



Land subsidence risk assessment due to groundwater level reduction (Case study: Mahidasht Basin)

Negar Fatahi ¹✉ Behzad Miladi ²

1. (Corresponding Author) Department of Geography, Faculty of Economics, Faculty of Literature and Humanities, Razi University, Kermanshah, Iran.

Email: ftahyngar@gmail.com

2. Department of Geography Faculty of Literature and Humanities, Razi University, Kermanshah, Iran.

Email: Behzadmiladi44@gmail.com

Article Info

Article Type:
Research Article

Article History:

Received:

17 Nov 2025

Received in revised form:

11 Jan 2026

Accepted:

16 Mar 2026

pp.106-116

Keywords:

Subsidence,
groundwater,
radar interferometry technique,
piezometer,
Mahidasht

ABSTRACT

Land subsidence is one of the most important geomorphological hazards in arid and semi-arid regions, mainly resulting from the compaction of subsurface layers due to groundwater depletion and excessive exploitation of aquifers. This phenomenon leads to ground surface deformation, damage to infrastructure, reduction in aquifer storage capacity, and threats to environmental sustainability, making it a serious challenge in water resource management. The aim of this study was to investigate land subsidence in the Mahidasht Plain, with a focus on the role of groundwater level decline and its relationship with surface subsidence. In this study, piezometric data from observation wells for the period 2017 to 2022 were integrated with Sentinel-1 radar imagery and the Interferometric Synthetic Aperture Radar (InSAR) technique to analyze the spatial and temporal variations of land subsidence. The results showed that the groundwater table declined by approximately 7 meters during the study period, while InSAR analysis revealed an annual subsidence rate ranging from 3 to 14 centimeters, with the highest values observed in the central and northwestern parts of the plain. The spatial overlay of groundwater level data and subsidence patterns confirmed a direct correlation between aquifer depletion and subsidence intensity. The findings also indicate that most of the subsidence is driven by excessive groundwater extraction and compaction of alluvial deposits, although local geological conditions also influence its severity. These results highlight the necessity of continuous monitoring, the use of advanced remote sensing technologies, and the implementation of effective management strategies to control groundwater extraction and mitigate land subsidence hazards, which can ultimately contribute to improved water resource planning and the reduction of environmental impacts.

Cite this article: Fattahi, Negar; Miladi, Behzad. (2026). Risk assessment of land subsidence due to groundwater level decline (Case study: Mahidasht Basin). *Journal of Quantitative Geomorphological Research*, 14(4), 106-116.

Doi: [10.22034/gmpj.2025.542279.1576](https://doi.org/10.22034/gmpj.2025.542279.1576)

Extended Abstract

Introduction

Land subsidence is one of the major geological and geomorphological hazards of the twenty-first century, particularly in arid and semi-arid regions where excessive groundwater extraction has become a serious environmental challenge. This phenomenon, which results from the compaction of subsurface layers following groundwater depletion or the extraction of natural resources, can cause severe damage to infrastructure, agricultural lands, and ecosystems. Owing to its arid climate and increasing dependence on groundwater resources, Iran has experienced widespread land subsidence in many plains, with reported rates exceeding the global critical threshold in several regions. Recent advances in satellite remote sensing, particularly Interferometric Synthetic Aperture Radar (InSAR), have enabled accurate monitoring of ground deformation over large areas. Previous studies in Iran and other countries have successfully applied InSAR techniques to quantify land subsidence and identify areas at risk. However, the Mahidasht Plain in Kermanshah Province, despite its intensive groundwater exploitation and increasing evidence of land subsidence, requires further investigation to better understand the spatial characteristics and severity of this phenomenon. Therefore, the present study aims to assess land subsidence caused by excessive groundwater withdrawal in the Mahidasht Plain using the InSAR technique and Sentinel-1 satellite imagery. The objectives of the study are to estimate the rate of land subsidence, analyze its spatial distribution, identify critical subsidence zones, and evaluate the relationship between groundwater depletion, well density, and subsidence intensity. Image processing was performed using SNAP software to generate land subsidence maps and provide scientific information for sustainable groundwater resource management and hazard mitigation.

Methodology

This study is applied in nature and employs library-based, field, and technical approaches to analyze land subsidence in the Mahidasht Plain and to investigate the geological and hydrological factors influencing its occurrence. The research framework includes the collection of spatial and remote sensing data, radar data processing, analysis of piezometric records, and integration of results within a GIS environment. The datasets used in this study consist of geological and topographic maps at scales of 1:50,000 and 1:100,000, a 30-meter Digital Elevation Model (DEM), Sentinel-1 Synthetic Aperture Radar (SAR) images in SLC format, piezometric data from observation wells, and field observations from the study area. Sentinel-1 Level-1 SLC images acquired on 8 June 2016 and 1 June 2022 in ascending orbit with VV polarization were used for InSAR analysis, as summarized in Table 1. The master image (June 2016) and the slave image (June 2022) were selected to assess long-term surface deformation, and the IW1 sub-swath was chosen according to the spatial extent of the study area. Radar data processing was carried out using SNAP software for interferogram generation, coherence estimation, image coregistration, debursting, and topographic phase removal, while SNAPHU was applied for phase unwrapping. During interferogram generation, phase components including flat-earth effect, topography, surface deformation, atmospheric effects, and noise were extracted, and a coherence map was produced to evaluate the reliability of results, where values above 0.6 were considered acceptable. To improve data quality, Goldstein and Martin–Löking filters were applied to reduce speckle noise and enhance deformation signals. Phase unwrapping was performed to convert wrapped phase into continuous displacement information, and its accuracy was ensured through prior filtering and coherence control. Geometric distortions caused by sensor viewing geometry and terrain effects

were corrected using the Range-Doppler Terrain (RDT) algorithm in SNAP, incorporating orbital parameters and the SRTM DEM, and the final outputs were projected into the WGS84 coordinate system. In addition, 20 years of piezometric data from observation wells (1997–2022) were collected from the Kermanshah Regional Water Authority and organized in Excel, and due to data limitations, the years 2017 and 2022 were selected for final analysis. These data were used to investigate the relationship between groundwater level decline and land subsidence. Finally, radar-derived results were integrated with hydrological data, and subsidence and groundwater change maps were produced in ArcGIS to enable spatial analysis and identification of critical subsidence zones in the Mahidasht Plain.

Results and discussion

Analysis of piezometric data and Sentinel-1 SAR imagery revealed that the Mahidasht Plain experienced a significant decline in groundwater levels between 2017 and 2022, with the average depth to groundwater increasing from approximately 50 m in 2017 to more than 57 m in 2022, indicating an average decline of about 7 m over this period, while the most pronounced depletion occurred between 2019 and 2022, particularly in the central and northwestern parts of the plain where groundwater extraction for agricultural purposes is most intensive. Interpolation results using the IDW method showed a spatially heterogeneous pattern of groundwater decline, with values exceeding 10 m in some areas, whereas lower declines ranging from 0.19 to 8 m were observed in the northeastern and southwestern margins, reflecting variations in abstraction intensity and emphasizing the dominant role of human activities in groundwater depletion, although differences in temporal coverage between piezometric data (2017–2022) and InSAR observations (2016–2022), together with limitations of interpolation methods and geological heterogeneity, introduce uncertainties in direct visual comparison of the datasets. InSAR-derived results

indicated that the annual land subsidence rate ranged from less than 3 cm to more than 14 cm, with the highest values concentrated in the central and northwestern parts of the study area, which spatially coincide with zones of severe groundwater level decline, and correlation analysis confirmed a strong positive relationship between groundwater drawdown and subsidence rates ($r > 0.8$), highlighting groundwater depletion as a key driving factor of land subsidence in the region. The spatial distribution further shows that areas characterized by thick unconsolidated alluvial deposits and high well density are more susceptible to subsidence, whereas marginal zones with more competent lithology and lower abstraction rates experience lower deformation (<3 cm/year), indicating that subsidence is controlled by an interaction of hydrogeological, geological, and anthropogenic factors rather than a single mechanism. From an impact perspective, continued subsidence may lead to serious damage to infrastructure such as buildings, roads, and utility networks, as well as reduced agricultural productivity due to soil compaction and aquifer storage loss, potentially threatening food security and rural livelihoods and increasing the risk of migration, while overall the integration of InSAR-based deformation monitoring with piezometric analysis demonstrates an effective approach for assessing subsidence dynamics and confirms a strong spatial consistency between groundwater depletion and land deformation despite temporal mismatches between datasets, emphasizing the importance of integrated groundwater management and remote sensing-based monitoring for mitigating subsidence hazards in vulnerable plains.

Conclusion

This study assessed land subsidence as a major geomorphological hazard in the Mahidasht Plain of Kermanshah Province using InSAR-based radar analysis and piezometric data over the period 2017–2021, and the results revealed significant and ongoing subsidence across the study area,

with the highest rates observed in the central and northwestern parts of the plain where intensive groundwater extraction and agricultural activities are concentrated, while a clear spatial correspondence was identified between groundwater level decline and subsidence intensity, indicating an average groundwater drawdown of about 7 m that closely matches zones of severe ground deformation. The integration of InSAR observations and hydrogeological data confirmed that groundwater overexploitation is the primary driving force behind land subsidence in the study area, whereas geological factors such as lithology and structural conditions play a secondary role, and although the Mahidasht Plain lies within the Zagros Folded and Thrust Belt, tectonic influences were found to be limited at the basin scale, suggesting that subsidence is predominantly non-tectonic and human-induced, with areas of more resistant lithology and lower well density showing significantly lower subsidence rates (less than 3 cm/year), further supporting the dominant role of anthropogenic pressure on the aquifer system. Given the ongoing increase in population, agricultural development, and continued groundwater abstraction, the risk of further subsidence and associated infrastructural damage is expected to intensify in the future if no effective management strategies are implemented, therefore sustainable groundwater management practices such as artificial recharge of aquifers, regulation of illegal pumping, optimization of cropping patterns, implementation of modern irrigation systems, and development of wastewater reuse systems for groundwater recharge are strongly recommended. Overall, the findings demonstrate that the integration of InSAR monitoring with piezometric analysis provides a reliable and effective framework for tracking ground deformation and supporting environmental management decisions, and this approach can be extended to other vulnerable plains in Iran as a practical tool for sustainable groundwater management and hazard mitigation in arid and semi-arid regions.

Funding

There is no funding support.

Authors' Contribution

The author solely contributed to all aspects of the study, including conceptualization, data collection, analysis, interpretation of results, and manuscript writing. The author also approved the final version of the manuscript

Conflict of Interest

Authors declared no conflict of interest.

Acknowledgments

The authors would like to express their sincere gratitude and deepest appreciation to their supervisor, Dr. Amjad Maleki, for his invaluable guidance, insightful comments, continuous support, constructive feedback, and expert advice throughout every stage of this research. His expertise, encouragement, and dedication made a significant contribution to the successful completion of this study.

ارزیابی ریسک فرونشست زمین در اثر کاهش سطح آب زیرزمینی

(مطالعه موردی حوضه ماهیدشت)

نگارفتاحی^۱، بهزاد میلادی^۲^۱- نویسنده مسئول، گروه جغرافیا، دانشکده ادبیات و علوم انسانی، دانشگاه رازی، کرمانشاه، ایران. ftahyngar@gmail.com^۲- گروه جغرافیا، دانشکده ادبیات و علوم انسانی، دانشگاه رازی، کرمانشاه، ایران. Behzadmiladi44@gmail.com

اطلاعات مقاله	چکیده
نوع مقاله: مقاله پژوهشی	
تاریخ دریافت: ۱۴۰۴/۰۹/۱۶	
تاریخ بازنگری: ۱۴۰۴/۱۰/۲۰	
تاریخ پذیرش: ۱۴۰۴/۱۲/۲۵	
صص: ۱۱۶-۱۰۶	
واژگان کلیدی: فرونشست زمین، سطح آب زیرزمینی، تداخل سنجی راداری (InSAR)، ماهواره Sentinel-1 دشت ماهیدشت	فرونشست زمین یکی از مهم‌ترین مخاطرات ژئومورفولوژیک در مناطق خشک و نیمه‌خشک است که معمولاً در اثر فشردگی لایه‌های زیرسطحی ناشی از افت فشار آبخوان‌ها و بهره‌برداری بی‌رویه از منابع آب زیرزمینی رخ می‌دهد. این پدیده با ایجاد تغییر شکل سطح زمین، آسیب به زیرساخت‌ها، کاهش ظرفیت ذخیره‌سازی آبخوان‌ها و تهدید پایداری محیط زیست، به یکی از چالش‌های جدی در مدیریت منابع آب تبدیل شده است. هدف این پژوهش، بررسی فرونشست زمین در دشت ماهیدشت با تمرکز بر نقش افت سطح آب زیرزمینی و ارتباط آن با فرونشست سطح زمین بود. در این مطالعه، داده‌های پی‌زومتری چاه‌های مشاهده‌ای در بازه زمانی ۱۳۹۶ تا ۱۴۰۱ با تصاویر راداری Sentinel-1 و تکنیک تداخل سنجی راداری (InSAR) تلفیق شد تا تغییرات مکانی و زمانی نشست زمین تحلیل گردد. نتایج نشان داد سطح ایستابی طی دوره مورد مطالعه حدود ۷ متر کاهش یافته است و تحلیل‌های InSAR نرخ فرونشست سالانه بین ۳ تا ۱۴ سانتی‌متر را نشان می‌دهد که بیشترین مقدار در نواحی مرکزی و شمال غربی دشت مشاهده شد. هم‌پوشانی فضایی داده‌های سطح آب زیرزمینی و فرونشست، همبستگی مستقیم میان افت آبخوان و شدت نشست زمین را تأیید می‌کند. یافته‌ها همچنین بیانگر آن است که بخش اعظم فرونشست ناشی از برداشت بیش از حد منابع آب زیرزمینی و فشردگی رسوبات آبرفتی است و ویژگی‌های زمین‌شناسی محلی نیز در شدت‌گیری فرونشست مؤثر هستند. این نتایج بر ضرورت پایش مستمر، بهره‌گیری از فناوری‌های نوین سنجش از دور و اجرای راهبردهای مدیریتی مؤثر برای کنترل برداشت آب زیرزمینی و کاهش مخاطرات فرونشست زمین تأکید دارند و می‌توانند به برنامه‌ریزی بهتر مدیریت منابع آب و کاهش آسیب‌های زیست‌محیطی کمک کنند.

استناد: فتاحی، نگار، میلادی، بهزاد (۱۴۰۵). ارزیابی ریسک فرونشست زمین در اثر کاهش سطح آب زیرزمینی (مطالعه موردی: حوضه ماهیدشت)

پژوهش‌های ژئومورفولوژی کمی، ۱۴(۴)، ۱۱۶-۱۰۶.

Doi: 10.22034/gmpj.2025.542279.1576

مقدمه

فرونشست زمین یکی از مخاطرات مهم زمین‌شناسی و ژئومورفولوژیکی قرن بیست و یکم به‌شمار می‌رود که به‌ویژه در مناطق خشک و نیمه‌خشک، به‌دلیل برداشت بی‌رویه از منابع آب زیرزمینی، به بحرانی جدی و چندبعدی تبدیل شده است. بر اساس تعریف یونسکو، فرونشست به فروریزش یا نشست سطح زمین در اثر عوامل طبیعی یا انسانی اطلاق می‌شود که می‌تواند به‌صورت تدریجی یا ناگهانی رخ دهد و گاه با جابه‌جایی‌های افقی ناچیز همراه است (سازمان زمین‌شناسی آمریکا، ۲۰۱۷)^۱ این پدیده، که در اثر فشردگی لایه‌های زیرسطحی ناشی از افت فشار در سفره‌های آب زیرزمینی یا استخراج منابع طبیعی رخ می‌دهد، آثار گسترده‌ای بر زیرساخت‌ها، محیط‌زیست و اقتصاد دارد (پدرتی و همکاران، ۲۰۲۴)^۲. در سال‌های اخیر، رشد جمعیت، توسعه‌ی کشاورزی و صنعتی، و کاهش منابع سطحی آب، موجب افزایش وابستگی به منابع آب زیرزمینی شده است. این وابستگی، به‌ویژه در کشورهایی با اقلیم خشک مانند ایران، باعث برداشت بی‌رویه از سفره‌های زیرزمینی و در نتیجه تشدید فرونشست شده است. مطالعات نشان می‌دهند که در بسیاری از دشت‌های ایران، از جمله مناطق مرکزی، غربی و جنوبی، نرخ فرونشست به بیش از ۳۰ میلی‌متر در سال رسیده است (واعظی و همکاران، ۲۰۲۴)^۳؛ عطایی، ۱۴۰۲؛ شریفی کیا، ۱۳۹۰). این نرخ‌ها در مقایسه با استانداردهای جهانی، بیانگر بحرانی بودن وضعیت منابع آب زیرزمینی و ضرورت مداخله‌ی فوری در مدیریت آن‌هاست. فرونشست زمین نه‌تنها یک پدیده‌ی زمین‌شناسی، بلکه یک چالش چندبعدی با پیامدهای اقتصادی، اجتماعی، زیست‌محیطی و فنی است. در مناطق شهری، این پدیده می‌تواند منجر به ترک در ساختمان‌ها، آسیب به خطوط انتقال نیرو، جاده‌ها، پل‌ها و شبکه‌های فاضلاب شود؛ در مناطق کشاورزی نیز کاهش بهره‌وری خاک، آسیب به چاه‌ها و تغییر الگوی زهکشی را به‌دنبال دارد (شومسار و همکاران، ۲۰۲۴)^۴. در مناطقی که هم‌زمان با فرونشست، خطراتی چون زمین‌لرزه یا سیل نیز وجود دارد، شدت تخریب می‌تواند به سطح فاجعه‌بار برسد (عطایی، ۱۳۹۰).

در گذشته، اندازه‌گیری فرونشست بیشتر بر پایه‌ی مشاهدات محلی و بررسی تغییرات در لوله‌های جدار چاه‌ها انجام می‌شد، اما امروزه با پیشرفت فناوری، تکنیک تداخل‌سنجی راداری (InSAR) با داده‌های ماهواره‌ای مانند Sentinel و Envisat، امکان پایش دقیق تغییرات سطح زمین را فراهم کرده است (ژانگ و همکاران، ۲۰۲۴)^۵؛ راسپینی و همکاران، ۲۰۲۲^۶). مطالعاتی در ایران با استفاده از روش‌های PS، SBAS و Stamps، نرخ فرونشست را در دشت‌های قزوین، تبریز، تهران، مهیار جنوبی و مسیر یزد-اردکان بررسی کرده‌اند و نرخ‌هایی بین ۴ تا ۱۲ سانتی‌متر در سال گزارش شده‌اند (بابایی و همکاران، ۱۳۹۴؛ کریم‌زاده، ۱۳۹۴؛ میرشاهی، ۱۳۹۲؛ صالحی و همکاران، ۱۳۹۱؛ آمیغ‌پی و همکاران، ۱۳۸۸).

در سطح جهانی نیز مطالعات متعددی به بررسی این پدیده پرداخته‌اند. در ایالات متحده، نشست‌های ۱۲ تا ۲۰ سانتی‌متری در لس‌آنجلس و آریزونا ثبت شده‌اند (سازمان زمین‌شناسی آمریکا، ۲۰۰۷^۷؛ زیکر و همکاران، ۱۹۹۹^۸؛ کیم و همکاران، ۲۰۱۵)^۹. در آسیا، نرخ‌های فرونشست ۸ تا ۱۴ سانتی‌متر در سال در اندونزی، تایوان و ویتنام گزارش شده‌اند (گورلیک و

^۱ USGS, 2017

^۲ Pedretti et al., 2024

^۳ Vaezihir et al., 2024

^۴ Chaussard et al., 2014

^۵ Zhang et al., 2024

^۶ Raspini et al., 2022

^۷ USGS, 2000

^۸ Zebker et al., 1999

^۹ Kim et al., 2015

همکاران، ۲۰۱۴^۱؛ لابیس و همکاران، ۲۰۱۱^۲؛ هو و همکاران، ۲۰۱۲^۳ در اروپا، نرخ‌هایی تا ۴.۵ سانتی‌متر در یونان و کاهش ۴۰ متری سطح آب زیرزمینی در کرته ثبت شده‌اند (راسپینی و همکاران، ۲۰۱۴^۴؛ مارتیکس، ۲۰۰۹^۵). در استرالیا نیز نرخ‌هایی بین ۱۰- تا ۱۰ میلی‌متر در سال گزارش شده‌اند (هایمن و همکاران، ۲۰۱۵^۶).

در استان کرمانشاه، پژوهش‌های اخیر با استفاده از تصاویر Sentinel-1 در بازه‌ی زمانی ۲۰۱۷ تا ۲۰۲۱ نشان داده‌اند که دشت ماهیدشت در معرض فرونشست شدید قرار دارد (رجبی و همکاران، ۱۴۰۳). وابستگی شدید این منطقه به منابع آب زیرزمینی در بخش‌های کشاورزی و صنعتی، آن را به یکی از نقاط حساس و آسیب‌پذیر در برابر مخاطرات ناشی از فرونشست تبدیل کرده است. از این‌رو، بررسی علمی و دقیق این پدیده در دشت ماهیدشت، ضرورتی انکارناپذیر دارد. بر همین اساس، پژوهش حاضر با هدف ارزیابی مخاطرات فرونشست ناشی از برداشت بی‌رویه‌ی آب‌های زیرزمینی در حوضه‌ی ماهیدشت طراحی شده است. اهداف اصلی تحقیق عبارت‌اند از: برآورد نرخ فرونشست با بهره‌گیری از تکنیک InSAR و داده‌های ماهواره‌ای همچنین تحلیل فضایی الگوی توزیع فرونشست و شناسایی نقاط بحرانی به علاوه ارائه‌ی راهکارهای مدیریتی^۷ و کاربردی به منظور کاهش مخاطرات و پیشگیری از خسارات احتمالی می‌باشد. این مطالعه با بهره‌گیری از نرم‌افزار SNAP و پردازش تصاویر ماهواره‌ای، تلاش دارد تا نقشه‌های دقیق نرخ و الگوی فرونشست را تهیه کرده و با تحلیل همبستگی میان تراکم چاه‌ها، افت سطح ایستابی و شدت فرونشست، راهکارهایی برای مدیریت پایدار منابع آب زیرزمینی ارائه دهد.

مواد و روش‌ها

منطقه مورد مطالعه

دشت ماهیدشت در شرق شهرستان کرمانشاه و در محدوده‌ی جغرافیایی طول‌های ۳۶°۴۶' تا ۵۱°۴۶' شرقی و عرض‌های ۳۴°۱۳' تا ۳۴°۲۸' شمالی واقع شده و مساحتی حدود ۲۷۱ کیلومتر مربع را دربر می‌گیرد. این دشت با کشیدگی شمال‌غربی-جنوب‌شرقی، دارای فرم مستطیلی بوده و بخشی از حوضه‌ی آبریز رودخانه‌ی مرگ محسوب می‌شود. بر اساس آمار سال ۱۳۹۵، جمعیت بخش ماهیدشت برابر با ۱۸۹۶۲۸ نفر گزارش شده است (مرکز آمار ایران، ۱۳۹۵). رودخانه‌ی مرگ با طول کلی ۱۴۹٫۵ کیلومتر، حدود ۴۰٫۵ کیلومتر از مسیر خود را در محدوده‌ی ماهیدشت طی می‌کند و به‌عنوان تنها جریان دائمی منطقه، نقش مهمی در تغذیه‌ی آبخوان و آبیاری اراضی کشاورزی دارد. سرچشمه‌ی این رودخانه در ارتفاع ۲۰۴۹۹ متری دامنه‌های جنوبی سفیدکوه قرار دارد و پس از عبور از دشت، در روستای دوآب به رودخانه‌ی قره‌سو می‌پیوندد (طرح نواندیشان، ۱۳۸۱؛ مهندسین مشاور تام، ۱۳۸۲). از نظر زمین‌شناسی، منطقه‌ی ماهیدشت بخشی از زون زاگرس چین‌خورده و رورانده است که با روند شمال‌غربی-جنوب‌شرقی از آذربایجان تا خلیج فارس امتداد دارد. سازندهای غالب شامل آهک‌های کرتاسه، مارن‌ها، ماسه‌سنگ‌ها و کنگلومراها هستند. ارتفاعات شمالی عمدتاً از آهک‌های کرتاسه‌ی فوقانی تشکیل شده‌اند که به‌دلیل تخلخل بالا، در ذخیره‌ی نزولات جوی و تغذیه‌ی آبخوان نقش مؤثری دارند. ارتفاعات جنوبی دارای تنوع لیتولوژیکی بیشتری بوده و شامل سازند امیران، آهک‌های اسماری و تشکیلات تله‌زنگ هستند (علایی طالقانی، ۱۳۸۲؛ مهندسین مشاور تام، ۱۳۸۲). پهنه‌ی اصلی دشت از آبرفت‌های جوان تشکیل شده که عمدتاً شامل رس و سیلت حاصل از تخریب سنگ‌های پیرامونی‌اند. این رسوبات دانه‌ریز، کم‌شیب و فاقد سیمان بوده و به‌دلیل تخلخل بالا،

¹ Gorelick et al., 2014

² Labis et al., 2011

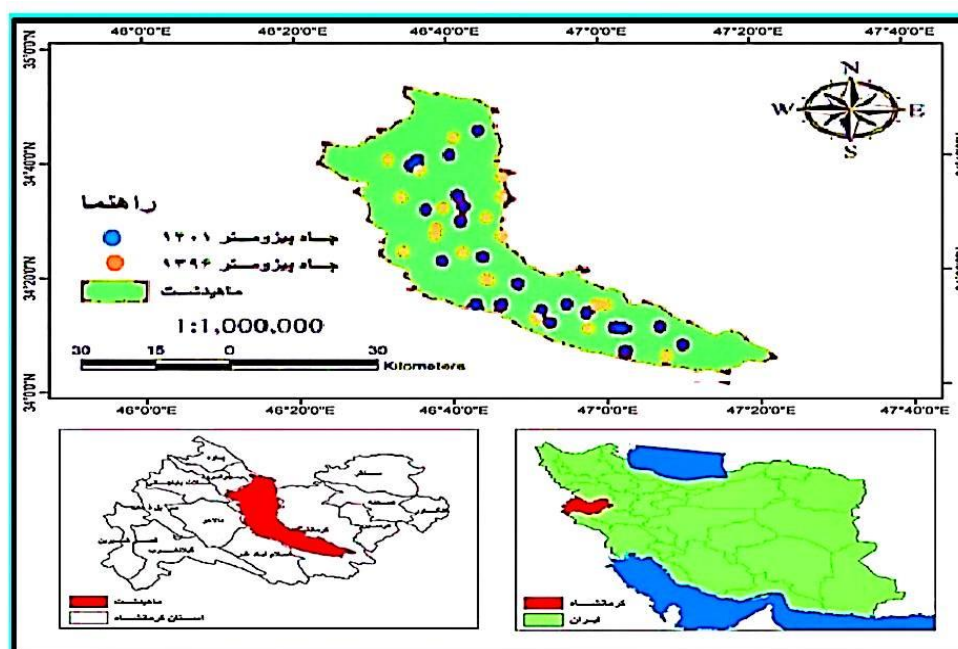
³ Ho & Tang, 2012

⁴ Raspini et al., 2014

⁵ Martikx, 2009

⁶ Hyman et al., 2015

ظرفیت مناسبی برای ذخیره و انتقال آب‌های زیرزمینی دارند. ضخامت آبرفت‌ها از حدود ۱۰ متر در حاشیه تا ۲۰۰ متر در بخش مرکزی متغیر است و سنگ بستر آن غالباً آهکی است (مهندسین مشاور تام، ۱۳۸۲). از نظر اقلیمی، منطقه‌ی مورد مطالعه در گذر از بخش مرکزی حوضه‌ی مرگ به سمت خروجی، از آب‌وهوای خشک و نیمه‌خشک به شرایط مدیترانه‌ای و نیمه‌مرطوب تغییر می‌یابد. سامانه‌های جوی مؤثر بر منطقه شامل پرفشار سیبری، پرفشار آزور، کم‌فشار مدیترانه‌ای، مرکز پرفشار کلاهدک قطبی، پرفشار اقیانوس هند و کم‌فشار آسیایی هستند. سامانه‌ی کم‌فشار مدیترانه‌ای بیشترین نقش را در بارش‌های منطقه دارد و با عبور از ارتفاعات زاگرس، بارش‌های قابل توجهی ایجاد می‌کند. همچنین، سامانه‌ی کم‌فشار سودان از طریق خوزستان به منطقه نفوذ کرده و بارش‌های گرم را، به‌ویژه در ارتفاعات، به‌صورت برف به‌همراه دارد. در فصل تابستان، توده‌های گرم عربستان و صحرای بزرگ آفریقا موجب افزایش دمای منطقه می‌شود (علیجانی، ۱۳۷۸). شکل (۱) موقعیت جغرافیایی منطقه مورد مطالعه را نشان می‌دهد.



شکل ۱: موقعیت منطقه مورد مطالعه

داده ها و روش ها

این پژوهش از نوع کاربردی بوده و با بهره‌گیری از روش‌های کتابخانه‌ای، ابزاری و میدانی، به تحلیل فضایی فرونشست زمین در دشت ماهیدشت و بررسی عوامل ژئولوژیکی و هیدرولوژیکی مؤثر پرداخته است. چارچوب تحقیق شامل گردآوری داده‌های مکانی و تصویری، پردازش اطلاعات راداری، تحلیل داده‌های پیژومتری، و تلفیق نتایج در محیط GIS می‌باشد. منابع داده‌ای شامل نقشه‌های زمین‌شناسی و توپوگرافی با مقیاس‌های ۱:۵۰۰,۰۰۰ و ۱:۱,۰۰۰,۰۰۰، مدل رقومی ارتفاع (DEM) با دقت ۳۰ متر، تصاویر ماهواره‌ای Sentinel-1 در قالب SLC، داده‌های پیژومتری چاه‌های مشاهده‌ای در سال‌های ۱۳۹۶ و ۱۴۰۱، و مشاهدات میدانی از محدوده پژوهش بوده‌اند. جدول ۱: مشخصات داده‌های اخذ شده را نشان می‌دهد.

جدول ۱: مشخصات داده‌های اخذ شده

سنجنده	نوع تصویر	تاریخ اخذ تصویر	عبور	قطب
SENTINEL_1 LEVEL 1	SLC	۲۰۱۶/۰۶/۰۸ ۲۰۲۲/۰۶/۰۱	Ascending	VV

مشخصات فنی تصاویر سنجش از دور در قالب جدول تنظیم شده و شامل اطلاعات مربوط به تاریخ تصویربرداری، مسیر عبور و نوع قطبش است. برای پردازش داده‌های راداری، نرم‌افزار SNAP جهت تولید تداخل‌نما و نقشه همدوسی، و SNAPHU برای رفع ابهام فاز به کار گرفته شد. تصویر پایه از ژوئن ۲۰۱۶ و تصویر پیرو از ژوئن ۲۰۲۲ انتخاب گردید تا تغییرات بلندمدت سطح زمین بررسی شود. از میان زیرنوارهای فناوری TOPSAR، نوار IW1 متناسب با موقعیت منطقه انتخاب شد. هم‌مرجع‌سازی تصاویر با استفاده از دستور Coregistration انجام شد و داده‌های کمکی مانند مدل ارتفاعی SRTM و اطلاعات مداری ماهواره نیز بارگذاری گردید.

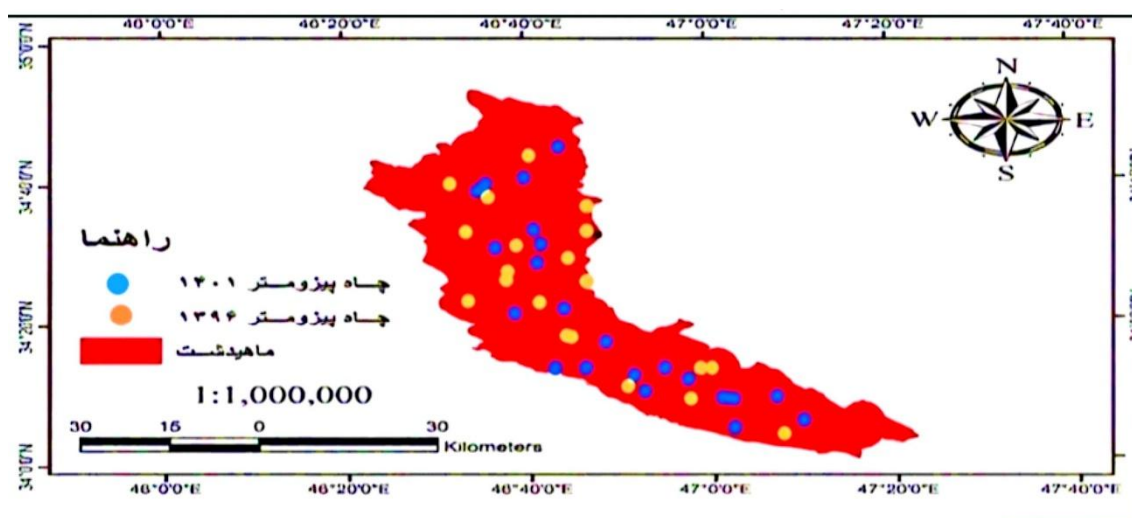
در مرحله تولید تداخل‌نما، فاز ترکیبی شامل مؤلفه‌های زمین مسطح، توپوگرافی، جابه‌جایی سطح، اثرات جوی و نویز زاویه دید استخراج شد. همچنین، نقشه‌ای از میزان همدوسی سیگنال‌ها تهیه گردید که تطابق بین تصاویر را در بازه صفر تا یک نمایش می‌دهد؛ مقادیر بالاتر از ۰٫۶ به عنوان داده‌های معتبر در نظر گرفته شدند. برای حذف اثرات توپوگرافی، قطعه‌های مجزای تصویر با فرآیند Debursting ادغام و سپس با دستور Topographic Phase Removal اصلاح شدند. نتیجه نهایی، نقشه‌ای بود که تنها فاز ناشی از جابه‌جایی سطح زمین را نمایش می‌داد. به منظور کاهش نویز اسپیکل و افزایش وضوح الگوهای جابه‌جایی، از دو روش فیلترگذاری مارتین-لوکینگ و گلدشتاین استفاده شد که موجب بهبود کیفیت داده‌ها گردید.

در مرحله رفع ابهام فاز، داده‌ها در نرم‌افزار SNAPHU پردازش شدند تا با یکپارچه‌سازی فاز بین پیکسل‌های همسایه، میزان جابه‌جایی سطح زمین به صورت مستقیم قابل استخراج باشد. کیفیت این مرحله به میزان همدوسی وابسته بوده و داده‌ها پیش از آن فیلترگذاری شدند. در ادامه، برای اصلاح اعوجاج‌های هندسی ناشی از زاویه دید سنجنده و توپوگرافی منطقه، از الگوریتم RDT در محیط SNAP استفاده شد. این الگوریتم با بهره‌گیری از اطلاعات مداری، پارامترهای زمانی تصویربرداری و مدل ارتفاعی، تصاویر را در سیستم مختصات WGS84 تصحیح کرده و امکان تحلیل مکانی دقیق‌تری را فراهم نمود. در بخش تحلیل هیدرولوژیکی، داده‌های پیزومتری ۲۰ ساله چاه‌های مشاهده‌ای دشت ماهیدشت (۱۳۷۶ تا ۱۴۰۱) از سازمان آب منطقه‌ای کرمانشاه گردآوری و در نرم‌افزار Excel ساماندهی شد. با توجه به نقص داده‌ها در برخی سال‌ها، سال‌های ۱۳۹۶ و ۱۴۰۱ که داده‌های کامل‌تری داشتند، برای تحلیل نهایی انتخاب شدند. این داده‌ها مبنای بررسی ارتباط میان افت سطح آب زیرزمینی و نرخ فرونشست زمین قرار گرفتند.

در نهایت، نتایج پردازش‌های راداری با داده‌های پیزومتری تلفیق و نقشه‌های تغییرات سطح آب زیرزمینی و فرونشست زمین در محیط ArcGIS ترسیم گردید. این تلفیق داده‌ای، امکان تحلیل دقیق‌تر همبستگی میان افت سطح ایستایی و شدت فرونشست را فراهم ساخت و نواحی بحرانی دشت ماهیدشت از نظر مخاطره فرونشست شناسایی شدند.

یافته ها و بحث

تحلیل داده‌های پیزومتری و تصاویر راداری سنتینل-۱ نشان داد که دشت ماهیدشت طی سال‌های ۱۳۹۶ تا ۱۴۰۱ با افت قابل توجه سطح آب زیرزمینی مواجه بوده است. میانگین عمق سطح ایستابی از حدود ۵۰ متر در سال ۱۳۹۶ به بیش از ۵۷ متر در سال ۱۴۰۱ افزایش یافت، که بیانگر افت متوسط ۷ متر در بازه‌ی پنج‌ساله است. روند تغییرات سالانه نشان داد که بیشترین افت در سال‌های ۱۳۹۹ تا ۱۴۰۱ رخ داده و شدت بحران در این دوره افزایش یافته است. بیشترین افت در نواحی مرکزی و شمال غربی دشت ثبت شد (شکل ۲)، که با تراکم بالای چاه‌های بهره‌برداری و کاربری کشاورزی همخوانی دارد.



شکل ۲: موقعیت چاه‌های پیزومتری و تغییرات سطح آب زیرزمینی در دشت طی سال‌های ۱۳۹۶-۱۴۰۱

بررسی نقشه‌های درون‌یابی سطح آب زیرزمینی با روش IDW برای سال‌های ۱۳۹۶ و ۱۴۰۱ (شکل‌های ۳ و ۴) نشان داد که افت سطح ایستابی به‌صورت فضایی ناهمگن بوده و در برخی نقاط به بیش از ۱۰ متر رسیده است. کمترین افت در شمال شرق و جنوب غرب دشت مشاهده شد و بین ۰٫۱۹ تا ۸ متر متغیر بود. این تفاوت‌ها با میزان برداشت از منابع زیرزمینی در نقاط مختلف هم‌راستا بوده و نشان می‌دهد که فشار بهره‌برداری انسانی نقش تعیین‌کننده‌ای در شدت افت سطح آب دارد. با این حال، به دلیل تفاوت در مقیاس و طبقه‌بندی رنگی دو نقشه، مقایسه‌ی بصری مستقیم میان آن‌ها با محدودیت‌هایی همراه است و تشخیص دقیق میزان تغییرات در برخی نواحی دشوار است. این عدم تطابق ظاهری را می‌توان به سه عامل اصلی نسبت داد ۱- تفاوت در مقیاس زمانی داده‌ها: داده‌های پیزومتری مربوط به سال‌های ۱۳۹۶ تا ۱۴۰۱ هستند، در حالی که داده‌های INSAR بازه‌ی زمانی ۲۰۱۶ تا ۲۰۲۲ را پوشش می‌دهند. این ناهم‌زمانی می‌تواند باعث اختلاف در نمایش روندهای فضایی شود و مقایسه‌ی مستقیم را با چالش مواجه کند ۲- تأثیر عوامل زمین‌شناسی و ژئوتکنیکی: جنس زمین، فشردگی لایه‌های زیرسطحی، و بارگذاری سازه‌های سطحی نقش مهمی در شدت فرونشست دارند. در برخی نواحی، حتی با افت کم سطح آب، فرونشست شدید رخ داده و بالعکس. این عوامل می‌توانند تناسب بصری بین نقشه‌ها را کاهش دهند ۳- محدودیت‌های مدل درون‌یابی و وضوح مکانی داده‌ها: روش IDW به موقعیت و تراکم ایستگاه‌های اندازه‌گیری وابسته است. در مناطقی با داده‌های کم، دقت درون‌یابی کاهش می‌یابد و ممکن است الگوی

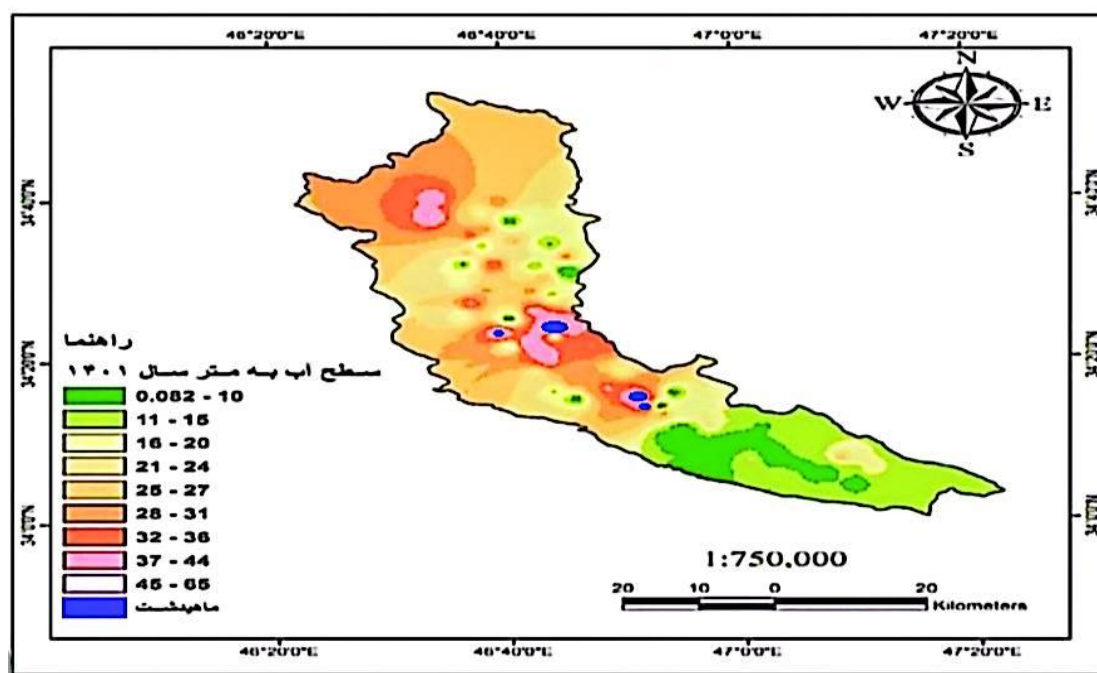
فضایی افت سطح آب به‌درستی نمایش داده نشود. بنابراین، عدم تطابق کامل در مقایسه‌ی نقشه‌ها بیشتر ناشی از محدودیت‌های داده و روش‌های مورد استفاده است و به هیچ وجه به معنای فقدان رابطه علمی میان افت سطح آب زیرزمینی و فرونشست زمین نیست. داده‌های تداخل‌سنجی راداری (InSAR) نشان دادند که نرخ فرونشست سالانه در محدوده‌ی مورد مطالعه بین کمتر از ۳ تا بیش از ۱۴ سانتی‌متر متغیر بوده و بیشترین نرخ در نواحی مرکزی و شمال‌غربی دشت ثبت شد، که با افت شدید سطح ایستابی هم‌پوشانی دارد. تحلیل همبستگی بین داده‌های پیرومتری و نتایج InSAR نشان داد که ضریب همبستگی بین افت سطح ایستابی و نرخ فرونشست بیش از ۰.۸ بوده، که بیانگر رابطه‌ای قوی و معنادار بین این دو متغیر است.

روند کلی نشان‌دهنده‌ی افزایش افت سطح آب زیرزمینی در بخش‌های جنوبی و جنوب‌غربی منطقه است، در حالی که در نواحی شمالی تغییرات کمتری مشاهده می‌شود. ارائه‌ی یک نقشه‌ی واحد از افت سطح آب زیرزمینی در بازه‌ی زمانی مورد بررسی می‌تواند امکان مشاهده و تفسیر یکنواخت‌تر و قابل‌انکاز تغییرات را فراهم سازد.

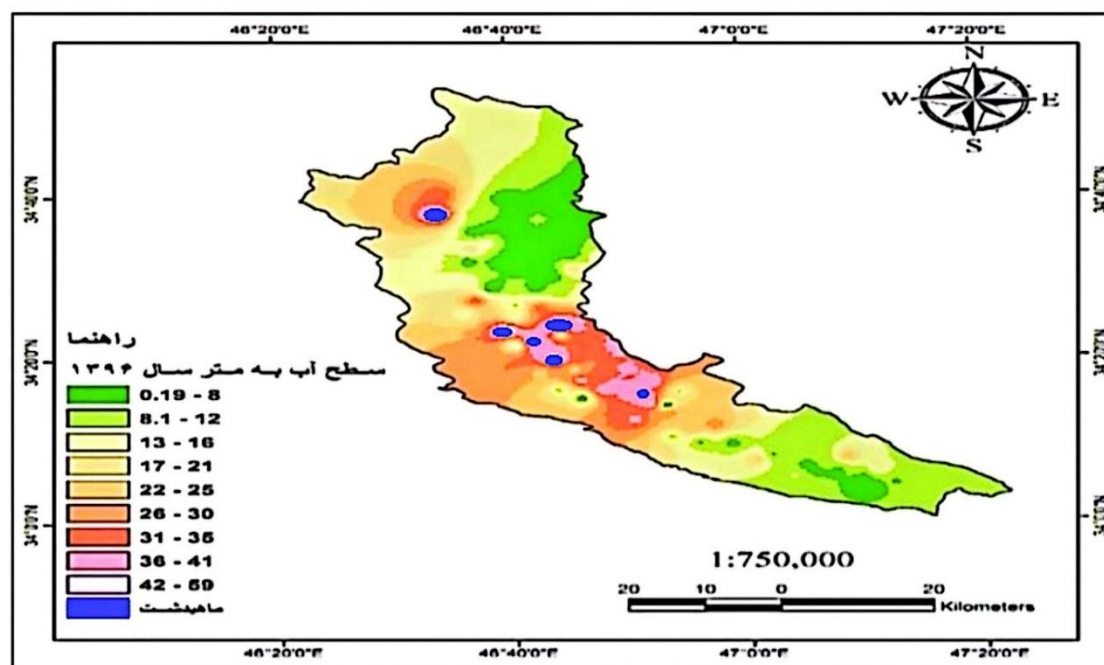
داده‌های تداخل‌سنجی راداری (InSAR) نشان دادند که نرخ فرونشست سالانه در محدوده‌ی مورد مطالعه بین کمتر از ۳ تا بیش از ۱۴ سانتی‌متر متغیر بوده و بیشترین نرخ در نواحی مرکزی و شمال‌غربی دشت ثبت شد، که با افت شدید سطح ایستابی هم‌پوشانی دارد. تحلیل همبستگی بین داده‌های پیرومتری و نتایج InSAR نشان داد که ضریب همبستگی بین افت سطح ایستابی و نرخ فرونشست بیش از ۰.۸ بوده، که بیانگر رابطه قوی و معنادار بین این دو متغیر است. این یافته با نتایج مطالعات مشابه در دشت‌های قزوین و مهاباد جنوبی و همچنین مطالعات بین‌المللی در مکزیکوسیتی و بانکوک هم‌خوانی دارد، جایی که برداشت بی‌رویه آب زیرزمینی منجر به نرخ‌های بالای فرونشست شده است.

نقشه‌های مدل‌سازی شده نشان دادند که نواحی با فرونشست شدید (۱۱ تا ۱۴ سانتی‌متر) عمدتاً در محدوده‌ی مرکزی دشت و در اراضی کشاورزی با تراکم بالای چاه‌ها شناسایی شدند. در مقابل، نواحی حاشیه‌ای با جنس سنگی‌تر و تراکم کمتر چاه، نرخ فرونشست کمتر از ۳ سانتی‌متر داشتند. این الگوی فضایی نشان می‌دهد که فرونشست حاصل ترکیب عوامل هیدروژئولوژیک، زمین‌شناسی و انسانی است و نمی‌توان آن را به یک عامل منفرد نسبت داد. نواحی با خاک‌های ریزدانه و آبرفتی جوان حساسیت بالاتری نسبت به نشست زمین نشان دادند، در حالی که مناطق سنگی‌تر با برداشت محدودتر، نرخ فرونشست کمتری داشتند. از منظر پیامدها، استمرار این روند می‌تواند آثار جدی بر زیرساخت‌های شهری و کشاورزی داشته باشد، از جمله ترک‌خوردگی ساختمان‌ها، نشست جاده‌ها، آسیب به خطوط انتقال نیرو و کاهش بهره‌وری اراضی کشاورزی. کاهش ظرفیت نگهداری آب در خاک و فشردگی سازندها می‌تواند امنیت غذایی و کیفیت زندگی جوامع محلی را تهدید کند و حتی مهاجرت روستاییان را در پی داشته باشد. برآوردهای اقتصادی نشان می‌دهد که هزینه‌های ناشی از خسارت به زیرساخت‌ها و کاهش ارزش زمین‌های کشاورزی می‌تواند بسیار سنگین باشد و مدیریت بحران را دشوار کند.

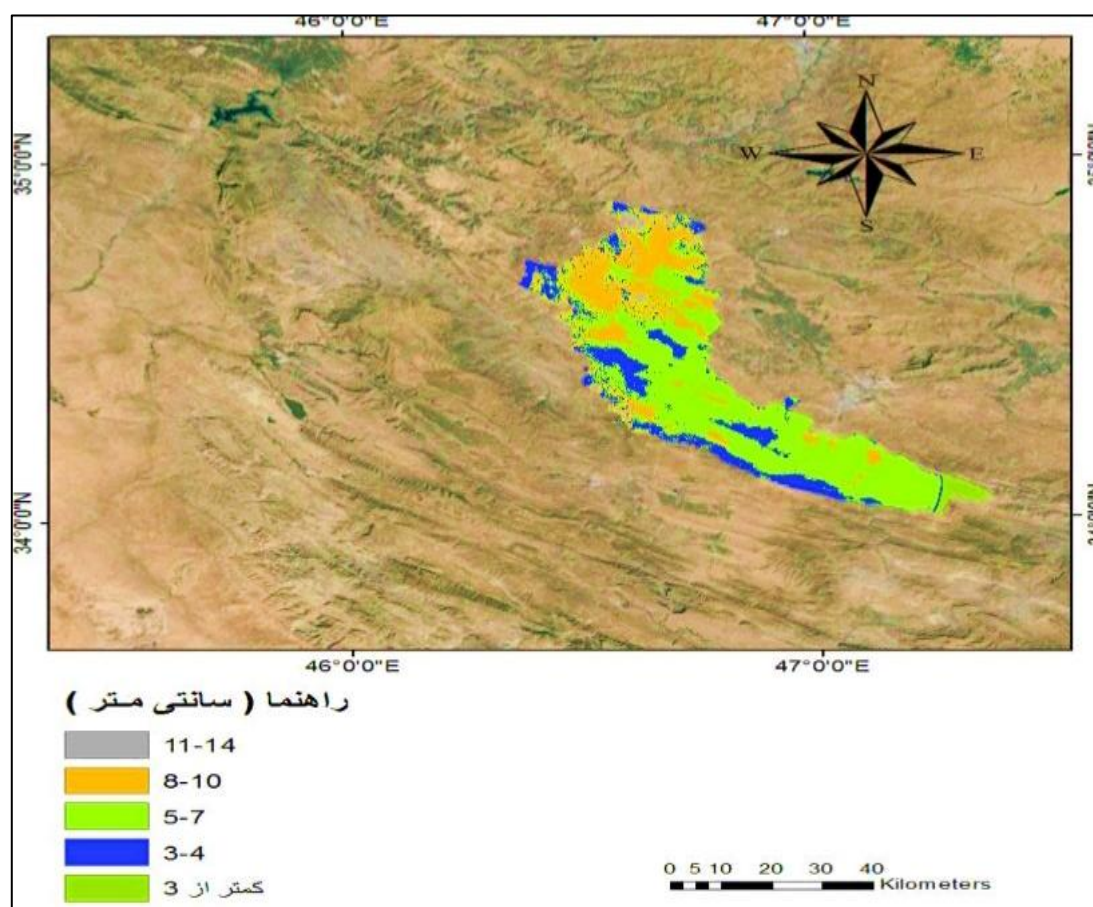
در نهایت، این پژوهش نشان داد که ترکیب داده‌های راداری و پیرومتری رویکردی مؤثر برای پایش فرونشست است و می‌تواند مبنایی برای طراحی راهبردهای مدیریت پایدار منابع آب در دشت‌های آسیب‌پذیر کشور باشد. بهره‌گیری از فناوری‌های نوین سنجش از دور در کنار مدیریت یکپارچه منابع آب، می‌تواند راهکاری عملی برای کاهش اثرات این بحران باشد. یکی از محدودیت‌های اصلی پژوهش، عدم تطابق کامل بازه زمانی داده‌های سطح آب زیرزمینی و داده‌های InSAR بود، اما روند تغییرات ثبت‌شده در هر دو مجموعه داده نشان از پیوستگی و تطابق فضایی معناداری دارد.



شکل ۳: نقشه درون یابی شده را برای دشت ماهیدشت با استفاده از مدل درون یابی یا idw سال آماری ۱۳۹۶



شکل ۴: نقشه درون یابی شده را برای دشت ماهیدشت با استفاده از مدل درون یابی یا idw را برای سال آماری ۱۴۰۱



شکل ۵: میزان فرونشست تعیین شده در دشت ماهیدشت در بازه زمانی ۲۰۱۶-۲۰۲۲

نتیجه‌گیری

در این پژوهش، فرونشست زمین به‌عنوان یکی از پدیده‌های ژئومورفولوژیکی مخرب در محدوده‌ی دشت ماهیدشت استان کرمانشاه مورد ارزیابی و اندازه‌گیری قرار گرفت. نتایج تحلیل‌های راداری و پیژومتری در بازه‌ی زمانی ۲۰۱۷ تا ۲۰۲۱ نشان داد که این دشت با نرخ‌های قابل‌توجه فرونشست در حال پیش‌روی است. بیشترین میزان نشست در نواحی مرکزی و شمال‌غربی دشت ثبت گردید؛ مناطقی که تراکم بالای چاه‌های بهره‌برداری و اراضی کشاورزی نشان از فشار زیاد بر منابع آب زیرزمینی دارند. روند تغییرات سطح ایستابی در این بازه، افتی میانگین برابر با ۷ متر را نشان داد که با نواحی دارای فرونشست شدید هم‌پوشانی دارد و گواه ارتباط مستقیم میان افت آب و نرخ نشست زمین است. بررسی داده‌های ترازیبی و تداخل‌سنجی راداری (InSAR) نشان داد که کاهش تراز آب‌های زیرزمینی اثر تعیین‌کننده‌ای بر افزایش نرخ فرونشست دارد و فعالیت‌های انسانی به‌ویژه بهره‌برداری بیش از ظرفیت آبخوان اصلی، عامل تشدید این فرآیند است. در مقابل، در نواحی غربی و جنوب‌غربی دشت که جنس سنگی‌تر و تراکم کمتر چاه‌ها مشاهده شد، نرخ نشست زمین کمتر از ۳ سانتی‌متر در سال برآورد گردید. این روند فضایی بیانگر نقش ترکیبی عوامل زمین‌شناسی، لیتولوژی و فشار انسانی در شدت فرونشست است. از نظر تکتونیکی، منطقه‌ی ماهیدشت در محدوده‌ی زاگرس چین‌خورده و رورانده قرار دارد، اما بررسی‌ها نشان داد که اثر عملکرد گسل‌ها و تکتونیک فعال در محدوده دشت محدود بوده و فرونشست عمدتاً ناشی از افت شدید منابع آب است نه از جابه‌جایی‌های ساختاری. بنابراین، می‌توان نتیجه گرفت که عامل انسانی نقش اصلی را در بروز و گسترش این

پدیده ایفا می‌کند. با توجه به روند افزایشی جمعیت، توسعه‌ی کشاورزی و تداوم برداشت بی‌رویه از منابع زیرزمینی، در صورت عدم مداخله‌ی مدیریتی احتمال پیشروی فرونشست و خسارات زیرساختی در سال‌های آینده جدی است. پیشنهاد می‌شود طرح‌های تغذیه مصنوعی آبخوان، کنترل برداشت‌های غیرمجاز، تغییر الگوی کشت، استفاده از آبیاری نوین و توسعه شبکه جمع‌آوری فاضلاب جهت تغذیه منابع آب زیرزمینی در دستور کار قرار گیرد. چنین اقداماتی می‌تواند از تشدید فرونشست در ماهیدشت جلوگیری کرده و زمینه‌ساز پایداری بلندمدت منابع آبی، حفظ زیرساخت‌ها و جلوگیری از خسارات اقتصادی و زیست‌محیطی شود. در نهایت، نتایج پژوهش حاضر نشان می‌دهد که پایش مستمر با بهره‌گیری از فناوری InSAR و تلفیق داده‌های پیرومتری، ابزاری قابل‌اعتماد برای رصد تغییرات زمین و تدوین تصمیمات مدیریتی آینده است. تداوم این روش می‌تواند ضمن کاهش بحران فعلی، در سایر دشت‌های آسیب‌پذیر کشور نیز راهگشا باشد و به‌عنوان الگویی بومی برای مدیریت پایدار منابع آب در مناطق خشک ایران مورد استفاده قرار گیرد.

منابع

- امیغ‌پی، م.، عربی، س.، و طالبی، ع. (۱۳۸۹). بررسی فرونشست یزد با استفاده از روش تداخل‌سنجی راداری و ترازبایی دقیق. *فصلنامه علوم زمین*، ۲۰ (77)، ۱۵۷-۱۶۴.
- بابایی، م.، شریفی‌کیا، م.، و همکاران. (۱۳۹۴). بررسی نرخ فرونشست دشت قزوین با استفاده از تحلیل سری‌زمانی تصاویر راداری و روش‌های SBAS و PS. *مجله علوم زمین*، ۴۶ (1)، ۲۳-۱.
- خالدی، ش. (۱۳۹۰). *بلایای طبیعی*. تهران: انتشارات دانشگاه شهید بهشتی.
- رجبی، م.، روستایی، ش.، و مطاعی، س. (۱۴۰۳). ارزیابی خطر فرونشست زمین در دشت کرمانشاه با استفاده از سنجش از دور و GIS. *نشریه ژئومورفولوژی دانشگاه تبریز*، ۲۸ (88)، ۳۰۸-۳۲۸.
- رنجبر، م.، و جعفری، ح. (۱۳۸۸). بررسی فرونشست زمین و تأثیر فعالیت‌های انسانی بر آن. تهران: مرکز تحقیقات منابع آب و زمین‌شناسی.
- زنگنه‌تبار، س.، احمدی، ن.، و رضایی، م. (۱۴۰۴). شناسایی تأثیرات فرونشست زمین بر پل‌های جاده‌ای جنوب غرب تهران با استفاده از PS-InSAR. *نشریه زمین‌شناسی مهندسی دانشگاه تهران*، ۲۹ (1)، ۳۵-۲۱.
- صالحی، ر.، غفوری، م.، لشکری‌پور، غ.، و دهقانی، م. (۱۳۹۱). بررسی فرونشست دشت مهیار جنوبی با استفاده از روش تداخل‌سنجی راداری. *فصلنامه مهندسی آبیاری و آب ایران*، ۲۰ (11)، ۴۵-۶۰.
- طرح نواندیشان (۱۳۸۱). *گزارش مطالعات اقلیمی حوضه آبریز مرگ*. گزارش فنی ارائه شده به شرکت آب منطقه‌ای فارس.
- عطایی، م. (۱۳۹۰). پیامدها و اثرات فرونشست زمین بر محیط زیست و زیرساخت‌ها. *مجله علوم زمین و محیط زیست ایران*، ۵ (1)، ۶۰-۴۵.
- علایی طالقانی، م. (۱۳۸۲). *ژئومورفولوژی ایران* چاپ دوم. تهران: انتشارات قومس.
- علیچانی، ب. (۱۳۷۸). *اقلیم‌شناسی ایران*. تهران: انتشارات سمت.
- مهندسین مشاور تام (۱۳۸۲). *گزارش مطالعات زمین‌شناسی و هیدروژئولوژی دشت ماهیدشت*. کرمانشاه: شرکت آب منطقه‌ای کرمانشاه.
- میراثی، ع. (۱۳۹۱). بررسی مسائل اقتصادی و اجتماعی پدیده نشست زمین ناشی از بهره‌برداری بی‌رویه از آب‌های زیرزمینی در رفسنجان. *فصلنامه جغرافیا و برنامه‌ریزی شهری*، ۲۴ (4)، ۷۰-۵۵.
- میرشاهی، ف.، السادات، ع.، عربی، س.، طالبی، ع.، دهقانی، م.، و هاشمی‌امین‌آبادی، س.ج. (۱۳۹۲). اندازه‌گیری فرونشست سطح زمین با تکنیک InSAR و تصاویر TerraSAR-X. پایان‌نامه کارشناسی ارشد، دانشگاه تهران.

- Chaussard, E., Wdowinski, S., Cabral-Cano, E., & Amelung, F. (2014). Land subsidence in central Mexico detected by InSAR. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 119(8), 7948–7961. . <https://doi.org/10.1002/2014JB011377>
- Ferretti, A., Prati, C., & Rocca, F. (2007). InSAR principles: Guidelines for SAR interferometry processing and interpretation. ESA.
- Gorelick, S. M., Erban, L. E., & Gorchach, S. (2014). Groundwater extraction, land subsidence, and sea-level rise in the Mekong Delta. *Environmental Research Letters*, 9(8), 084010.
- Gumilar, I. (2011). Study on causes and impacts of land subsidence in Bandung Basin, Indonesia. *FIG Working Week, Marrakech*.
- Hyman, J. S., Riel, B. K., & Sammis, C. G. (2015). Spatiotemporal analysis of land subsidence in the Gippsland Basin, Australia. *Remote Sensing of Environment*, 165, 1–13.
- Kim, J., Luo, Z., Jia, Y., & Shum, C.-K. (2015). Long-term land subsidence in Tucson, Arizona. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 107, 126–141.
- Labisa, B. F., Abidin, H. Z., Andreas, H., Meilano, I., & Sarah, D. A. (2011). Land subsidence in Semarang (Indonesia) as determined from GPS surveys.
- Martakis, P. (2009). Groundwater level decline and associated land subsidence in the Messara Valley, Crete. *Environmental Geology*, 58(1), 163–172.
- Pedretti, D., Wang, Y., & Liu, Z. (2024). Urban subsidence trends in 143 coastal cities: A global InSAR analysis. *Environmental Geoscience*, 31(2), 101–118.
- Raspi, F., Ciampalini, A., Bianchini, S., Bardi, F., Huber, M., & Moretti, S. (2022). Ground deformation monitoring using Sentinel-1 SAR data. *Remote Sensing of Environment*, 274, 112982.
- Tung, C.-P., & Hu, J.-C. (2012). Assessments of anthropogenic land subsidence in Taiwan by PS-InSAR. *Remote Sensing of Environment*, 124, 1–12.
- USGS. (2017). Land subsidence: Causes, consequences, and monitoring. *U.S. Geological Survey Fact Sheet, FS-165-97*. <https://pubs.usgs.gov/fs/fs165-97/>
- Veci, L. (2016). TOPS interferometry tutorial. ESA & Array Systems Computing. <http://www.array.ca>
- Wang, G. Y. (2008). Long-term land subsidence and strata compression in Changzhou, China. *Engineering Geology*, 72–89.
- Zhang, Y., Liu, H., & Chen, X. (2024). GeoTemporal modeling of urban subsidence using SBAS-InSAR: Case study from Tehran. *Remote Sensing of Environment*, 312, 113–129. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2024.113129>
- Zoback, M. D., McEvilly, T. V., & Hickman, S. H. (1999). Crustal structure and seismicity of the San Andreas fault system. *AGU Fall Meeting, San Francisco*.