



Assessment of Land Subsidence in the Marand Plain Using Interferometric Synthetic Aperture Radar (InSAR)

Shahram Roostaei ^{1*}, Seyyed Asadullah Hejazi ¹, Davood Mokhtari ¹,

Davood Amani ¹

¹ Department of Geomorphology, Faculty of Planning and Environmental Sciences, University of Tabriz, Tabriz, Iran

ARTICLE INFO

Article History:

Received: 21 October 2025

Revised: 19 January 2025

Accepted: 24 January 2025

Available Online:

26 January 2025

Keywords:

Land Subsidence

Interferometric Synthetic
Aperture Radar (InSAR)

Groundwater

Ground Deformation

Sentine1-1

ABSTRACT

This paper aimed to assess land subsidence in the Marand Plain using Interferometric Synthetic Aperture Radar (InSAR) and to investigate the factors influencing its occurrence. Processing of radar images over the period 2020–2024 revealed that subsidence rates in the plain ranged from zero to a maximum of 3.745 cm over four years, with an average of approximately -1.723 cm. The spatial distribution of subsidence follows a heterogeneous but continuous pattern, with more than 70% of the plain's area falling within moderate to high subsidence classes. Analysis of the driving factors indicated that groundwater level decline is the primary trigger of subsidence, reaching over 10 meters in the southeastern and western parts of the plain. Additionally, aquifer characteristics such as considerable thickness (up to 282 m), dominance of fine-grained clay and silt sediments (especially in the western half), reduced natural aquifer recharge (due to climatic and hydrological droughts), gentle terrain slopes, and human activities such as irrigated agriculture and land-use change, are other factors exacerbating subsidence in the region. Accuracy assessment of the method using the ROC curve, Area Under the Curve ($AUC = 0.949$), and Gini coefficient ($GC = 0.898$) indicates excellent model performance. The findings highlight the critical condition of land subsidence in the Marand Plain, particularly in its western half, emphasizing the urgent need for management strategies such as controlling groundwater extraction, enhancing artificial aquifer recharge, revising cropping patterns, and implementing efficient irrigation practices.

* Corresponding author: Shahram Roostaei

E-mail address: roostaei@tabrizu.ac.ir

How to cite this article: Roostaei, S., Hejazi, S. A., Mokhtari, D., & Amani, D. (2026). Assessment of Land Subsidence in the Marand Plain Using Interferometric Synthetic Aperture Radar (InSAR). *Journal of Geography and Environmental Hazards*, 15(1), 72-95. <https://doi.org/10.22067/geoe.2026.97067.1633>



©2026 The author(s). This is an open access article distributed under Creative Commons Attribution 4.0 International License (CC BY 4.0)

Extended Abstract

Introduction

Land subsidence is defined as the downward vertical displacement of the ground surface, which typically occurs as a result of susceptible geological conditions and under the influence of various environmental, hydrogeological, and economic changes and factors (Batubara et al., 2023). This phenomenon may have natural or anthropogenic origins and is consistently associated with significant concerns due to the reduction in aquifer storage capacity (Jiang et al., 2023). As one of the major environmental and engineering challenges in arid and semi-arid regions of the world, land subsidence mainly results from declining groundwater levels caused by excessive extraction, climate change, and geological factors. Iran, due to its heavy reliance on groundwater resources and exposure to prolonged droughts, has been increasingly affected by this phenomenon. The Marand Plain, as one of the important and densely populated plains of East Azerbaijan Province, is at risk of land subsidence due to excessive groundwater withdrawal, reduced natural recharge of the aquifer, and susceptible geological characteristics. This study aims to analyze the mechanisms and identify the factors influencing land subsidence in the Marand Plain using an integrated approach.

Material and Methods

This paper was conducted using an integrated and multidisciplinary methodological framework. The core of the methodology was based on Interferometric Synthetic Aperture Radar (InSAR) technology. For this purpose, a series of Sentinel-1 radar satellite images covering a four-year period from 2020 to 2024, with a four-month revisit interval, were utilized. Image processing was carried out in a specialized software environment and involved several steps: (1) generation of interferometric pairs through precise geometric registration and co-registration of master and slave images; (2) removal of topographic phase effects using a high-resolution Digital Elevation Model (DEM); (3) correction of atmospheric delay using atmospheric model data; (4) phase filtering to reduce noise and enhance the signal-to-noise ratio; (5) phase unwrapping; and finally, (6) conversion of relative satellite line-of-sight (LOS) displacement into absolute vertical ground surface displacement. The output of this process consisted of annual and cumulative land subsidence rate maps with millimeter-level accuracy.

To complement and validate the satellite-based analyses, a Geographic Information System (GIS) was employed as an integrated platform for data integration, spatial analysis, and visualization of various information layers. Hydrogeological data, including groundwater table levels from piezometric wells over a ten-year period, groundwater contour maps and water-level change maps, aquifer thickness layers, and quantitative sedimentary characteristics of the aquifer environment, were imported into and processed within the GIS environment. In addition, field observations using a three-frequency GPS device were conducted at control points across the plain to validate the InSAR results. The accuracy of the InSAR method was quantitatively evaluated using the Receiver Operating Characteristic (ROC) curve, calculation of the Area Under the Curve (AUC), and the Gini coefficient.

Results and Discussion

The results of satellite monitoring showed that land subsidence has extensively affected the entire Marand Plain, with varying degrees of intensity. Over the four-year period, subsidence rates ranged from zero to a maximum of -3.745 cm over four years, with an average subsidence of approximately -1.723 cm for the entire plain. Subsidence zonation analysis indicated that only about 9.5% of the plain falls within the very low subsidence class, while the moderate, high, and very high classes together cover nearly 70% of the plain's total area. The most high-risk zones are concentrated in the western half and parts of the southeastern sector of the plain, and major cities such as Marand, Koshksaray, and New Bonab are located within areas experiencing moderate to high subsidence rates.

The main driving factor of land subsidence was identified as the severe and continuous decline in groundwater levels. The average groundwater table drop over the past decade was -4.67 m, reaching more than 10 m in critical hotspots in the southeastern and western parts of the plain. The significant spatial overlap between areas with the greatest groundwater decline and zones with the highest subsidence rates confirms a direct causal relationship between these two phenomena. In addition, intrinsic aquifer characteristics - including considerable thickness (up to 282 m) and fine-grained sediments (especially clay and silt layers) - together with reduced natural aquifer recharge and human activities such as the expansion of water-intensive irrigated agriculture, have contributed to the intensification of subsidence in the western half of the plain.

Conclusion

This study demonstrates that the Marand Plain particularly its western and southeastern areas—is in a critical condition with respect to land subsidence. The continuation of current groundwater exploitation trends and the lack of effective management intervention could lead to irreversible damage to the environment, infrastructure, and human communities. Accordingly, immediate and comprehensive action is required, including integrated and sustainable groundwater resource management, implementation of artificial aquifer recharge programs, fundamental revision of agricultural and irrigation patterns, incorporation of hazard considerations into development planning, and continuous monitoring of subsidence-prone areas. These measures are proposed as key strategies to mitigate this crisis and move toward environmental resilience in the Marand Plain. The methodology employed in this research, with an AUC value of 0.949 and acceptable agreement with field observations, confirms the high reliability of the results.



ارزیابی فرونشست دشت مرنده با استفاده از روش تداخل سنجی راداری (InSAR)

^۱ شهرام روستایی*، ^۱ سیداسدالله حجازی^۱، ^۱ داود مختاری^۱، ^۱ داوود امانی^۱

^۱ گروه ژئومورفولوژی، دانشکده برنامه ریزی و علوم محیطی، دانشگاه تبریز، تبریز، ایران

اطلاعات مقاله	چکیده
تاریخچه مقاله: تاریخ دریافت: ۱۴۰۴/۰۷/۲۹ تاریخ بازنگری: ۱۴۰۴/۱۰/۲۹ تاریخ پذیرش: ۱۴۰۴/۱۱/۰۴	این پژوهش با هدف ارزیابی فرونشست زمین در دشت مرنده، با کاربست تداخل سنجی راداری (InSAR) و بررسی عوامل مؤثر بر بروز آن انجام شده است. پردازش تصاویر راداری در بازه زمانی ۲۰۲۰ تا ۲۰۲۴ نشان داد که نرخ فرونشست در این دشت بین صفر تا حداکثر ۳/۷۴۵ سانتی متر در چهار سال متغیر بوده و میانگین آن حدود ۱/۷۲۳- سانتی متر است. توزیع فضایی فرونشست از الگوی ناهمگن ولی پیوسته‌ای پیروی می‌کند، به‌طوری که بیش از ۷۰ درصد مساحت دشت در کلاس‌های فرونشست متوسط به بالا قرار دارد. تحلیل عوامل مؤثر نشان داد که افت سطح آب زیرزمینی مهم‌ترین عامل محرک فرونشست است. این افت در مناطق جنوب شرقی و نیمه غربی دشت به بیش از ۱۰ متر نیز رسیده است. علاوه بر این، ضخامت زیاد آبخوان (تا ۲۸۲ متر)، غلبه رسوبات ریزدانه رسی و سیلتی (به‌ویژه در نیمه غربی)، کاهش تغذیه طبیعی آبخوان (ناشی از خشکسالی اقلیمی و هیدرولوژیکی)، شیب کم زمین و فعالیت‌های انسانی مانند کشاورزی آبی و تغییر کاربری اراضی، از دیگر عوامل تشدیدکننده فرونشست در منطقه هستند. ارزیابی دقت روش با استفاده از منحنی ROC و محاسبه مساحت زیر منحنی ($AUC=0.949$) و ضریب جینی ($GC=0.898$) نشان‌دهنده عملکرد بسیار خوب مدل مورد استفاده است. یافته‌های پژوهش حاکی از وضعیت بحرانی فرونشست در دشت مرنده به‌ویژه در نیمه غربی آن است و لزوم اتخاذ راهبردهای مدیریتی فوری از جمله کنترل برداشت آب زیرزمینی، افزایش تغذیه مصنوعی آبخوان‌ها، اصلاح الگوی کشت و به‌کارگیری روش‌های آبیاری کارآمد را بیش از پیش نمایان می‌سازد.
کلمات کلیدی: فرونشست زمین تداخل سنجی راداری (InSAR) آب زیرزمینی تغییر شکل سطح زمین سنتینل-۱	

مقدمه

فرونشست زمین به‌صورت جابه‌جایی عمودی رو به پایین سطح زمین تعریف می‌شود که معمولاً در نتیجه وجود شرایط زمین‌شناسی مستعد و تحت تأثیر تغییرات و عوامل گوناگون محیطی، هیدروژئولوژیکی و اقتصادی رخ می‌دهد (Batubara, Kooy)

(Zwarteveen, 2023). این پدیده می‌تواند منشأ طبیعی یا انسانی داشته باشد و به دلیل کاهش ظرفیت ذخیره آبخوان‌ها، همواره با نگرانی‌های قابل توجهی همراه است (Jiang, Zhang, Liu, Li & Fang, 2023). فرونشست زمین پیامدهایی همچون ایجاد ترک‌های زمین‌شناسی، شکل‌گیری فروچاله‌ها، آسیب به زیرساخت‌های عمرانی و افزایش خطر وقوع سیلاب را به دنبال دارد. بررسی آثار فرونشست زمین مستلزم توجه به مقیاس‌های زمانی کوتاه مدت و بلندمدت است. فرونشست طبیعی معمولاً با نرخ‌های در حد چند میلی‌متر در سال رخ می‌دهد و از این رو، پیامدهای آن محدود بوده و عمدتاً در بازه‌های زمانی بسیار طولانی آشکار می‌شود. با این حال، حتی در صورت پایین بودن نرخ فرونشست، اثرات تجمعی آن در طول چند دهه می‌تواند به‌طور چشمگیری میزان آسیب‌پذیری مناطق را افزایش دهد (Melet et al., 2021). در مقابل، فرونشست ناشی از فعالیت‌های انسانی ممکن است ده‌ها تا بیش از صد برابر فرونشست طبیعی باشد و آثار آن در مدت‌زمان نسبتاً کوتاهی نمایان شود. فرونشست با شدت بالا تأثیرات قابل توجهی بر محیط‌زیست برجای می‌گذارد و پیامدهای جدی برای فعالیت‌های انسانی به همراه دارد. از جمله این پیامدها می‌توان به آسیب‌های سازه‌ای واردشده به تأسیسات زیرزمینی، زیرساخت‌های خطی نظیر خطوط لوله و راه‌آهن و همچنین نشست ساختمان‌ها اشاره کرد (Hu et al., 2009).

در سال‌های اخیر، به‌ویژه در مناطق نیمه‌خشک و پرجمعیت، فراوانی و شدت پدیده فرونشست زمین به‌طور قابل‌ملاحظه‌ای افزایش یافته و پیامدهای اقتصادی و زیست‌محیطی گسترده‌ای را به همراه داشته است (El Kamali et al., 2021). در این میان، ایران به‌عنوان کشوری پهناور با مساحتی در حدود ۱/۶ میلیون کیلومتر مربع و جمعیتی نزدیک به ۸۵ میلیون نفر، با چالشی جدی در حوزه مدیریت منابع آب زیرزمینی روبه‌رو است. رشد چهار برابری جمعیت طی شش دهه اخیر، توسعه شتابان صنعتی و گسترش بی‌رویه فعالیت‌های کشاورزی، فشار فزاینده‌ای بر منابع آبی کشور وارد کرده است. در پاسخ به افزایش تقاضا، برداشت بی‌رویه و ناپایدار از آب‌های زیرزمینی به رویه‌ای رایج تبدیل شده و در نتیجه، کاهش چشمگیر این منابع حیاتی را به دنبال داشته است. به بیان دیگر، میزان برداشت از ظرفیت تجدیدپذیری آب‌های زیرزمینی فراتر رفته و تعادل طبیعی چرخه آب را مختل کرده است. این تنش آبی گسترده نه تنها جوامع انسانی را با مخاطرات جدی مواجه می‌سازد، بلکه موجب برهم خوردن تعادل‌های زیست‌محیطی نیز می‌شود. از این رو، بررسی جامع و فوری پیامدهای افت سطح آب زیرزمینی از ابعاد مختلف، امری ضروری به شمار می‌رود (Haghshenas Haghighi & Motagh, 2024). در ایران، آب‌های زیرزمینی منبع اصلی تأمین آب در بسیاری از مناطق محسوب می‌شوند و در عین حال، به‌کارگیری روش‌های سنتی و ناکارآمد در بخش کشاورزی نیاز آبی را تشدید کرده است. این شرایط منجر به بهره‌برداری بیش از حد از منابع آب زیرزمینی شده و افزایش تنش و فشار مؤثر در لایه‌های زمین را به دنبال دارد که در نهایت، فشردگی رسوبات و بروز پدیده فرونشست زمین را سبب می‌شود (Mohammady, Pourghasemi & Amiri, 2021).

مطالعات متعددی در سطح جهان به بررسی علل فرونشست زمین، روش‌های پایش، ارزیابی مخاطرات و ارائه راهکارهای مدیریتی این پدیده پرداخته‌اند. با توجه به گستردگی جغرافیایی فرونشست و پیامدهای جدی آن بر محیط‌زیست و اقتصاد، این پدیده به‌عنوان یکی از چالش‌های مهم مطرح شده و نیازمند پژوهش‌های گسترده، انتقال فناوری و توسعه پایش‌های بین‌المللی است (Hu et al., 2009). در مطالعات مرتبط با فرونشست، مهم‌ترین مراحل شامل: (۱) شناسایی پهنه‌های در حال فرونشست و تعیین نرخ فرونشست در نقاط مختلف، (۲) شناسایی عوامل مؤثر در وقوع فرونشست، و (۳) ارائه راهکارهای مناسب برای کاهش نرخ فرونشست و مدیریت خسارات ناشی از آن می‌باشد (Hosseinzadeh, Akbari, Javanshiri & Mohammadpour, 2023; Asadzadeh, Kaki, Shakiba & Raei, 2016). در دو دهه اخیر، تکنیک‌های متنوعی برای شناسایی و ارزیابی فرونشست زمین توسعه یافته و مورد استفاده قرار گرفته‌اند که از جمله آن‌ها می‌توان به روش‌های ترازابی، سامانه‌های موقعیت‌یابی جهانی (GPS) و روش‌های ژئوتکنیکی اشاره کرد. این روش‌ها اغلب پرهزینه و زمان‌بر بوده و امکان پایش مداوم تغییرشکل‌های زمین را تنها در بخش محدودی از مناطق مستعد فرونشست فراهم می‌کنند. در مقایسه، فناوری InSAR به دلیل پوشش مکانی وسیع و دقت بالای خود، قابلیت شناسایی تغییرشکل‌های سطح زمین در مقیاس‌های گسترده‌تر را دارد و قادر است جابه‌جایی‌های کوچک تا بزرگ زمین را اندازه‌گیری کند.

(Lin et al., 2009; Galloway & Burbey, 2011). تکنیک InSAR یا تداخل‌سنجی راداری با استفاده از تصاویر ماهواره‌ای، یکی از روش‌های شناخته شده و گسترده برای پایش دقیق جابه‌جایی‌های سطح زمین است. اساس کار این روش بر اختلاف فاز بین حداقل دو تصویر راداری است که از موقعیت‌های مداری مختلف یا زمان‌های متفاوت به‌دست آمده است (Raspini et al., 2022). در سال‌های اخیر، فناوری InSAR از یک موضوع تخصصی محدود به ابزاری عملیاتی و کاربردی در مطالعات فرونشست تبدیل شده است (Amiri, Momeni, Rostami, Entezari & Zakerinejad, 2023; Azarm, Mehrabi & Nadi, 2023; Hosseinzadeh et al., 2023; Villaseñor-Reyes, Hernández-Ding, Jia, Di, Wu & Wei, 2021; Rajabi, Roostaei & Mataee, 2024; Mirassi, 2023; Ren, Gong, Gao & Guo et al., 2023; Zhang, Ke, Shen, Lin & Wang, 2023; Madrigal & Figueroa-Miranda, 2022; Huang et al., 2025; Zhao, 2024). در این پژوهش نیز برای برآورد فرونشست در محدوده دشت مرنده از تکنیک تداخل‌سنجی راداری استفاده شده است.

در سال‌های اخیر، استان آذربایجان شرقی با چالش‌های جدی در زمینه منابع آب زیرزمینی مواجه بوده است. کاهش نزولات جوی، تداوم دوره‌های خشکسالی و برداشت بی‌رویه از منابع آب زیرزمینی سبب کاهش شدید سطح ایستابی و بروز خسارات جبران‌ناپذیری در اکوسیستم‌های طبیعی و زیرساخت‌های انسانی این استان شده است. یکی از پیامدهای مهم این وضعیت، فرونشست زمین در دشت‌های حاصل‌خیز استان است که در سال‌های اخیر به یکی از تهدیدات جدی محیط‌زیستی و ژئوتکنیکی تبدیل شده است. وجود تعداد بالای چاه‌های غیرمجاز در دشت‌های استان، به‌ویژه در دشت مرنده، منجر به افت محسوس سطح آب زیرزمینی و فشرده‌گی لایه‌های رسوبی شده است. این روند علاوه بر کاهش ظرفیت ذخیره آبخوان، خطر وقوع فرونشست زمین را به‌طور قابل‌توجهی افزایش داده است. دشت مرنده به عنوان یکی از دشت‌های مهم و گسترده آذربایجان شرقی، بخشی از حوضه آبریز دریای خزر را تشکیل می‌دهد. این دشت از شمال‌شرق به منطقه جلفا - دوزال، از شمال غرب به دشت هرزندات، از غرب به خروجی رودخانه‌های زنوزچای و زیلیرچای و از جنوب به حوضه آبریز دریاچه ارومیه محدود می‌شود. محصور بودن این دشت میان ارتفاعات و شیب ملایم ۲ تا ۵ درصدی از دامنه‌ها به سمت مرکز، موجب تمرکز آب‌های زیرزمینی و در نتیجه حساسیت بیشتر آن نسبت به تغییرات هیدرولوژیکی شده است. دو رودخانه زیلیرچای و زنوزچای از مهم‌ترین منابع آب سطحی منطقه به‌شمار می‌روند. در سال‌های اخیر، برداشت بی‌رویه آب از چاه‌های مجاز و غیرمجاز، کاهش تغذیه طبیعی آبخوان و افت مستمر سطح ایستابی، شرایط بحرانی را برای دشت مرنده رقم زده است. تداوم این روند می‌تواند منجر به بروز پدیده فرونشست در مقیاس وسیع و خسارات سنگین به زیرساخت‌های عمرانی، اراضی کشاورزی و سکونتگاه‌های انسانی شود. با توجه به اهمیت اقتصادی و کشاورزی این دشت، شناسایی نواحی مستعد فرونشست و پایش تغییرشکل‌های سطح زمین از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است. روش‌های سنتی پایش زمین مانند ترازبایی و اندازه‌گیری‌های زمینی، اگرچه دقیق هستند، اما به‌دلیل هزینه بالا، پوشش مکانی محدود و زمان‌بر بودن، پاسخگوی نیازهای گسترده مطالعاتی در این زمینه نیستند. در مقابل، استفاده از تکنیک تداخل‌سنجی راداری با استفاده از تصاویر ماهواره‌ای (InSAR) به‌دلیل دقت بالا، پوشش مکانی وسیع و قابلیت ردیابی تغییرشکل‌های میلی‌متری سطح زمین، ابزاری کارآمد و نوین در شناسایی و پایش فرونشست محسوب می‌شود. بنابراین، در پژوهش حاضر تلاش شده است تا با بهره‌گیری از تکنیک ترکیبی InSAR و سیستم اطلاعات جغرافیایی (GIS)، موقعیت‌های پتانسیل فرونشست در دشت مرنده شناسایی گردد. همچنین، با تحلیل ویژگی‌های هیدروژئولوژیکی، هیدرودینامیکی و روند برداشت از منابع آب زیرزمینی، علل اصلی بروز این پدیده مورد بررسی قرار گرفته و در نهایت راهکارهایی برای مدیریت و کاهش نرخ فرونشست ارائه شود. هدف اصلی این تحقیق، ایجاد درکی جامع از وضعیت فعلی دشت مرنده و ارائه راهکارهایی علمی برای پیشگیری از گسترش پدیده فرونشست در این منطقه است.

منطقه مورد مطالعه

شهرستان مرنده با مساحتی حدود ۲۹۳ کیلومترمربع در شمال غرب استان آذربایجان شرقی واقع شده است (شکل ۱). این شهرستان پس از تبریز و مراغه، سومین شهرستان بزرگ و پرجمعیت استان به شمار می رود. از نظر ویژگی های طبیعی، شهرستان مرنده به دو واحد اصلی کوهستان و دشت تقسیم می شود. واحد کوهستان شامل رشته کوه های موروداغ و میشوداغ در جنوب، و قره داغ در شمال شهرستان است. واحد دشت نیز بین این دو رشته کوه قرار گرفته و شامل مخروط افکنه ها و دشت های آبرفتی و سیلابی پایکوه هاست. رشته کوه قره داغ شمالی ترین و بزرگ ترین رشته کوه های آذربایجان است که از طریق فرورفتگی دره ارس از کوه های قفقاز و ارمنستان جدا شده است. بخش عمده ساختار این رشته کوه از سنگ های آذرین تشکیل شده است. در جنوب شهرستان، رشته کوه میشوداغ- موروداغ امتداد یافته است. این رشته کوه از غرب استان و شمال دریاچه ارومیه آغاز می شود و تا شمال غرب تبریز ادامه دارد. در این مسیر، به وسیله تپه های کم ارتفاع به کوه های شمال تبریز (عینالی) متصل می گردد که تا گردنه شبلی امتداد می یابند. بلندترین نقطه این رشته، قله علمدار با ارتفاع ۳۱۵۵ متر است. هسته اصلی این کوه ها از سازندهای پرکامبرین و عمدتاً از جنس ریولیت تشکیل شده است.

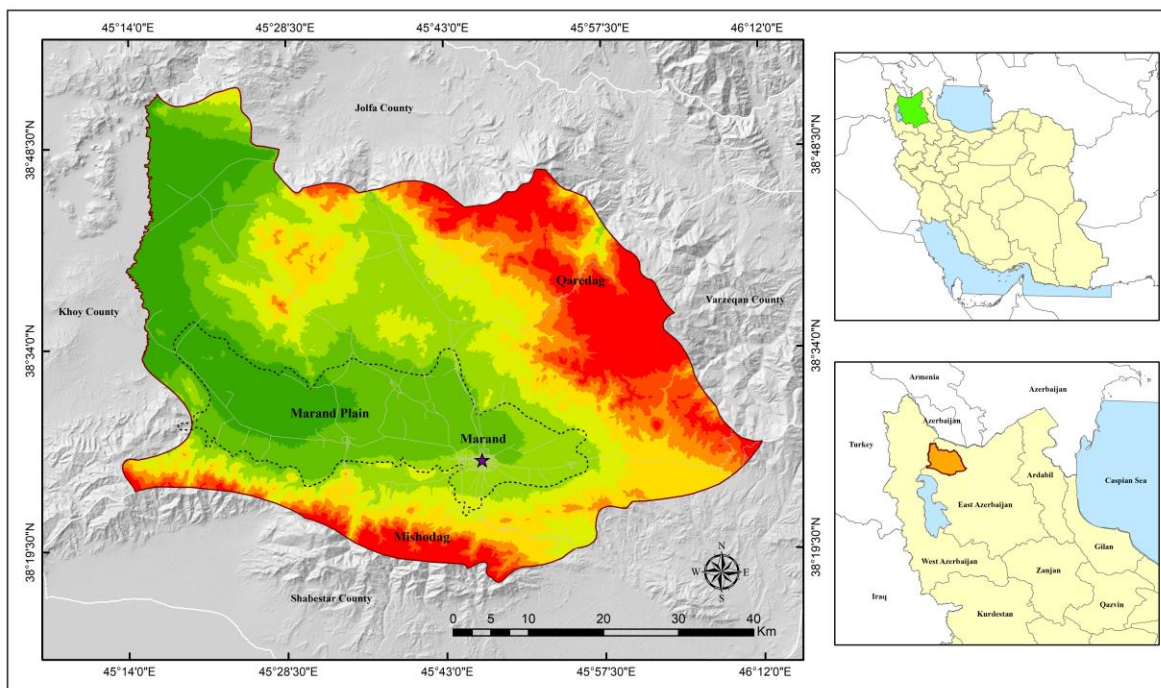
دشت مرنده میان رشته کوه های میشوداغ و قره داغ واقع شده و توسط رشته کوه میشو از دشت تبریز جدا می شود. این دشت با وسعتی حدود ۶۴۱۲۱ هزار هکتار (در این تحقیق) و ارتفاع متوسط ۱۳۰۰ متر از سطح دریا، در بخش میانی شهرستان واقع شده است. دشت مرنده پس از دشت های تبریز و مراغه، سومین کانون مهم جمعیتی استان آذربایجان شرقی محسوب می شود. برداشت بی رویه از منابع آب زیرزمینی، این دشت را در زمره دشت های مستعد فرونشست استان قرار داده است. علاوه بر دشت مرنده، بخش هایی از دشت جلفا - دوزال نیز در محدوده شهرستان قرار دارد. بخش قابل توجهی از دشت ائواوغلی نیز در غرب شهرستان واقع شده و از این طریق با شهرستان خوی در استان آذربایجان غربی اشتراکات طبیعی دارد. برخی از قسمت های غربی دشت مرنده به دلیل تأثیر گندهای نمکی، شور شده و حاصلخیزی اندکی دارند. بخش عمده شهرستان مرنده در حوزه آبریز رودخانه ارس (دریای خزر) قرار دارد و توسط شاخه های مختلف رودخانه زیلبرچای زهکشی می شود. همچنین بخش هایی از شمال و شمال شرق شهرستان توسط رودخانه های سیه رود و پهناور به ارس می ریزند. تنها بخش کوچکی از جنوب شرق شهرستان در محدوده حوزه آبریز دریاچه ارومیه واقع شده است.

مواد و روش ها

رادار دریچه مصنوعی^۱ (SAR) یک سیستم تصویربرداری میکروویو محسوب می شود که قادر است از میان ابرها نفوذ کرده و داده های تصویری به دست آورد، زیرا از امواج میکروویو استفاده می کند. این فناوری به عنوان یک سیستم فعال، قابلیت عملیات شبانه روزی را نیز داراست. یکی از ویژگی های برجسته این رادار، پیکربندی تداخل سنجی^۲ آن (InSAR) است که امکان اندازه گیری دقیق مسیر حرکت امواج تشعشعی را با توجه به هم فاز بودن فراهم می کند. این اندازه گیری ها، بر اساس موقعیت ماهواره و زمان ثبت داده ها، به تولید مدل های رقومی ارتفاع (DEM) و ارزیابی تغییر شکل های سانتی متری سطح زمین منجر می شود (Ferretti, Monti, Guarnieri, Prati & Rocca, 2007). به ویژه تکنیک تداخل سنجی (InSAR) مؤثر است؛ چرا که از اختلاف فاز میان تصاویر SAR ثبت شده از یک منطقه مشابه که در زمان های مختلف و تحت شرایط تصویربرداری و هندسی یکسان به دست می آیند، استفاده می کند. تکنیک های چندزمانی InSAR امکان نقشه برداری دقیق تغییرات سطحی و ساختاری را در مقیاس های زمانی و مکانی مختلف فراهم می کنند. این قابلیت به تحلیل حرکات غیرمعمول و ارزیابی چالش های بالقوه مرتبط با پروژه های عمرانی در طول زمان کمک می نماید، و چنین تحلیلی با استفاده از سری های زمانی داده ها امکان پذیر است (Karimzadeh, Matsuoka & Ogushi, 2018).

1 - Synthetic Aperture Radar (SAR)

2 - Interferometric configuration



شکل ۱- موقعیت جغرافیایی دشت مرند در شمال غرب کشور

Fig. 1. Geographical location of the Marand Plain in northwestern of Iran

در این پژوهش، از تصاویر ماهواره‌ای راداری ماهواره سنتینل در بازه زمانی ۲۰۲۰ تا ۲۰۲۴ و با تکرار چهار ماهه استفاده شد. پردازش این تصاویر شامل مراحل ایجاد جفت‌های تداخلی، حذف اثرات جوی و توپوگرافی، فیلتر کردن نویزها و نهایتاً محاسبه نرخ تجمعی و میانگین جابه‌جایی در محیط نرم‌افزار ArcGIS بوده است. این روش به دلیل پوشش وسیع، دقت بالا، قابلیت پایش تغییرات در هر شرایط آب‌وهوایی و ارائه داده‌های پیوسته مکانی، به عنوان ابزاری بسیار قدرتمند برای مطالعه پدیده‌هایی مانند فرونشست زمین مورد استفاده قرار گرفته است. بدین ترتیب، روش‌شناسی پژوهش مبتنی بر سنجش از دور (RS) و سیستم اطلاعات جغرافیایی (GIS) می‌باشد. پردازش‌های مورد نیاز در روش تداخل‌سنجی راداری را می‌توان به شرح زیر بیان داشت:

(۱) ثبت دو تصویر: در این مرحله دو تصویر SAR نسبت به یکدیگر ثبت هندسی می‌شوند. در این راستا، یک تصویر به عنوان تصویر اصلی و تصویر دوم به عنوان تصویر فرعی نام‌گذاری می‌شوند. برای ثبت هندسی دو تصویر، می‌بایست پیکسل‌های تصویر فرعی مطابق با پیکسل‌های تصویر اصلی هماهنگ و تنظیم شوند.

(۲) تشکیل اینترفروگرام و برآورد همبستگی تصاویر: در این مرحله، تداخل‌سنجی با ضرب متناظر دامنه و محاسبه اختلاف فاز بین تصاویر اصلی و فرعی ایجاد می‌شود. اختلاف فاز تصاویر، شامل پنج منبع مختلف می‌باشد که این اختلاف فازها عبارتند از: فاز زمین مسطح، فاز توپوگرافی، فاز تغییر شکل سطح زمین، فاز اتمسفر و فاز نویز. در سایر مراحل باقی‌مانده برای پردازش InSAR همه فازها به غیر از تغییر شکل سطح زمین حذف می‌شوند. همچنین همبستگی بین دو تصویر، که نشان‌دهنده شباهت پیکسل‌های تصاویر اصلی و فرعی می‌باشد، در این مرحله محاسبه می‌شود.

(۳) حذف فاز توپوگرافی: در این مرحله، فاز توپوگرافی، با کم کردن یک مدل ارتفاع رقومی (DEM) مرجع از تداخل نگاشت پردازش شده، حذف می‌شود.

(۴) فیلتر کردن فاز: در این قدم، نسبت سیگنال به اغتشاش با فیلتر کردن فاز افزایش می‌یابد.

(۵) بازیابی فاز: این مرحله با بررسی اختلافات فاز بین پیکسل‌های مجاور، بین فاز تداخل‌نگاشت و جابه‌جایی ارتباط ایجاد می‌شود.

۶- تصحیح زمین: در این مرحله اختلاف فاز ناشی از زمین مسطح محاسبه و حذف می‌شود.

(۷) تبدیل خط دید (LOS) به جابه‌جایی عمودی: نتیجه مرحله تصحیح زمین، تصویری است که جابه‌جایی زمین در جهت خط دید را نشان می‌دهد. برای به دست آوردن جابه‌جایی عمودی، تصویر باید با توجه به زاویه برداشت تصویر سطح، تجزیه شود.

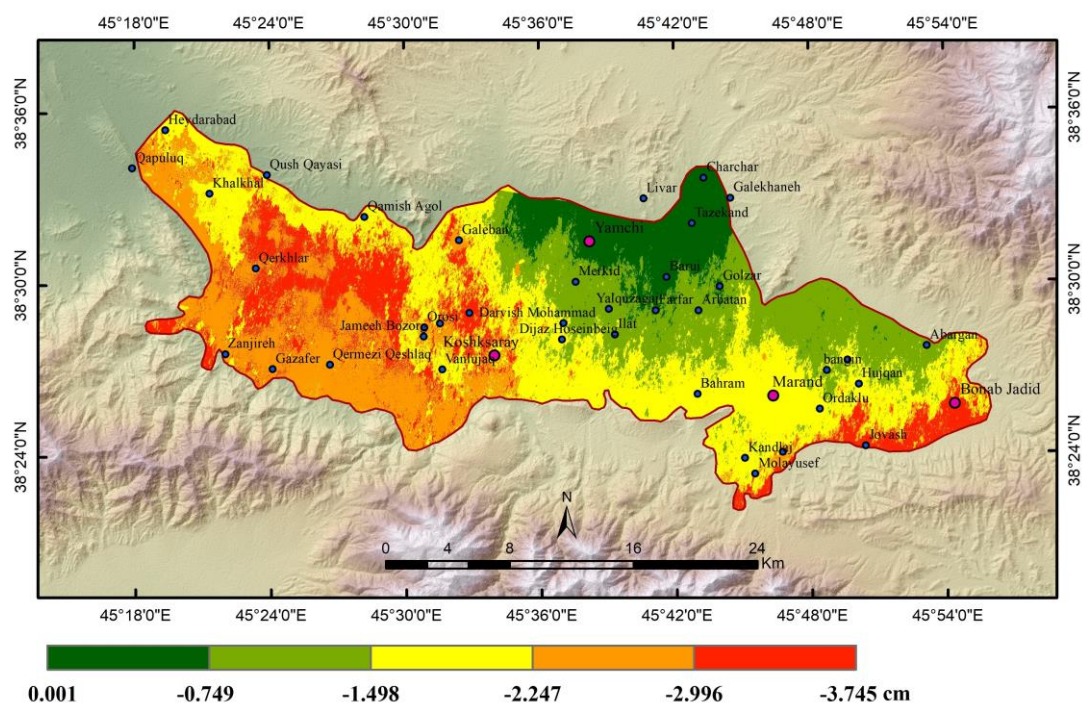
(۸) تبدیل جابه‌جایی نسبی به جابه‌جایی مطلق: با تصویر InSAR به دست آمده از مرحله قبلی، جابه‌جایی نسبی سطح زمین در جهت دید سنسور به دست می‌آید. سپس یک نقطه مرجع با احتمال جابه‌جایی کم با در نظر گرفتن سازگاری برآورد شده و اطلاعات موجود از منطقه مورد نظر برای تبدیل مقادیر نسبی جابه‌جایی به مقادیر مطلق، انتخاب می‌شود. پس از تنظیم منطقه بدون جابه‌جایی، جابه‌جایی مطلق یا عمودی محاسبه می‌شود.

نتایج و بحث

پایش فرونشست با تکنیک تداخل‌سنجی راداری

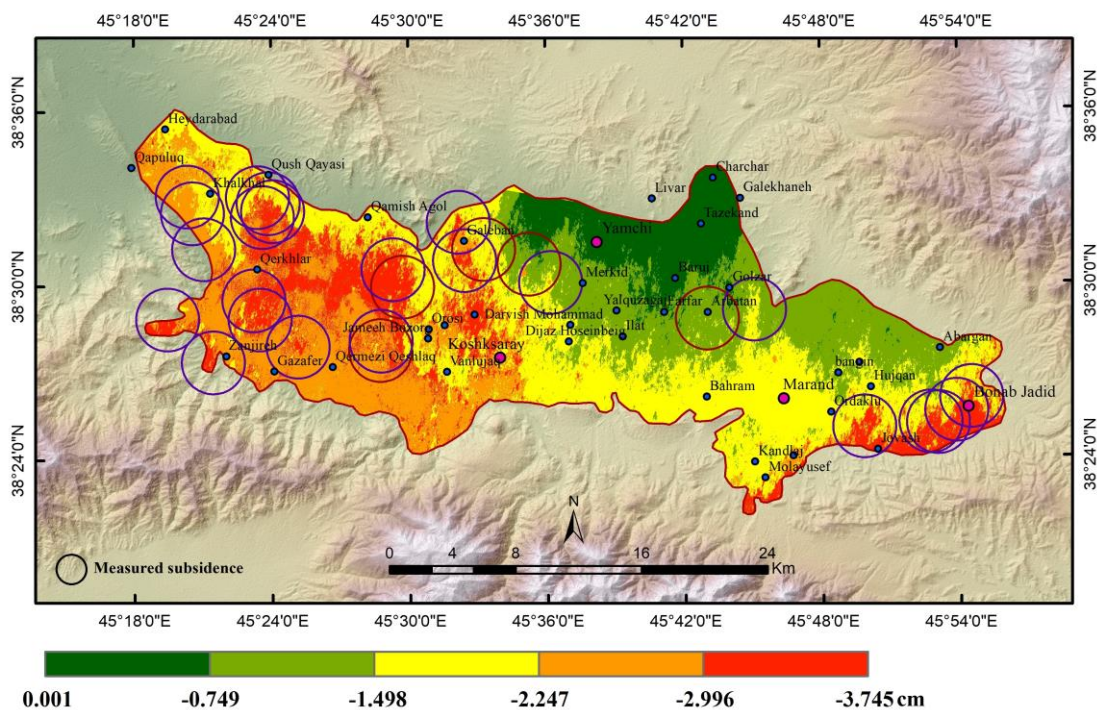
تداخل‌سنجی راداری یک تکنیک پیشرفته سنجش از دور است که با مقایسه فاز دو یا چند تصویر راداری دریافتی از یک منطقه در زمان‌های مختلف، قادر به تشخیص و اندازه‌گیری جابه‌جایی‌های سطح زمین در حد میلی‌متر تا سانتیمتر است. این روش بر اساس ایجاد یک تصویر تداخلی (اینترفروگرام) از اختلاف فاز بین دو تصویر عمل می‌کند. تغییرات فاز در اینترفروگرام ناشی از عوامل مختلفی چون تغییر شکل سطح زمین (مانند فرونشست)، تغییرات جوی و خطاهای مداری است. با فیلتر کردن و پردازش‌های دقیق، می‌توان اثر تغییر شکل زمین را استخراج نمود. در پژوهش حاضر نیز نقشه فرونشست دشت مرنند با استفاده از روش‌شناسی مذکور تهیه گردید. نقشه به دست آمده (شکل ۲) تغییرات مکانی نرخ فرونشست را با دقت فضایی بالا و به صورت پیوسته نشان می‌دهد. برای اطمینان از صحت و اعتبار نتایج حاصل از پردازش‌های سنجش از دور، از داده‌های میدانی جمع‌آوری شده با دستگاه GPS سه فرکانسه و نیز منحنی مشخصه عملکرد سیستم (ROC) بهره گرفته شد. تطابق قابل توجه بین پهنه‌های فرونشست شناسایی شده با تکنیک InSAR و موقعیت‌های اندازه‌گیری شده با GPS، دلیلی بر قابلیت اطمینان روش‌شناسی اتخاذ شده است (شکل ۳).

ارزیابی دقت روش با استفاده از منحنی ROC و شاخص AUC انجام شد (شکل ۴). منحنی ROC با مقایسه تشخیص صحیح و نادرست، توان تفکیک آزمون را نشان می‌دهد؛ به طوری که انطباق منحنی با خط قطر بیانگر عملکرد تصادفی و فاصله گرفتن از آن (در بالای خط قطر) نشان‌دهنده دقت بالاتر است. شاخص AUC معیار کلی سنجش دقت بوده و هرچه به عدد ۱ نزدیک‌تر باشد، عملکرد آزمون بهتر ارزیابی می‌شود. همچنین ضریب جینی که از AUC محاسبه می‌شود، شاخص دیگری برای سنجش کارایی طبقه‌بندی است. نتایج به دست آمده برای دشت مرنند با مقدار AUC برابر ۰/۹۴۹ و ضریب جینی ۰/۸۹۸، بیانگر عملکرد عالی و قدرت تشخیص بسیار بالای روش تداخل‌سنجی راداری در شناسایی پهنه‌های فرونشست است و قابلیت اتکای بالای نقشه‌های تولید شده را برای تحلیل‌ها و برنامه‌ریزی‌های مدیریتی نشان می‌دهد.



شکل ۲- نقشه فرونشست دشت مرند با کاربست تکنیک تداخل سنجی راداری (از سال ۲۰۲۰ تا ۲۰۲۴)

Fig. 2. Land subsidence map of the Marand Plain using Interferometric Synthetic Aperture Radar (InSAR) technique (2020–2024)

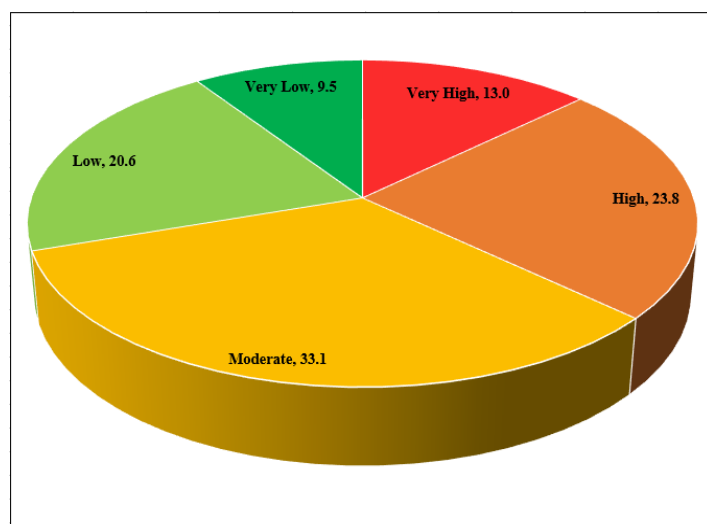


شکل ۳- پهنه‌های اندازه‌گیری فرونشست با استفاده از GPS سه فرکانسه در دشت مرند

Fig. 3. Subsidence measurement zones using a three-frequency GPS in the Marand Plain

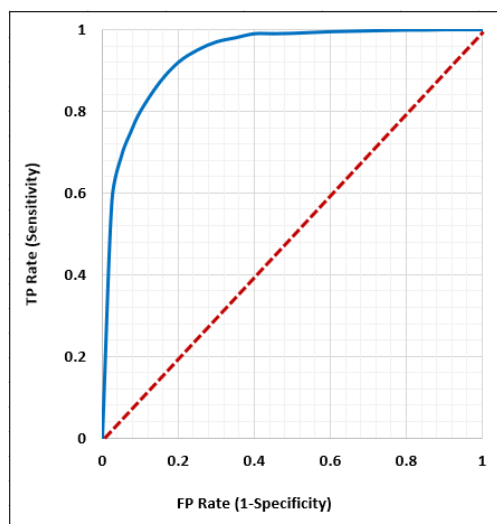
نتایج تحلیل‌های صورت گرفته نشان می‌دهد که تقریباً کل گستره دشت مرند در معرض پدیده فرونشست، با شدت‌های متفاوت قرار دارد. نرخ فرونشست در این دشت در بازه چهارساله مورد مطالعه، از صفر تا حداکثر ۳/۷۴۵ سانتی‌متر در سال متغیر بوده و میانگین پیکسلی آن برای کل دشت حدود ۱/۷۲۳- سانتی‌متر برآورد گردیده است. توجه به دو نکته اساسی، ابعاد نگران‌کننده این پدیده را آشکارتر می‌سازد: نخست آنکه این رقم میانگین برای کل پهنه وسیع دشت محاسبه شده و در بخش‌های قابل توجهی از آن، نرخ فرونشست به مراتب بیشتر است. دوم آنکه این رقم حاصل تنها چهار سال مشاهده است و در صورت تداوم روندهای کنونی بهره‌برداری از منابع آب زیرزمینی و عدم اجرای مدیریت یکپارچه، اثرات تجمعی فرونشست در بلندمدت می‌تواند به ارقامی بسیار چشمگیر و فاجعه‌بار منجر شود که خساراتی جبران‌ناپذیر بر محیط زیست، زیرساخت‌ها، سازه‌ها و فعالیت‌های اقتصادی - اجتماعی وارد خواهد کرد. در شکل ۵ مساحت هر یک از کلاس‌های فرونشست برحسب درصد ارائه شده است.

توزیع فضایی نرخ فرونشست در دشت مرند از الگوی ناهمگن ولی با پیوستگی نسبی برخوردار است. بخش‌های شمالی و شمال شرقی دشت، عمدتاً منطبق بر مخروط‌افکنه زون‌چای، با نرخ‌های فرونشست بسیار کم (کمتر از ۰/۷۴۹ سانتی‌متر) مشخص می‌شوند. این امر مخصوصاً در محدوده شهر یامچی و روستاهای باروج، تازه‌کندآخوند و چرچر دیده می‌باشد. بر این اساس حدود ۹/۵ درصد از منطقه مطالعاتی با مساحتی بالغ بر ۶۱۰۸ هکتار در کلاس با فرونشست بسیار کم قرار گرفته است. پهنه‌های با فرونشست کم (بین ۰/۷۴۹ تا ۱/۴۹۸ سانتی‌متر) که عمدتاً اراضی روستاهای مرکید، یالقوزآغاج، فارفار، ابرغان و و ارباتان را دربرمی‌گیرند، با سهمی حدود ۲۰/۶ درصدی (۱۳۲۰۵ هکتار)، حاشیه‌ای نسبتاً وسیع پیرامون مناطق با فرونشست بسیار کم ایجاد کرده‌اند. داده‌های GPS میدانی نیز نرخ پایین فرونشست در این پهنه‌ها را تأیید می‌کند. آنچه مشخص است فرونشست زمین در محدوده دشت مرند به صورت پهنه‌های پیوسته بوده و به صورت تدریجی رخ داده است. بدین ترتیب، در محدوده‌ای مشخص، مجموعه‌ای از متغیرها باعث شده‌اند که فرونشست با نرخ کمتری اتفاق بیفتد و برعکس. این الگوی توزیع، حاکی از نقش مؤثر عواملی مانند تغذیه بهتر آبخوان در مناطق بالادست و نزدیک به کوهپایه‌ها، بافت رسوبی درشت‌تر در مخروط‌افکنه‌ها، و کاهش فشار بهره‌برداری از آب زیرزمینی در این نواحی است.



شکل ۵- مساحت کلاس‌های فرونشست در دشت مرند

Fig. 5. Area of land subsidence classes in the Marand Plain



شکل ۴- منحنی ROC روش‌شناسی تحقیق

Fig. 4. ROC curve of the study methodology

بررسی‌ها نشان می‌دهد که بالغ بر ۳۳ درصد از گستره دشت مرند، معادل حدود ۲۱۲۰۹ هکتار، در طبقه‌بندی مناطق با نرخ فرونشست متوسط قرار دارد. داده‌های حاصل از مطالعات چهار سال گذشته نشان می‌دهد که دشت مطالعاتی در این پهنه‌ها در طی چهار سال گذشته بین ۱/۴۹۸ تا ۲/۲۴۷ سانتی‌متر نشست داشته است. این مقادیر بیانگر روندی محسوس و قابل توجه در کاهش ارتفاع سطح زمین در بخش‌هایی از دشت است. پراکنش این پهنه‌ها، عمدتاً در بین طبقات فرونشست کم تا زیاد قرار گرفته و الگوی فضایی آن‌ها روندی تقریباً شمال غربی - جنوب شرقی را دنبال می‌کند. این الگو نشان می‌دهد که فرونشست در دشت مرند محدود به نقاط پراکنده نیست، بلکه در قالب نوارهایی تمایل به امتداد یافتن در طول این محور جغرافیایی را دارد. شهر مرند به عنوان بزرگ‌ترین و مهم‌ترین مرکز جمعیتی و اقتصادی این دشت، در دل همین پهنه با فرونشست متوسط واقع شده است. قرارگیری شهر در این محدوده، اهمیت موضوع و ضرورت برنامه‌ریزی برای مدیریت منابع آب و کنترل مخاطرات زمین‌شناختی را دوچندان می‌کند. علاوه بر شهر مرند، بخش عمده‌ای از اراضی روستاهای حیدرآباد، خلخال، قوش‌قیه‌سی، قمیش آغل، وانلوجق، درویش محمد، دیزج حسین‌بیگ، بهرام، کندلج، اردکلو و هوجقان نیز در محدوده این کلاس قرار دارد. این گستردگی بیانگر آن است که فرونشست نه تنها نواحی شهری بلکه مناطق روستایی و اراضی کشاورزی را نیز تحت تأثیر قرار داده است. در نهایت، پیوستگی نسبی پهنه‌های این کلاس به خوبی نشان می‌دهد که نرخ فرونشست در دشت مرند ماهیتی تدریجی، پهنه‌ای و گسترده دارد؛ به عبارتی، این پدیده به صورت یک فرآیند آرام اما مداوم در حال پیشروی بوده و در صورت عدم مدیریت صحیح، می‌تواند به یکی از چالش‌های جدی زیست‌محیطی و توسعه‌ای منطقه تبدیل شود (شکل ۶).

در حالت تطبیقی، بالغ بر ۱۵۲۷۸ هکتار از اراضی دشت مرند در کلاس فرونشست زیاد قرار گرفته‌اند که این مقدار حدود ۲۳/۸ درصد از کل محدوده دشت را شامل می‌شود. نکته قابل توجه آن است که توزیع فضایی این کلاس عمدتاً با نیمه غربی دشت انطباق دارد و بررسی‌های چند سال اخیر نشان می‌دهد که این بخش از دشت با آهنگی بالا و نگران‌کننده در حال فرونشست است. چنین روندی می‌تواند نتیجه مجموعه‌ای از عوامل مختلف مانند افت شدیدتر سطح آب‌های زیرزمینی، محدود بودن تغذیه آبخوان در اثر خشکسالی‌های اقلیمی و هیدرولوژیکی، ویژگی‌های زمین‌شناسی و جنس سازندها، و نیز فعالیت‌های نوزمین‌ساختی باشد. بخش قابل توجهی از اراضی شهر کشکسرای در این پهنه قرار دارد و علاوه بر آن، تعدادی از روستاهای کوچک و بزرگ از جمله قاپولوخ، قرخلار، زنجیره، گزافر، قرمزی قشلاق، ارسی، جامعه بزرگ، قراجه فیض‌اله و گله‌بان نیز در محدوده کلاس فرونشست زیاد واقع شده‌اند. همچنین بخشی از اراضی روستاهای ملایوسف و دیزج علیا در جنوب شرق دشت نیز در این طبقه جای گرفته‌اند. تمرکز پهنه‌های دارای فرونشست زیاد و بسیار زیاد در وسعت قابل توجهی از نیمه غربی دشت، بیانگر وضعیت بحرانی این بخش‌هاست. ادامه روند کنونی فرونشست می‌تواند پیامدهای جدی همچون کاهش شدید یا از بین رفتن ظرفیت نگهداری آب در بخش‌های وسیعی از دشت مرند، تخریب فونداسیون و نشست ساختمان‌ها، آسیب به زیرساخت‌های شهری و روستایی، تخریب چاه‌ها و زمین‌های کشاورزی را به دنبال داشته باشد؛ پیامدهایی که در نهایت می‌توانند تبعات اجتماعی، اقتصادی و حتی امنیتی گسترده‌ای برای منطقه ایجاد کنند. در برخی از نواحی دشت مرند، فرونشست زمین با آهنگی بسیار بالا رخ داده و این مناطق در طبقه‌بندی پهنه‌بندی، تحت عنوان کلاس با فرونشست بسیار زیاد شناخته می‌شوند. حدود ۱۳ درصد از محدوده دشت، معادل ۸۳۲۱ هکتار، در این کلاس قرار گرفته است. در این پهنه‌ها میزان فرونشست زمین بیش از ۲/۹۹۶ سانتی‌متر بوده که نشان‌دهنده شدت و گستردگی قابل توجه این پدیده در بخش‌هایی از دشت است. الگوی توزیع فضایی این پهنه‌ها بیان می‌کند که مناطق دارای فرونشست بسیار زیاد عمدتاً در نیمه غربی دشت و بخش‌هایی از نوار جنوب شرقی آن پراکنده شده‌اند. بخش قابل توجهی از اراضی شهر کشکسرای در نیمه غربی دشت و همچنین اراضی شهر بناب جدید در جنوب شرقی دشت در این طبقه قرار دارند. افزون بر این، اراضی روستاهای قراجه محمد و جواش نیز در محدوده همین پهنه‌ها واقع شده‌اند.

قرارگیری پهنه‌ها با فرونشست بسیار زیاد در مجاورت پهنه‌هایی با فرونشست زیاد موجب شده است که مناطق وسیعی از دشت به صورت یکپارچه در معرض نرخ‌های بالای فرونشست قرار گیرند؛ وضعیتی که خطرات و پیامدهای جدی را به دنبال خواهد داشت. این هم‌پوشانی فضایی، علاوه بر افزایش آسیب‌پذیری سکونتگاه‌ها و زیرساخت‌ها، می‌تواند تخریب اراضی کشاورزی، افت ظرفیت ذخیره آبخوان و تشدید مخاطرات زمین‌شناختی را به همراه داشته و چالش‌های اجتماعی - اقتصادی قابل توجهی را برای منطقه ایجاد کند.

الگوی توزیع ناهمگون فرونشست در دشت مرند را می‌توان ناشی از ترکیب پیچیده‌ای از عوامل زمین‌شناختی، هیدروژئولوژیکی و انسانی دانست. افت شدیدتر سطح آب‌های زیرزمینی در اثر برداشت بی‌رویه برای مصارف کشاورزی و شرب، کاهش تغذیه طبیعی آبخوان به دلیل توالی خشکسالی‌های اخیر، ضخامت و جنس رسوبات ریزدانه (مانند رس و سیلت) که قابلیت تراکم‌پذیری بالایی دارند، و احتمالاً تأثیرات فعالیت‌های نوزمین‌ساختی، از جمله مهم‌ترین دلایل تشدید فرونشست در نیمه غربی دشت به شمار می‌روند. تداوم این روند، علاوه بر کاهش شدید ظرفیت ذخیره‌سازی سفره‌های آب زیرزمینی، می‌تواند منجر به ایجاد ترک‌ها و شکاف‌های گسترده در سطح زمین، تخریب زیرساخت‌های حیاتی (مانند جاده‌ها، خطوط انتقال آب و نیرو، شبکه‌های آبیاری)، آسیب به فونداسیون ساختمان‌ها و سازه‌ها، کج‌شدگی و تخریب چاه‌های آب، و نهایتاً خسارت گسترده به اراضی کشاورزی گردد. این پیامدهای محیطی - مهندسی، به نوبه خود، می‌تواند موجبات ناامنی غذایی، تشدید مهاجرت از روستاها، بروز تنش‌های اجتماعی و خسارات اقتصادی کلان را فراهم آورد. بنابراین، نتایج این پژوهش به وضوح هشدار می‌دهد که دشت مرند، به ویژه نیمه غربی آن، در وضعیت آسیب‌پذیر و بحرانی نسبت به پدیده فرونشست قرار دارد و اتخاذ فوری راهبردهای مدیریتی یکپارچه، شامل کنترل و نظارت بر برداشت از آب‌های زیرزمینی، تغذیه مصنوعی آبخوان‌ها، بازچرخانی آب، و اصلاح الگوی کشت، برای جلوگیری از فاجعه زیست‌محیطی و انسانی ضروری است.



شکل ۶- شواهد میدانی فرونشست در دشت مرند

Fig. 6. Field evidences of land subsidence in the Marand Plain

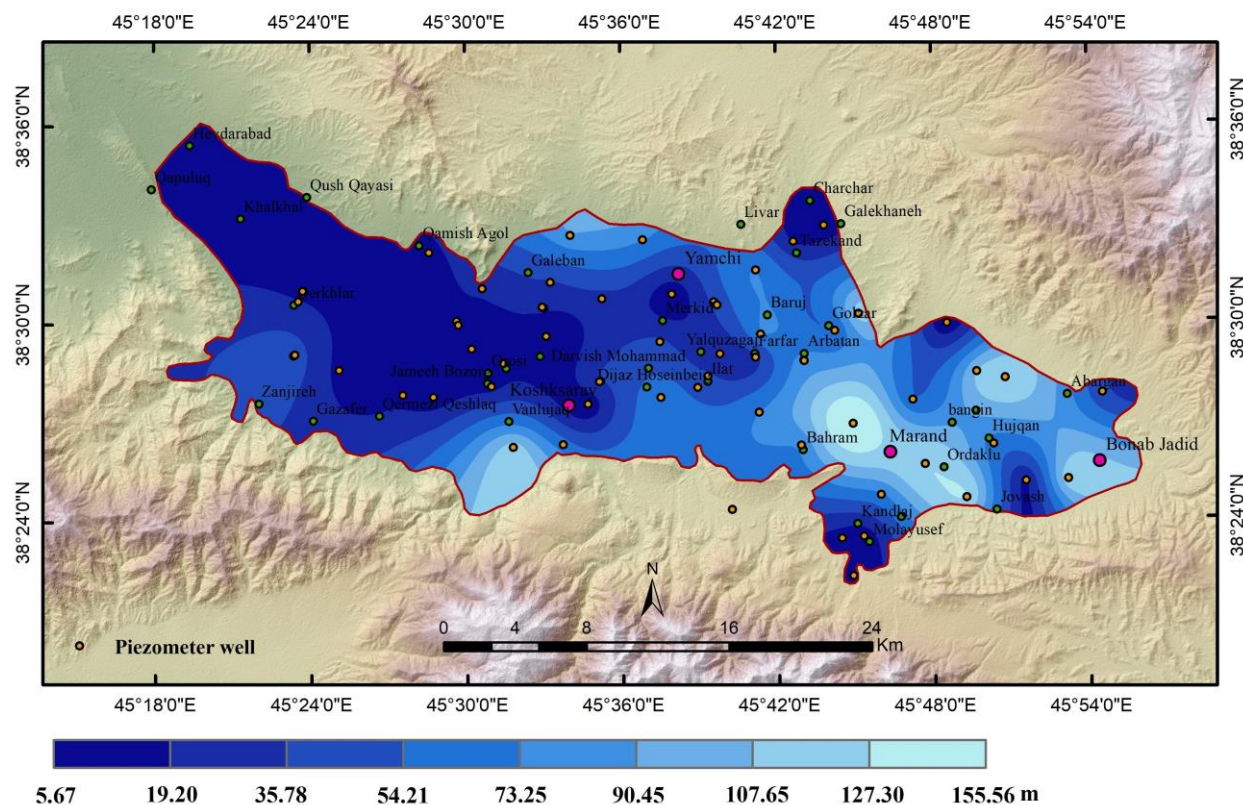
ارزیابی سطح ایستابی

برداشت بی‌رویه از منابع آب زیرزمینی و افت سطح ایستابی، امروزه به‌عنوان یکی از اصلی‌ترین و تأثیرگذارترین عوامل بروز پدیده فرونشست زمین شناخته می‌شود. این مسئله به‌ویژه در دشت‌های خشک و نیمه‌خشک ایران، که وابستگی بالایی به منابع آب زیرزمینی دارند، از اهمیت بیشتری برخوردار است. از این‌رو در هرگونه مطالعه مرتبط با فرونشست، بررسی دقیق رفتار و تغییرات سطح آب زیرزمینی، جزء مراحل اساسی و غیرقابل چشم‌پوشی محسوب می‌شود. در پژوهش حاضر، با هدف تحلیل دقیق فرونشست دشت مرند، روند تغییرات سطح ایستابی آب‌های زیرزمینی طی سال‌های اخیر مورد بررسی قرار گرفت. برای این منظور، از اطلاعات چاه‌های پیژومتری مستقر در سطح دشت استفاده شد که از معتبرترین منابع داده‌ای برای ارزیابی پویایی آبخوان‌ها به شمار می‌روند. در نخستین گام، وضعیت فعلی آبخوان و سطح ایستابی در سال ۱۴۰۲ تحلیل شد. شکل ۷ نقشه هم‌سطح ایستابی دشت مرند را نشان می‌دهد که بر اساس درون‌یابی مکانی داده‌های پیژومتری تهیه شده است. این نقشه امکان مشاهده الگوی فضایی تغییرات سطح آب زیرزمینی و مشخص کردن نواحی دارای افت شدید یا کم‌عمق را فراهم می‌کند.

نتایج به دست آمده از نظر آماری نشان می‌دهد:

- میانگین سطح ایستابی دشت مرند برابر با ۴۸/۶ متر است که نشان‌دهنده عمق نسبتاً زیاد آب زیرزمینی در بخش‌های مختلف دشت می‌باشد.
 - کمترین عمق سطح ایستابی، حدود ۵ متر، در غرب دشت و در محدوده نزدیک به تلاقی رودخانه‌های زیلبرچای و قطورچای مشاهده می‌شود. نزدیکی به سطح اساس محلی، وجود بسترهای آبرفتی و برداشت کمتر در این ناحیه، علت اصلی کم عمق بودن سطح ایستابی است.
 - بیشترین عمق سطح ایستابی، حدود ۱۵۶ متر، در شرق دشت و اطراف شهر مرند قرار دارد. این ناحیه دارای برداشت‌های بیشتر، تراکم جمعیتی بالا و تغذیه کمتر آبخوان است.
 - انحراف معیار ۳۵/۳ متر نشان‌دهنده وجود تفاوت چشمگیر و تغییرپذیری بالا در عمق سطح آب زیرزمینی در سراسر دشت مرند است؛ موضوعی که اهمیت بررسی‌های محلی و نقطه‌ای را دوچندان می‌کند.
- از نظر الگوی کلی، سطح ایستابی از شرق به غرب و همچنین از ارتفاعات شمالی (قره‌داغ) و جنوبی (میشوداغ) به سوی مرکز دشت به طور قابل توجهی کاهش می‌یابد. این وضعیت بیانگر جهت عمومی جریان زیرزمینی و نیز توزیع مکانی مناطق تغذیه و تخلیه آبخوان است. در پهنه‌های مرتفع پیرامونی دشت، به دلیل نفوذپذیری بیشتر و تغذیه طبیعی بهتر، سطح آب بالاتر قرار دارد، درحالی‌که در بخش‌های مرکزی و کم‌ارتفاع، افزایش بهره‌برداری انسانی و کاهش تغذیه، موجب افت محسوس سطح ایستابی شده است.
- در نیمه غربی دشت مرند، سطح ایستابی آب‌های زیرزمینی در عمق‌های کم‌تری قرار دارد و این امر بیانگر فاصله کم میان سطح آبخوان و سطح زمین است. وجود چنین شرایطی معمولاً سبب می‌شود که آبخوان در برابر نوسانات هیدرولوژیکی - مانند بارندگی‌های فصلی، تغییرات دما و شدت برداشت‌ها - واکنش سریع‌تری نشان دهد. نزدیک بودن سطح آب به سطح زمین علاوه بر افزایش دامنه نوسان سطح ایستابی، موجب افزایش آسیب‌پذیری آبخوان نسبت به نفوذ آلاینده‌ها نیز می‌شود؛ زیرا ضخامت لایه‌های محافظ در بالای آبخوان کاهش یافته و مسیر انتقال آلاینده‌ها به آب زیرزمینی کوتاه‌تر می‌شود. همچنین در چنین شرایطی، به‌ویژه در رسوبات دانه‌ریز و فشرده، امکان تراکم‌پذیری بیشتر لایه‌ها در اثر افت سطح آب فراهم شده و پتانسیل وقوع فرونشست زمین افزایش می‌یابد.
- در بخش قابل توجهی از نیمه غربی دشت مرند، عمق سطح ایستابی کمتر از ۲۰ متر است. این عمق کم، اگرچه در نگاه اول نشانه‌ای از دسترسی آسان‌تر به منابع آب زیرزمینی به‌نظر می‌رسد، اما در عمل می‌تواند تبعات جدی برای پایداری زمین و کیفیت آب به همراه داشته باشد. از نظر کیفیت، وجود واحدهای زمین‌شناسی شور، نهشته‌های نم‌دار و کفه‌های نمکی در بخش‌هایی از نوار غربی دشت، تأثیر مستقیمی بر ترکیب شیمیایی آب زیرزمینی دارد. این تشکیلات باعث افزایش شوری و هدایت الکتریکی آب

می‌شوند و به تدریج کیفیت منابع آب را در این بخش از دشت کاهش می‌دهند. چنین روندی غالباً در مناطق پایین‌دست دشت‌ها که محل تجمع مواد محلول و املاح هستند، شدیدتر دیده می‌شود.



شکل ۷- سطح ایستابی آب‌های زیرزمینی در دشت مرند

Fig. 7. Groundwater table of Marand Plain

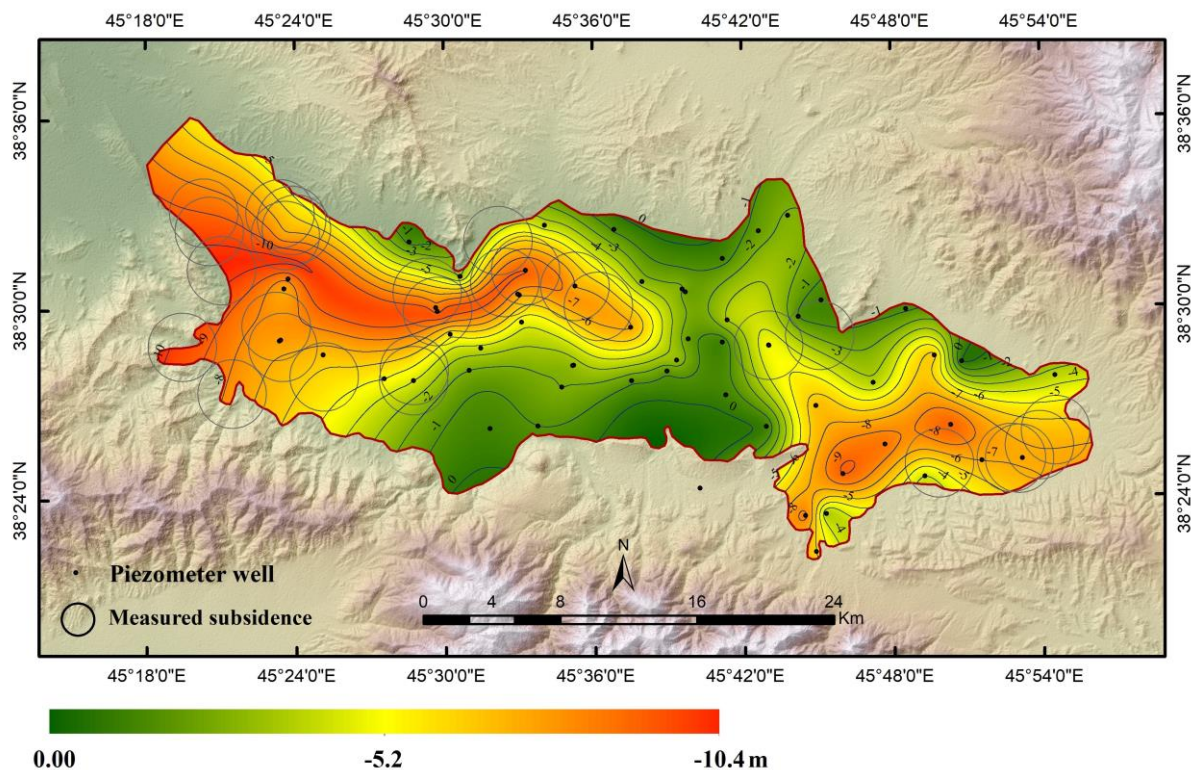
در مقابل، در نیمه شرقی دشت مرند- به‌ویژه در محدوده شهر مرند و اطراف آن- شرایط کاملاً متفاوت است. در این ناحیه، سطح ایستابی در عمق‌های بسیار بیشتری از سطح زمین قرار دارد. در بسیاری از نقاط این قسمت، عمق سطح آب زیرزمینی بیش از ۹۰ متر است و در بخشی از پهنه شرقی دشت، سطح ایستابی حتی در عمق بیش از ۱۵۰ متر مشاهده شده است. این اختلاف قابل توجه در عمق، بازتابی از چند عامل مهم است: افزایش تراکم جمعیتی و برداشت بیشتر آب زیرزمینی در بخش‌های شهری و کشاورزی پرمصرف، ساختار زمین‌شناسی متفاوت، و همچنین دوری از نواحی تغذیه طبیعی آبخوان. در نیمه شرقی دشت، پهنه‌های دارای سطح ایستابی کم‌عمق‌تر غالباً در حاشیه دشت و در محدوده مخروط‌افکنه‌های پای‌کوهی قرار دارند؛ مناطقی که به دلیل رسوبات آبرفتی درشت‌دانه و نفوذپذیری بالا، تغذیه آبخوان به‌صورت مؤثر انجام می‌شود. نمونه بارز این وضعیت، رأس مخروط‌افکنه زون‌چای است که در مناطق پیرامون روستاهای چرچر و تازه‌کند آخوند مشاهده می‌شود. در این بخش، ورود آب‌های سطحی و نفوذ سریع آن‌ها در رسوبات مخروط‌افکنه‌ای، سطح آب زیرزمینی را در عمق کمتری قرار داده و یک ناحیه تغذیه‌ای نسبتاً فعال برای آبخوان ایجاد کرده است.

به طور کلی، مقایسه شرایط نیمه شرقی و غربی دشت مرند نشان دهنده ناهمگونی فضایی قابل توجه در عمق سطح ایستابی است؛ موضوعی که در تحلیل روند فرونشست زمین اهمیت ویژه‌ای دارد. چنین ناهمگونی نه تنها رفتار آبخوان را تحت تأثیر قرار می‌دهد، بلکه نوع و شدت واکنش لایه‌های زمین به افت سطح آب را نیز تعیین می‌کند. در بخش‌های کم‌عمق غربی، آسیب‌پذیری بیشتر و احتمال نشست سریع‌تر است، در حالی که در بخش‌های عمیق شرقی، فرونشست وابسته به افت طولانی مدت سطح آب خواهد بود.

ارزبایی تغییرات سطح آب زیرزمینی

بررسی تغییرات زمانی سطح ایستابی آب‌های زیرزمینی یکی از اساسی‌ترین مراحل در تحلیل فرونشست زمین در دشت مرند به‌شمار می‌رود، زیرا افت تدریجی سطح آب زیرزمینی مستقیماً بر تراکم‌پذیری لایه‌های زمین و در نتیجه میزان نشست آن تأثیر می‌گذارد. در این تحقیق، تغییرات سطح ایستابی آبخوان مرند در دوره زمانی ده‌ساله اخیر مورد تحلیل قرار گرفت تا روند کلی افت، شدت و پراکندگی مکانی آن مشخص شود. نتایج این تغییرات در شکل ۸ ارائه شده است.

بر اساس محاسبات پیکسل‌پایه، میانگین تغییرات سطح آب زیرزمینی در دشت مرند برابر با $-4/67$ متر بوده است. این مقدار بیانگر آن است که طی یک دهه گذشته، سطح ایستابی در اغلب مناطق دشت به‌طور پیوسته کاهش یافته است. حداقل مقدار افت، حدود ۰ متر و بیشترین مقدار افت نیز حدود $-10/4$ متر محاسبه شده است که نشان دهنده اختلاف مکانی قابل توجه در رفتار آبخوان می‌باشد. بررسی الگوی فضایی افت نشان می‌دهد که کمترین میزان افت سطح آب زیرزمینی در بخش‌هایی از نوار شمالی و جنوبی دشت رخ داده است. این دو ناحیه عمدتاً منطبق بر رأس مخروط‌افکنه‌های پای‌کوهی هستند؛ مناطقی که به طور طبیعی نرخ تغذیه آبخوان در آن‌ها بیشتر و برداشت آب نسبتاً کمتر است.



شکل ۸- تغییرات سطح ایستابی آب‌های زیرزمینی دشت مرند

Fig. 8. Changes in groundwater table level in the Marand Plain

در نوار شمالی، محدوده‌هایی که کمترین افت را نشان می‌دهند شامل مخروط‌افکنه زنوزچای در دامنه‌های جنوبی رشته‌کوه قره‌داغ است. در نوار جنوبی نیز، کمترین افت در مخروط‌افکنه‌های حد فاصل کشکسرای تا روستای بهرام و در پایکوه‌های رشته‌کوه‌های میشوداغ ثبت شده است. در این پهنه‌ها، افت سطح آب زیرزمینی عمدتاً بین ۰ تا ۳- متر بوده است. علت پایین‌تر بودن میزان افت در این مناطق را می‌توان به چند عامل نسبت داد: (۱) تراکم نسبتاً کم جمعیت و در نتیجه برداشت کمتر آب برای مصارف شرب و کشاورزی؛ (۲) تغذیه مؤثر آبخوان توسط آبراهه‌ها و رودخانه‌هایی که از ارتفاعات قره‌داغ و میشوداغ سرچشمه می‌گیرند و آب را به سمت مخروط‌افکنه‌ها هدایت می‌کنند؛ (۳) نفوذپذیری بالاتر رسوبات مخروط‌افکنه‌ای که موجب افزایش نرخ نفوذ و کاهش رواناب سطحی می‌شود؛ (۴) کاهش فشار بهره‌برداری کشاورزی در مقایسه با بخش‌های مرکزی یا شرقی دشت که تحت شدت بیشتری از برداشت قرار دارند. در مقابل، بخش‌هایی از دشت که از تغذیه طبیعی کمتری برخوردارند یا در آنها برداشت آب سهم بالایی دارد، شاهد بیشترین میزان افت طی ده سال اخیر بوده‌اند. این روند افت مداوم، در کنار شرایط زمین‌شناسی خاص بخش‌های مرکزی دشت، زمینه‌ساز افزایش پتانسیل فرونشست شده و اهمیت مدیریت پایدار منابع آب زیرزمینی را بیش از پیش برجسته می‌کند.

بیشترین میزان افت سطح ایستابی آب‌های زیرزمینی در دشت مرنند مربوط به جنوب‌شرق دشت و همچنین بخش‌هایی از نیمه غربی دشت است. بررسی‌های انجام‌شده بر اساس داده‌های پیرومتری و مدل‌سازی‌های مکانی نشان می‌دهد که در بخش‌های قابل توجهی از این پهنه‌ها، افت سطح ایستابی بیش از ۶ متر بوده و در برخی نقاط حتی مقادیر بزرگ‌تری نیز ثبت شده است. این میزان افت، بیانگر فشار چشمگیر بر آبخوان در طی یک دهه گذشته و نشانه‌ای از ناپایداری هیدروژئولوژیکی منطقه است. در جنوب‌شرق دشت مرنند، تمرکز بالایی از سکونتگاه‌ها و فعالیت‌های انسانی وجود دارد. شهر مرنند به‌عنوان مرکز شهرستان، یکی از بزرگ‌ترین نقاط جمعیتی منطقه محسوب می‌شود و شهر بناب جدید نیز در همین بخش از دشت قرار دارد. افزون بر این دو شهر، چندین روستای پرجمعیت نیز در این پهنه استقرار یافته‌اند که مجموعاً بار قابل توجهی بر منابع آب زیرزمینی وارد می‌کنند. طبیعی است که این تراکم بالای جمعیت، همراه با توسعه کاربری‌های شهری و کشاورزی، منجر به برداشت بیش از حد از چاه‌های آب زیرزمینی و کاهش حجم ذخیره آبخوان شود. از سوی دیگر، دشت مرنند طی سال‌های اخیر تحت تأثیر خشکسالی‌های پی‌درپی و ممتد قرار داشته است. کاهش چشمگیر بارندگی‌های سالانه، کاهش جریان‌های سطحی و محدود شدن تغذیه طبیعی آبخوان، سبب شده است که بیلان آب زیرزمینی در اکثر سال‌ها منفی باشد. در چنین شرایطی، حتی برداشت‌های معمول نیز می‌توانند موجب افت معنی‌دار سطح ایستابی شوند، چه رسد به برداشت‌های فراتر از ظرفیت تجدیدپذیر آبخوان. ترکیب این عوامل - یعنی برداشت بی‌رویه ناشی از جمعیت و فعالیت‌های انسانی از یک‌سو و کاهش شدید تغذیه آبخوان به علت خشکسالی‌های متوالی از سوی دیگر - باعث شده است که در جنوب شرقی دشت مرنند، افت سطح ایستابی به طور چشمگیر و نگران‌کننده‌ای بالاتر از سایر نقاط دشت باشد. این الگوی افت شدید، نه تنها نشان‌دهنده فشار بیش از حد بر آبخوان است، بلکه بیانگر افزایش خطر فرونشست زمین نیز می‌باشد، زیرا افت مداوم سطح آب، نقش قابل توجهی در فشردگی و تراکم‌پذیری لایه‌های ریزدانه زمین دارد. به طور کلی، روند ثبت شده در این بخش از دشت مرنند هشدار است نسبت به ضرورت مدیریت یکپارچه منابع آب، کنترل برداشت‌های غیرمجاز، تغییر الگوی کشت، و برنامه‌ریزی دقیق برای مقابله با اثرات بلندمدت خشکسالی بر آبخوان منطقه.

افت سطح ایستابی آب‌های زیرزمینی در نیمه غربی دشت مرنند نیز بسیار قابل توجه بوده است. هرچند تراکم جمعیتی و شدت توسعه شهری در این بخش از دشت نسبت به نیمه شرقی کمتر است، اما مجموعه‌ای از عوامل طبیعی و انسانی موجب شده‌اند که نرخ افت سطح آب زیرزمینی در این ناحیه به طور معناداری افزایش یابد. یکی از عوامل اصلی، کاهش محسوس تغذیه آبخوان در نیمه غربی دشت است. در این بخش، رودخانه زیلبرچای - که یکی از مهم‌ترین منابع تغذیه آبخوان محسوب می‌شود - طی سال‌های اخیر با کاهش چشمگیر دبی مواجه شده است. این کاهش دبی (مخصوصاً از سال ۱۳۸۳ بدین‌سو) نتیجه چند عامل عمده است: (۱) خشکسالی‌های اقلیمی و هیدروژئولوژیکی که طی دو دهه اخیر شدت یافته‌اند و میزان بارندگی و رواناب سطحی را کاهش داده‌اند؛ (۲) برداشت گسترده آب در بالادست برای مصارف کشاورزی و شهری که حجم آب ورودی به پایین دست را تا حد زیادی کاهش می‌دهد؛

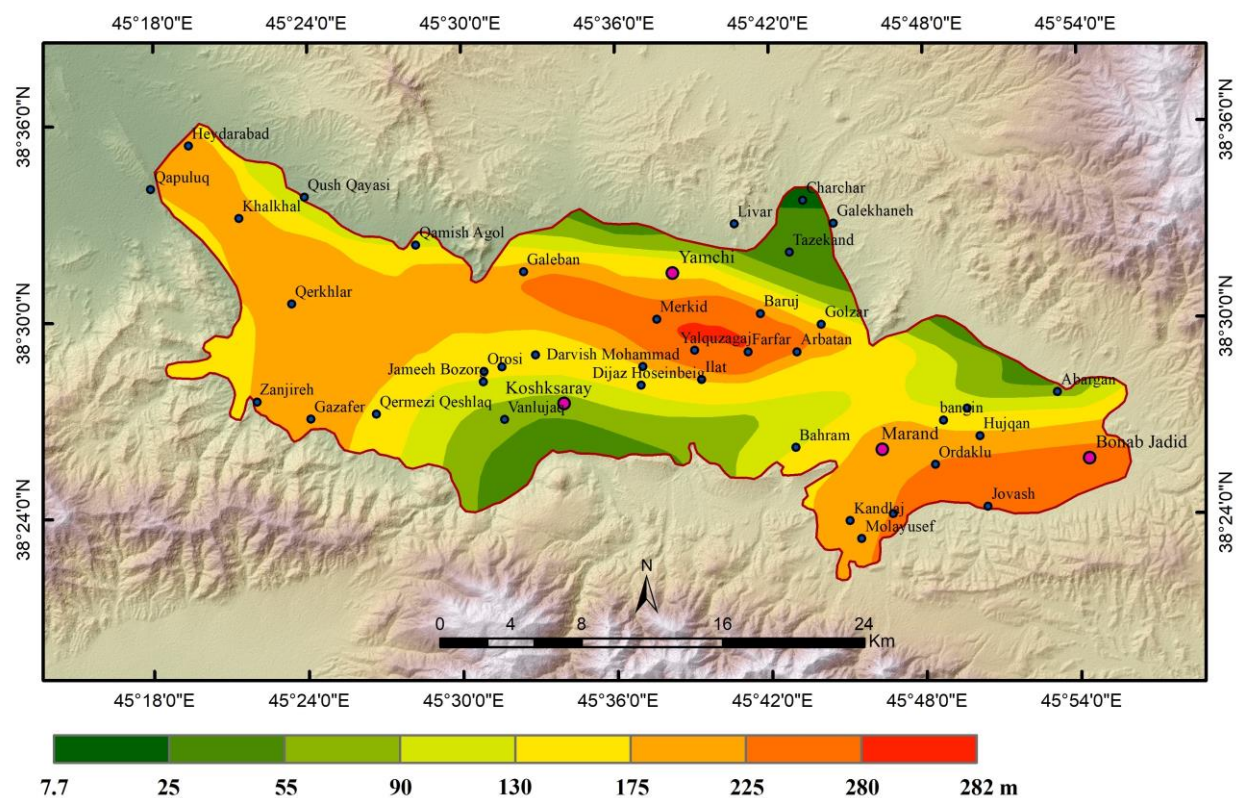
(۳) تغییر الگوی بارش‌ها و افزایش تبخیر در اثر گرمایش منطقه‌ای که باعث می‌شود بخشی از بارش‌های اندک نیز وارد آبراهه‌ها نشوند. از سوی دیگر، نیمه غربی دشت مرند طی دهه‌های اخیر شاهد گسترش سطح زیرکشت و توسعه فعالیت‌های کشاورزی آبی بوده است. این افزایش سطح زیرکشت موجب شده تا چاه‌های عمیق متعدد - به‌ویژه بر روی مخروط‌افکنه‌های پایکوه‌های رشته‌کوه‌های میشوداغ - حفر شوند. برداشت بی‌رویه از این چاه‌ها، فراتر از ظرفیت تجدیدپذیر آبخوان، روند افت سطح ایستابی را سرعت بخشیده است. بر اساس داده‌های موجود، در برخی مناطق نیمه غربی دشت، افت سطح آب زیرزمینی حتی از ۱۰ متر نیز فراتر رفته است که نشان دهنده فشار شدید بر منابع آب زیرزمینی است.

عامل مهم دیگری که شدت و پیامدهای افت سطح ایستابی را در این پهنه افزایش می‌دهد، ویژگی‌های زمین‌شناسی آبخوان غرب دشت مرند (مخصوصاً دو عامل ضخامت و محیط آبخوان) است. در این رابطه، هر چه ستون رسوبی یک آبخوان از نظر ضخامت گسترده‌تر باشد، قابلیت آن برای تجربه فشردگی بیشتر تحت یک کاهش فشار معین افزایش می‌یابد. این اصل، یکی از مبانی مهم در تحلیل رفتار آبخوان‌ها و بررسی پدیده‌هایی همچون فرونشست زمین است. بیشترین ضخامت رسوبات مربوط به بخش مرکزی دشت، در شمال روستاهای یالقوزآغاج و فارفار است؛ جایی که ضخامت تقریبی رسوبات به حدود ۲۸۲ متر می‌رسد. این پهنه با مساحتی در حدود ۳/۲ کیلومتر مربع از نظر هیدروژئولوژیکی یکی از مهم‌ترین بخش‌های دشت به شمار می‌رود. پس از آن، کلاس ضخامت ۲۲۵ تا ۲۸۰ متر قرار می‌گیرد که در دو ناحیه مجزا از دشت مرند گسترش یافته است: یکی در بخش‌های مرکزی و دیگری در جنوب‌شرقی. در محدوده مرکزی، روستاهای مرکید، باروج، فارفار، یالقوزآغاج و ارباتان بر روی این پهنه‌ها واقع شده‌اند. در بخش جنوب‌شرقی نیز روستاهای دیزج علیا و جواش به همراه شهر بناب جدید در این ناحیه مستقر شده‌اند. بررسی داده‌های تداخل‌سنجی راداری نشان می‌دهد که تعدادی از فرونشست‌های اندازه‌گیری شده دستگاهی، به‌ویژه در نوار جنوب‌شرقی دشت، دقیقاً بر روی پهنه‌هایی با ضخامت ۲۲۵ تا ۲۸۰ متر رخ داده‌اند. این هم‌پوشانی مکانی بیانگر آن است که ضخامت قابل توجه رسوبات در این مناطق شرایط مساعدی برای بروز فرونشست فراهم کرده است. این کلاس ضخامت با مساحتی حدود ۷۹/۲ کیلومتر مربع حدود ۱۲/۳ درصد از مساحت کل دشت را به خود اختصاص می‌دهد. در مرتبه بعد، کلاس ضخامت ۱۷۵ تا ۲۲۵ متر قرار دارد که گستره وسیعی معادل ۲۱۴ کیلومتر مربع یعنی حدود ۳۳/۴ درصد از کل دشت را شامل می‌شود (شکل ۹). بخش عمده‌ای از فرونشست‌های اندازه‌گیری شده دستگاهی نیز در محدوده همین پهنه رخ داده‌اند، به‌ویژه در نیمه غربی دشت که ضخامت رسوبات در قسمت‌های وسیعی از آن در همین بازه قرار دارد. این الگو در نوار جنوب‌شرقی دشت نیز قابل مشاهده است.

مطابق با طبقه‌بندی ندیری و همکاران (Nadiri, Taheri, Khatibi, Barzegari & Dideban, 2018)، برای تبدیل داده‌های کیفی خاک به شاخص‌های کمی: رسوبات آبرفتی درشت‌دانه (گراول و ماسه درشت) رتبه ۳، ماسه با دانه‌بندی متوسط تا ریز رتبه ۵، ترکیبات ماسه همراه با سیلت یا رس زیاد رتبه ۷ و ترکیبات غالباً سیلتی - رسی رتبه ۹ دریافت می‌کنند. در شکل ۱۰ لایه کمی محیط آبخوان ارائه شده است. بخش قابل توجهی از آبخوان مرند دارای بافت ریزدانه (عمدتاً رس) است. رفتار رس در برابر افت سطح ایستابی و خروج آب از خلل و فرج به‌گونه‌ای است که:

- با کاهش سطح ایستابی، آب درون حفره‌های خاک تخلیه شده و فشار مؤثر بر اسکلت جامد خاک افزایش می‌یابد.
- این افزایش فشار باعث تراکم و فشردگی تدریجی ذرات می‌شود.
- در رس‌ها، به دلیل نفوذپذیری بسیار پایین، این فرآیند با تأخیر زمانی رخ می‌دهد اما تراکم ایجاد شده دائمی و غیر قابل بازگشت است (تراکم پلاستیک).
- این پدیده که در مهندسی ژئوتکنیک، تحکیم^۱ نامیده می‌شود، یکی از اصلی‌ترین مکانیسم‌های فرونشست در دشت‌های رس‌دار است.

- در مقابل، در لایه‌های ماسه‌ای، افت سطح آب باعث تراکم سریع‌تر ولی با بزرگی کمتر و تا حدی قابل برگشت می‌شود. بنابراین ترکیب چهار عامل: افت شدید سطح آب زیرزمینی، کاهش تغذیه آبخوان، ضخامت زیاد آبخوان و وجود رسوبات ریزدانه تراکم‌پذیر موجب شده است که نیمه غربی دشت مرنده به طور ویژه نسبت به فرونشست زمین حساس و آسیب‌پذیر باشد. این موضوع در نتایج حاصل از تکنیک تداخل‌سنجی راداری (InSAR) نیز به وضوح مشاهده شده است. داده‌های InSAR نشان می‌دهد که طی چند سال اخیر، بیشترین نرخ فرونشست زمین در بخش‌های غربی دشت مرنده رخ داده است و آهنگ نشست در این نواحی به مراتب بالاتر از سایر بخش‌های دشت است. این هم‌خوانی میان داده‌های هیدروژئولوژیکی و مشاهدات ژئودتیکی، نقش تعیین‌کننده افت سطح آب زیرزمینی را در وقوع فرونشست در نیمه غربی دشت مرنده به صورت علمی تأیید می‌کند.

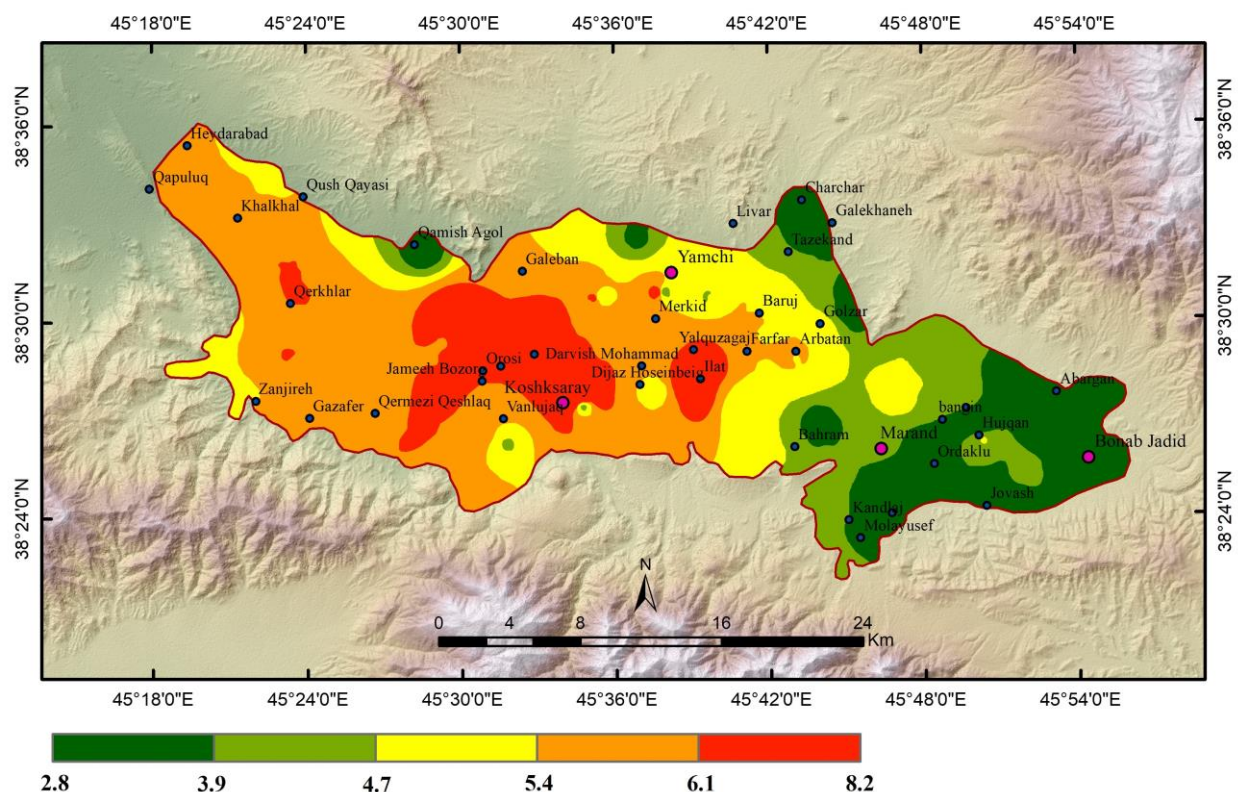


شکل ۹- توزیع فضایی ضخامت آبخوان در محدوده دشت مرنده

Fig. 9. Spatial distribution of aquifer thickness in the Marand Plain

نتایج تحقیق نشان می‌دهد که افت سطح آب زیرزمینی به عنوان اصلی‌ترین عامل محرک فرونشست در دشت مرنده به شمار می‌رود. داده‌های پیژومتری در بازه ده ساله اخیر نشان داد که میانگین افت سطح ایستابی در دشت مرنده به میزان ۴/۶۷- متر بوده است. این افت در برخی مناطق، به ویژه در جنوب شرق دشت (اطراف شهر مرنده و بناب جدید) و نیمه غربی دشت، حتی از ۱۰ متر نیز فراتر رفته است. این کاهش قابل توجه فشار منفذی در لایه‌های آبخوان را کاهش داده و تنش مؤثر بر ذرات خاک را افزایش می‌دهد که در نهایت منجر به تراکم و فشردگی لایه‌های رسوبی و نشست سطح زمین می‌شود. علاوه بر این، تطابق کاملی بین پهنه‌های دارای بیشترین افت سطح آب زیرزمینی و مناطق با نرخ فرونشست بالا مشاهده شده است. به طور مشخص، نیمه غربی دشت مرنده که با بیشترین نرخ فرونشست (گاه بیش از ۳/۷ سانتیمتر) مواجه است، همزمان شاهد کاهش شدید تغذیه آبخوان (به ویژه از طریق رودخانه زیلبرچای) و افت مداوم سطح ایستابی بوده است. اگرچه عوامل دیگری مانند ضخامت زیاد آبخوان (تا ۲۸۲

متر در بخش مرکزی)، غلبه رسوبات ریزدانه رسی و سیلتی (به ویژه در نیمه غربی)، تغذیه کم آبخوان، شیب کم زمین و فعالیت‌های انسانی (مانند تغییر کاربری اراضی) نیز در تشدید فرونشست نقش داشته‌اند، اما این عوامل عمدتاً به عنوان شرایط زمینه‌ساز، تشدیدکننده یا تقویت‌کننده عمل کرده‌اند. به عنوان مثال، ضخامت و جنس رسوبات، میزان آسیب‌پذیری منطقه را در برابر همان عامل اصلی (افت سطح آب) تعیین می‌کند. در نیمه شرقی دشت که برداشت آب بیشتر است ولی رسوبات درشت‌دانه‌تر هستند، نرخ فرونشست به نسبت کمتر از نیمه غربی است که با وجود برداشت کمتر، رسوبات رسی و سیلتی مستعدتر و تغذیه بسیار محدودتری دارد.



شکل ۱۰- لایه کمی محیط آبخوان در محدوده دشت مرند

Fig. 10. Quantitative layer of the aquifer system within the Marand Plain

پژوهش حاضر نشان می‌دهد که بیشترین مناطق مستعد و درگیر پدیده فرونشست در دشت مرند، در بخش‌های غربی و مرکزی این دشت متمرکز شده‌اند. این یافته نه تنها از طریق نقشه‌های مستقیم نرخ نشست، بلکه از طریق بررسی علمی عوامل علی نیز به طور کامل تأیید می‌گردد:

شواهد مستقیم از پایش ماهواره‌ای و میدانی: پردازش تصاویر راداری در بازه چهار ساله (۲۰۲۰-۲۰۲۴) نقشه‌ای از نرخ فرونشست ارائه می‌دهد که در آن کانون‌های بحرانی با نرخ‌هایی تا ۳/۷۴۵ سانتی‌متر در سال، به شکل یک نوار ممتد در نیمه غربی و بخش‌های وسیعی از مرکز دشت آشکار می‌شوند. این الگو به طور همزمان توسط اندازه‌گیری‌های زمینی با دستگاه GPS سه فرکانسه در نقاط متعددی مانند اطراف رودخانه زیلبرچای، مناطق کشکسرای و بخش‌هایی از مرکز دشت اعتبارسنجی شده است. تطابق فضایی بالا بین این دو منبع داده، وجود یک واقعیت فیزیکی متمرکز در غرب و مرکز دشت را غیر قابل انکار می‌سازد.

تحلیل کمی پهنه‌های فرونشست: بررسی مساحت کلاس‌های مختلف فرونشست گویای این تمرکز است. تنها حدود ۹/۵ درصد از دشت در کلاس فرونشست بسیار کم قرار دارد که عمدتاً محدود به حاشیه‌های شمالی و کوهپایه‌هاست. در مقابل، کلاس‌های نگران‌کننده متوسط، زیاد و بسیار زیاد مجموعاً نزدیک به ۷۰ درصد از مساحت دشت را پوشش می‌دهند. نکته کلیدی؛ توزیع مکانی این کلاس‌هاست؛ کلاس فرونشست بسیار زیاد (۱۳ درصد مساحت) عمدتاً در نیمه غربی و گوشه جنوب‌شرقی، کلاس فرونشست زیاد (۲۴ درصد) به وضوح در نیمه غربی و کلاس متوسط (۳۳ درصد) در بخش‌های مرکزی و میانی دشت پراکنده شده‌اند. حتی شهر مهم مرند نیز در دل پهنه متوسط قرار گرفته که نشان از گستردگی اثر این پدیده تا سکونتگاه‌های اصلی دارد.

ترکیب مخرب عوامل در غرب و مرکز دشت: این تمرکز مکانی تصادفی نیست، بلکه حاصل برهم‌کنش چندین عامل تشدیدکننده است که در غرب و مرکز دشت به اوج خود می‌رسد. عامل محرک اصلی، افت شدید سطح آب زیرزمینی است. در نیمه غربی، این افت نه تنها ناشی از برداشت برای کشاورزی است، بلکه به‌طور ویژه تحت تأثیر کاهش شدید تغذیه طبیعی آبخوان قرار دارد. رودخانه زبلیرچای به عنوان شریان اصلی تغذیه این ناحیه، از سال ۲۰۰۴ وارد یک دوره خشکسالی هیدرولوژیکی طولانی‌مدت شده و دبی آن به طور پیوسته کاهش یافته است. این موضوع در کنار برداشت‌های بالادست، ورودی آب به آبخوان غرب دشت را به حداقل رسانده است. از سوی دیگر، ویژگی‌های ذاتی زمین‌شناسی و هیدروژئولوژیکی این مناطق، آن‌ها را مستعدترین نقاط برای تبدیل افت آب به فرونشست کرده است. ضخامت آبخوان در بخش‌های مرکزی به بیش از ۲۸۰ متر می‌رسد که حجم عظیمی از مواد مستعد تراکم را فراهم می‌کند. همزمان، جنس رسوبات در راستای شرق به غرب دشت ریزانه‌تر می‌شود، به طوری که در نیمه غربی رسوبات رسی و سیلتی غالب می‌گردند. این رسوبات به دلیل تخلخل بالا و قابلیت تراکم‌پذیری زیاد، در برابر کاهش فشار منفذی ناشی از افت آب، به شدت فشرده شده و نشست قابل توجهی ایجاد می‌کنند. بنابراین، غرب دشت به دلیل تغذیه کم، برداشت نسبی آب، ضخامت زیاد و جنس بسیار حساس رسوبات از پتانسیل بسیار بالایی برای پدیده فرونشست برخوردار است.

عوامل تشدیدکننده محیطی و انسانی: توپوگرافی مسطح و کم ارتفاع مناطق مرکزی و غربی (عمدتاً کمتر از ۱۱۵۰ متر) نیز به این فرآیند کمک می‌کند. از طرف دیگر، الگوی کاربری اراضی به ویژه گسترش کشاورزی آبی (که ۵۴ درصد دشت را پوشش می‌دهد) و تغییر مراتع به دیم، بار اضافه‌ای بر منابع آب زیرزمینی وارد کرده و تعادل هیدرولوژیک را بیشتر برهم زده است.

نتیجه‌گیری

پژوهش حاضر با هدف تحلیل مکانیسم‌ها و شناسایی عوامل مؤثر بر پدیده فرونشست زمین در دشت مرند، با استفاده از رویکردی تلفیقی شامل فناوری نوین تداخل‌سنجی راداری (InSAR)، سیستم اطلاعات جغرافیایی (GIS)، داده‌های هیدروژئولوژیکی، زمین‌شناسی و مشاهدات میدانی انجام شد. روش‌شناسی به کار گرفته شده در این پژوهش با شاخص‌های مساحت زیر منحنی (AUC) برابر ۰/۹۴۹ و ضریب جینی ۰/۸۹۸ و تطابق قابل قبول با اندازه‌گیری‌های میدانی GPS، تأیید گردید. یافته‌های این تحقیق تصویری هشدار دهنده و جامع از ابعاد این مخاطره ژئومورفولوژیکی ارائه می‌دهد و گویای وضعیت بحرانی در بخش‌های وسیعی از این دشت است. نتایج پایش ماهواره‌ای در بازه زمانی ۲۰۲۰ تا ۲۰۲۴ نشان داد که پدیده فرونشست به صورتی گسترده و با شدت‌های متفاوت، کل دشت مرند را تحت تأثیر قرار داده است. نرخ فرونشست از صفر تا حداکثر ۳/۷۴۵ سانتیمتر در نوسان است و میانگین آن برای کل دشت حدود ۱/۷۲۳- سانتی‌متر بر چهار سال برآورد شده است. تحلیل پهنه‌بندی فرونشست حاکی از آن است که تنها حدود ۹/۵ درصد از مساحت دشت (عمدتاً در حاشیه‌های شمالی و کوهپایه‌ها) در کلاس فرونشست بسیار کم قرار دارد. در مقابل، کلاس‌های متوسط، زیاد و بسیار زیاد مجموعاً نزدیک به ۷۰ درصد از وسعت دشت را پوشش می‌دهند. پرخطرترین مناطق، به طور مشخص در نیمه غربی و بخش‌هایی از جنوب شرق دشت متمرکز شده‌اند و حتی شهرهای مهمی مانند مرند، کشکسرای و بناب جدید در دل این پهنه‌های با نرخ نشست متوسط تا بالا قرار گرفته‌اند که نشان‌دهنده تهدید مستقیم این پدیده برای سکونتگاه‌های انسانی و زیرساخت‌های حیاتی است.

عامل اصلی و مستقیم محرک فرونشست در منطقه، افت شدید و مداوم سطح آب‌های زیرزمینی شناسایی شد. داده‌های پیزومتری نشان می‌دهد میانگین افت سطح ایستابی در دهه اخیر به میزان ۴/۶۷- متر بوده و این مقدار در کانون‌های بحرانی جنوب شرق (اطراف مرند و بناب جدید) و نیمه غربی دشت، گاه از ۱۰ متر نیز فراتر رفته است. این کاهش، موجب کاهش فشار منفذی در لایه‌های آبخوان و افزایش تنش مؤثر بر ذرات خاک شده که در نهایت به تراکم و فشردگی لایه‌های رسوبی و نشست سطح زمین منجر می‌شود. هم‌پوشانی فضایی قابل توجه بین پهنه‌های دارای بیشترین افت آب زیرزمینی و مناطق با بالاترین نرخ فرونشست، این رابطه علی را به وضوح تأیید می‌کند.

علاوه بر عامل محرک اصلی، ویژگی‌های ذاتی آبخوان نقش تعیین‌کننده‌ای در تشدید یا تعدیل فرونشست ایفا کرده‌اند. ضخامت زیاد آبخوان (تا ۲۸۲ متر در بخش مرکزی) حجم عظیمی از مواد مستعد تراکم را فراهم کرده است. از سوی دیگر، ریزدانه بودن رسوبات، به‌ویژه غلبه لایه‌های رسی و سیلتی در نیمه غربی دشت، باعث افزایش آسیب‌پذیری منطقه شده است. این رسوبات به دلیل قابلیت تراکم‌پذیری زیاد، در برابر افت سطح آب واکنش شدیدی نشان می‌دهند. کاهش تغذیه طبیعی آبخوان به‌ویژه از طریق رودخانه زبلبرجای به عنوان جریان اصلی، عامل تشدیدکننده بحران در نیمه غربی است. عوامل ژئومورفولوژیکی مانند ارتفاع کم و شیب ملایم در نواحی مرکزی و غربی، هم موجب تجمع رسوبات ریزدانه و ضخیم شده و هم امکان تغذیه مستقیم را کاهش داده است. همچنین، فعالیت‌های انسانی شامل گسترش کشاورزی آبی پرمصرف (پوشش ۵۴ درصدی دشت)، تغییر کاربری مراتع به دیم، و توسعه شهری، با افزایش برداشت از منابع آب زیرزمینی و کاهش نفوذپذیری خاک، چرخه معیوب تشدید فرونشست را تکمیل کرده‌اند.

در مجموع، پژوهش حاضر نشان می‌دهد که دشت مرند، به‌ویژه نواحی غربی و جنوب شرقی آن، در وضعیت بحرانی نسبت به پدیده فرونشست قرار دارد. تداوم روندهای کنونی بهره‌برداری و عدم مداخله مدیریتی مؤثر، بحران را تشدید و خساراتی جبران‌ناپذیر به همراه خواهد داشت. لذا، اقدام فوری، همه‌جانبه و مبتنی بر شواهد علمی در قالب: (۱) مدیریت یکپارچه و پایدار منابع آب زیرزمینی با اولویت کنترل و نظارت بر برداشت‌ها، (۲) اجرای برنامه‌های تغذیه مصنوعی آبخوان در پهنه‌های مستعد، (۳) بازنگری اساسی در الگوهای کشاورزی و آبیاری به سمت روش‌های کم‌مصرف، (۴) اعمال ملاحظات مخاطره در طرح‌های توسعه‌ای و آمایش سرزمین، و (۵) پایش مستمر پهنه‌های فرونشست، به عنوان راهکارهای کلیدی و اجتناب‌ناپذیر برای مهار این بحران و حرکت به سمت تاب‌آوری محیطی در دشت مرند پیشنهاد می‌گردد.

References

- Abbaszadeh, A., Safari, A., & Ahmadabadi, A. (2024). Estimating the Subsidence Rate of Eyvanakey Plain and Analyzing the Role of Human Activities in its Occurrence. *Journal of Geography and Environmental Hazards*, 13(3), 35-55. [In Persian] <https://doi.org/10.22067/geoh.2024.87559.1477>
- Amiri, F., Momeni, M., & Mirassi, S. (2023). Assessing subsidence risk of Lordegan county using radar interferometry technique. *Quantitative Geomorphological Research*, 12(2), 230-244. [In Persian] <https://doi.org/10.22034/gmpj.2023.405603.1443>
- Asadzadeh, F., Kaki, M., Shakiba, S., & Raei, B. (2016). Impact of Drought on Groundwater Quality and Groundwater Level in Qorveh-Chardoli Plain. *Iran-Water Resources Research*, 12(3), 153-165. [In Persian] https://www.iwrr.ir/article_32629.html?
- Azarm, Z., Mehrabi, H., & Nadi, S. (2023). Investigating the Relationship between Subsidence and Groundwater Level Changes using InSAR Time Series Analysis (Isfahan Study Area). *Journal of Geography and Environmental Hazards*, 11(4), 173-192. [In Persian] <https://doi.org/10.22067/geoh.2022.75774.1199>
- Batubara, B., Kooy, M., & Zwarteveen, M. (2023). Politicising land subsidence in Jakarta: How land subsidence is the outcome of uneven sociospatial and socionatural processes of capitalist urbanization. *Geoforum*, 139, 103689. <https://doi.org/10.1016/j.geoforum.2023.103689>

- Ding, P., Jia, C., Di, S., Wu, J., & Wei, R. (2021). Analysis and evaluation of land subsidence along linear engineering based on InSAR data. *Journal of Civil Engineering*, 25(9), 3477-3491. <https://doi.org/10.1007/s12205-021-0201-z>
- El Kamali, M., Papoutsis, I., Loupasakis, C., Abuelgasim, A., Omari, K., & Kontoes, C. (2021). Monitoring of land surface subsidence using persistent scatterer interferometry techniques and ground truth data in arid and semi-arid regions, the case of Remah, UAE. *Science Total Environment*, 776, 145946. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2021.145946>
- Ferretti, A., Monti-Guarnieri, A., Prati, C., & Rocca, F. (2007). *InSAR Principles: Guidelines for SAR Interferometry Processing and Interpretation*. ESA Publications.
- Galloway, D. L., & Burbey, T. J. (2011). Regional land subsidence accompanying groundwater extraction. *Hydrogeology Journal*, 19(8), 1459. <https://doi.org/10.1007/s10040-011-0775-5>
- Guo, H., Yuan, Y., Wang, J., Cui, J., Zhang, D., Zhang, R., ... & Zhao, S. (2023). Large-scale land subsidence monitoring and prediction based on SBAS-InSAR technology with time-series sentinel-1A satellite data. *Remote Sensing*, 15(11), 2843. <https://doi.org/10.3390/rs15112843>
- Haghshenas Haghighi, M., & Motagh, M. (2024). Uncovering the impacts of depleting aquifers: A remote sensing analysis of land subsidence in Iran. *Science Advances*, 10(19), eadk3039. <https://www.science.org/doi/10.1126/sciadv.adk3039>
- Hosseinzadeh, S. R., Akbari, E., Javanshiri, M., & Mohammadpour, Z. (2023). Spatial Analysis of Ground Subsidence using Radar Interferometry (Case Study: Central Plain of Ghaen City). *Journal of Geography and Environmental Hazards*, 11(4), 99-126. [In Persian] <https://doi.org/10.22067/geoe.2022.75138.1169>
- Hu, B., Zhou, J., Wang, J., Chen, Z., Wang, D., & Xu, S. (2009). Risk assessment of land subsidence at Tianjin coastal area in China. *Environmental Earth Sciences*, 59(2), 269. <https://doi.org/10.1007/s12665-009-0024-6>
- Huang, L., Zhu, P., Zhang, T., He, L., Wu, W., Ge, Z., & Ai, H. (2025). Investigation of land subsidence in Guangdong Province, China, using PS-InSAR technique. *Advances in Space Research*, 75(4), 3507-3520. <https://doi.org/10.1016/j.asr.2024.12.034>
- Jiang, H., Zhang, J., Liu, Y., Li, J., & Fang, Z. N. (2023). Does flooding get worse with subsiding land? Investigating the impacts of land subsidence on flood inundation from Hurricane Harvey. *Science Total Environment*, 865, 161072. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2022.161072>
- Karimzadeh, S., Matsuoka, M., & Ogushi, F. (2018). Spatiotemporal deformation patterns of the Lake Urmia Causeway as characterized by multisensor InSAR analysis. *Science Report*, 8, 5357. <https://doi.org/10.1038/s41598-018-23650-6>
- Lin, Z., Huili, G., Lingling, J., Yaoming, S., Xiaojuan, L., & Jun, J. (2009). Research on evolution of land subsidence induced by nature and human activity by utilizing remote sensing technology. In 2009 Joint Urban Remote Sensing Event (pp. 1-5). IEEE. <https://doi.org/10.1109/URS.2009.5137693>
- Melet, A., Buontempo, C., Mattiuzzi, M., Salamon, P., Bahurel, P., Breyiannis, G., ... & Voukouvalas, E. (2021). European Copernicus Services to inform on sea-level rise adaptation: current status and perspectives. *Frontiers in Marine Science*, 8, 703425. <https://doi.org/10.3389/fmars.2021.703425>
- Mohammady, M., Pourghasemi, H., & Amiri, M. (2021). Investigation of Subsidence Susceptibility in the Semnan Plain Using Entropy Model. *Journal Watershed Manage Research*, 12(23), 75-85. [In Persian] <http://jwmr.sanru.ac.ir/article-1-1002-fa.html>
- Nadiri, A., Taheri, Z., Khatibi, R., Barzegari, G., & Dideban, K. (2018). Introducing a new framework for mapping subsidence vulnerability indices (SVIs): ALPRIFT. *Science of The Total Environment*, 628-629, 1043-1057. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2018.02.031>
- Rajabi, M., Roostaei, S., & Mataee, S. (2024). Evaluation of kermanshah plain subsidence time series using small-based radar interferometry technique (SBAS). *Quantitative Geomorphological Research*, 13(1), 1-17. [In Persian] <https://doi.org/10.22034/gmpj.2022.363452.1380>

- Raspini, F., Caleca, F., Del Soldato, M., Festa, D., Confuorto, P., & Bianchini, S. (2022). Review of satellite radar interferometry for subsidence analysis. *Earth-Science Reviews*, 235, 104239. <https://doi.org/10.1016/j.earscirev.2022.104239>
- Ren, T., Gong, W., Gao, L., & Zhao, F. (2024). Understanding land subsidence in the Pearl River Delta region of China based on InSAR observations. *Engineering Geology*, 339, 107646. <https://doi.org/10.1016/j.enggeo.2024.107646>
- Rostami, A., Entezari, M., & Zakerinejad, R. (2023). Assessment and analysis of subsidence risk in Hashtgerd Plain. *Quantitative Geomorphological Research*, 12(3), 140-156. [In Persian] <https://doi.org/10.22034/gmpj.2023.414731.1454>
- Villaseñor-Reyes, C. I., Hernández-Madrigal, V. M., & Figueroa-Miranda, S. (2022). Identification and assessment of land subsidence development in rural areas using PS interferometry: a case study in Western Michoacan, Mexico. *Environmental Earth Sciences*, 81(16), 417. <https://doi.org/10.1007/s12665-022-10545-z>
- Zhang, J., Ke, C., Shen, X., Lin, J., & Wang, R. (2023). Monitoring land subsidence along the subways in Shanghai on the basis of time-series InSAR. *Remote Sensing*, 15(4), 908. <https://doi.org/10.3390/rs15040908>