



## Assessment and Analysis of Factors Influencing Land Subsidence in the Miandoab Plain Using InSAR and a Hybrid Fuzzy Logic-RWR Model

Toktam Yazdani <sup>1\*</sup>, Mohammad Hossein Rezaei Moghaddam <sup>1</sup>,  
Shahram Roostaei <sup>1</sup>, Tohid Rahimpour <sup>1</sup>

<sup>1</sup> Department of Geomorphology, Faculty of Planning and environmental sciences, University of Tabriz, Tabriz, Iran

### ARTICLE INFO

### ABSTRACT

#### Article History:

**Received:** 31 May 2026

**Revised:** 28 September 2026

**Accepted:** 30 September 2026

**Available Online:**

01 October 2026

#### Keywords:

Subsidence

SBAS

RWR Model

Miandoab Plain

Groundwater Depletion

Land subsidence represents one of the most critical geomorphological hazards across global alluvial plains, primarily driven by excessive groundwater exploitation. This study evaluates land subsidence in the Miandoab Plain (northwestern Iran) and investigates its relationship with groundwater level decline and environmental covariates. A total of 38 Sentinel-1 Synthetic Aperture Radar (SAR) acquisitions from January 2018 to January 2024 were processed using the Small Baseline Subset time-series interferometric SAR (SBAS-InSAR) algorithm within GMTSAR software to quantify surface deformation. Additionally, historical records from 12 piezometric monitoring wells were analyzed to evaluate groundwater depletion dynamics. A subsidence susceptibility map was generated using a hybrid model integrating fuzzy logic and the Relative Weighting Ratio (RWR) coupled with key environmental parameters. The results revealed that cumulative subsidence ranged from 2.9 to 36.7 cm over the 6-year period, corresponding to an average annual deformation rate of approximately 6.0 cm/yr (60 mm/yr). The maximum subsidence rates were concentrated in the southern sectors of the plain and across the urban extent of Miandoab. Piezometric analysis indicated a mean annual groundwater table decline of 81.6 cm. Pixel-based spatial correlation analysis confirmed a significant positive correlation ( $r=0.66$ ) between groundwater decline and ground subsidence. Furthermore, susceptibility zonation demonstrated that 17.8% of the study area is classified as high to very high subsidence hazard. These findings underscore that groundwater depletion is the primary controlling driver of land subsidence in the Miandoab Plain, highlighting the urgent need for sustainable aquifer management to mitigate ongoing ground deformation.

\* Corresponding author: Toktam Yazdani

E-mail address: [t.yazdani92@gmail.com](mailto:t.yazdani92@gmail.com)

How to cite this article: Yazdani, T., Rezaei Moghaddam, M. H., Roostaei, S., & Rahimpour, T. (2026). Assessment and Analysis of Factors Influencing Land Subsidence in the Miandoab Plain Using InSAR and a Hybrid Fuzzy Logic-RWR Model. *Journal of Geography and Environmental Hazards*, ?(?), ?-?. <https://doi.org/10.22067/geoe.2026.99023.1671>



©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 one of the major geomorphological and environmental hazards affecting rapidly developing regions worldwide. It is manifested as gradual or localized downward displacement of the ground surface, primarily resulting from the compaction of unconsolidated and compressible subsurface sediments. Among the various controlling factors, excessive groundwater abstraction is considered a dominant anthropogenic driver. Continued groundwater withdrawal reduces pore-water pressure and increases effective stress within aquifer systems, particularly in fine-grained clayey and silty deposits, resulting in irreversible compaction and progressive surface deformation. Subsidence can consequently cause ground cracks, damage to buildings and infrastructure, disruption of transportation and energy networks, reduction in aquifer storage capacity, alteration of surface drainage, and increased flood susceptibility.

Iran is particularly vulnerable to land subsidence because of increasing pressure on groundwater resources, climatic aridity, and extensive dependence on groundwater for agricultural activities. The Miandoab Plain in northwestern Iran is an important agricultural and settlement area characterized by extensive alluvial deposits and intensive groundwater use. Increasing agricultural development, population growth, and reliance on groundwater have contributed to a persistent decline in groundwater levels, raising concerns regarding the development and spatial expansion of subsidence. The presence of fine-grained alluvial sediments and concentrated agricultural activities further increases the susceptibility of the plain to ground deformation. Despite the significance of these processes, detailed spatial information on the temporal evolution and controlling factors of subsidence in the Miandoab Plain remains limited.

Previous studies in different regions, including Mexico City, Shanghai, Peshawar, and several Iranian plains, have demonstrated the effectiveness of Interferometric Synthetic Aperture Radar (InSAR) for detecting and quantifying surface deformation and have emphasized the relationship between groundwater depletion and subsidence. However, the spatial interaction between groundwater decline and other environmental controls requires further investigation. Therefore, this study aims to analyze the spatial and temporal characteristics of land subsidence in the Miandoab Plain using Sentinel-1 InSAR observations and to investigate its relationship with groundwater-level decline. In addition, environmental and hydrogeological factors are integrated to identify areas with greater susceptibility to future subsidence, providing a spatial basis for groundwater management and land-use planning.

### Material and Methods

This study employed an integrated approach combining satellite radar interferometry, hydrogeological observations, and GIS-based spatial analysis to investigate land subsidence and its controlling factors in the Miandoab Plain, northwestern Iran. The analysis was conducted using 38 Sentinel-1 Synthetic Aperture Radar (SAR) images acquired in Interferometric Wide (IW) mode with VV polarization and descending orbit geometry during the period from 11 January 2018 to 4 January 2024. The radar data were processed using GMTSAR and GMT under the Linux operating system. Orbit correction, topographic phase removal using a digital elevation model (DEM), interferogram generation, and filtering were performed during preprocessing. Interferometric pairs were selected based on temporal and perpendicular spatial baselines, with a spatial baseline threshold of less than 30 m and a coherence threshold of 0.2 to reduce geometric and decorrelation-related errors. A total of 37 suitable interferometric pairs were subsequently processed using the Small Baseline Subset (SBAS) approach to estimate the spatial and temporal characteristics of surface deformation and generate the subsidence-rate map.

Groundwater conditions were evaluated using long-term observations from 12 piezometric wells distributed across the study area. Groundwater-level data covering the period 2001–2024 were analyzed to determine the spatial pattern and annual rate of groundwater decline. The Inverse Distance Weighting (IDW) interpolation method was applied in ArcGIS to generate a continuous groundwater-decline surface. The spatial relationship between groundwater decline and InSAR-derived subsidence was then assessed using the Pearson correlation coefficient.

To identify areas susceptible to land subsidence, six environmental and hydrogeological parameters were considered: groundwater-level decline, distance from the river, elevation, slope, land use, and lithology. The spatial layers were prepared in GIS and standardized using fuzzy membership functions, with values approaching one representing greater susceptibility. The relative importance of the parameters was determined using the Relative Weighting Ratio (RWR) method. In this approach, an initial weight of one was assigned to each parameter and 0.1 was added for each pairwise preference, after which the resulting values were normalized. The standardized layers and their relative weights were integrated using a fuzzy gamma operator. Different gamma values were evaluated, and the value providing the greatest spatial agreement with the observed InSAR-derived subsidence pattern was selected. A gamma value of 0.9 was ultimately adopted for the final susceptibility model.

Finally, the resulting susceptibility map was compared with the observed subsidence distribution to evaluate model performance and identify areas where groundwater depletion and environmental characteristics jointly contribute to higher subsidence potential.

#### Results and Discussion

The Sentinel-1 time-series analysis revealed a substantial spatial and temporal pattern of land subsidence across the Miandoab Plain during 11 January 2018–4 January 2024. The cumulative subsidence ranged from 2.9 to 36.7 cm, with an average annual subsidence rate of approximately 6 cm. The most pronounced deformation occurred in the southern parts of the plain and extended into substantial portions of Miandoab urban area, whereas the lowest deformation was generally observed in the surrounding upland areas. The concentration of severe deformation in the southern plain corresponds spatially with intensive agricultural activities, high groundwater demand, and the distribution of compressible alluvial sediments.

Analysis of groundwater observations from the 12 piezometric wells indicated a persistent decline in groundwater levels throughout the study area. The mean annual groundwater decline was approximately 81.6 cm, with values ranging from 59 to 100 cm per year. The highest decline, approximately 100 cm/year, was recorded at well 9 near the agricultural station, while the lowest value, approximately 59 cm/year, occurred at well 8 near Lilan. The IDW interpolation showed that groundwater depletion was particularly pronounced in the southern part of the plain. This spatial pattern is consistent with the concentration of groundwater extraction wells and water-intensive agricultural activities. Groundwater decline generally decreased toward the northern and peripheral areas of the plain.

The spatial comparison between groundwater decline and InSAR-derived subsidence demonstrated a significant positive relationship, with a Pearson correlation coefficient of 0.66. Areas experiencing greater groundwater-level decline generally corresponded to areas with greater subsidence, supporting the interpretation that groundwater depletion is a major controlling factor in the deformation of the Miandoab Plain. This relationship is consistent with the established mechanism whereby groundwater withdrawal reduces pore-water pressure, increases effective stress, and promotes compaction of compressible fine-grained sediments.

The fuzzy-RWR model further demonstrated the spatial significance of groundwater decline in controlling subsidence susceptibility. Among the six investigated parameters, groundwater decline received the highest relative weight of 0.2. The final fuzzy combination using a gamma value of 0.9 identified the southern plain as the principal high-susceptibility zone. Approximately 98.7 km<sup>2</sup>, equivalent to 17.8% of the study area, was classified as having very high subsidence susceptibility, while 121.9 km<sup>2</sup>, approximately 22% of the area, was categorized as highly susceptible. These zones are characterized by substantial groundwater depletion, low elevation and slope, intensive agricultural land use, and the presence of relatively compressible alluvial materials.

The general agreement between the modeled susceptibility pattern and the observed InSAR deformation indicates that integrating hydrogeological and environmental parameters can effectively identify areas vulnerable to land subsidence. Nevertheless, uncertainties remain due to atmospheric effects in C-band radar observations, temporal and spatial decorrelation associated with agricultural land-cover changes, the limited number and uneven distribution of piezometric wells, differences between the groundwater and radar observation periods, and the absence of some potentially influential parameters such as aquifer thickness and groundwater-well density.

## **Conclusion**

The results demonstrate that land subsidence has become a significant and spatially extensive environmental hazard in the Miandoab Plain. Sentinel-1 SBAS analysis identified cumulative subsidence of 2.9–36.7 cm during 2018–2024, with the highest deformation concentrated in the southern plain and parts of Miandoab urban area. Groundwater observations showed an average annual decline of 81.6 cm, and the significant positive correlation between groundwater decline and subsidence ( $r = 0.66$ ) confirms the major role of groundwater depletion in controlling surface deformation. The fuzzy-RWR model, using six environmental and hydrogeological parameters and a gamma value of 0.9, identified 17.8% of the plain as having very high and approximately 22% as having high subsidence susceptibility. These findings highlight the necessity of continuous InSAR monitoring, improved groundwater-level observation, control of groundwater abstraction, adoption of water-efficient irrigation practices, artificial aquifer recharge, and integration of subsidence susceptibility into land-use and water-resource management.



## ارزیابی و تحلیل عوامل موثر بر فرونشست دشت میاندواب با استفاده از روش تداخل سنجی راداری و مدل ترکیبی منطق فازی و RWR

<sup>۱</sup>تکتم یزدانی <sup>ID</sup>، <sup>ID</sup>محمدحسین رضائی مقدم <sup>ID</sup>، <sup>ID</sup>شهرام روستایی<sup>۱</sup>، توحید رحیم پور<sup>۱</sup>

<sup>۱</sup>گروه ژئومورفولوژی، دانشکده برنامه ریزی و علوم محیطی، دانشگاه تبریز، تبریز، ایران

| اطلاعات مقاله                                                                                                                | چکیده                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                      |
|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| <p><b>تاریخچه مقاله:</b></p> <p>تاریخ دریافت: ۱۴۰۵/۰۳/۱۰</p> <p>تاریخ بازنگری: ۱۴۰۵/۰۷/۰۶</p> <p>تاریخ پذیرش: ۱۴۰۵/۰۷/۰۸</p> | <p>فرونشست زمین یکی از مهم ترین مخاطرات ژئومورفولوژیکی در بسیاری از دشتهای آبرفتی جهان به شمار می رود که عمدتاً در اثر برداشت بی رویه از منابع آب زیرزمینی رخ می دهد. هدف این پژوهش، ارزیابی میزان فرونشست زمین در دشت میاندواب و تحلیل ارتباط آن با افت سطح آب زیرزمینی و برخی پارامترهای محیطی است. برای این منظور از مجموع ۳۸ تصویر داده های راداری ماهواره Sentinel 1 در بازه زمانی ژانویه ۲۰۱۸ تا ژانویه ۲۰۲۴ استفاده شد راداری با استفاده از روش تداخل سنجی سری زمانی SBAS در نرم افزار GMTSAR پردازش گردید تا میزان جابجایی سطح زمین استخراج شود. همچنین به منظور بررسی نقش افت منابع آب زیرزمینی، داده های ۱۲ حلقه چاه پیزومتری مورد تحلیل قرار گرفت. علاوه بر این، با استفاده از روش ترکیبی منطق فازی و RWR و پارامترهای محیطی، نقشه پتانسیل فرونشست منطقه تهیه شده است. نتایج نشان داد که میزان فرونشست در دوره مورد مطالعه بین ۲/۹ تا ۳۶/۷ سانتی متر متغیر بوده و میانگین نرخ سالانه آن حدود ۶ سانتی متر است. بیشترین میزان فرونشست در بخش های جنوبی دشت و محدوده شهری میاندواب مشاهده شد. تحلیل داده های پیزومتری نیز نشان داد که میانگین افت سالانه سطح آب زیرزمینی در منطقه حدود ۸۱/۶ سانتی متر است. نتایج تحلیل همبستگی پیکسلی بیانگر وجود رابطه مستقیم و معنادار بین افت سطح آب زیرزمینی و فرونشست زمین با ضریب همبستگی ۰/۶۶ است. همچنین نتایج پهنه بندی نشان داد که حدود ۱۷/۸ درصد از مساحت منطقه در طبقه پتانسیل بسیار زیاد وقوع فرونشست قرار دارد. یافته های پژوهش نشان می دهد که افت منابع آب زیرزمینی مهم ترین عامل کنترل کننده فرونشست در دشت میاندواب بوده و مدیریت پایدار منابع آب زیرزمینی برای کاهش شدت این پدیده ضروری است.</p> |

## مقدمه

فرونشست زمین یکی از مهم‌ترین مخاطرات ژئومورفولوژیکی و محیط‌زیستی در بسیاری از مناطق جهان به شمار می‌رود (Shi et al., 2022; Tang et al., 2024) که در دهه‌های اخیر به دلیل افزایش فشارهای انسانی بر منابع طبیعی، به‌ویژه منابع آب زیرزمینی، گسترش قابل توجهی یافته است (Asadi, Ganjaeian, Javedani & Hasab, Jaecian, 2021; Kanwal, Ding, 2021; Wu & Sajjad, 2022; Lu et al, 2022; Ren, Gorg, gao & Zhao, 2024). این پدیده به کاهش تدریجی یا ناگهانی سطح زمین در اثر فشردگی لایه‌های زیرسطحی گفته می‌شود و معمولاً در مناطق دارای رسوبات آبرفتی نرم و تراکم‌پذیر بیشتر رخ می‌دهد. در چنین شرایطی، برداشت بی‌رویه از آبخوان‌ها باعث کاهش فشار آب منفذی در میان ذرات رسوبی شده و در نتیجه تنش مؤثر در اسکلت رسوبی افزایش می‌یابد. این فرآیند در نهایت به فشردگی تدریجی لایه‌های ریزدانه مانند سیلت و رس و کاهش تراز سطح زمین منجر می‌شود (Yastika, Shimizu & Abidin, 2019; Malik, Kumar, Perissin & Pradhan, 2022; Wang et al., 2025).

فرونشست زمین پیامدهای متعددی برای محیط طبیعی و زیرساخت‌های انسانی به همراه دارد (Hosseinzadeh, Akbari, 2023; Javanshiri & Mohammadpour, 2023; Mokhtari, Rezaei Moghadam, & Dortaj, 2024; Sheng et al., 2023; Shankar, Singh & Chauhan, 2024). از جمله مهم‌ترین آثار آن می‌توان به ایجاد ترک‌های سطحی، آسیب به ساختمان‌ها و تأسیسات زیربنایی، تخریب راه‌ها و خطوط انتقال انرژی، کاهش ظرفیت ذخیره آبخوان‌ها و افزایش خطر سیلاب اشاره کرد (Bayati, Khatibi, Mohammadzadeh & Karimzadeh, 2024). در بسیاری از دشت‌های کشاورزی، این پدیده همچنین می‌تواند موجب تغییر شیب زمین، اختلال در شبکه‌های آبیاری و کاهش بهره‌وری اراضی شود (Asghari Saraskanroud, Esfandiyari, 2023; Faal Naziri & Zeinali, 2024; Zangenehtabar, Yamani, Sharifikia, Hoseini & Amighpey, 2025; Ganjaeian et al., 2026). از سوی دیگر، فرونشست معمولاً پدیده‌ای برگشت‌ناپذیر است؛ زیرا فشردگی لایه‌های رسوبی در بسیاری از موارد به‌طور دائمی ظرفیت ذخیره آب در آبخوان را کاهش می‌دهد (Zhu et al., 2020).

عوامل مختلفی در شکل‌گیری و تشدید فرونشست زمین نقش دارند که مهم‌ترین آن‌ها برداشت بیش از حد از منابع آب زیرزمینی است (Asadi et al., 2021; Ganjaeian, Menbari, Ghasemi & Nosrati, 2023b; Hejazi, 2022; Roostaei, 2023; Hejazi, Mokhtari & Amani, 2026; Roostaei, Rezaei Moghaddam, Yarahmadi & Najafvand, 2023). علاوه بر این، ویژگی‌های زمین‌شناسی و لیتولوژیکی، نوع و بافت رسوبات، شرایط توپوگرافی، الگوی کاربری اراضی و فاصله از منابع آب سطحی نیز می‌توانند در میزان حساسیت مناطق نسبت به این پدیده مؤثر باشند (Rygu et al., 2025; Ullah, Chen, 2025; Hussain, Shah & Ali, 2025). در سال‌های اخیر، استفاده از فناوری‌های سنجش از دور به‌ویژه تداخل‌سنجی راداری ماهواره‌ای، امکان پایش دقیق و گسترده تغییرات سطح زمین را فراهم کرده و به یکی از ابزارهای مهم در مطالعه و مدیریت پدیده فرونشست تبدیل شده است (Wang et al., 2022).

موقعیت جغرافیایی ایران سبب شده است تا بسیاری از دشت‌های آن، در معرض مخاطره فرونشست باشد (Ebrahimi, 2023; Ghasemi & Ganjaeian, 2020; Ghorbani Mohammadabadi, Nejad Hossini & Ganjaeian, 2023). از جمله این دشت‌ها، دشت میاندواب است. دشت میاندواب به عنوان یکی از دشت‌های مهم کشاورزی در شمال غرب ایران، طی سال‌های اخیر با فشار فزاینده‌ای بر منابع آب زیرزمینی مواجه شده است. توسعه کشاورزی آبی، افزایش جمعیت و وابستگی گسترده به منابع آب زیرزمینی برای تأمین نیازهای مختلف، موجب افزایش برداشت از سفره‌های آب زیرزمینی این دشت شده است. تداوم این روند در سال‌های گذشته باعث افت قابل توجه سطح آب زیرزمینی و ایجاد نگرانی‌هایی در خصوص پیامدهای هیدروژئولوژیکی و ژئومورفولوژیکی آن شده است. یکی از مهم‌ترین پیامدهای افت سطح آب زیرزمینی، بروز پدیده فرونشست زمین در دشت‌های آبرفتی است که می‌تواند خسارات قابل توجهی به زیرساخت‌های شهری، اراضی کشاورزی و منابع طبیعی وارد کند. با توجه به ساختار زمین‌شناسی آبرفتی دشت میاندواب، وجود رسوبات ریزدانه و همچنین تمرکز فعالیت‌های کشاورزی در این منطقه، احتمال وقوع و گسترش فرونشست در این دشت افزایش یافته است. از سوی دیگر، نبود اطلاعات دقیق و به‌روز درباره میزان و الگوی فضایی فرونشست، برنامه‌ریزی و مدیریت صحیح منابع آب و کاربری اراضی را با چالش مواجه می‌کند. در

چنین شرایطی، استفاده از داده‌های سنجش از دور و تحلیل همزمان عوامل محیطی می‌تواند در شناسایی الگوی فرونشست و تعیین مناطق مستعد نقش مؤثری داشته باشد. بنابراین، بررسی میزان فرونشست زمین و تحلیل ارتباط آن با افت منابع آب زیرزمینی و سایر پارامترهای محیطی، گامی مهم در جهت شناخت بهتر این مخاطره و کمک به مدیریت پایدار منابع در دشت میاندوآب به شمار می‌رود.

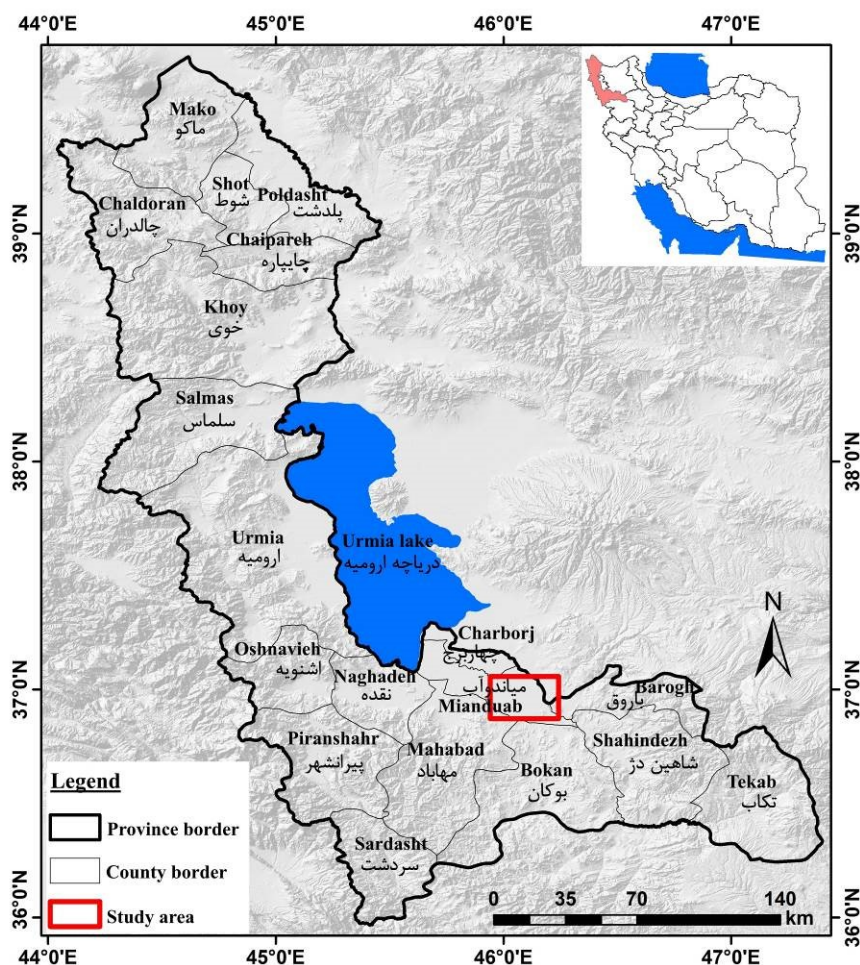
در ارتباط با موضوع مورد مطالعه، تاکنون تحقیقات متعددی در سطح جهان و ایران انجام شده است. چوسارد و همکاران (Chaussard, Wdowinski, Cabral-Cano & Amelung, 2014) با بهره‌گیری از تصاویر راداری ماهواره ALOS، میزان حداکثر فرونشست در شهر مکزیکوسیتی را تا ۳۰ سانتی‌متر در سال برآورد کردند و نشان دادند که برداشت بی‌رویه آب زیرزمینی، عامل اصلی این نرخ بالای فرونشست است. ژائو و همکاران (Zhao et al., 2019) نیز با استفاده از روش تداخل‌سنجی راداری، مقدار فرونشست سالانه در منطقه ساحلی شانگهای چین را حدود ۳ سانتی‌متر محاسبه کردند و بر نقش توسعه شهری و افت سطح آب زیرزمینی در این فرایند تأکید داشتند. خان و همکاران (Khan, Faiz, Gadea & Ahmad, 2023) با به‌کارگیری داده‌های تداخل‌سنجی راداری، میزان فرونشست سالانه حوضه پیشاور پاکستان را ۲۳/۳ سانتی‌متر گزارش نمودند.

جاسچکو و همکاران (Jasechko et al., 2024) نقش افت آب‌های زیرزمینی را در بروز مخاطره فرونشست مورد تحلیل قرار دادند. نتایج آن‌ها بیانگر آن بود که برداشت بی‌برنامه و ناپایدار از منابع آب زیرزمینی، مهم‌ترین عامل شکل‌گیری و تشدید پدیده فرونشست در بسیاری از آبخوان‌های جهان است. در ایران نیز پژوهش‌های متعددی انجام شده است. محمدخان و همکاران (Mohammad Khan, Ganjaeian, Garosi & Zanganetabar, 2020) با استفاده از روش سری زمانی SBAS، میزان حداکثر فرونشست دشت قروه را طی دوره‌ای دو ساله حدود ۲۱۶ میلی‌متر برآورد کردند. گنجائیان و همکاران (Ganjaeian, Asadi, Menbari & Ebrahimi, 2023a) با بهره‌گیری از روش تداخل‌سنجی راداری، مقدار فرونشست محدوده شهری همدان را در بازه‌ای سه‌ساله بین ۶ تا ۹۸ میلی‌متر محاسبه کردند. در پژوهشی دیگر، عابدینی و نظری‌گزیک (Abedini & Nazari, 2024) با استفاده از داده‌های سنتینل ۱ و روش تداخل‌سنجی راداری، رابطه افت سطح آب‌های زیرزمینی و فرونشست زمین در شهرستان چناران را بررسی کرده و نشان دادند که این منطقه طی سال‌های ۲۰۱۷ تا ۲۰۲۱ حدود ۴۲ سانتی‌متر فرونشست داشته است. همچنین محمدی‌ده‌چشمه و ابراهیمی (Mohammadi Dehcheshme & Ebrahimi, 2026) با استفاده از روش SBAS، نرخ فرونشست سالانه در محدوده شهری جهرم را بین ۲۸ تا ۱۷۹ میلی‌متر گزارش نمودند.

در مجموع، نتایج پژوهش‌های گذشته به روشنی بیان می‌کند که افت سطح آب زیرزمینی مهم‌ترین محرک کنونی بروز فرونشست در بسیاری از مناطق است. در راستای این تحقیقات، هدف از پژوهش حاضر، تحلیل دقیق‌تر الگوهای زمانی و مکانی فرونشست در منطقه مورد مطالعه و ارزیابی ارتباط آن با تغییرات سطح آب زیرزمینی به منظور ارائه شناختی جامع‌تر از روندهای خطرزا و پیامدهای بالقوه آن است.

### منطقه مورد مطالعه

محدوده مورد مطالعه در این پژوهش دشت میاندوآب است که از نظر تقسیمات سیاسی در محدوده استان آذربایجان غربی و شهرستان میاندوآب قرار دارد (شکل ۱). این دشت یکی از مهم‌ترین دشت‌های آبرفتی شمال‌غرب ایران محسوب می‌شود و به دلیل برخورداری از اراضی حاصلخیز و منابع آب سطحی و زیرزمینی، از گذشته تاکنون نقش مهمی در فعالیت‌های کشاورزی و سکونت انسانی در منطقه ایفا کرده است. شهر میاندوآب در بخش مرکزی این دشت قرار گرفته و به عنوان مهم‌ترین مرکز جمعیتی و اقتصادی منطقه شناخته می‌شود. دشت میاندوآب از نظر موقعیت جغرافیایی در ارتفاع متوسط حدود ۱۳۰۰ متر از سطح دریا قرار دارد و به دلیل استقرار در یک محیط آبرفتی نسبتاً هموار، شرایط مناسبی برای توسعه فعالیت‌های کشاورزی و استقرار سکونتگاه‌ها فراهم شده است. این دشت از نظر تقسیمات هیدرولوژیکی در زیرحوضه زرينه‌رود قرار می‌گیرد که یکی از مهم‌ترین زیرحوضه‌های آبریز دریاچه ارومیه به شمار می‌رود. رودخانه زرينه‌رود به عنوان یکی از اصلی‌ترین رودخانه‌های دائمی منطقه، پس از عبور از بخش‌های مختلف حوضه، از محدوده شهر میاندوآب عبور کرده و در نهایت به دریاچه ارومیه وارد می‌شود. این رودخانه نقش مهمی در تأمین آب مورد نیاز بخش کشاورزی، تغذیه آبخوان‌های آبرفتی و شکل‌گیری چشم‌انداز ژئومورفولوژیکی دشت دارد.



شکل ۱- نقشه موقعیت منطقه مورد مطالعه

Fig. 1. Location map of study area

### مواد و روش‌ها

در این پژوهش به منظور تهیه نقشه فرونشست و تحلیل ارتباط آن با عوامل محیطی، از ترکیبی از داده‌های سنجش از دور، داده‌های هیدروژئولوژیکی و لایه‌های اطلاعاتی محیطی استفاده شد. داده‌های اصلی شامل ۳۸ تصویر راداری ماهواره Sentinel-1 بوده است که برای استخراج میزان جابجایی سطح زمین مورد استفاده قرار گرفت. همچنین به منظور بررسی تغییرات سطح آب زیرزمینی، داده‌های مربوط به ۱۲ حلقه چاه پیژومتری منطقه در دوره آماری مورد مطالعه به کار گرفته شد. علاوه بر این، برای تحلیل نقش عوامل محیطی در وقوع فرونشست، لایه‌های اطلاعاتی شامل ارتفاع، شیب، فاصله از رودخانه، کاربری اراضی و لیتولوژی مورد استفاده قرار گرفت. پردازش داده‌های راداری و استخراج نرخ فرونشست با استفاده از نرم‌افزار GMTSAR و بسته پردازشی GMT در محیط سیستم عامل لینوکس انجام شد. همچنین برای انجام تحلیل‌های مکانی، تهیه لایه‌های اطلاعاتی، درونیابی داده‌های پیژومتری و تحلیل همبستگی بین متغیرها از قابلیت‌های سامانه اطلاعات جغرافیایی (ArcGIS) بهره گرفته شد. در ادامه به تشریح مراحل تحقیق پرداخته شده است.

**مرحله اول (تهیه نقشه فرونشست):** در نخستین مرحله پژوهش، وضعیت فرونشست زمین در دشت میاندواب مورد بررسی قرار گرفت. برای این منظور از تصاویر راداری ماهواره Sentinel-1 در بازه زمانی شش ساله از ژانویه ۲۰۱۸ تا ژانویه ۲۰۲۴ استفاده شد. در این تحقیق مجموعاً ۳۸ تصویر راداری مربوط به ماهواره Sentinel-1 مورد پردازش قرار گرفت. تصاویر مورد استفاده دارای ویژگی‌هایی نظیر مسیر مداری نزولی (Descending Orbit)، حالت تصویربرداری IW، قالب داده SLC و پلاریزاسیون VV هستند. این داده‌ها در بازه زمانی ۱۱ ژانویه ۲۰۱۸ تا ۴ ژانویه ۲۰۲۴ تهیه شده‌اند (جدول ۱) همچنین زوج

تصویرهای مورد آنالیز مورد استفاده تهیه شده‌اند (جدول ۲). در فرآیند انتخاب تصاویر، به منظور افزایش دقت نتایج تداخل‌سنجی، وضعیت Baseline میان تصاویر نیز مورد توجه قرار گرفت (شکل ۲). بدین منظور تصاویری انتخاب شدند که فاصله مبنای مداری آن‌ها نسبت به تصویر مرجع کمتر از ۳۰ متر باشد. رعایت این معیار باعث کاهش خطاهای هندسی و بهبود کیفیت اینترفروگرام‌های تولید شده می‌شود.

جدول ۱- لیست تاریخ، بیس‌لاین زمانی و مکانی تصاویر مورد استفاده

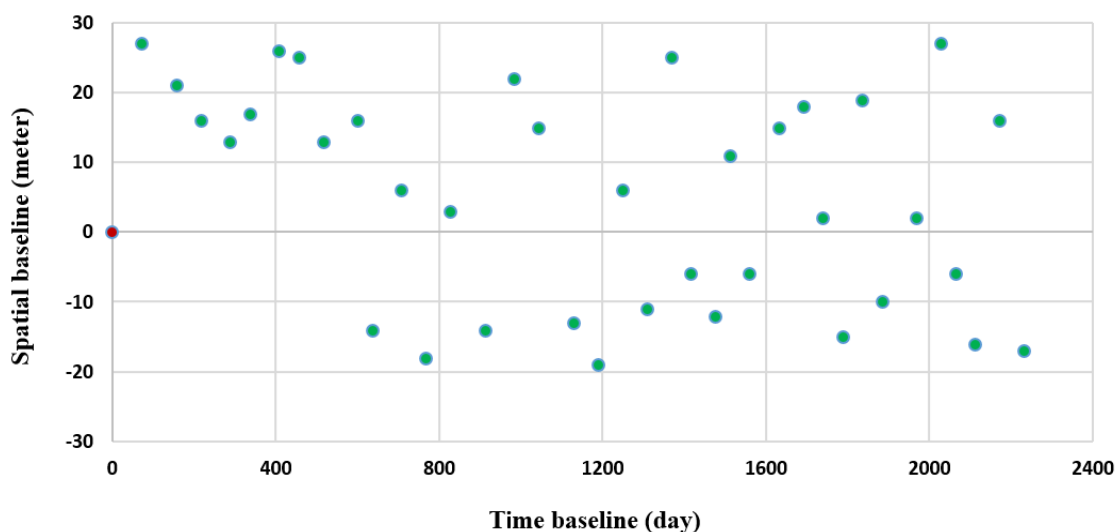
Table 1- list of date, baseline time and location of images used

| بیس لاین مکانی<br>Perpendicular<br>Baseline | بیس لاین زمانی<br>Temporal<br>Baseline | تاریخ<br>data | ردیف<br>No | بیس لاین مکانی<br>Perpendicular<br>Baseline | بیس لاین زمانی<br>Temporal<br>Baseline | تاریخ<br>data | ردیف<br>No |
|---------------------------------------------|----------------------------------------|---------------|------------|---------------------------------------------|----------------------------------------|---------------|------------|
| 6                                           | 1248                                   | 25/04/2021    | 20         | 0                                           | 0                                      | 11/01/2018    | 1          |
| -11                                         | 1308                                   | 24/06/2021    | 21         | 27                                          | 72                                     | 04/02/2018    | 2          |
| 25                                          | 1368                                   | 23/08/2021    | 22         | 21                                          | 156                                    | 29/04/2018    | 3          |
| -6                                          | 1416                                   | 10/10/2021    | 23         | 16                                          | 216                                    | 28/06/2018    | 4          |
| -12                                         | 1476                                   | 09/12/2021    | 24         | 13                                          | 288                                    | 08/09/2018    | 5          |
| 11                                          | 1512                                   | 14/01/2022    | 25         | 17                                          | 336                                    | 26/10/2018    | 6          |
| -6                                          | 1560                                   | 03/03/2022    | 26         | 26                                          | 408                                    | 06/01/2019    | 7          |
| 15                                          | 1632                                   | 14/05/2022    | 27         | 25                                          | 456                                    | 23/02/2019    | 8          |
| 18                                          | 1692                                   | 13/07/2022    | 28         | 13                                          | 516                                    | 24/04/2019    | 9          |
| 2                                           | 1740                                   | 30/08/2022    | 29         | 16                                          | 600                                    | 17/07/2019    | 10         |
| -15                                         | 1788                                   | 17/10/2022    | 30         | -14                                         | 636                                    | 22/08/2019    | 11         |
| 19                                          | 1836                                   | 04/12/2022    | 31         | 6                                           | 708                                    | 02/11/2019    | 12         |
| -10                                         | 1884                                   | 21/01/2023    | 32         | -18                                         | 768                                    | 01/01/2020    | 13         |
| 2                                           | 1968                                   | 15/04/2023    | 33         | 3                                           | 828                                    | 01/03/2020    | 14         |
| 27                                          | 2028                                   | 14/06/2023    | 34         | -14                                         | 912                                    | 24/05/2020    | 15         |
| -6                                          | 2064                                   | 20/07/2023    | 35         | 22                                          | 984                                    | 04/08/2020    | 16         |
| -16                                         | 2112                                   | 06/09/2023    | 36         | 15                                          | 1044                                   | 03/10/2020    | 17         |
| 16                                          | 2172                                   | 05/11/2023    | 37         | -13                                         | 1128                                   | 26/12/2020    | 18         |
| 17                                          | 2232                                   | 04/01/2024    | 38         | -19                                         | 1188                                   | 24/02/2021    | 19         |

جدول ۲- تصاویر راداری سنتینل-۱ مورد استفاده در این پژوهش

Table 2- Radar images Sentinel-1 used in this study

| زوج تصاویر<br>Interferometric (Master-Slave Pair) |            | ردیف<br>No | زوج تصاویر<br>Interferometric (Master-Slave Pair) |            | ردیف<br>No |
|---------------------------------------------------|------------|------------|---------------------------------------------------|------------|------------|
| 25/04/2021                                        | 24/06/2021 | 20         | 11/01/2018                                        | 04/02/2018 | 1          |
| 24/06/2021                                        | 23/08/2021 | 21         | 04/02/2018                                        | 29/04/2018 | 2          |
| 23/08/2021                                        | 10/10/2021 | 22         | 29/04/2018                                        | 28/06/2018 | 3          |
| 10/10/2021                                        | 09/12/2021 | 23         | 28/06/2018                                        | 08/09/2018 | 4          |
| 09/12/2021                                        | 14/01/2022 | 24         | 08/09/2018                                        | 26/10/2018 | 5          |
| 14/01/2022                                        | 03/03/2022 | 25         | 26/10/2018                                        | 06/01/2019 | 6          |
| 03/03/2022                                        | 14/05/2022 | 26         | 06/01/2019                                        | 23/02/2019 | 7          |
| 14/05/2022                                        | 13/07/2022 | 27         | 23/02/2019                                        | 24/04/2019 | 8          |
| 13/07/2022                                        | 30/08/2022 | 28         | 24/04/2019                                        | 17/07/2019 | 9          |
| 30/08/2022                                        | 17/10/2022 | 29         | 17/07/2019                                        | 22/08/2019 | 10         |
| 17/10/2022                                        | 04/12/2022 | 30         | 22/08/2019                                        | 02/11/2019 | 11         |
| 04/12/2022                                        | 21/01/2023 | 31         | 02/11/2019                                        | 01/01/2020 | 12         |
| 21/01/2023                                        | 15/04/2023 | 32         | 01/01/2020                                        | 01/03/2020 | 13         |
| 15/04/2023                                        | 14/06/2023 | 33         | 01/03/2020                                        | 24/05/2020 | 14         |
| 14/06/2023                                        | 20/07/2023 | 34         | 24/05/2020                                        | 04/08/2020 | 15         |
| 20/07/2023                                        | 06/09/2023 | 35         | 04/08/2020                                        | 03/10/2020 | 16         |
| 06/09/2023                                        | 05/11/2023 | 36         | 03/10/2020                                        | 26/12/2020 | 17         |
| 05/11/2023                                        | 04/01/2024 | 37         | 26/12/2020                                        | 24/02/2021 | 18         |
| -                                                 | -          | -          | 24/02/2021                                        | 25/04/2021 | 19         |



شکل ۲- نمودار بیس لاین زمانی و مکانی تصاویر

Fig. 2. Tim and location bass chart

در مرحله پیش پردازش، تصحیحات مداری بر روی تصاویر اعمال شده و اثرات توپوگرافی با استفاده از مدل ارتفاعی مناسب حذف گردید. همچنین به منظور کاهش نویز و افزایش دقت نتایج، فیلترگذاری مناسب بر روی اینترفروگرامها انجام شد و آستانه همبستگی تصاویر برابر با  $0.2$  در نظر گرفته شد. پس از آن بر اساس بیس لاین زمانی و مداری تصاویر، زوج تصاویر مناسب انتخاب و اینترفروگرامهای منطقه تولید شد. در نهایت با پردازش سری زمانی داده‌ها، نقشه میزان جابجایی و نرخ فرونشست زمین در محدوده دشت میاندواب استخراج گردید. پردازش این داده‌ها در محیط سیستم عامل لینوکس و با استفاده از نرم‌افزار GMTSAR و بسته پردازشی GMT انجام شده است. در این مرحله برای استخراج میزان جابجایی سطح زمین از روش تداخل سنجی سری زمانی SBAS استفاده شد.

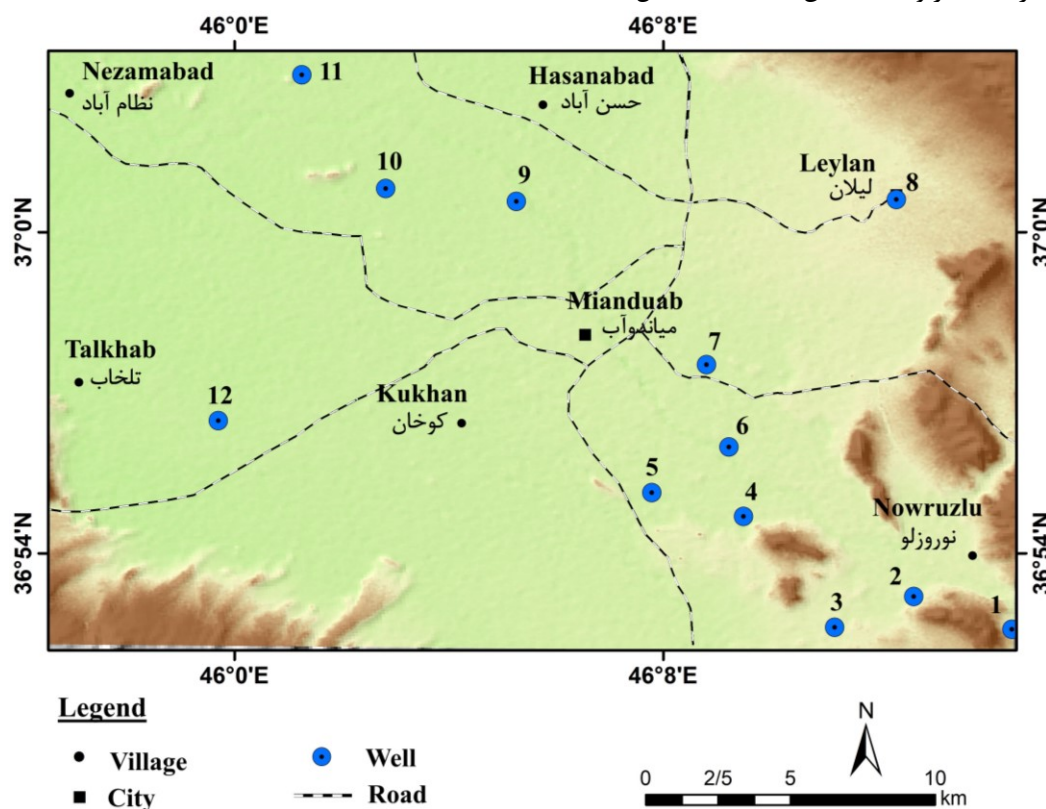
**مرحله دوم (تحلیل وضعیت افت منابع آب زیرزمینی):** در این مرحله به منظور بررسی ارتباط فرونشست با وضعیت منابع آب زیرزمینی، اطلاعات مربوط به ۱۲ حلقه چاه پیژومتری منطقه مورد استفاده قرار گرفت. با استفاده از این داده‌ها و به کمک روش درونیایی IDW نقشه افت سطح آب زیرزمینی تهیه شد. سپس برای ارزیابی میزان ارتباط بین دو پدیده، ضریب همبستگی پیرسون بین نقشه فرونشست و نقشه افت سطح آب زیرزمینی در محیط GIS محاسبه گردید.

**مرحله سوم (شناسایی مناطق مستعد وقوع فرونشست):** در این مرحله، به منظور تحلیل نقش عوامل محیطی در بروز فرونشست، شش پارامتر شامل افت سطح آب زیرزمینی، فاصله از رودخانه، ارتفاع، شیب، کاربری اراضی و لیتولوژی مورد بررسی قرار گرفت. ابتدا لایه‌های اطلاعاتی مربوط به این پارامترها تهیه و با استفاده از توابع منطق فازی استانداردسازی شدند. سپس با استفاده از روش وزن‌دهی نسبی (RWR) میزان اهمیت هر یک از پارامترها تعیین گردید و در نهایت با تلفیق لایه‌ها، نقشه پتانسیل وقوع فرونشست منطقه تهیه شد. برای ارزیابی صحت نتایج، نقشه حاصل با نقشه واقعی فرونشست منطقه مقایسه و تحلیل گردید. در مدل RWR، وزن پایه هر پارامتر برابر با ۱ در نظر گرفته می‌شود و سپس به‌ازای هر بار ارجحیت نسبت به سایر پارامترها،  $0.1$  به ارزش آن افزوده می‌شود. به عنوان مثال، اگر یک پارامتر نسبت به چهار پارامتر دیگر دارای ارجحیت باشد، ارزش  $1/4$  را کسب می‌کند و اگر نسبت به هیچ‌یک از پارامترها ارجحیت نداشته باشد، ارزش آن برابر با ۱ باقی می‌ماند. وزن نهایی هر پارامتر از تقسیم وزن اولیه آن بر مجموع وزن‌های اولیه تمامی پارامترها به‌دست می‌آید.

در این پژوهش برای تلفیق لایه‌های استاندارد شده فازی، از عملگر گامای فازی استفاده شده است. این عملگر یکی از انعطاف‌پذیرترین عملگرهای ترکیب در مدل‌سازی پتانسیل مخاطرات محیطی محسوب می‌شود و بر ترکیب دو عملگر ضرب جبری فازی و جمع جبری فازی استوار است. به بیان دیگر، عملگر گاما با به کارگیری یک پارامتر تنظیمی به نام گاما ( $\gamma$ )، امکان می‌دهد که اثر ترکیبی پارامترها به صورت متعادل بین حالت «حداقل‌گرا» (ضرب جبری) و حالت «حداکثرگرا» (جمع

جبری) تنظیم شود. هرچه مقدار گاما به صفر نزدیک‌تر باشد، عملگر به رفتار ضرب جبری (کاهش‌دهنده) و هرچه به یک نزدیک‌تر باشد، به رفتار جمع جبری (افزایش‌دهنده) میل می‌کند. این ویژگی باعث می‌شود عملگر گاما برای مدل‌سازی پدیده‌های پیچیده‌ای مانند فرونشست که در آن هم‌پوشانی چند عامل با وزن‌های متفاوت نقش دارد، مناسب‌تر باشد. انتخاب مقدار گاما در این پژوهش بر اساس آزمون مقادیر مختلف و انتخاب مقداری که بیشترین انطباق را با نقشه واقعی فرونشست (استخراج‌شده از داده‌های راداری) ایجاد می‌کند، صورت گرفته است.

مرحله چهارم (تحلیل ارتباط بین فرونشست رخ داده با افت منابع آب زیرزمینی): یکی از مهم‌ترین عوامل شناخته‌شده در واکنش‌پذیری رسوبات آبرفتی نسبت به فرونشست، افت سطح آب زیرزمینی است. بنابراین، در گام نخست تلاش شد تا با استفاده از داده‌های بلندمدت چاه‌های پیژومتری، وضعیت تغییرات سطح ایستابی و میزان افت سالانه در نقاط مختلف دشت به‌طور دقیق مطالعه شود تا بتوان درجه انطباق آن را با فرونشست‌های ثبت‌شده ارزیابی کرد. برای این منظور، داده‌های مربوط به ۱۲ چاه پیژومتری واقع در محدوده دشت جمع‌آوری گردید. این داده‌ها دوره زمانی نسبتاً جامعی را شامل می‌شوند و بازه‌ای بین سال‌های ۱۳۸۰ تا ۱۴۰۲ را در بر می‌گیرند. موقعیت مکانی چاه‌ها، که به‌طور پراکنده نقاط مختلف دشت را پوشش می‌دهند، در نقشه مربوطه مشخص شده است (شکل ۳).



شکل ۳- نقشه موقعیت چاه‌های مورد مطالعه

Fig. 3. Location map of the wells

پس از گردآوری داده‌های تراز آب زیرزمینی، روند تغییرات سطح ایستابی برای هر چاه استخراج و سپس میانگین سالانه افت سطح آب برای دوره زمانی موجود محاسبه شد (جدول ۳). نتایج حاصل از این محاسبات نشان داد که افت سالانه سطح آب زیرزمینی در این چاه‌ها بین ۵۹ تا ۱۰۰ سانتی‌متر متغیر است. این بازه، خود نمایانگر فشار سنگین وارده بر منابع آب زیرزمینی دشت و برداشت بیش از حدی است که طی دو دهه اخیر رخ داده است. در میان چاه‌های بررسی‌شده، بیشترین میزان افت سالانه مربوط به چاه شماره ۹ در محدوده ایستگاه کشاورزی با ۱۰۰ سانتی‌متر افت سالانه بوده است. این مقدار نشان‌دهنده برداشت بسیار فشرده و بی‌رویه از سفره آب زیرزمینی در این منطقه است که احتمالاً ناشی از فعالیت‌های گسترده کشاورزی، پمپاژ مداوم و افزایش تعداد چاه‌های عمیق و نیمه‌عمیق بوده است. در مقابل، چاه شماره ۸ واقع در محدوده نزدیک

لیلان با ۵۹ سانتی متر کمترین افت سالانه را نشان می‌دهد که بیانگر فشار کمتر بر منابع آب زیرزمینی در این بخش از دشت است. میانگین کلی افت سالانه در کل دشت برابر با ۸۱/۶ سانتی متر محاسبه شده است که رقمی بسیار قابل توجه و نشانه‌ای جدی از وضعیت بحرانی آبخوان میاندواب است.

جدول ۳- موقعیت و میانگین افت سالانه چاه‌های منطقه مورد مطالعه

Table 3- Location and average annual drop of wells in the study area

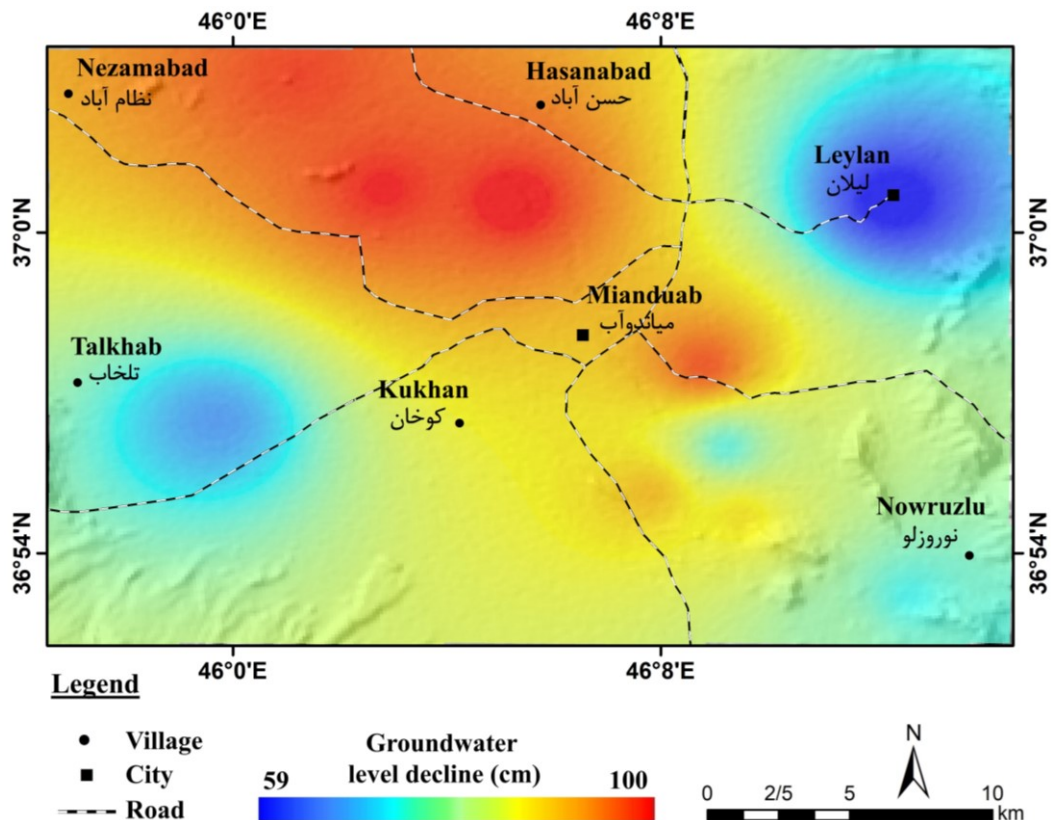
| موقعیت در نقشه<br>Location Map | موقعیت محلی<br>Local Location           | طول جغرافیایی<br>Longitude | عرض جغرافیایی<br>Latitude | دوره زمانی<br>Time Period | میانگین افت سالانه (cm)<br>Mean Annual Groundwater Level Decline(cm) |
|--------------------------------|-----------------------------------------|----------------------------|---------------------------|---------------------------|----------------------------------------------------------------------|
| 1                              | شیرآباد<br>Shir abad                    | 46° 14' 28"                | 36° 14' 29"               | 1402-1391                 | 75                                                                   |
| 2                              | سد نوروزلو<br>Dam Norozlo               | 46° 12' 38"                | 36° 53' 13"               | 1402-1380                 | 74                                                                   |
| 3                              | حسین‌آباد<br>Hossein Abad               | 46° 11' 10"                | 36° 52' 37"               | 1402-1391                 | 78                                                                   |
| 4                              | گاو میش گلی<br>Gavmish Goli             | 46° 09' 29"                | 36° 54' 43"               | 1402-1381                 | 87                                                                   |
| 5                              | عسگرآباد<br>Asgar Abad                  | 46° 07' 46"                | 36° 55' 10"               | 1402-1382                 | 90                                                                   |
| 6                              | حیدرآباد<br>Heydar Abad                 | 46° 09' 11"                | 36° 56' 01"               | 1402-1391                 | 75                                                                   |
| 7                              | قره ورن<br>Ghare vern                   | 46° 08' 46"                | 36° 57' 32"               | 1402-1380                 | 76                                                                   |
| 8                              | لیلان<br>Lilan                          | 46° 12' 20"                | 37° 00' 36"               | 1402-1391                 | 59                                                                   |
| 9                              | ایستگاه کشاورزی<br>Agricultural Station | 46° 05' 15"                | 37° 00' 35"               | 1402-1384                 | 100                                                                  |
| 10                             | اوج تپه قلعه<br>Uch Tappah Qaleh        | 46° 02' 48"                | 37° 00' 49"               | 1402-1385                 | 99                                                                   |
| 11                             | اسلام تپه<br>Eslam Tappeh               | 46° 01' 14"                | 37° 02' 57"               | 1402-1386                 | 98                                                                   |
| 12                             | جعفرآباد<br>Jafar Abad                  | 45° 59' 40"                | 36° 56' 29"               | 1402-1391                 | 68                                                                   |

پس از محاسبه افت سالانه در چاه‌ها، لازم بود تحلیل مکانی این افت به صورت منطقه‌ای انجام شود تا بتوان الگوی فضایی افت سطح آب زیرزمینی را با الگوی فرونشست مقایسه کرد. برای این منظور، از روش درونیایی IDW استفاده شد و نقشه تغییرات سطح ایستابی برای کل دشت تهیه گردید (شکل ۴). تحلیل این نقشه نشان داد که بیشترین افت آب زیرزمینی در نواحی جنوبی دشت رخ داده است. این بخش‌ها به دلیل تراکم بالای چاه‌های بهره‌برداری، اراضی کشاورزی پرمصرف و وابستگی شدید به آبیاری، همواره با بحران کمبود منابع آب زیرزمینی مواجه بوده‌اند. همچنین افت سطح آب به طور واضح از جنوب به سمت نواحی شمالی و ارتفاعات پیرامونی کاهش می‌یابد که این موضوع با ساختار هیدروژئولوژیکی دشت و موقعیت تغذیه آبخوان همخوانی دارد.

در مرحله بعد، به منظور بررسی این موضوع که آیا الگوی افت آب زیرزمینی با الگوی فرونشست‌ها همخوانی دارد یا خیر، از روش همبستگی پیکسلی استفاده شد. در این روش، مقدار افت آب زیرزمینی و مقدار فرونشست متناظر در هر پیکسل از دو نقشه وارد محاسبات آماری شد. نتیجه این تحلیل نشان داد که ضریب همبستگی پیرسون بین این دو پارامتر ۰/۶۶ است. مقدار به دست آمده نشان‌دهنده وجود رابطه مستقیم، مثبت و معنادار بین افت سطح آب زیرزمینی و میزان فرونشست دشت است.

به بیان دیگر، مناطقی که افت بیشتری در سطح ایستابی داشته‌اند، همان بخش‌هایی هستند که بیشترین میزان فرونشست را تجربه کرده‌اند. این موضوع تأیید می‌کند که افت شدید و مستمر سطح آب زیرزمینی، عامل اصلی و غالب در شکل‌گیری

فرونشست‌های رخ داده در دشت میاندوآب است. با توجه به اینکه رسوبات ریزدانه و تراکم‌پذیر در لایه‌های میانی و پایینی آبخوان در اثر کاهش فشار آب حفره‌ای دچار فشردگی می‌شوند، افزایش برداشت آب و افت ناشی از آن به صورت مستقیم موجب نشست زمین در این مناطق می‌شود. انطباق کامل الگوی افت و فرونشست در نقشه‌ها نیز مؤید صحت این نتیجه است.



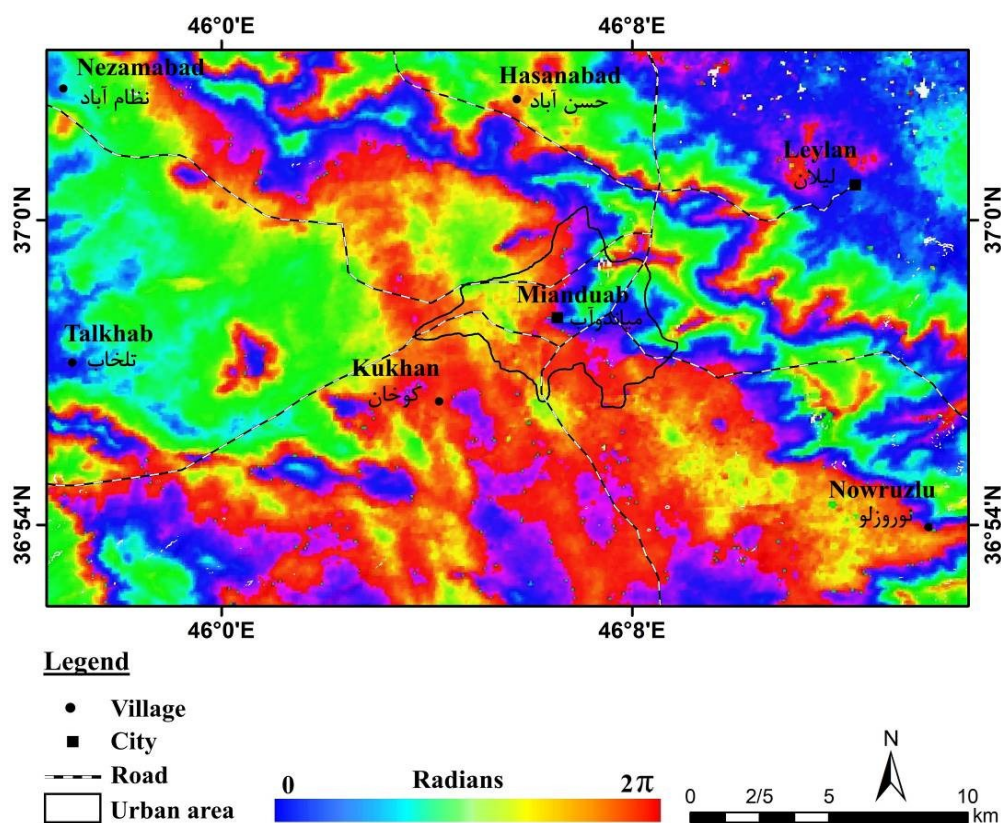
شکل ۴- نقشه درونیایی شده وضعیت افت منابع آب زیرزمینی در منطقه مورد مطالعه

Fig 4. Spatially interpolated map of groundwater drawdown

## نتایج و بحث

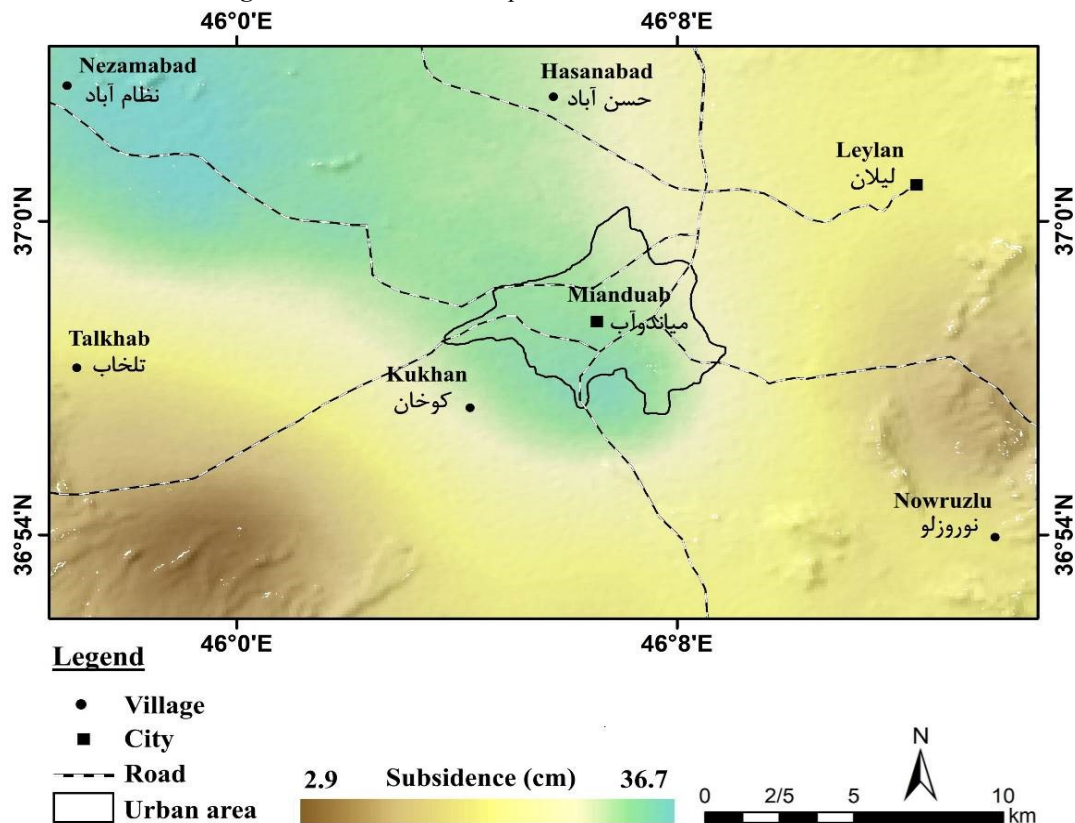
### ارزیابی وضعیت فرونشست منطقه مورد مطالعه

برای بررسی روند بلندمدت فرونشست، بازه زمانی ۱۱ ژانویه ۲۰۱۸ تا ۴ ژانویه ۲۰۲۴ مورد ارزیابی قرار گرفت. در این بخش، ۳۸ تصویر راداری ماهواره Sentinel-1 مورد استفاده قرار گرفت و بر اساس معیار بیس لاین زمانی، ۳۷ زوج تصویر جهت تولید اینترفروگرام‌ها انتخاب شد (شکل ۳ و جدول ۲) در واقع تشکیل اینترفراگرام و برآورد همبستگی تصاویر تداخل سنجی 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 (شکل ۵). در انتها پس از انجام پردازش‌های تداخل سنجی، نقشه نهایی فرونشست برای این دوره استخراج گردید (شکل ۶). نتایج نشان می‌دهد که طی این دوره ۶ ساله، میزان فرونشست در دشت میاندوآب بین ۲/۹ تا ۳۶/۷ سانتی‌متر متغیر بوده است. بررسی توزیع فضایی این پدیده حاکی از آن است که بخش‌های جنوبی دشت میاندوآب و همچنین بخش قابل توجهی از محدوده شهری میاندوآب بیش‌ترین نرخ فرونشست را تجربه کرده‌اند. در مقابل، کمترین میزان فرونشست در ارتفاعات مجاور دشت مشاهده می‌شود. به طور کلی، نتایج حاصل از تحلیل داده‌ها نشان می‌دهد که میانگین نرخ سالانه فرونشست در دشت میاندوآب حدود ۶ سانتی‌متر برآورد می‌شود که بیانگر شدت قابل توجه این پدیده در منطقه مورد مطالعه است.



شکل ۵- نمونه‌ای از اینترفروگرام‌های تهیه شده (مربوط به زوج تصاویر تاریخ ۲۰۲۳/۰۴/۱۵ تا ۲۰۲۳/۰۱/۲۱)

Fig. 5. Area subsidence map from 2018/01/11 to 2014/04/01



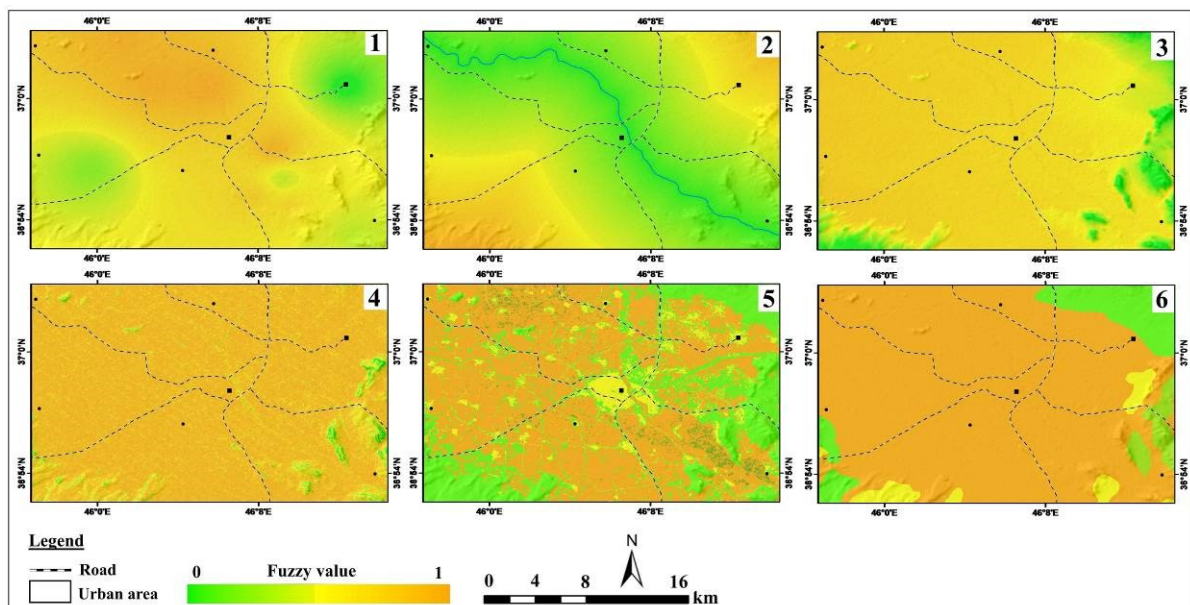
شکل ۶- نقشه فرونشست منطقه از تاریخ ۲۰۱۸/۰۱/۱۱ تا ۲۰۲۴/۰۱/۰۴

Fig. 6. Area subsidence map from 2018/01/11 to 2014/04/01

## تحلیل ارتباط بین فرونشست رخ داده با پارامترهای محیطی

پارامترهای محیطی نقش مهمی در تعیین میزان استعداد مناطق برای وقوع فرونشست دارند. بر این اساس، در این پژوهش مجموعه‌ای از عوامل طبیعی و انسانی به‌منظور شناسایی پهنه‌های مستعد فرونشست در دشت میاندوآب مورد بررسی قرار گرفت. هدف از تحلیل این پارامترها، تعیین نواحی مستعد و مقایسه نتایج حاصل با الگوی فرونشست استخراج‌شده از تصاویر راداری بود. برای این منظور، لایه‌های اطلاعاتی پس از آماده‌سازی به مقیاس ۰ تا ۱ نرمال‌سازی شدند (شکل ۷) تا امکان تلفیق مکانی آنها فراهم شود؛ به‌گونه‌ای که مقادیر نزدیک به ۱ بیانگر استعداد بیشتر فرونشست و مقادیر نزدیک به صفر نشان‌دهنده استعداد کمتر باشند.

تشریح پارامترهای مورد استفاده: در این مطالعه شش پارامتر اصلی شامل افت منابع آب زیرزمینی، فاصله از رودخانه، کاربری اراضی، لیتولوژی، ارتفاع و شیب مورد استفاده قرار گرفتند. افت سطح آب زیرزمینی به‌عنوان مهم‌ترین عامل فیزیکی فرونشست در آبخوان‌های آبرفتی شناخته می‌شود، زیرا کاهش فشار آب منفذی موجب افزایش تنش مؤثر در اسکلت رسوبی و در نتیجه تراکم‌پذیری لایه‌های ریزدانه می‌شود. نقشه این پارامتر با استفاده از داده‌های ۱۲ چاه پیزومتری و روش درونیابی مکانی تهیه شد و نواحی دارای بیشترین افت، بیشترین مقدار استاندارد را دریافت کردند. فاصله از رودخانه نیز به‌عنوان عاملی غیرمستقیم در نظر گرفته شد؛ به‌طوری‌که نواحی دورتر از رودخانه‌ها معمولاً وابستگی بیشتری به برداشت آب زیرزمینی دارند و در نتیجه احتمال افت ایستابی و فرونشست در آنها بیشتر است. در مقابل، نواحی نزدیک به رودخانه‌ها به‌دلیل امکان تغذیه جانبی، فشار کمتری بر آبخوان وارد می‌کنند. کاربری اراضی شاخصی از شدت فعالیت‌های انسان‌زاد و میزان بهره‌برداری از منابع آب است. اراضی کشاورزی آبی به دلیل مصرف بالای آب و تراکم چاه‌ها بیشترین فشار را بر آبخوان وارد می‌کنند، در حالی که کاربری‌هایی مانند مراتع یا اراضی بایر تأثیر کمتری دارند. از نظر ویژگی‌های زمین‌شناسی، لیتولوژی نقش مهمی در تعیین میزان تراکم‌پذیری رسوبات دارد؛ به‌طوری‌که نهشته‌های آبرفتی نرم و ریزدانه استعداد بیشتری برای نشست دارند، در حالی که واحدهای سنگی مقاوم‌تر کمتر دچار تراکم می‌شوند. همچنین پارامترهای توپوگرافی شامل ارتفاع و شیب نیز در تحلیل مورد توجه قرار گرفتند. مناطق کم‌ارتفاع و کم‌شیب معمولاً با تمرکز فعالیت‌های انسانی، توسعه کشاورزی و حضور رسوبات نرم همراه هستند و به همین دلیل استعداد بیشتری برای وقوع فرونشست دارند.



شکل ۷- نقشه استانداردسازی شده لایه‌های اطلاعاتی (۱) افت منابع آب زیرزمینی (۲) فاصله از رودخانه (۳) ارتفاع (۴) شیب (۵) کاربری اراضی (۶) لیتولوژی

Fig. 7. Standardized thematic layers map: 1) Groundwater drawdown 2) Distance from river 3) Elevation 4) Slope 5) Landuse 6) Lithology

وزن‌دهی به پارامترها: با درک این نکته که هر یک از پارامترهای شناسایی شده در تعیین پتانسیل فرونشست، از ارزش و اهمیت یکسانی برخوردار نیستند، این بخش از پژوهش به تخصیص وزن‌های متفاوت به آن‌ها اختصاص یافته است. این فرآیند وزن‌دهی با اتکا بر دو رویکرد کلیدی صورت پذیرفته است: اول، بهره‌گیری از دانش و تجربیات کارشناسان خبره در حوزه فرونشست؛ و دوم، استفاده از مدل کمی ضریب وزنی نسبی (Relative Weighting Ratio - RWR). این رویکرد ترکیبی تضمین می‌کند که وزن‌دهی به پارامترها هم مبتنی بر مبانی علمی و هم بر اساس یافته‌های تجربی و نظرات تخصصی باشد. بر اساس نتایج حاصل از تحلیل‌ها و مدل RWR، پارامتر «افت منابع آب زیرزمینی» به عنوان مهم‌ترین و تأثیرگذارترین عامل در وقوع فرونشست شناسایی شده است. این پارامتر، وزن بالاتری معادل  $0/2$  را به خود اختصاص داده است (جدول ۴).

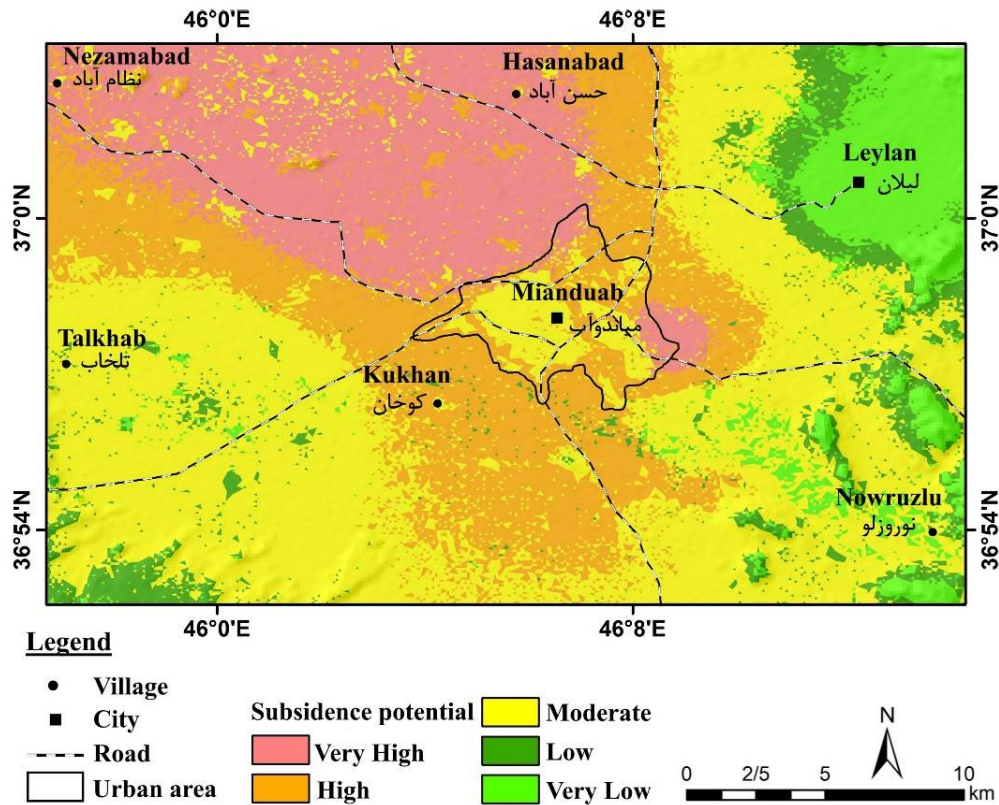
جدول ۴- وزن پارامترها بر اساس مدل RWR

Table 4- Parameter weights based on the RWR model

| ردیف<br>No | پارامتر<br>Parameter                                 | وزن اولیه<br>Initial Weight | وزن نهایی<br>Final Weight |
|------------|------------------------------------------------------|-----------------------------|---------------------------|
| 1          | افت منابع آب زیرزمینی<br>(Groundwater Level Decline) | 1.5                         | 0.2                       |
| 2          | کاربری اراضی (Land Use)                              | 1.4                         | 0.187                     |
| 3          | ارتفاع (Elevation)                                   | 1.3                         | 0.173                     |
| 4          | شیب (Slope)                                          | 1.1                         | 0.147                     |
| 5          | فاصله از رودخانه (Distance from River)               | 1.2                         | 0.16                      |
| 6          | لیتولوژی (Lithology)                                 | 1                           | 0.133                     |

اجرای مدل ترکیبی منطق فازی و RWR: با تعیین و تخصیص وزن‌های معنادار به پارامترهای مؤثر در وقوع فرونشست، مرحله بعد شامل اعمال این وزن‌ها بر روی لایه‌های اطلاعاتی متناظر در محیط GIS است. در این فرآیند، ابتدا وزن هر پارامتر بر روی لایه مربوطه اعمال می‌شود و سپس لایه‌های وزن‌دهی شده با استفاده از عملگرهای ترکیب فازی با یکدیگر تلفیق می‌گردند. عملگر ترکیب فازی، که در منطق فازی برای ادغام لایه‌های دارای ارزش‌های استاندارد شده فازی به کار می‌رود، امکان ترکیب همزمان و منطقی چندین لایه محیطی را فراهم کرده و دقت تحلیل را افزایش می‌دهد. نتیجه نهایی این تلفیق، تولید نقشه پتانسیل وقوع فرونشست بوده است (شکل ۸). بر اساس نقشه حاصل، بخش‌های جنوبی دشت میاندواب دارای پتانسیل بسیار بالای وقوع فرونشست هستند. انطباق نتایج به‌دست‌آمده از پهنه‌بندی مبتنی بر پارامترهای محیطی با نتایج استخراج شده از تصاویر راداری نشان می‌دهد که می‌توان با اتکاء به داده‌های محیطی، مناطق مستعد فرونشست را تا حد زیادی شناسایی و پیش‌بینی کرد.

نتایج ارزیابی میزان مساحت و درصد طبقات پتانسیل وقوع فرونشست نشان داده است که حدود  $98/7$  کیلومترمربع (معادل  $17/8$  درصد از کل محدوده) در طبقه «پتانسیل خیلی زیاد» قرار می‌گیرد. این گستره عمدتاً تحت تأثیر افت شدید سطح آب زیرزمینی، ارتفاع و شیب کم، نوع کاربری اراضی و ویژگی‌های لیتولوژیکی منطقه است. همچنین حدود  $121/9$  کیلومترمربع (معادل  $2$  درصد از وسعت منطقه) در طبقه «پتانسیل زیاد» وقوع فرونشست قرار دارد (جدول ۵). در مجموع، یافته‌ها نشان می‌دهد که بخش قابل توجهی از منطقه دارای استعداد بالایی برای بروز مخاطره فرونشست بوده و این مسئله ضرورت مدیریت منابع آب و برنامه‌ریزی کاربری اراضی را بیش از پیش برجسته می‌سازد.



شکل ۸- نقشه پتانسیل وقوع فرونشست در منطقه مورد مطالعه

Fig. 8. Land subsidence susceptibility map of the study area

جدول ۵- مساحت و درصد مساحت طبقات

Table 5- Area and percentage of floor area

| ردیف<br>No | طبقات<br>Classes       | مساحت (کیلومتر مربع)<br>Area<br>(km <sup>2</sup> ) | درصد مساحت<br>Area<br>Percentage% |
|------------|------------------------|----------------------------------------------------|-----------------------------------|
| 1          | خیلی زیاد<br>Very High | 98.7                                               | 17.8                              |
| 2          | زیاد<br>High           | 121.9                                              | 22                                |
| 3          | متوسط<br>Moderate      | 247.1                                              | 44.7                              |
| 4          | کم<br>Low              | 35.2                                               | 6.4                               |
| 5          | خیلی کم<br>Very Low    | 50.2                                               | 9.1                               |
| 6          | مجموع<br>Total         | 553.1                                              | 100                               |

نتایج این پژوهش نشان داد که دشت میاندوآب طی دوره زمانی ژانویه ۲۰۱۸ تا ژانویه ۲۰۲۴ با پدیده فرونشست قابل توجهی مواجه بوده است. تحلیل ۳۸ تصویر راداری Sentinel-1 با روش تداخل سنجی سری زمانی SBAS نشان داد که میزان فرونشست در این بازه شش ساله بین ۲/۹ تا ۳۶/۷ سانتی متر متغیر بوده و میانگین نرخ سالانه آن حدود ۶ سانتی متر برآورد می شود. بررسی الگوی فضایی فرونشست حاکی از آن است که بیشترین میزان نشست در بخش های جنوبی دشت و بخش هایی از محدوده شهری میاندوآب رخ داده است، در حالی که کمترین میزان آن در ارتفاعات اطراف دشت مشاهده می شود. این الگوی فضایی با موقعیت چاه های بهره برداری، تراکم اراضی کشاورزی و ویژگی های لیتولوژیکی منطقه انطباق کامل دارد. تحلیل داده های ۱۲ حلقه چاه پیزومتری نیز بیانگر افت قابل توجه سطح آب زیرزمینی در منطقه است؛ به طوری که میانگین افت سالانه سطح ایستابی حدود ۸۱/۶ سانتی متر در سال محاسبه شد. دامنه افت سالانه چاه ها بین ۵۹ تا ۱۰۰ سانتی متر

متغیر است که بیشترین مقدار آن مربوط به چاه شماره ۹ در محدوده ایستگاه کشاورزی و کمترین مقدار آن مربوط به چاه شماره ۸ در محدوده لیلان است. نتایج تحلیل همبستگی پیکسلی نشان داد که بین افت سطح آب زیرزمینی و میزان فرونشست رابطه مستقیم و معناداری وجود دارد (ضریب همبستگی پیرسون ۰/۶۶)، که نشان‌دهنده نقش اصلی برداشت بی‌رویه آب زیرزمینی در تشدید این پدیده است. تحلیل پارامترهای محیطی شامل افت منابع آب زیرزمینی، فاصله از رودخانه، کاربری اراضی، لیتولوژی، ارتفاع و شیب و تلفیق آن‌ها با استفاده از مدل ترکیبی منطق فازی و RWR (با عملگر گامای فازی و مقدار گاما ۰/۹) نشان داد که بخش‌های جنوبی دشت بیشترین پتانسیل وقوع فرونشست را دارند. بر اساس نتایج پهنه‌بندی، حدود ۱۷/۸ درصد از مساحت منطقه (معادل ۹۸/۷ کیلومترمربع) در طبقه «پتانسیل بسیار زیاد» و حدود ۲۲ درصد (معادل ۱۲۱/۹ کیلومترمربع) در طبقه «پتانسیل زیاد» قرار دارد.

یافته‌های این تحقیق با نتایج پژوهشگران پیشین در سطح جهانی و ایران مطابقت دارد. در سطح بین‌المللی، چوسارد و همکاران (Chaussard et al., 2014) با استفاده از تصاویر ALOS، حداکثر نرخ فرونشست شهر مکزیکوسیتی را تا ۳۰ سانتی‌متر در سال گزارش کردند و برداشت بی‌رویه آب زیرزمینی را عامل اصلی آن دانستند. در پژوهش حاضر نیز اگرچه نرخ فرونشست سالانه در دشت میاندوآب حدود ۶ سانتی‌متر برآورد شده است، اما الگوی فضایی و عامل کنترل‌کننده (افت سطح آب زیرزمینی) با یافته‌های چوسارد و همکاران هم‌راستا است. ژائو و همکاران (Zhao et al., 2019) نرخ فرونشست سالانه در منطقه ساحلی شانگهای چین را حدود ۳ سانتی‌متر محاسبه کردند؛ این در حالی است که نرخ فرونشست در دشت میاندوآب حدود دو برابر مقدار گزارش‌شده برای شانگهای است که نشان‌دهنده شدت بالاتر این پدیده در منطقه مورد مطالعه است. خان و همکاران (Khan et al., 2023) نرخ فرونشست سالانه حوضه پیشاور پاکستان را ۲۳/۳ سانتی‌متر گزارش کردند که از نرخ مشاهده‌شده در دشت میاندوآب حدود چهار برابر بیشتر است؛ این تفاوت می‌تواند ناشی از شدت بالاتر برداشت آب زیرزمینی در حوضه پیشاور و ویژگی‌های لیتولوژیکی متفاوت آن باشد. جی‌یین و همکاران (Jie Yin, Yu & Wilby, 2016) با مدل‌سازی اثر فرونشست بر خطر سیل‌گرفتگی شهری در شانگهای، بر پیامدهای ژئومورفولوژیکی این پدیده تأکید کردند که با یافته‌های پژوهش حاضر درباره پیامدهای فرونشست در دشت میاندوآب هم‌خوانی دارد. میلر و شیرازی (Miler & Shirazaei, 2019) نیز با تحلیل فرونشست هیوستون و ارتباط آن با سیل‌گرفتگی ناشی از طوفان هاروی، نقش افت آب زیرزمینی در تشدید خطرات سیل را نشان دادند. ناوارو و همکاران (Navarro-Hernández et al., 2023) با ترکیب InSAR و مدل‌سازی هیدرولوژیکی، اثر فرونشست بر افزایش خطر سیل‌گرفتگی را در جنوب شرق اسپانیا ارزیابی کردند و به نتایجی مشابه پژوهش حاضر درباره نقش کلیدی افت آب زیرزمینی دست یافتند.

در سطح ملی نیز، محمدخان و همکاران (Mohammad Khan et al., 2020)، با استفاده از روش سری زمانی SBAS، حداکثر فرونشست دشت قروه را طی دوره‌ای دو ساله حدود ۲۱۶ میلی‌متر (معادل میانگین سالانه حدود ۱۰/۸ سانتی‌متر) برآورد کردند که از نرخ سالانه ۶ سانتی‌متری دشت میاندوآب بیشتر است. گنجائیان و همکاران (Ganjaeian et al., 2023a) مقدار فرونشست محدوده شهری همدان را در بازه‌ای سه‌ساله بین ۶ تا ۹۸ میلی‌متر (معادل میانگین سالانه حدود ۲ تا ۷/۳۲ میلی‌متر) محاسبه کردند که با نرخ فرونشست دشت میاندوآب هم‌پوشانی قابل توجهی دارد.

عابدینی و نظری‌گزیک (Abedini & Nazari Gazik, 2024) با استفاده از داده‌های سنتینل ۱، فرونشست شهرستان چناران را طی سال‌های ۲۰۱۷ تا ۲۰۲۱ حدود ۴۲ سانتی‌متر (معادل میانگین سالانه حدود ۸/۴ سانتی‌متر) گزارش کردند که از نرخ دشت میاندوآب بیشتر است. محمدی‌ده‌چشمه و ابراهیمی (Mohammadi Dehcheshme & Ebrahimi, 2026) نرخ فرونشست سالانه محدوده شهری جهرم را بین ۲۸ تا ۱۷۹ میلی‌متر (معادل ۲/۷ تا ۱۷/۹ سانتی‌متر) گزارش کردند که بازه گسترده‌تری را نسبت به دشت میاندوآب نشان می‌دهد. به‌طور کلی، دشت میاندوآب از نظر نرخ فرونشست (۶ سانتی‌متر در سال) در محدوده میانی تا بالای مطالعات جهانی و داخلی قرار می‌گیرد؛ به‌طوری‌که از شانگهای (۳ سانتی‌متر) و همدان (۲ تا ۳۲/۷ میلی‌متر) بیشتر، اما از مکزیکوسیتی (۳۰ سانتی‌متر)، پیشاور (۲۳/۳ سانتی‌متر)، قروه (۱۰/۸ سانتی‌متر) و چناران (۸/۴ سانتی‌متر) کمتر است. این جایگاه میانی، نشان‌دهنده شدت قابل توجه فرونشست در منطقه مورد مطالعه و ضرورت اقدامات

مدیریتی فوری است. هم‌سویی الگوی فضایی و عامل کنترل‌کننده (افت آب زیرزمینی) در همه این مطالعات، بر نقش کلیدی مدیریت پایدار منابع آب زیرزمینی در کاهش این مخاطره تأکید دارد.

نتایج این پژوهش، همانند هر مطالعه مبتنی بر داده‌های سنجش از دور و مشاهدات زمینی، با محدودیت‌ها و منابع عدم قطعیت خاصی همراه است که در تفسیر یافته‌ها باید مورد توجه قرار گیرد.

**عدم قطعیت‌های داده‌های Sentinel-1 و روش تداخل‌سنجی:** تصاویر راداری Sentinel-1 در باند C، علی‌رغم دقت مکانی و زمانی مناسب، تحت تأثیر عوامل مختلفی قرار می‌گیرند که می‌توانند بر دقت نتایج تداخل‌سنجی اثر بگذارند. یکی از مهم‌ترین این عوامل، نویز اتمسفری<sup>۱</sup> است که به‌ویژه در مناطق با رطوبت جوّی متغیر، می‌تواند خطاهای فازی قابل توجهی در اینترفروگرام‌ها ایجاد کند. این خطاها به‌صورت الگوهای فضایی گسترده و نامنظم بروز می‌کنند و ممکن است با سیگنال واقعی فرونشست اشتباه گرفته شوند. در این پژوهش، هرچند از تصحیحات مداری و مدل ارتفاعی برای کاهش اثرات توپوگرافی استفاده شد، اما تصحیح کامل نویز اتمسفری بدون استفاده از داده‌های کمکی مانند GACOS یا ERA5 امکان‌پذیر نبود و این موضوع می‌تواند عدم قطعیت جزئی در مقادیر فرونشست ایجاد کند. عامل دیگر، دی‌کوریلیشن زمانی و مکانی<sup>۲</sup> است. دی‌کوریلیشن زمانی ناشی از تغییرات پوشش زمین در فاصله زمانی بین دو تصویر است، در حالی که دی‌کوریلیشن مکانی به‌دلیل تغییرات سطح پراکندگی در فاصله مکانی رخ می‌دهد. در مناطق با پوشش گیاهی متراکم، تغییرات کاربری اراضی یا فعالیت‌های کشاورزی، همبستگی فازی بین تصاویر کاهش می‌یابد و کیفیت اینترفروگرام‌ها افت می‌کند. در دشت میاندوآب که بخش قابل توجهی از آن را اراضی کشاورزی تشکیل می‌دهد، تغییرات فصلی پوشش گیاهی و عملیات زراعی می‌تواند منجر به کاهش همبستگی در برخی اینترفروگرام‌ها و در نتیجه افزایش نویز در نتایج شود. آستانه همبستگی ۰/۲ در نظر گرفته‌شده در این پژوهش تا حدودی این اثر را کنترل می‌کند، اما حذف کامل آن ممکن نیست. همچنین، اعوجاج‌های ناشی از تغییرات رطوبت خاک و ذوب و انجماد در فصول سرد نیز می‌تواند بر فاز تداخل‌سنجی تأثیر بگذارد. حداکثر بیس‌لاین زمانی ۲۲۳۲ روز و حداکثر بیس‌لاین مکانی ۲۷ متر در نظر گرفته شد.

**عدم قطعیت‌های داده‌های چاه‌های پی‌زومتری:** داده‌های چاه‌های پی‌زومتری به‌عنوان مبنای تحلیل افت سطح آب زیرزمینی، خود با محدودیت‌هایی همراه هستند. نخست، عدم تطابق بازه زمانی داده‌های چاه‌ها با بازه زمانی تصاویر راداری یکی از مهم‌ترین چالش‌های این پژوهش است. در حالی که تصاویر Sentinel-1 بازه زمانی ژانویه ۲۰۱۸ تا ژانویه ۲۰۲۴ (۶ سال) را پوشش می‌دهند، داده‌های چاه‌های پی‌زومتری مورد استفاده در برخی موارد به دوره‌های طولانی‌تر (۱۳۸۰ تا ۱۴۰۲) تعلق دارند. این عدم تطابق زمانی می‌تواند در تحلیل همبستگی پیکسلی بین افت آب زیرزمینی و فرونشست، عدم قطعیت ایجاد کند؛ زیرا فرض بر آن است که الگوی فضایی افت در دوره‌های مختلف مشابه بوده است، در حالی که ممکن است تغییرات مدیریتی یا اقلیمی، الگوی افت را در طول زمان تغییر داده باشد. دوم، پراکندگی مکانی محدود چاه‌ها است. هرچند ۱۲ حلقه چاه پی‌زومتری در منطقه وجود دارد، اما توزیع مکانی آن‌ها یکنواخت نیست و برخی بخش‌های دشت، به‌ویژه نواحی جنوبی که بیشترین فرونشست را تجربه کرده‌اند، از نظر تعداد چاه و تراکم مشاهدات، محدودیت دارند. درونیابی IDW برای تهیه نقشه پیوسته افت، ناگزیر به برون‌یابی در مناطق فاقد چاه می‌پردازد که می‌تواند با خطا همراه باشد. روش IDW به‌دلیل ماهیت قطعی خود، عدم قطعیت مکانی داده‌ها را در نظر نمی‌گیرد و در مناطق با تراکم کم چاه، ممکن است خطای برون‌یابی افزایش یابد. سوم، خطای اندازه‌گیری و ثبت داده‌های چاه‌ها نیز به‌عنوان یک منبع عدم قطعیت دیگر مطرح است؛ عواملی مانند خطای ابزار، تغییرات سطح ایستابی در اثر پمپاژ نزدیک، و ثبت دستی داده‌ها می‌توانند دقت داده‌ها را تحت تأثیر قرار دهند.

**محدودیت‌های مدل‌سازی فازی و RWR:** علاوه بر داده‌ها، خود مدل‌سازی نیز با محدودیت‌هایی همراه است. وزن‌دهی RWR تا حدی به قضاوت کارشناسی (Expert Judgment) وابسته است و انتخاب پارامترها (شش پارامتر محیطی) ممکن است عوامل دیگری را که در فرونشست مؤثرند (مانند ضخامت آبخوان، جنس لایه‌های زیرین، یا تراکم چاه‌های بهره‌برداری) نادیده بگیرد. این پارامترها به‌دلیل عدم دسترسی به داده‌های مکانی کافی در مقیاس دشت، در مدل‌سازی وارد نشدند. همچنین، انتخاب

1- Atmospheric Phase Screen – APS

2- Temporal and Spatial Decorrelation

مقدار گاما در عملگر گامای فازی، هرچند بر اساس آزمون انطباق انجام شده، می‌تواند بر نتایج نهایی اثر بگذارد و عدم قطعیت مدل را افزایش دهد.

### نتیجه‌گیری

فرونشست زمین در دشت میاندوآب، به‌عنوان یکی از دشت‌های حاصلخیز شمال‌غرب ایران، به یک مخاطره جدی و فراگیر تبدیل شده است. تحلیل تصاویر راداری Sentinel-1 با روش SBAS نشان داد که این دشت طی دوره مورد مطالعه با نشست قابل توجهی مواجه بوده و بیشترین میزان آن در بخش‌های جنوبی دشت و محدوده شهری میاندوآب رخ داده است. این الگوی فضایی با تراکم چاه‌های بهره‌برداری، تمرکز اراضی کشاورزی و رسوبات ریزدانه تراکم‌پذیر انطباق کامل دارد. تحلیل داده‌های چاه‌های پیژومتری نیز افت قابل توجه سطح ایستابی را تأیید کرد و همبستگی معنادار بین افت آب زیرزمینی و فرونشست، گواهی بر نقش اصلی برداشت بی‌رویه آب زیرزمینی در تشدید این پدیده است. مدل ترکیبی فازی RWR نیز نشان داد که بخش قابل توجهی از مساحت منطقه در طبقات پتانسیل زیاد و بسیار زیاد وقوع فرونشست قرار دارد و انطباق مناسب بین نقشه پتانسیل فرونشست و نتایج حاصل از داده‌های راداری، بیانگر کارایی پارامترهای محیطی در شناسایی مناطق مستعد است. یافته‌های این پژوهش با نتایج پژوهشگران پیشین در سطح جهانی و ایران هم‌راستا است و مؤید آن است که فرونشست زمین صرفاً یک تغییر ارتفاعی در سطح زمین نبوده، بلکه پدیده‌ای با پیامدهای گسترده ژئومورفولوژیکی و محیط‌زیستی است که می‌تواند پایداری دشت‌ها و کاربری‌های موجود را تحت تأثیر قرار دهد. هم‌سویی نتایج این پژوهش با مطالعات پیشین، ضرورت پایش مستمر فرونشست، مدیریت برداشت از منابع آب زیرزمینی و توجه ویژه به این مخاطره در برنامه‌ریزی‌های مدیریتی و محیط‌زیستی را بیش از پیش آشکار می‌سازد.

با توجه به نتایج پژوهش، مدیریت پایدار منابع آب زیرزمینی در دشت میاندوآب ضروری به نظر می‌رسد. در این راستا، کنترل و کاهش برداشت از چاه‌های بهره‌برداری، به‌ویژه در بخش‌های جنوبی دشت که بیشترین افت و فرونشست را تجربه کرده‌اند، از طریق نصب کنتور هوشمند و تعیین سقف برداشت مجاز، می‌تواند روند افت سطح ایستابی را کند کرده و شدت فرونشست را کاهش دهد. توسعه روش‌های نوین آبیاری (قطره‌ای و بارانی) و اصلاح الگوی کشت به سمت محصولات کم‌آب‌بر و سازگار با اقلیم منطقه، همراه با افزایش بهره‌وری مصرف آب، از راهکارهای مؤثر در کاهش فشار بر آبخوان میاندوآب محسوب می‌شود. پایش مستمر فرونشست با استفاده از داده‌های Sentinel-1 و روش‌های پیشرفته InSAR، همراه با توسعه شبکه چاه‌های پیژومتری با بازه زمانی هماهنگ با تصاویر راداری و استفاده از داده‌های کمکی تصحیح اتمسفری، برای کاهش عدم قطعیت و مدیریت دقیق‌تر این مخاطره توصیه می‌شود. اجرای طرح‌های تغذیه مصنوعی آبخوان (مانند پخش سیلاب و حوضچه‌های نفوذ) در مناطق با پتانسیل فرونشست بالا، به‌ویژه در بخش‌های جنوبی دشت، می‌تواند به بازگرداندن تعادل آبخوان و کاهش روند فرونشست کمک کند. همچنین پیشنهاد می‌شود سیاست‌گذاران و مدیران منطقه‌ای، نتایج این پژوهش را در برنامه‌ریزی‌های کاربری اراضی و تخصیص منابع آب لحاظ کنند تا از گسترش این مخاطره در آینده پیشگیری شود.

### References

- Abedini, M., & Nazari Gazik, Z. (2024). Investigating the effect of groundwater loss on land subsidence, a case study: Chenaran city. *Geography and Human Relationships*, 6(4), 669-689. [in Persian] <https://doi.org/10.22034/gahr.2024.433326.2019>
- Asadi, M., Ganjaeian, H., Javedani, M., & Ghaderi Hasab, M. (2021). Evaluation of the Relationship between Natural Factors and Subsidence in Ivanaki Plain Using Radar Imaging. *Hydrogeology*, 6(1), 13-22. [in Persian] <https://doi.org/10.22034/hydro.2021.13016>
- Asghari Saraskanroud, S., Esfandiyari, F., Faal Naziri, M., & Zeinali, B. (2025). Estimation and evaluation of the risk of land subsidence in the urban boundaries of Savajbalag-Nazarabad-Chaharbagh-Karaj-Ferdis cities. *Journal of Hydrogeomorphology*, 11(41), 161-135. [in Persian] <https://doi.org/10.22034/hyd.2024.62570.1751>

- Bayati Khatibi, M., Mohammadzadeh, R., & Karimzadeh, S. (2024). Modeling of Land Subsidence of Salmas Plain by Using Adaptive Neuro-Fuzzy Inference System (ANFIS). *Journal of Geography and Environmental Hazards*, 13(4), 48-73. [in Persian] <https://doi.org/10.22067/geoe.2024.75157.1171>
- Chaussard, E., Wdowinski, S., Cabral-Cano, E., & Amelung, F. (2014). Land subsidence in central Mexico detected by ALOS InSAR time-series. *Remote Sensing of Environment*, 140, 94-106. <http://dx.doi.org/10.1016/j.rse.2013.08.038>
- Ebrahimi, A., Ghasemi, A., & Ganjaeian, H. (2020). Monitoring the subsidence rate of Pakdasht urban area using radar interferometry method. *Geography and Human Relationships*, 2(4), 29-41. [in Persian] <https://dor.isc.ac/dor/20.1001.1.26453851.1399.2.4.3.1>
- Ganjaeian, H. (2024). Identification of sinkhole-prone areas using radar images (Case study: Qorveh Plain). *Environmental Erosion Research*, 14(2), 87-105. [in Persian] <http://dx.doi.org/10.61186/jeer.14.2.6>
- Ganjaeian, H., Asadi, M., Menbari, F., & Ebrahimi, A. (2023a). Analysis of Subsidence Status in Hamedan Urban Area using Radar and Satellite Images. *Journal of Geography and Environmental Hazards*, 11(4), 236-221. [in Persian] <https://doi.org/10.22067/geoe.2022.76383.1217>
- Ganjaeian, H., Menbari, F., Ghasemi, A., & Nosrati, M. (2023b). Assessment and analysis of subsidence risk in Kaboudar Ahang-Famenin plain. *Scientific- Research Quarterly of Geographical Data (SEPEHR)*, 31(124), 75-86. [in Persian] <https://doi.org/10.22131/sepehr.2023.553000.2871>
- Ganjaeian, H., Zahabnazouri, S., Boshehri, T. F., Ebrahimi, A., & Asadi, M. (2026). Quantitative assessment and driving factors of land subsidence in Northern Hamadan Province, Iran. *Journal of Sedimentary Environments*, 11, 17. <https://doi.org/10.1007/s43217-026-00285-6>
- Ghorbani Mohammadabadi, S., Nejad Hossini, R., & Ganjaeian, H. (2023). Analysis of the effective factors in the subsidence of the Ghahavand Plain using radar and satellite images. *Geography and Human Relationships*, 5(4), 542-553. [in Persian] <https://dor.isc.ac/dor/20.1001.1.26453851.1402.5.4.29.4>
- Hejazi, A., Rezaei Moghaddam, M. H., Valizadeh Kamran, K., & Mosavi Kajabad, N. (2022). Revealing Land Subsidence in Heris Plain Using Radar Images and SBAS, PSI Method. *Geography and Environmental Sustainability*, 12(1), 89-103. [in Persian] <https://doi.org/10.22126/ges.2022.6909.2446>
- 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>
- Jasechko, S., Seybold, H., Perrone, D., Fan, Y., Shamsudduha, M., Taylor, R. G., ... & Kirchner, J. W. (2024). Rapid groundwater decline and some cases of recovery in aquifers globally. *Nature*, 625, 715-721. <https://doi.org/10.1016/j.isprsjprs.2019.05.005>
- Jie Yin, J., Yu, D., & Wilby, R. (2016). Modelling the impact of land subsidence on urban pluvial flooding: A case study of downtown Shanghai, China. *Science of The Total Environment*, 744-753. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2015.11.159>
- Kanwal, S., Ding, X., Wu, S., & Sajjad, M. (2022). Vertical ground displacements and its impact on erosion along the Karachi coastline, Pakistan. *Remote Sensing*, 14(9), 2054. <https://doi.org/10.3390/rs14092054>
- Khan, S. D., Faiz, M. I., Gadea, C. A., & Ahmad, A. (2023). Study of land subsidence by radar interferometry and hot spot analysis techniques in the Peshawar Basin, Pakistan. *The Egyptian Journal of Remote Sensing and Space Science*, 26(1), 173-184. <https://doi.org/10.1016/j.ejrs.2023.02.001>
- Lu, C., Zhu, L., Li, X., Gong, H., Du, D., Wang, H., & Teatini, P. (2022). Land subsidence evolution and simulation in the western coastal area of Bohai Bay, China. *Journal of Marine Science and Engineering*, 10(10), 1549. <https://doi.org/10.3390/jmse10101549>
- Malik, K., Kumar, D., Perissin, D., & Pradhan, B. (2022). Estimation of ground subsidence of New Delhi, India using PS-InSAR technique and multi-sensor radar data. *Advances in Space Research*, 69(4), 1863-1882. <https://doi.org/10.1016/j.asr.2021.08.032>
- Miler, M. M., & Shirazaei, M. (2019). Land subsidence in Houston correlated with flooding from Hurricane Harvey. *Remote Sensing of Environment*, 225, 368-378. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2019.03.022>

- Mohammad Khan, S., Ganjaeian, H., Garosi, L., & Zanganetabar, Z. (2020). Assessing the impact of groundwater drop on the subsidence rate using the Sentinel-1 Radar images - Case study: Qorveh Plain. *Scientific- Research Quarterly of Geographical Data (SEPEHR)*, 28(112), 219-229. [in Persian] <https://doi.org/10.22131/sepehr.2020.38617>
- Mohammadi Dehcheshme, M., & Ebrahimi, A. (2026). Evaluation of the Amount of Subsidence of the Urban Area and Urban Periphery of Jahrom using Radar Interferometric Method. *Geography and Development*, 24(82), 193-210. [in Persian] <https://doi.org/10.22111/gdij.2025.50205.3692>
- Mokhtari, D., Rezaei Moghadam, M. H., & Dortaj, D. (2024). Evaluation of the tectonic status of the sub-basins of Fars province (from evaz to Karmostaj) using geomorphic indicators and SBAS time series method. *Quantitative Geomorphological Research*, 13(1), 50-63. [in Persian] <https://doi.org/10.22034/gmpj.2024.422974.1461>
- Navarro-Hernández, M. I., Valdes-Abellan, J., Tomás, R., Tessitore, S., Ezquerro, P., & Herrera, G. (2023). Analysing the Impact of Land Subsidence on the Flooding Risk: Evaluation Through InSAR and Modelling. *Water Resources Management*, 37(11), 4363-4383. <https://doi.org/10.1007/s11269-023-03561-6>
- 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>
- 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. [in Persian] <https://doi.org/10.22067/geoh.2026.97067.1633>
- Roostaei, S., Rezaei Moghaddam, M. H., Yarahmadi, G., & Najafvand, S. (2023). Investigation of land subsidence risk areas due to groundwater level drop using FUZZY-AHP method (Case study: Shabestar-Soufian plain). *Quantitative Geomorphological Research*, 12(3), 35-58. [in Persian] <https://doi.org/10.22126/ges.2022.6909.2446>
- Rygu, M., Bianchi, M., Novellino, A., Hussain, E., Taufiq, A., Rusli, S. R., ... & Meisina, C. (2025). Permanent aquifer storage loss from long-term groundwater withdrawal: A case study of subsidence in Bandung (Indonesia). *Journal of Hydrology: Regional Studies*, 57, 102129. <https://doi.org/10.1016/j.ejrh.2024.102129>
- Shankar, H., Singh, D., & Chauhan, P. (2024). Investigation of groundwater-induced land subsidence in Ludhiana City using InSAR and Sentinel-1 data. *Quaternary Science Advances*, 13, 100151. <https://doi.org/10.1016/j.qsa.2023.100151>
- Sheng, H., Zhou, L., Huang, C., Ma, S., Xian, L., Chen, Y., & Yang, F. (2023). Surface subsidence characteristics and causes in Beijing (China) before and after COVID-19 by Sentinel-1A TS-InSAR. *Remote Sensing*, 15(5), 1199. <https://doi.org/10.3390/rs15051199>
- Shi, X., Chen, C., Dai, K., Deng, J., Wen, N., Yin, Y., & Dong, X. (2022). Monitoring and Predicting the Subsidence of Dalian Jinzhou Bay International Airport, China by Integrating InSAR Observation and Terzaghi Consolidation Theory. *Remote Sensing*, 14(10), 2332. <https://doi.org/10.3390/rs14102332>
- Tang, Z., Ning, R., Wang, D., Tian, X., Bi, X., Ning, J., ... & Luo, F. (2024). Projections of land use/cover change and habitat quality in the model area of Yellow River Delta by coupling land subsidence and sea level rise. *Ecological Indicators*, 158, 111394. <https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2023.111394>
- Ullah, I., Chen, Z., Hussain, M. A., Shah, S. U., & Ali, N. (2025). Hybrid machine learning and SBAS-InSAR integration for landslide susceptibility mapping along the Balakot-Naran Route, Pakistan. *Remote Sensing*, 17(20), 3464. <https://doi.org/10.3390/rs17203464>
- Wang, H., Jia, C., Ding, P., Feng, K., Yang, X., & Zhu, X. (2022). Analysis and Prediction of Regional Land Subsidence with InSAR Technology and Machine Learning Algorithm. *Civil Engineering*, 25, 782-793. <https://doi.org/10.1007/s12205-022-1067-4>
- Wang, Y., Gong, H., Zhou, C., Wang, Q., Wang, H., & Zhang, J. (2025). Decomposition and attribution analysis of the coupled evolution characteristics of groundwater and land subsidence in the Beijing-Tianjin-Hebei Plain. *Journal of Hydrology: Regional Studies*, 59, 102393. <https://doi.org/10.1016/j.ejrh.2025.102393>

- Yastika, P. E., Shimizu, N., & Abidin, H. Z. (2019). Monitoring of long-term land subsidence from 2003 to 2017 in coastal area of Semarang, Indonesia by SBAS DInSAR analyses using Envisat-ASAR, ALOS-PALSAR, and Sentinel-1A SAR data. *Advances in Space Research*, 63(5), 1719-1736. <https://doi.org/10.1016/j.asr.2018.11.008>
- Zangenehtabar, S., Yamani, M., Sharifikia, M., Hoseini, S. M., & Amighpey, M. (2025). Using the PS-InSAR Technique to Assess the Impacts of Land Subsidence on Road Bridges in Southwest Tehran. *Journal of Geography and Environmental Hazards*, 14(4), 1-20. [in Persian] <https://doi.org/10.22067/geoeh.2025.93735.1575>
- Zhao, Q., Ma, G., Wang, Q., Yang, T., Liu, M., Gao, W., ... & Pepe, A. (2019). Generation of long-term InSAR ground displacement time-series through a novel multi-sensor data merging technique: The case study of the Shanghai coastal area. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 154, 10-27. <https://doi.org/10.1016/j.isprsjprs.2019.05.005>
- Zhu, M., Yu, X., Tan, H., Yuan, J., Chen, K., Xie, S., ... & Long, W. (2020). High-precision monitoring and prediction of mining area surface subsidence using SBAS-InSAR and CNN-BiGRU-attention model. *Scientific Reports*, 14, 28968. <https://doi.org/10.1038/s41598-024-80446-7>