

Assessing Land Subsidence Triggered by the 28 January 2023 Khoy Earthquake in Salmas Plain Using InSAR

Sana Gholami¹, Mahdi Behyari^{2*} , Ali Abedini³

1. MSc. Student of Geology, Geology Department, Urmia University, Urmia, Iran
 2. **Corresponding Author**, Associate Professor, Department of Geology, Urmia University, Urmia, Iran
 Email: m.behyari@urmia.ac.ir ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-4944-5161>
 3. Professor, Department of Geology, Urmia University, Urmia, Iran

Article Info	ABSTRACT
Article type: Research Article Article history: Received: 14 October 2025 Revised: 24 December 2025 Accepted: 31 December 2025 Published: 22 December 2026 Keywords: Land subsidence, Earthquake, Interferometry, Salmas Plain.	Land subsidence is a geomorphological and environmental phenomenon with significant economic and social consequences, driven by both natural and anthropogenic factors such as excessive groundwater extraction and seismic activity. The Salmas Plain in northwestern Iran, characterized by severe groundwater-level decline and its location within a seismically active zone, is considered a critical area affected by land subsidence. In this study, Sentinel-1 satellite data and Synthetic Aperture Radar Interferometry (InSAR) techniques were employed to investigate ground surface deformation over the period 2021–2024. Geological, hydrological, and soil datasets were integrated with a Digital Elevation Model (DEM), slope and aspect maps, land-use information, and seismic records to identify and analyze the main controlling factors of subsidence. The results indicate that subsidence rates generally reach their maximum during periods of intensive groundwater extraction and decrease during the cold season, highlighting the dominant role of human activities in surface deformation. However, the Khoy earthquake of 28 January 2023 (8 Bahman 1401), despite occurring in the cold season, resulted in a nearly threefold increase in subsidence rates, demonstrating the direct impact of seismic loading on both surficial and subsurface sediments. Low-slope areas underlain by fine-grained and highly compressible deposits were identified as the most vulnerable zones, while slope orientation and active faults significantly influenced the spatial distribution of subsidence. These findings emphasize that in seismically active regions, land subsidence rates may increase abruptly following seismic events, posing serious risks to infrastructure, and therefore, continuous groundwater monitoring, controlled extraction, and the integration of InSAR observations with hydrogeological modeling are essential for identifying vulnerable areas and mitigating subsidence-related hazards.
How to Cite: Gholami, S. , Behyari, M. and Abedini, A. (2026). Assessing Land Subsidence Triggered by the 28 January 2023 Khoy Earthquake in Salmas Plain Using InSAR. <i>Journal of Natural Environmental Hazards</i>, 15 (50), 109-132.	
 © The Author/Authors DOI: 10.22111/jneh.2025.53484.2141 Publisher: University of Sistan and Baluchestan	

EXTENDED ABSTRACT

INTRODUCTION

Land subsidence is a critical geomorphological and environmental phenomenon that may occur gradually or suddenly, causing a significant lowering of the Earth's surface. It results primarily from compaction of subsurface layers and the extraction of fluids from voids. Human activities, such as excessive groundwater withdrawal, intensive agriculture, and land use change, often exacerbate natural geological processes, while tectonic and seismic activities can induce abrupt subsidence events. In areas with active faults and high seismicity, earthquakes can rapidly alter subsurface stress regimes, trigger soil compaction, and induce vertical displacement, significantly increasing the risk to infrastructure and human settlements.

The Salmas Plain, located in northwestern Iran, represents a highly vulnerable region where anthropogenic groundwater exploitation combines with active tectonics to create complex subsidence patterns. The plain exhibits widespread alluvial deposits, low-relief terrain, and extensive agricultural activity, making it susceptible to both seasonal and sudden changes in surface elevation. Before the 28 January 2023 earthquake in Khoy, seasonal groundwater extraction had already caused measurable subsidence across the plain, with average annual rates approaching several centimeters. The occurrence of the earthquake provided a unique opportunity to evaluate the interplay between human-induced and seismic-driven deformation, allowing for a comprehensive assessment of subsidence dynamics over four years from 2021 to 2024.

This study employs Synthetic Aperture Radar Interferometry (InSAR) using Sentinel-1 satellite imagery to quantify and map land subsidence. The method provides millimeter-scale measurements over wide areas, independent of weather conditions, and is particularly suitable for monitoring both slow and rapid surface deformations. By integrating geological, hydrogeological, soil, topographic, and land use data with InSAR results, this study identifies controlling factors, evaluates spatial and temporal patterns of subsidence, and assesses the direct impacts of the 28 January 2023 Khoy earthquake on the Salmas Plain.

DATA AND METHODOLOGY

The study area extends from the east toward the Iran–Turkey border in the west. The central and eastern parts of the plain are relatively flat and intensively cultivated, whereas the western sectors are characterized by mountainous terrain. The geological units of the area include metamorphic rocks, Quaternary alluvial and terrace deposits, evaporitic formations along the lake margins, travertine layers, and volcanic deposits. These units were classified based on their susceptibility to compaction and land subsidence.

Topographic data were derived from a digital elevation model (DEM) with a spatial resolution of 13.9 m, obtained from Sentinel-1 imagery. Slope maps were classified into four categories (0–5°, 5–15°, 15–30°, >30°) to identify low-gradient areas prone to subsidence. Aspect maps were generated to examine the influence of slope orientation on subsidence distribution. Soil data, including depth, texture, permeability, and compressibility, were compiled, identifying Lithosols, Haplic Xerosols, and Calcaric Regosols as the main soil classes. Land use data were extracted from high-resolution maps and categorized into agriculture, wetland, urban, and other types.

Groundwater information was obtained from 41 piezometer wells covering 2019–2024. Water table levels were interpolated in GIS to produce spatially continuous maps for analysis. Earthquake data and fault maps were integrated to assess tectonic influences and to derive a seismic hazard index.

Sentinel-1 SLC images with VV polarization were selected to minimize atmospheric noise and ensure high coherence. Images were co-registered, interferograms were formed, and phase unwrapping was performed to convert phase changes into vertical displacement along the satellite line-of-sight. Multilooking and Goldstein filtering reduced noise, and terrain correction aligned results with

geographic coordinates. Processing emphasized dry-season image pairs to focus on human-induced subsidence while capturing earthquake effects.

RESULTS AND DISCUSSION

InSAR analysis reveals a strong seasonal pattern of subsidence modulated by human activity and amplified by the 2023 earthquake.

Annual and seasonal observations indicate that:

- * 2021–2022: Average subsidence ranged from 4.6 to 5.2 cm/year, with the highest rates in southern and southeastern alluvial zones.
- * Pre-earthquake 2023: Rates declined to 1.5 cm/year due to winter aquifer recharge and reduced water extraction.
- * Post-earthquake 2023: Abrupt increase to 14.7 cm/year highlights the direct impact of seismic energy on both surface and subsurface sediments.
- * 2024: Rates slightly decreased to 12.5 cm/year but remained significantly elevated, particularly in low-gradient, fine-grained areas.

Table 1. Changes in Maximum Subsidence Rate over the Studied Years in the Study Area

Year	Maximum Subsidence Rate (cm/year)	Key Observations and Notes
2021	5.2	Relatively high and stable subsidence
2022	4.6	Slight decrease, but still high
2023 (pre-earthquake)	1.5	Significant reduction
2023 (post-earthquake)	14.7	Sharp increase due to the direct impact of the earthquake on the ground structure
2024	12.5	Relative decrease compared to the previous year, but still critical with more widespread subsidence

Spatial analysis demonstrates that geology and lithology strongly influence subsidence intensity. Fine-grained, compressible alluvial and terrace deposits exhibited the largest vertical displacements, while bedrock units had minor direct subsidence but influenced the distribution patterns. Hydrogeological factors, particularly the depth and decline of groundwater, were critical in controlling compaction rates. Land use and drainage conditions further modulated subsidence, with irrigated agricultural areas and wetlands showing heightened vulnerability.

Seismic effects were clearly evident: even during periods of reduced groundwater extraction in winter, the earthquake triggered rapid and extensive subsidence. Topography also affected the patterns, as low-gradient areas concentrated subsidence, while steeper slopes experienced less vertical displacement. Fault lines and structural trends guided the spatial distribution of subsidence, emphasizing the interplay between tectonics and anthropogenic stressors.

The combined influence of these factors produces complex temporal and spatial variations, where human activity sets the baseline susceptibility and seismic events act as accelerators of sudden deformation. These findings underscore the necessity for continuous monitoring, groundwater management, and the integration of geospatial and hydrogeological data to mitigate subsidence risks in seismic plains.

CONCLUSION

Between 2021 and 2024, the Salmas Plain experienced substantial variations in subsidence rates due to a combination of anthropogenic, natural, and seismic factors. InSAR measurements provided high-

resolution mapping of vulnerable zones, revealing that low-gradient, fine-grained sediments are particularly sensitive. The 28 January 2023 Khoy earthquake caused sudden and severe subsidence, demonstrating the rapid response of susceptible deposits to seismic energy. Sustainable management of groundwater, regular monitoring, and identification of high-risk areas are essential to mitigate subsidence hazards. Integrating InSAR with hydrogeological models and GPS data can enhance predictive capabilities and support resilient land and water management strategies.

ETHICAL CONSIDERATIONS

Conflict of Interest Statement: The authors declare no conflict of interest.

Ethical Statement: This article does not contain any studies with human participants or animals performed by any of the authors.

ACKNOWLEDGMENTS

This research was conducted as part of a Master's thesis at Urmia University. The authors express sincere gratitude to the Research and Technology Vice-Presidency of Urmia University for financial and technical support.

REFERENCES

References [in Persian]

- Farzin-Kia, R., Zangeneh-Asadi, M., Amirahmadi, A., & Zandi, R. (2019). Tectonic activities and their impact on land subsidence in the Jovin Plain watershed: *Hydrogeomorphology*. *Hydrogeomorphology*, 6(20), 165–185. [In Persian]
- Shafiei, N., Mokhtari, L., Amirahmadi, A., & Zandi, R. (2021). Investigation of groundwater subsidence in Noorabad Plain using radar interferometry. *Journal of Geomorphology and Environmental Sciences of Iran*, Article Research. <https://doi.org/10.22034/gmpj.2020.106424> [In Persian]
- Rajabi, M., Roustaei, Sh., & Motaei, S. (2023). Time-series assessment of land subsidence in Kermanshah Plain using the InSAR technique. *Natural Geography Research*, 55(1), 19–37. [In Persian]
- Amirahmadi, A., Shafiei, N., & Zandi, R. (2021). Analysis of the relationship between groundwater level decline and land subsidence using spatial models: Case study of Noorabad Plain aquifer. *Journal of Geography and Planning*, 25(76), 159–171. [In Persian]

References [in English]

- Behyari, M., et al. (2018). "Structural control on the Salmas geothermal region, northwest Iran, from fractal analysis and paleostress data." *Acta Geologica Sinica-English Edition* 92(5): 1728-1738. DOI: 10.1111/1755-6724.13673
- Berberian, M. and J. Tchalenko (1976). "Field study and documentation of the 1930 Salmas (Shahpur-Azarbaidjan) earthquake." *Geol. Surv. Iran* 39: 271-342.
- Dehghani, M., et al. (2009). "InSAR monitoring of progressive land subsidence in Neyshabour, northeast Iran." *Geophysical Journal International* 178(1): 47-56. DOI: 10.1111/j.1365-246x.2009.04135.x
- Hejmanowski, R., et al. (2019). "An analysis applying InSAR of subsidence caused by nearby mining-induced earthquakes." *Geosciences* 9(12): 490. DOI: 10.3390/geosciences9120490
- Herrera-García, G., et al. (2021). "Mapping the global threat of land subsidence." *Science* 371(6524): 34-36. DOI: 10.4211/hs.dc7c5bfb3a86479b889d3b30ab0e4ef7
- Imakiire, T. and M. Koarai (2012). "Wide-area land subsidence caused by the 2011 off the Pacific Coast of Tohoku Earthquake." *Soils and Foundations* 52(5): 842-855. DOI: 10.1016/j.sandf.2012.11.007
- Khodabandeh, A., et al. (2002). "Geological map of Iran, 1: 100,000 series sheet Salmas." *Geological Survey of Iran*, Tehran.
- Li, X., Wang, X., and Chen, Y., 2022, InSAR atmospheric delay correction model integrated from multi-source data based on VCE: *Remote Sensing*, v. 14, no. 17, p. 4329.
- Malik, K., et al. (2022). "Estimation of ground subsidence of New Delhi, India using PS-InSAR technique and Multi-sensor Radar data." *Advances in Space Research* 69(4): 1863-1882. DOI: 10.1016/j.asr.2021.08.032
- Massonnet, D. and K. L. Feigl (1998). "Radar interferometry and its application to changes in the Earth's surface." *Reviews of Geophysics* 36(4): 441-500. DOI: 10.1029/97rg03139
- Prestininzi, A. and R. Romeo (2000). "Earthquake-induced ground failures in Italy." *Engineering Geology* 58(3-4): 387-397. DOI: 10.1016/s0013-7952(00)00044-2

- Samieie-Esfahany, S., et al. (2010). On the effect of horizontal deformation on InSAR subsidence estimates. Fringe 2009, Proceedings of the workshop held 30 November-4 December 2009, in Frascati, Italy. Edited by H. Lacoste. ESA-SP Vol. 677. ISBN: 978-92-9221-241-4, 2010, id. 39.
- Sedighi, M., et al. (2010). "Subsidence detection in Salmas area using InSAR and geodetic techniques." *Geospatial Eng J* **1**(4): 25-33.
- Shahbazi, S., et al. (2022). "Constraints on the hydrogeological properties and land subsidence through GNSS and InSAR measurements and well data in Salmas plain, northwest of Urmia Lake, Iran." *Hydrogeology Journal* **30**(2): 533-555. DOI: 10.1007/s10040-021-02416-x
- Solano-Rojas, D., et al. (2020). "Remotely triggered subsidence acceleration in Mexico City induced by the September 2017 M w 7.1 Puebla and the M w 8.2 Tehuantepec September 2017 earthquakes." *Proceedings of the International Association of Hydrological Sciences* **382**: 683-687. DOI: 10.5194/piahs-382-683-2020.
- Taghipour, K., et al. (2018). "Evidence for distributed active strike-slip faulting in NW Iran: The Maragheh and Salmas fault zones." *Tectonophysics* **742**: 15-33. DOI: 10.1016/j.tecto.2018.05.022
- Wu, P. C., et al. (2022). "Subsidence in coastal cities throughout the world observed by InSAR." *Geophysical Research Letters* **49**(7): e2022GL098477. DOI: 10.1029/2022gl098477
- Zhang, Z., et al. (2023). "Monitoring and analysis of ground subsidence in Shanghai based on PS-InSAR and SBAS-InSAR technologies." *Scientific Reports* **13**(1): 8031. DOI: 10.22541/au.166831755.54665841/v1.

مجله علمی پژوهشی مخاطرات محیط طبیعی، دوره ۱۵، شماره ۵۰، شماره پیاپی ۰۴، دی ۱۴۰۵

بررسی فرونشست ناشی از زمین لرزه ۸ بهمن خوی در دشت سلماس با بهره‌گیری از تکنیک تداخل سنجی راداری

ثنا غلامی^۱، مهدی بهیاری^{۲*} , علی عابدینی^۳

۱. کارشناسی ارشد زمین شناسی دانشگاه ارومیه

۲. دانشیار گروه زمین شناسی دانشگاه ارومیه (نویسنده مسئول)

ایمیل: m.behyari@urmia.ac.ir <https://orcid.org/0000-0002-4944-5161> ORCID:

۳. استاد گروه زمین شناسی دانشگاه ارومیه

اطلاعات مقاله	چکیده
نوع مقاله: مقاله پژوهشی تاریخ دریافت: ۱۴۰۴/۰۷/۲۲ تاریخ ویرایش: ۱۴۰۴/۱۰/۰۳ تاریخ پذیرش: ۱۴۰۴/۱۰/۱۰ تاریخ انتشار: ۱۴۰۵/۱۰/۰۱ واژه‌های کلیدی: فرونشست، زمین لرزه، تداخل سنجی راداری، دشت سلماس.	فرونشست زمین، پدیده‌ای ژئومورفولوژیکی و زیست محیطی با پیامدهای اقتصادی و اجتماعی قابل توجه است. دشت سلماس در شمال غرب ایران، با سابقه افت شدید سطح آب‌های زیرزمینی و قرارگیری در پهنه لرزه خیز، یکی از مناطق بحرانی در زمینه فرونشست محسوب می‌شود. در این مطالعه، با استفاده از داده‌های ماهواره‌ای سنتینل-۱ و فن تداخل سنجی راداری، تغییرات سطح زمین در بازه زمانی ۲۰۲۱ تا ۲۰۲۴ بررسی شد. داده‌های زمین شناسی، هیدرولوژیکی، خاک شناسی، مدل ارتفاعی رقومی، نقشه شیب و جهت شیب، کاربری زمین و اطلاعات زمین لرزه‌ای برای تحلیل عوامل کنترل کننده فرونشست مورد استفاده قرار گرفتند. یافته‌ها نشان داد که نرخ فرونشست در فصل برداشت شدید آب‌های زیرزمینی به بیشترین مقدار خود می‌رسد و در فصل سرد کاهش می‌یابد که نقش فعالیت‌های انسانی در تغییر شکل سطح زمین را برجسته می‌کند. اما وقوع زمین لرزه ۸ بهمن ۱۴۰۱، علی‌رغم فصل سرد، باعث افزایش قابل توجه نرخ فرونشست به میزان ۳ برابر نرخ مشابه در دوره قبل شد و تأثیر مستقیم لرزه‌ای بر رسوبات سطحی و زیرسطحی را نشان داد. مناطق کم‌شیب، با رسوبات ریزدانه و تراکم‌پذیر، حساس‌ترین نقاط شناسایی شدند و جهت شیب و گسل‌های فعال در پراکندگی فرونشست نقش داشتند. نتایج تأکید می‌کنند که در پهنه‌های لرزه خیز، نرخ فرونشست تحت تأثیر فعالیت‌های لرزه‌ای به صورت ناگهانی می‌تواند افزایش یابد و مخاطرات جدی برای سازه‌ها و تاسیسات ایجاد نماید. بنابراین، پایش مستمر منابع آب زیرزمینی، مدیریت برداشت‌ها می‌تواند در شناسایی مناطق آسیب‌پذیر و مدیریت ریسک ناشی از فرونشست در پهنه‌های لرزه خیز مؤثر باشد.

استناد: غلامی، ثنا، بهیاری، مهدی و عابدینی، علی. (۱۴۰۵). بررسی فرونشست ناشی از زمین لرزه ۸ بهمن خوی در دشت سلماس با بهره‌گیری از تکنیک تداخل سنجی راداری. مخاطرات محیط طبیعی، ۱۰ (۵۰)، ۱۰۹-۱۳۲.

ناشر: دانشگاه سیستان و بلوچستان

نویسنده/ نویسندگان
DOI: 10.22111/jneh.2025.53484.2141



مقدمه

فرونشست زمین، یکی از مهم‌ترین پدیده‌های ژئومورفولوژیکی و زیست‌محیطی است که به‌صورت تدریجی یا ناگهانی رخ داده و منجر به پایین رفتن سطح زمین می‌شود. این پدیده در نتیجه تراکم لایه‌های زیرسطحی و خروج سیالات از میان حفره‌ها شکل می‌گیرد (هررا-گارسیا، ازکوئرو و همکاران^۱، ۲۰۲۱؛ وو، وی و همکاران^۲، ۲۰۲۲؛ ژانگ، هو و همکاران^۳، ۲۰۲۳). فرونشست دلایل طبیعی و انسانی متعددی دارد که از جمله مهم‌ترین آن‌ها می‌توان به فشردگی تدریجی رسوبات، برداشت بی‌رویه آب‌های زیرزمینی، استخراج منابع نفت و گاز، فعالیت‌های معدنی، انحلال سنگ‌های زیرسطحی و نیز فرآیندهای زمین‌ساختی و لرزه‌ای اشاره کرد (ایماکییره و کوآرای^۴، ۲۰۱۲؛ هجمانوسکی، مالینووسکا و همکاران^۵، ۲۰۱۹) اما آنچه مهم است این است که وقوع زمین‌لرزه به هر علتی هم که باشد، به‌شدت زندگی انسان را تحت تاثیر قرار می‌دهد به‌طوری‌که بسیاری از شهرهای ایران درگیر این رویداد مخاطره‌آمیز شده‌اند.

فرونشست زمین در دشت‌های آبرفتی ایران بیشتر ناشی از ترکیب عوامل انسانی و طبیعی، به‌ویژه برداشت بی‌رویه آب زیرزمینی و تراکم رسوبات زیرسطحی است. امیراحمدی، شفیع و زندی (۱۴۰۰) ارتباط مستقیم افت سطح آب‌های زیرزمینی با فرونشست آبخوان نورآباد ممسنی را نشان دادند. شفیع، مختاری، امیراحمدی و زندی (۱۴۰۰) با استفاده از روش تداخل‌سنجی راداری، روند تدریجی فرونشست دشت نورآباد را پایش کرده و الگوهای فضایی آن را مشخص کردند. همچنین رجبی، روستایی و مطاعی (۱۴۰۲) با ارزیابی سری زمانی فرونشست در دشت کرمانشاه، تأکید کردند که این پدیده در دشت‌های آبرفتی ایران به شکل تدریجی و قابل‌پیش‌بینی رخ می‌دهد. نتایج این مطالعات نشان می‌دهد که پایش دقیق فرونشست برای مدیریت منابع آب و کاهش مخاطرات زمین‌شناختی حیاتی است. دشت سلماس در شمال‌غرب ایران یکی از مناطق بحرانی از نظر فرونشست زمین به‌شمار می‌آید. مطالعات متعدد نشان داده‌اند که افت شدید سطح آب‌های زیرزمینی در این منطقه که ناشی از برداشت بی‌رویه برای مصارف کشاورزی و شرب است، نقش اصلی در بروز فرونشست دارد (بربریان و چالنگو^۶، ۱۹۷۶؛ بهیاری، نورعلی و همکاران^۷، ۲۰۱۸؛ شهبازی، موسوی و همکاران^۸، ۲۰۲۲). نتایج سنجش‌های تداخل‌سنجی راداری با روزه مصنوعی و داده‌های ژئودتیکی نشان می‌دهند که میانگین نرخ فرونشست در این دشت حدود ۵ سانتی‌متر در سال بوده و بیشترین شدت آن در بخش‌های جنوبی و جنوب‌شرقی مشاهده شده است (صدیقی، نانکالی و همکاران^۹، ۲۰۱۰). علاوه بر آن، کاهش ظرفیت ذخیره‌سازی آبخوان‌ها در طی دهه‌های اخیر باعث شده است که حدود ۲۵ درصد مساحت دشت سلماس در معرض فرونشست با آسیب‌پذیری بسیار بالا قرار گیرد. این وضعیت، همراه با قرارگیری دشت در پهنه لرزه‌خیز شمال‌غرب ایران (بربریان و چالنگو^۶، ۱۹۷۶؛ بهیاری، نورعلی و همکاران، ۲۰۱۸؛ تقی‌پور، خطیب و همکاران^{۱۰}، ۲۰۱۸) اهمیت ویژه‌ای به پایش و بررسی اثرات ترکیبی زمین‌لرزه‌ها و بهره‌برداری انسانی بر پایداری سطح زمین در این منطقه می‌دهد.

¹ Herrera-García, Ezquerro et al.

² Wu, Wei et al.

³ Zhang, Hu et al.

⁴ Imakiire and Koarai

⁵ Hejmanowski, Malinowska et al.

⁶ Berberian and Tchalenko

⁷ Behyari et al.

⁸ Shahbazi et al.

⁹ Nankali et al.

¹⁰ Taghipour et al.

در سطح جهانی نیز فرونشست به‌عنوان یک معضل روبه‌رشد در مناطق شهری و کشاورزی شناخته می‌شود. در ایران نیز به‌ویژه در مناطق خشک و نیمه‌خشک، برداشت غیرقانونی و بی‌رویه آب‌های زیرزمینی منجر به نرخ‌های فرونشست بالایی شده است؛ به‌طوری‌که کشور در زمره سریع‌ترین مناطق دارای فرونشست در جهان با نرخ‌هایی تا حدود ۲۵ سانتی‌متر در سال قرار گرفته است. این پدیده علاوه بر آثار زیست‌محیطی، پیامدهای اقتصادی و اجتماعی متعددی از جمله آسیب به زیرساخت‌ها، کاهش بهره‌وری کشاورزی، تهدید امنیت غذایی و جابه‌جایی جمعیت انسانی را به‌همراه دارد (هررا-گارسیا، از کوئرو و همکاران^۱، ۲۰۲۱؛ ژانگ، هو و همکاران^۲، ۲۰۲۳).

یکی از عوامل مهم در ایجاد یا تشدید فرونشست، حرکات تکتونیکی و رخداد زمین‌لرزه‌ها است. فرزین‌کیا، زنگنه‌اسدی، امیراحمدی و زندی (۱۳۹۸) در مطالعه خود بر روی حوضه آبریز دشت جوبین نشان داده‌اند که فعالیت‌های تکتونیکی می‌تواند به‌طور مستقیم بر الگوهای فرونشست زمین تأثیر بگذارد؛ به‌خصوص زمانی که ساختار سازندهای رسوبی حساس به تغییر تنش باشند و شرایط هیدروژئومورفولوژیکی منطقه موجب تشدید فرونشست شود. از طرفی، زمین‌لرزه‌ها می‌توانند با ایجاد تغییر در فشارهای زیرسطحی، شکستگی لایه‌های رسوبی و فشردگی ناگهانی رسوبات اشباع، موجب جابه‌جایی عمودی زمین و در نتیجه فرونشست شوند. این موضوع در مناطق لرزه‌خیز اهمیت ویژه‌ای دارد؛ زیرا ترکیب اثرات تکتونیک فعال و فشارهای انسانی ناشی از بهره‌برداری منابع می‌تواند منجر به فرونشست‌های شدید و پرخطر گردد (پرستینیزی و رومئو^۳، ۲۰۰۰؛ ایماکییره و کوآرای^۴، ۲۰۱۲؛ هجمانوسکی، مالدینوسکا و همکاران^۵، ۲۰۱۹؛ سولانو-روخاس، کابرا-کانو و همکاران^۶، ۲۰۲۰). در چنین شرایطی، پایش دقیق تغییرات سطح زمین برای شناخت الگوهای فرونشست و ارزیابی ارتباط آن با رخدادهای لرزه‌ای ضروری است.

روش‌های سنتی مانند تراز دقیق و شبکه‌های سامانه موقعیت‌یاب جهانی^۷ در گذشته برای مطالعه تغییرات سطح زمین به‌کار گرفته می‌شدند؛ اما به‌دلیل هزینه‌بر بودن و پوشش محدود، جای خود را به فناوری‌های نوینی چون تداخل‌سنجی راداری با روزه مصنوعی^۸ داده‌اند (دهقانی، والدان‌زویج و همکاران^۹، ۲۰۰۹؛ سامعی‌اصفهانی، هانسن و همکاران^{۱۰}، ۲۰۱۰؛ مالک، کومار و همکاران^{۱۱}، ۲۰۲۲؛ شهبازی، موسوی و همکاران^{۱۲}، ۲۰۲۲؛ وو، وی و همکاران^{۱۳}، ۲۰۲۲). به‌دلیل دقت میلی‌متری، پوشش وسیع مکانی، قابلیت پایش طولانی‌مدت و استقلال از شرایط جوی، ابزاری قدرتمند برای مطالعه تغییر شکل سطح زمین محسوب می‌شود (ماسونه‌نه و فیگل^{۱۴}، ۱۹۹۸). این روش علاوه بر پایش فرونشست، امکان تحلیل جابه‌جایی‌های ناشی از زلزله، حرکات گسلی و سایر فرآیندهای زمین‌ساختی را نیز فراهم می‌کند.

¹ Herrera-García, Ezquerro et al.

² Zhang, Hu et al.

³ Prestininzi and Romeo

⁴ Imakiire and Koarai

⁵ Hejmanowski, Malinowska et al.

⁶ Solano-Rojas, Cabral-Cano et al.

⁷ GPS

⁸ InSAR

⁹ Valadan Zoej et al.

¹⁰ Hanssen et al

¹¹ Malik, Kumar et al.

¹² Shahbazi, Mousavi et al.

¹³ Wu, Wei et al.

¹⁴ Wu, Wei et al.

در این پژوهش، تلاش شده است تا با بهره‌گیری از فن تداخل‌سنجی راداری با روزنه مصنوعی و تلفیق آن با داده‌های زمین‌شناسی، توپوگرافی، هیدرولوژی و کاربری زمین، ارتباط میان فرونشست زمین و رخداد زمین‌لرزه ۸ بهمن ۱۴۰۱ (۲۸ ژانویه ۲۰۲۳) در خوی مورد بررسی قرار گیرد. این زمین‌لرزه در پهنه لرزه‌خیز شمال‌غرب ایران رخ داده و موقعیت دشت سلماس امکان تحلیل دقیق اثرات لرزه‌ای بر تغییرات نرخ فرونشست را فراهم کرده است. نوآوری اصلی این پژوهش در **ادغام داده‌های میلی‌متری تداخل‌سنجی راداری با روزنه مصنوعی با اطلاعات چندمنظوره محیطی** برای شناسایی نواحی حساس به فرونشست و ارزیابی اثرات مستقیم و غیرمستقیم زمین‌لرزه بر سازندهای سطحی و زیرسطحی نهفته است که امکان ارائه تحلیل دقیق‌تر از تعامل میان عوامل طبیعی و انسانی را فراهم می‌کند. اهداف اصلی مطالعه شامل تعیین الگوهای فضایی و زمانی فرونشست، سنجش تأثیر زمین‌لرزه بر رسوبات سطحی و زیرسطحی، شناسایی مناطق آسیب‌پذیر و ارائه راه‌کارهای مدیریتی برای کاهش مخاطرات زمین‌شناختی در دشت سلماس و مناطق مشابه می‌باشد. نتایج این پژوهش می‌تواند درک بهتری از نقش زمین‌لرزه‌ها در تشدید فرونشست و بهبود استراتژی‌های پایش و مدیریت ریسک در پهنه‌های لرزه‌خیز ارائه دهد.

داده‌ها و روش‌ها

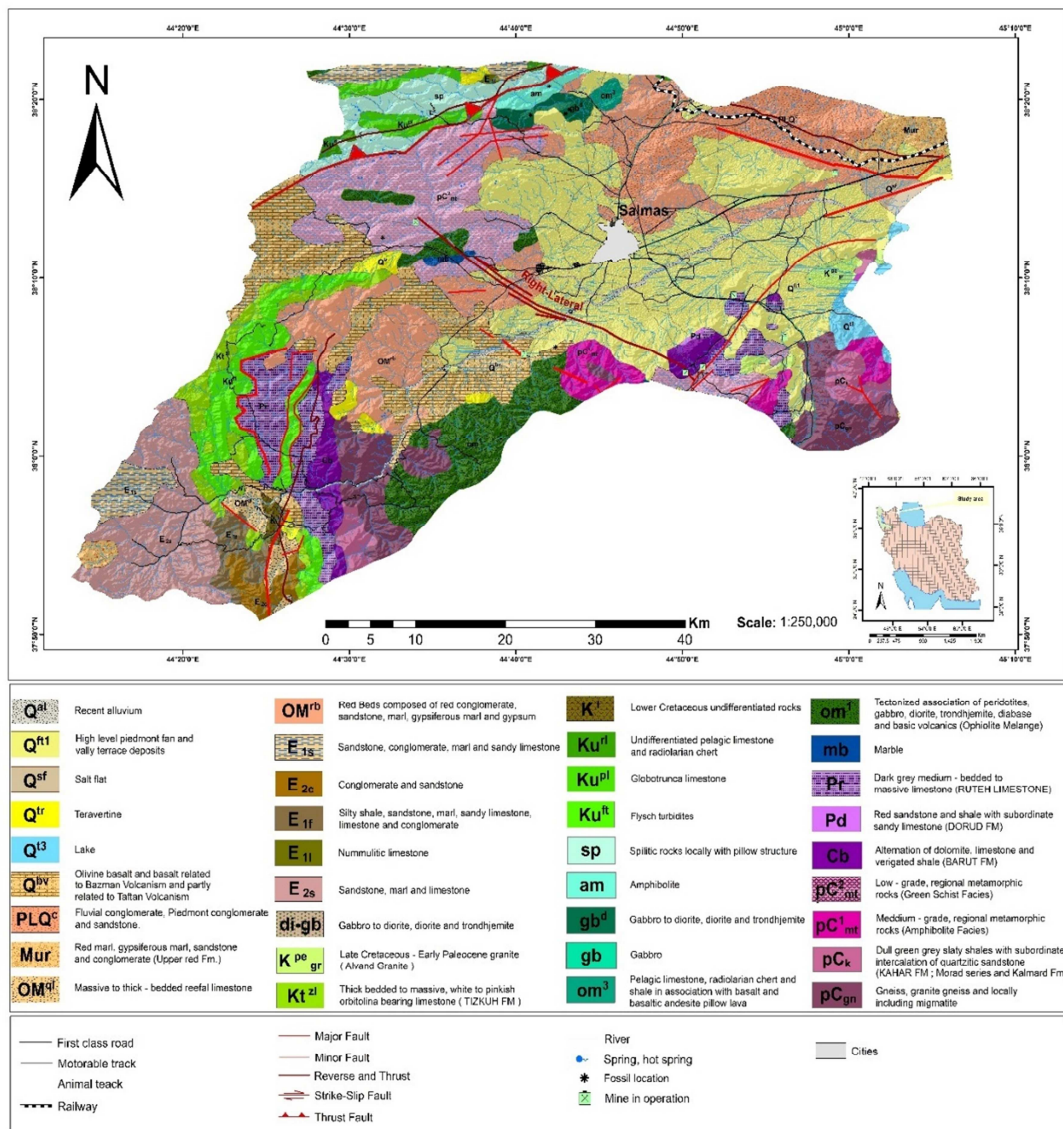
منطقه مورد مطالعه دشت سلماس در شمال‌غرب ایران و استان آذربایجان‌غربی واقع شده است. این دشت در ارتفاع متوسط ۱۴۰۰ متر از سطح دریا قرار دارد و از شرق به دریاچه ارومیه و از غرب به مرز ایران و ترکیه محدود می‌شود. بخش‌های مرکزی و شرقی بیشتر هموار و آب‌رفتی بوده و برای کشاورزی مناسب هستند، درحالی‌که بخش‌های غربی به کوه‌های سلماس و دالامیر محدود می‌شوند. داده‌های ژئومورفولوژیکی و توپوگرافی منطقه از مدل رقومی ارتفاعی ۱ استخراج‌شده از داده‌های سنجنده سنتینل-۱ و پردازش اینترفروگرام‌های مربوط به تاریخ‌های ۲۰ ژوئن ۲۰۲۴ و ۲۹ اوت ۲۰۲۴ در محیط نرم‌افزار اسنپ ۲ به‌دست آمد مدل ارتفاع رقومی تولیدشده دارای وضوح مکانی ۱۳٫۹ متر بوده و به‌عنوان لایه پایه برای تهیه نقشه‌های شیب، جهت شیب، سایه‌روشن و تحلیل‌های مورفولوژیکی مورد استفاده قرار گرفت.

زمین‌شناسی منطقه:

برای بررسی ویژگی‌های زمین‌شناسی، از نقشه‌های زمین‌شناسی موجود استفاده شد (خدابنده، سلطانی و همکاران، ۲۰۰۲؛ بهیاری، نورعلی و همکاران، ۲۰۱۸؛ تقی‌پور، خطیب و همکاران، ۲۰۱۸). واحدهای زمین‌شناسی عمده شامل سنگ‌های دگرگونی (شیست سبز تا آمفیبولیت و گنایس)، رسوبات کواترنری (آبرفت‌ها، پادگانه‌های جوان و رسوبات هولوسن)، نهشته‌های تبخیری در حاشیه دریاچه ارومیه، تراورتن‌های کواترنری و لایه‌های آتشفشانی (بازالت و الیون) هستند. این داده‌ها به‌منظور تعیین مناطق مستعد فرونشست و ارتباط آن با ساختارهای زمین‌شناسی به‌کار گرفته شدند (شکل ۱)

1 DEM

2 Snap



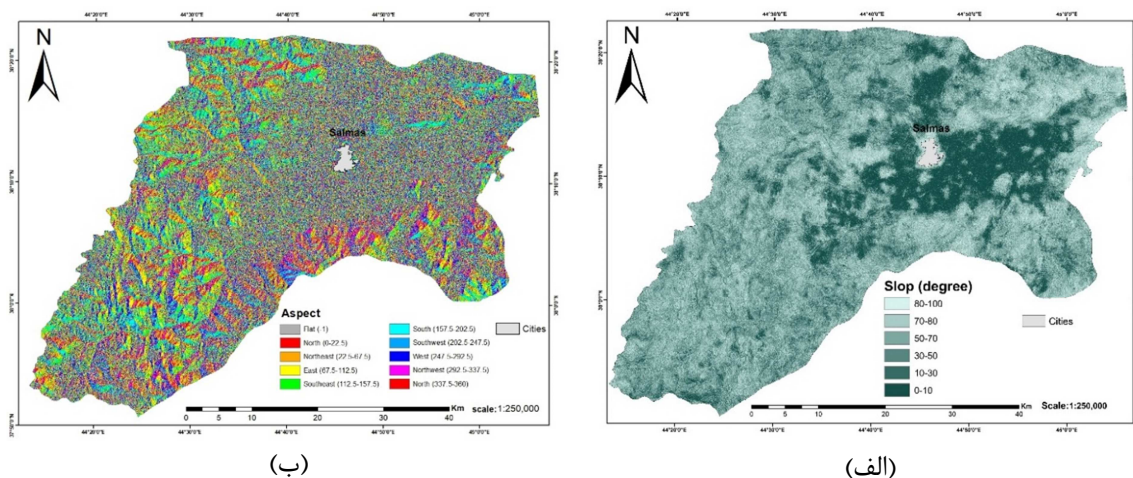
شکل ۱) نقشه زمین‌شناسی منطقه سلماس با مقیاس ۱:۱۰۰۰۰۰ شامل واحدهای رسوبی اخیر، آتشفشانی، رسوبات دریاچه‌ای و سنگ‌های دگرگونی و آذرین متنوع است. در این نقشه، انواع سنگ‌ها مانند ماسه‌سنگ، مارن، سنگ آهک، گابرو، آمفیبولیت و مرمر مشخص شده‌اند. همچنین ساختارهای تکتونیکی مهم شامل گسل‌های مختلف (اصلی، فرعی، رانشی و معکوس) (پروزرسانی خداندنه ۲۰۰۲)!

شیب منطقه:

به‌منظور استخراج نقشه شیب، مدل ارتفاع رقومی تهیه شده پردازش شد. نقشه شیب در واحد درجه به چهار رده (۵۰-، ۱۵-۵، ۳۰- و بیش از ۳۰ درجه) طبقه‌بندی گردید. این طبقه‌بندی امکان شناسایی نواحی کم‌شیب و مستعد فرونشست را فراهم نمود (شکل ۲الف).

جهت شیب منطقه

جهت شیب از مدل ارتفاع رقومی محاسبه و در قالب نقشه‌ای رستری طبقه‌بندی شد. مقادیر ۰، ۹۰، ۱۸۰ و ۲۷۰ درجه به‌ترتیب نشان‌دهنده شیب رو به شمال، شرق، جنوب و غرب هستند. این داده‌ها برای تحلیل نقش توپوگرافی و جهت دامنه‌ها در وقوع فرونشست استفاده شدند (شکل ۲ ب).



شکل ۲ الف: نقشه شیب منطقه که در آن مناطق مستعد فرونشست با شیب کم به رنگ تیره تر نمایش داده شده است. ب: نقشه جهت شیب منطقه

سطح آب‌های زیرزمینی

اطلاعات مربوط به سطح ایستابی از ۴۱ حلقه چاه پیزومتری در بازه زمانی ۱۳۹۸ تا ۱۴۰۳، از سازمان آب منطقه‌ای آذربایجان غربی گرفته شد. داده‌ها پس از پردازش و درونیابی در محیط نرم‌افزار سیستم داده‌های اطلاعات جغرافیایی ۱، به نقشه پهنه‌بندی سطح آب زیرزمینی تبدیل شدند. این نقشه‌ها برای ارزیابی ارتباط بین افت سطح آب و فرونشست مورد استفاده قرار گرفتند (شکل ۳ الف).

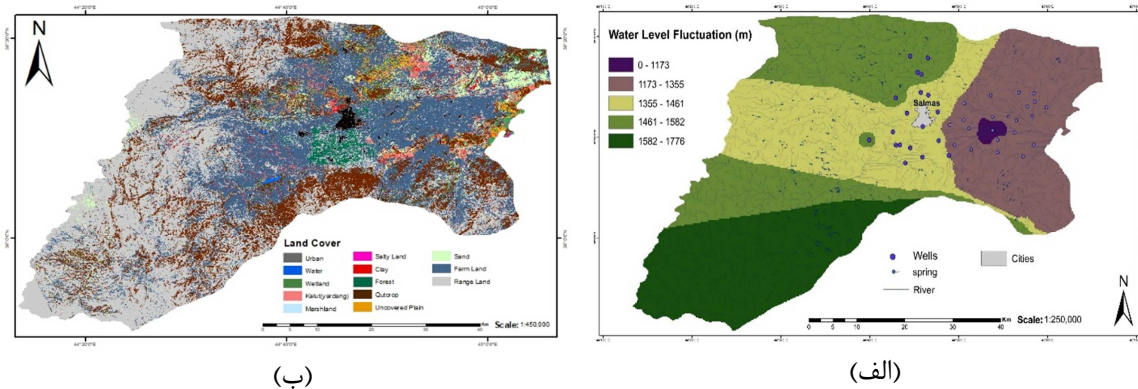
خاک‌شناسی منطقه

داده‌های خاک‌شناسی از منابع سازمان خواربار و کشاورزی ملل متحد^۲، پایگاه مرجع جهانی منابع خاک^۳ و مطالعات ملی خاک ایران گردآوری شد. سه رده اصلی خاک شامل خاک‌های کم‌عمق سنگی^۴، خاک‌های خشک معمولی^۵ و خاک‌های جوان آهکی^۶ شناسایی شدند. خصوصیت‌های این خاک‌ها (عمق، بافت، درصد کربنات کلسیم، نفوذپذیری و تراکم‌پذیری) برای تحلیل پتانسیل نشست زمین مورد بررسی قرار گرفت.

کاربری اراضی

- 1 GIS
- 2 FAO
- 3 WRB
- 4 Lithosols
- 5 Haplic Xerosols
- 6 Calcaric Regosols

برای تهیه نقشه کاربری اراضی، داده‌های نقشه پوشش زمین ایران ۱ با دقت ۱۰ متر در محیط گوگل ارث مورد استفاده قرار گرفت. این داده‌ها به ۱۳ کلاس مختلف طبقه‌بندی شده و برای تحلیل ارتباط میان نوع کاربری زمین و وقوع فرونشست به کار گرفته شدند (شکل ۳ب).



شکل ۳ الف: نقشه سطح آب زیرزمینی منطقه با استفاده از داده های ۴۱ چاه پیزومتریک ب: نقشه کاربری اراضی در محدوده مورد مطالعه

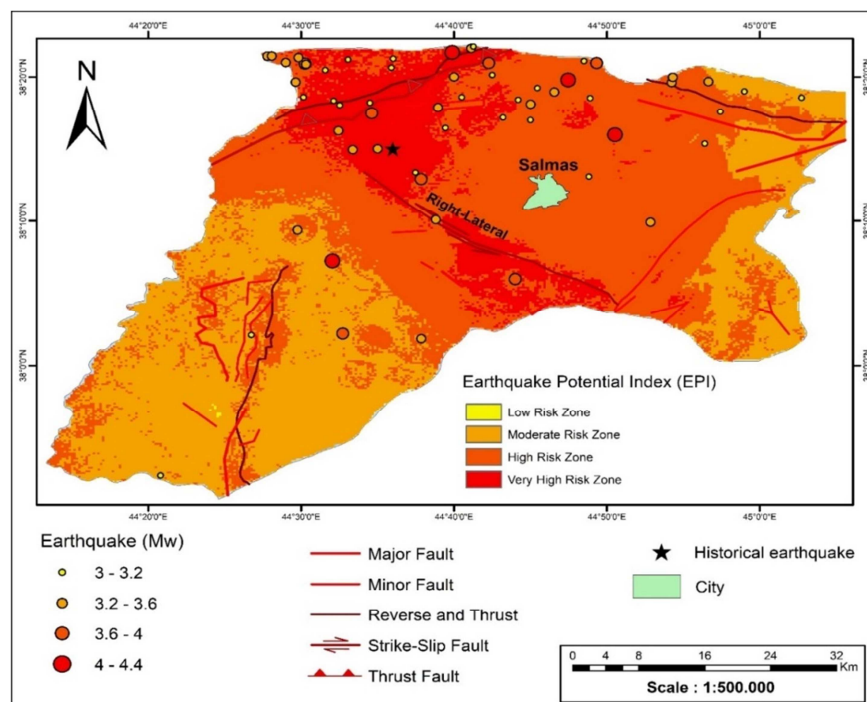
گسل‌ها و لرزه‌خیزی منطقه

منطقه مورد مطالعه تحت تاثیر چندین گسل مهم و لرزه‌زا بوده است که در شکل‌گیری سیمای زمین‌ساختی منطقه نقش قابل توجهی داشته‌اند. گسل سلماس یکی از گسل‌های فعال و مهم شمال غرب ایران است که می‌تواند نقش بسزایی در فرونشست دشت سلماس داشته باشد و در فاصله ۱۰ کیلومتری از منطقه مورد مطالعه قرار دارد. این گسل بیشتر با جهت شمال‌غرب-جنوب‌شرق امتداد یافته و طول آن بیش از چند ده کیلومتر است و بخشی از سیستم گسل‌های امتداد لغز اخیر زاگرس ۲ در شمال غرب ایران تشکیل می‌دهد. گسل سلماس بیشتر به صورت امتداد لغز با مولفه راستگرد فعالیت می‌کند، هرچند بخش‌هایی از آن دارای اجزای معکوس نیز هستند که این ترکیب حرکتی باعث تغییرات پیچیده در میدان تنش و فشار آب زیرزمینی رسوبات دشت می‌شود. شواهد زمین‌شناسی نشان می‌دهد که این گسل در گذشته‌های زمین‌شناختی و دوره‌های اخیر زمین‌لرزه‌زا بوده است. مجاورت دشت سلماس با گسل و شکستگی‌های فرعی ناشی از آن می‌تواند مسیر جریان آب زیرزمینی را تغییر داده و نرخ فرونشست را در محدوده‌های نزدیک به گسل افزایش دهد. داده‌های تداخل‌سنجی راداری با روزه مصنوعی نشان می‌دهند که بخش‌های نزدیک به گسل معمولاً نرخ فرونشست بالاتری نسبت به بخش‌های مرکزی یا دورتر دشت دارند. هم‌راستایی جهت شمال باختر جنوب خاورگسل با ساختار رسوبات دشت موجب می‌شود اثرات گسلی و تمرکز فرونشست به صورت نوارهای خطی موازی با گسل مشاهده شود.

با فاصله به نسبت دورتر از منطقه مورد مطالعه، سامانه گسلی منطقه خوی قرار دارد. این گسل‌ها بیشتر با جهت شمال‌غرب-جنوب‌شرق امتداد یافته‌اند و برخی از آنها دارای جهت شمال-جنوب هستند و طول آنها از چند کیلومتر تا ده‌ها کیلومتر متغیر است. سازوکار حرکتی بیشتر گسل‌های منطقه خوی به صورت امتداد لغز با مولفه شیب‌لغز معکوس می‌باشد. این گسل‌ها در طول تاریخ زمین‌شناسی و دوره‌های اخیر زمین‌لرزه‌زا بوده و قادر به ایجاد

جابجایی‌های ناگهانی سطح زمین هستند. لرزش‌های ناشی از حرکات این گسل‌ها می‌تواند سبب اعمال تغییراتی در نرخ فرونشست در دشت‌های مجاور گردد. داده‌های لرزه‌ای از کاتالوگ زمین‌لرزه‌های مرکز بین‌المللی داده‌های لرزه-ای ۱ در بازه زمانی سال ۱۹۶۵-۲۰۲۴ گردآوری و به‌همراه لایه گسل‌ها و مدل ارتفاع رقومی منطقه در محیط سامانه اطلاعات جغرافیایی ترکیب شدند. شاخص پتانسیل زلزله ۲ محاسبه و نقشه پهنه‌بندی خطر لرزه‌ای تهیه شد. این داده‌ها به‌منظور بررسی همبستگی میان فعالیت‌های تکتونیکی و پدیده فرونشست استفاده شدند (شکل ۴).

بررسی کمی فراوانی آماری زمین‌لرزه‌ها در محدوده مورد مطالعه نشان می‌دهد که از مجموع رخداد‌های اتفاق‌افتاده در محدوده مورد مطالعه، حدود ۵۴٪ زلزله‌ها در بازه بزرگای $M_w = 3.2$ تا ۴٫۰ قرار دارند که بیشترین سهم را به خود اختصاص می‌دهد. زلزله‌های با بزرگای $M_w = 3.0$ تا ۳٫۲ حدود ۱۸٪ از کل رخدادها را تشکیل می‌دهند، درحالی‌که رخداد‌های نسبتاً قوی‌تر با $M_w \geq 4.0$ نیز حدود ۱۸٪ ثبت شده‌اند که بیانگر حضور زلزله‌های متوسط در منطقه است. از نظر مکانی، حدود ۷۲٪ زلزله‌ها یا به‌طور مستقیم بر روی گسل‌های اصلی قرار دارند یا در فاصله نزدیک (کمتر از چند کیلومتر) از آن‌ها رخ داده‌اند و تنها حدود ۲۸٪ در نواحی دورتر از گسل‌ها ثبت شده‌اند. همچنین از نظر پهنه‌بندی لرزه‌ای، بیش از عمده رخدادها در محدوده‌های با پتانسیل زمین‌لرزه زیاد تا بسیار زیاد قرار دارند، درحالی‌که تعداد کمتری از زلزله‌ها در پهنه‌های با خطر متوسط مشاهده می‌شوند. این توزیع آماری نشان می‌دهد که لرزه‌خیزی منطقه به‌شدت تحت تأثیر ساختارهای گسلی فعال بوده و احتمال تداوم رخداد زمین‌لرزه‌های کوچک تا متوسط در آینده بالا است.



شکل ۴) نقشه پتانسیل فعالیت لرزه‌ای به همراه گسل‌های مهم در منطقه، بخش‌های پررنگ مناطق دارای خطر بالای لرزه‌ای را نشان می‌دهد.

تداخل‌سنجی راداری

در این مطالعه، از فن تداخل‌سنجی راداری ماهواره‌ای^۱ برای شناسایی و پایش تغییرات سطحی آهسته مانند فرونشست زمین استفاده شده است. فن تداخل‌سنجی راداری، یکی از پیشرفته‌ترین و دقیق‌ترین روش‌های سنجش-ازدور است که در سال‌های اخیر به‌طور گسترده‌ای توسعه یافته و به‌عنوان روشی کارآمد در زمین‌شناسی، محیط‌زیست و مهندسی کاربرد دارد. این روش بر پایه پردازش داده‌های راداری حاصل از ماهواره‌های مجهز به سیستم رادار با روزه مصنوعی^۲ استوار است که قادر به ارائه اطلاعات سه‌بعدی از سطح زمین با دقت بالا می‌باشد.

در این پژوهش، داده‌های ماهواره سنتینل-۱ به‌عنوان منبع اصلی اطلاعات استفاده شده است سنتینل-۱، ماهواره‌ای فعال متعلق به آژانس فضایی اروپا^۳ است که با استفاده از سنجنده راداری باند سی، تصاویر راداری با قدرت تفکیک حدود ۱۰ متر را در شرایط آب‌وهوایی متنوع و در طول شب و روز ثبت می‌کند. این ماهواره به‌ویژه در حالت اینترفرومتری باند پهن^۴ برای انجام مطالعات تداخل‌سنجی راداری بسیار مناسب است. داده‌های سنتینل-۱ به‌صورت جفت تصاویر^۵ ارائه می‌شوند که شامل اطلاعات دامنه و فاز سیگنال‌های راداری می‌باشند و برای تحلیل‌های تداخل‌سنجی راداری ماهواره‌ای کاربرد دارند.

این مطالعه با وجود ارائه نتایج دقیق و کاربردی در پایش فرونشست، محدودیت‌هایی دارد که باید در تفسیر نتایج مورد توجه قرار گیرد. نخست، پوشش گیاهی متراکم در برخی نواحی می‌تواند باعث کاهش همدوسی سیگنال‌های تداخل‌سنجی راداری با روزه مصنوعی شود و به‌طور موقت دقت اندازه‌گیری جابه‌جایی‌های سطح زمین را کاهش دهد. دوم، تغییرات رطوبت خاک و محتوای آب در لایه‌های سطحی ممکن است بر فاز راداری تأثیرگذار باشد و اثرات جزئی بر تخمین نرخ فرونشست، به‌ویژه در فصول با تغییرات رطوبتی شدید ایجاد کند. سوم، دقت مدل ارتفاع رقومی به‌ویژه در نواحی با ناهمواری‌های کوچک و شیب‌های تند محدود است و می‌تواند بر تصحیح توپوگرافی و به تبع آن بر اینترفروگرام‌ها اثرگذار باشد. چهارم، در این مطالعه به‌دلیل ماهیت محلی و مقیاس محدود دشت سلماس، تصحیحات اتمسفری مبتنی بر مدل‌های جهانی مانند ERA5 یا GACOS اعمال نشده است. این موضوع می‌تواند موجب ورود عدم قطعیت جزئی در تخمین تغییرات سطح زمین شود؛ هرچند انتخاب جفت تصاویر با خط پایه کوتاه، همدوسی بالا و استفاده از فصول خشک تا حد زیادی اثرات اتمسفری را کاهش داده است.

با وجود این محدودیت‌ها، تحلیل‌های انجام‌شده روند کلی فرونشست و تأثیر زمین‌لرزه ۸ بهمن ۱۴۰۱ بر دشت سلماس را به‌صورت معتبر بازتاب می‌دهد و نتایج ارائه‌شده برای شناسایی مناطق آسیب‌پذیر و مدیریت ریسک فرونشست در پهنه‌های لرزه‌خیز قابل اتکا است.

مراحل پردازش داده‌ها

در اولین مرحله به منظور انتخاب تصاویر مناسب و برای کاهش تأثیرات منفی ناشی از شرایط جوی مانند رطوبت و بارش، جفت تصاویر ماهواره‌ای از فصول خشک سال انتخاب شده‌اند. به منظور ارزیابی کیفیت جفت تصاویر، از

1 InSAR

2 Synthetic Aperture Radar (SAR)

3 ESA

4 Interferometric Wide Swath (IW)

5 Single Look Complex

شاخص ضریب همدوسی محاسبه شده^۱ در نرم افزار اسنپ^۲ استفاده شده است که هرچه به عدد یک نزدیک تر باشد، نشان دهنده سازگاری و مناسب بودن تصاویر برای تحلیل تداخل سنجی راداری است.

برای اندازه گیری و ارزیابی فرونشست منطقه دشت سلماس، از ۹ تصویر ماهواره ای سنتینل-۱ استفاده شده است. همه تصاویر در محدوده باند C بوده و با جهت حرکت نزولی ماهواره هم راستا هستند. قطبش تصاویر VV-VH بوده و حالت تصویربرداری ماهواره اینترفرومتری باند پهن می باشد. نوع پردازش تصاویر تصویر تک نمای پیچیده^۳ است. فاصله خط پایه مؤثر بین تصاویر در محدوده ۲۰ تا ۱۵۰ متر قرار دارند که برای حفظ دقت فضایی و کاهش نویز فازی مناسب هستند. با توجه به ۹ تصویر سنتینل-۱، تعداد ۸ اینترفروگرام اصلی ایجاد شده که شامل جفت های قبل و بعد از زلزله ۸ بهمن ۱۴۰۱ می باشند و امکان تحلیل دقیق تغییرات سطح زمین و نرخ فرونشست را فراهم می کنند (جدول ۱).

در این مطالعه، به منظور ارزیابی تغییرات فرونشست قبل و بعد از زمین لرزه ۸ بهمن ۱۴۰۱، از روش های چندزمانه پیشرفته نظیر PS-InSAR یا SBAS استفاده نشده و تحلیل بر پایه اینترفروگرام های حاصل از جفت تصاویر منتخب انجام گرفته است. به منظور کاهش اثرات جوی، راهبرد اصلی پژوهش بر کنترل درون داده ای اثرات اتمسفری استوار بوده است؛ بدین معنا که جفت تصاویر با خط پایه زمانی کوتاه، همدوسی بالا و بیشتر از فصول خشک سال انتخاب شده اند تا تغییرات رطوبت و بخار آب تروپوسفری به حداقل برسد. با توجه به این رویکرد و همچنین ماهیت محلی و مقیاس محدود منطقه مورد مطالعه، استفاده از مدل های تصحیح اتمسفری مبتنی بر داده های بازتحلیل جهانی نظیر ERA5 یا GACOS که دارای تفکیک مکانی در حد چند ده کیلومتر هستند، می تواند خود منجر به ورود عدم قطعیت اضافی در مقیاس دشت سلماس شود. از این رو، به جای اعمال تصحیح های مدل محور، بر انتخاب بهینه جفت تصاویر و ارزیابی ضریب همدوسی تمرکز شده است. این رویکرد در مطالعات مشابه مبتنی بر تداخل سنجی راداری تفاضلی و با بازه زمانی کوتاه نیز به عنوان روشی معتبر برای کاهش اثرات جوی گزارش شده است (لی و همکاران^۴ ۲۰۲۲). بر اساس ویژگی های داده های سنتینل-۱، میزان همدوسی اینترفروگرام ها و مقایسه با مطالعات پیشین مشابه، عدم قطعیت اندازه گیری جابه جایی قائم و نرخ فرونشست در این پژوهش در حدود 3 ± 5 میلی متر در سال برآورد می شود که در تفسیر نتایج لحاظ شده است.

قابل یادآوری است که مشاهدات تداخل سنجی راداری، جابه جایی سطح زمین را در راستای دید سنجنده^۵ اندازه گیری می کنند و این سیگنال می تواند شامل مؤلفه های قائم و افقی باشد. در مناطق لرزه خیز، جابه جایی های افقی ناشی از فعالیت های تکتونیکی ممکن است بر سیگنال LOS تأثیر بگذارند. با این حال، در این مطالعه به دلیل استفاده از داده های یک جهته (مدار نزولی) و تمرکز بر پایش فرونشست تدریجی در محیط آبرفتی کم شیب دشت سلماس و همچنین فاصله دشت سلماس از گسل لرزه زا، فرض شده است که سهم مؤلفه قائم در تغییر شکل غالب است.

برای پردازش اولیه تصاویر ابتدا با استفاده از ابزار اسپلیت^۶، ساب سواس مربوط به منطقه مورد مطالعه انتخاب می شود. سپس با استفاده از داده های اربیت فایل^۷، موقعیت جغرافیایی تصاویر اصلاح شده و دقت مکانی آنها افزایش می یابد.

1 Modeled Coherence

2 Snap

3 SLC (Single Look Complex)

4 Li et al

5 LOS (Line of Sight)

6 Split

7 Orbit File

در ادامه کار به منظور هم‌ترازی تصاویر^۱، تصاویر مرجع^۲ و تابع^۳ به‌گونه‌ای هم‌تراز می‌شوند که هر پیکسل در هر دو تصویر موقعیت مکانی یکسانی را نشان دهد؛ این مرحله ضروری است تا تفاوت فازی ناشی از تغییر موقعیت ژئومتریک کاهش یابد.

جدول (۱) مشخصات تصاویر استفاده برای ارزیابی حرکات پوسته زمین در محدوده مورد مطالعه

باند	پلاریزاسیون	نوع محصول	اینترفروگرام	تاریخ تصویر بعد	تاریخ تصویر قبل	Baseline موثر (متر)
C-Band	VV-VH	SLC	IFG1	2021/07/18	2021/02/12	۴۲
			IFG2	2022/05/14	2021/07/18	۸۵
			IFG3	2022/09/23	2022/05/14	۳۷
			IFG4	2023/01/21	2022/09/23	۵۳
			IFG5	2023/05/21	2023/01/21	۴۸
			IFG6	2023/07/08	2023/05/21	۲۵
			IFG7	2024/05/27	2023/07/08	۱۱۲
			IFG8	2024/06/20	2024/05/27	۲۸

برای ایجاد اینترفروگرام، اختلاف فاز بین دو تصویر رادار روزنه مصنوعی^۴ محاسبه می‌شود. از آنجا که فاز تصاویر تحت تأثیر عوامل مختلفی مانند انحنای زمین، توپوگرافی، شرایط جوی و نویز قرار دارد، فازهای ناشی از مسطح بودن زمین^۵ و توپوگرافی^۶ با استفاده از مدل‌های دقیق ارتفاعی حذف می‌شوند تا فقط تغییرات فاز مربوط به جابه‌جایی سطح زمین باقی بماند. تصاویر رادار روزنه مصنوعی معمولاً با نویزهای مختلفی همراه هستند که دقت تحلیل را کاهش می‌دهد. در این پژوهش، برای کاهش نویز از دستور مالتی لوکینگ^۷ و فیلتر گلدشتاین^۸ استفاده شده است که باعث افزایش وضوح و کیفیت اینترفروگرام می‌شود (شکل ۵الف).

تصاویر SLC ماهواره سنتینل-۱ دارای خطوطی به نام برش^۹ هستند که باید حذف شوند تا تصویر یکپارچه و قابل-تحلیل شود. فاز محاسبه‌شده به‌صورت فاز پیچیده^{۱۰} است که داده‌ها به‌صورت متناوب و محدود به بازه $-\pi$ تا $+\pi$ نمایش داده می‌شوند. برای استخراج تغییرات واقعی فاز، فرآیند باز کردن فاز^{۱۱} انجام می‌شود که فازهای پیچیده را به مقادیر پیوسته و قابل‌تفسیر تبدیل می‌کند. این مرحله برای محاسبه دقیق میزان جابه‌جایی سطح زمین ضروری است (شکل ۵ب).

پس از باز کردن فاز، فازهای پیوسته به مقادیر جابه‌جایی قائم در راستای دید سنجنده^{۱۲} تبدیل می‌شوند که نشان‌دهنده میزان تغییرات ارتفاعی یا نشست زمین است (شکل ۵ج). برای هم‌راستا کردن نقشه جابه‌جایی با سیستم

1 Back Geocoding

2 Master

3 Slave

4 SAR

5 ϕ_{flat}

6 ϕ_{DEM}

7 Multilooking

8 Goldstein

9 Burst

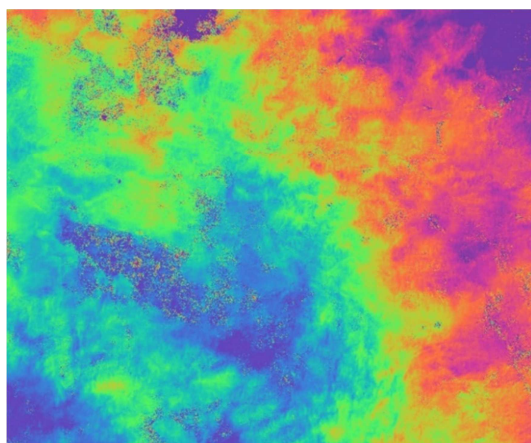
10 Wrapped Phase

11 Unwrapping

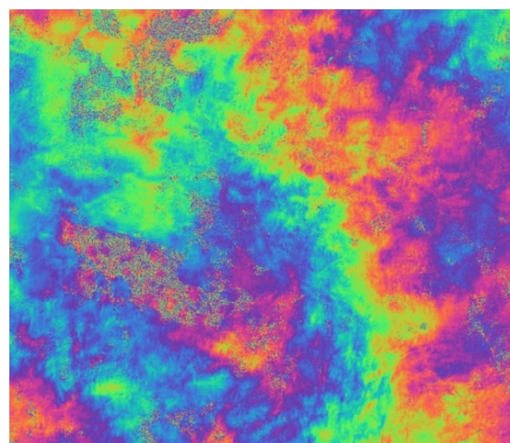
12 Line of Sight

مختصات جغرافیایی و اصلاح خطاهای ناشی از حرکت ماهواره و انحنای زمین، از دستور تصحیح زمین با استفاده از افکت داپلر^۱ استفاده می‌شود (شکل ۵).

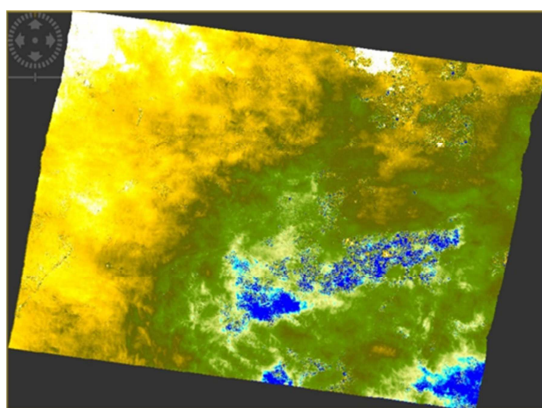
در فرآیند تداخل‌سنجی راداری، انتخاب قطبش مناسب راداری نقش مهمی در دقت داده‌ها دارد. در این مطالعه از قطبش ارسال و دریافت عمودی^۲ استفاده شده است که برای تشخیص جابه‌جایی‌های سطحی ناشی از فرونشست و زلزله مناسب‌تر است. قطبش‌های دیگر مانند ارسال و دریافت افقی^۳، VH و HV نیز کاربردهایی دارند که به‌خصوص در تحلیل پوشش گیاهی و مناطق با ساختار پیچیده به‌کار می‌روند؛ اما برای هدف این پژوهش قطبش VV بهترین نتیجه را به همراه دارد.



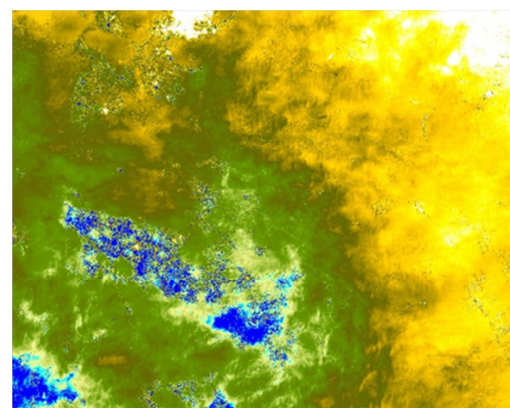
(ب)



(الف)



(د)



(ج)

شکل ۵) الف: تأثیر دستور Goldstein Phase filtering روی اینترفروگرام ب: اینترفروگرام ساخته‌شده بعد از عملیات unwrapping ج: تبدیل اینترفروگرام به نقشه جابه‌جایی د: تأثیر دستور Range-Doppler Terrain Correction روی نقشه جابه‌جایی

1 Range-Doppler Terrain Correction

2 VV

3 HH

یافته‌های پژوهش

در این مطالعه، تغییرات فرونشست زمین در دشت‌های تحت تأثیر برداشت آب‌های زیرزمینی و رخداد زمین‌لرزه ۸ بهمن خوی مورد بررسی قرار گرفت. تحلیل‌های زمانی نشان داد که فرونشست زمین به‌شدت با میزان برداشت آب زیرزمینی ارتباط دارد و الگوهای فصلی در این تغییرات نقش مهمی ایفا می‌کنند. در بازه‌های زمانی مختلف، نرخ فرونشست در فصل برداشت آب بیشتر است، درحالی‌که در فصل سرد کاهش می‌یابد. این الگو نشان‌دهنده تأثیر مستقیم فعالیت‌های انسانی بر پویایی‌های زمین‌سطحی است.

نتایج حاصل از داده‌های تداخل‌سنجی راداری در بازه‌های زمانی کوتاه‌مدت و بلندمدت نشان می‌دهد که روند افزایش فرونشست پس از زمین‌لرزه خوی، با وجود وقوع آن در فصل سرد، به شکل قابل‌توجهی تسریع شده است. این موضوع بیانگر تأثیر مستقیم زمین‌لرزه بر تشدید نشست زمین است و اهمیت توجه به اثرات کوتاه‌مدت بلایای طبیعی بر فرونشست زمین را برجسته می‌کند (جدول ۱).

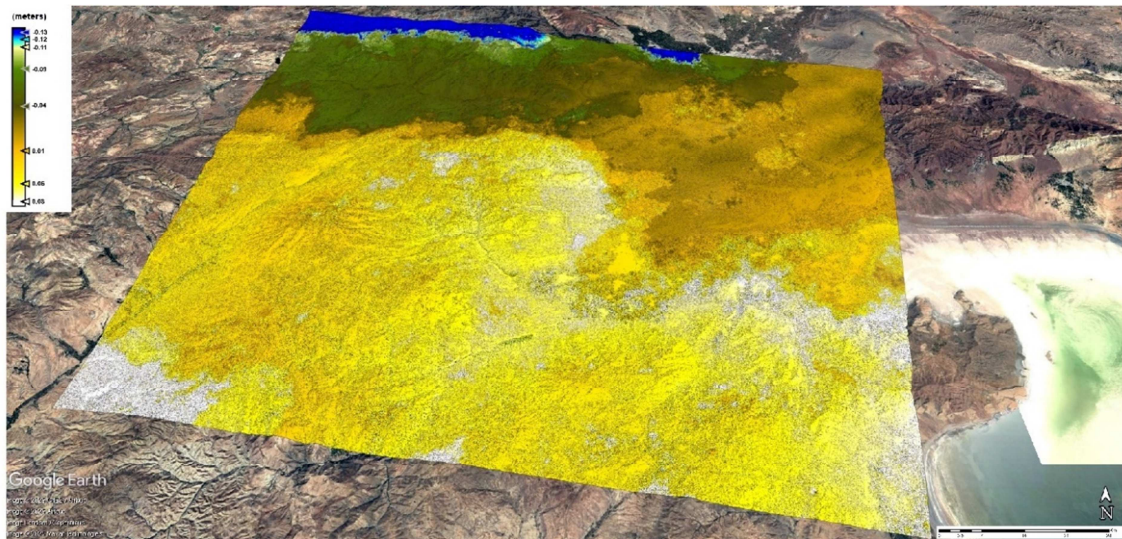
همچنین، نتایج نشان داد که مناطق با برداشت شدید آب زیرزمینی، حساسیت بیشتری نسبت به رخداد‌های زمین‌لرزه دارند و میزان نشست در این مناطق به شکل قابل‌توجهی بالاتر است. این یافته‌ها اهمیت پایش مستمر منابع آب زیرزمینی و ارزیابی خطرات مرتبط با فرونشست زمین، به‌ویژه در مناطق با فعالیت لرزه‌ای، را تأکید می‌کند.

تحلیل زمانی

سال ۲۰۲۱ (ژانویه تا ژوئیه): بیشترین نشست در بخش‌های جنوبی و جنوب شرقی دشت، به‌ویژه روی رسوبات آبرفتی و تراس‌های جوان مشاهده شد. نرخ متوسط سالانه نشست حدود ۵,۲ سانتی‌متر برآورد شد. تحلیل داده‌های ژئومورفولوژیک نشان داد که رسوبات دشت به‌دلیل فشردگی طبیعی، سطح آب زیرزمینی بالا و فعالیت‌های کشاورزی، بیشترین حساسیت را به نشست داشتند. سنگ‌بستر سخت مانند گرانیت‌ها و شیست‌ها به‌طور مستقیم در نشست نقش نداشتند، اما توزیع مکانی جابه‌جایی‌ها را تحت تأثیر قرار دادند.

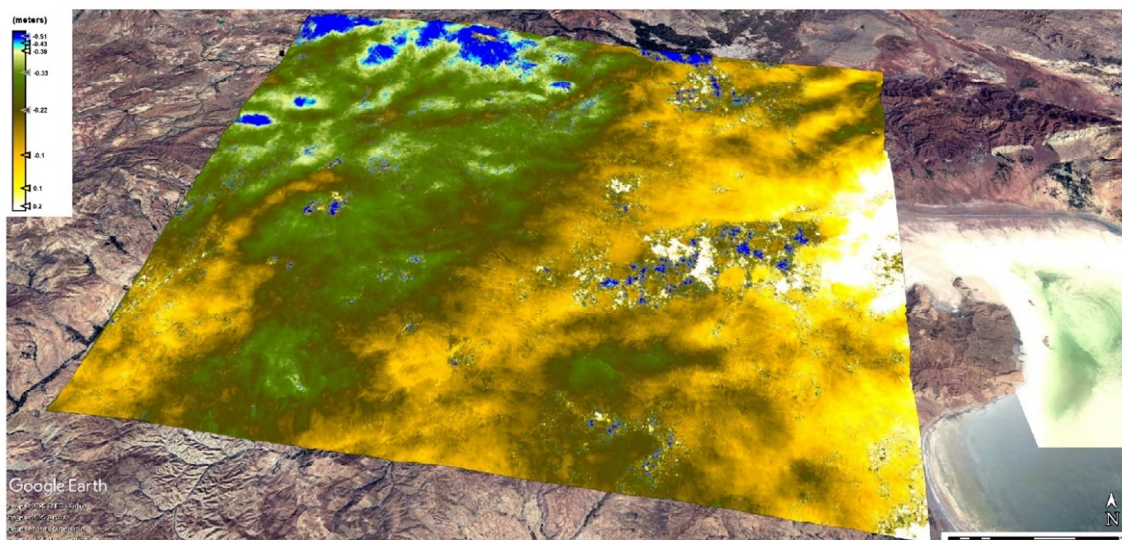
سال ۲۰۲۲ (مه تا سپتامبر): نرخ نشست سالانه کاهش نسبی یافت و به حدود ۴,۶ سانتی‌متر رسید. بیشترین جابه‌جایی در نواحی مرکزی دشت و حاشیه‌های جنوبی دریاچه ارومیه رخ داد. این کاهش می‌تواند به تغییرات فصلی سطح آب، کاهش برداشت آب زیرزمینی و عوامل اقلیمی نسبت داده شود. تحلیل زمانی نشان داد که بخش‌هایی با تراس‌های آبرفتی، خاک‌های ریزدانه و زهکشی کم، حساسیت بالایی دارند و حتی تغییرات جزئی سطح آب می‌تواند نرخ نشست را تحت تأثیر قرار دهد.

پیش از زلزله ۲۰۲۳ (ژانویه تا مه): نرخ نشست در این بازه زمانی به حدود ۱,۵ سانتی‌متر در سال کاهش یافت. کاهش نشست به عوامل فصلی، مانند شارژ طبیعی سفره‌های آب زیرزمینی در زمستان و اوایل بهار و کاهش فعالیت کشاورزی مرتبط است. با این حال، مناطق با خاک‌های کم‌ظرفیت آب و تراس‌های آبرفتی همچنان بیشترین آسیب‌پذیری را نشان دادند (شکل ۶).



شکل ۶) نقشه جابه‌جایی مربوط به سال ۲۰۲۳ (قبل از زمین‌لرزه ۸ بهمن خوی)

پس از زلزله ۲۸ ژانویه ۲۰۲۳ (مه تا ژوئیه): پس از وقوع زلزله، افزایش قابل توجهی در نرخ نشست مشاهده شد و به حدود ۱۴,۷ سانتی‌متر در سال رسید. بیشترین تغییرات در مرکز سلماس، حومه شهر و حاشیه شرقی دریاچه ارومیه ثبت شد. این افزایش سریع، بازتاب اثر مستقیم انرژی زلزله بر رسوبات سطحی و زیرسطحی است و شامل تراکم سریع خاک، افزایش فشار منفذی و ایجاد ترک‌ها و لغزش‌های جزئی در رسوبات ریزدانه می‌باشد. تحلیل مکانی نشان داد که مناطق با شیب کم، رسوبات فشرده و زهکشی ضعیف بیشترین آسیب را تجربه کرده‌اند (شکل ۷).



شکل ۷) نقشه جابه‌جایی مربوط به سال ۲۰۲۳ (بعد از زمین‌لرزه ۸ بهمن ۱۴۰۱ خوی)

سال ۲۰۲۴ (مه تا ژوئن): مشاهدات نشان داد که نرخ نشست نسبت به دوره پس از زلزله کاهش جزئی داشته، اما همچنان بالاتر از نرخ‌های قبل از زلزله باقی مانده است. این روند نشان‌دهنده تثبیت نسبی سفره‌های آب زیرزمینی و

کاهش اثرات لرزه‌ای است؛ اما با توجه به وقوع پس لرزه‌های متعدد در منطقه حساسیت مناطق با رسوبات ریزدانه و نسبت به فرونشست همچنان قابل توجه است.

فرونشست زمین در دشت سلماس، الگوی ناهمگن مکانی از خود نشان می‌دهد که این ناهمگنی به‌طور مستقیم تحت تأثیر تغییرات لیتولوژی، ضخامت و نوع رسوبات آبرفتی، شرایط هیدروژئولوژیکی و نزدیکی به ساختارهای تکتونیکی فعال قرار دارد. نتایج تحلیل داده‌های تداخل‌سنجی راداری نشان می‌دهد که شدت فرونشست در سطح دشت یکنواخت نبوده و بیشترین مقادیر نشست به‌صورت موضعی در نواحی کم‌شیب، دارای رسوبات ریزدانه و تراکم‌پذیر و در بخش‌هایی از دشت که هم‌زمان تحت تأثیر افت شدید سطح آب زیرزمینی و تنش‌های لرزه‌ای قرار گرفته‌اند، رخ داده است. از این‌رو، مقادیر ارائه‌شده در این مطالعه، بیانگر بیشینه نرخ فرونشست مشاهده‌شده در بازه‌های زمانی مورد بررسی هستند و لزوماً نماینده میانگین مکانی کل دشت نمی‌باشند. این بیشینه‌ها به‌ویژه پس از رخداد زمین‌لرزه ۸ بهمن ۱۴۰۱ به‌طور چشمگیری افزایش یافته و نشان‌دهنده واکنش سریع و موضعی رسوبات اشباع به لرزش‌های لرزه‌ای است. چنین رفتاری اهمیت توجه به ناهمگنی مکانی فرونشست در تحلیل مخاطرات زمین‌ساختی و برنامه‌ریزی مدیریت پایدار منابع آب و کاربری زمین در دشت‌های لرزه‌خیز را برجسته می‌کند.

جدول ۲) تغییرات نرخ بیشینه فرونشست در سال‌های مورد بررسی در محدوده مورد مطالعه

سال	نرخ بیشینه فرونشست (سانتی‌متر در سال)	نکات مهم و توضیحات
۲۰۲۱	۵,۲	فرونشست پایدار و نسبتاً بالا
۲۰۲۲	۴,۶	کاهش نسبی اما همچنان بالا
۲۰۲۳ قبل زلزله	۱,۵	کاهش قابل توجه
۲۰۲۳ بعد زلزله	۱۴,۷	افزایش شدید به‌دلیل تأثیر مستقیم زمین‌لرزه بر ساختار زمین
۲۰۲۴	۱۲,۵	کاهش نسبی نسبت به سال قبل اما نرخ بحرانی و توزیع گسترده‌تر فرونشست

عوامل کنترل‌کننده فرونشست

تحلیل داده‌های تداخل‌سنجی راداری و نقشه‌های زمین‌شناسی نشان داد که نشست سطح زمین تحت تأثیر چند عامل اصلی است:

ژئولوژی و لیتولوژی: رسوبات آبرفتی و تراس‌های رودخانه‌ای کم‌سخت و فشرده‌پذیر بیشترین نرخ نشست را دارند، درحالی‌که سنگ‌بستر سخت نقش مستقیم کمی دارد؛ اما شکل‌گیری و توزیع مکانی نشست را کنترل می‌کند. هیدروژئولوژی: برداشت شدید آب زیرزمینی، کاهش سطح ایستابی و تغییر فشار منفذی از عوامل اصلی افزایش نشست هستند.

کاربری زمین: مناطق کشاورزی، تالابی و اراضی با زهکشی ضعیف حساسیت بالاتری نسبت به نشست نشان می‌دهند. ویژگی‌های خاک: خاک‌های ریزدانه، با ظرفیت جذب آب بالا و تراکم‌پذیری زیاد، بیشترین تغییرات سطحی را تجربه می‌کنند.

فعالیت‌های لرزه‌ای و تکتونیکی: زلزله ۲۸ ژانویه ۲۰۲۳ نشان داد که رسوبات سطحی و زیرسطحی حتی در نواحی پایدارتر نیز می‌توانند دچار تغییرات سریع شوند و نقش گسل‌های فعال در تشدید نشست غیرقابل انکار است.

نتایج و بحث

نتایج تحلیل داده‌های تداخل‌سنجی راداری نشان می‌دهد که فرونشست در منطقه مورد مطالعه تحت تأثیر ترکیبی از عوامل زمین‌شناسی، هیدرولوژیکی و زمین‌لرزه‌ای قرار دارد. با بررسی داده‌ها در بازه‌های زمانی مختلف، روندهای مشخصی از فرونشست مشاهده شد که با فصل‌های برداشت آب‌های زیرزمینی ارتباط مستقیم دارد. بیشترین نرخ فرونشست در فصل گرم و برداشت شدید آب‌های زیرزمینی ثبت شد و در فصل سرد، به دلیل کاهش برداشت و افزایش تغذیه سفره‌های آب زیرزمینی، میزان فرونشست کاهش می‌یابد. این موضوع نشان می‌دهد که مدیریت منابع آب زیرزمینی نقش تعیین‌کننده‌ای در کنترل فرونشست دارد.

با توجه به رخداد زمین‌لرزه خوی در فصل سرد، مشاهده شد که نرخ فرونشست افزایش قابل‌توجهی پیدا کرده است که نشان‌دهنده تأثیر مستقیم زلزله بر تغییر شکل سطح زمین است. این افزایش نرخ فرونشست علی‌رغم کاهش برداشت آب‌های زیرزمینی در فصل سرد، تأثیر حرکات تکتونیکی و جابه‌جایی لایه‌های زمین را برجسته می‌کند. بنابراین، ترکیب عوامل انسانی و طبیعی منجر به تغییرات پیچیده در نرخ فرونشست می‌شود.

تحلیل مکانی فرونشست نشان داد که ویژگی‌های زمین‌شناسی و توپوگرافی منطقه نقش مهمی در شدت و پراکندگی فرونشست دارد. مناطق با شیب کمتر و زمین‌های رسوبی، فرونشست بیشتری را تجربه کردند، درحالی‌که شیب‌های تندتر و سنگ‌بسترهای مقاوم‌تر نرخ فرونشست پایین‌تری دارند. علاوه بر این، جهت شیب و ساختار گسل‌های منطقه نیز بر پراکندگی فرونشست تأثیر دارد؛ به‌طوری‌که فرونشست در جهت گسله‌های فعال و در امتداد روندهای رسوبی غالب بیشتر است.

نتایج کمی نشان می‌دهد که متوسط نرخ فرونشست در بازه زمانی یک سال حدود ۴ میلی‌متر در ماه است که در فصل سرد به‌علت کم شدن برداشت کاهش می‌یابد. این مقادیر به وضوح ارتباط بین مدیریت منابع آب نرخ فرونشست را نشان می‌دهد؛ اما نکته قابل‌توجه آن است که حفره‌های خالی‌شده از آب که در حالت ایستا پایدار هست، در اثر لرزش‌های ناشی از زمین‌لرزه فرو ریخته و می‌تواند به‌صورت ناگهانی به بیش از ۴ برابر مقدار میانگین سالانه افزایش دهد و موجب ایجاد خسارت به سازه‌ها و زمین‌های کشاورزی گردد.

نتایج این مطالعه در زمینه فرونشست دشت سلماس با استفاده از داده‌های تداخل‌سنجی راداری و تحلیل زمانی با مطالعات پیشین در این منطقه و سایر دشت‌های شمال‌غرب ایران همخوانی دارد و در عین حال اطلاعات جدید و مهمی ارائه می‌کند. یافته‌ها نشان می‌دهد که میانگین نرخ فرونشست در سال‌های ۲۰۲۱ و ۲۰۲۲ (حدود ۵٫۲ و ۴٫۶ سانتی‌متر در سال) با گزارش‌های پیشین در دشت سلماس که نرخ سالانه فرونشست را حدود ۵ سانتی‌متر برآورد کرده‌اند (شهبازی و همکاران ۲۰۲۲)^۱، مطابقت دارد و اثر بلندمدت برداشت آب‌های زیرزمینی بر نشست زمین را نشان می‌دهد. با این حال، تحلیل پس از زمین‌لرزه ۸ بهمن ۱۴۰۱ نشان داد که نرخ فرونشست به حدود ۱۴٫۷ سانتی‌متر در سال افزایش یافته است؛ رقمی که به‌طور قابل‌توجهی بالاتر از نرخ‌های گزارش‌شده در مطالعات قبلی است و تأثیر مستقیم فعالیت لرزه‌ای بر تغییرات سطح زمین را برجسته می‌کند. علاوه بر مطالعه‌هایی که بر فرونشست تدریجی ناشی از افت آب زیرزمینی تمرکز داشته‌اند، سایر تحقیقات مبتنی بر تداخل‌سنجی راداری در دشت‌های شمال‌غرب ایران، مانند ارزیابی فرونشست دشت اردبیل، نیز نشان‌دهنده فرونشست قابل‌توجه ناشی از کاهش سطح آب و شرایط اقلیمی هستند و اهمیت بررسی ترکیبی عوامل هیدرولوژیکی و زمین‌ساختی را تأکید

می‌کنند. تحلیل مکانی این پژوهش نشان داد که الگوی فرونشست با ویژگی‌های زمین‌شناسی، رسوبات نرم آبرفتی و نزدیکی به گسل‌های فعال هم‌راستا است؛ مشابه آنچه در مطالعات دیگر دشت‌های ایران با فن تداخل‌سنجی راداری مشاهده شده است. بنابراین، داده‌های این مطالعه نه تنها نتایج قبلی را تأیید می‌کنند، بلکه اثرات کوتاه‌مدت زمین‌لرزه در تشدید فرونشست را به‌صورت کمی نشان داده و اهمیت ترکیب داده‌های ماهواره‌ای با داده‌های زمین‌شناسی و هیدرولوژیکی برای مدیریت پایدار منابع آب و کاهش مخاطرات زمین‌ساختی را برجسته می‌سازند.

نتایج این مطالعه دارای کاربردهای مهمی در مدیریت زمین و منابع آب در مناطق لرزه‌خیز است. با استفاده از داده‌های تداخل‌سنجی راداری می‌توان مناطق حساس به فرونشست را با دقت میلی‌متری شناسایی کرد و نقش ترکیبی عوامل انسانی، از جمله برداشت بی‌رویه آب‌های زیرزمینی و عوامل لرزه‌ای در ایجاد تغییرات سطح زمین را تحلیل نمود. این اطلاعات می‌تواند به برنامه‌ریزی مدیریت پایدار منابع آب، پیش‌بینی و کاهش ریسک‌های زیربنایی و شهری و طراحی سازوکارهای حفاظتی در برابر فرونشست کمک کند. علاوه بر این، ادغام داده‌های تداخل‌سنجی راداری با مدل‌های هیدروژئولوژیکی و مشاهدات سامانه موقعیت‌یاب جهانی^۱ امکان بهبود پیش‌بینی روند فرونشست و ارائه راه‌کارهای مدیریت هوشمندانه برای کاهش خطرات ناشی از تغییرات ناگهانی سطح زمین در دشت سلماس و سایر مناطق مشابه را فراهم می‌سازد.

نتیجه‌گیری

دشت سلماس در بازه زمانی ۲۰۲۱ تا ۲۰۲۴ نوسانات قابل‌توجهی در نرخ نشست نشان داده است که ناشی از ترکیب عوامل طبیعی، انسانی و لرزه‌ای می‌باشد؛ به‌طوری‌که نرخ فرونشست در دوره‌های برداشت شدید آب‌های زیرزمینی به حدود ۴٫۶ تا ۵٫۲ سانتی‌متر در سال رسیده و در دوره‌های کاهش برداشت و تغذیه طبیعی آبخوان به حدود ۱٫۵ سانتی‌متر در سال کاهش یافته است.

داده‌های تداخل‌سنجی راداری امکان تحلیل میلی‌متری تغییرات سطح زمین و شناسایی کمّی مناطق آسیب‌پذیر را فراهم کرده و نشان می‌دهد که فرونشست در سطح دشت به‌صورت ناهمگن توزیع شده و بیشینه مقادیر آن تحت تأثیر عواملی چون تغییرات لیتولوژی، ضخامت و نوع رسوبات آبرفتی، شرایط هیدروژئولوژیکی و نزدیکی به ساختارهای تکتونیکی فعال قرار دارد.

رخداد زمین‌لرزه ژانویه-فوریه ۲۰۲۳ موجب افزایش ناگهانی و شدید فرونشست تا بیش از ۱۴٫۷ سانتی‌متر در سال شد که این مقدار بیش از سه برابر نرخ فرونشست در دوره‌های غیرلرزه‌ای بوده و حساسیت بالای رسوبات ریزدانه، اشباع و کم‌شیب را به تحریک‌های لرزه‌ای برجسته می‌کند.

بر این اساس، مدیریت منابع آب زیرزمینی از طریق کنترل برداشتها و جلوگیری از افت‌های شدید سطح ایستابی، می‌تواند به‌صورت مستقیم موجب کاهش نرخ پایه فرونشست و محدود شدن دامنه افزایش ناگهانی نشست ناشی از رخدادهای لرزه‌ای گردد؛ موضوعی که به‌طور کمّی در نتایج این مطالعه قابل‌مشاهده است.

^۱ GPS

در نهایت، نتایج نشان می‌دهد که مناطقی با پتانسیل فرونشست بالا، در صورت وقوع لرزش‌های لرزه‌ای، مستعد بروز فرونشست ناگهانی و چندین برابر نرخ متوسط سالانه هستند که این موضوع لزوم توجه هم‌زمان به مدیریت آبخوان و مخاطرات لرزه‌ای را دوچندان می‌کند.

تقدیر و تشکر (حمایت مالی یا معنوی سازمانی)

این پژوهش در قالب پایان‌نامه کارشناسی ارشد در دانشگاه ارومیه انجام شده است. نویسندگان مراتب تشکر و قدردانی خود را از معاونت پژوهش و فناوری دانشگاه ارومیه به جهت زمینه‌سازی انجام این پژوهش اعلام می‌دارند.

منابع

- فرزین‌کیا، ربابه؛ زنگنه‌اسدی، محمدعلی؛ امیراحمدی، ابوالقاسم؛ زندی، رحمان. (۱۳۹۸). فعالیت‌های تکتونیکی و تأثیر آن در فرونشست زمین در حوضه آبریز دشت جوبین: هیدروژئومورفولوژی. هیدروژئومورفولوژی، ۶(۲۰)، صص: ۱۶۵-۱۸۵.
- شفیعی، نجمه؛ مختاری، لیلاگلی؛ امیراحمدی، ابوالقاسم؛ زندی، رحمان. (۱۴۰۰). بررسی فرونشست آبخوان دشت نورآباد با استفاده از روش تداخل‌سنجی راداری. ژورنال ژئومورفولوژی و محیط‌زیست ایران، مقاله پژوهشی. <https://doi.org/10.22034/gmpj.2020.106424>.
- رجبی، معصومه؛ روستایی، شهرام؛ مطاعی، سارا. (۱۴۰۲). ارزیابی سری زمانی فرونشست زمین در دشت کرمانشاه با استفاده از تکنیک InSAR. پژوهش‌های جغرافیای طبیعی، ۵۵(۱)، صص: ۱۹-۳۷.
- امیراحمدی، ابوالقاسم؛ شفیعی، نجمه؛ زندی، رحمان. (۱۴۰۰). تحلیل ارتباط افت سطح آب زیرزمینی و فرونشست زمین با استفاده از مدل‌های فضایی: مطالعه موردی آبخوان نورآباد ممسنی. نشریه جغرافیا و برنامه‌ریزی، ۲۵(۷۶)، صص: ۱۵۹-۱۷۱.
- Behyari, M., et al. (2018). "Structural control on the Salmas geothermal region, northwest Iran, from fractal analysis and paleostress data." *Acta Geologica Sinica-English Edition* 92(5): 1728-1738. DOI: 10.1111/1755-6724.13673
- Berberian, M. and J. Tchalenko (1976). "Field study and documentation of the 1930 Salmas (Shahpur-Azarbaidjan) earthquake." *Geol. Surv. Iran* 39: 271-342.
- Dehghani, M., et al. (2009). "InSAR monitoring of progressive land subsidence in Neyshabour, northeast Iran." *Geophysical Journal International* 178(1): 47-56. DOI: 10.1111/j.1365-246x.2009.04135.x
- Hejmanowski, R., et al. (2019). "An analysis applying InSAR of subsidence caused by nearby mining-induced earthquakes." *Geosciences* 9(12): 490. DOI: 10.3390/geosciences9120490
- Herrera-García, G., et al. (2021). "Mapping the global threat of land subsidence." *Science* 371(6524): 34-36. DOI: 10.4211/hs.dc7c5bfb3a86479b889d3b30ab0e4ef7
- Imakiire, T. and M. Koarai (2012). "Wide-area land subsidence caused by the 2011 off the Pacific Coast of Tohoku Earthquake." *Soils and Foundations* 52(5): 842-855. DOI: 10.1016/j.sandf.2012.11.007
- Khodabandeh, A., et al. (2002). "Geological map of Iran, 1: 100,000 series sheet Salmas." *Geological Survey of Iran*, Tehran.
- Li, X., Wang, X., and Chen, Y., 2022, InSAR atmospheric delay correction model integrated from multi-source data based on VCE: Remote Sensing, v. 14, no. 17, p. 4329.
- Malik, K., et al. (2022). "Estimation of ground subsidence of New Delhi, India using PS-InSAR technique and Multi-sensor Radar data." *Advances in Space Research* 69(4): 1863-1882. DOI: 10.1016/j.asr.2021.08.032
- Massonnet, D. and K. L. Feigl (1998). "Radar interferometry and its application to changes in the Earth's surface." *Reviews of Geophysics* 36(4): 441-500. DOI: 10.1029/97rg03139
- Prestininzi, A. and R. Romeo (2000). "Earthquake-induced ground failures in Italy." *Engineering Geology* 58(3-4): 387-397. DOI: 10.1016/s0013-7952(00)00044-2
- Samieie-Esfahany, S., et al. (2010). On the effect of horizontal deformation on InSAR subsidence estimates. Fringe 2009, Proceedings of the workshop held 30 November-4 December 2009, in Frascati, Italy. Edited by H. Lacoste. ESA-SP Vol. 677. ISBN: 978-92-9221-241-4, 2010, id. 39.
- Sedighi, M., et al. (2010). "Subsidence detection in Salmas area using InSAR and geodetic techniques." *Geospatial Eng J* 1(4): 25-33.
- Shahbazi, S., et al. (2022). "Constraints on the hydrogeological properties and land subsidence through GNSS and InSAR measurements and well data in Salmas plain, northwest of Urmia Lake, Iran." *Hydrogeology Journal* 30(2): 533-555. DOI: 10.1007/s10040-021-02416-x
- Solano-Rojas, D., et al. (2020). "Remotely triggered subsidence acceleration in Mexico City induced by the September 2017 M w 7.1 Puebla and the M w 8.2 Tehuantepec September 2017 earthquakes." *Proceedings of the International Association of Hydrological Sciences* 382: 683-687. DOI: 10.5194/piahs-382-683-2020

- Taghipour, K., et al. (2018). "Evidence for distributed active strike-slip faulting in NW Iran: The Maragheh and Salmas fault zones." *Tectonophysics* **742**: 15-33. DOI: 10.1016/j.tecto.2018.05.022
- Wu, P. C., et al. (2022). "Subsidence in coastal cities throughout the world observed by InSAR." *Geophysical Research Letters* **49**(7): e2022GL098477. DOI: 10.1029/2022gl098477
- Zhang, Z., et al. (2023). "Monitoring and analysis of ground subsidence in Shanghai based on PS-InSAR and SBAS-InSAR technologies." *Scientific Reports* **13**(1): 8031. DOI: 10.22541/au.166831755.54665841/v1.