



OPEN ACCESS

Kharazmi Journal of Earth Sciences

Journal homepage <https://gnf.khu.ac.ir>

Separating hydrogeological subsidence from mining-induced surface deformation in the Gol-e-Gohar region using SBAS-InSAR

Reza Jahanshahi^{1,2*}

1. School of Geology, College of Science, University of Tehran, Tehran, Iran.

2. Department of Geology, Faculty of Science, University of Sistan and Baluchestan, Zahedan, Iran.

Article info

Article type

Research Article

Article history

Received: 7 February 2025

Accepted: 7 April 2026

Keywords:

Groundwater; Remote Sensing; Land Subsidence, SBAS-InSAR



Abstract

This study aims to monitor and distinguish the origin of ground surface elevation changes in the Gol-e-Gohar mining area using a time-series analysis of 16 Sentinel-1 SAR images acquired between 2017 and 2025, applying the SBAS-InSAR technique. The results reveal that the highest magnitude of surface lowering occurs within mining pit areas, with rates exceeding 300 mm/year, primarily driven by excavation activities, artificial topographic modifications, and mechanical processes, and therefore not representative of true aquifer-related subsidence. In contrast, regional and continuous land subsidence is observed in the Chah-Deraz Plain, with an average rate of approximately 10 mm/year, and in the agricultural lands east of the Sirjan salt flat, with an average rate of about 7 mm/year. These lower but spatially coherent subsidence patterns are consistent with long-term groundwater level decline. The Sirjan salt flat exhibits complex surface deformation behavior influenced by processes such as evaporite dissolution and moisture variations, which may produce signals similar to subsidence. The findings demonstrate that failure to differentiate mining-induced deformation from hydrogeological subsidence may lead to significant overestimation of subsidence hazards. This study highlights the necessity of a source-based, differentiated interpretation framework for accurate hazard assessment, sustainable groundwater management, and informed decision-making in mining regions.

Introduction

Land subsidence is a geomorphological phenomenon characterized by gradual or sudden downward displacement of the ground surface, commonly associated with groundwater overexploitation, mining activities, sediment compaction, and dissolution processes in evaporitic environments. In arid and semi-arid regions, excessive groundwater withdrawal has become one of the most critical drivers of regional land subsidence, leading to irreversible aquifer compaction, infrastructure damage, and environmental degradation (Raspini et al., 2022). However, in mining districts, surface elevation changes may reflect a combination of true subsidence processes and localized anthropogenic modifications, such as excavation, pit slope adjustment, blasting-induced compaction, waste dumping, and artificial topographic alterations.

The Gol-e-Gohar mining area, located in south-central Iran, is one of the largest iron ore mining districts in the country and has experienced extensive open-pit mining, large-scale groundwater drainage, and rapid industrial development during the past two decades. Continuous dewatering of mine pits,

combined with intensive groundwater abstraction for agricultural purposes in surrounding plains, has raised concerns regarding the occurrence, magnitude, and spatial distribution of land subsidence in the region. At the same time, observed surface lowering within mining pits may not necessarily represent hydrogeological subsidence but rather localized surface deformation induced by mining operations.

Interferometric Synthetic Aperture Radar (InSAR) techniques provide a powerful means for monitoring ground deformation over large areas with high spatial resolution and temporal continuity (Fadhillah et al., 2024). Among various InSAR approaches, the Small Baseline Subset (SBAS-InSAR) method is particularly suitable for long-term deformation analysis in heterogeneous terrains, as it reduces temporal and spatial decorrelation effects and mitigates atmospheric disturbances. This study aims to evaluate surface elevation changes and land subsidence patterns in the Gol-e-Gohar mining region using multi-temporal Sentinel-1 SBAS-InSAR data, with a specific focus on distinguishing true groundwater-induced subsidence from mining-related and salt-flat-related

DOI <http://doi.org/10.22034/KJES.2026.12.1.107682>*Corresponding author: Reza Jahanshahi; E-mail: rezajahanshahi@ut.ac.ir

How to cite this article: Jahanshahi, R., 2026. Separating hydrogeological subsidence from mining-induced surface deformation in the Gol-e-Gohar region using SBAS-InSAR. Kharazmi Journal of Earth Sciences 12(1), 1- 16. <http://doi.org/10.22034/KJES.2026.12.1.107682>



surface deformation. Such differentiation is essential for reliable hazard assessment, sustainable groundwater management, and informed infrastructure planning in mining environments.

Materials and Methods

This study employed a multi-temporal SBAS-InSAR approach to quantify ground surface deformation in the Gol-e-Gohar mining district and adjacent plains. A dataset consisting of 16 Sentinel-1A/B Synthetic Aperture Radar (SAR) images acquired in descending orbit mode between May 22, 2017, and April 22, 2025, was obtained from the Alaska Satellite Facility data archive. Sentinel-1 imagery was selected due to its consistent acquisition geometry, short revisit time, and proven capability for deformation monitoring in arid and semi-arid regions.

Interferometric processing was conducted by constructing a network of interferograms based on predefined temporal and perpendicular baseline thresholds to ensure high coherence and reliable phase information. A connection graph was established to optimize redundancy within the interferometric network. Ground Control Points (GCPs) were incorporated to improve orbital precision and reduce long-wavelength phase errors.

Topographic phase components were removed using a digital elevation model, followed by adaptive filtering to suppress noise and atmospheric artifacts. Phase unwrapping was applied to retrieve continuous deformation signals, and residual atmospheric, orbital, and noise components were minimized through time-series inversion. The resulting deformation rates were geocoded and converted into annual vertical displacement maps expressed in millimeters per year.

To interpret deformation mechanisms, InSAR-derived results were integrated with geological, geomorphological, hydrogeological, and land-use information. Particular emphasis was placed on differentiating deformation signals associated with active mining pits, salt flats, agricultural lands, and natural alluvial deposits, allowing for a comprehensive assessment of deformation sources.

Results and Discussion

The SBAS-InSAR analysis revealed pronounced spatial heterogeneity in surface deformation across the Gol-e-Gohar region. High-magnitude negative elevation changes, locally exceeding 300 mm/year, were primarily detected within and adjacent to active open-pit mines. These extreme deformation rates are mainly attributed to excavation activities, waste dumping, blasting-induced compaction, and artificial topographic modification, rather than true subsidence related to aquifer compaction.

In contrast, surrounding alluvial plains, particularly Dasht-e Daraz Chah and the eastern agricultural plain, exhibited lower but spatially coherent subsidence rates typically ranging from 10 to 50 mm/year. These deformation patterns are continuous over time and extend across broad areas, consistent with land

subsidence driven by long-term groundwater level decline and gradual sediment compaction. The spatial continuity and temporal persistence of these signals strongly support a hydrogeological origin.

Salt flats within the study area displayed complex deformation signatures characterized by moderate subsidence rates and localized surface changes. In these environments, surface elevation variations may result from a combination of groundwater extraction, evaporite dissolution, salt erosion, sediment redistribution, and episodic surface processes. Without careful interpretation, such signals could be misidentified as groundwater-induced subsidence, highlighting the necessity of integrating geological context into InSAR-based analyses.

Time-series analysis indicated a generally increasing subsidence trend in agricultural plains over recent years, coinciding with intensified groundwater abstraction for irrigation. Deformation curves exhibited smooth, progressive behavior with limited short-term fluctuations, suggesting dominance of long-term hydrogeological controls rather than transient surface loading or climatic effects. These findings demonstrate that interpreting the entire Gol-e-Gohar area as a uniform subsidence zone would lead to substantial overestimation of subsidence hazards and potentially misleading management decisions.

Conclusions

This study demonstrates that surface elevation changes in the Gol-e-Gohar mining district are governed by multiple deformation mechanisms, including true groundwater-induced subsidence, mining-related surface modification, and salt-flat processes. SBAS-InSAR analysis confirms that severe surface lowering within mining pits does not represent regional land subsidence and should not be directly interpreted as an indicator of aquifer instability.

In contrast, moderate but spatially continuous subsidence in surrounding agricultural and alluvial plains is closely linked to sustained groundwater level decline and progressive sediment compaction. Accurate differentiation between deformation mechanisms is therefore essential for reliable hazard zonation, infrastructure planning, and sustainable groundwater management.

The integrated SBAS-InSAR and geological interpretation framework presented in this study provides a robust basis for deformation monitoring in complex mining environments. The results emphasize that InSAR-derived deformation maps must be interpreted contextually to avoid misclassification of anthropogenic surface changes as true subsidence. This approach offers valuable insights for environmental management, risk mitigation, and long-term planning in arid and semi-arid mining regions.

References

Raspini, F., Caleca, F., Soldato M.D., Festa, D., Confuorto, P., Bianchini, S., 2022. Review of satellite radar interferometry for subsidence analysis. *Earth-Science Reviews* 234, 104245.

Fadhillah, M. F., Wahyu, L.H., Lee, S., Lee, K., Lee, S., Chae, S., Lee, H., Lee, C., 2024. Multitemporal analysis of land subsidence

induced by mining using ICOPS (PS+DS) InSAR time series. *Scientific Reports* 14, 56347.

CRedit authorship contribution statement**Reza Jahanshahi**

Conceptualization, Methodology
Software, Validation, Formal analysis
Investigation, Resources, Data Curation
Writing - Original Draft, Writing - Review & Editing
Supervision, Project administration
Funding acquisition



دسترسی آزاد

نشریه علوم زمین خوارزمی

Journal homepage <https://gnf.khu.ac.ir>

تفکیک فرونشست هیدروژئولوژیکی از تغییرشکل‌های سطحی ناشی از معدن‌کاری در منطقه گل‌گهر با استفاده از روش SBAS-InSAR

رضا جهانشاهی*^{۱،۲}

۱. دانشکده زمین‌شناسی، دانشکده‌گان علوم، دانشگاه تهران، تهران، ایران

۲. گروه زمین‌شناسی، دانشکده علوم، دانشگاه سیستان و بلوچستان، زاهدان، ایران

چکیده

اطلاعات مقاله

این مطالعه با هدف پایش و تفکیک منشأ تغییرات ارتفاع سطح زمین در محدوده معدنی گل‌گهر، با استفاده از تحلیل سری زمانی ۱۶ تصویر ماهواره‌ای Sentinel-1 در بازه زمانی سال ۲۰۱۷ تا ۲۰۲۵ و به‌کارگیری روش SBAS-InSAR انجام شد. نتایج نشان می‌دهد که بیشینه کاهش ارتفاع سطح زمین در محدوده پیت‌های معدنی با نرخ‌هایی بیش از ۳۰۰ میلی‌متر در سال رخ می‌دهد که بیشتر ناشی از فعالیت‌های استخراجی، تغییرات مصنوعی توپوگرافی و فرآیندهای مکانیکی است و بیانگر فرونشست واقعی آبخواری نیست. در مقابل، فرونشست واقعی و منطقه‌ای با الگوی پیوسته و گسترده در دشت چاه‌دراز با متوسط نرخ حدود ۱۰ میلی‌متر در سال و در اراضی کشاورزی شرق کفه نمکی با متوسط حدود ۷ میلی‌متر در سال مشاهده می‌شود که با افت تدریجی سطح آب زیرزمینی سازگار است. همچنین، کفه نمکی سیرجان رفتار پیچیده‌ای از تغییرات سطحی را نشان می‌دهد که ناشی از ترکیب فرآیندهایی مانند انحلال نمک و تغییرات رطوبتی است. نتایج این پژوهش نشان می‌دهد که عدم تفکیک بین تغییرشکل‌های ناشی از معدن‌کاری و فرونشست هیدروژئولوژیکی می‌تواند منجر به برآوردهای نادرست از مخاطرات شود. این مطالعه بر ضرورت تحلیل تفکیکی و مبتنی بر منشأ تغییر شکل برای مدیریت صحیح منابع آب زیرزمینی و ارزیابی مخاطرات در مناطق معدنی تأکید دارد.

نوع مقاله

مقاله پژوهشی

تاریخچه مقاله

دریافت: ۱۴۰۴/۱۱/۱۸

پذیرش: ۱۴۰۵/۰۱/۱۸

واژه‌های کلیدی:

آب زیرزمینی، سنجش از دور، فرونشست زمین، SBAS-InSAR



مقدمه

اطلاعاتی در مورد آسیب‌های مرتبط با این پدیده و اثرات اقتصادی آن ارائه دهد. از میان کلیه روش‌های زمین‌ی و ماهواره‌ای، روش سنجش‌از‌دور مبتنی بر تداخل‌سنجی راداری کاراترین روش در شناسایی مناطق تحت تأثیر جابجایی و اندازه‌گیری نرخ جابجایی در پوشش وسیع، قدرت تفکیک مکانی بالا می‌باشد. در این روش به کمک دو تصویر ماهواره‌ای راداری مقدار جابجایی سطح زمین که در بازه زمانی دو تصویر رخ داده است اندازه‌گیری می‌شود.

فرونشست ناشی از استخراج زیرزمینی به دلیل تغییرات در رژیم تنش-کرنش و تخلیه آبخوان‌ها می‌تواند مشکلاتی همچون تخریب زیرساخت‌ها، کاهش پایداری دامنه‌ها و افت کیفیت محیط‌زیست ایجاد کند (Raspini et al., 2022). پایش ماهواره‌ای با InSAR در پنج سال اخیر به ابزاری عملیاتی برای رصد تغییرشکل‌های میلی‌متری در نواحی معدنی تبدیل شده و با استفاده

فرونشست زمین به عنوان پدیده‌ای مورفولوژیک، نوعی از تغییر شکل سطح زمین است که با دگرشکلی عمودی و یا حرکت رو به پایین سطح زمین و همچنین نشست تدریجی مواد سطحی همراه است. به عبارتی دیگر پدیده فرونشست زمین شامل فروریزش یا نشست رو به پائین سطح زمین است که می‌تواند دارای بردار جابجایی افقی اندک باشد. این حرکت از نظر شدت، وسعت و میزان مناطق درگیر، محدود نمی‌باشد و در اثر عوامل خارجی از حد بهره‌برداری بیش از حد از منابع زیرزمینی ایجاد می‌شود. استخراج بیش از حد از آب‌های زیرزمینی باعث کاهش سطح آب و افزایش تنش فشاری روی ساختمان آبخوان شده و منجر به فرونشست زمین می‌شود. در نتیجه، نقشه‌برداری از پوشش مکانی و نظارت بر تکامل زمانی فرونشست زمین می‌تواند

DOI <http://doi.org/10.22034/KJES.2026.12.1.107682>

*نویسنده مسئول: رضا جهانشاهی rezajahanshahi@ut.ac.ir

استناد به این مقاله: جهانشاهی، ر. (۱۴۰۵). تفکیک فرونشست هیدروژئولوژیکی از تغییرشکل‌های سطحی ناشی از معدن‌کاری در منطقه گل‌گهر با استفاده از روش SBAS-InSAR. مجله علوم

زمین خوارزمی، جلد ۱۲، شماره ۱، صفحه ۱ تا ۱۶. <http://doi.org/10.22034/KJES.2026.12.1.107682>

۱/۵ میلیون متر مکعب، از پیت معدن ۲ حدود ۰/۵ میلیون متر مکعب، از پیت معدن ۳ حدوداً ۳/۷ میلیون متر مکعب، از پیت معدن ۴ حدوداً ۰/۱۵ میلیون متر مکعب و از پیت معدن ۵ حدوداً ۰/۸ میلیون متر مکعب) از آب زیرزمینی در مساحتی حدود ۲۰ کیلومتر مربع برداشت می‌شود که بطور میانگین آفتی برابر با حدود ۰/۳۳ متر در سال در سطح ایستایی ایجاد می‌شود. در خوش‌بینانه‌ترین حالت در ۲۰ سال گذشته بطور متوسط حدوداً ۶ متر افت سطح ایستایی رخ داده است و لذا می‌تواند پتانسیل ایجاد فرونشست را فراهم آورد. همچنین در حین خاک‌برداری و استخراج ماده معدنی از معادن موجود، تنش حاصل از انفجارات انجام شده، ممکن است سبب تراکم و کاهش تخلخل ذرات آبرفت و حتی سنگ بستر در منطقه شود و این خود پتانسیل فرونشست را افزایش خواهد داد. در کنار موارد گفته شده، سازه‌های عظیم موجود در طرح توسعه در منطقه، احتمال فرونشست از وزن روباره را نیز بالا می‌برد. بنابراین در این پژوهش در راستای شناسایی وجود یا عدم وجود فرونشست زمین در منطقه معدنی گل گهر مطالعه اولیه در خصوص تعیین نرخ سالیانه و پهنه‌بندی میزان فرونشست از طریق تکنیک تداخل سنجی راداری در منطقه انجام گردید.

مواد و روش‌ها

در این تحقیق پهنه‌بندی پدیده تغییرات ارتفاع سطح زمین در محدوده معدنی گل گهر، با استفاده از تحلیل سری زمانی تصاویر ماهواره‌ای Sentinel-1 و روش SBAS-InSAR انجام شده است. بدین منظور، ۱۶ تصویر ماهواره‌ای سنتینل-۱ مربوط به بازه زمانی ۲۲ می ۲۰۱۷ تا ۲۲ آوریل ۲۰۲۵ از پایگاه داده ASF دانلود و یک تصویر به‌عنوان پایه و سایر تصاویر به‌عنوان پیرو انتخاب گردید.

یکی از پارامترهای کلیدی در هندسه تداخل سنجی راداری، خط مبنا بوده که ساختار ارتباطی تصاویر در قالب نمودار ارتباطی (Connection Graph) تعریف می‌شود؛ بنابراین برای انجام پردازش اینترفروگرام‌ها و محاسبه نرخ تغییرات سطح زمین، خطوط مبنای مکانی و زمانی تعیین شدند (اشکال ۱ و ۲). همچنین نقاط کنترل زمینی (GCP) از روی تصاویر استخراج گردید. فاز تداخل‌نگار شامل مؤلفه‌های مختلفی از جمله تغییر شکل، توپوگرافی، اثرات اتمسفری، خطاهای مداری و نویز است که به‌صورت رابطه زیر بیان می‌شود:

$$\phi_{\text{int}} = \phi_{\text{def}} + \phi_{\text{topo}} + \phi_{\text{atm}} + \phi_{\text{orb}} + \phi_{\text{noise}} \quad (1)$$

که در آن ϕ_{def} بیانگر فاز ناشی از تغییر شکل سطح زمین، ϕ_{topo} مؤلفه توپوگرافی، ϕ_{atm} نشان‌دهنده تأخیرهای اتمسفری، ϕ_{orb} مربوط به خطاهای مداری و ϕ_{noise} شامل نویز و خطاهای ناشی از کاهش همبستگی می‌باشد. به‌منظور استخراج مؤلفه تغییر شکل، فاز توپوگرافی با استفاده از مدل رقومی ارتفاعی SRTM (با تفکیک مکانی ۳۰ متر) حذف شد و اثرات اتمسفری

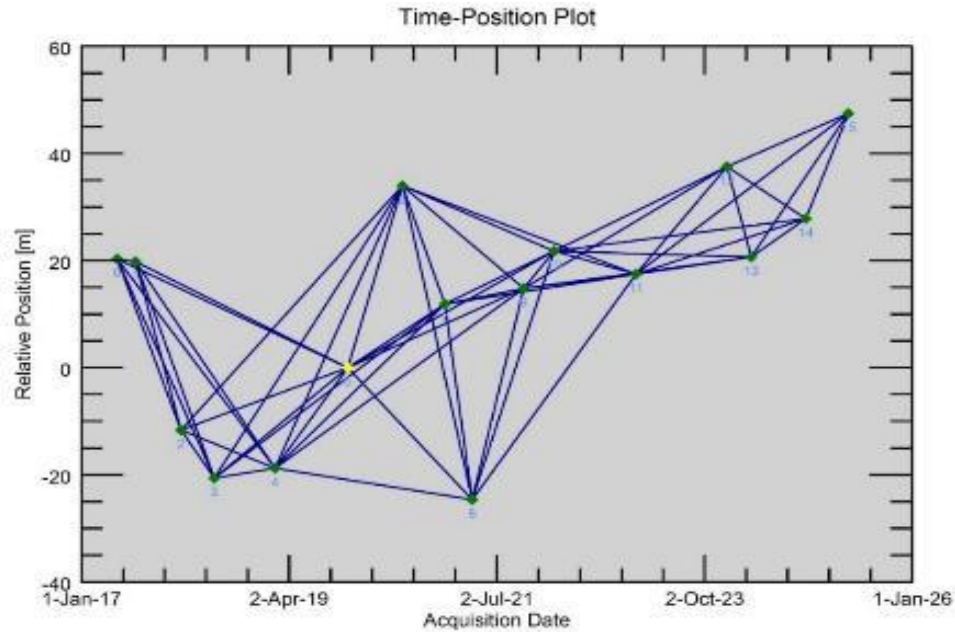
از تکنیک‌هایی مانند SBAS، D-InSAR و PS/DS پوشش مکانی و زمانی را به‌طور معناداری ارتقا داده است (Fadhillah et al., 2024; Raspini et al., 2022). در مطالعه‌ای در معدن بانجی چین، یک روش پایش یکپارچه با ترکیب SBAS، D-InSAR و داده‌های پهپادی برای کاهش خطای مکانی و افزایش کارایی عملیاتی پیشنهاد شد (Zhu et al., 2024). در مقیاس میدان، استفاده از Sentinel-1 و سنجنده LT-1 نشان داده که فرونشست می‌تواند با چرخه‌های استخراج و ژئومتری کارگاه تغییر کند و InSAR چند زمانه قادر به تفکیک این الگوها است (Hu et al., 2024). همچنین، SBAS-InSAR در معادن کوهستانی توانسته پارامترهای نشست را برای شرایط ناهموار کمی کرده و عدم قطعیت‌های ناشی از توپوگرافی و پوشش گیاهی را کاهش دهد (Jiang et al., 2024). در پاکستان، استفاده از SBAS و استکینگ InSAR در معدن زغال سنگ لاخرا موفقیت‌آمیز بوده و نشان‌دهنده قابلیت تعمیم این روش‌ها به معادن منطقه‌ای است (Ashraf et al., 2024).

در حوزه پیش‌بینی، مدل‌های یادگیری عمیق مبتنی بر سری زمانی InSAR توانسته‌اند با در نظر گرفتن وابستگی‌های مکانی زمانی، دقت پیش‌بینی تغییر شکل را به‌طور قابل توجهی افزایش دهند (Zhu et al., 2024; Tao, 2024). همچنین، در نواحی کارستی/نمکی، فرونشست ناشی از استخراج با فرآیندهای هیدروشیمیایی ارتباط دارد و این مسئله به‌ویژه در معادن محلول استخراج تشدید می‌شود (Jiang et al., 2024). تحلیل‌های هیدروژئولوژیکی نیز نشان داده‌اند که زهکشی معادن می‌تواند تأثیرات دوربرد هیدرولوژیکی ایجاد کند و افت سطح آبخوان‌ها به فرونشست کمک می‌کند (Sutton, 2024). در زمینه زیرساخت‌ها، تغییرشکل‌های افقی ناشی از نشست می‌تواند آسیب‌های جدی به خطوط لوله گاز طبیعی وارد کند و برای مدیریت ریسک، چارچوب‌های کمی‌سازی احتمال خرابی پیشنهاد شده‌اند (Bazaluk et al., 2023; Ren et al., 2025). در فاز بازسازی پس از تعطیلی معدن، تحلیل‌های SBAS-InSAR نشان داده که الگوی نشست می‌تواند با عوامل مختلفی مانند بارندگی و تغییر پوشش گیاهی در تعامل باشد (Huang et al., 2024).

در نهایت، در ایران بیشترین فرونشست‌ها به دلیل برداشت بی‌رویه آب‌های زیرزمینی رخ می‌دهند (Bakhtiari et al., 2024; Manafiazar et al., 2019; Haghightmehr et al., 2013; Jahanshahi et al., 2024). استفاده از تکنیک‌های پیشرفته مانند InSAR و مدل‌های مبتنی بر هوش مصنوعی می‌تواند در پایش حفرات رهاشده و مناطق صنعتی کاربرد داشته باشد. همچنین، ایجاد بانک جامع رخدادهای فرونشست و تدوین اطلس پهنه‌بندی خطر برای معادن کشور ضروری است.

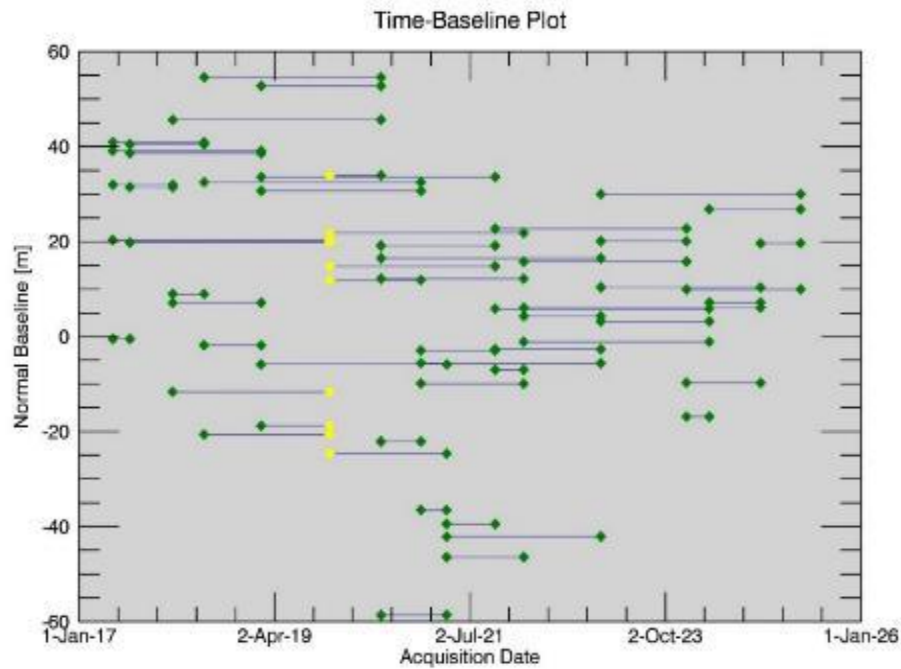
در منطقه معدنی گل گهر از حدود ۲۰ سال قبل تاکنون (۱۳۸۳-۱۴۰۳) طرح زهکشی پیت معادن شروع شده است و در حال حاضر در مجموع از کلیه پیت‌های منطقه سالانه حدوداً ۷/۷ میلیون متر مکعب (از پیت معدن ۱ حدوداً

با بهره‌گیری از روش SBAS کاهش یافت. همچنین خطاهای مداری و روندهای فازی بلند موج با استفاده از نقاط کنترل زمینی و برازش مناسب تصحیح گردید. پس از فیلترگذاری، عملیات بازگشایی فاز (Phase Unwrapping) انجام و نتایج نهایی ژئوکد شده و نقشه‌های جابه‌جایی سطح زمین استخراج گردید (Berardino et al., 2002; Raspini et al., 2022).



شکل ۱- شبکه‌گراف ترسیم‌شده برای تشکیل تداخل‌نگارها بر اساس اختلاف مکانی بین تصاویر پیرو و تصویر پایه

Fig. 1. Graph network constructed for interferogram generation based on the spatial baseline between slave images and the master image



شکل ۲- شبکه‌گراف ترسیم‌شده برای تشکیل تداخل‌نگارها بر اساس اختلاف زمانی بین تصاویر پیرو و تصویر پایه

Fig. 2. Graph network constructed for interferogram generation based on the temporal baseline between slave images and the master image

بحث

تحلیل پدیده فرونشست و تفاوت آن با کاهش ارتفاع ناشی از فعالیت‌های استخراجی

در مطالعه پدیده‌های زمین‌شناسی و مهندسی، کاهش ارتفاع سطح زمین که در اثر فعالیت‌های استخراجی مشاهده می‌شود، باید با پدیده فرونشست تفکیک شود. فرونشست به‌طور عمومی به کاهش تدریجی سطح زمین اطلاق می‌شود که در نتیجه کاهش سطح آب‌های زیرزمینی، فشرده‌سازی لایه‌های خاکی و رسوبات رخ می‌دهد. این پدیده به‌ویژه در مناطقی که از منابع آب زیرزمینی به‌طور بی‌رویه بهره‌برداری می‌شود، به شدت قابل مشاهده است.

در محدوده پیت‌های معدنی گل‌گهر، کاهش ارتفاع سطح زمین در اثر استخراج معادن مشاهده می‌شود. این کاهش ارتفاع غالباً به‌واسطه حفاری‌های عمیق و برداشت مواد معدنی است و به‌طور مستقیم با فرونشست واقعی ارتباط ندارد. در این مناطق، افت سطح زمین بیشتر به دلیل فرآیندهای مکانیکی ناشی از استخراج مواد معدنی و حفر پیت‌های معدنی است و نه به دلیل افت آب‌های زیرزمینی یا فرآیندهای ژئومکانیکی ناشی از فرونشست واقعی. بنابراین، تفکیک این دو پدیده مهم است، چرا که فرونشست به‌طور عمده به افت سطح آب‌های زیرزمینی و فشار وارده بر لایه‌های زیرسطحی اطلاق می‌شود، در حالی که کاهش ارتفاع در اثر فعالیت‌های معدنی ناشی از تغییرات سطحی است که به‌واسطه استخراج مواد معدنی یا تغییرات در ساختار زمین‌شناسی به وقوع می‌پیوندد.

نقشه ارائه‌شده در شکل ۳ توزیع مکانی نرخ تغییرات ارتفاع سطح زمین را در چهار واحد ژئومورفولوژیک-کاربری شامل دشت چاه‌دراز، محدوده پیت‌های معدنی، کفه نمکی سیرجان و زمین‌های کشاورزی شرق کفه نشان می‌دهد. بیشترین دامنه نرخ کاهش ارتفاع (تا ۳۰۰ میلی‌متر در سال) بیشتر در محدوده پیت‌های معدن و بخش‌هایی از کفه نمکی مشاهده می‌شود که این مقادیر بالا، به‌ویژه در محدوده پیت‌ها، لزوماً بیانگر فرونشست زمین به مفهوم ژئوتکنیکی آن نیستند، بلکه به‌طور مستقیم تحت تأثیر فعالیت‌های استخراجی و تغییرات توپوگرافی ناشی از عملیات معدنکاری قرار دارند. در مقابل، در دشت چاه‌دراز و زمین‌های کشاورزی شرق کفه، نرخ‌های پایین‌تر (بیشتر در بازه ۱۰ تا ۵۰ میلی‌متر در سال) غالب هستند که از نظر ژئومکانیکی می‌توانند با فرونشست تدریجی ناشی از افت سطح آب زیرزمینی و تراکم رسوبات آبرفتی مرتبط باشند. این تمایز مکانی نشان می‌دهد که تفسیر یکنواخت کل منطقه به‌عنوان ناحیه فرونشستی، بدون تفکیک منشأ تغییرات ارتفاع، می‌تواند منجر به برداشت نادرست از نتایج شود.

تحلیل مکانی فرونشست در مناطق مختلف منطقه گل‌گهر

در شکل ۴، با حذف نواحی پیت‌های معدنی و کفه نمکی، الگوی پراکندگی نرخ فرونشست به‌طور معناداری یکنواخت‌تر شده و دامنه تغییرات به بازه‌های پایین‌تر محدود شده است. این موضوع نشان می‌دهد که بخش قابل توجهی از مقادیر بالای کاهش ارتفاع مشاهده‌شده، منشأی غیر از فرونشست واقعی داشته و بیشتر به تغییرات سطح زمین ناشی از معدنکاری و فرآیندهای سطحی در محیط‌های نمکی مربوط بوده است. پس از حذف این نواحی، تمرکز اصلی فرونشست در دشت چاه‌دراز و زمین‌های کشاورزی شرق کفه باقی می‌ماند که بیانگر نقش غالب عوامل هیدروژنولوژیکی، به‌ویژه برداشت آب زیرزمینی، در کنترل فرونشست منطقه‌ای است. این شکل به‌طور مؤثر اهمیت تفکیک واحدهای زمین‌ریخت‌شناسی و کاربری زمین در تحلیل فرونشست را نشان می‌دهد. شکل ۵ توزیع مکانی فرونشست با نرخ‌های پایین و متوسط (۱۰ تا ۲۵ میلی‌متر در سال) را در دشت چاه‌دراز، کفه نمکی و زمین‌های کشاورزی شرق کفه نمایش می‌دهد. تمرکز فرونشست در این بازه، به‌ویژه در دشت چاه‌دراز و اراضی کشاورزی، بیانگر یک الگوی فرونشست تدریجی و گسترده است که با تراکم آرام رسوبات آبرفتی ریزدانه در اثر افت پیوسته سطح آب زیرزمینی سازگار است. در کفه نمکی، هرچند مقادیر مشابهی مشاهده می‌شود، اما تفسیر این تغییرات نیازمند احتیاط بیشتری است؛ زیرا در چنین محیط‌هایی، فرآیندهایی نظیر انحلال و شست‌وشوی نمک، نشست‌های سطحی موضعی و تغییرات فصلی رطوبتی می‌توانند سیگنال‌هایی مشابه فرونشست ایجاد کنند که الزاماً ریشه در تراکم لایه‌های آبخوان ندارند. بزرگنمایی ارائه‌شده در شکل ۶ امکان بررسی دقیق‌تر الگوی فضایی فرونشست در دو ناحیه کلیدی دشت چاه‌دراز و زمین‌های کشاورزی شرق کفه را فراهم می‌کند. در این شکل، پیوستگی فضایی نواحی دارای نرخ فرونشست مشابه مشاهده می‌شود که نشان‌دهنده حاکمیت یک سازوکار منطقه‌ای، احتمالاً افت سطح آب زیرزمینی، بر رفتار تغییر شکل زمین است. تمرکز فرونشست در اراضی کشاورزی شرق کفه می‌تواند با فشار مضاعف ناشی از برداشت آب برای مصارف کشاورزی تبیین شود، در حالی که در دشت چاه‌دراز، گسترش پهنه‌های فرونشستی بیانگر پاسخ تدریجی آبخوان آبرفتی به تنش‌های هیدرولیکی بلندمدت است. این الگو از نظر مقیاس و نرخ، با فرونشست‌های گسترده و کم‌شیب گزارش‌شده در دشت‌های بهره‌برداری شده ایران همخوانی دارد.

در ادامه به بررسی دقیق‌تر موقعیت‌های مکانی و روند تغییرات فرونشست در مناطق مختلف گل‌گهر پرداخته می‌شود. برای این منظور، تحلیل‌های زمین‌شناسی و هیدروژنولوژیکی مختلف باید در نظر گرفته شوند تا بتوان اثرات فرونشست را در هر منطقه به‌طور خاص ارزیابی کرد.

الف) دشت چاه دراز

سطحی در زمین شود که ممکن است شبیه به فرونشست به نظر برسد، اما در حقیقت این تغییرات به دلیل جابه‌جایی و شستشوی نمک‌ها و رسوبات است. در مناطقی مانند کفه نمکی سیرجان، فرسایش نمک و تغییرات سطحی ناشی از سیلاب‌ها می‌تواند محاسبات فرونشست را تحت تأثیر قرار دهد، به‌ویژه زمانی که این تغییرات به اشتباه به‌عنوان فرونشست ثبت می‌شوند. به این ترتیب، فرونشست در این منطقه نمی‌تواند تنها ناشی از کاهش سطح آب‌های زیرزمینی باشد، بلکه باید به تأثیرات دیگر نظیر فرسایش نمک و ورود سیلاب‌ها نیز توجه کرد.

ج) کفه نمکی سیرجان

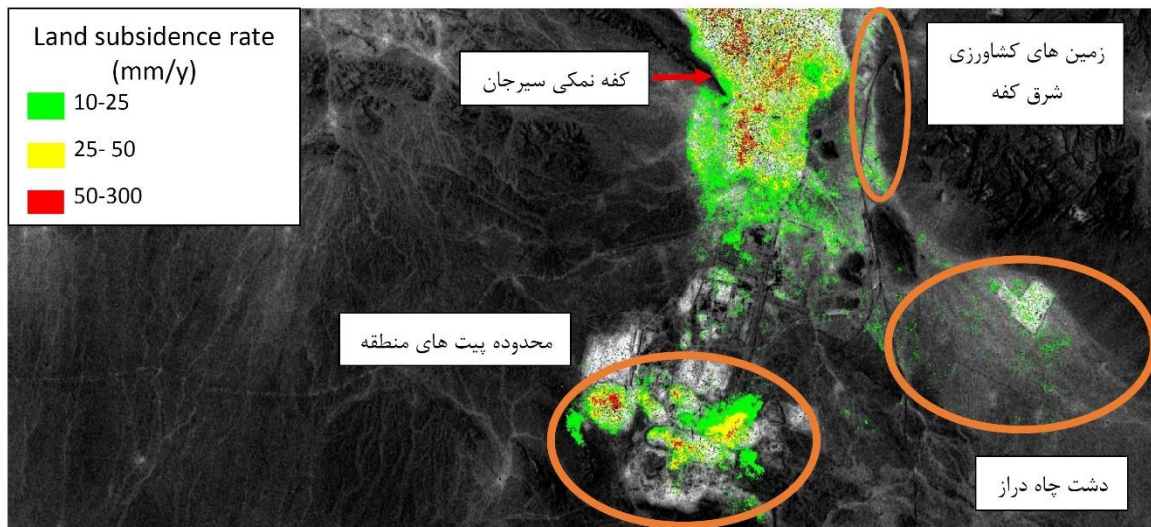
کفه نمکی سیرجان، به دلیل ویژگی‌های خاص خاک و رسوبات، تحت تأثیر پدیده‌هایی همچون فرسایش نمک و ورود سیلاب‌ها قرار دارد. این تغییرات می‌توانند در ظاهر مشابه فرونشست به نظر برسند، اما باید در نظر داشت که تغییرات سطحی در این نواحی به‌ویژه ناشی از فرسایش نمک و ورود سیلاب‌ها است و نه افت سطح آب‌های زیرزمینی. در اینجا، جابه‌جایی نمک‌ها و تغییرات در ساختار سطح زمین به وقوع می‌پیوندد که باید از فرونشست واقعی تفکیک شود.

مقایسه این منطقه با سایر محیط‌های تبخیری نشان می‌دهد که در کفه‌های نمکی، تغییرات سطحی می‌تواند ناشی از فرآیندهایی نظیر انحلال نمک و تأثیر سیلاب‌ها باشد و لزوماً بیانگر فرونشست ناشی از افت سطح آب‌های زیرزمینی نیست (Shviro et al., 2017).

دشت چاه دراز یکی از مناطقی است که به دلیل فعالیت‌های کشاورزی و برداشت بی‌رویه از منابع آب‌های زیرزمینی به شدت تحت تأثیر فرونشست قرار دارد. بر اساس مطالعات ژئوفیزیکی و هیدروژئولوژیکی، این منطقه در سال‌های اخیر با کاهش سطح آب‌های زیرزمینی مواجه بوده است که منجر به ایجاد فشارهای ژئومکانیکی در لایه‌های خاکی و رسوبات آبرفتی شده است. این فشارها باعث وقوع فرونشست و کاهش ارتفاع زمین در این ناحیه گردیده‌اند. مقایسه دشت چاه دراز با دشت‌های مشابه ایران مانند دشت رفسنجان (Mehrabi et al., 2024) و دشت ورامین (Halataei et al., 2024) نشان می‌دهد که در این مناطق، که وابستگی شدیدی به منابع آب زیرزمینی دارند، پدیده فرونشست ناشی از کاهش شدید سطح آب‌های زیرزمینی به شدت در حال گسترش است. در دشت چاه دراز، اما به دلیل وجود منابع آبی بیشتر، فرونشست به طور نسبی در مقایسه با سایر دشت‌های کشاورزی کشور کمتر و تدریجی‌تر است، اگرچه روند کلی افزایش آن قابل مشاهده است.

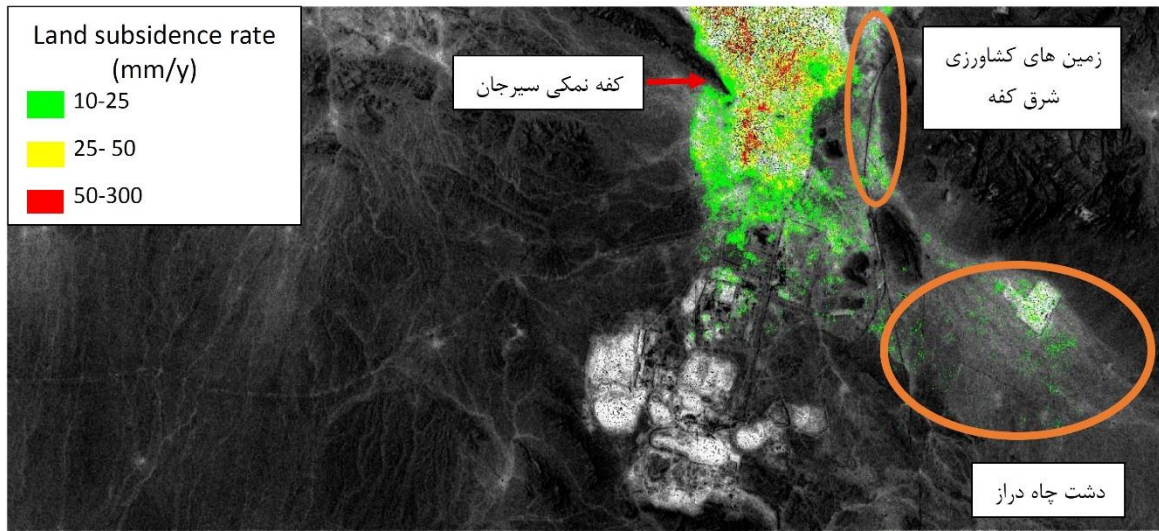
ب) زمین‌های کشاورزی شرق کفه نمکی سیرجان

در این منطقه، علاوه بر فرونشست ناشی از استخراج منابع آب زیرزمینی، باید به فرسایش نمک و اثرات سیلاب‌ها نیز توجه کرد. زمین‌های کشاورزی شرق کفه نمکی سیرجان تحت تأثیر فرسایش نمک قرار دارند، که در اثر ورود سیلاب‌ها و تغییرات اقلیمی رخ می‌دهد. این فرسایش می‌تواند باعث تغییرات

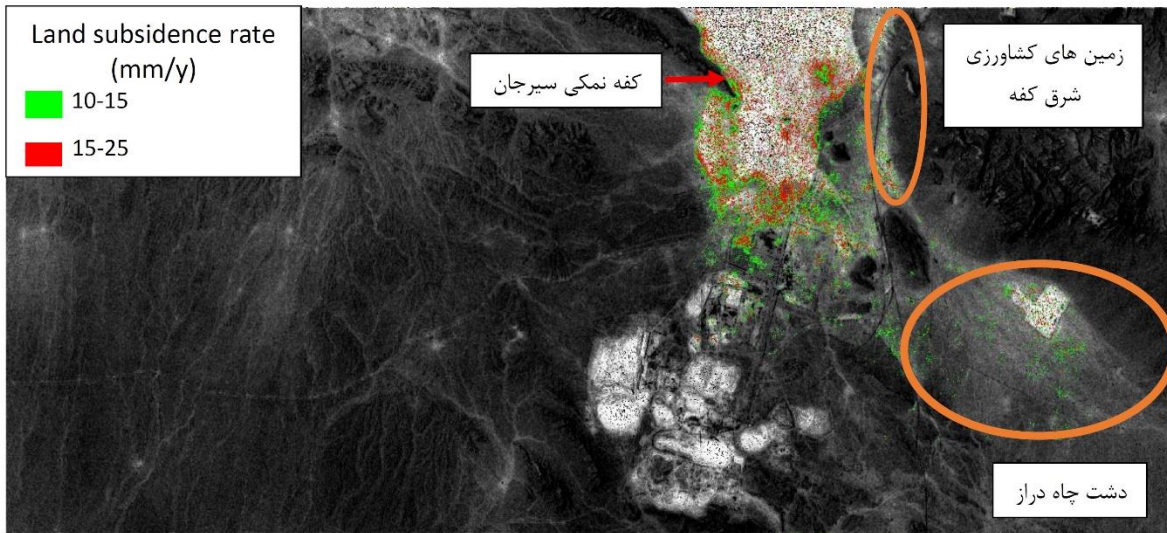


شکل ۳- نقشه پراکندگی نرخ فرونشست زمین در محدوده معدنی گل گهر در چهار ناحیه دشت چاه دراز، محدوده پیت‌های معدن، کفه نمکی و زمین‌های کشاورزی سمت شرق کفه.

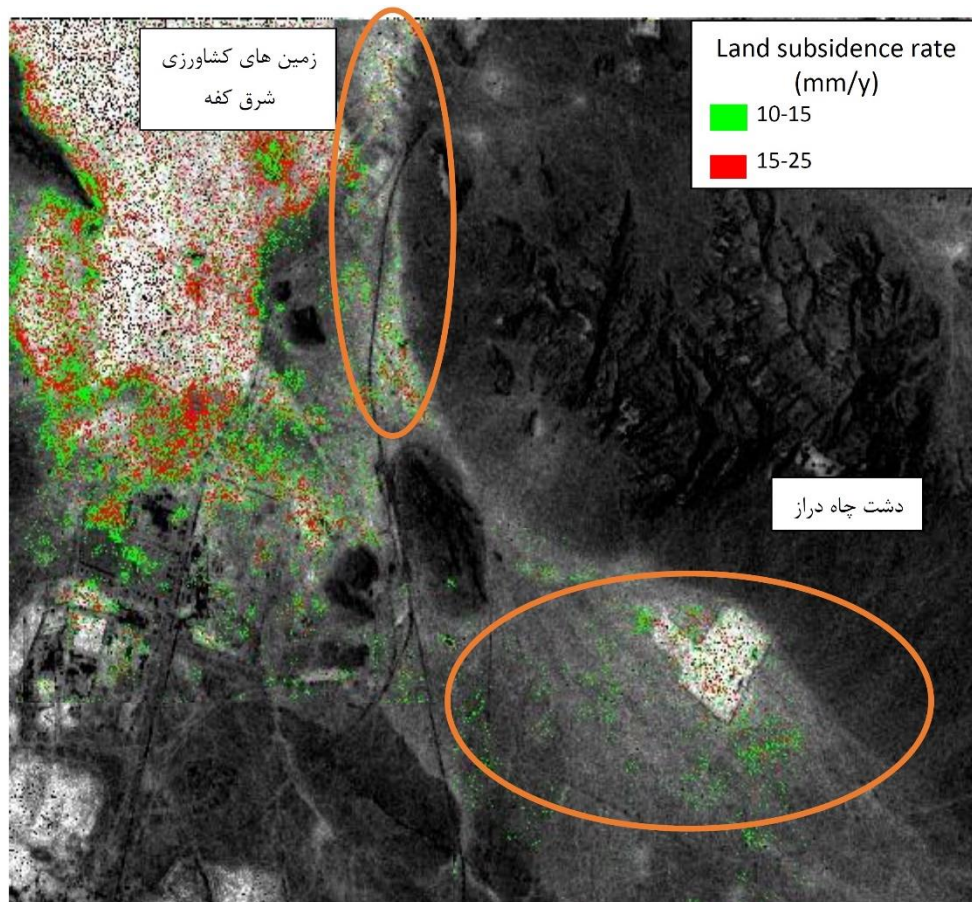
Fig. 3. Spatial distribution map of land subsidence rates in the Gol-e-Gohar mining area across four zones: Chah-Deraz Plain, mine pit areas, salt flat, and agricultural lands east of the salt flat.



شکل ۴- نقشه پراکندگی نرخ فرونشست زمین در محدوده معدنی گل‌گهر با حذف تغییرات ارتفاعی سطح زمین در محدوده پیت‌های معادن، کفه نمکی
 Fig. 4. Spatial distribution map of land subsidence rates in the Gol-e-Gohar mining area after removing surface elevation variations in the mine pit areas and the salt flat.



شکل ۵- نقشه پراکندگی نرخ فرونشست زمین با نرخ بین ۱۰ تا ۲۵ میلی‌متر در سال در محدوده‌های دشت چاه دراز، کفه نمکی و زمین‌های کشاورزی سمت شرق کفه
 Fig. 5. Spatial distribution map of land subsidence rates ranging from 10 to 25 mm per year in the Chah-Deraz Plain, salt flat, and agricultural lands east of the salt flat



شکل ۶- بزرگنمایی نقشه پراکندگی نرخ فرونشست زمین با نرخ بین ۱۰ تا ۲۵ میلی‌متر در سال در محدوده‌های دشت چاه‌دراز و زمین‌های کشاورزی سمت شرق کفه.
 Fig. 6. Enlarged view of the spatial distribution map of land subsidence rates ranging from 10 to 25 mm per year in the Chah-Deraz Plain and agricultural lands east of the salt flat.

نمودار شکل ۷ بیانگر روند زمانی میانگین تغییرات ارتفاع سطح زمین در دشت چاه‌دراز است. شیب کلی منحنی نشان‌دهنده یک روند کاهشی پیوسته ارتفاع سطح زمین در طول دوره زمانی مورد بررسی است که مشخصه فرونشست تدریجی و تجمعی محسوب می‌شود. این نوع رفتار زمانی معمولاً با تراکم تدریجی رسوبات آبرفتی ریزدانه در پاسخ به افت مداوم تراز آب زیرزمینی سازگار است. در این نمودار، نبود نوسانات شدید کوتاه‌مدت و غالب بودن یک روند نسبتاً یکنواخت، بیانگر آن است که فرونشست در دشت چاه‌دراز بیشتر تحت کنترل فرآیندهای هیدروژئولوژیکی بلندمدت قرار دارد و کمتر تحت تأثیر پدیده‌های سطحی مقطعی یا تغییرات ناگهانی کاربری زمین است. این الگوی زمانی با فرونشست دشت‌های آبرفتی کلاسیک ایران، که به دلیل بهره‌برداری مزمین از آبخوان‌ها دچار نشست تدریجی می‌شوند، همخوانی دارد. همچنین، نرخ متوسط تغییرات زمانی نشان می‌دهد که فرونشست در این دشت از نوع فرونشست گسترده بوده و تمرکز موضعی یا رفتار ناپایدار در آن مشاهده نمی‌شود؛ موضوعی که از دیدگاه مخاطرات ژئوتکنیکی، بیانگر خطر تدریجی اما

روند تغییرات زمانی فرونشست

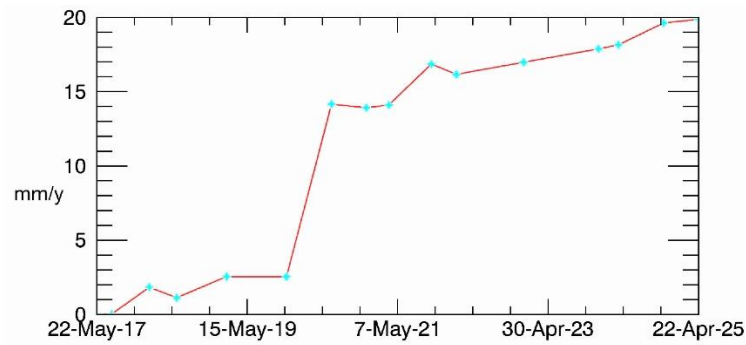
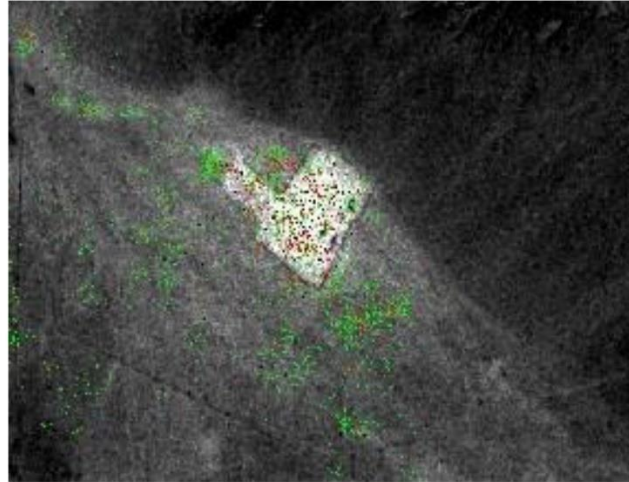
در تحلیل تغییرات زمانی فرونشست، باید به روند افزایشی و کاهشی این پدیده توجه کرد. بر اساس شکل در منطقه گل‌گهر، داده‌های موجود نشان می‌دهند که در برخی مناطق، روند افزایش فرونشست در سال‌های اخیر به‌ویژه در مناطقی که به طور بی‌رویه از منابع آبی زیرزمینی بهره‌برداری می‌شود، مشهود است.

الف) دشت چاه دراز

در این منطقه، روند افزایش فرونشست در دهه‌های اخیر به وضوح قابل مشاهده است. این روند می‌تواند ناشی از کاهش سطح آب‌های زیرزمینی و افزایش فعالیت‌های کشاورزی باشد. کاهش سطح آب‌های زیرزمینی منجر به فشارهای مکانیکی بر لایه‌های خاکی و رسوبات آبرفتی شده و به وقوع فرونشست دامن زده است.

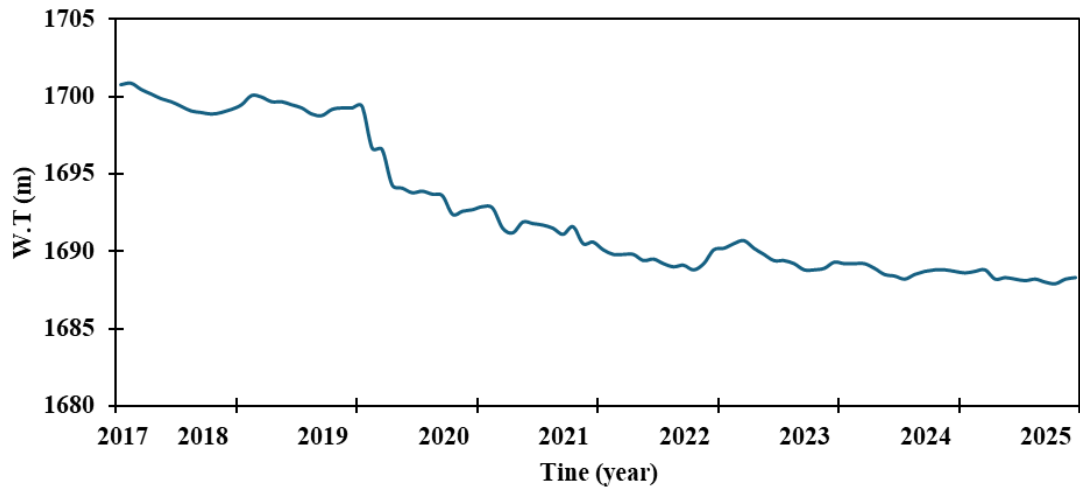
آب زیرزمینی و نرخ فرونشست (شکل ۹) نشان‌دهنده نقش برداشت بی‌رویه از آب آبخوان در تحکیم لایه‌های رسی می‌باشد.

پایدار برای زیرساخت‌ها است. افزایش ناگهانی نرخ فرونشست در این دشت بعد از سال ۲۰۱۹ تقریباً هم‌زمان با افزایش نرخ کاهش سطح ایستابی در دشت (شکل ۸) رخ داده است و ضریب همبستگی مثبت بالا بین میزان افت سطح



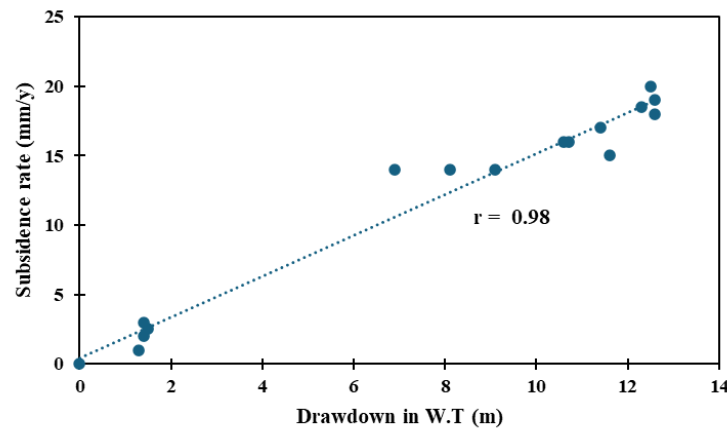
شکل ۷- میانگین تغییرات زمانی نرخ فرونشست در دشت چاه دراز

Fig. 7. Mean temporal variations of land subsidence rate in the Chah-Deraz Plain.



شکل ۸- هیدروگراف میانگین ارتفاع سطح ایستابی در دشت چاه دراز

Fig. 8. Hydrograph of water table in the Chah-Deraz Plain.



شکل ۹- همبستگی بین میزان افت سطح ایستابی و نرخ فرونشست در دشت چاه دراز

Fig. 9. Correlation of drawdown and subsidence rate in the Chah-Deraz Plain.

از یک‌سو، روند کاهشی میانگین ارتفاع نشان‌دهنده وجود فرونشست تدریجی مرتبط با برداشت آب زیرزمینی برای مصارف کشاورزی است. از سوی دیگر، نوسانات موجود در منحنی می‌تواند بازتاب‌دهنده تأثیر فرآیندهای سطحی و فصلی نظیر تغییرات رطوبتی خاک، آبیاری‌های دوره‌ای، و در برخی بازه‌ها، اثرات غیرمستقیم سیلاب‌ها و تغییرات سطح آب در محیط‌های مجاور کفه نمکی باشد.

این ویژگی زمانی سبب می‌شود که تفسیر فرونشست در این ناحیه نسبت به دشت چاه‌دراز با عدم قطعیت بیشتری همراه باشد؛ زیرا بخشی از تغییرات ثبت‌شده لزوماً ناشی از تراکم دائمی لایه‌های آبخوان نیست و می‌تواند مؤلفه‌های برگشت‌پذیر یا نیمه برگشت‌پذیر نیز داشته باشد. به همین دلیل،

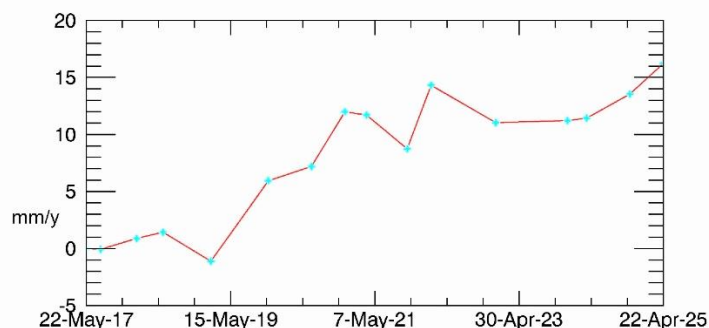
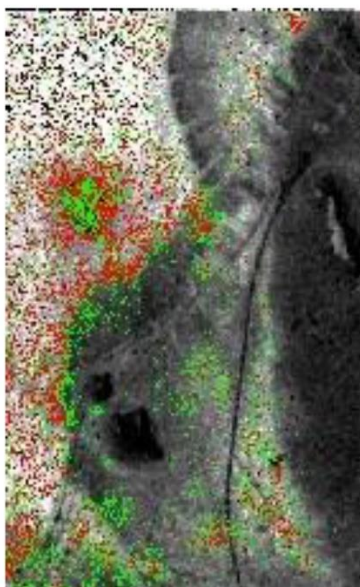
ب) زمین‌های کشاورزی شرق کفه نمکی سیرجان

در این ناحیه، تغییرات سطح زمین به دلیل فرسایش نمک و تأثیرات سیلاب‌ها بیشتر از فرونشست واقعی است. در اینجا، فرونشست بیشتر به دلیل برداشت‌های بی‌رویه از منابع آبی زیرزمینی و همچنین تغییرات طبیعی سطح زمین رخ می‌دهد.

نمودار شکل ۱۰ الگوی زمانی تغییرات ارتفاع سطح زمین را در زمین‌های کشاورزی واقع در شرق کفه نمکی سیرجان نمایش می‌دهد. در مقایسه با دشت چاه‌دراز، این نمودار معمولاً دارای نوسانات زمانی محسوس‌تر در کنار روند کلی کاهش ارتفاع است. این رفتار زمانی می‌تواند ناشی از هم‌زمانی چند سازوکار مؤثر بر تغییرات سطح زمین باشد.

نوسانی‌تر دارند که بیانگر تأثیر هم‌زمان عوامل هیدروژئولوژیکی و فرآیندهای سطحی-محیطی است. این تفاوت رفتاری مؤید آن است که حتی در یک پهنه جغرافیایی نسبتاً محدود، پاسخ زمین به تنش‌های انسانی و طبیعی می‌تواند به‌طور قابل‌توجهی ناهمگن باشد و تحلیل فرونشست بدون توجه به زمینه ژئومورفولوژیکی و کاربری زمین، منجر به برداشت‌های ساده‌انگارانه خواهد شد.

فرونشست در این محدوده را باید به‌عنوان ترکیبی از فرونشست واقعی آبخوانی و تغییرشکل‌های سطحی وابسته به شرایط محیطی در نظر گرفت. مقایسه روندهای زمانی دو نمودار نشان می‌دهد که دشت چاه‌دراز دارای رفتار زمانی منظم‌تر، یکنواخت‌تر و با قطعیت بالاتر از نظر فرونشست واقعی است؛ در مقابل، زمین‌های کشاورزی شرق کفه نمکی رفتاری پیچیده‌تر و



شکل ۱۰- میانگین تغییرات زمانی فرونشست در زمین‌های کشاورزی ساحل شرق کفه نمکی

Fig. 10. Mean temporal variations of land subsidence in the agricultural lands along the eastern margin of the salt flat.

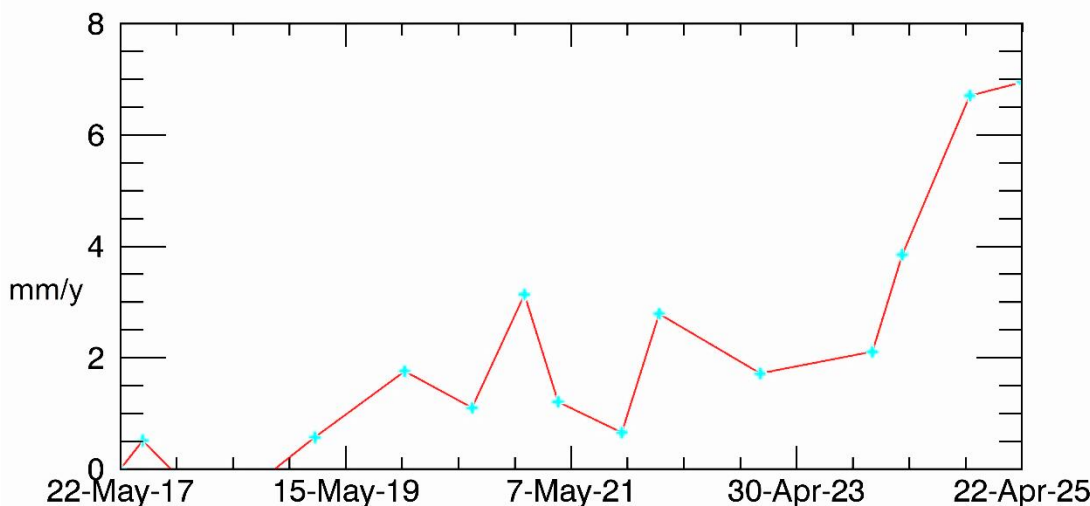
حاشیه آن‌ها استقرار یافته‌اند. اگرچه نقشه‌های پراکندگی نرخ تغییرات ارتفاع نشان می‌دهند که بیشترین مقادیر کاهش تراز زمین در محدوده پیت‌ها مشاهده می‌شود، اما همان‌گونه که پیش‌تر بیان شد، این مقادیر بیشتر ناشی از فعالیت‌های مستقیم معدن‌کاری بوده و بیانگر فرونشست واقعی آبخوانی نیستند. با این حال، ماهیت این تغییرات از منظر پایداری سازه‌ای نیازمند توجه ویژه است.

تحلیل رفتار تغییر شکل سطح زمین در محدوده ساختمان‌ها و تأسیسات مجاور پیت‌ها

یکی از نکات قابل توجه در تفسیر نتایج حاصل از تحلیل سری زمانی تغییرات ارتفاع سطح زمین، رفتار خاص نواحی مجاور پیت‌های معدنی است که بخشی از ساختمان‌ها و تأسیسات اداری-معدنی منطقه در این محدوده یا

تغییرشکل‌های افقی موضعی شود که از دیدگاه عملکرد سازه‌ای اهمیت بالایی دارند. این موضوع به‌ویژه در محیط‌های معدنی فعال که تغییرات توپوگرافی مصنوعی، بارگذاری روباره و ارتعاشات ناشی از انفجار به‌طور هم‌زمان رخ می‌دهند، تشدید می‌شود.

تحلیل مکانی تغییرات ارتفاع در اطراف ساختمان‌ها و تأسیسات نشان می‌دهد (شکل ۱۱) که این نواحی در معرض گرادین‌های مکانی تغییر شکل قرار دارند؛ به این معنا که نرخ و جهت تغییرات ارتفاع سطح زمین در فواصل کوتاه دچار تغییر می‌شود. چنین شرایطی، حتی در صورت پایین بودن نرخ متوسط فرونشست منطقه‌ای، می‌تواند منجر به بروز نشست‌های نامتقارن و



شکل ۱۱- میانگین تغییرات زمانی ارتفاع سطح زمین در محدوده ساختمان‌ها و تأسیسات مجاور پیت‌ها

Fig. 11. Average temporal changes in ground surface elevation within the area of buildings and facilities adjacent to the pits.

شرایطی با حساسیت بالاتر نسبت به دشت‌های یکنواخت پیرامونی قرار دارند. این یافته، زمینه تحلیلی لازم را برای بررسی دقیق‌تر رفتار این سازه‌ها در مقیاس محلی فراهم می‌کند.

نتیجه‌گیری

نتایج حاصل از این مطالعه به‌وضوح بیانگر آن است که تفسیر پدیده کاهش تراز زمین در این محدوده، بدون تفکیک دقیق میان فرونشست واقعی و سایر فرآیندهای مؤثر بر تغییرات ارتفاع سطح زمین، می‌تواند منجر به برداشت‌های نادرست و اغراق‌آمیز از میزان و گستره فرونشست شود. نقشه پراکندگی اولیه نرخ تغییرات ارتفاع سطح زمین نشان داد که بیشترین مقادیر کاهش ارتفاع (تا بیش از ۳۰۰ میلی‌متر در سال) بیشتر در محدوده پیت‌های معدنی و بخش‌هایی از کفه نمکی سیرجان متمرکز است. با این حال، تحلیل ماهیت این تغییرات نشان می‌دهد که این مقادیر بالا الزاماً ناشی از فرونشست ژئومکانیکی به مفهوم کلاسیک آن نیستند. در محدوده پیت‌های معدنی، کاهش ارتفاع سطح زمین به‌طور مستقیم با فعالیت‌های استخراجی، جابجایی توده سنگ، تغییرات توپوگرافی مصنوعی و عملیات معدنکاری مرتبط بوده و بنابراین باید به‌عنوان تغییرات انسان‌زاد سطح زمین تلقی شود، نه فرونشست ناشی از تراکم آبخوان. این تمایز از منظر علمی و مدیریتی اهمیت اساسی دارد، زیرا اختلاط این دو

از منظر زمانی نیز، سری‌های تغییرات ارتفاع در مجاورت پیت‌ها رفتاری متفاوت از دشت‌های آبرفتی پیرامونی نشان می‌دهند. این سری‌ها عموماً فاقد روند یکنواخت و بلندمدت مشخص بوده و در عوض، نوسانات موضعی و تغییرات ناگهانی‌تری را ثبت می‌کنند. چنین الگویی بیشتر با تغییرشکل‌های انسان‌زاد و مقطعی سازگار است تا فرونشست تدریجی آبخوانی، اما همین ویژگی باعث افزایش عدم قطعیت در ارزیابی ایمنی سازه‌های مستقر در این محدوده می‌شود. نکته قابل توجه آن است که روش InSAR، علی‌رغم توانایی بالا در پایش تغییرشکل‌های منطقه‌ای، در محیط‌های معدنی فعال با محدودیت‌هایی در تفکیک دقیق تغییرشکل‌های موضعی در مقیاس پی سازه مواجه است. از این‌رو، نبود سیگنال فرونشست کلاسیک یا پایین بودن نرخ میانگین تغییرات ارتفاع در اطراف ساختمان‌ها و تأسیسات، لزوماً به معنای نبود ریسک تغییر شکل سازه‌ای نیست. این موضوع به‌ویژه در شرایطی که ساختمان‌ها در نزدیکی مرز بین نواحی با رفتارهای متفاوت تغییر شکل قرار دارند، اهمیت بیشتری می‌یابد. در مجموع، نتایج حاصل از تحلیل مکانی-زمانی تغییرات ارتفاع سطح زمین نشان می‌دهد که هرچند ساختمان‌ها و تأسیسات محدوده پیت‌ها در پهنه‌های فرونشست منطقه‌ای با نرخ بالا قرار ندارند، اما به دلیل مجاورت با نواحی دارای تغییرشکل‌های ناهمگن و انسان‌زاد، از منظر پایداری و عملکرد سازه‌ای در

انتقال و سازه‌های سطحی است. در مقابل، نمودار تغییرات زمانی زمین‌های کشاورزی شرق کفه نمکی علاوه بر روند کلی کاهشی، نوسانات زمانی قابل توجه‌تری را نشان می‌دهد. این رفتار بیانگر تأثیر هم‌زمان فرونشست واقعی ناشی از افت آب زیرزمینی و تغییرشکل‌های برگشت‌پذیر یا نیمه برگشت‌پذیر مرتبط با تغییرات رطوبتی خاک، آبیاری‌های فصلی و شرایط محیطی خاص نواحی مجاور کفه نمکی است. از این‌رو، فرونشست در این ناحیه ماهیتی ترکیبی داشته و نمی‌توان آن را صرفاً به تراکم دائمی آبخوان نسبت داد. در مجموع، نتایج این مطالعه نشان می‌دهد که محدوده معدنی گل‌گهر را نمی‌توان به‌عنوان یک پهنه فرونشستی یکنواخت در نظر گرفت. بلکه این منطقه شامل زیرپهنه‌هایی با منشأهای متفاوت تغییر ارتفاع سطح زمین است که از فعالیت‌های استخراجی، فرآیندهای سطحی محیط‌های نمکی و فرونشست واقعی آبخوانی تأثیر می‌پذیرند. تفکیک این زیرپهنه‌ها برای تحلیل علمی صحیح، ارزیابی مخاطرات و اتخاذ تصمیمات مدیریتی ضروری است. بررسی نتایج به‌دست‌آمده در ارتباط با نواحی مجاور پیت‌های معدنی، که بخشی از ساختمان‌ها و تأسیسات اداری منطقه در آن‌ها استقرار یافته‌اند، نشان می‌دهد که این ساختمان‌ها اگرچه در پهنه‌های فرونشست واقعی و آبخوانی با نرخ بالا قرار ندارند، اما در معرض تغییرات ارتفاع سطح زمین با ماهیتی ناهمگن و بیشتر انسان‌زاد قرار دارند. همان‌گونه که نتایج این مطالعه نشان می‌دهد، کاهش ارتفاع مشاهده‌شده در محدوده پیت‌ها بیشتر ناشی از فعالیت‌های استخراجی، تغییرات مصنوعی توپوگرافی و فرآیندهای مکانیکی مرتبط با معدن‌کاری بوده و از نظر منشأ با فرونشست تدریجی آبخوانی متفاوت است. با این حال، تحلیل الگوی مکانی تغییرات ارتفاع سطح زمین بیانگر آن است که در مجاورت پیت‌ها، تغییر شکل زمین به‌صورت یکنواخت و پیوسته رخ نمی‌دهد و گرادیان‌های مکانی نسبتاً بالایی در مقیاس‌های محلی مشاهده می‌شود. چنین شرایطی می‌تواند از منظر پایداری سازه‌ای، به‌ویژه برای ساختمان‌های اداری، اهمیت داشته باشد؛ چرا که این سازه‌ها نسبت به تغییرشکل‌های نامتقارن و موضعی حساس‌تر از دشت‌های باز و فاقد سازه هستند.

قدردانی

بدین‌وسیله از شرکت معدنی و صنعتی گل‌گهر و مدیریت تحقیقاتی و فناوری به جهت حمایت‌های مالی و معنوی سپاسگزاری می‌شود.

References

- Ashraf, T., Yin, F., Liu, L., Zhang, Q., 2024. Land subsidence detection using SBAS- and stacking-InSAR with zonal statistics and topographic correlations in Lakhra coal mines, Pakistan. *Remote Sensing* 16(20), 3815.
- Bakhtiari, S., Khairy, H., Eatemadifar, M., Mirani Moghadam, H., Barati, R., 2024. Investigating the subsidence phenomenon of the

پدیده می‌تواند منجر به بزرگ‌نمایی خطر فرونشست در محدوده‌های معدنی فعال شود. در کفه نمکی سیرجان نیز اگرچه مقادیر قابل توجهی از کاهش ارتفاع سطح زمین ثبت شده است، اما ماهیت زمین‌شناسی و ژئومورفولوژیکی این واحد نشان می‌دهد که فرآیندهایی نظیر انحلال و فرسایش نمک، جابجایی رسوبات سطحی، تغییرات رطوبتی فصلی و اثرگذاری سیلاب‌ها نقش مهمی در ایجاد سیگنال‌های ارتفاعی ثبت‌شده دارند. بنابراین، بخشی از تغییرات مشاهده‌شده در این پهنه را باید به‌عنوان تغییرشکل‌های سطحی غیرمرتبط با فرونشست واقعی در نظر گرفت. این موضوع به‌ویژه در مطالعات مبتنی بر داده‌های سنجنش از دور اهمیت مضاعف دارد، زیرا محیط‌های نمکی مستعد تولید سیگنال‌های کاذب تغییر ارتفاع هستند. با حذف محدوده پیت‌های معدنی و کفه نمکی از تحلیل، الگوی مکانی فرونشست به‌طور معناداری تغییر یافته و پهنه‌های فرونشستی با دامنه نرخ محدودتر و یکنواخت‌تر آشکار می‌شوند. این الگو به‌روشنی نشان می‌دهد که فرونشست واقعی در محدوده گل‌گهر بیشتر در دشت چاه‌دراز و زمین‌های کشاورزی شرق کفه نمکی متمرکز است و نرخ آن غالباً در بازه ۱۰ تا ۲۵ میلی‌متر در سال قرار دارد. این میزان فرونشست، هرچند از نظر عددی در مقایسه با برخی دشت‌های بحرانی کشور کمتر است، اما از نظر گستره مکانی و تداوم زمانی، حائز اهمیت بوده و می‌تواند در بلندمدت پیامدهای ژئوتکنیکی و زیست‌محیطی قابل توجهی به همراه داشته باشد.

در زمین‌های کشاورزی شرق کفه نمکی، اگرچه نرخ‌های فرونشست در همان بازه ۱۰ تا ۲۵ میلی‌متر در سال قرار دارند، اما الگوی فضایی و زمانی پیچیده‌تری مشاهده می‌شود. تمرکز فرونشست در این ناحیه را می‌توان به فشار مضاعف ناشی از برداشت آب برای مصارف کشاورزی نسبت داد، با این حال، هم‌جواری با محیط نمکی سبب می‌شود که فرآیندهای سطحی و فصلی نیز در ثبت تغییرات ارتفاع نقش داشته باشند. این ویژگی باعث می‌شود که تفسیر فرونشست در این ناحیه با عدم قطعیت بیشتری همراه باشد و نیازمند تحلیل‌های تکمیلی هیدروژئولوژیکی و ژئوتکنیکی باشد. بررسی نمودارهای میانگین تغییرات زمانی فرونشست، بعد زمانی تحلیل را تکمیل می‌کند. نمودار تغییرات زمانی دشت چاه‌دراز نشان‌دهنده یک روند کاهشی یکنواخت و پیوسته ارتفاع سطح زمین است که مشخصه فرونشست تدریجی، تجمعی و غیرقابل بازگشت محسوب می‌شود. نبود نوسانات شدید کوتاه‌مدت در این نمودار مؤید آن است که فرونشست این دشت بیشتر تحت کنترل فرآیندهای بلندمدت آبخوانی قرار دارد و از پایداری رفتاری برخوردار است. چنین الگویی از دیدگاه مدیریت مخاطرات، بیانگر تهدیدی آرام اما مداوم برای زیرساخت‌ها، خطوط

- Karat Plain using the MODFLOW mathematical model and based on the development of GMS numerical package. *Kharazmi Journal of Earth Sciences* 10(2), 376-396.
- Bazaluk, O., Kuchyn, O., Saik, P., Soltabayeva, S., Brui, H., Lozynskiy, V., Cherniaev, O., 2023. Impact of ground surface subsidence caused by underground coal mining on natural gas pipeline. *Scientific Reports* 13, 20566.

- Berardino, P., Fornaro, G., Lanari, R., Sansosti, E., 2002. A new algorithm for surface deformation monitoring based on small baseline differential SAR interferograms. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing* 40(11), 2375-2383.
- Fadhillah, M. F., Wahyu, L.H., Lee, S., Lee, K., Lee, S., Chae, S., Lee, H., Lee, C., 2024. Multitemporal analysis of land subsidence induced by mining using ICOPS (PS+DS) InSAR time series. *Scientific Reports* 14, 56347.
- Haghighatmehr, P., Valadanzouj, M.J., Tajik, R., Jabari, S., Sahebi, M.R., Eslami, R., Ganjiyan, M., Dehghani, M., 2013. Time Series Analysis of Hashtgerd Subsidence Using Radar Interferometry and Global Positioning System. *Geosciences* 22(85), 105-114. (in Persian)
- Halataei, M., Khamechi, M., Amighpey, M., Manafiazar, A., 2024. Investigating the land subsidence potential of the Varamin Plain using a Simple Additive Weighting method and optimizing the weighting of affecting factors on land subsidence by Analytical Hierarchy Process. *Iranian Association of Engineering Geology* 17(4), 97-114.
- Hu, L., Li, J., Wang, Y., 2024. Monitoring surface deformation dynamics in the mining subsidence area using LT-1 InSAR interferometry. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation* 132, 103910.
- Huang, G., Wang, H., Fan, X., 2024. Study on surface deformation pattern in mine closure area using SBAS-InSAR. *Frontiers in Earth Science* 12, 1353593.
- Jahanshahi, R., Gamshadzei Mahbou, E., Soloki, H.R., Azhdary Moghaddam, M., 2024. Land subsidence potential in the Tahlab plain and the relationship between domestic wastewater and collapse in sewage wells in the Rig -Malek city, southeast of Zahedan. *Kharazmi Journal of Earth Sciences* 10(2), 397 - 420. (in Persian)
- Jiang, X., Shi, W., Liang, F., Gui, J., Li, J. 2024. InSAR-derived surface deformation characteristics and mining subsidence parameters in mountain coal mines. *Journal of Mountain Science* 21(9), 3139–3156.
- Manafiazar, A., Khamsehchiyan, M., Nadiri, A., 2019. Comparison of Vulnerability of the Southwest Tehran Plain Aquifer with Simple Weighting Model (ALPRIFT Model) and Genetic Algorithm (GA). *Kharazmi Journal of Earth Sciences* 4(2), 199-212.
- Mehrabi, A., Karimi, S., Mohammadi Lahijani, A., 2024. Monitoring of the Rafsanjan City Subsidence and Its Possible Causes. *Geographical Research* 39(2), 149-159
- Raspini, F., Caleca, F., Soldato M.D., Festa, D., Confuorto, P., Bianchini, S., 2022. Review of satellite radar interferometry for subsidence analysis. *Earth-Science Reviews* 234, 104245.
- Ren, J., Zhang, J., Wang, H., 2025. Risk mapping for oil–gas pipeline under mining-induced surface subsidence. *International Journal of Coal Science & Technology* 12, 123–137.
- Shviro, M., Haviv, I., Baer, G., 2017. High-resolution InSAR constraints on flood-related subsidence and evaporite dissolution along the Dead Sea shores. *Geomorphology* 293, 53-68.
- Sutton, O. F., 2024. Mining and climate change alters water storage and streamflow: Evidence from mine dewatering. *Water Resources Research* 60(10), e2024WR037310.
- Tao, Q., 2024. Ground subsidence prediction with high precision from InSAR time series using an attention-based spatiotemporal model. *International Journal of Remote Sensing* 45(18), 5967–5991.
- Zhu, M., Zhang, H., Wang, X., Liu, Y., 2024. Integrated high-precision monitoring method for surface subsidence in mining areas using D-InSAR, SBAS, and UAV technologies. *Scientific Reports* 14(1), 12445.