs متعلق به بخش‌های مربوط منطقه پژوهش می‌تواند پایداری/ناپایداری محوطه میراث تخت جمشید را نشان دهد. بنابراین میزان فرونشست برای نه محوطه داخل و اطراف محوطه میراث تخت جمشید ارزیابی شد.

نتایج ارزیابی تغییرات زمانی در اطراف محوطه میراث تخت جمشید

در منطقه تخت جمشید چند روستا و شهر، از جمله ولی عصر (جنوب شرقی)، کناره (جنوب)، فیروزی (شرق) و تالار دهکده (شمال غربی)، اطراف تخت جمشید را احاطه کرده‌اند. محوطه میراث تخت جمشید حدود ۳۰۰ متر عرض و ۴۴۰ متر طول دارد و مساحت کل آن حدود ۱۲۵۰۰۰ متر مربع است (شکل ۲). شکل ۶ نرخ فرونشست سری زمانی ۹ PS (همبستگی یا کوه‌رنسی > 0.9) را در تخت جمشید و اطراف سایت میراث تخت جمشید نشان می‌دهد. در این شکل مشخص است که کل مجموعه تخت جمشید از سال ۲۰۱۶ تا ۲۰۲۰ دچار تغییرات بسیار کم (-0.6 میلی‌متر در سال) شده است.

ولی نواحی اطراف سایت از جمله روستای کناره و روستای گاردن حدوداً در $3/5$ کیلومتری جنوب غرب و جنوب محوطه میراث تخت جمشید قرار دارند بیش از ۱۳۰ میلی‌متر در سال دچار فرونشست شده‌اند (شکل ۶). نهشته‌های این روستاها از سیلت، ماسه و رس دشت سیلابی (شکل ۱) تشکیل شده‌اند که اغلب در زیر روستاها پراکنده شده‌اند. آنها مستعد فرونشست هستند. آب رودخانه سیوند به طرق مختلف در این منطقه توزیع می‌شود و از طریق کانال‌های مختلف در کل منطقه، مزارع کشاورزی و روستایی را آبیاری می‌کند. سد سیوند در سال ۲۰۰۷ روی رودخانه سیوند ساخته شد. با توجه به احداث سد روی رودخانه سیوند، تداوم خشکسالی در سال‌های اخیر و در نتیجه کاهش آب ورودی به منطقه، می‌توان انتظار داشت که فرونشست در اطراف رودخانه و کانال‌های آن شدید باشد. همان‌طور که در شکل ۶B نشان داده شده است، میانگین نرخ سری زمانی فرونشست سالانه در طول دوره پژوهش (اکتبر ۲۰۱۶ تا مارس ۲۰۲۰) بیش از -1.0 میلی‌متر در سال در غرب منطقه تخت جمشید بوده است. درحالی که مجموعه پرسپولیس فرونشست نداشته است.

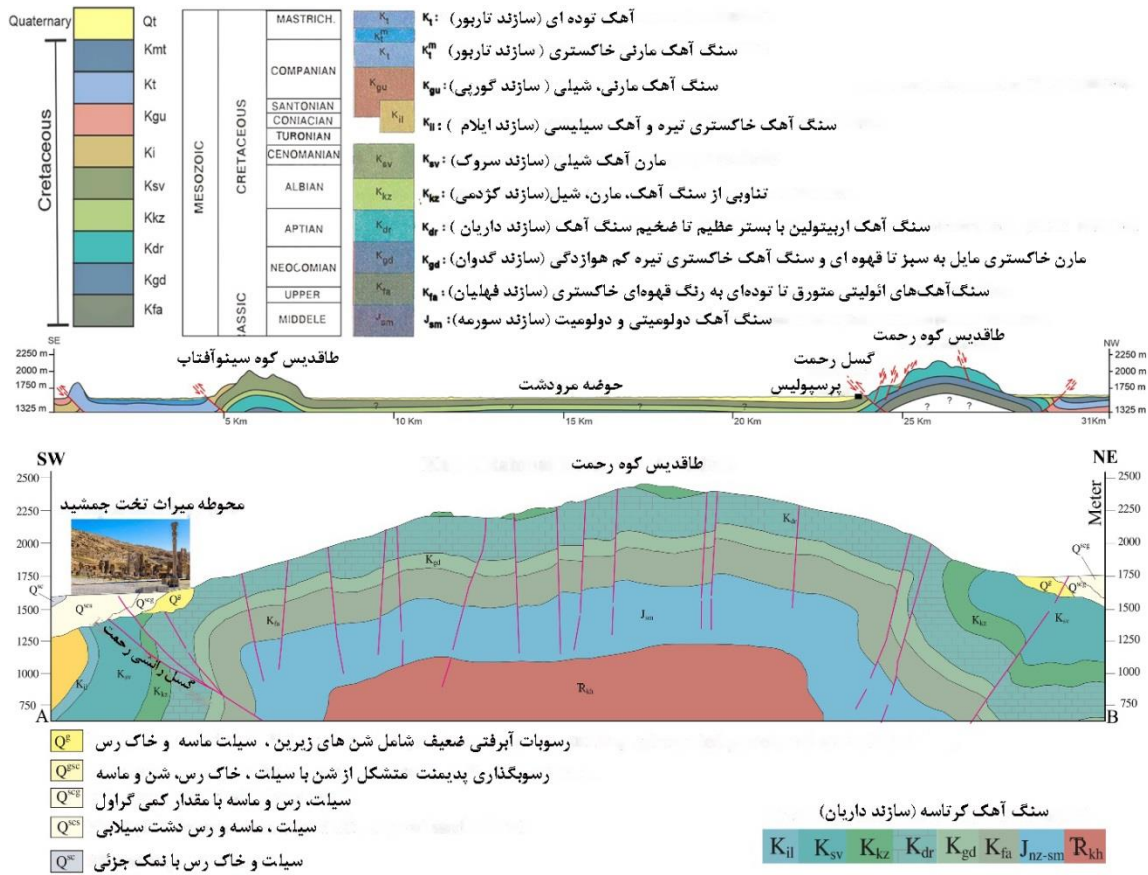


شکل ۶. A میانگین نرخ سری زمانی فرونشست سالانه در منطقه پژوهش که روی تصاویر Google Earth قرار گرفته است. نقاط قرمز نشان دهنده فرونشست سریع تر از میانگین است. شکل (B) (۱-۹) نمایه‌های فرونشست سری زمانی را در اطراف محوطه میراث تخت جمشید نشان می‌دهد.

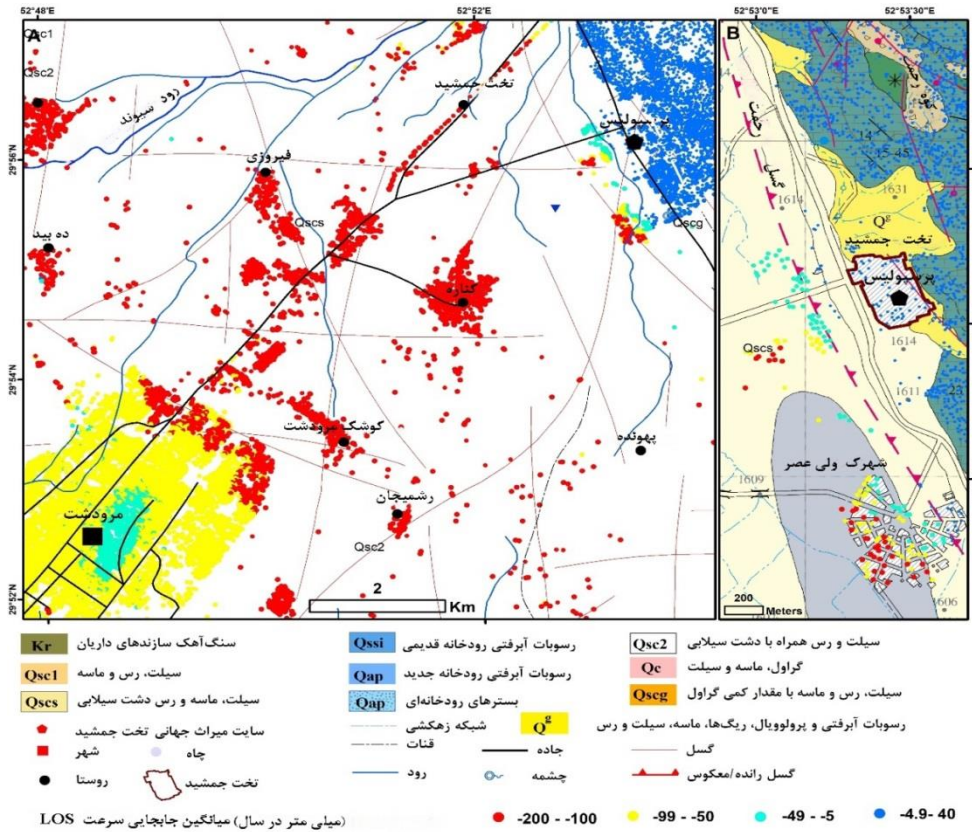
تحلیل فرونشست زمین در محوطه میراث تخت جمشید

فرونشست زمین در مناطق خشک ایران مرکزی در سه دهه اخیر خسارات زیادی به سازه‌های دست‌ساز وارد کرده است [۳۳، ۳۲، ۱۸، ۱۷، ۱۵، ۱۴]. دشت مرو دشت بزرگ‌ترین دشت آبرفتی ایران است و سایت میراث جهانی تخت جمشید در قسمت بالای این دشت قرار دارد. آبخوان بالای دشت از رسوبات ریز تا درشت‌دانه تشکیل شده است [۲۹]. این رسوبات توسط رودخانه سیوند بریده شده‌اند. آب‌های زیرزمینی لایه‌های زیرین غلظت نمک زیادی دارند که از سنگ آهک‌های کرتاسه زیر دشت سرچشمه می‌گیرند [۲۸]، اما سفره‌های زیرزمینی برای کشاورزی و توسعه روستا و شهر ارزش و اهمیت زیادی دارد. تغییرات اقلیمی، تداوم خشکسالی طی سه دهه اخیر، برداشت‌های کنترل‌نشده از چاه‌های عمیق، رفتار هیدرولوژیکی و کیفیت آب سطحی و زیرزمینی محوطه تخت جمشید و اطراف آن را تحت تأثیر قرار داده است [۳۵]. در این صورت، فرونشست زمین در این محوطه به دلیل شرایط پیچیده زمین‌شناسی و مداخلات انسانی فزاینده، جدی‌تر و علل آن پیچیده‌تر می‌شود. شکل ۷ پایه و اساس محوطه میراث تخت جمشید را نشان می‌دهد.

نتایج حاصل از اندازه‌گیری تغییر شکل زمین در محیط ARC MAP 10.8 با پارامترهای دیگر ترکیب شد و به‌منظور بررسی میزان فرونشست در محوطه تخت جمشید، منطقه از نظر واحدهای زمین‌شناسی طبقه‌بندی و با نقشه فرونشست طبقه‌بندی شده مقایسه شد (شکل ۸). مقایسه نقشه‌ها بیانگر ارتباط معنی‌دار بین نرخ فرونشست و واحدهای زمین‌شناسی در منطقه پژوهش است (شکل ۸).

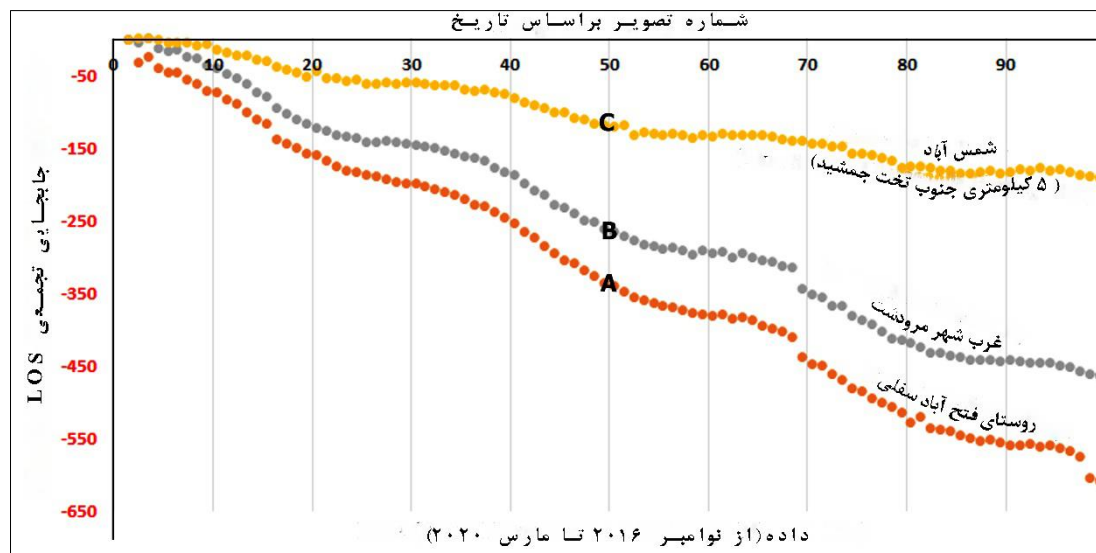


شکل ۷. مقطع زمین شناسی تاقادیس کوه رحمت و موقعیت محوطه میراث تخت جمشید



شکل ۸. رابطه بین واحدهای زمین شناسی و میانگین جابه جایی سرعت LOS در محوطه میراث تخت جمشید

حداقل جابه‌جایی تجمعی LOS حدود ۱۵۰- میلی‌متر در ۵ کیلومتری جنوب محوطه میراث تخت جمشید (C) را نشان می‌دهد (شکل ۹). فرونشست تجمعی سری زمانی LOS دو نقطه PS در غرب مرودشت (A و B) و یک نقطه در ۵ کیلومتری جنوب محوطه میراث تخت جمشید (C) را نشان می‌دهد.



شکل ۹. پروفایل‌های سری زمانی جابه‌جایی تجمعی LOS در نقاط انتخاب‌شده.

بین نرخ فرونشست و چاه‌های آبی حفرشده در سفره‌های زیرزمینی در این منطقه رابطه معناداری وجود دارد. براساس آمار سال ۱۳۹۸ وزارت نیرو، تا کنون حدود ۳۵۰۰ حلقه چاه در منطقه تخت جمشید حفر شده است (شکل ۸). به دلیل حفر بیش از حد این چاه‌ها، سطح آب پایین رفته است و لایه‌های پایینی در حال شکسته شدن هستند که سبب شکستگی زمین و کم‌آب شدن سفره‌های آبی این مناطق شده است. از این رو این فرضیه ظاهراً با این واقعیت تأیید می‌شود که افزایش و کاهش فرونشست زمین در منطقه پژوهش با کاهش ارتفاع سطح ابهای زیر زمینی از سال ۲۰۱۶ تا ۲۰۲۰ و همچنین شرایط زمین‌شناسی مطابقت دارد [۲۸، ۳۵]. برای اطمینان از صحت نتایج حاصل از تداخل‌سنجی راداری نمونه‌هایی از شواهد صحرایی این فرونشست در شکل ۱۰ ارائه شده است.



شکل ۱۰. شواهد میدانی فرونشست زمین در غرب منطقه تخت جمشید

۴. نتیجه‌گیری

تخت جمشید میراثی جهانی و نمایانگر تاریخ و فرهنگ غنی ایران است. حفاظت و نگهداری از این اثر تاریخی هم برای حفظ هویت ملی و هم برای انتقال ارزش‌های فرهنگی به نسل‌های آینده ضروری است. با توجه به تهدیدهای طبیعی و انسانی که این مکان را تحت تأثیر قرار می‌دهد، برنامه‌ریزی و اقدام جدی برای حفاظت از آن ضرورت دارد. این تحقیق با استفاده از روش PS-InSAR، تغییر شکل زمین در محوطه میراث جهانی تخت جمشید را پایش و اندازه‌گیری کرد. تغییرات مکانی و زمانی فرونشست زمین و تغییرات ژئومورفولوژی روی زمین‌های موجود در سایت میراث جهانی تخت جمشید برای دوره پنج‌ساله از ۲۰۱۶ تا ۲۰۲۰ بررسی شد. مقایسه اندازه‌گیری‌های InSAR از مدارهای مختلف، نشان‌دهنده همبستگی حدود ۰/۷۳ بین این اندازه‌گیری‌ها، با RMSE ۱/۸۶ میلی‌متر در سال است که نشان‌دهنده سازگاری خوب اندازه‌گیری‌های InSAR است. با استفاده از روش تداخل‌سنجی راداری InSAR روی مجموعه‌ای از تصاویر راداری از سال ۲۰۱۶ تا ۲۰۲۰ در منطقه پژوهش و اطراف آن، حرکات LOS در مجموعه تخت جمشید در محدوده میلی‌متری شناسایی شد. بنابراین تغییر شکل غیرعادی یا بیش از حدی که نشان‌دهنده ناهنجاری زیاد در محوطه میراث تخت جمشید باشد شناسایی نشد. اندازه‌گیری‌های InSAR نشان داد که فرونشست در محوطه میراث تخت جمشید از سال ۲۰۱۶ تا ۲۰۲۰ تقریباً پایدار بوده است ($-0/107 \geq$ میلی‌متر/سال، میانگین ۲۶ پراکنشگر دائمی (PS) در سایت). نرخ فرونشست تخمینی برای دوره ۲۰۱۶-۲۰۲۰ نشان داد که نرخ فرونشست با بستر زمین‌شناسی و کاربری زمین مطابقت دارد. بنابراین می‌توان نتیجه گرفت که توجه به بستر زمین‌شناسی و مدیریت آب‌های سطحی و زیرزمینی در ارزیابی نرخ فرونشست ضروری است و به مدیریت جغرافیایی محیط کمک می‌کند. همچنین مدیریت آن، از مخاطرات تخریب آثار فرهنگی و اجتماعی روبه افزایشی که در پی دارد، می‌کاهد.

تقدیر و تشکر

این مقاله مستخرج از رساله دکتری رقیه حسینی‌نژاد است که با حمایت گروه جغرافیای طبیعی دانشکده جغرافیای دانشگاه تهران انجام گرفته است. بدین وسیله از آن گروه محترم تشکر می‌شود.

منابع

- [۱] اکبریان، مرتضی؛ و قهرودی تالی، منیژه (۲۰۲۴). تحلیل محیطی فرونشست زمین در دشت اسدآباد همدان و مخاطرات آن. مدیریت مخاطرات محیطی، ۱۱(۱)، ۷۲-۵۷.
- [۲] پاپی، رامین؛ عطارچی، سارا؛ و سلیمانی، مسعود (۲۰۲۰). تحلیل سری زمانی فرونشست زمین در غرب استان تهران (دشت شهریار) و ارتباط آن با برداشت آب‌های زیرزمینی با تکنیک تداخل‌سنجی راداری. جغرافیا و پایداری محیط، ۱۰(۱)، ۱۰۹-۱۲۸.
- [۳] پی‌لاش، دیوید (۱۳۹۲). مبانی سنجش از دور مایکروویو (تداخل‌سنجی راداری)، ترجمه عبدالحسین حاجی‌زاده؛ محمدعلی نظام‌محله؛ سعید فرزانه؛ عبدالمطلب رستگار؛ هداسادات سیدرضایی. ماهواره.
- [۴] روستایی، شهرام؛ و نجف‌وند، سمیرا (۲۰۲۲). پایش پدیده فرونشست دشت‌ها بر مبنای الگوریتم خودکار SNAP2STAMPS به روش تداخل‌سنجی راداری (PSI) (مطالعه موردی: دشت مرند). جغرافیا و مخاطرات محیطی، ۱۱(۴)، ۴۲-۲۱.
- [۵] علی‌دادیانی، بهاره؛ زارع، مهدی؛ درستیان، آرزو؛ اشجع اردلان، افشین؛ و حسینی، سیدکیوان (۲۰۲۳). ارزیابی تأثیر فرونشست بر روند لرزه‌خیزی دشت ورامین و دشت شهریار با استفاده از تصاویر ماهواره‌ای. مدیریت مخاطرات محیطی، ۱۰(۲)، ۱۳۷-۱۵۱.
- [۶] قهرودی تالی، منیژه؛ خدامرادی، فرهاد؛ علی‌نوری، خدیجه (۲۰۲۳). تأثیر افت آب‌های زیرزمینی بر مخاطرات فرونشست زمین در دشت دهگلان، استان کردستان. مدیریت مخاطرات محیطی، ۱۰(۱)، ۵۷-۷۰.
- [۷] مقصودی، یاسر؛ امانی، رضا؛ و احمدی، حسن (۲۰۱۹). بررسی رفتار فرونشست زمین در منطقه غربی تهران با استفاده از تصاویر سنتینل ۱- و تکنیک تداخل‌سنجی راداری مبتنی بر پراکنشگرهای دائمی. تحقیقات منابع آب ایران، ۱۵، ۲۹۹-۳۱۳.
- [8] Akhoondzadeh, M. (2015). (PDF) Principles of Remote Sensing [WWW Document]. ResearchGate. URL https://www.researchgate.net/publication/366592510_Principles_of_Remote_Sensing (accessed 12.13.24).
- [9] Alberti, S., Ferretti, A., Leoni, G., Margottini, C., & Spizzichino, D. (2017). Surface deformation data in the archaeological site of Petra from medium-resolution satellite radar images and SqueeSAR™ algorithm. J. Cult. Herit. 25, 10–20. <https://doi.org/10.1016/j.culher.2017.01.005>
- [10] Alipour, S., Motgah, M., Sharifi, M.A., & Walter, T.R. (2008). InSAR time series investigation of land subsidence due to groundwater overexploitation in Tehran, Iran. 2008 Second Workshop Use Remote Sens. Tech. Monit. Volcanoes Seism. Areas 1–5. <https://doi.org/10.1109/USEREST.2008.4740370>
- [11] Aloiz, E., Douglas, J., & Nagel, A. (2016). Painted plaster and glazed brick fragments from Achaemenid Pasargadae and Persepolis, Iran. Herit. Sci. 4. <https://doi.org/10.1186/s40494-016-0072-7>
- [12] Castellazzi, P., Arroyo-Domínguez, N., Martel, R., Calderhead, A.I., Normand, J.C.L., Gárfias, J., & Rivera, A. (2016). Land subsidence in major cities of Central Mexico: Interpreting InSAR-derived land subsidence mapping with hydrogeological data. Int. J. Appl. Earth Obs. Geoinformation 47, 102–111. <https://doi.org/10.1016/j.jag.2015.12.002>
- [13] Daneshmandi, A. (2018). Geotectonic Critical Analysis with Emphasis on Active Remote Sensing (ASAR Sensor) Case study: Persepolis.
- [14] Dehghani, M., Valadan Zojj, M.J., Hooper, A., Hanssen, R.F., Entezam, I., & Saatchi, S. (2013). Hybrid conventional and Persistent Scatterer SAR interferometry for land subsidence monitoring in the Tehran Basin, Iran. ISPRS J. Photogramm. Remote Sens. 79, 157–170. <https://doi.org/10.1016/j.isprsjprs.2013.02.012>
- [15] Dehghan-Soraki, Y., Sharifikia, M., & Sahebi, M.R. (2015). A comprehensive interferometric process for monitoring land deformation using ASAR and PALSAR satellite interferometric data. GIScience Remote Sens. 52, 58–77. <https://doi.org/10.1080/15481603.2014.989774>
- [16] Ferretti, A., Prati, C., & Rocca, F. (2001). Permanent scatterers in SAR interferometry. IEEE Trans. Geosci. Remote Sens. 39, 8–20. <https://doi.org/10.1109/36.898661>
- [17] Foroughnia, F., Nemati, S., Maghsoudi, Y., & Perissin, D. (2019). An iterative PS-InSAR method for the analysis of large spatio-temporal baseline data stacks for land subsidence estimation. Int. J. Appl. Earth Obs. Geoinformation 74, 248–258. <https://doi.org/10.1016/j.jag.2018.09.018>
- [18] Ghazifard, A., Akbari, E., Shirani, K., & Safaei, H. (2017). Evaluating land subsidence by field survey and D-InSAR technique in Damaneh City, Iran. J. Arid Land 9, 778–789. <https://doi.org/10.1007/s40333-017-0104-5>
- [19] Goldstein, R.M., & Werner, C. (1998). (PDF) Radar interferogram filtering for geophysical applications. Geophysical Research Letters, 25, 4035–4038. ResearchGate. <https://doi.org/10.1029/1998GL900033>
- [20] Goorabi, A., Karimi, M., Yamani, M., & Perissin, D. (2020a). Land subsidence in Isfahan metropolitan and its relationship with geological and geomorphological settings revealed by Sentinel-1A InSAR observations. J. Arid Environ. 181, 104238. <https://doi.org/10.1016/j.jaridenv.2020.104238>

- [21] Goorabi, A., Maghsoudi, Y., & Perissin, D. (2020b). Monitoring of the ground displacement in the Isfahan, Iran, metropolitan area using persistent scatterer interferometric synthetic aperture radar technique. *J. Appl. Remote Sens.* 14, 024510. <https://doi.org/10.1117/1.JRS.14.024510>
- [22] Guo, J., Zhou, L., Yao, C., & Hu, J. (2016). Surface Subsidence Analysis by Multi-Temporal InSAR and GRACE: A Case Study in Beijing. *Sensors* 16, 1495. <https://doi.org/10.3390/s16091495>
- [23] Hanssen, R.F. (2001). *Radar Interferometry: Data Interpretation and Error Analysis*, 2001st edition. ed. Springer.
- [24] Hooper, A., Bekaert, D., Spaans, K., & Arkan, M. (2012). Recent advances in SAR interferometry time series analysis for measuring crustal deformation. *Tectonophysics* 514–517, 1–13. <https://doi.org/10.1016/j.tecto.2011.10.013>
- [25] Hooper, A., Segall, P., & Zebker, H. (2007). Persistent scatterer interferometric synthetic aperture radar for crustal deformation analysis, with application to Volcán Alcedo, Galápagos. *J. Geophys. Res. Solid Earth* 112, B07407. <https://doi.org/10.1029/2006JB004763>
- [26] Kampes, B., & Adam, N. (2005). The STUN algorithm for persistent scatterer interferometry [WWW Document]. URL https://www.researchgate.net/publication/312494737_The_STUN_algorithm_for_persistent_scatterer_interferometry (accessed 11.19.24).
- [27] Kampes, B.M. (2006). *Radar Interferometry*, vol. 12. Springer, Berlin. - References - Scientific Research Publishing [WWW Document]. URL <https://www.scirp.org/reference/referencespapers?referenceid=2412864> (accessed 11.21.24).
- [28] Kehl, M., Frechen, M., & Skowronek, A. (2005). Paleosols derived from loess and loess-like sediments in the Basin of Persepolis, Southern Iran. *Quat. Int.* 140–141, 135–149. <https://doi.org/10.1016/j.quaint.2005.05.007>
- [29] Kehl, M., Skowronek, A., & Frechen, M. (2009). Nature and age of Late Quaternary basin fill deposits in the Basin of Persepolis/Southern Iran | Request PDF [WWW Document]. URL https://www.researchgate.net/publication/222130117_Nature_and_age_of_Late_Quaternary_basin_fill_deposits_in_the_Basin_of_PersepolisSouthern_Iran (accessed 11.12.24).
- [30] Kiseleva, E., Mikhailov, V., Smolyaninova, E., Dmitriev, P., Golubev, V., Timoshkina, E., Hooper, A., Samiei-Esfahany, S., & Hanssen, R. (2014). PS-InSAR Monitoring of Landslide Activity in the Black Sea Coast of the Caucasus. *Procedia Technol.* 16, 404–413. <https://doi.org/10.1016/j.protcy.2014.10.106>
- [31] Li, Z., Cao, Y., Wei, J., Duan, M., Wu, L., Hou, J., & Zhu, J. (2019). Time-series InSAR ground deformation monitoring: Atmospheric delay modeling and estimating. *Earth-Sci. Rev.* 192, 258–284. <https://doi.org/10.1016/j.earscirev.2019.03.008>
- [32] Mahmoudpour, M., Khomechiyan, M., Nikudel, M.R., & Ghassemi, M.R. (2016). Numerical simulation and prediction of regional land subsidence caused by groundwater exploitation in the southwest plain of Tehran, Iran. *Eng. Geol.* 201, 6–28. <https://doi.org/10.1016/j.enggeo.2015.12.004>
- [32/1] Moghimi, E. (2014). *Hazards Science*, University of Tehran Press, ISBN 978-964-03-6659-2.
- [32/2] Moghimi, E. (2014). Why hazards science? Definition and necessity. *Iranian Journal of Hazards Science*, 1(1).
- [32/3] Moghimi, E. (2012). *Urban geomorphology*, University of Tehran Press, ISBN 978-964-03-6276-1.
- [33] Motagh, M., Shamshiri, R., Haghshenas Haghghi, M., Wetzel, H.-U., Akbari, B., Nahavandchi, H., Roessner, S., & Arabi, S. (2017). Quantifying groundwater exploitation induced subsidence in the Rafsanjan plain, southeastern Iran, using InSAR time-series and in situ measurements. *Eng. Geol.* 218, 134–151. <https://doi.org/10.1016/j.enggeo.2017.01.011>
- [34] Mousavi, A (2012) *Persepolis: Discovery and Afterlife of a World Wonder*, De Gruyter.
- [35] Naderi, M., Raeisi, E., & Zarei, M. (2016). The impact of halite dissolution of salt diapirs on surface and ground water under climate change, South-Central Iran. *Environ. Earth Sci.* 75, 1–13. <https://doi.org/10.1007/s12665-016-5525-5>
- [36] Perissin, N.D. (PDF) Repeat-Pass SAR Interferometry With Partially Coherent Targets [WWW Document]. URL https://www.researchgate.net/publication/220052369_Repeat-Pass_SAR_Interferometry_With_Partially_Coherent_Targets (accessed 11.14.24).
- [37] Perissin, D. (2016a). Interferometric SAR Multitemporal Processing: Techniques and Applications, in: Ban, Y. (Ed.), *Multitemporal Remote Sensing, Remote Sensing and Digital Image Processing*. Springer International Publishing, Cham, pp. 145–176. https://doi.org/10.1007/978-3-319-47037-5_8
- [38] Perissin, D., & Wang, T. (2012). Repeat-Pass SAR Interferometry With Partially Coherent Targets. *IEEE Trans. Geosci. Remote Sens.* 50, 271–280. <https://doi.org/10.1109/TGRS.2011.2160644>
- [39] Perissin, D., Wang, Z., & Lin, H. (2012). Shanghai subway tunnels and highways monitoring through Cosmo-SkyMed Persistent Scatterers. *ISPRS J. Photogramm. Remote Sens.* 73, 58–67. <https://doi.org/10.1016/j.isprsjprs.2012.07.002>

- [40] Rajabi, A., & Ghorbani, E. (2016). Land subsidence due to groundwater withdrawal in Arak plain, Markazi province, Iran. *Arab. J. Geosci.* 9, 738. <https://doi.org/10.1007/s12517-016-2753-7>
- [41] Xue, F., Lv, X., Dou, F., & Yun, Y. (2020). A Review of Time-Series Interferometric SAR Techniques: A Tutorial for Surface Deformation Analysis. *IEEE Geosci. Remote Sens. Mag.* 8, 22–42. <https://doi.org/10.1109/MGRS.2019.2956165>
- [42] Yagüe-Martínez, N., Prats-Iraola, P., Rodríguez González, F., Brcic, R., Shau, R., Geudtner, D., Eineder, M., & Bamler, R. (2016). Interferometric Processing of Sentinel-1 TOPS Data. *IEEE Trans. Geosci. Remote Sens.* 54, 2220–2234. <https://doi.org/10.1109/TGRS.2015.2497902>
- [43] Zhou, Z. (2013b). The applications of InSAR time series analysis for monitoring long-term surface change in peatlands (PhD). University of Glasgow.