



Monitoring and Analysis of Subsidence Risk in Shahrekord Plain Using Radar Interferometry

Pezhman Fazeli Dehkordi¹ , Sohrab Mirasi² , Borhan Hosinpour³

1. Associate Professor, Department of Civil Engineering, ShK.C., Islamic Azad University, Shahrekord, Iran.

Email: Pe.fazeli@iau.ac.ir

2. (Corresponding author) Assistant Professor, Department of Civil Engineering, ShK.C., Islamic Azad University, Shahrekord, Iran.

Email: Sohrab.mirassi@iau.ac.ir

3. MSc. Student, Department of Civil Engineering, ShK.C., Islamic Azad University, Shahrekord, Iran.

Email: borhan.hosinpour1366@iau.ir

Article Info

Article Type:

Research Article

Article History:

Received:

18 Nov 2025

Received in revised form:

8 Feb 2026

Accepted:

8 May 2026

pp.177-195

Keywords:

Land Subsidence

SARPROZ

Radar Interferometry

Shahrekord Plain.

ABSTRACT

Land subsidence is a critical environmental challenge, especially in Iran's arid regions, threatening infrastructure and water resources. This study addresses a research gap by conducting the first analysis of subsidence and groundwater changes in the Shahrekord Plain using time-series radar interferometry (InSAR). The primary objective was to determine the precise risk and rate of subsidence to inform prevention strategies. Employing a quantitative methodology, Sentinel-1 satellite data from 2019-2023 was processed with SARPROZ software to measure millimeter-level surface deformation. The InSAR data was integrated with groundwater levels, precipitation records, geotechnical data, and well information. Advanced statistical analyses, including multivariate regression and spatial analysis, were used to identify causal patterns, supplemented by field visits for validation. The results confirm significant subsidence, with a maximum rate of 77 mm over four years. The spatial pattern reveals the central plain as the most vulnerable area, subsiding over 5 cm annually—far exceeding the safe limit of 2 mm per year. A strong correlation (coefficient of 0.87) was found between groundwater decline and subsidence rates. A nine-year precipitation deficit and persistent drought were key exacerbating factors, with the lowest rainfall areas experiencing the highest subsidence. In conclusion, the research demonstrates that excessive groundwater extraction, compounded by climate-induced drought, is the principal driver of severe and accelerating land subsidence in the Shahrekord Plain. The findings provide a critical scientific basis for implementing urgent water management and mitigation policies.

Cite this article: Fazeli Dehkordi, P., Mirassi, S. & Hosseinpour, B. (2026). Monitoring and Analysis of Subsidence Risk in Shahrekord Plain Using Radar Interferometry. *Quantitative Geomorphological Research*, 15(1). 177-195.

Doi: [10.22034/gmpj.2026.569281.1597](https://doi.org/10.22034/gmpj.2026.569281.1597)

Extended Abstract

Introduction

Land subsidence is one of the most serious environmental and social challenges in Iran's arid and semi-arid regions, severely threatening infrastructure, water resources, and human settlements. This phenomenon, often triggered by excessive groundwater extraction, aquifer compaction, and prolonged drought, has been extensively documented worldwide in cities such as Venice (Italy), Bangkok (Thailand), Mexico City (Mexico), and Jakarta (Indonesia). In Iran, significant subsidence rates have been reported in numerous plains, including Rafsanjan (up to ۲۷cm/year), Hamadan, Mashhad, and Lardegan, highlighting the urgent need for advanced monitoring techniques. This study presents the first comprehensive InSAR-based analysis of subsidence and groundwater changes in the Shahrekord Plain using Sentinel-1 satellite data and the SARPROZ software. By integrating radar interferometry, piezometric well records, precipitation data, and geological maps, the research identifies the spatial distribution, annual rates, and causal factors of subsidence. The findings demonstrate severe land subsidence (maximum ۷۷mm over four years, exceeding ۵cm/year in central areas) primarily driven by intensive groundwater withdrawal and a nine-year rainfall deficit, far beyond the international safety threshold of ۲mm/year. The results provide critical scientific evidence for urgent water management policies and sustainable groundwater governance in the Shahrekord Plain and similar alluvial basins across Iran. The primary objective of this study is to determine the extent and rate of subsidence risk in the Shahrekord Plain using the time-series radar interferometry (InSAR) method and the SARPROZ software. This research is the first comprehensive analysis of land subsidence and groundwater level changes in this plain. By integrating satellite data, piezometric wells, precipitation records, and geological maps, the study identifies causal patterns and provides a scientific basis for developing prevention strategies and evidence-based water management policies

to mitigate and control subsidence.

Methodology

This research adopted a quantitative and multi-source data integration approach. Sentinel-1A satellite imagery (VV-VH polarization, ۵×۲۰ m resolution) was acquired over three distinct periods (۲۰۱۸–۲۰۱۹, ۲۰۲۰–۲۰۲۱, and ۲۰۲۲–۲۰۲۳) with perpendicular baselines shorter than ۱۷ m and temporal baselines of ۲۰۴, ۴۵۶, and ۴۹ days, respectively. Processing was performed in the SARPROZ software, including orbit file application, Back Geocoding using a ۱۰ m SRTM digital elevation model, topographic phase removal, Goldstein speckle filtering, Phase Unwrapping with the SNAPHU algorithm, conversion of phase difference to vertical displacement via the formula $d = (\lambda / \pi) \times \Delta\phi$, and Range-Doppler Terrain Correction for orthorectification. A total of ۲۳ piezometric wells from the Regional Water Company of Chaharmahal and Bakhtiari Province (۲۰۱۳–۲۰۲۳) and daily precipitation data from five synoptic stations (Shahrekord, Saman, Farasan, Borujen, and Kiari) were collected. Ground-truth validation was conducted using ۱۲ permanent dual-frequency Leica GS GPS points measured every three months. Spatial hazard mapping was generated using the Inverse Distance Weighting (IDW) interpolation method in ArcGIS, and multivariate statistical analyses and correlation coefficients were applied.

Results and discussion

The results indicate significant land subsidence in the Shahrekord Plain. The maximum cumulative subsidence over the four-year study period reached ۷۷ mm, with the central plain (Region A) experiencing rates exceeding ۵ cm per year — far above the international safety threshold of ۲ mm/year. In the peripheral zone (Region B), the average annual subsidence rate was approximately ۱۵ mm, with a standard deviation of ۶ mm. The spatial pattern shows a clear concentration of subsidence in low-elevation, high-churn areas (red zones with subsidence >۴۰ mm). A strong correlation (coefficient = ۰.۸۷) was found between

groundwater decline and subsidence rates. Multivariate regression analysis explained 83% of the variance in subsidence. Spatial hazard mapping revealed that 12% of the plain area is in very high-risk category (depth to groundwater > 0.5 m and annual decline > 1.0 m), 68% in moderate risk, and 20% in low risk. Time-series analysis demonstrates accelerating subsidence, increasing from 2.1 cm/year in the first period to 3.5 cm/year in the third period. Independent validation with GPS data yielded RMSE = 1.8 mm and MAE = 1.6 mm, confirming the high accuracy of the InSAR method.

Conclusion

This study was designed using a quantitative approach based on advanced radar interferometry technology, enabling millimeter-level surface deformation measurement without extensive field presence. The results confirm the occurrence of significant subsidence in the Shahrekord Plain, with the central areas exhibiting rates above 0 cm per year and classified as very high risk. Excessive groundwater extraction, in interaction with a nine-year precipitation deficit and prolonged drought, is the principal driver of accelerating subsidence. The findings provide a new scientific foundation for evidence-based policy formulation. The results strongly emphasize the urgent need for water resource management, reduction of groundwater abstraction from the central aquifer, protection of groundwater reserves, and proactive assessment of subsidence vulnerability for urban and infrastructural development. Given the plain's location in the Zagros foothills and the high density of wells, continuous monitoring with advanced InSAR techniques combined with sustainable water policies is essential to prevent irreversible damages. This study offers a replicable model for similar alluvial plains in Chaharmahal and Bakhtiari Province and other arid regions of Iran, supporting policymakers in achieving sustainable agricultural development while preserving groundwater resources.

Funding

There is no funding support.

Authors' Contribution

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

Conflict of Interest

Authors declared no conflict of interest.

Acknowledgments

This article is an extract from a postdoctoral research project that was funded by the University of Mohaghegh Ardabili. We would like to express our gratitude and appreciation.

پایش و تحلیل خطرپذیری فرونشست دشت شهر کرد با استفاده از روش تداخل‌سنجی راداری

پژمان فاضلی دهکردی^۱، سهراب میراثی^۲✉، برهان حسین پور^۳

۱- گروه عمران، واحد شهرکرد، دانشگاه آزاد اسلامی، شهرکرد، ایران. رایانامه: Pe.fazeli@iau.ac.ir

۲- نویسنده مسئول، گروه عمران، واحد شهرکرد، دانشگاه آزاد اسلامی، شهرکرد، ایران. رایانامه: Sohrab.mirassi@iau.ac.ir

۳- گروه عمران، واحد شهرکرد، دانشگاه آزاد اسلامی، شهرکرد، ایران. رایانامه: borhan.hosinpour1366@iau.ir

اطلاعات مقاله	چکیده
نوع مقاله: مقاله پژوهشی	
تاریخ دریافت: ۱۴۰۴/۰۸/۲۷	
تاریخ بازنگری: ۱۴۰۴/۱۱/۱۹	
تاریخ پذیرش: ۱۴۰۵/۰۲/۱۸	
صص: ۱۷۷-۱۹۵	
واژگان کلیدی: فرونشست، سطح آب زیرزمینی، روش تداخل‌سنجی راداری، دشت شهرکرد.	فرونشست زمین یکی از چالش‌های جدی زیست‌محیطی و اجتماعی است که در سال‌های اخیر به‌ویژه در مناطق خشک و نیمه‌خشک ایران مورد توجه جدی قرار گرفته است. این پژوهش برای نخستین بار فرونشست زمین و تغییرات سطح آب زیرزمینی دشت شهرکرد را با استفاده از روش تحلیل سری زمانی تداخل‌سنجی راداری (InSAR) مورد بررسی قرار داده است. هدف اصلی پژوهش، تعیین دقیق میزان و نرخ خطرپذیری فرونشست به‌منظور ارائه راهکارهای پیشگیرانه بوده است. در این پژوهش با رویکرد کمی، داده‌های ماهواره Sentinel-1 در بازه زمانی ۲۰۱۹ تا ۲۰۲۳ با نرم‌افزار SARPROZ پردازش شد تا تغییر شکل سطح زمین با دقت میلی‌متری اندازه‌گیری گردد. داده‌های تداخل‌سنجی راداری با اطلاعات سطح آب زیرزمینی، بارندگی، مشخصات ژئوتکنیکی و اطلاعات چاه‌ها تلفیق شد. تحلیل‌های آماری پیشرفته شامل رگرسیون چندمتغیره و تحلیل فضایی برای شناسایی الگوهای علی به کار گرفته شد و بازدهی‌های میدانی برای اعتبارسنجی نتایج انجام پذیرفت. نتایج وجود فرونشست قابل توجه در دشت شهرکرد را تأیید می‌کند؛ به‌گونه‌ای که حداکثر نرخ فرونشست تجمعی ۷۷ میلی‌متر در دوره چهارساله اندازه‌گیری شده است. الگوی مکانی فرونشست نشان می‌دهد که بخش‌های مرکزی دشت با نرخ فرونشست سالانه بیش از ۵ سانتی‌متر، بیشترین آسیب‌پذیری را دارند که این میزان بسیار فراتر از حد مجاز بین‌المللی ۲ میلی‌متر در سال است. همبستگی قوی و معنادار (ضریب ۰.۸۷) بین افت سطح آب زیرزمینی و نرخ فرونشست مشاهده شد. کسری بارندگی نه‌ساله و خشکسالی مداوم از عوامل تشدیدکننده کلیدی بوده‌اند. در نتیجه، برداشت بی‌رویه آب زیرزمینی در تعامل با خشکسالی‌های اقلیمی، محرک اصلی فرونشست شدید و رو به تسریع در دشت شهرکرد شناسایی شد. یافته‌های پژوهش مبنای علمی لازم برای اجرای سیاست‌های فوری مدیریت آب و کاهش خطر فرونشست را فراهم می‌سازد.
استناد: فاضلی دهکردی، پژمان، میراثی، سهراب و حسین پور آقائی، برهان. (۱۴۰۵). پایش و تحلیل خطرپذیری فرونشست شهرستان شهرکرد با استفاده از روش تداخل‌سنجی راداری. <i>پژوهش‌های ژئومورفولوژی کمی</i> ، ۱۵(۱)، ۱۷۷-۱۹۵.	

مقدمه

تاکنون در دشت شهرکرد به بررسی محاسبه پدیده فرونشست زمین و تغییرات سطح آب زیرزمینی با روش تحلیل سری زمانی تداخل سنجی راداری که برای سازه‌ها و سکونتگاه‌ها بسیار مؤثر واقع شده، پرداخته نشده است. این روش یک ابزار تحقیقاتی بسیار انعطاف‌پذیر و به عنوان یک نرم‌افزار جدید و به‌روز سارپروز (SARPROZ) در بحث پردازش گسترده قلمداد می‌شود و به دلیل آسیب‌های ناشی از فرونشست زمین و تأثیرات مخرب آن بر سازه‌های دست‌ساز و پیشروی به سمت مناطق مسکونی شهرکرد که مرکز استان می‌باشد، نیاز شدیدی به کنترل و پیشگیری از این پدیده وجود دارد. هدف کلی این پژوهش تعیین میزان خطرپذیری و فرونشست دقیق منطقه با استفاده از روش تداخل سنجی راداری می‌باشد که با شناسایی علت‌ها و آسیب‌های وارد بر ساختمان‌ها بتوان بر اساس نتایج آن راهکارهای اصولی و کاربردی در جهت کنترل و جلوگیری از فرونشست را ارائه نمود. فرونشست سبب آسیب رساندن به راه‌های ارتباطی، کاهش آبدی چاه‌ها، لوله‌زایی جداره چاه‌ها، ترک خوردن سازه‌ها و دیگر سازندها می‌گردد. نمونه‌ای از این آسیب‌ها در محدوده دشت مرودشت و دشت‌های استان چهارمحال و بختیاری مورد بررسی و ارزیابی قرار گرفته است (سازمان زمین شناسی و اکتشافات معدنی کشور، ۱۳۸۴).

پدیده فرونشست در نقاط مختلفی از جهان گزارش شده است؛ از جمله در شهر ونیز ایتالیا در فاصله سال‌های ۱۹۳۰ تا ۱۹۷۳ با نشست حدود ۱۵ سانتی‌متر (گامبولاتی^۱ و همکاران، ۱۹۷۴)، بانکوک در تایلند با نشست سالانه ۱۲ سانتی‌متر، مکزیکوسیتی، تایلند، ژاپن و آمریکا. این پدیده در بیش از ۱۵۰ شهر جهان گزارش شده است (زیتون^۲ و واکشال، ۲۰۱۳). در مقیاس جهانی، بحران افت سطح آب و خسارات ناشی از آن در بین سال‌های ۱۹۵۰ تا ۱۹۷۰، که هم‌زمان با صنعتی شدن و رشد شهرنشینی بود، به اوج خود رسید. میراثی و همکاران (۱۳۹۸) به نشست زمین به دلیل پمپاژ آب در ۳۵ سال گذشته در شهر بانکوک در تایلند اشاره نمودند که حداکثر نشست سالانه ۱۲۰ میلی‌متر در اوایل دهه ۱۹۸۰ گزارش گردیده است. در اوایل دهه ۱۹۸۰، فرونشست دشت ساحلی تسالونیک (شمال یونان) به میزان حدود ۱۰ سانتی‌متر در سال گزارش شده است (فین‌وژ^۳ و همکاران، ۲۰۰۶).

در بخش‌هایی از شهر قاهره در مصر، به علت رخداد شکاف‌ها در اکثر ساختمان‌ها و همچنین نشست‌های موضعی، از روش‌های ژئوالکتریک و انکسار امواج لرزه‌ای جهت شناسایی لایه‌های خاک، موقعیت گسل و ناهنجاری‌های زیرسطحی استفاده شده است؛ که مشخص شده عمده دلایل آسیب‌های وارده ناشی از وجود خاک رس ماری اشباع و وجود گسل در لایه‌ای زیر ساختمان‌های اجرا شده بوده است (عرفه^۴ و همکاران، ۲۰۱۴). در کشور هلند از روش‌های امواج لرزه‌ای در جهت شناسایی تغییرات پارامترهای الاستیک خاک در اثر فرونشست سطح زمین به علت معدن‌کاری استفاده شده است. نتایج به‌دست‌آمده نشان داد که دلیل اصلی این فرونشست‌ها ضخامت زیاد لایه نرم منطقه بوده است و برخی نوسانات نیز در نتایج مشاهده گردید که احتمالاً به خاطر وجود آب زیرزمینی می‌باشد (هو^۵ و همکاران، ۲۰۰۴).

گزارش‌های متعددی از عوارض افت سطح آب، خصوصاً از نقاط خشک و کم‌باران در سراسر جهان ارائه گردیده است. یکی از مهم‌ترین خسارات افت سطح آب در جهان در اثر بهره‌برداری بی‌رویه از آب‌های زیرزمینی جهت مصارف کشاورزی در ایالت کالیفرنیا در آمریکا گزارش شده است؛ تا سال ۱۹۶۹ مقدار نشست در این ایالت ۸ متر گزارش گردید (لارسون^۶ و همکاران، ۲۰۰۱). بیش از ۸۰ درصد فرونشست‌های شناسایی شده در ایالات متحده ناشی از تأثیر انسان روی

¹Gambolati

²Zeitoun

³ Phien-wej

⁴ Araffa

⁵ Hu, R. L

⁶ Larson

آب‌های زیر سطحی است که اغلب به دلیل نادیده گرفتن عواقب زیست‌محیطی ناشی از استفاده نادرست از آب و زمین می‌باشد. در ایالات متحده، بیش از ۱۷۰۰۰ مایل مربع در ۴۵ ایالت، به‌طور مستقیم توسط فرونشست تحت تأثیر قرار گرفته‌اند. علل اصلی شامل تراکم سیستم آبخوان، زهکشی خاک آلی، استخراج از معادن زیرزمینی، انقباض خاک رس ناشی از برداشت آب، تراکم طبیعی، فروچاله و ذوب لایه منجمد دائمی اعماق زمین می‌باشند (پولند^۱، ۱۹۸۱).

شایان و همکاران (۱۳۷۲) در بخش حوزه قره‌چای شمال همدان با استفاده از روش تداخل‌سنجی راداری میزان فرونشست زمین در دشت همدان را بررسی کردند که نتایج آن نشان داد به ازای هر ۷ متر افت سطح آب زیرزمینی، سطح زمین حدود ۱۸ سانتی‌متر نشست می‌نماید. در منطقه سیرجان، به ازای هر ۱۰ متر افت سطح آب زیرزمینی، سطح زمین حدود ۲۷ سانتی‌متر نشست می‌کند و در رفسنجان نیز به ازای هر ۱۰ متر افت سطح آب، سطح زمین حدود ۴۲ سانتی‌متر نشست گزارش شده است (پولند، ۱۹۸۱). لازم به ذکر است در ایران اولین بار فرونشست زمین در دشت رفسنجان در سال ۱۳۴۶ همراه با پدیده لوله‌زایی در چاه‌های کشاورزی مشاهده شده است (عباس‌نژاد، ۱۳۷۷).

شفیعی و همکاران (۱۳۹۹) با استفاده از روش تداخل‌سنجی راداری میزان نشست دشت نورآباد فارس و علل آن را بررسی کردند. نتایج نشان داد که در محدوده دشت در بازه زمانی ۱۲ ساله، بیشترین میزان افت آب زیرزمینی حدود ۲۲ متر در بخش‌های شرقی، جنوبی و مرکزی آبخوان واقع می‌باشد و نرخ نشست در هر سال میانگین ۴ سانتی‌متر می‌باشد. ایمانی و همکاران (۱۴۰۳) پدیده فرونشست شهر مشهد را از طریق بررسی ارتباط میزان افت سطح آب با فرونشست زمین طی سال‌های اخیر مورد بررسی قرار دادند و به این نتیجه رسیدند که فرونشست زمین حدود ۶ سانتی‌متر در بازه زمانی ۱۴۰۰ و ۱۴۰۱ منجر به ایجاد خساراتی به تأسیسات موجود در سطح این دشت، به‌ویژه ایستگاه‌های پمپاژ، شده است. خرمی و همکاران (۱۳۹۸) با محاسبه میزان فرونشست و خسارات شهر مشهد با استفاده از روش تداخل‌سنجی راداری نشان دادند که نرخ فرونشست بسیار بالایی در نواحی شمال غرب و شمال شهر مشهد با بیشینه‌ای حدود ۱۴ سانتی‌متر در سال رخ داده است.

گلی^۲ و همکاران (۲۰۱۹) ارزیابی آسیب‌پذیری فرونشست زمین سکونتگاه‌های روستایی استان فارس را با استفاده از روش تداخل‌سنجی راداری مورد ارزیابی قرار دادند و میزان نشست و خسارات وارده را بررسی کردند. شفیی و همکاران (۱۳۹۹) در بررسی پدیده نشست در منطقه ۱۸ تهران و الگوی توزیع فضایی نواحی مسکون نشان دادند که استقرار بخش قابل‌توجهی از مساکن این منطقه در عرصه درگیر با پدیده نشست است. وقوع فرونشست می‌تواند عاملی در ایجاد و تشدید آسیب‌پذیری کانون فعالیت‌های انسانی واقع در بسترهایی با ریزساخت مخاطره‌آمیز طبیعی باشد. همچنین هم‌زمانی سانحه نشست و زلزله می‌تواند برای این منطقه فاجعه‌آمیز باشد.

یمانی و همکاران با بررسی فرونشست دشت لردگان با استفاده از روش تداخل‌سنجی راداری سنتینل-۱ (۲۰۱۷-۲۰۲۳) و نرم‌افزار *SNAP*، میزان فرونشست سالانه حدود ۳ سانتی‌متر را شناسایی کردند و ارتباط مستقیم بین افت سطح آب زیرزمینی ناشی از برداشت بی‌رویه و فرونشست زمین را تأیید نمودند؛ کاهش ۱۵ متری سطح آب زیرزمینی از سال ۲۰۰۸ تاکنون نگرانی‌ها را افزایش داده است. افضلی و همکاران (۱۳۹۴) فرونشست زمین در دشت دامغان را با روش تداخل‌سنجی تفاضلی (*DInSAR*) و تصاویر *ERS* مورد بررسی قرار دادند و نتایج نشان‌دهنده نرخ فرونشست تا ۱۰ سانتی‌متر در سال در مناطق مرکزی دشت بود.

کریمی و المدرسی (۱۳۹۹) فرونشست دشت مرودشت در استان فارس را با استفاده از روش *InSAR* و تکنیک *PSInSAR* بررسی کردند. نتایج نشان‌دهنده نرخ فرونشست تا ۵ سانتی‌متر در سال در مناطق مرکزی بود. این پژوهش

¹ Poland

² Goli

با استفاده از ۲۵ تصویر *Sentinel-1* و پردازش داده‌ها با نرم‌افزار *StaMPS* و تحلیل سری‌های زمانی و شناسایی نقاط پراکنده پایدار (*PS*) انجام شد. عباسی^۱ و همکاران (۲۰۱۹) فرونشست زمین در شهر ابوت‌آباد پاکستان را با استفاده از تکنیک *PSInSAR* و پردازش داده‌های راداری ماهواره سنتینل-۱ (۲۰۱۷-۲۰۱۹) در نرم‌افزار سارپروز (*SARPROZ*) بررسی کردند. نتایج نشان داد نرخ فرونشست از ۳۰- میلی‌متر در سال در ۲۰۱۷ به ۱۵۰- میلی‌متر در سال در ۲۰۱۹ افزایش یافته است که همبستگی مستقیمی با برداشت بی‌رویه آب‌های زیرزمینی دارد.

گزالز^۲ و همکاران (۲۰۲۰) با بررسی فرونشست کلان‌شهر مکزیکوسیتی با تکنیک *SBAS-InSAR* و پردازش داده‌های راداری سنتینل-۱ و *ALOS-2* در نرم‌افزارهای *StaMPS* و *SNAP*، فرونشست زمین در مکزیکوسیتی را طی بازه ۲۰۱۵ تا ۲۰۲۰ بررسی کردند که نتایج نشان‌دهنده نرخ فرونشست تا ۴۰ سانتی‌متر در سال در مناطق مرکزی شهر بوده است. تاکاهاشی^۳ و همکاران (۲۰۲۲) با بررسی ارزیابی ریسک فرونشست جاکارتا با استفاده از تداخل سنجی راداری در بازه ۲۰۱۸ تا ۲۰۲۲ و نرم‌افزارهای *GMTSAR* و *SNAP*، نتایجی نشان‌دهنده نرخ فرونشست تا ۲۵ سانتی‌متر در سال در مناطق شمالی شهر به‌دست آوردند.

روش‌شناسی پژوهش

شرح انجام پژوهش

پژوهش حاضر در محدوده دشت شهرکرد با رویکردی کمی و مبتنی بر سنجش از دور راداری انجام شد. داده‌های مورد نیاز از طریق سه روش مکمل گردآوری گردید:

روش نخست شامل بازدیدهای میدانی دقیق و منظم بود که پژوهشگران با حضور در منطقه، وضعیت فیزیکی و عینی دشت را بررسی کردند، علائم ظاهری فرونشست نظیر ترک‌خوردگی سازه‌ها، نشست جاده‌ها و لوله‌زایی چاه‌ها را مستند نمودند و نتایج حاصل از تحلیل‌های ماهواره‌ای را اعتبارسنجی کردند.

روش دوم بر پایه گردآوری آمار و اطلاعات ثانویه از منابع معتبر سازمانی استوار بود که شامل داده‌های بارندگی از ایستگاه‌های هواشناسی، نوسانات سطح آب زیرزمینی از چاه‌های پیژومتری، و مشخصات ژئوتکنیکی خاک نظیر عمق، جنس، ضخامت لایه‌های مختلف و عمق سنگ‌بستر می‌شد.

روش سوم متکی بر پردازش تصاویر ماهواره‌ای راداری بود که امکان تعیین دقیق میزان نشست سطح زمین در بازه زمانی ۲۰۱۹ تا ۲۰۲۳ را فراهم ساخت. در این روش از تصاویر ماهواره *Sentinel-1* با سنسور راداری بانده *C*، قدرت تفکیک مکانی ۲۰×۵ متر و پلاریزاسیون *VV-VH* استفاده شد. بازه زمانی ۲۰۱۹ تا ۲۰۲۳ به دلیل در دسترس بودن داده‌های پیوسته و منسجم ماهواره *Sentinel-1* با تناوب تکرار ۱۲ روزه، انطباق با دوره بحرانی افت سطح آب زیرزمینی دشت شهرکرد، و امکان تحلیل سری زمانی با حداقل ۶ تصویر برای اجرای روش *PSInSAR* انتخاب گردید.

پژوهشگران در این مطالعه از طیف گسترده‌ای از تجهیزات زمینی و فضایی بهره گرفتند. تجهیزات *GPS* دوفرکانسه با دقت میلی‌متری و دستگاه‌های ترازبایی الکترونیکی دیجیتال برای اندازه‌گیری دقیق تغییرات ارتفاعی نقاط کنترل زمینی و اعتبارسنجی نتایج تداخل سنجی راداری به‌کار گرفته شدند. این اندازه‌گیری‌ها در ۱۲ نقطه کنترل ثابت در سطح دشت، در فواصل زمانی سه‌ماهه طی دوره مطالعه انجام پذیرفت.

تصاویر راداری *Sentinel-1A* با فرمت *SLC* (*Single Look Complex*) در حالت تصویربرداری *IW* (*Interferometric Wide Swath*) از پایگاه داده آژانس فضایی اروپا (*ESA*) دریافت شد. این تصاویر دارای

¹ Abbasi

² Gonzalez

³ Takahashi

پوشش طیفی باند C (طول موج ۵۶ سانتی متر) و عرض نوار تصویربرداری ۲۵۰ کیلومتر هستند که پوشش کامل دشت شهرکرد را تأمین می کنند. در مجموع ۶ تصویر در سه دوره زمانی مجزا برای تولید تداخل نگارها انتخاب شدند. داده های سطح آب زیرزمینی ۲۳ حلقه چاه پیرومتری برای دوره ۱۰ ساله (۲۰۱۳ تا ۲۰۲۳) از شرکت آب منطقه ای استان چهارمحال و بختیاری فراهم و استخراج گردید. اداره کل هواشناسی استان داده های بارندگی روزانه ۵ ایستگاه سینوپتیک و باران سنجی منطقه را برای همین دوره ارائه نمود. سازمان زمین شناسی و اکتشافات معدنی کشور نقشه های زمین شناسی ۱:۱۰۰,۰۰۰ ورقه شهرکرد (شماره ۶۳۵۵) و نقشه های ۱:۲۵,۰۰۰ تفصیلی محدوده دشت که حاوی اطلاعات دقیق سازندهای زمین شناسی، گسل ها، آبرفت های کواترنری و لایه های رسی آبخوان می باشند را در اختیار پژوهش قرار داد. داده های سطح آب زیرزمینی از طریق قرائت ماهانه تراز ایستابی در ۲۳ حلقه چاه پیرومتری که توسط شرکت آب منطقه ای چهارمحال و بختیاری نصب و پایش می شوند، گردآوری گردید. موقعیت این چاه ها در نقاط مختلف دشت از جمله بخش های مرکزی، شمالی، جنوبی و حاشیه ای توزیع شده اند و عمق آن ها بین ۳۰ تا ۸۰ متر متغیر است. اندازه گیری سطح آب با استفاده از سنسورهای فشار الکترونیکی دیجیتالی و به صورت خودکار انجام می پذیرد. این داده ها برای تهیه نقشه های پهنه بندی افت سطح ایستابی با روش درون یابی IDW در محیط GIS و تحلیل همبستگی با نرخ فرونشست به دست آمده از تصاویر راداری مورد استفاده قرار گرفتند.

داده های بارندگی روزانه از ۵ ایستگاه هواشناسی سینوپتیک و باران سنجی واقع در محدوده دشت شهرکرد و حومه، شامل ایستگاه های شهرکرد، سامان، فارس، بروجن و کیار، برای بازه زمانی ۲۰۱۳ تا ۲۰۲۳ از اداره کل هواشناسی استان چهارمحال و بختیاری دریافت شد. این داده ها برای تحلیل رابطه بین الگوهای خشکسالی و روند فرونشست به کار گرفته شدند.

داده های تراز یابی دقیق از طریق برداشت های GPS دیفرانسیل با دستگاه های دوفرکانسه Leica GS16 در ۱۲ نقطه کنترل ثابت که در سطح دشت مستقر شده اند، در فواصل زمانی سه ماهه طی دوره ۲۰۱۹ تا ۲۰۲۳ گردآوری شد. پردازش داده های GPS با نرم افزار Leica Geo Office و با استفاده از شبکه ایستگاه های دائمی CORS انجام پذیرفت. دقت اندازه گیری های ارتفاعی در حدود ± 2 تا ± 5 میلی متر بود که برای اعتبارسنجی نتایج تداخل سنجی راداری کافی است. نقشه های زمین شناسی ۱:۱۰۰,۰۰۰ ورقه شهرکرد (شماره ۶۳۵۵) که توسط سازمان زمین شناسی و اکتشافات معدنی کشور تهیه شده اند، حاوی اطلاعات دقیق در مورد گسترش سازندهای زمین شناسی، موقعیت گسل ها، ضخامت آبرفت های کواترنری و توزیع لایه های رسی آبخوان می باشند. علاوه بر این، نقشه های کاربری اراضی ۱:۲۵,۰۰۰ منطقه که توسط سازمان جنگل ها، مراتع و آبخیزداری کشور تهیه شده اند، جهت تحلیل تأثیر انواع کاربری زمین بر میزان فرونشست به کار گرفته شدند. موقعیت دقیق چاه های بهره برداری از آب زیرزمینی نیز از بانک اطلاعاتی سازمان آب منطقه ای دریافت و برای بررسی رابطه بین تراکم مکانی چاه ها و شدت فرونشست استفاده شد.

تجزیه و تحلیل کلیه داده های گردآوری شده با استفاده از نرم افزار تخصصی سارپروز (SARPROZ) که توسط شرکت ایتالیایی Danesi Engineering توسعه یافته انجام شد. این نرم افزار یکی از پیشرفته ترین ابزارهای موجود در زمینه پردازش تصاویر راداری است و قادر به پردازش انواع تصاویر راداری از جمله Sentinel-1، COSMO-SkyMed، TerraSAR-X، RADARSAT و ALOS PALSAR می باشد. مهم ترین ویژگی این نرم افزار، پشتیبانی از تکنیک های پیشرفته SBAS (Small Baseline و PSInSAR (Persistent Scatterer Interferometry) Subset است که امکان اندازه گیری جابه جایی های زمین با دقت میلی متری را فراهم می کند.

پردازش تداخل سنجی راداری (InSAR) داده های دشت شهرکرد

در این پژوهش، پردازش تداخل سنجی راداری بر روی ۶ تصویر SLC ماهواره Sentinel-1A در سه دوره زمانی مجزا (۲۰۱۹-۲۰۲۰، ۲۰۲۰-۲۰۲۱ و ۲۰۲۱-۲۰۲۳) اعمال گردید. برای هر دوره، یک جفت تصویر (Master و Slave) انتخاب شد و فرآیند پردازش در نرم‌افزار SARPROZ طی مراحل زیر انجام پذیرفت:

انتخاب جفت تصاویر بر اساس دو معیار اصلی صورت گرفت: خط مبنای مکانی عمودی (Perpendicular Baseline) و فاصله زمانی (Temporal Baseline). خط مبنای مکانی عمودی در دوره اول صفر، در دوره دوم ۱۱- و در دوره سوم ۱۱- متر تعیین شد که همگی به مراتب کمتر از خط مبنای بحرانی ماهواره Sentinel-1 (حدود ۵۰۰۰ متر) هستند و کیفیت مناسب تداخل سنجی را تضمین می‌کنند. فواصل زمانی دوره‌ها به ترتیب ۲۰۴، ۴۵۶ و ۴۹ روز بودند که متناسب با هدف پایش فرونشست تدریجی در منطقه انتخاب گردیدند. در مرحله هم‌مرجع سازی، ابتدا محدوده دشت شهرکرد از تصاویر اصلی برش داده شد تا سرعت پردازش افزایش یابد. سپس فرآیند Apply-orbit-file برای اصلاح دقیق پارامترهای مداری هر دو تصویر اجرا گردید. از عملگر Back Geocoding با استفاده از مدل ارتفاعی رقومی SRTM با وضوح ۱۰ متر برای ثبت دقیق هندسی دو تصویر در هر دوره استفاده شد. در نهایت عملگر Enhanced Spectral Diversity برای حذف خطاهای فازی باقیمانده در جهت آزمون اعمال گردید.

تداخل‌نگار اولیه از ضرب مختلط تصویر Master در مزدوج مختلط تصویر Slave تولید شد. برای کاهش نویز، عملیات میانگین‌گیری (Multi-looking) با نسبت ۴ در جهت برد و ۱ در جهت آزمون اعمال گردید. اثر فاز توپوگرافی با استفاده از مدل ارتفاعی رقومی SRTM با وضوح ۱۰ متر از تداخل‌نگار حذف شد تا تداخل‌نگار تفاضلی (DInSAR) حاوی صرفاً سیگنال تغییر شکل زمین به دست آید. فیلتر Goldstein با پنجره ۳۲×۳۲ پیکسل برای کاهش نویز فازی و بهبود کیفیت تداخل‌نگار اعمال شد.

فرآیند بازیابی فاز (Phase Unwrapping) با استفاده از الگوریتم SNAPHU در نرم‌افزار SARPROZ اجرا گردید. فاز بازیابی شده با استفاده از رابطه $d = (\lambda/4\pi) \times \Delta\phi$ به جابه‌جایی عمودی در راستای دید ماهواره (LOS) تبدیل شد؛ که در آن λ طول موج ماهواره Sentinel-1 (۵۶ سانتی‌متر) و $\Delta\phi$ اختلاف فاز است. در نهایت، فرآیند Range Doppler Terrain Correction با استفاده از مدل ارتفاعی SRTM اعمال شد تا نتایج به سیستم مختصات جغرافیایی WGS84 تبدیل و قابل تطبیق با سایر لایه‌های اطلاعاتی گردند.

نرخ میانگین سالانه فرونشست برای هر دوره زمانی از تقسیم مقدار جابه‌جایی کل بر مدت زمان دوره محاسبه شد. نتایج سه دوره در محیط نرم‌افزار Google Earth و GIS با یکدیگر و با نقشه‌های سطح آب زیرزمینی تطبیق داده شدند تا الگوی مکانی و روند زمانی فرونشست دشت شهرکرد تحلیل گردد.

موقعیت جغرافیایی منطقه شهرکرد در استان چهارمحال بختیاری

شهرستان شهرکرد در طول شرقی ۴۹ درجه و ۲۲ دقیقه تا ۵۰ درجه و ۴۹ دقیقه و از نظر عرض جغرافیایی در عرض شمالی ۳۲ درجه و ۲۰ دقیقه تا ۳۳ درجه و ۳۱ دقیقه قرار گرفته است. موقعیت جغرافیایی دشت شهرکرد در سطح استان چهارمحال و بختیاری در شکل (۱) و موقعیت آن در سطح کشور ایران در شکل (۲) نمایش داده شده است.

به لحاظ وضعیت توپوگرافی، این شهرستان در بخش شرقی سلسله جبال زاگرس و در حاشیه گسل زاگرس قرار گرفته است. مهم‌ترین ارتفاعات آن کوه جهان‌بین است که با ارتفاع بیش از ۳۳۰۰ متر، بلندترین نقطه شهرستان را تشکیل می‌دهد. این شهرستان در قسمت شمال شرقی استان چهارمحال و بختیاری واقع شده و از شمال به شهرستان‌های سامان و بن، از شرق به استان اصفهان، از غرب به شهرستان فارس و از جنوب به شهرستان‌های فرخ‌شهر و کیار محدود می‌گردد. فواصل بین رشته‌کوه‌ها را دشت‌های وسیعی فراگرفته است که از عمده‌ترین آن‌ها می‌توان به دشت شهرکرد و

افت سطح آب زیرزمینی کاهش می‌یابد، اسکلت دانه‌ای خاک تحت تنش مؤثر بیشتری قرار گرفته و فشردگی غیرقابل برگشت رخ می‌دهد. ضخامت زیاد این لایه‌های نرم در اعماق آبخوان دشت شهرکرد، این منطقه را به‌ویژه در برابر فرونشست آسیب‌پذیر ساخته است.

ب) عوامل هیدرولوژیکی

برداشت بی‌رویه از آب‌های زیرزمینی از طریق چاه‌های عمیق و نیمه‌عمیق مجاز و غیرمجاز، مهم‌ترین عامل انسانی تسریع‌کننده فرونشست در دشت شهرکرد به‌شمار می‌رود. گسترش کشاورزی سنتی و صنعتی در محدوده دشت، نیاز آبی بالایی ایجاد کرده که عمدتاً از طریق بهره‌برداری از منابع آب زیرزمینی تأمین می‌شود. این برداشت مداوم و فزاینده منجر به افت مستمر سطح ایستابی آبخوان شده است؛ به گونه‌ای که بر اساس داده‌های سازمان آب منطقه‌ای استان چهارمحال و بختیاری، عمق آب زیرزمینی در بخش‌های مرکزی دشت در سال آبی ۱۴۰۳-۱۴۰۴ به بیش از ۶۸ متر رسیده است.

ج) عوامل اقلیمی

دشت شهرکرد در اقلیم نیمه‌خشک واقع شده و متوسط بارندگی سالانه آن در محدوده ۳۰۰ تا ۴۰۰ میلی‌متر قرار دارد. این میزان بارندگی برای تغذیه طبیعی آبخوان و جبران برداشت‌های صورت گرفته کافی نیست. وقوع خشکسالی‌های پیاپی در دهه اخیر این وضعیت را وخیم‌تر کرده است؛ کاهش بارندگی نه تنها تغذیه آبخوان را به شدت محدود کرده، بلکه وابستگی کشاورزان به منابع آب زیرزمینی را نیز افزایش داده است. این چرخه معیوب میان کاهش بارندگی، افزایش برداشت از آبخوان و افت سطح آب زیرزمینی، در نهایت منجر به تشدید و تسریع فرونشست در دشت شهرکرد شده است. در مجموع، تعامل هم‌زمان این سه دسته از عوامل زمین‌شناختی، هیدرولوژیکی و اقلیمی، دشت شهرکرد را به یکی از مناطق با خطرپذیری بالا در برابر فرونشست زمین تبدیل کرده است.

یافته‌های تحقیق

داده‌ها و روش‌ها

در این مطالعه، پردازش تداخل سنجی راداری بر روی ۶ تصویر SLC ماهواره Sentinel-1A متعلق به آژانس فضایی اروپا (ESA) با پلاریزاسیون VV-VH و در حالت تصویربرداری IW انجام شد. تصاویر در سه دوره زمانی مجزا شامل دو دوره تقریباً یک ساله و یک دوره دو ساله گردآوری شدند (جدول ۱). انتخاب این تصاویر براساس کمینه سازی خط مبنای مکانی عمودی برای کاهش اثر توپوگرافی و تناسب فاصله زمانی با نرخ فرونشست مورد انتظار در منطقه صورت گرفت.

به منظور سنجش ارتباط بین افت سطح آب زیرزمینی و فرونشست زمین، نقشه‌های تراز سطح ایستابی آبخوان دشت شهرکرد با روش درون‌یابی IDW در محیط GIS تهیه و با نقشه‌های فرونشست حاصل از تداخل سنجی راداری در نرم‌افزار SARPROZ و Google Earth تطبیق داده شدند. مدل ارتفاعی رقومی SRTM با وضوح مکانی ۱۰ متر برای حذف اثر فاز توپوگرافی از تداخل‌نگارها و اصلاح هندسی تصاویر به کار گرفته شد. تمامی پردازش‌ها در محیط سیستم عامل ویندوز با استفاده از نرم‌افزار تخصصی SARPROZ انجام پذیرفت.

جدول ۱: مشخصات تصاویر سنتینل مورد استفاده در پژوهش

دوره زمانی	نوع ماهواره	تاریخ اخذ تصویر	نوع پردازش تصویر	نوع گذر تصویر	کانال	قطبش	جهت مدار	زاویه مدار	خط مبنا عمودی
دوره	Sentinel-1A	۱۳/۱۱/۲۰۱۸	IW.SLC	Master	C	VV-VH	Descending	۳۵	۰

اول	Sentinel-1A	۵/۶/۲۰۱۹	IW.SLC	Slave	C	VV-VH	Dessending	۳۵	۹۰-
دوره	Sentinel-1A	۱۴/۳/۲۰۲۰	IW.SLC	Master	C	VV-VH	Aessending	۲۸	۰
دوم	Sentinel-1A	۱۳/۶/۲۰۲۱	IW.SLC	Slave	C	VV-VH	Aessending	۲۸	۱۱-
دوره	Sentinel-1A	۲۲/۱۲/۲۰۲۲	IW.SLC	Master	C	VV-VH	Dessending	۳۵	۱۱-
سوم	Sentinel-1A	۹/۲/۲۰۲۳	IW.SLC	Slave	C	VV-VH	Dessending	۳۵	۱۷

انتخاب یک جفت تصویر تداخل سنجی

در این پژوهش، انتخاب جفت تصاویر راداری برای دشت شهرکرد بر اساس شرایط خاص منطقه و هدف پایش فرونشست تدریجی انجام شد. در مجموع ۶ تصویر SLC از ماهواره Sentinel-1A از پایگاه داده Alaska Satellite Facility دریافت گردید و برای هر یک از سه دوره زمانی، یک جفت تصویر (Master) و (Slave) انتخاب شد. مقادیر خط مبنای عمودی در سه دوره به ترتیب صفر، ۱۱- و ۱۷+ متر انتخاب شدند. این مقادیر به عمد در حداقل ممکن نگه داشته شدند تا اثر توپوگرافی دشت شهرکرد که دارای تغییرات ارتفاعی قابل توجه در حاشیه‌های کوهستانی است، در تداخل نگار به حداقل برسد و سیگنال فرونشست با دقت بیشتری استخراج گردد. فواصل زمانی دوره‌های اول، دوم و سوم نیز به ترتیب ۲۰۴، ۴۵۶ و ۴۹ روز تعیین شدند. دوره‌های یک ساله و دو ساله به منظور پوشش یک سیکل هیدرولوژیکی کامل در دشت شهرکرد انتخاب شدند تا تأثیر نوسانات فصلی سطح آب زیرزمینی بر فرونشست قابل تحلیل باشد. دوره کوتاه مدت ۴۹ روزه نیز برای بررسی تغییرات سریع در بازه زمانی زمستان ۲۰۲۲ تا بهار ۲۰۲۳ که با دوره حداکثر برداشت آب زیرزمینی برای کشاورزی در منطقه همزمان است، انتخاب گردید.

از نظر پلاریزاسیون، کانال VV به عنوان کانال اصلی پردازش انتخاب شد؛ زیرا این پلاریزاسیون برای پایش تغییر شکل سطح زمین در مناطق کشاورزی و شهری مانند دشت شهرکرد حساسیت بیشتری دارد. همچنین تصاویر دوره اول و سوم با مدار نزولی (Descending) و تصاویر دوره دوم با مدار صعودی (Ascending) اخذ شدند تا امکان بررسی جابه‌جایی‌های زمین از دو زاویه دید متفاوت فراهم گردد و اثر سایه‌اندازی توپوگرافی در حاشیه‌های کوهستانی دشت به حداقل برسد. مشخصات کامل هر شش تصویر در جدول (۱) ارائه شده است.

هم مرجع سازی تصویر یک

برای انجام این مرحله بسیار مهم، از پارامترهای مداری هر دو تصویر به همراه مدل ارتفاعی رقومی منطقه و استفاده از نقاط پراکندگی ثابت استفاده می‌شود. برای این منظور، ابتدا منطقه مورد نظر برای سرعت در پردازش تصویر از تصاویر اصلی جدا شد. پس از برش تصاویر برای اصلاح مداری تصویر، فرآیند Apply-orbit-file روی آنها انجام شد. سپس از عملگر Back Geocoding استفاده گردید. این عملگر با استفاده از بردارهای دو محصول و یک مدل ارتفاعی رقومی، دو تصویر جدا شده از منطقه را از دو بازه زمانی مختلف با زیرباند یکسان ثبت می‌کند. در مرحله بعد، از عملگر Enhanced Spectral Diversity برای استفاده از یک آزمون و برد ثابت برای کل تصاویر استفاده شد.

تولید تداخل نگار

در این پژوهش، تداخل نگار از ضرب مختلط هر جفت تصویر Master و Slave پس از هم‌مرجع‌سازی دقیق آنها تولید شد. با توجه به اینکه تصاویر Sentinel-1A از سه زیرنوار IW1، IW2 و IW3 تشکیل شده‌اند و محدوده دشت شهرکرد در زیرنوار IW1 و انفجارهای ۳ تا ۷ قرار دارد، از عملگر TOPS Deburst برای ادغام انفجارها و حذف فضاهای خالی میان آنها استفاده شد.

برای هر سه دوره زمانی، تداخل نگار اولیه تولید و سپس اثر فاز توپوگرافی با استفاده از مدل ارتفاعی رقومی SRTM با

وضوح ۱۰ متر از آن حذف گردید تا تداخل‌نگار تفاضلی (DInSAR) حاوی صرفاً سیگنال تغییر شکل زمین به‌دست آید. به‌منظور کاهش نویز فازی و بهبود کیفیت تداخل‌نگارهای دشت شهرکرد که به دلیل پوشش کشاورزی متنوع از همدوسی متوسطی برخوردار بودند، فیلتر Goldstein با پنجره 32×32 پیکسل اعمال شد. پس از فیلترگذاری، فرآیند میانگین‌گیری (Multi-looking) با نسبت ۴ در جهت برد و ۱ در جهت آزمون انجام پذیرفت تا پیکسل‌های تداخل‌نگار به شکل مربعی درآمده و قابلیت تفسیر مکانی بهتری داشته باشند.

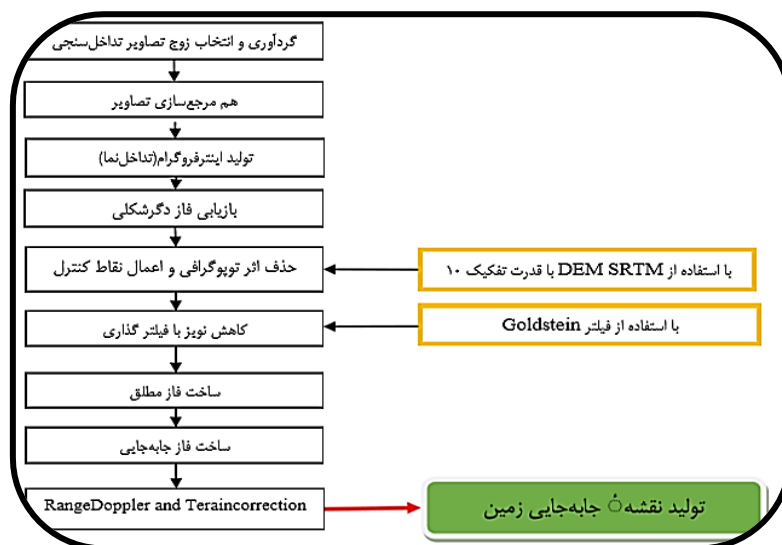
بررسی نقشه‌های همدوسی حاصله نشان داد که بخش‌های مرکزی دشت شهرکرد که عمدتاً دارای پوشش مسکونی و صنعتی هستند، مقادیر همدوسی بالاتری (بیش از ۰٫۶) نسبت به اراضی کشاورزی اطراف (۰٫۳ تا ۰٫۵) دارند. این امر انتخاب روش PSInSAR را برای استخراج دقیق نرخ فرونشست در بخش‌های شهری و روش SBAS را برای پوشش نواحی کشاورزی توجیه می‌کند. نتایج تداخل‌نگارهای سه دوره در شکل‌های (۴)، (۵) و (۶) ارائه شده‌اند.

بازیابی فاز دگرشکلی

پس از تولید تداخل‌نگارهای تفاضلی برای سه دوره زمانی مورد مطالعه، فرآیند بازیابی فاز (Phase Unwrapping) با استفاده از الگوریتم SNAPHU در نرم‌افزار SARPROZ اجرا گردید. برای این منظور، ابتدا با استفاده از عملگر Export Snaphu، خروجی تداخل‌نگار فیلترشده از نرم‌افزار SNAP به SARPROZ منتقل شد و فازهای پیچیده به فاز مطلق تبدیل گردیدند.

اثر مؤلفه‌های توپوگرافی، مداری و جوی از تداخل‌نگار حذف شد تا صرفاً سیگنال دگرشکلی زمین باقی بماند. حذف اثر توپوگرافی با استفاده از مدل ارتفاعی رقومی SRTM با وضوح ۱۰ متر انجام پذیرفت که با توجه به تغییرات توپوگرافی قابل توجه در حاشیه‌های کوهستانی دشت شهرکرد، این مرحله از اهمیت ویژه‌ای برخوردار بود. اثرات جوی نیز با استفاده از مدل‌های تأخیر تروپوسفری در نرم‌افزار SARPROZ تصحیح گردید.

فازهای بازیابی‌شده سپس با استفاده از رابطه $d = (\lambda/4\pi) \times \Delta\phi$ به جابه‌جایی عمودی در راستای دید ماهواره (LOS) تبدیل شدند؛ که در آن λ طول موج ماهواره Sentinel-1 (۵٫۶ سانتی‌متر) و $\Delta\phi$ فاز مطلق بازیابی‌شده است. در مرحله نهایی، فرآیند Range Doppler Terrain Correction با استفاده از مدل ارتفاعی SRTM اعمال شد تا اعوجاج‌های هندسه تصویربرداری راداری اصلاح و نتایج به سیستم مختصات جغرافیایی WGS84 تبدیل گردند. نرخ سالانه فرونشست برای هر دوره از تقسیم مقدار جابه‌جایی کل بر مدت زمان هر دوره محاسبه شد. مراحل کامل پردازش در شکل (۳) نشان داده شده است.



شکل ۳. فلوچارت (مراحل انجام تداخل‌سنجی راداری)

روش بررسی میزان تغییرات سطح آب زیرزمینی

در این مرحله، به منظور شناسایی و ارزیابی روند و اثرات برداشت بیش از حد از آبخوان دشت شهرکرد، ابتدا داده‌های مربوط به افت سطح آب زیرزمینی از چاه‌های مشاهده‌ای در منطقه مورد مطالعه برای یک دوره ۱۰ ساله از سازمان آب منطقه‌ای استان چهارمحال و بختیاری اخذ و به دو دوره مطالعاتی در سال‌های ۲۰۲۳-۲۰۱۹ تقسیم شد تا نقشه سطح ایستابی آبخوان شهرکرد تهیه شود. سپس، برای بررسی تغییرات کمی آب زیرزمینی، اطلاعات مربوط به داده‌های هیدروگراف‌های آب منطقه‌ای شهرکرد به طور دقیق جمع‌آوری و تصاویر ماهواره‌ای بدست آمده از موقعیت مطالعاتی در نرم‌افزار سارپروز داده شده و میزان سطح ایستابی آب‌های زیرزمینی و فرونشست دشت مشخص و تحلیل و پایش شده است. نقشه‌های پهنه‌بندی افت سطح آب زیرزمینی در منطقه مورد مطالعه با استفاده از روش درونیابی IDW تهیه شد (شکل ۳). روش درونیابی IDW بر این فرض استوار است که با افزایش فاصله، اثر پدیده مورد نظر کاهش می‌یابد. به عبارت دیگر، پدیده پیوسته در نقاط اندازه‌گیری نشده بیشترین شباهت را به نزدیکترین نقاط نمونه‌برداری شده دارد، بنابراین برای تخمین نقاط ناشناخته، نمونه‌های اطراف باید سهم بیشتری نسبت به نمونه‌هایی که در فاصله دورتری قرار دارند، داشته باشند. در این مدل، فاصله به عنوان وزن متغیر شناخته شده در پیش‌بینی نقاط اندازه‌گیری نشده استفاده می‌شود زیرا نقش متغیر پیوسته در تأثیرگذاری با فاصله از محل نقطه ناشناخته کاهش می‌یابد. بنابراین، با افزایش فاصله داده‌های شناخته شده از نقطه ناشناخته، وزن‌ها باید بر اساس فاصله کاهش یابند، بنابراین فواصل معکوس می‌شوند. به عبارت دیگر، معکوس فاصله به عنوان وزن نقاط اندازه‌گیری شده در پیش‌بینی نقاط ناشناخته استفاده می‌شود، به همین دلیل است که این مدل، معکوس فاصله وزنی نامیده می‌شود. از سوی دیگر، می‌توان با استفاده از توان معکوس فاصله، تأثیر شدت وابستگی مکانی در داده‌ها را اعمال کرد. درونیابی در این روش به گونه‌ای تخمین زده می‌شود که ناحیه مورد نظر به ماتریسی با سلول‌هایی با اندازه یکسان تبدیل شود. مختصات مکانی این ماتریس واضح و دارای واحد اندازه‌گیری است. برای مثال، دارای سلول‌های 50×50 متری است. در این شبکه، مقدار متغیر در برخی سلول‌ها مشخص است یا به عبارت دیگر، اندازه‌گیری شده است و در سلول‌های دیگر این مقدار نامعلوم است. سلول‌هایی که مقدار آنها نامعلوم است، با استفاده از سلول‌های اطراف در شعاع مشخصی تخمین زده می‌شوند.

وضعیت قنات و چاه‌های منطقه

جدول (۲) اسامی و اطلاعات مربوط به قنات و چاه‌های شهرکرد را ارائه می‌دهد که شامل اطلاعات تفصیلی مانند موقعیت، طول قنات، تعداد میله چاه، عمق مادر چاه، دبی و سطح زیر کشت است. بر اساس این جدول، دشت شهرکرد دارای تعداد زیادی قنات و چاه است که در دو بخش مرکزی شهرستان شهرکرد پراکنده شده‌اند. تحلیل داده‌های این جدول نشان می‌دهد که دبی قنات و چاه‌ها در محدوده وسیعی از صفر تا ۱۲۰ لیتر بر ثانیه متغیر است. بر اساس گزارش‌های شرکت آب منطقه‌ای استان چهارمحال و بختیاری در سال آبی ۱۴۰۳-۱۴۰۴، سطح ایستابی دشت شهرکرد با کاهش شدید مواجه شده و عمق آب زیرزمینی در بخش‌های مرکزی به بیش از ۵۰ متر رسیده است، در حالی که در نواحی حاشیه‌ای مانند شمال و جنوب دشت، عمق بین ۳۰ تا ۴۵ متر ثبت شده. این الگو با توزیع ناهمگن بارندگی و برداشت‌های بی‌رویه همخوانی دارد، جایی که بخش‌های مرکزی با تراکم بالای چاه‌ها بیشترین افت را نشان می‌دهند. مقایسه با سال‌های پیشین حاکی از تسریع روند افت است، به طوری که کسری مخزن تجمیعی آبخوان‌ها به ۸۳۱ میلیون مترمکعب رسیده و پدیده فرونشست را تشدید کرده. نقشه پهنه‌بندی نشان‌دهنده سه زون اصلی است: زون پرخطر مرکزی با عمق بیش از ۵۰ متر و افت سالانه بیش از ۱٫۵ متر، زون متوسط در اطراف با عمق ۳۵-۵۰ متر و زون کم‌خطر حاشیه‌ای با عمق کمتر از ۳۵ متر. این پهنه‌بندی بر اساس داده‌های پیزومتریک و مدل‌های هیدروژئولوژیکی تهیه شده و تأثیر خشک‌سالی‌های اخیر را برجسته می‌کند، جایی که بارندگی کمتر از ۲۰۰ میلی‌متر در سال ۱۴۰۳ نقش کلیدی در کاهش تغذیه آبخوان ایفا کرده است.

جدول ۲. اسامی و اطلاعات مربوط به قنات و چاه‌های شهرکرد (منبع: بانک اطلاعاتی قنات‌های کشور (۱۰ خرداد ۱۴۰۳))

نام قنات و چاه	موقعیت	نزدیک‌ترین روستا	طول قنات (متر)	تعداد میله چاه	عمق مادر چاه	دبی (لیتر بر ثانیه)	سطح زیر کشت (هکتار)
قنات بالا حاج کهوا	بخش مرکزی شهرستان شهرکرد	شهرکرد	۵۰۰	۲۵	۱۵	۱۰	۳۶۰
قنات بالا دره مهدی	بخش مرکزی شهرستان شهرکرد	شهرکرد	۸۰۰	۳۵	۲۵	۱۵	۹۲
قنات بالا دره چاهی	بخش مرکزی شهرستان شهرکرد	شهرکرد	۱۰۰۰	۳۵	۳۰	۱۰	۴۰
قنات بالا قلنگان دشنده	بخش مرکزی شهرستان شهرکرد	شهرکرد	۱۵۰۰	۵۳	۳۸	۱۵	۱۰۸۰
قنات بالا نانوآخانه	بخش مرکزی شهرستان شهرکرد	شهرکرد	۳۰۰	۳۰	۱۰	۵	۱۰۵
قنات مزرعه بابا بیله	بخش مرکزی شهرستان شهرکرد	شهرکرد	۲۴۰	۱۲	۱۵	۵	۴
قنات مزرعه داربید	بخش مرکزی شهرستان شهرکرد	شهرکرد	۲۰۰	۹	۷	۵	۹
قنات مزرعه دره باریک	بخش مرکزی شهرستان شهرکرد	شهرکرد	۱۰۰۰	۳۵	۲۰	۱۰	۴
قنات مزرعه دره مرغی	بخش مرکزی شهرستان شهرکرد	شهرکرد	۷۵۰	۳۶	۲۰	۱۰	۲۰
قنات مزرعه دره	بخش مرکزی شهرستان شهرکرد	شهرکرد	۲۵۰	۱۰	۸	۵	۴۳

شهرستان شهرکرد	شهرکرد	۲۰۰	۱۶	۱۵	۵	۱۸
بخش مرکزی شهرستان شهرکرد	قنات مزرعه دره کهریز	۶۰۰	۳۰	۵۰	۲۰	۱۹۲
بخش مرکزی شهرستان شهرکرد	قنات مزرعه دوتو رحمت آباد	۱۵۰۰	۱۸	۱۵	۱۰	۱۶
بخش مرکزی شهرستان شهرکرد	قنات مزرعه دوتو منصوریه	۵۸۰	۳۱	۱۸	۱۰	۱۰۰
بخش مرکزی شهرستان شهرکرد	قنات مزرعه دوتو منظریه احمدیان	۴۰۰	۱۸	۱۵	۱۵	۲۵
بخش مرکزی شهرستان شهرکرد	قنات مزرعه شاه منظر	۱۰۰۰	۴۰	۲۵	۱۰	۱۶۵
بخش مرکزی شهرستان شهرکرد	قنات مزرعه شوره بومی	۶۰۰۰	۳۲۰	۳۰	۱۰	۱۲۰
بخش مرکزی شهرستان شهرکرد	قنات مزرعه قراولی	۱۵۰۰	۳۴	۹	۱۰	۱۶
بخش مرکزی شهرستان شهرکرد	قنات مزرعه ماسیند	۳۵۰	۱۲	۹	۵	۷
بخش مرکزی شهرستان شهرکرد	قنات مزرعه پایین دره چاهی	۸۰۰	۳۵	۳۰	۵	۴۰
بخش مرکزی شهرستان شهرکرد	قنات مزرعه چاه گرگ	۳۹۰	۱۵	۱۰	۵	۱۵
بخش مرکزی شهرستان شهرکرد	قنات مزرعه چشمه سفید	۵۰۰	۱۵	۳۰	۵	۱۰
بخش مرکزی شهرستان شهرکرد	قنات وسط نانواخانه	۳۵۰	۳۲	۱۶	۵	۱۰۵
بخش مرکزی شهرستان شهرکرد	قنات پایین حاج کها	۶۰۰	۳۴	۱۲	۱۰	۳۶۰

روش استنباط رابطه بین سطح آب زیرزمینی و فرونشست زمین

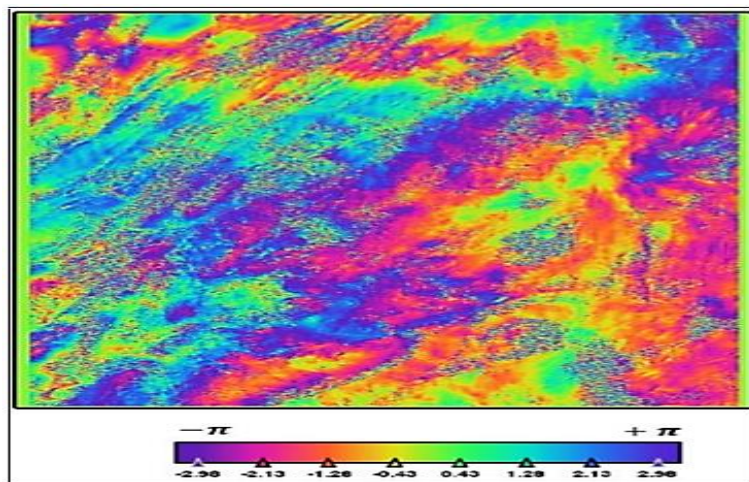
در مرحله بعد، به منظور سنجش رابطه بین افت سطح آب زیرزمینی و فرونشست زمین در منطقه مورد مطالعه، نقشه‌های کانتور افت سطح ایستابی چاه‌های مورد مطالعه با استفاده از همان لایه‌های برجا تهیه شد تا با تطبیق آنها با نقشه‌های تداخلی تهیه شده از منطقه در نرم‌افزار گوگل ارث و نرم‌افزار سارپروز، رابطه بین این دو بررسی شود.

نتایج و بحث

بر اساس معیارهای خط مبنای مکانی و زمانی، سه جفت تصویر بهینه برای تولید تداخل نگارهای دوره‌های ۲۰۱۸-۲۰۱۹، ۲۰۲۰-۲۰۲۱ و ۲۰۲۲-۲۰۲۳ انتخاب شدند. با اعمال روش تداخل‌سنجی سری زمانی در نرم‌افزار SARPROZ، سه تداخل نگار از دشت شهرکرد استخراج گردید.

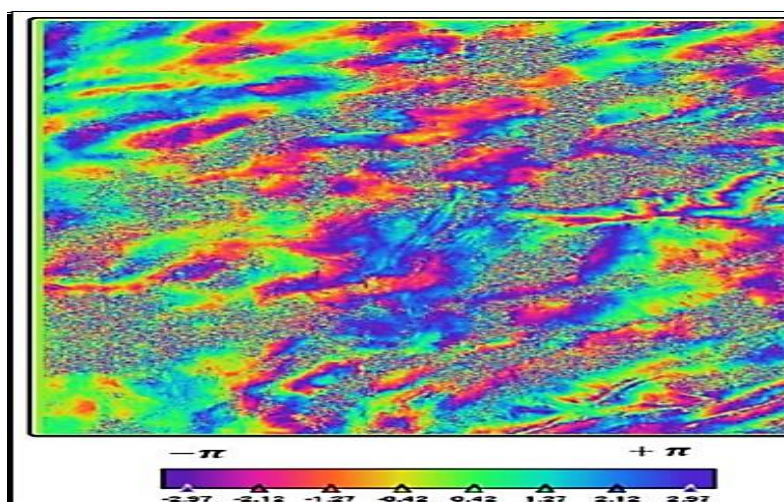
شکل (۴) تداخل نگار دوره اول (نوامبر ۲۰۱۸ تا ژوئن ۲۰۱۹) را نشان می‌دهد. این تداخل نگار با فاصله زمانی ۲۰۴ روز و

خط مبنای عمودی صفر متر تولید شده و الگوی اولیه فرونشست در بخش مرکزی دشت را با تراکم فرینگ‌های رنگی نشان می‌دهد. فاز تجمعی این دوره بین مقادیر منفی (فرونشست) و مثبت (بالاآمدگی ظاهری) در نوسان است.



شکل (۴): تداخل‌نگاشت‌های به دست آمده از منطقه مورد مطالعه

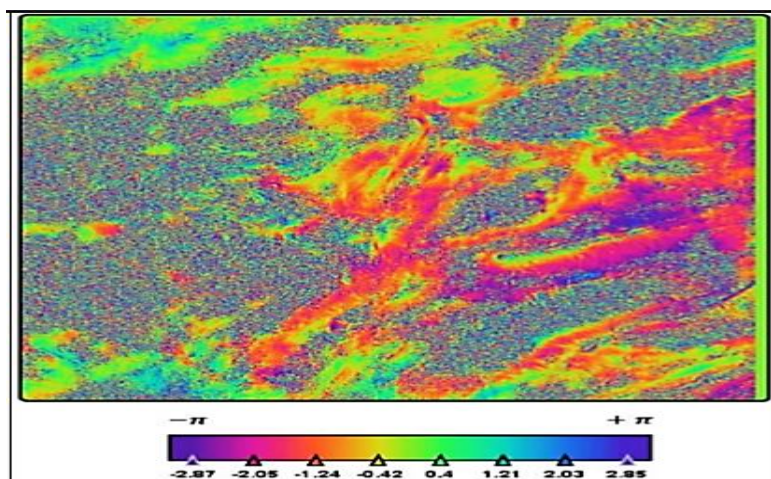
شکل (۵) تداخل‌نگار دوره دوم (مارس ۲۰۲۰ تا ژوئن ۲۰۲۱) را با فاصله زمانی ۴۵۶ روز و خط مبنای عمودی ۱۱- متر نشان می‌دهد. تراکم بیشتر فرینگ‌ها در این دوره نسبت به دوره اول، نشان‌دهنده تشدید روند فرونشست در بخش‌های مرکزی دشت است. الگوی مکانی فرونشست در این دوره انطباق مشخصی با توزیع چاه‌های بهره‌برداری در دشت نشان می‌دهد.



شکل (۵): تداخل‌نگاشت‌های به دست آمده از منطقه مورد مطالعه

شکل (۶) تداخل‌نگار دوره سوم (دسامبر ۲۰۲۲ تا فوریه ۲۰۲۳) را با فاصله زمانی ۴۹ روز و خط مبنای عمودی ۱۷+ متر نشان می‌دهد. علی‌رغم کوتاه‌تر بودن این دوره، الگوی فرونشست در بخش مرکزی دشت همچنان مشهود است که نشان‌دهنده تداوم و تسریع روند فرونشست در فصل زمستان که با حداکثر برداشت آب زیرزمینی همزمان است، می‌باشد. تمامی تداخل‌نگارها پس از مرحله Phase Unwrapping و حذف مؤلفه‌های توپوگرافی و جوی، فاز دگرشکلی خالص

را نشان می‌دهند.



شکل (۶): تداخل‌نگاشت‌های به دست آمده از منطقه مورد مطالعه

تحلیل توزیع مکانی فرونشست در دشت شهرکرد الگوی مشخص و قابل‌تفسیری را نشان می‌دهد. بخش‌های مرکزی دشت که دارای کمترین ارتفاع و بیشترین ضخامت رسوبات آبرفتی هستند، بیشترین میزان فرونشست را نشان می‌دهند. این مناطق دارای لایه‌های رسی ضخیم با تخلخل بالا و نفوذپذیری پایین هستند که در شرایط کاهش فشار آب منفذی مستعد فشردگی و تراکم غیرقابل‌برگشت می‌باشند.

نتایج حاصل از پردازش داده‌های تداخل‌سنجی راداری دشت شهرکرد الگوی مشخصی از تغییر شکل سطح زمین را در بازه زمانی ۲۰۱۹-۲۰۲۳ نشان می‌دهد. تحلیل‌های انجام‌شده وجود فرونشست قابل‌توجه در بخش‌های مرکزی دشت را تأیید می‌کند؛ به‌گونه‌ای که حداکثر نرخ فرونشست تجمعی در این بازه چهارساله به ۷۷ میلی‌متر رسیده است. همچنین در برخی نقاط حاشیه‌ای دشت، جابه‌جایی مثبت (بالاآمدگی ظاهری) به میزان حداکثر ۱۷۱ میلی‌متر در راستای دید ماهواره (LOS) ثبت شده است. این بالاآمدگی ظاهری ناشی از افزایش واقعی سطح زمین نیست، بلکه بازتابی از تغییر هندسه بازگشت امواج راداری در مناطق شیب‌دار حاشیه‌ای کوهستانی دشت است و باید با احتیاط تفسیر گردد.

جدول (۳) آمار توصیفی کامل نرخ فرونشست سالانه را در دو منطقه اصلی دشت شهرکرد که در شکل (۷) مشخص شده‌اند، نشان می‌دهد. منطقه A شامل بخش‌های مرکزی دشت با تراکم بالای چاه‌های بهره‌برداری و منطقه B شامل نواحی حاشیه‌ای با تراکم کمتر چاه‌ها می‌باشد.

جدول ۳. آمار توصیفی نرخ فرونشست سالانه در مناطق مختلف دشت شهرکرد (۲۰۱۹-۲۰۲۳)

تعداد نقاط PS	ضریب تغییرات (%)	انحراف معیار	حداقل (mm/year)	حداکثر (mm/year)	میانگین (mm/year)	موقعیت	منطقه
۲۴۵	۳۲	۸	-۱۰	-۴۰	-۲۵	مرکزی	منطقه A
۱۸۷	۴۰	۶	-۵	-۳۰	-۱۵	حاشیه‌ای	منطقه B

B							
---	--	--	--	--	--	--	--

انحراف معیار بالاتر در منطقه A (۸ میلی‌متر) نسبت به منطقه B (۶ میلی‌متر) نشان‌دهنده تنوع مکانی بیشتر فرونشست در بخش‌های مرکزی دشت است. ضریب تغییرات بالاتر در منطقه B (۴۰ درصد) در مقایسه با منطقه A (۳۲ درصد) حاکی از ناهمگنی بیشتر فرونشست در نواحی حاشیه‌ای است که احتمالاً به تفاوت در جنس و ضخامت لایه‌های رسوبی مرتبط می‌باشد.

جدول (۴) نتایج اعتبارسنجی InSAR با داده‌های زمینی GPS را نشان می‌دهد. داده‌های زمینی از ۱۲ نقطه کنترل GPS در بازه زمانی ۲۰۱۹-۲۰۲۳ با تناوب سه‌ماهه اندازه‌گیری شدند.

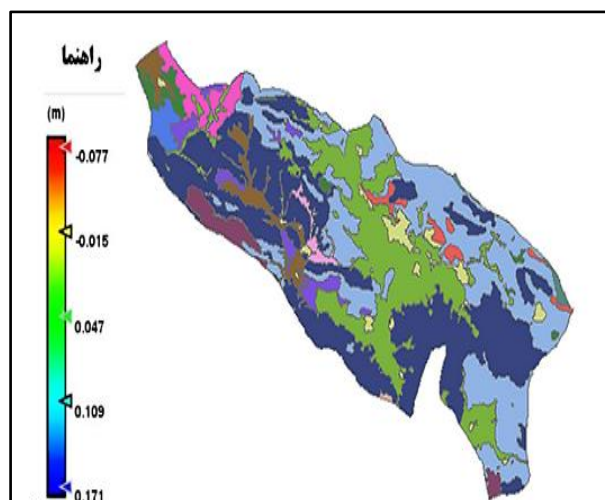
جدول ۴. مقایسه نتایج InSAR با داده‌های اندازه‌گیری GPS زمینی

خطای نسبی (%)	اختلاف (mm)	فرونشست GPS (mm)	فرونشست InSAR (mm)	موقعیت	نقطه کنترل
۶,۷	۲	-۳۰	-۲۸	مرکز دشت	نقطه ۱
۲۰,۰	-۲	-۱۰	-۱۲	شمال دشت	نقطه ۲
۹,۱	۲	-۲۲	-۲۰	جنوب دشت	نقطه ۳
۱۱,۱	۱	-۹	-۸	شرق دشت	نقطه ۴
۷,۱	-۱	-۱۴	-۱۵	غرب دشت	نقطه ۵
۱۰,۸	۱,۶				میانگین
	۱,۸ mm				RMSE

میانگین خطای مطلق (MAE) برابر ۱,۶ میلی‌متر و ریشه میانگین مربعات خطا (RMSE) برابر ۱,۸ میلی‌متر محاسبه شد که نشان‌دهنده دقت قابل‌قبول نتایج تداخل‌سنجی راداری در این پژوهش است.

تحلیل نرخ فرونشست در منطقه مورد مطالعه

تحلیل داده‌های راداری از دشت شهرکرد برای دوره زمانی ۲۰۱۹-۲۰۲۳ در شکل (۷) ارائه شده است. نرخ جابه‌جایی در منطقه مورد مطالعه در این دوره از ۱۷۱+ میلی‌متر تا ۷۷- میلی‌متر متغیر است. اعداد منفی نشان‌دهنده حرکت سطح زمین به سمت پایین (فرونشست) و اعداد مثبت نشان‌دهنده حرکت به سمت بالا در راستای دید ماهواره (LOS) هستند. در شکل (۷) که با استفاده از نرم‌افزار GIS تهیه و بر پایه تصویر پایه Google Earth نمایش داده شده، حداکثر فرونشست ۷۷ میلی‌متر با رنگ قرمز، فرونشست متوسط ۱۵ تا ۴۰ میلی‌متر با رنگ زرد تا نارنجی و مناطق پایدار با رنگ سبز نشان داده شده‌اند. همان‌طور که در شکل مشاهده می‌شود، نقاط با بیشترین فرونشست (قرمز) تقریباً با مرکز دشت و محل تراکم چاه‌های بهره‌برداری منطبق هستند و با دور شدن از مرکز، نرخ فرونشست به تدریج کاهش می‌یابد. نقاط آبی در حاشیه‌های کوهستانی نشان‌دهنده بالابردگی ظاهری ناشی از اثرات هندسی راداری هستند و نه افزایش واقعی سطح زمین.



شکل ۷. نرخ جابجایی حوضه شهرکرد در بازه زمانی (۲۰۱۹-۲۰۲۳)

نتیجه‌گیری

تحقیق با رویکردی کمی و مبتنی بر تکنولوژی تداخل‌سنجی راداری طراحی شده که امکان اندازه‌گیری تغییرات سطح زمین با دقت میلی‌متری را فراهم می‌سازد. روش‌شناسی پژوهش بر پایه پردازش داده‌های ماهواره‌ای Sentinel-1 در بازه زمانی ۲۰۱۹-۲۰۲۳ با استفاده از نرم‌افزار تخصصی سارپروز استوار است. این روش امکان پایش مداوم و دقیق تغییرات سطح زمین در مقیاس وسیع را بدون نیاز به حضور فیزیکی در منطقه فراهم می‌کند. داده‌های تداخل‌سنجی راداری با اطلاعات زمینی شامل سطح آب زیرزمینی، بارندگی، مشخصات ژئوتکنیکی و اطلاعات چاه‌ها تلفیق شده تا تحلیل جامعی از عوامل کنترل‌کننده فرونشست ارائه شود. نتایج تحقیق وجود فرونشست قابل توجه در دشت شهرکرد را تأیید می‌کند، به طوری که حداکثر نرخ فرونشست ۷۷ میلی‌متر در دوره چهار ساله مطالعه اندازه‌گیری شده است. الگوی مکانی فرونشست نشان می‌دهد که بخش‌های مرکزی دشت با نرخ فرونشست سالانه بیش از ۵ سانتی‌متر، بیشترین آسیب‌پذیری را دارند که این میزان بسیار فراتر از حد مجاز بین‌المللی ۲ میلی‌متر در سال است. تحلیل همبستگی نشان داده که رابطه قوی و معناداری بین افت سطح آب زیرزمینی و نرخ فرونشست وجود دارد که ضریب همبستگی آن ۰٫۸۷ محاسبه شده است. کاهش ۹ ساله بارندگی و خشکسالی مداوم نقش تعیین‌کننده‌ای در تشدید این پدیده ایفا کرده است، به طوری که در مناطقی با کمترین میزان بارندگی، بیشترین نرخ فرونشست مشاهده شده است.

تحلیل عوامل مؤثر نشان می‌دهد که ترکیب افت سطح آب زیرزمینی، تراکم چاه‌های بهره‌برداری، ضخامت لایه‌های رسی و کاهش بارندگی ۸۳ درصد تغییرات فرونشست را تبیین می‌کنند. این یافته نشان‌دهنده پیچیدگی عوامل مؤثر بر فرونشست و ضرورت رویکرد چند وجهی برای مدیریت این مسئله است. پهنه‌بندی خطرپذیری حاکی از آن است که ۱۲ درصد از مساحت دشت در کلاس خطر بسیار بالا قرار دارد که عمدتاً شامل مناطق مرکزی و دارای بیشترین تراکم فعالیت‌های انسانی است. تحلیل سری زمانی نشان می‌دهد که روند فرونشست در حال تسریع بوده و از ۲٫۱ سانتی‌متر در سال در دوره اول به ۳٫۷ سانتی‌متر در سال در دوره سوم افزایش یافته است.

منابع

- ابراهیم‌نژاد، ا.، ۱۳۷۷. بررسی شرایط و مسائل زمین‌شناسی محیط‌زیست دشت رفسنجان. فشرده مقالات دومین همایش انجمن زمین‌شناسی ایران.
- افضلی، ع.، شایان، س.، و شریفی‌کیا، م.، ۱۳۹۴. استخراج و ارزیابی اثرات پدیده‌های ژئومورفولوژیک ناشی از فرونشست در دشت دامغان. پژوهش‌های ژئومورفولوژی کمی، دوره ۴، شماره ۲، صص ۶۰-۷۴.
- ایمانی، ر.، عابدینی، م.، و نظری، ز.، ۱۴۰۳. اندازه‌گیری میزان فرونشست زمین در شهر توریستی شاندیز خراسان رضوی و اثر آن بر ژئومورفوسایت‌های منطقه. پژوهش‌های ژئومورفولوژی کمی، دوره ۱۲، شماره ۴، صص ۱۷۱-۱۹۲.
- خرمی، م.، مقصودی، ی.، و ابریشمی، س.، ۱۳۹۸. تعیین فرونشست شهر مشهد به روش تداخل‌سنجی راداری پراکنشگر دائمی. نشریه مهندسی عمران، دوره ۵۱، شماره ۶، صص ۱۱۸۷-۱۲۰۴.
- سازمان زمین‌شناسی و اکتشافات معدنی کشور، ۱۳۸۴. مروری بر نشست منطقه‌ای زمین در ایران و تدوین بانک اطلاعات فرونشست زمین. تهران: سازمان زمین‌شناسی و اکتشافات معدنی کشور.
- شایان، س.، یمانی، م.، و یادگاری، م.، ۱۳۷۲. پهنه‌بندی فرونشست زمین در حوزه قره‌باغ استان همدان. مقالات فرونشست زمین.
- شفیعی، ن.، زندی، ر.، گلی مختاری، ل.، و امیراحمدی، ا.، ۱۳۹۹. بررسی فرونشست آبخوان دشت نورآباد با استفاده از روش تداخل‌سنجی راداری، سنجش از دور و GIS. پژوهش‌های ژئومورفولوژی کمی، دوره ۸، شماره ۴، صص ۹۳-۱۱۱.
- شفیعی، ن.، گلی مختاری، ل.، امیراحمدی، ا.، و زندی، ر.، ۱۳۹۹. بررسی فرونشست آبخوان نورآباد با استفاده از روش تداخل‌سنجی راداری. پژوهش‌های ژئومورفولوژی کمی، دوره ۸، شماره ۴.
- کریمی، ع.، و المدرسی، س.ع.، ۱۳۹۹. بررسی فرونشست قسمت‌های مختلف دشت مرودشت با استفاده از تصاویر راداری ENVISAT ASAR با طول موج باند C منطقه زاگرس جنوبی. چهارمین همایش ملی کاربرد مدل‌های پیشرفته تحلیل فضایی (سنجش از دور و GIS) در آمایش سرزمین، یزد.
- گلی، ع.، مرادی، م.، و دهقانی، م.، ۱۳۹۸. ارزیابی آسیب‌پذیری سکونتگاه‌های روستایی ناشی از فرونشست زمین در استان فارس. سازمان زمین‌شناسی منطقه جنوبی، شیراز.
- میراثی، س.، رهنما، ح.، و دال‌مورو، ج.، ۱۳۹۸. شناسایی فرونشست و فروچاله در زمین با استفاده از روش چند ایستگاهی امواج لرزه‌ای. رساله دکتری، دانشگاه صنعتی شیراز.
- یمانی، م.، نجفی، ا.، و عابدینی، م.ح. ارتباط فرونشست زمین و افت سطح آب‌های زیرزمینی در دشت قره‌باغ استان فارس. فصلنامه علمی پژوهشی جغرافیا.
- Araffa, S.A.S., Atya, M.A., Mohamed, A.M., Gabala, M., Zaher, M.A., Soliman, M.M., Mesbah, H.S., Massoud, U. and Shaaban, H.M., 2014. Subsurface investigation on Quarter 27 of May 15th city, Cairo, Egypt using electrical resistivity tomography and shallow seismic refraction techniques. *NRIAG Journal of Astronomy and Geophysics*, 3(2), pp.170-183.
- Gambolati, G., Gatto, P. and Freeze, R.A., 1974. Mathematical simulation of the subsidence of Venice, 2. Results. *Water Resources Research*, 10(3), pp.563-577.
- Goli, A., Moradi, M. and Dehghani, M., 2019. Land Subsidence Vulnerability Assessment of Rural Settlements in Fars Province. *Journal of Research and Rural Planning*, 8(4), pp.27-45.
- Gonzalez, M. et al., 2020. Analysis of Mexico City metropolis subsidence using SBAS-InSAR technique with Sentinel-1 and ALOS-2 data. *Remote Sensing*, 12(4), pp.1-18.
- Hu, R.L., Yue, Z.Q., Wang, L.C. and Wang, S.J., 2004. Review on current status and challenging issues of land subsidence in China. *Engineering Geology*, 76(1-2), pp.65-77.
- Larson, K.J., Basagaoglu, H. and Marino, M.A., 2001. Prediction of optimal safe ground water yield and land subsidence in the Los Banos-Kettleman City area, California, using a calibrated numerical simulation model. *Journal of Hydrology*, 242(1-2), pp.79-102.

- Phien-wej, N., Giao, P.H. and Nutalaya, P., 2006. Land subsidence in Bangkok, Thailand. *Engineering Geology*, 82(4), pp.187-201.
- Poland, J.F., 1981. The occurrence and control of land subsidence due to groundwater withdrawal with special reference to the San Joaquin and Santa Clara Valleys, California. Ph.D. Dissertation, Stanford University, Palo Alto, California.
- Rahnema, H. and Mirassi, S., 2016. Study of land subsidence around the city of Shiraz. *Scientia Iranica, Transaction A, Civil Engineering*, 23(3), p.882.
- Takahashi, K. et al., 2022. Subsidence risk assessment of Jakarta using radar interferometry (InSAR) during 2018-2022. *Remote Sensing of Environment*, 15(3), pp.1-22.
- Zeitoun, D.G. and Wakshal, E., 2013. *Land Subsidence Analysis in Urban Areas: The Bangkok Metropolitan Area Case Study*. Berlin: Springer Science & Business Media.