Iranian Journal of Rainwater Catchment Systems
Online ISSN: 1531-2783 Print ISSN: 5970-2423

# Evaluating the rate of subsidence of the Samalghan Plain using radar interferometry

**Ebrahim Amiri[1], Mohammad Motamedi Rad[*2], Ali Sadeghi[3], Farzad Amiri[4]**

1. Assistant Professor, Department of Geography Education, Farhangian University, Tehran, Iran, Email: Dr.amiri@cfu.ac.ir
2. Assistant Professor, Department of Geography Education, Farhangian University, Tehran, Iran, Email: m.motamedirad@cfu.ac.ir
3. Associate Professor of Humanities and Social Sciences Department, Farhangian University of Tehran, Iran, Email: a.sadeghi@cfu.ac.ir
4. Former M.Sc. Student, Bojnourd Branch, Islamic Azad University, Bojnourd, Iran. Email: Faarzaad.amiirii@gmail.com

**ARTICLE INFO**

**Article type:**
Research Paper

**Article history**
**Received:** 27 April 2025
**Revised:** 30 May 2025
**Accepted:** 10 June 2025
**Published online:** 05 August 2025

**Keywords:**
Radar, Semlghan, Sentinel, Subsidence, SNAP.

**ABSTRACT**

Subsidence can have many negative effects on infrastructure, the environment, and ecosystems. Therefore, an accurate and complete understanding of subsidence is essential to reduce the damage caused by the subsidence phenomenon. This research aimed to assess the subsidence rate of the Samalghan Plain using radar interferometry during the period from March 2021 to June 2024 using SNAP software. Ground data, such as piezometric wells and groundwater level drop rates during minimum and maximum periods, and exploitation wells, were used to calculate the discharge rate at the aquifer level using interpolation using the IDW method. The results of the study show that the subsidence rate in the study basin is within the desired range of 1 to 10 mm, and 35.18 percent of the basin area is in the very high critical zone and 36.88 percent is in the very critical zone, and in total, 72.06 percent of the study basin is in the very high critical and very critical subsidence zones. The subsidence rate in the very high critical zone is 4 to 10 mm, which indicates high subsidence rates in the south, center, west, and part of the north of the basin. The wells of Hyderabad-Ghale Khan Road, Mulla Hassan, Bagh Nodeh, and Ebtedaye Ghori are located in the very high critical zone. Due to its specific geological characteristics and excessive exploitation of groundwater resources, the Samalghan Plain is at risk of subsidence. To manage this phenomenon, it is necessary to take measures such as sustainable management of groundwater resources, reducing excessive groundwater extraction, artificially feeding aquifers, and carefully monitoring the water table and examining hydrogeological changes in the region to help control subsidence and prevent its increase.

Citation: Amiri, E., Motamedirad, M., Sadeghi, A., & Amiri, F. (2025). Evaluating the rate of subsidence of the Samalghan Plain using radar interferometry. *Iranian Journal of Rainwater Catchment Systems*, 13(2), 61-82.
**DOR:** 20.1001.1.24235970.1404.13.2.3.5

**Publisher:** Iranian Rainwater Catchment Systems Association
© Author(s)

* **Corresponding author:** Mohammad Motamedi Rad
**Address:** Department of Geography Education, Farhangian University, Tehran, Iran
**Tel:** +989154842105
**Email:** m.motamedirad@cfu.ac.ir

[ Downloaded from jircsa.ir on 2026-10-31 ]
[ DOR: 20.1001.1.24235970.1404.13.2.3.5 ]

Iranian Journal of Rainwater Catchment Systems
Online ISSN: 1531-2783 Print ISSN: 5970-2423

# Evaluating the rate of subsidence of the Samalghan Plain using radar interferometry

**Ebrahim Amiri[1], Mohammad Motamedi Rad[2], Ali Sadeghi[3], Farzad Amiri[4]**

1. Assistant Professor, Department of Geography Education, Farhangian University, Tehran, Iran, Email: Dr.amiri@cfu.ac.ir
2. Assistant Professor, Department of Geography Education, Farhangian University, Tehran, Iran, Email: m.motamedirad@cfu.ac.ir
3. Associate Professor of Humanities and Social Sciences Department, Farhangian University of Tehran, Iran, Email: a.sadeghi@cfu.ac.ir
4. Former M.Sc. Student, Bojnourd Branch, Islamic Azad University, Bojnourd, Iran. Email: Faarzaad.amiirii@gmail.com

## EXTENDED ABSTRACT

**Introduction:** Land subsidence is the gradual lowering of the land surface on a large scale, typically caused by human activities, such as excessive groundwater extraction, or naturally occurring due to geological factors. The most important cause of regional land subsidence in sedimentary watersheds of arid and semi-arid regions is the depletion of groundwater aquifers due to excessive pumping from these sources. This situation is particularly acute where indiscriminate pumping of porous sand aquifers, which are interbedded with water layers, causes extensive subsidence in impermeable clayey ground. For accurate subsidence monitoring, the use of radar images, especially the InSAR technique, is recognized as one of the most powerful tools. Radar images of this technique allow the measurement of changes in the ground surface with millimeter accuracy. Meanwhile, the Samalghan Plain has also suffered from drought, and subsidence is observed on a large scale. Therefore, this study was selected to analyze the time series of subsidence of the Samalghan Plain using the radar interferometry method.

**Methodology:** First, the boundary of the studied watershed was determined using Google Earth software and 1:50,000 topographic maps. The mesa curves and waterways were digitized using ArcGIS software, and topographic information such as elevation levels and topographic slopes was extracted. To extract geological information of the region, 1:100,000 geological sheets were used. The method of work in this research is analytical and field-based. In this research, ground data such as piezometric wells and groundwater level drop rate in the minimum and maximum periods, and exploitation wells were used to calculate the discharge rate at the aquifer level using interpolation using the IDW method. Additionally, radar data, including Sentinel-1 images, were used to calculate the subsidence rate for the period from March 2021 to June 2024.

**Results and Discussion:** Using piezometric data for the period March to June 2021, September to December 2021, March to June 2022, September to December 2022, March to June 2023, September to December 2023, March to June 2024, water level zoning was carried out and evaluated based on regional water data of North Khorasan using the IDW method. The results show that the groundwater level has decreased in different years, so that the wells of Ghori Meydan, Molla Hassan, Ghazi 2, and along the Ghare Mosala road have the highest groundwater decrease during March 2021 to June 2024, respectively equal to -10, -7.7, -7.1, and -5.3, which can lead to subsidence. The land subsidence was calculated during the mentioned periods, and then the rate of subsidence growth in the final subsidence (March 2021 to June 2024) was examined, and its zoning was achieved.

**Conclusion:** Using SNAP software, the subsidence rate in the study watershed was determined in the desired range from 1 to 10 mm. Based on the studies conducted, 35.18 percent of the watershed area is in the very high critical zone and 36.88 percent is in the very critical zone, and a total of 72.06 percent of the study watershed is in the very high critical and very critical subsidence zones. The rate of subsidence in the very critical zone is 4 to 10 mm, which shows this high rate of subsidence in the south, center, west, and part of the north of the watershed. By examining the trend of groundwater level changes in the Samalghan plain, it can be said that the subsidence in this plain has been affected by groundwater changes and excessive extraction from the aquifer of this plain. The highest amount of subsidence occurred in the center and north of the watershed in the Samalqan Plain aquifer, excavated in the terrace deposits and new low-lying foothill alluvial fans (the largest percentage of area in the watershed), and the Upper Red Formation. Also, in the west of the watershed, the Tirgan, Mozduran, and Shurijeh formations have accounted for a large amount of subsidence. It can be stated that the Samalghan Plain is at risk of subsidence due to its specific geological characteristics and excessive exploitation of groundwater resources. To manage this phenomenon, it is necessary to take measures such as sustainable management of groundwater resources, reducing excessive groundwater extraction, artificially feeding aquifers, and careful monitoring of the

[ Downloaded from jircsa.ir on 2026-10-31 ]

[ DOR: 20.1001.1.24235970.1404.13.2.3.5 ]

ISSN (Online): 2783-1531 - ISSN (Print): 2423-5970

water table and examining hydrogeological changes in the region to help control subsidence and prevent its increase.

## Ethical Considerations

**Data availability statement:** The datasets are available upon a reasonable request to the corresponding author.
**Funding:** No funding was received
**Authors' contribution:** As the authors of the paper, we conducted all parts of the research and wrote the whole manuscript.
**Conflicts of interest:** The authors of this paper declared no conflict of interest regarding the authorship or publication of this article.
**Acknowledgment:** The authors of this article would like to thank the North Khorasan Regional Water Company for providing water resources data.

[ Downloaded from jircsa.ir on 2026-10-31 ]
[ DOR: 20.1001.1.24235970.1404.13.2.3.5 ]

Iranian Journal of Rainwater Catchment Systems
مجله علمی سامانه‌های سطوح آبگیر باران ایران
شاپا الکترونیکی: ۲۷۸۳-۱۵۳۱ شاپا چاپی: ۲۴۲۳-۵۹۷۰

# ارزیابی میزان فرونشست دشت سملقان با استفاده از روش تداخل‌سنجی راداری

**ابراهیم امیری[۱]، محمد معتمدی راد[۲]، علی صادقی[۳] و فرزاد امیری[۴]**

۱. استادیار، گروه آموزش جغرافیا، دانشگاه فرهنگیان، تهران، ایران. Dr.amiri@cfu.ac.ir
۲. استادیار، گروه آموزش جغرافیا، دانشگاه فرهنگیان، تهران، ایران. m.motamedirad@cfu.ac.ir
۳. دانشیار، گروه علوم انسانی و اجتماعی، دانشگاه فرهنگیان، تهران، ایران. a.sadeghi@cfu.ac.ir
۴. دانش‌آموخته کارشناسی ارشد، دانشگاه آزاد اسلامی واحد بجنورد، ایران. Faarzaad.amiirii@gmail.com

**مشخصات مقاله**

**نوع مقاله:**
پژوهشی

**تاریخچه مقاله**
**دریافت:** ۰۷ اردیبهشت ۱۴۰۴
**بازنگری:** ۰۹ خرداد ۱۴۰۴
**پذیرش:** ۲۰ خرداد ۱۴۰۴
**انتشار برخط:** ۱۴ مرداد ۱۴۰۴

**واژه‌های کلیدی:**
رادار، سملقان، سنتینل، فرونشست، SNAP.

**چکیده**

فرونشست می‌تواند اثرات منفی زیادی بر زیرساخت‌ها، محیط زیست و اکوسیستم‌ها بگذارد. لذا درک دقیق و کامل فرونشست جهت کاهش خسارات ناشی از پدیده فرونشست ضروری است. این پژوهش با هدف ارزیابی میزان فرونشست دشت سملقان با استفاده از روش تداخل‌سنجی راداری در بازه زمانی مارس ۲۰۲۱ تا ژوئن ۲۰۲۴ با استفاده از نرم افزار SNAP انجام شده است. از داده‌های زمینی نظیر چاه‌های پیزومتریک و میزان افت آب زیرزمینی سطح آب زیرزمینی در دوره‌های حداقل و حداکثر و چاه‌های بهره‌برداری جهت محاسبه میزان تخلیه در سطح آبخوان با استفاده از درونیابی به روش IDW استفاده شد. نتایج حاصل از پژوهش نشان می‌دهد میزان فرونشست در حوضه مطالعاتی از ۱ تا ۱۰ میلی‌متر در بازه مورد نظر بوده و ۳۵/۱۸ درصد از مساحت حوضه در پهنه خیلی زیاد بحرانی و ۳۶/۸۸ درصد در پهنه خیلی بحرانی قرار گرفته است و در مجموع ۷۲/۰۶ درصد از حوضه مطالعاتی در پهنه فرونشست خیلی زیاد بحرانی و خیلی بحرانی است. میزان فرونشست در پهنه خیلی زیاد بحرانی از ۴ تا ۱۰ میلی‌متر است که این میزان بالای فرونشست را در جنوب، مرکز، غرب و بخشی از شمال حوضه را نشان می‌دهد. چاه‌های جاده حیدرآباد- قلعه خان، ملاحسن، باغ نوده و ابتدای قوری در پهنه خیلی زیاد بحرانی قرار گرفته‌اند. دشت سملقان به‌دلیل ویژگی‌های زمین شناسی خاص و بهره‌برداری بی‌رویه از منابع آب زیرزمینی، در معرض خطر فرونشست قرار گرفته که برای مدیریت این پدیده، لازم است اقداماتی نظیر مدیریت پایدار منابع آب زیرزمینی، کاهش برداشت بی‌رویه آب‌های زیرزمینی، تغذیه مصنوعی آبخوان‌ها و پایش دقیق سطح ایستابی آب و بررسی تغییرات هیدروژئولوژیکی منطقه انجام شود تا به کنترل فرونشست و جلوگیری از افزایش آن کمک کند.

**استناد:** (۱۴۰۴). امیری، ابراهیم، معتمدی راد، محمد، صادقی، علی و امیری، فرزاد (۱۴۰۴). ارزیابی میزان فرونشست دشت سملقان با استفاده از روش تداخل‌سنجی راداری، *سامانه‌های سطوح آبگیر باران*، ۱۳(۲)، ۶۱-۸۲.

**DOR:** 20.1001.1.24235970.1404.13.2.3.5

ناشر: انجمن علمی سیستم‌های سطوح آبگیر باران ایران

© نویسندگان

* **نویسنده مسئول:** محمد معتمدی راد
**نشانی:** گروه آموزش جغرافیا، دانشگاه فرهنگیان، تهران، ایران.
**تلفن:** ۰۹۱۵۴۸۴۲۱۰۵
**پست الکترونیکی:** m.motamedirad@cfu.ac.ir

[ Downloaded from jircsa.ir on 2026-10-31 ]
[ DOR: 20.1001.1.24235970.1404.13.2.3.5 ]

## مقدمه

رشد جمعیت و افزایش نیاز به آب های زیرزمینی موجب استخراج بی رویه این منابع شده است. یکی از مشکلات مهم در ارتباط با برداشت بی‌رویه آب از سفره‌های آب زیرزمینی افت سطح آب و متراکم شدن لایه‌ها و رسوبات است. استخراج بی‌رویه به حالتی اطلاق می‌شود که طی چند سال، میانگین میزان برداشت، از میانگین میزان تغذیه و ورودی به منبع مورد نظر بیش‌تر باشد (رفیعی و همکاران، ۱۳۹۹). این پدیده باعث نشست سطح زمین به‌صورت ناگهانی (در سفره‌های ماسه‌ای) و یا به‌طور تدریجی (در سفره‌های رسی) می‌شود (لشگری پور و همکاران، ۱۳۸۴).

فرونشست زمین به کاهش تدریجی سطح زمین در مقیاس وسیع گفته می‌شود که معمولاً به‌دلیل فعالیت‌های انسانی، مانند برداشت بی‌رویه آب‌های زیرزمینی، یا به‌طور طبیعی به‌دلیل عوامل ژئولوژیکی رخ می‌دهد (Galloway et al., 2000). طبق تعریف سازمان زمین شناسی ایالت آمریکا، پدیده فرونشست زمین شامل فروریزش یا نشست رو به پایین سطح زمین است که می‌تواند دارای بردار جابه‌جایی اندکی باشد (Bats & Jacson,1980؛ USGS, 2011 ؛ شفیعی و همکاران، ۱۳۹۹؛ گودرزی و همکاران، ۱۴۰۴). مهم‌ترین علت فرونشست منطقه‌ای سطح زمین در حوضه‌های رسوبی مناطق خشک و نیمه خشک، تراکم سفره های آب زیرزمینی در اثر پمپاژ بی‌رویه از این منابع است (Pacheco et al, 2006). این وضعیت به‌ویژه در جایی که پمپاژ بی‌رویه از سفره‌های آب‌دار ماسه‌ای متخلخل که به‌صورت بین لایه‌ای با لایه‌های آب، مقدار فرونشست در زمین رسی نفوذناپذیر قرار دارد، بسیار حاد بوده و موجب فرونشست گسترده می‌شود (Liu et al, 2006). به‌دلیل تدریجی بودن فرونشست و ایجاد خسارت‌های جبران ناپذیر این پدیده را زلزله خاموش می‌نامند (اکبری و همکاران، ۱۴۰۲). فرونشست می‌تواند اثرات منفی زیادی بر زیرساخت‌ها، محیط زیست و اکوسیستم‌ها بگذارد. در دهه‌های اخیر، فرونشست به یک نگرانی جدی در بسیاری از مناطق دنیا تبدیل شده است، به‌ویژه در مناطقی که از منابع آب زیرزمینی برای مصارف کشاورزی و شهری استفاده می‌کنند.

برای اندازه‌گیری فرونشست زمین روش‌های مختلف ژئودتیک و غیر ژئودتیک مانند استفاده (GPS)، توتال استیشن، لیزر اسکنر وجود دارد. ایستگاه‌های *GPS* اندازه‌گیری‌های دقیق و پیوسته‌ای را در نقاط محدودی از نواحی فرونشست می‌دهند (Lanari et al., 2004؛ کیانی و همکاران، ۱۴۰۳). بنابراین آن‌ها توانایی تعیین وسعت و الگوی فرونشست را ندارند. روش تداخل‌سنجی راداری (InSAR) نیز در سال‌های اخیر به‌عنوان یکی از روش‌های غیر ژئودتیک با توجه به مزایایی که نسبت به دیگر روش‌ها دارد، بسیار مورد توجه قرار گرفته است. این روش در میان روش‌های زمینی و فضایی به‌عنوان کارآمدترین روش برای اندازه‌گیری تغییرات سطح زمین با دقت و قدرت تفکیک مکانی بسیار بالا به شمار می‌رود (Crosetto et al., 2002). لذا برای پایش دقیق فرونشست، استفاده از تصاویر راداری به‌ویژه تکنیک InSAR[1] به‌عنوان یکی از قدرتمندترین ابزارها شناخته می‌شود. تصاویر راداری این تکنیک امکان اندازه‌گیری تغییرات سطح زمین با دقت میلی‌متری را فراهم می‌کنند. این داده‌ها از ماهواره‌هایی مانند Sentinel-1 و RADARSAT جمع‌آوری می‌شوند و می‌توانند تغییرات سطحی زمین را در مقیاس زمانی و مکانی وسیعی ثبت کنند (Joughin et al., 1998). این قابلیت‌ها به محققان کمک می‌کنند تا به‌طور مؤثری روند فرونشست را پایش کرده و اطلاعات دقیقی در مورد سرعت و شدت این پدیده در اختیار داشته باشند.

با توجه به اهمیت موضوع، مطالعاتی توسط محققین داخلی و خارجی در این زمینه صورت پذیرفته است که به تعدادی از آن‌ها اشاره می‌شود: Faunt و همکاران (۲۰۱۵) در مقاله خود تحت عنوان دستیابی به آب و فرونشست زمین در دره مرکزی کالیفرنیا، به نقش افزایش برداشت آب زیرزمینی در اثر کشاورزی پرداخته است. در این منطقه که یکی از قطب‌های کشاورزی آمریکا است کشاورزان برای آبیاری زمین های خود تا قبل از خشکسالی ۲۰۰۷ بیش‌تر از آب‌های سطحی استفاده می‌کرده اما بعد از آن پمپاژ بیش‌تری از آب‌های زیرزمینی به عمل آورده‌اند. به‌طوری‌که ۲/۳ از مساحت دره کلا با آب زیرزمینی آبیاری می‌شد، این پمپاژ بیش از حد موجب افت سطح آب شده و در نتیجه بیلان سیستم آبخوان بهم خورده و موجب فرونشینی شده است. مدل‌های هیدرولوژیکی استفاده شده در ارزیابی مدیریت سطح آب زیرزمینی در این منطقه نیمه خشک نشان داد که تداوم خشکسالی بعد از سال ۲۰۰۷ می توانست موجب فرونشینی در حد ۳-۱/۵ سانتی‌متر در سمت جنوب دره شود. Agustan و همکاران (۲۰۱۶) به ارزیابی جابه‌جایی زمین در جاکارتا از طریق تجزیه و تحلیل داده‌های راداری پرداختند. نتایج تحقیق نشان داد که در این منطقه در ماه نوامبر ۲۰۱۵ تا سپتامبر ۲۰۱۶ حدود ۱۲ سانتی‌متر فرونشست داشته است. Smith و همکاران (۲۰۱۷) در تحقیق خود به‌عنوان برآورد از دست دادن دائمی ذخایر آب زیرزمینی در دره سن ژوآکوین[2] کالیفرنیا عنوان کردند اگر آب بیش از حد از آبخوان‌ها استخراج شود، مخصوصا در نواحی که لایه‌های خاک رس دارند، متراکم شدن لایه‌های خاک به‌دلیل افت فشار آب باعث ایجاد حالت غیرقابل برگشت می‌شود و توانایی خاک برای حفظ و نفوذ آب از دست می‌رود، از این‌رو آبخوان ظرفیت دریافت آب خود را به

[1] Interferometric Synthetic Aperture Radar
[2] San Joaquin

[ Downloaded from jircsa.ir on 2026-10-31 ]
[ DOR: 20.1001.1.24235970.1404.13.2.3.5 ]

طور دائم از دست می‌دهد. Zhao و همکاران (۲۰۱۹) با استفاده از روش تداخل‌سنجی راداری، میزان فرونشست سالانه زمین در منطقه ساحلی شانگهای چین را حدود ۳۰ میلی‌متر محاسبه کرده‌اند. Khan و همکاران (۲۰۲۲) به بررسی فرونشست زمین در شهر اسلام آباد پاکستان با استفاده از تصاویر راداری سنتینل ۱ پرداختند و میزان فرونشست در سال ۲۰۱۹ را ۶۹- میلی‌متر و در سال ۲۰۲۰ را ۹۸- میلی‌متر برآورد کردند. Shankar و همکاران (۲۰۲۴) به بررسی فرونشست زمین ناشی از آب‌های زیرزمینی در شهر لودیانا با استفاده از داده‌های InSAR و Sentinel1 پرداختند. آن‌ها ۱۹۷ تداخل‌گرا از ۶۵ تصویر Sentinel-A که در گذر نزولی بین سپتامبر ۲۰۱۹ تا ژوئیه ۲۰۲۲ برای استخراج سری‌های زمانی جابه‌جایی خط دید رادار (LOS) و میانگین سرعت LOS ایجاد نمودند. نتایج تغییر شکل نشان داد که بخش‌های جنوبی و جنوب شرقی شهر با میانگین نرخ فرونشست ۲۴/۷ میلی‌متر در سال به‌طور پیوسته به سمت پایین حرکت کرده‌اند، درحالی‌که در غرب، چند لکه کوچک در مناطق شرقی و شمالی بین ۲ تا ۲۱ میلی‌متر متغیر است. مقایسه کلی اندازه‌گیری‌های InSAR و GWL مطابقت خوبی دارد و به‌طور قابل‌توجهی همبستگی دارد، که می‌تواند اطلاعات کافی دقیق در مورد LS ارائه دهد.

حاجب و همکاران (۱۳۹۸) با استفاده از داده‌های ماهواره ENVISAT و به کمک تکنیک تداخل سنجی رادار دهانه مصنوعی، نرخ فرونشست سالانه زمین در دشت‌های جعفرآباد و قنوات استان قم را بررسی کردند و با استفاده از تغییرات تراز آب چاه‌های پیزومتری منطقه و مشاهده نمودارهای هیدروگراف واحد دشت‌ها، ارتباط تغییرات مکانی نرخ فرونشست در نقاط مختلف آبخوان با برداشت بی‌رویه آب زیرزمینی را بررسی و تائید کردند. شفیعی و همکاران (۱۳۹۹) در پژوهشی تحت عنوان بررسی فرونشست آبخوان دشت نورآباد با استفاده از روش تداخل‌سنجی راداری که با استفاده از نرم‌افزار SNAP انجام داده و از داده‌های سنتینل 1A در بازه زمانی ۲۰۱۵ تا ۲۰۱۸ استفاده نموده و نتیجه گرفتند که ارتباط مستقیم بین افت و میزان فرونشست وجود دارد. هم‌چنین با استفاده از نقشه‌های حاصل از فرونشست نشان دادند که نرخ نشست در هر سال میانگین ۴ سانتی‌متر و طی بازه زمانی ۴ ساله حدود ۱۶ سانتی‌متر است. آقایاری و همکاران (۱۴۰۱) در بررسی فرونشست دشت اردبیل از سال ۲۰۱۶ تا ۲۰۲۰ میزان فرونشست در مدت ۵ سال را ۲۲ سانتی‌متر برآورد کرده‌اند و بیان داشتند که بیش‌ترین میزان پراکندگی فرونشست در حوالی چاه‌هایی که افت سطح آب به‌دلیل مصرف بالای کشاورزی داشته‌اند، رخ داده است. رفیعی و همکاران (۱۴۰۲) به مطالعه تداخل‌سنجی تفاضلی راداری از داده‌های پایین گذر ماهواره سنتینل ۱ در بازه زمانی ۲۰۲۰-۲۰۱۴ پرداختند. هم‌چنین برای پایش تغییرات پوشش گیاهی از داده‌های ماهواره لندست – ۸ در دشت سملقان و بررسی رفتار متقابل آبخوان استفاده نمودند. با استفاده از داده چاه‌های پیزومتری دشت نقشه‌های هم افت آب زیرزمینی و با استفاده از سیستم اطلاعات جغرافیایی، ارتباط افت سطح آب زیرزمینی با فرونشست تحلیل شد. نقشه‌های حاصله نشان‌دهنده ارتباط مستقیم افت آب با فرونشست در آبخوان سملقان در بازه زمانی مورد مطالعه بود. حداکثر فرونشست در این دشت در سال ۲۰۱۹ مقدار بیشینه ۳۴ سانتی‌متر داشته و حداقل ۱۸ سانتی‌متر در سال‌های ۲۰۱۵ و ۲۰۱۸ برآورد شد. در نهایت ارتباط افت سطح آب زیرزمینی با فرونشست منطقه مورد مطالعه قرار گرفت و رفتار آبخوان بررسی شد. نتایج نشان دهنده رفتار الاستیک زمین در آبخوان سملقان و اطراف شهرستان چمن بید بود. هم‌چنین با پردازش تصاویر لندست برای سال‌های ۲۰۲۰-۲۰۱۵ ارتباط زمانی-مکانی تغییرات پوشش گیاهی با فرونشست مطالعه شد. زنگنه اسدی و همکاران (۱۴۰۲) به بررسی نوع کشت در میزان فرونشست حوضه آبریز نورآباد از روش‌های تداخل‌سنجی راداری، ماشین بردار پشتیبان و رگرسیون فضایی پرداخته و نشان دادند که بیش‌ترین میزان فرونشست زمین در مناطقی که به کشت انواع برنج اختصاص یافته به حداکثر میزان حدود ۱۰سانتی‌متر در سال رسیده است. هم‌چنین نتایج حاصل از الگو کشت و ارتباط آن با فرونشست زمین نشان از وجود همبستگی مثبت ضریب R2 برابر ۰/۹۰ و کم‌ترین میزان خطا حدود ۰/۰۰۱ را به خود اختصاص داد. معتمدی‌راد و همکاران (۱۴۰۴) در پژوهشی که با هدف تحلیل سری زمانی فرونشست دشت اسفراین با استفاده از روش تداخل‌سنجی راداری انجام دادند، از داده‌های زمینی نظیر چاه‌های پیزومتریک و میزان افت آب زیرزمینی سطح آب زیرزمینی در دوره‌های حداقل و حداکثر و چاه‌های بهره‌برداری جهت محاسبه میزان تخیله در سطح آبخوان با استفاده از درونیابی به روش IDW[1] استفاده نمودند. هم‌چنین از داده‌های راداری شامل تصاویر سنتینل ۱ جهت محاسبه نرخ فرونشست در بازه زمانی ۸ ماهه اول سال ۲۰۲۳ میلادی استفاده کردند. نتایج حاصل از پژوهش آنان نشان داد میزان فرونشست در حوضه مطالعاتی از ۱ تا ۱۲ میلی‌متر در بازه ۸ ماهه بوده و ۷۵/۲ درصد از مساحت حوضه در پهنه متوسط بحرانی و خیلی بحرانی قرار گرفت که بر این اساس می‌توان اذعان نمود که دشت اسفراین در حالت بحرانی قرار گرفته است. گودرزی و همکاران (۱۴۰۴) رابطه بین فرونشست زمین و مصرف آب در دشت یزد-اردکان با استفاده از تصاویر سنتینل ۱ از ۴ تصویر CLC باند C ماهواره سنتینل ۱ و روش تداخل‌سنجی تفاضلی راداری مقدار فرونشست در سال‌های ۲۰۱۷ تا ۲۰۲۱ به‌دست آورده و با هم مقایسه نمودند. آنان نشان دادند مقدار بیشینه فرونشست در سال ۲۰۱۷ به میزان ۱۳ سانتی‌متر و در سال‌های ۲۰۲۰ و ۲۰۲۱ به میزان ۹ سانتی‌متر به‌دست آمد که این مقدار مربوط به منطقه شمسی در محدوده بین میبد و اردکان است. هم‌چنین برای

[1] Inverse distance weighting

[ Downloaded from jircsa.ir on 2026-10-31 ]

[ DOR: 20.1001.1.24235970.1404.13.2.3.5 ]

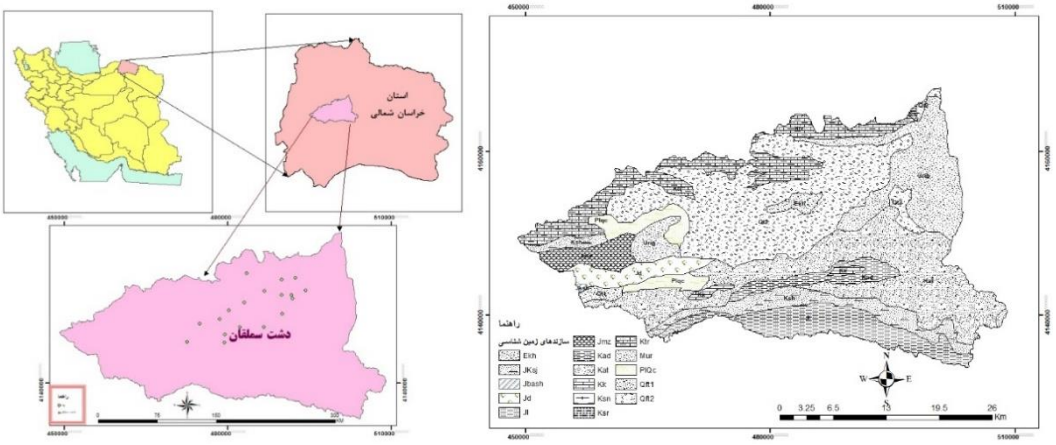
اطمینان از نتایج حاصل از تصاویر ماهواره‌ای به مقایسه آن‌ها با نتایج روش ترازیابی دقیق که توسط سازمان نقشه‌برداری کشور صورت گرفته بود، پرداخته شد. بر طبق نتایج بیان نمودند که تصاویر سنتینل از قابلیت خوبی برای تخمین میزان فرونشست برخوردار هستند.

با توجه به اهمیت موضوع هم‌چنین بر اساس گزارش رسمی اداره کل هواشناسی خراسان شمالی که حدود ۵۹ درصد از پهنه این استان ۲ میلیون و ۸۰۰ هزار هکتاری واقع در شمال شرق کشور درگیر خشکسالی و تحت تأثیر این پدیده است به‌طوری‌که بر اساس شاخص SPI (شاخص بارش استاندارد شده) در بازه ۱۰ ساله تا پایان اسفند ماه سال گذشته، بیش از نیمی از مساحت استان تحت تاثیر خشکسالی قرار دارد و ذکر این نکته که هم اکنون ۱۳/۱ درصد از گستره استان درگیر خشکسالی بسیار شدید، ۱۳/۹ درصد تحت تاثیر خشکسالی شدید، ۱۶/۱ درصد خشکسالی متوسط و ۱۵/۶درصد خشکسالی خفیف دارد و در این میان دشت سملقان نیز دچار خشکسالی گشته و فرونشست در آن در سطحی وسیع مشاهده می‌شود لذا این پژوهش با هدف تحلیل سری زمانی فرونشست دشت سملقان با استفاده از روش تداخل‌سنجی راداری انتخاب شد که طی آن نرخ فرونشست در در بازه زمانی مارس ۲۰۲۱ تا ژوئن ۲۰۲۴ محاسبه و در نهایت نرخ رشد نهایی تهیه شود. این رویکرد، دید دقیقی از تغییرات دینامیکی فرونشست و روند شدت‌گیری آن ارائه می‌دهد، که در مطالعات قبلی معمولاً تنها به بررسی یک یا دو دوره زمانی محدود شده‌اند. به‌عبارتی در مقاله حاضر در هر سال تصاویر دو دوره سه ماهه بررسی شده و پهنه‌بندی فرونشست را در هر دوره سه ماهه ( در سال دو دوره) انجام و نقشه پهنه‌بندی تهیه خواهد شد.

## مواد و روش تحقیق

### منطقه مورد مطالعه

دشت سملقان در شمال غرب بجنورد در محدوده در محدوده´۲۶ °۵۶ تا´۰۶ °۵۷ درجه طول شرقی و ´۱۵ °۳۷ تا´۳۵ °۳۷ درجه عرض شمالی واقع شده و یکی از زیر حوضه‌های حوزه آبخیز اترک و از توابع شهرستان آشخانه است. از نظر موقعیت نسبی این دشت در جنوب رشته کوه های آلاداغ شامل قله‌های یمن داغی و قورخود به‌ترتیب با ارتفاع ۲۴۵۵ و ۲۸۰۵ متر از سطح آب‌های آزاد قرار دارد. این دشت از سمت جنوب با کوه موسوم به دوچنگ با ارتفاع ۱۳۱۳ متر و دشت رسوبی مانه و رود اترک مجاور است. از سمت غرب با دشت قره میدان و از سمت شرق به حوضه آبخیز بدرانلو و دشت رسوبی- ساختاری بجنورد منتهی می شود. حوضه مذکور دارای مساحتی معادل ۱۱۴۸ کیلومتر است. از نظر ساختاری نیز در غرب ناحیه کپه داغ-هزار مسجد قرار دارد. از نظر وضعیت لیتولوژیکی بخش عمده ارتفاعات این دشت را سازندهای آهکی تیرگان تشکیل داده و محدوده دشت پوشیده از رسوبات دوران اخیر است. در حوضه مورد مطالعه تعداد ۱۶ واحد چینه سنگی و رسوبات کواترنری رخنمون یافته‌اند که به دوران اول، دوم و سوم تعلق دارند که شامل: سازند مزدوران (۲/۷۸ درصد)، خانگیران (۰/۸۹ درصد)، چمن‌بید (۳/۱۲ درصد)، شوریجه (۶/۸۸ درصد)، باشکلاته (۰/۷۹ درصد)، لار (۷/۹۱ درصد)، آب‌دراز (۲/۸۷ درصد)، آتامیر (۲۱/۹۳ درصد)، کلات (۴۲/۹۶ درصد)، سنگانه (۰/۰۰۱۰ درصد)، سرچشمه (۰/۱۱۶ درصد)، تیرگان (۱۰/۲۵ درصد)، قرمز بالایی (۱۲/۷۷ درصد)، کشف‌رود (۳/۶۰ درصد)، ذخایر تراسی و مخروط‌افکنه‌های کوهپایه‌ای قدیمی مرتفع (۰/۶۸ درصد) و ذخایر تراسی و مخروط‌افکنه‌های کوهپایه‌ای جدید کم ارتفاع (۲۵/۷۵ درصد) هستند. شکل ۱ موقعیت و نقشه زمین شناسی حوضه مطالعاتی را نشان می‌دهد.




**شکل ۱- موقعیت حوضه مورد مطالعه و نقشه زمین‌شناسی آن**

**Figure 1- Location of the study watershed and its geological map**

[ Downloaded from jircsa.ir on 2026-10-31 ]

[ DOR: 20.1001.1.24235970.1404.13.2.3.5 ]

## روش تحقیق

ابتدا مرز حوضه مورد مطالعه با استفاده از نرم افزار google Earth و نقشه‌های توپوگرافی ۱:۵۰۰۰۰ تعیین شد. خطوط منحنی میزان و آبراهه‌ها با استفاده از نرم افزار Arc GIS رقومی شد و اطلاعات توپوگرافی مانند سطوح ارتفاعی و شیب توپوگرافی استخراج شد. جهت استخراج اطلاعات زمین‌شناسی منطقه از برگه‌های ۱:۱۰۰۰۰۰ زمین‌شناسی استفاده شد. روش کار در این پژوهش تحلیلی و میدانی است. در این پژوهش از داده‌های زمینی نظیر چاه‌های پیزومتریک و میزان افت آب زیرزمینی سطح آب زیرزمینی در دوره‌های حداقل و حداکثر و چاه‌های بهره‌برداری جهت محاسبه میزان تخلیه در سطح آبخوان با استفاده از درون‌یابی به روش IDW استفاده شد. هم‌چنین جهت محاسبه نرخ فرونشست از داده‌های راداری شامل ۷ تصویر سنتینل ۱ با فرمت SLC[1] با حالت تصویربرداری IW[2]، پلارزاسیون: DV (شامل VV و VH)، مسیر عبور صعودی، زمان تصویربرداری حدود ساعت ۱۴:۱۱ به وقت UTC و وضوح مکانی حدود ۵ متر حدود ۵ متر (Range) و ۲۰ متر(Azimuth) در بازه زمانی مارس ۲۰۲۱ تا ژوئن ۲۰۲۴ میلادی استفاده شد.

### تداخل‌سنجی رادار

تداخل‌سنجی رادار دهانه ترکیبی یا InSAR یک فناوری دورسنجی است که به‌منظور مطالعه حرکات سطح زمین در زمین‌لرزه ۱۹۹۲ لندرز کالیفرنیا ابداع شد. InSAR برگرفته از Synthetic Aperture Radar Interferometry است که پس از این در این نوشتار با InSAR مطرح می‌شود. امروزه تداخل‌سنجی ماهواره‌ای (InSAR) به‌عنوان تکنیکی که جابه‌جایی سطح زمین را با دقت و توان تفکیک بالا برآورد می‌کند؛ ابزار متداولی برای بررسی تغییر شکل سطحی زمین در اثر عوامل مختلف از جمله فرونشست زمین است. در این روش با استفاده از دو تصویر ماهواره‌ای می‌توان یک اینترفروگرام تهیه کرد. به‌طوری که با به‌کارگیری ابزار اینترفرومتری فازهای سیگنال برگشتی از زمین، در دو تصویر ماهواره‌ای دارای تأخیر زمانی از یک منطقه، برای استخراج تغییرات سطح زمین از هم کم می‌شود. این اختلاف فاز می‌تواند شامل اثرات اتمسفری، توپوگرافی و مداری نیز باشد. بنابراین برای رسیدن به نتیجه دقیق‌تر در به‌دست آوردن نقشه تغییرات سطح زمین باید این عوامل شناخته و حذف شوند. بدین ترتیب با استفاده از تغییرات دینامیک یک منطقه اینترفروگرام تغییرات با دقتی در حدود میلی‌متر از چند تصویر ماهواره‌ای به‌دست می‌آید. به‌عبارت دیگر این روش از یک اینترفروگرام و اختلاف فاز بین دو تصویر ماهواره‌ای بازتابیده شده جهت اندازه‌گیری تغییرات سطح زمین که بین دو زمان برداشت تصاویر رخ داده، استفاده می‌کند و امکان اندازه‌گیری دقیق حرکت پوسته زمین را با استفاده از تصاویر ماهواره‌ای در پوشش وسیع فراهم می‌سازد (حداد و خراسانی، ۱۳۹۸).

### روش انجام کار جهت برآورد میزان فرونشست

برای انجام این مهم مراحل ذیل انجام شد:

۱- دانلود تصاویر از سایت ASF DATA search

الف- ورود شیپ فایل محدوده به نرم‌افزار qGIS

ب-ترسیم پلیگون ساده‌تر (دارای vertex کم‌تر) و گرفتن خروجی شیپ فایل

ج- انتخاب فریم‌های مناسب در سایت که محدوده را شامل شود. در این بخش فایل‌های زیر را خواهیم داشت:

S1A_IW_SLC__1SDV_20230102T141144_20230102T141211_046606_0595EA_84CE
S1A_IW_SLC__1SDV_20230420T141143_20230420T141210_048181_05CAF8_5473
S1A_IW_SLC__1SDV_20230420T141143_20230420T141210_048181_05CAF8_5473
S1A_IW_SLC__1SDV_20230806T141149_20230806T141216_049756_05FBA3_5598
S1A_IW_SLC__1SDV_20231017T141152_20231017T141219_050806_061F8D_1FDE
S1A_IW_SLC__1SDV_20231204T141150_20231204T141217_051506_06378D_079B
S1A_IW_SLC__1SDV_20231204T141150_20231204T141217_051506_06378D_079B
S1A_IW_SLC__1SDV_20240321T141148_20240321T141215_053081_066DC6_760D

مشخصات تصاویر مورد استفاده در جدول ۱ آمده است. برای هر زوج تصویر مراحل زیر انجام شد (شکل ۲).

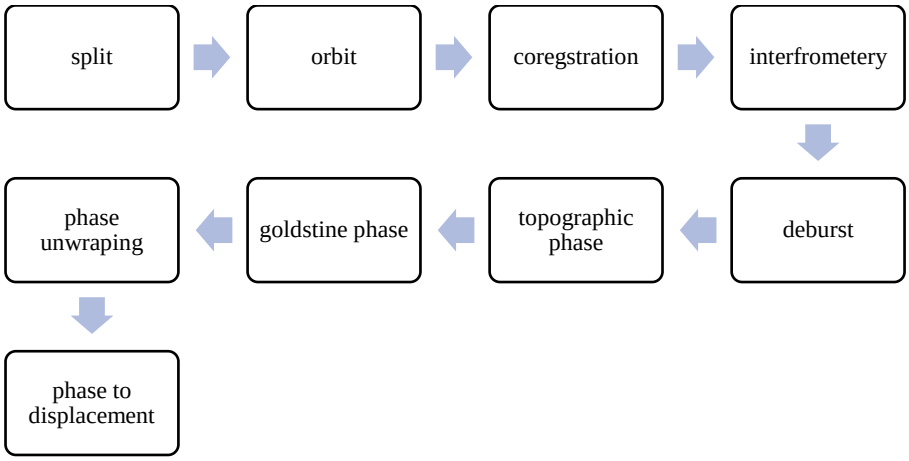
[1] Single Look Complex
[2] Interferometric Wide Swath

[ Downloaded from jircsa.ir on 2026-10-31 ]
[ DOR: 20.1001.1.24235970.1404.13.2.3.5 ]

**جدول ۱- مشخصات تصاویر راداری مورد استفاده**

**Table 1- Specifications of the radar images used**

| شماره | بازه زمانی تصویربرداری | فرمت تصویر | گذر تصویر |
|---|---|---|---|
| 1 | 2021_12_20 & 2021_09_27 | slc | صعودی |
| 2 | 2021-06-11 & 2021-03-19 | slc | صعودی |
| 3 | ۰۶2022_06_06 & 2022-03-18 | slc | صعودی |
| 4 | 2022_12_15 & 2022_09_10 | slc | صعودی |
| 5 | 2023-06-13 & 2023-03-09 | slc | صعودی |
| 6 | 2023-12-22 & 2023-09-29 | slc | صعودی |
| 7 | 2024-06-07 & 2024-03-15 | slc | صعودی |




**شکل ۲- مراحل انجام هر زوج تصویر**

**Figure 2- Steps to complete each pair of images**

۱- مراحل محاسبه فرونشست با جزئیات در نرم افزار SNAP

همان‌طورکه بیان شد در این مطالعه از تکنیک تداخل‌سنجی راداری با استفاده از تصاویر Sentinel-1A در قالب SLC بهره گرفته شد. پردازش‌ها در محیط نرم‌افزار SNAP و با استفاده از افزونه‌های مرتبط با Sentinel-1 انجام شد. با این حال، پردازش‌های انجام‌شده مبتنی بر الگوریتم‌های زیر بوده‌اند:

أ. هم‌ترازسازی تصاویر[1]: تصاویر SLC صعودی به‌صورت جفت‌هایی از تصویر مبنا و تصویر ثانویه پردازش شدند. در این مرحله، از الگوریتم تطبیق متقابل (Cross-Correlation) برای تصحیح جابجایی‌های زیرپیکسلی استفاده شد تا اطمینان حاصل شود که پیکسل‌های متناظر به‌درستی تراز شده‌اند.

ب. تشکیل اینترفروگرام[2]: با محاسبه اختلاف فاز بین دو تصویر، نقشه فاز نسبی بین آن‌ها تولید شد. این اختلاف فاز شامل ترکیبی از مؤلفه‌های مختلف از جمله توپوگرافی، جابجایی سطح، خطاهای اتمسفری و نویز است.

ج. حذف فاز توپوگرافی: با استفاده از مدل رقومی ارتفاعی (DEM) با دقت ۳۰ متر (SRTM)، مؤلفه توپوگرافی از اینترفروگرام حذف شد تا صرفاً مؤلفه جابجایی سطح باقی بماند.

[1] Coregistration
[2] Interferogram Formation

[ Downloaded from jircsa.ir on 2026-10-31 ]
[ DOR: 20.1001.1.24235970.1404.13.2.3.5 ]

د. فیلترگذاری فاز [1]: به‌منظور کاهش نویز فاز و افزایش همبستگی فضایی سیگنال، از فیلتر تطبیقی Goldstein استفاده شد. این فیلتر اجازه می‌دهد ساختارهای واقعی جابه‌جایی از نویز جدا شوند.

ه. بازگشایی فاز [2]: به کمک الگوریتم Minimum Cost Flow، پیکربندی بازگشایی فاز انجام شد تا فاز ناپیوسته به یک سطح پیوسته تبدیل شود. این مرحله برای تبدیل فاز نسبی به تغییر ارتفاع واقعی ضروری است.

و. محاسبه نرخ جابه‌جایی: مقادیر جابه‌جایی حاصل از هر زوج تصویر در هر بازه زمانی با استفاده از رابطه زیر به نرخ جابه‌جایی سالانه تبدیل شد:

$$Velocity\ (mm/year)=\frac{\Delta\phi}{\Delta t}.\frac{\lambda}{4\pi}$$

که در آن:

$\Delta\phi$ :اختلاف فاز بین دو تاریخ

$\Lambda$: طول موج رادار (برای *Sentinel-1* ، حدود ۵/۶ سانتی‌متر)

$\Delta t$ : $\Delta$فاصله زمانی بین دو تصویر (بر حسب سال) است.

ز. ژئوکدگذاری نتایج: در پایان، نقشه‌های جابه‌جایی به سیستم مختصات جغرافیایی تبدیل شده و به‌صورت فایل‌های قابل تحلیل در سامانه‌های GIS ذخیره شدند.

۲- موزاییک کردن تصاویر. برای انجام این کار داده‌ها را در نرم افزار ArcGIS pro وارد کرده و طبق مراحل زیر موزاییک می‌شود:

الف- وارد کردن دو تصویر سمت چپ و سمت راست

ب- سپس استفاده از قسمت raster function تابع موزاییک mosaic

ج- برش‌زدن شیپ فایل محدوده (clip)

در این پژوهش، جهت محاسبه سرعت رشد فرونشست زمین، از داده‌های راداری Sentinel-1 در قالب تصاویر SLC و از گذر صعودی استفاده شد. پس از انجام پردازش‌های لازم در نرم‌افزار SNAP شامل هم‌ترازسازی تصاویر، تولید اینترفروگرام‌ها، حذف اثر توپوگرافی و بازگشایی فاز، نقشه‌های جابجایی در راستای دید (LOS) برای هفت بازه زمانی از مارس ۲۰۲۱ تا ژوئن ۲۰۲۴ تولید شد.

در ادامه، مقادیر جابه‌جایی حاصل از هر زوج تصویر در هر بازه زمانی با استفاده از رابطه زیر به نرخ جابه‌جایی سالانه تبدیل شد:

$$Velocity\ (mm/year)=\frac{\Delta\phi}{\Delta t}.\frac{\lambda}{4\pi}$$

که در آن:

$\Delta\phi$ : اختلاف فاز بین دو تاریخ

$\Lambda$: طول موج رادار (برای *Sentinel-1*، حدود ۵/۶ سانتی‌متر)

$\Delta t$ : $\Delta$فاصله زمانی بین دو تصویر (بر حسب سال) است.

### روش درون‌یابی IDW

در این روش برآورد بر اساس مقادیر نقاط نزدیک به نقطهٔ برآورد که بنا بر عکس فاصله وزن‌دهی می‌شوند، انجام می‌گیرد. به عبارت دیگر، به نقاط نزدیک به نقطهٔ برآورد وزن بیش‌تری نسبت به نقاط دورتر داده می‌شود. این روش برخلاف روش کریجینگ از فرضیات مربوط به ارتباط مکانی بین داده‌ها پیروی نمی‌کند (واریوگرام ندارد) و تنها بر این فرض متکی است که نقاط نزدیک‌تر به نقطهٔ برآورد، شباهت بیش‌تری به آن نقاط دورتر دارند. قابل ذکر است این روش مهم‌ترین و گسترده‌ترین روش درون‌یابی است که بر پایه مدل‌ها و روابط آماری پایه‌ریزی شده است. لایه رستری تولید شده از این روش، سطحی بسیار دقیق را نمایش می‌دهد( اخوان و همکاران، ۱۳۹۰؛ سیفی و میرزایی، ۱۳۹۶؛ معتمدی راد و بهرامی، ۱۴۰۱).

[1] Goldstein Filter
[2] Phase Unwrapping

[ Downloaded from jircsa.ir on 2026-10-31 ]
[ DOR: 20.1001.1.24235970.1404.13.2.3.5 ]

## نتایج و بحث

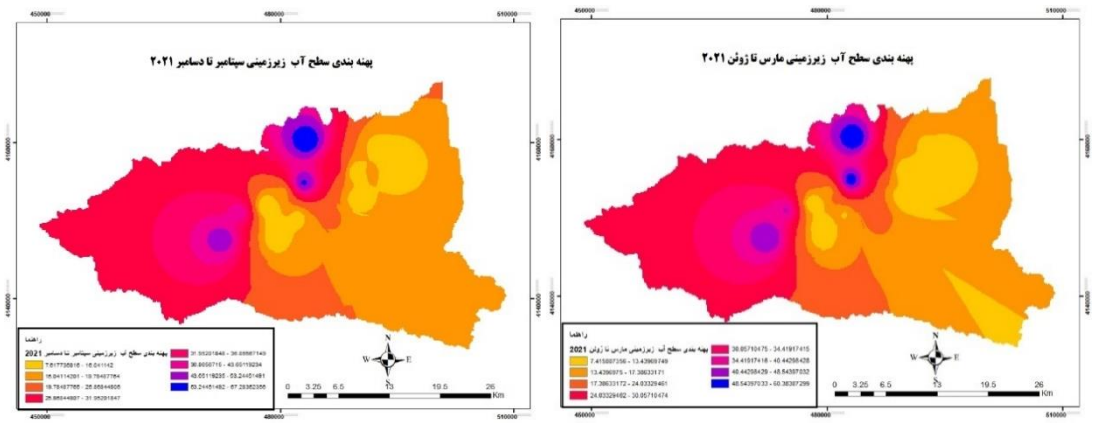
### پهنه‌بندی سطح آب زیرزمینی

پس از شناسایی و تعیین حوضه مطالعاتی اقدام به دانلود تصاویر ماهواره‌ای مورد نظر شد. از طرفی با استفاده از داده‌های پیزومتریک برای بازه زمانی مارس تا ژوئن ۲۰۲۱ ( اسفند ۱۳۹۹ تا خرداد ۱۴۰۰)، سپتامبر تا دسامبر ۲۰۲۱ ( شهریور تا آذر ۱۴۰۰)، مارس تا ژوئن ۲۰۲۲ (اسفند ۱۴۰۰ تا خرداد ۱۴۰۱)، سپتامبر تا دسامبر ۲۰۲۲ (شهریور تا آذر ۱۴۰۱)، مارس تا ژوئن ۲۰۲۳ (اسفند ۱۴۰۱ تا خرداد ۱۴۰۲)، سپتامبر تا دسامبر ۲۰۲۳ (شهریور تا آذر ۱۴۰۲)، مارس تا ژوئن ۲۰۲۴ ( اسفند ۱۴۰۲ تا خرداد ۱۴۰۳)، پهنه‌بندی میزان سطح آب بر اساس داده‌های آب منطقه‌ای خراسان شمالی با استفاده از روش IDW انجام و مورد ارزیابی قرار گرفت (شکل‌های ۳ تا ۶). شکل ۷ نیز نمودار سطح آب زیرزمینی طی سال‌های مختلف به متر و جدول ۲ مشخصات چاه‌های پیزومتری محدوده مطالعاتی را نشان می‌دهد.

**جدول ۲- مشخصات چاه‌های پیزومتری محدوده مطالعاتی**

**Table 2- Characteristics of piezometric wells in the study area**

| شماره | نام ایستگاه | utmX | utmY | ارتفاع نقطه نشانه به متر | افت آب از مارس ۲۰۲۱ تا ژوئن ۲۰۲۴ ( سال‌های ۱۳۹۹-۱۴۰۲) به متر |
|---|---|---|---|---|---|
| 1 | ابتدای قوری میدان | 492320 | 4159466 | 12.7 | -4.9 |
| 2 | اسلام آباد | 489928 | 4152758 | 9 | -5.2 |
| 3 | اکتشافی عزیز آباد | 483033 | 4154909 | 53.7 | -3.8 |
| 4 | اکتشافی قوری میدان | 483360 | 4160232 | 60.4 | -10 |
| 5 | اکتشافی کلاته قمو | 472488 | 4147635 | 48.5 | -2.4 |
| 6 | باغ نوده | 474723 | 4151021 | 40.8 | -0.7 |
| 7 | جاده حیدر آباد- قلعه خان | 482182 | 4150345 | 13.1 | -1.3 |
| 8 | جاده عزیز آباد قلعه خان | 480123 | 4153427 | 16 | -3.2 |
| 9 | چاه همتی | 486683 | 4156991 | 28.1 | -4.6 |
| 10 | زمان صوفی | 479309 | 4147505 | 10.8 | -1.1 |
| 11 | شهرک صنعتی | 494309 | 4157114 | 8.5 | -0.9 |
| 12 | قاضی ۲ | 479386 | 4149030 | 7.7 | -7.1 |
| 13 | قلعه خان ۲ | 478418 | 4151860 | 7.4 | -0.9 |
| 14 | قلعه نجف | 489816 | 4159078 | 16.6 | -3.3 |
| 15 | کنار جاده قره مصلی | 489880 | 4156246 | 8.7 | -5.3 |
| 16 | ملاحسن | 491657 | 4156297 | 9.7 | -7.7 |
| 17 | مهمانک | 486587 | 4150401 | 20.1 | -2.6 |

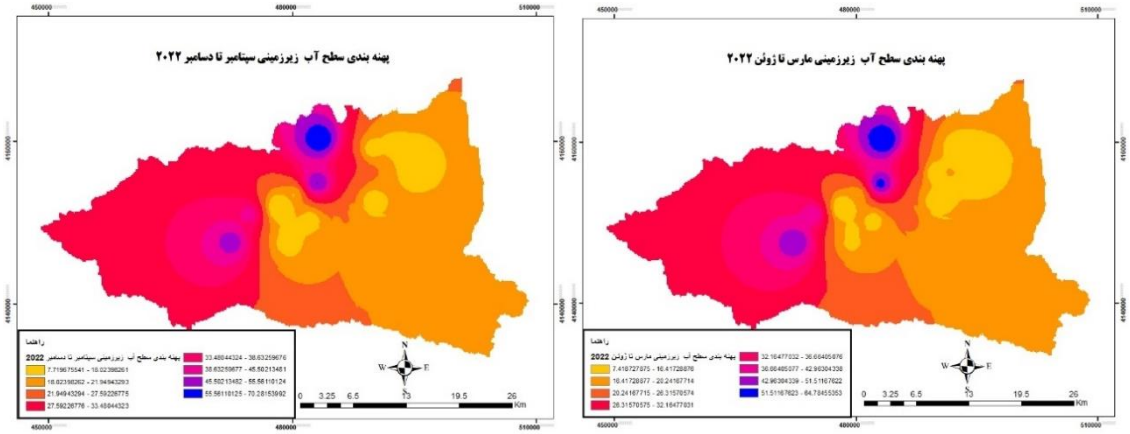



**شکل ۳- پهنه‌بندی سطح آب زیرزمینی مارس تا ژوئن ۲۰۲۱ (راست) و سپتامبر تا دسامبر ۲۰۲۱ (چپ)**

**Figure 3- Groundwater level zoning from March to June 2021 (Right) and September to December 2021 (Left)**

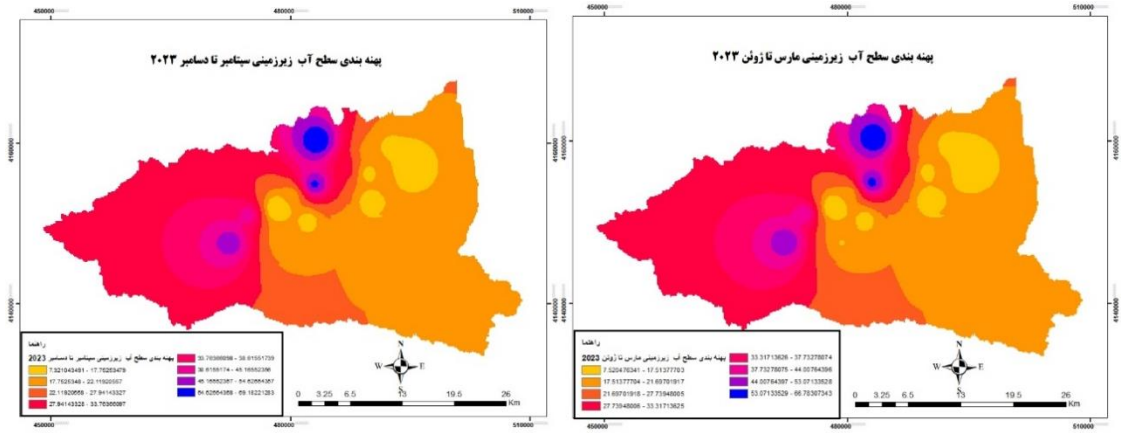
[ Downloaded from jircsa.ir on 2026-10-31 ]

[ DOR: 20.1001.1.24235970.1404.13.2.3.5 ]



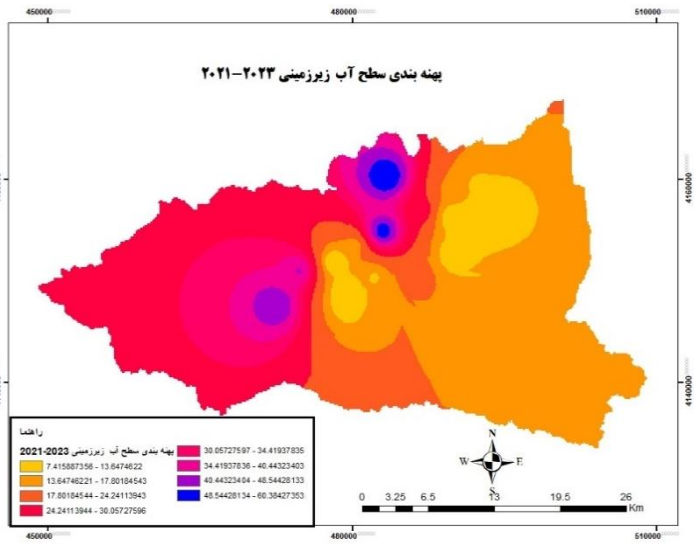

**شکل ۴- پهنه‌بندی سطح آب زیرزمینی مارس تا ژوئن ۲۰۲۲ (راست) و سپتامبر تا دسامبر ۲۰۲۲ (چپ)**

**Figure 4- Groundwater level zoning from March to June (Right) and September to December 2022 (Left)**




**شکل ۵- پهنه‌بندی سطح آب زیرزمینی مارس تا ژوئن ۲۰۲۳ (راست) و سپتامبر تا دسامبر ۲۰۲۳ (چپ)**

**Figure 4- Groundwater level zoning from March to June (Right) and September to December 2023 (Left)**

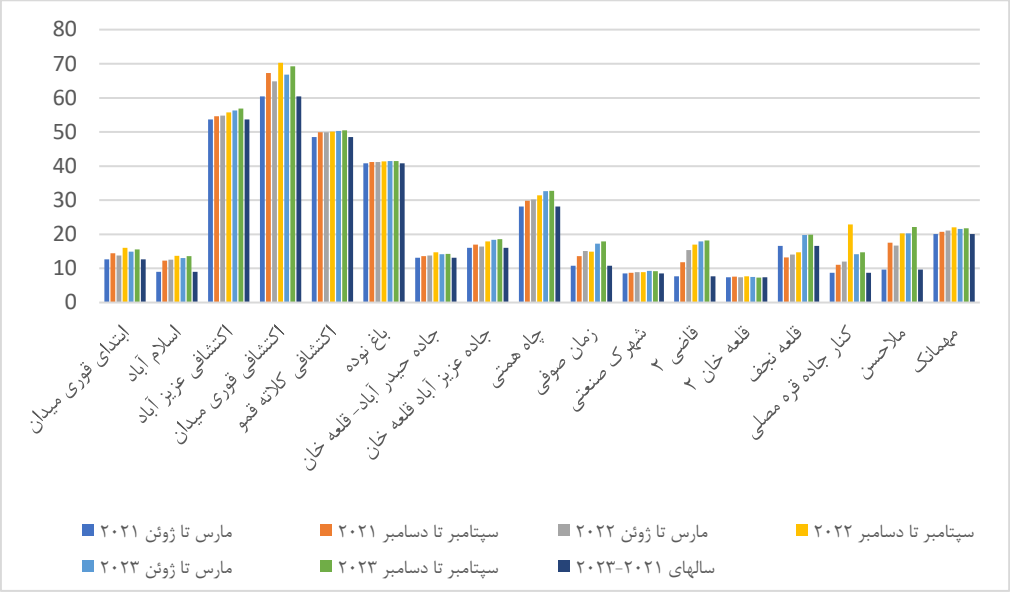



**شکل ۶- پهنه‌بندی سطح آب زیرزمینی در سال‌های ۲۰۲۱-۲۰۲۳**

**Figure 6- Groundwater level zoning in 2023-2021**

[ Downloaded from jircsa.ir on 2026-10-31 ]

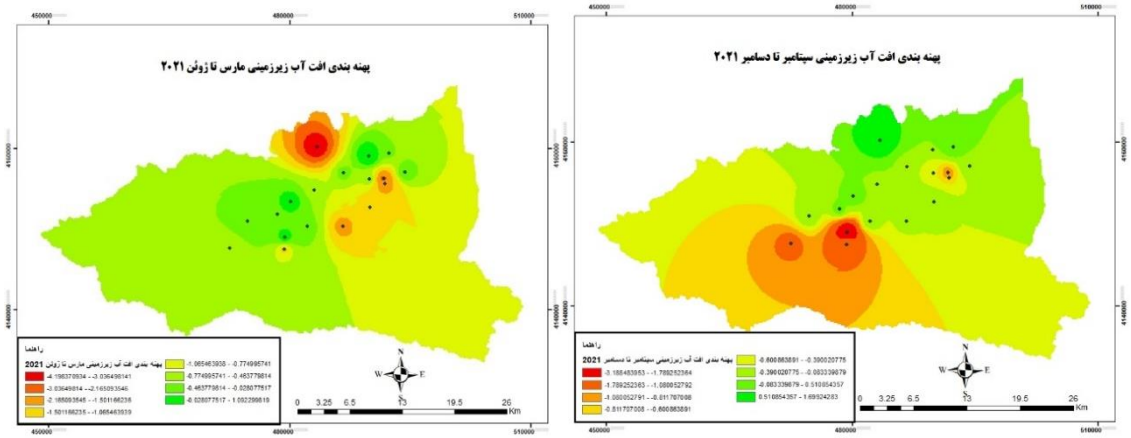
[ DOR: 20.1001.1.24235970.1404.13.2.3.5 ]




**شکل ۷- نمودار سطح آب زیرزمینی در سری‌های زمانی مختلف**

**Figure 7- Graph of groundwater level in different time series**

همان‌طورکه نقشه‌های تهیه شده نشان می‌دهد، چاه‌های اکتشافی قوری میدان، عزیز آباد، کلاته قمو و باغ نوده بیش‌ترین و چاه‌های قلعه خان ۲، شهرک صنعتی و اسلام آباد کم‌ترین میزان سطح آب را دارا هستند. قابل ذکر است تمامی چاه‌ها به‌جز اسلام‌آباد در ذخایر تراسی و مخروط‌افکنه‌های کوهپایه‌ای جدید کم ارتفاع حفر شده‌اند که چاه اسلام‌آباد نیز در سازند قرمز بالایی حفر شده است. شکل های ۸ تا ۱۱ نرخ افت آب زیرزمینی در بازه مارس ۲۰۲۱ تا ژوئن ۲۰۲۴ (اسفند ۱۳۹۹ تا خرداد ۱۴۰۳) را نشان می‌دهد. شکل‌های مذکور نشان می‌دهد که سطح آب زیرزمینی در سال‌های مختلف افت داشته به‌طوری‌که بر اساس شکل ۱۲ چاه‌های قوری میدان، ملاحسن، قاضی ۲، کنار جاده قره مصلی بیش‌ترین افت آب زیرزمینی در طول مارس ۲۰۲۱ تا ژوئن ۲۰۲۴ (اسفند ۱۳۹۹ تا خرداد ۱۴۰۳) را به‌ترتیب برابر با ۱۰-، ۷/۷-، ۷,۱-، و ۵/۳- را به خود اختصاص داده‌اند که این میزان افت می‌تواند منجر به فرونشست شود. از طرفی چاه‌های باغ نوده، قلعه خان ۲، شهرک صنعتی و زمام صوفی کم‌ترین میزان افت آب زیرزمینی در این بازه زمانی را به‌ترتیب ۰/۷-، ۰/۹-، ۰/۹- و ۱/۱- داشته‌اند.

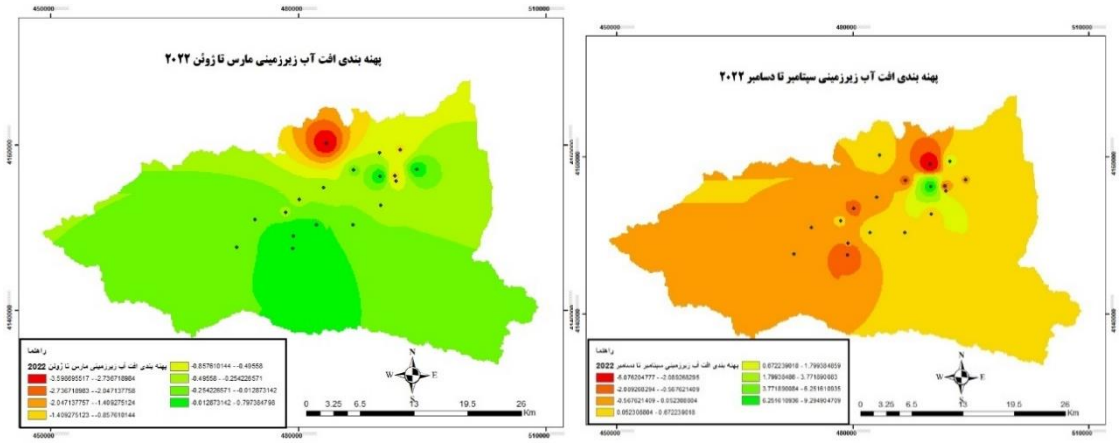



**شکل ۸- پهنه‌بندی افت آب زیرزمینی مارس تا ژوئن ۲۰۲۱ (راست) و سپتامبر تا دسامبر ۲۰۲۱ (چپ)**

**Figure 8- Zoning of groundwater depletion from March to June 2021 (Right) and September to December 2021 (Left)**

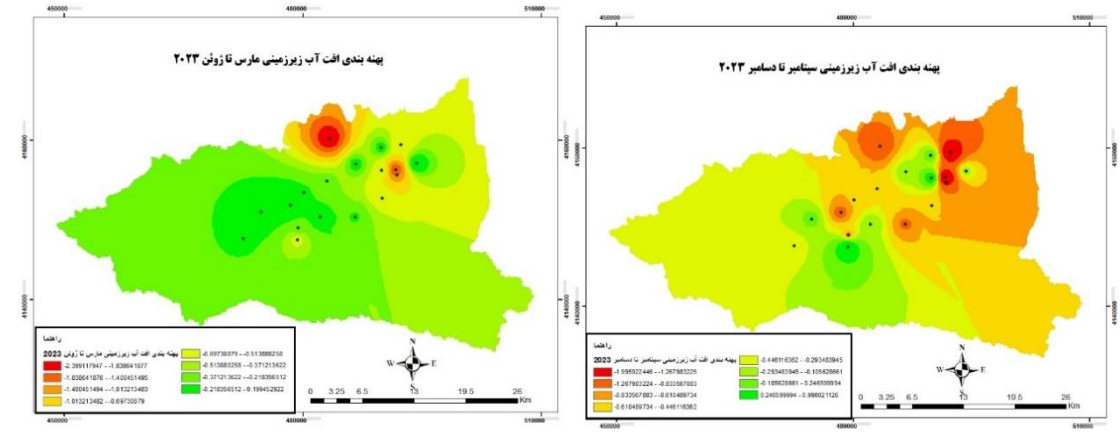
[ Downloaded from jircsa.ir on 2026-10-31 ]

[ DOR: 20.1001.1.24235970.1404.13.2.3.5 ]



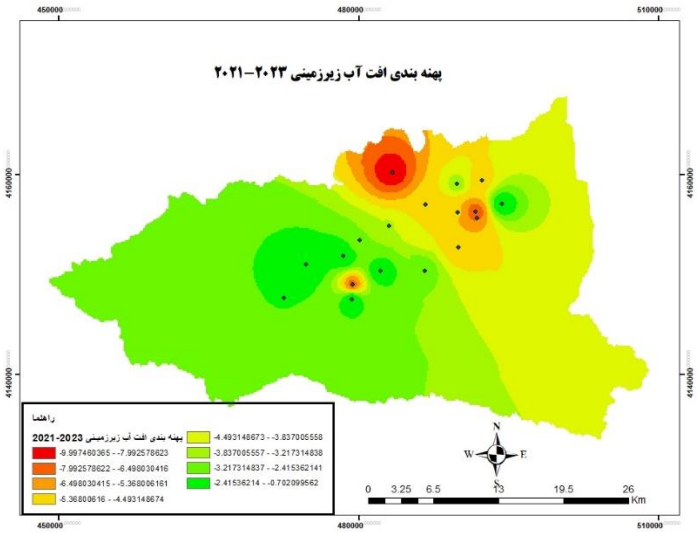

**شکل ۹- پهنه‌بندی افت آب زیرزمینی مارس تا ژوئن ۲۰۲۲ (راست) و سپتامبر تا دسامبر ۲۰۲۲ (چپ)**

**Figure 9- Zoning of groundwater depletion from March to June 2022 (Right) and September to December 2022 (Left)**




**شکل ۱۰- پهنه‌بندی افت آب زیرزمینی مارس تا ژوئن ۲۰۲۳ (راست) و سپتامبر تا دسامبر ۲۰۲۳ (چپ)**

**Figure 10- Zoning of groundwater depletion from March to June 2023 (Right) and September to December 2023 (Left)**

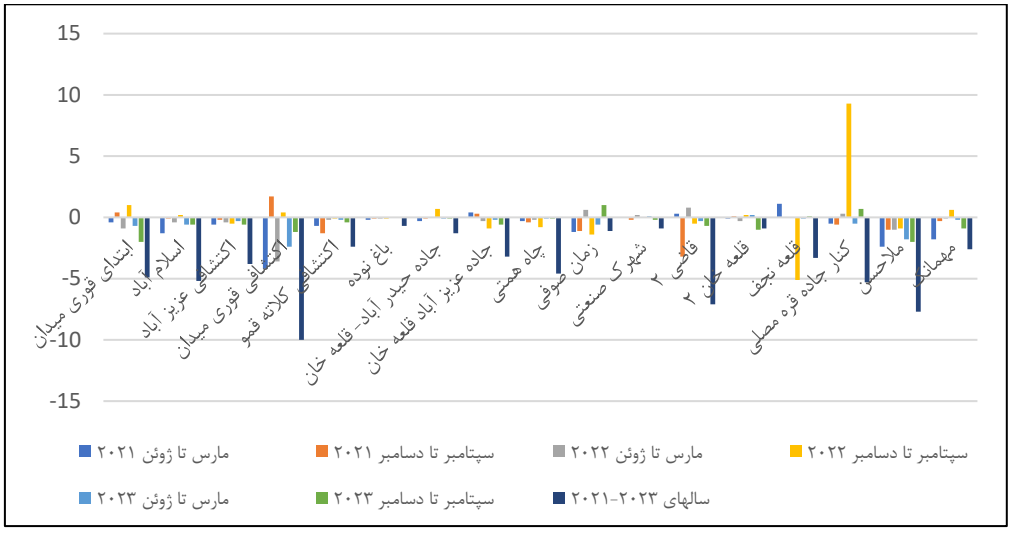



**شکل ۱۱- پهنه‌بندی افت آب زیرزمینی ۲۰۲۳-۲۰۲۱**

**Figure 11- Zoning of groundwater depletion 2023-2021**

[ Downloaded from jircsa.ir on 2026-10-31 ]

[ DOR: 20.1001.1.24235970.1404.13.2.3.5 ]

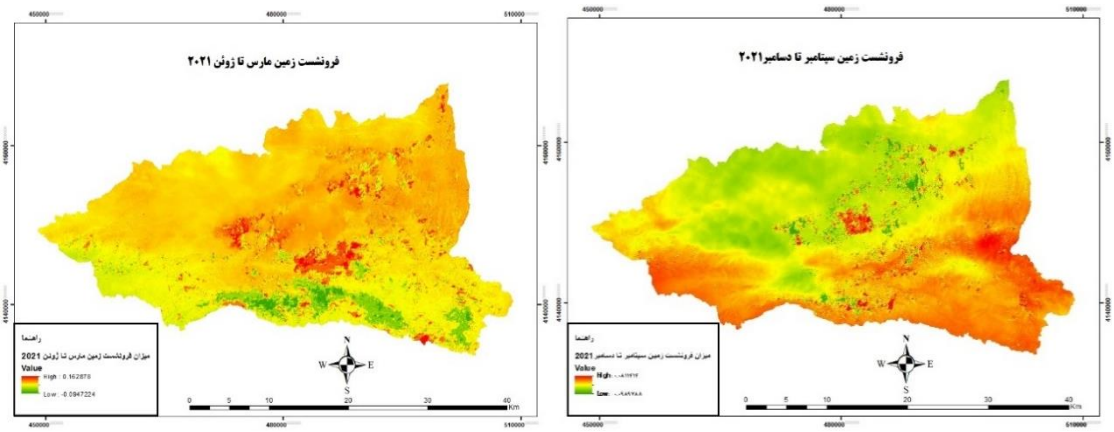



**شکل ۱۲- نمودار افت آب زیرزمینی در سری‌های زمانی مختلف**

**Figure 12- Graph of groundwater decline in different time series**

## برآورد میزان فرونشست در حوضه مطالعاتی

شکل‌های ۱۳ تا ۱۶، پهنه‌بندی میزان فرونشست در دوره‌های زمانی مشخص شده نشان می‌دهد. فرونشست زمین در بازه‌های زمانی مارس تا ژوئن ۲۰۲۱ (اسفند ۱۳۹۹ تا خرداد ۱۴۰۰)، سپتامبر تا دسامبر ۲۰۲۱ (شهریور تا آذر ۱۴۰۰)، مارس تا ژوئن ۲۰۲۲ (اسفند ۱۴۰۰ تا خرداد ۱۴۰۱)، سپتامبر تا دسامبر ۲۰۲۲ (شهریور تا آذر ۱۴۰۱)، مارس تا ژوئن ۲۰۲۳ (اسفند ۱۴۰۱ تا خرداد ۱۴۰۲)، سپتامبر تا دسامبر ۲۰۲۳ (شهریور تا آذر ۱۴۰۲)، مارس تا ژوئن ۲۰۲۴ (اسفند ۱۴۰۲ تا خرداد ۱۴۰۳) و سپس محاسبه سرعت رشد فرونشست در فرونشست نهایی (مارس ۲۰۲۱ تا ژوئن ۲۰۲۴) بررسی و پهنه‌بندی آن حاصل شد (شکل ۱۷). جدول ۳ میزان و درصد هر پهنه را نشان می‌دهد. بر اساس این جدول ۳۵/۱۸ درصد از مساحت حوضه در پهنه خیلی زیاد بحرانی و ۳۶/۸۸ درصد در پهنه خیلی بحرانی قرار گرفته است و در مجموع ۷۷/۰۶ درصد از حوضه مطالعاتی در پهنه فرونشست خیلی زیاد بحرانی و خیلی بحرانی است. از مهم‌ترین چاه‌هایی که در پهنه خیلی زیاد بحرانی قرار گرفته‌اند می‌توان از چاه‌های جاده حیدرآباد- قلعه خان، ملا حسن، باغ نوده و ابتدای قوری می‌توان نام برد. چاه‌های عزیزآباد قلعه خان، مهمانک، قلعه خان ۲، عزیزآباد، شهرک صنعتی، کلاته قمو، اکتشافی قوری میدان در پهنه زیاد بحرانی، چاه‌های همتی، زمان صوفی قلعه نجف، جاده قره مصلی در پهنه متوسط بحرانی و چاه اسلام آباد در پهنه کمی بحرانی قرار گرفته‌اند. بر اساس شکل ۱۷، جنوب، مرکز، غرب و بخشی از شمال حوضه فرونشستی به میزان ۴ تا ۱۰ میلی‌متر را به خود اختصاص داده‌اند.

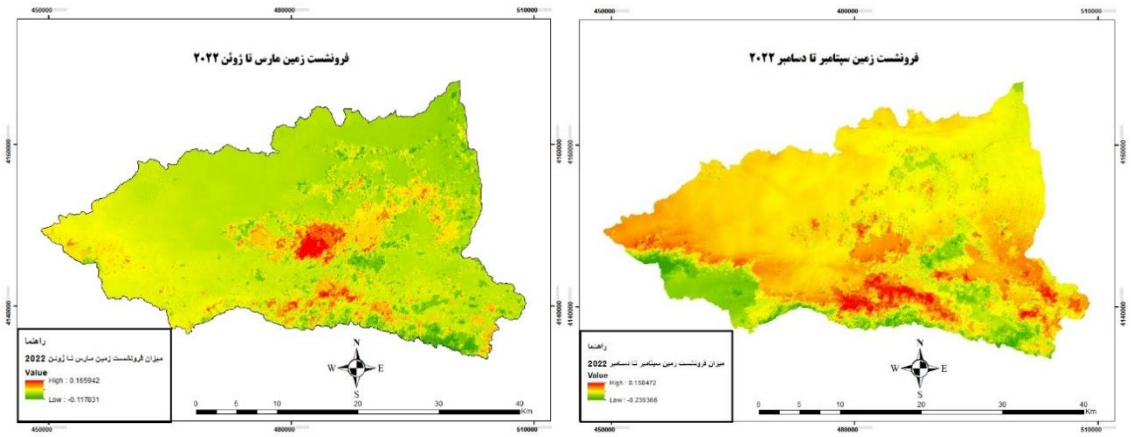



**شکل ۱۳- فرونشست زمین مارس تا ژوئن ۲۰۲۱ (راست) و سپتامبر تا دسامبر ۲۰۲۱ (چپ)**

**Figure 13- Land subsidence March to June 2021 (Right) and September to December 2021 (Left)**

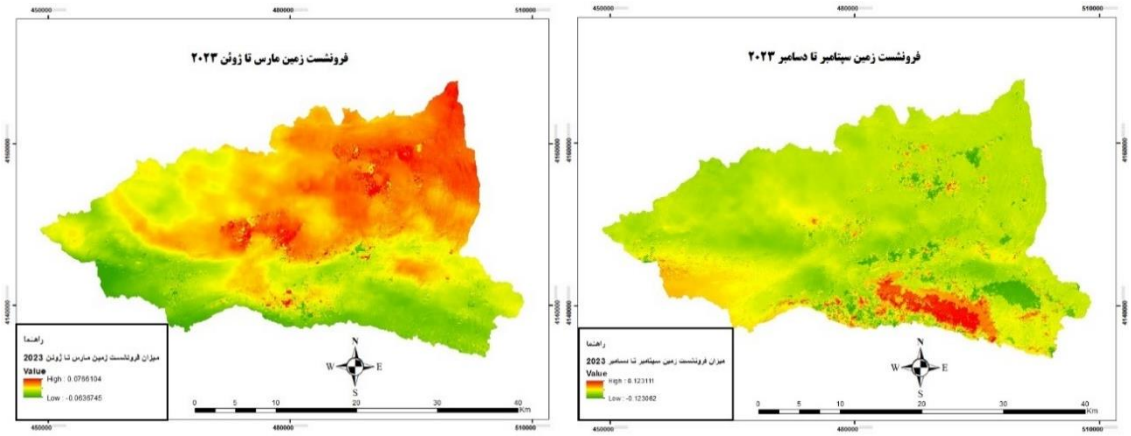
[ Downloaded from jircsa.ir on 2026-10-31 ]

[ DOR: 20.1001.1.24235970.1404.13.2.3.5 ]



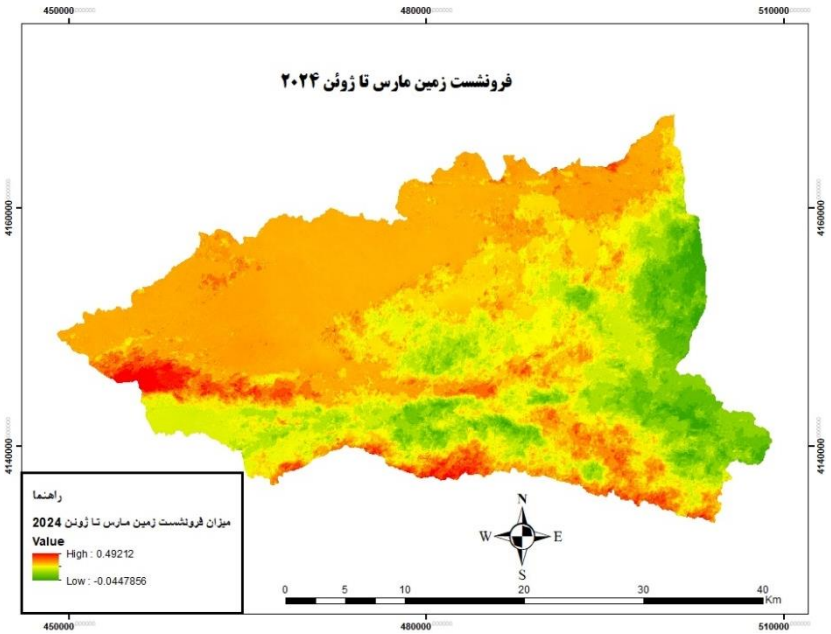

**شکل ۱۴- فرونشست زمین مارس تا ژوئن ۲۰۲۲ (راست) و سپتامبر تا دسامبر ۲۰۲۲ (چپ)**

**Figure 14 - Land subsidence March to June 2022 (Right) and September to December 2022 (Left)**




**شکل ۱۵- فرونشست زمین مارس تا ژوئن ۲۰۲۳ (راست) و سپتامبر تا دسامبر ۲۰۲۳ (چپ)**

**Figure 15 - Land subsidence March to June 2023 (Right) and September to December 2023 (Left)**

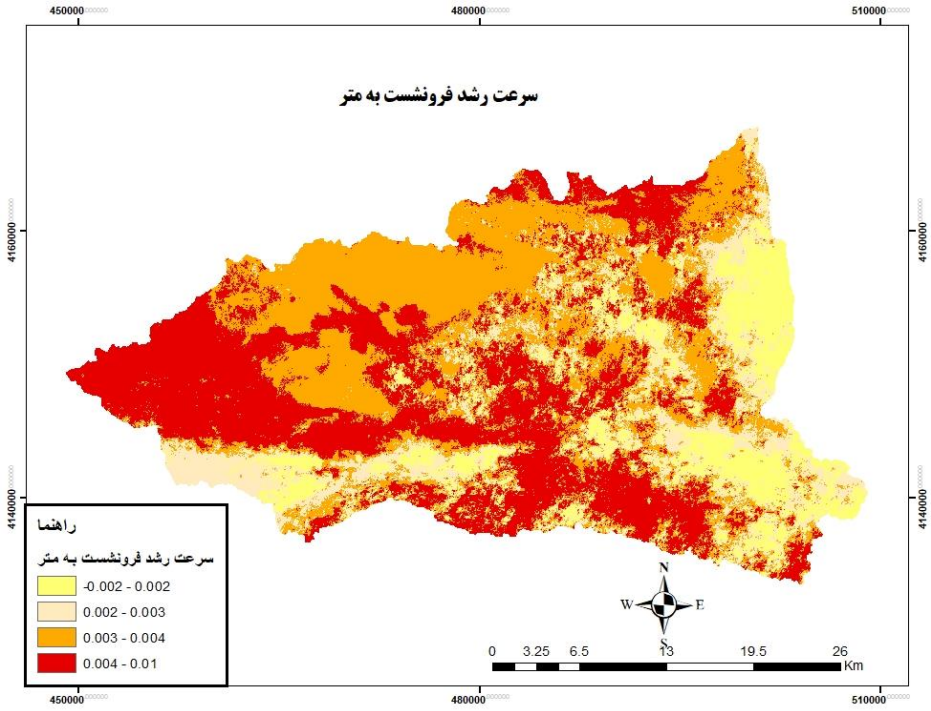



**شکل ۱۶- فرونشست زمین مارس تا ژوئن ۲۰۲۴**

**Figure 16- Land subsidence March to June 2024**

[ Downloaded from jircsa.ir on 2026-10-31 ]

[ DOR: 20.1001.1.24235970.1404.13.2.3.5 ]




**شکل ۱۷- سرعت رشد فرونشست بر حسب متر**

**Figure 17- Subsidence growth rate in meters**

**جدول ۳- درصد مساحت فرونشست در هر پهنه**

**Table 3- Percentage of subsidence area in each zone**

| شدت بحران | وسعت به کیلومتر مربع | درصد مساحت |
|---|---|---|
| کمی بحرانی | 132.170656 | 11.52 |
| متوسط بحرانی | 188.26133 | 16.42 |
| خیلی بحرانی | 423.12644 | 36.88 |
| خیلی زیاد بحرانی | 40362574 | 35.18 |

## نتیجه‌گیری

در این پژوهش فرونشست زمین در دشت سملقان با استفاده از SentineL1 بازه‌های زمانی مارس تا ژوئن ۲۰۲۱ (اسفند ۱۳۹۹ تا خرداد ۱۴۰۰)، سپتامبر تا دسامبر ۲۰۲۱ (شهریور تا آذر ۱۴۰۰)، مارس تا ژوئن ۲۰۲۲ (اسفند ۱۴۰۰ تا خرداد ۱۴۰۱)، سپتامبر تا دسامبر ۲۰۲۲ (شهریور تا آذر ۱۴۰۱)، مارس تا ژوئن ۲۰۲۳ (اسفند ۱۴۰۱ تا خرداد ۱۴۰۲)، سپتامبر تا دسامبر ۲۰۲۳ (شهریور تا آذر ۱۴۰۲)، مارس تا ژوئن ۲۰۲۴ (اسفند ۱۴۰۲ تا خرداد ۱۴۰۳) مورد بررسی قرار گرفت. بدین منظور از داده‌های چاه‌های پیزومتری و بازدید میدانی به‌منظور صحت سنجی و تفسیر نتایج استفاده شد. پهنه‌بندی میزان سطح آب بر اساس داده‌های آب منطقه‌ای خراسان شمالی با استفاده از روش IDW انجام و مورد ارزیابی قرار گرفت و نمودار سطح آب زیرزمینی طی سال‌های مختلف به متر ترسیم شد. نرخ افت آب زیرزمینی در بازه مورد نظر نیز نشان می‌دهد که سطح آب زیرزمینی در سال‌های مختلف افت داشته به‌طوری‌که چاه‌های قوری میدان، ملاحسن، قاضی ۲، کنار جاده قره مصلی بیش‌ترین افت آب زیرزمینی در طول مارس ۲۰۲۱ تا ژوئن ۲۰۲۴ (اسفند ۱۳۹۹ تا خرداد ۱۴۰۳ را به خود اختصاص داده‌اند که این میزان افت می‌تواند منجر به فرونشست شود. سپس با استفاده از نرم‌افزار SNAP میزان فرونشست در حوضه مطالعاتی از ۱ تا ۱۰ میلی‌متر در بازه مورد نظر تعیین شد. ضریب همبستگی بین میزان افت آب زیرزمینی و میزان فرونشست محاسبه و برابر با ۰/۶۸ به‌دست آمد. بر اساس مطالعات انجام شده ۳۵/۱۸ درصد از مساحت حوضه در پهنه خیلی زیاد بحرانی و ۳۶/۸۸ درصد در پهنه خیلی بحرانی قرار گرفته است و در مجموع ۷۲/۰۶ درصد از حوضه مطالعاتی در پهنه فرونشست خیلی زیاد بحرانی و خیلی بحرانی است. میزان فرونشست در پهنه خیلی زیاد بحرانی از ۴ تا ۱۰ میلی‌متر است که این میزان بالای فرونشست را در جنوب، مرکز، غرب و بخشی از شمال حوضه را نشان می‌دهد.

[ Downloaded from jircsa.ir on 2026-10-31 ]

[ DOR: 20.1001.1.24235970.1404.13.2.3.5 ]

چاه‌های جاده حیدرآباد– قلعه خان، ملاحسن، باغ نوده و ابتدای قوری در پهنه خیلی زیاد بحرانی، چاه‌های عزیزآباد قلعه خان، مهمانک، قلعه خان ۲، عزیزآباد، شهرک صنعتی، کلاته قمو، اکتشافی قوری میدان در پهنه زیاد بحرانی بحرانی، چاه‌های همتی، زمان صوفی قلعه نجف، جاده قره مصلی در پهنه متوسط بحرانی و چاه اسلام آباد در پهنه کمی بحرانی قرار گرفته‌اند. مشاهدات میدانی در منطقه مورد مطالعه هم چون ترک خوردگی دیوارها و ایجاد فروچاله‌ها و ... نتایج حاصله را تایید می‌کند.

با بررسی روند تغییرات سطح آب زیرزمینی در دشت سملقان، می‌توان گفت فرونشست صورت گرفته در این دشت تحت تأثیر تغییرات آب زیرزمینی و استخراج بی‌رویه از آبخوان این دشت بوده است. بیش‌ترین مقدار فرونشست در مرکز و شمال حوضه در آبخوان دشت سملقان حفر شده در ذخایر تراسی و مخروط‌افکنه‌های کوهپایه‌ای جدید کم ارتفاع (بیش‌ترین درصد مساحت در حوضه) و سازند قرمز بالایی رخ داده و هم‌چنین در غرب حوضه در سازندهای تیرگان، مزدوران و شوریجه میزان زیادی از فرونشست را به خود اختصاص داده‌اند. ذخایر تراسی و مخروط‌افکنه‌های کوهپایه‌ای جدید کم ارتفاع و سازند قرمز بالایی حساسیت بالایی برای فرونشست دارا هستند. سازند تیرگان و مزدوران به دلیل ترکیب غالب آهکی خود به‌طورکلی سازندی مقاوم در برابر فرونشست محسوب می‌شود اما در شرایط خاص مانند کارستی شدن، وجود میان لایه‌های نرم یا بهره‌برداری شدید از منابع آب زیرزمینی می‌تواند به‌طور موضعی باعث ایجاد فرونشست یا فروچاله شود. به‌عبارتی در دشت سملقان، فرونشست در سازندهای آهکی مانند مزدوران و تیرگان به دلایل مختلفی اتفاق می‌افتد. مهم‌ترین دلایل این پدیده شامل کاهش سطح آب‌های زیرزمینی، تغییرات هیدرولوژیکی، ویژگی‌های زمین‌شناسی سازندهای آهکی، فرآیندهای کارستی و مدیریت نادرست منابع آب است. در مجموع، این سازندها در اثر برداشت بیش از حد آب‌های زیرزمینی، به‌ویژه در نواحی دارای شکاف‌ها و حفره‌های طبیعی، مستعد فرونشست می‌شوند. بنابراین تحلیل دقیق ساختار داخلی و ویژگی هیدروژئولوژیکی این سازند برای ارزیابی خطر فرونشست ضروری است. سازند شوریجه نیز بخش کوچکی از غرب حوضه مورد مطالعه را به خود اختصاص داده است. لایه‌های آهکی ستبر با میان لایه‌های آهک مارنی بخش بالایی سازند مزدوران به‌تدریج به سازند شوریجه تبدیل می‌شود. سازنده شوریجه به‌دلیل ترکیب رسی مارنی و وجود لایه‌های تبخیری یکی از مهم‌ترین سازندهای مستعد فرونشست به شمار می‌آید. فرونشست در مناطقی با گسترش این سازند معمولاً ناشی از فشردگی مواد نرم و انحلال سنگ‌های تبخیری است. بر این اساس مدیریت دقیق منابع آب زیرزمینی و مطالعات ژئوتکنیکی در مناطق دارای این سازند ضرورت دارد.

نتایج مقاله حاضر از نظر رابطه مستقیم میان افت سطح آب زیرزمینی و فرونشست زمین، با مطالعات متعددی هم‌خوانی دارد. برای نمونه، در پژوهش صالحی و همکاران (۱۳۹۲) در دشت مهیار شمالی، محمد خان و همکاران (۱۳۹۸) در دشت قروه، رفیعی و همکاران (۱۴۰۲) در دشت سملقان، کلالی مقدم (۱۴۰۳) در دشت نیشابور افت سطح ایستابی به‌عنوان عامل اصلی فرونشست معرفی شده است که در این مطالعه نیز ارتباط برداشت آب زیرزمینی و در نتیجه افت سطح ایستابی با فرونشست نیز مشخص و این موضوع به‌طور مستند بررسی شد. به‌طورکلی می‌توان گفت فرونشست زمین در دشت سملقان یکی از مسائل مهم زیست‌محیطی و زمین‌شناسی است که در سال‌های اخیر به‌دلیل عوامل مختلفی شدت یافته است. تعداد ۱۶ واحد چینه سنگی و رسوبات کواترنری رخنمون یافته‌اند که به دوران اول، دوم و سوم تعلق دارند که شامل: سازند مزدوران، تیرگان، خانگیران، چمن‌بید، شوریجه است که ذخایر تراسی و مخروط‌افکنه‌های کوهپایه‌ای جدید کم ارتفاع بیش‌ترین درصد مساحت را به خود اختصاص داده است. به عبارتی بیش‌ترین مساحت دشت سملقان از رسوبات آبرفتی و مواد نرم تشکیل شده است و این دشت در بخش‌هایی (غرب حوضه) روی واحدهای زمین‌شناسی مختلفی مانند سازندهای شوریجه، تیرگان و مزدوران گسترده است. این سازندها نیز ترکیب‌هایی از سنگ‌های رسی، مارنی و آهکی دارند که در مجموع به‌دلیل ویژگی‌های تراکم‌پذیر و غیرمقاوم بودن، مستعد فرونشست در صورت کاهش سطح ایستابی منابع آب زیرزمینی هستند. شایان ذکر است شکاف‌های طولی کششی در امتداد تقریباً شمالی – جنوبی در شمال غرب دشت به‌دلیل افت سطح آب و زهکشی از لایه‌های ریزدانه هم راستای گسل منطقه ایجاد شده‌اند که در زمین‌های کشاورزی قابل رؤیت هستند.

علاوه‌بر برداشت بی‌رویه از منابع آب زیرزمینی از طریق چاه‌های عمیق و نیمه‌عمیق که به کاهش سطح آب‌های زیرزمینی منجر و این کاهش سطح، باعث فشرده شدن لایه‌های آبرفت و در نتیجه منجر به فرونشست و حتی شکستن لایه‌های سطحی خاک شده است، می‌توان به ساختار زمین‌شناسی به‌دلیل وجود لایه‌های رسی و مارنی که تراکم‌پذیری بالایی دارند و این مواد به‌ویژه در شرایط برداشت آب زیرزمینی می‌توانند باعث نشست و فروپاشی سطح زمین شوند اشاره کرد. هم‌چنین تغییرات اقلیمی و خشکسالی‌های پیاپی در سال‌های اخیر نیز موجب کاهش میزان بارندگی و تغذیه آبخوان‌ها شده است که این امر سبب افت بیش‌تر سطح ایستابی آب‌های زیرزمینی شده و به تشدید فرونشست کمک کرده است. ترک‌خوردگی و آسیب به سازه‌ها، منازل و زیرساخت‌ها، شکست کانال‌های آبیاری و آسیب به شبکه‌های کشاورزی، کاهش کیفیت منابع آبی به‌دلیل نفوذ آلودگی‌ها به آبخوان‌ها و آسیب به زیرساخت‌ها و کاهش بهره‌وری اراضی کشاورزی از اثرات مخرب فرونشست در این دشت است. لذا می‌توان بیان نمود که دشت سملقان به‌دلیل ویژگی‌های زمین‌شناسی خاص و بهره‌برداری بی‌رویه از منابع آب زیرزمینی،

[ Downloaded from jircsa.ir on 2026-10-31 ]

[ DOR: 20.1001.1.24235970.1404.13.2.3.5 ]

در معرض خطر فرونشست قرار گرفته که برای مدیریت این پدیده، لازم است اقداماتی نظیر مدیریت پایدار منابع آب زیرزمینی، کاهش برداشت بی‌رویه آب‌های زیرزمینی، تغذیه مصنوعی آبخوان‌ها و پایش دقیق سطح ایستابی آب و بررسی تغییرات هیدروژئولوژیکی منطقه انجام شود تا به کنترل فرونشست و جلوگیری از افزایش آن کمک شود.

## ملاحظات اخلاقی

**دسترسی به داده‌ها:** داده‌ها و نتایج استفاده شده در این پژوهش از طریق مکاتبه با نویسنده مسئول در اختیار قرار خواهد گرفت.

**حمایت مالی:** این پژوهش در قالب پژوهش آزاد انجام شده است.

**مشارکت نویسندگان:** ابراهیم امیری، محمد معتمدی راد، علی صادقی و فرزاد امیری: بخش‌های مختلف مقاله توسط نام‌بردگان انجام و نگاشته شده است.

**تضاد منافع نویسندگان:** نویسندگان این مقاله اعلام می‌دارند که هیچ‌گونه تضاد منافعی در خصوص نگارش و انتشار مطالب و نتایج این پژوهش ندارند.

**سپاس‌گزاری:** نویسندگان این مقاله، از شرکت آب منطقه‌ای خراسان شمالی جهت دادن داده‌های منابع آبی تشکر و قدردانی می‌نمایند.

## منابع

۱. اخوان، رضا، کرمی خرم آبادی، منا، و سوسنی، جواد. (۱۳۹۰). کاربرد دو روش کریجینگ و IDW در پهنه‌بندی تراکم و تاج پوشش جنگل های شاخه زاد بلوط (مطالعه موردی: منطقه کاکارضای خرم آباد لرستان). *جنگل ایران*، ۳(۴)، ۳۰۵-۳۱۶. **https://www.ijf-isaforestry.ir/article_4666.html**

۲. اکبری، محمد، آزرم، زهرا، افتخاری، مبین، اسلامی نژاد، سید احمد و محمودی زاده، سعید. (۱۴۰۲). بررسی فرونشست دشت اسفراین به علت بهره‌برداری از منابع آب زیرزمینی. *اکوهیدرولوژی* ,۱۰(۲)، ۲۸۹-۳۰۰. **doi: 10.22059/ije.2023.358148.1724**

۳. آقایاری، لیلا، عابدینی، موسی و اصغری سراسکانرود، صیاد .(۱۴۰۱). برآورد میزان فرونشست با استفاده از تکنیک تداخل‌سنجی راداری و پارامترهای آب‌های زیرزمینی و کاربری اراضی( مطالعه موردی دشت اردبیل). *ژئومورفولوژی کمی*، ۱۱(۱)، ۱۱۷-۱۳۲. **doi: 10.22034/gmpj.2022.304999.1302.**

۴. حاجب، زهرا، موسوی، زهرا، معصومی، زهره، و رضایی، ابوالفضل. (۱۳۹۸). مطالعه فرونشست دشت قم با استفاده از تداخل‌سنجی راداری و ویژگی‌های هیدروژئولوژیکی آبخوان. *علوم زمین*، ۲۹(۱۱۴)، ۲۵۱-۲۵۸. **doi:10.22071/gsj.2018.113987.1367**

۵. حداد، عبدالحسین و خراسانی، الهام .(۱۳۹۸). اثر تغییرات سطح آب زیرزمینی بر فرونشست دشت سمنان. *علوم زمین*، ۲۸(۱۱۲ )، ۱۸۱-۱۹۰. **doi:10.22071/gsj.2019.93191**

۶. رفیعی، فاطمه، قره چلو، سعید و گلیان، سعید. (۱۳۹۹). ارزیابی تاثیر افت آب‌های زیرزمینی بر میزان فرونشست دشت سملقان با استفاده از تداخل‌سنجی راداری، اولین کنفرانس ملی داده‌کاوی در علوم زمین، دانشکده مهندسی علوم زمین، دانشگاه صنعتی اراک.

۷. رفیعی، فاطمه، قره چلو، سعید و گلیان، سعید. (۱۴۰۲). ارزیابی رفتار متقابل آبخوان با فرونشست زمین و ارتباط آن با سطح آب زیرزمینی و تغییرات پوشش گیاهی با استفاده از تکنیک تداخل سنجی تفاضلی راداری، *سنجش از دور و سامانه اطلاعات جغرافیایی در منابع طبیعی*. ۱۲(۲)، ۷۳-۵۳. **doi:10,30495/GIRS.2023.689174**

۸. زنگنه اسدی، محمد علی، زندی، رحمان، و شفیعی، نجمه. (۱۴۰۲). سنجش و ارزیابی کشت برنج و صیفی جات و تاثیر آن بر بحران نشست زمین آبخوان نور آباد ممسنی. پژوهش‌های ژئومورفولوژی کمی. ۱۲(۲)، ۱۹۹-۱۸۴.**doi:10.22034/gmpj.2023.393690.1432**

۹. سیفی، یونس، و میرزایی، روح اله .(۱۳۹۶). مقایسه روش‌های درون یابی مکانی جهت پهنه‌بندی غلظت فلزات سنگین در خاک سطحی شهرستان آران و بیدگل. *علوم و تکنولوژی محیط زیست*. ۱۹(۱)، ۱۳۱-۱۴۷. **doi: 10.22034/jest.2017.10341**

۱۰. شفیعی، نجمه، گلی مختاری، لیلا، امیراحمدی، ابوالقاسم، و زندی، رحمان .(۱۳۹۹). بررسی فرونشست آبخوان دشت نورآباد با استفاده از روش تداخل‌سنجی راداری. *پژوهش‌های ژئومورفولوژی کمی*. ۸(۴)، ۹۳-۱۱۱. **doi: 10.22034/gmpj.2020.106424.**

۱۱. صالحی، رضا، غفوری، محمد، لشکری پور، غلامرضا، و دهقانی، مریم. (۱۳۹۲). بررسی فرونشست دشت مهیار جنوبی با استفاده از روش تداخل‌سنجی راداری. مهندسی آبیاری و آب ایران. ۳(۱۱)، ۴۷-۵۷.

[ Downloaded from jircsa.ir on 2026-10-31 ]

[ DOR: 20.1001.1.24235970.1404.13.2.3.5 ]

۱۲. کلالی مقدم، ژیلا. (۱۴۰۳). ارزیابی اثرات بحران آب و پدیدهٔ فرونشست زمین در مناطق روستایی دشت نیشابور. *جغرافیا و توسعه ناحیه‌ای*. ۲۲(۲)، ۱۶۹-۲۰۱. **doi: 10.22067/jgrd.2024.86096.1379**

۱۳. کیانی، شکراله، مزیدی، احمد و حسینی، سیدزین العابدین. (۱۴۰۳). شناسایی مناطق دارای فرونشست با استفاده از تداخل‌سنجی راداری (مطالعه موردی؛ دشت دامنه)، *تحقیقات کاربردی علوم جغرافیایی (علوم جغرافیایی)*. ۲۴(۷۴)، ۹۷-۷۶. **doi: 10.61186/jgs.24.74.14**

۱۴. گودرزی، محمدرضا، صباغزاده، مریم، و رجب‌پور نیکنام، امیررضا. (۱۴۰۴). رابطه بین فرونشست زمین و مصرف آب در دشت یزد–اردکان با استفاده از تصاویر سنتینل ۱. *تحقیقات کاربردی علوم جغرافیایی* . ۲۵(۷۶)، ۱۶۱-۱۴۴. **doi:10.61186/jgs.25.76.13**

۱۵. لشگری پور، غلامرضا، غفوری، محمد، سویزی، زینب، و پیوندی، زکیه .(۱۳۸۴). افت سطح آب زیرزمینی و نشست زمین در دشت مشهد. *همایش انجمن‌های زمین شناسی ایران*.

۱۶. محمدخان، شیرین، گنجائیان، حمید، گروسی، لیلا و زنگنه تبار، زهرا. (۱۳۹۸). ارزیابی تأثیر افت آب‌های زیرزمینی بر میزان فرونشست با استفاده از تصاویر راداری سنتینل-۱؛ محدوده مورد مطالعه: دشت قروه. *اطلاعات جغرافیایی. ۲۸(۱۱۲)*، ۲۲۹-۲۱۹، **doi:10.22131/sepehr.2020.38617**

۱۷. معتمدی راد، محمد و بهرامی، شهرام (۱۴۰۱). تحلیل میزان غلظت و آلودگی عناصر سنگین رسوبات (مطالعه موردی : حوضه گلیان در استان خراسان شمالی). *فصلنامه مطالعات جغرافیایی مناطق کوهستانی*. ۳(۲)، ۸۱-۵۷. **doi:10.52547/gsma.3.2.57**

۱۸. معتمدی‌راد، محمد، ارجمند زاده، رضا، امیری، ابراهیم و امیری، فرزاد (۱۴۰۴). تحلیل سری زمانی فرونشست دشت اسفراین با استفاده از روش تداخل‌سنجی راداری. *تحقیقات کاربردی علوم جغرافیایی*. ۲۵(۷۸)، ۳۹۷-۳۷۶. **doi:10.61186/jgs.25.78.22**

## References

1. Aghayari, L., Abedini, M & Asghari Saraskanroud, S. (2012). Estimating the rate of subsidence using radar interferometry technique and groundwater and land use parameters (case study of Ardabil plain). *Journal of Quantitative Geomorphology*, 11(1), 117-132. doi:10.22034/gmpj.2022.304999.1302. [In Persian]
2. Agustan, A. S., & Takeo, I. (2016). Measuring deformation in Jakarta through long term synthetic aperture radar (SAR) data analysis. *Environmental Science*, 47(1), doi:10.1088/1755-1315/47/1/012022
3. Akbari, M., Azram, Z., Eftekhari, M., Eslaminejad, S. A., & Mahmoudizadeh, S. (2013). Study of subsidence of Esfarayen plain due to exploitation of groundwater resources. *Journal of Ecohydrology*, 10(2), 289-300, doi:10.22059/ije.2023.358148.1724. [In Persian]
4. Akhavan, R., Khorramabadi, M. K., & Soosani, J. (2012). Application of Kriging and IDW methods in mapping of crown cover and density of coppice oak forests (case study: Kakareza region, Khorramabad). *Iranian journal of forest*, 3(4), 305-316. https://www.ijf-isaforestry.ir/article_4666.html [In Persian]
5. Bates, R. L., & Jackson, J. A. (1980). Glossary of Geology. American Geological Institute. Second edition, Falls Church, *Virginia*, 749 p.
6. Crosetto, M., Tscherning, C. C., Crippa, B. & Castillo, M. (2002). Subsidence monitoring using SAR interferometry: Reduction of the atmospheric effects using stochastic filtering. *Geophysical Research Letters*, 29(9), 26.1-26.4. doi:10.1029/2001GL013544
7. Faunt, C. C., Sneed, M., Traum, J., & Brandt, J. T. (2016). Water availability and land subsidence in the Central Valley, California, USA. *Hydrogeology Journal*, *24*(3), 675-684, doi:10.1007/s10040-015-1339-x.
8. Galloway, D. L., Phillips, S. P., & O'Connor, A. S. (2000). Land subsidence in the United States. US *Geological Survey Circular*, 1182.
9. Goodarzi, M. R., Sabaghzadeh, M., & Rajabpour Niknam, A.R. (2025).The relationship between land subsidence and water use in Yazd, Ardakan plain using Sentinel-1 images. *Journal Of Geographical Sciences*, 25(76 ), 144-161, doi:10.61186/jgs.25.76.13 [In Persian]
10. Haddad, A., & Khorasani, E. (2019). Groundwater level changes effect on the subsidence in Semnan plain. *Geosciences*, 28(112 ), 181-190,10.22071/gsj.2019.93191 [In Persian]
11. Hajeb, z., Mousavi, Z., Masoumi, Z., & Rezaei, A. (2020). Investigation of Qom plain subsidence using synthetic aperture radar Interferometry and aquifer hydrogeological characterization. *Geosciences*, 29(114), 251-258 , doi:10.22071/gsj.2018.113987.1367 [In Persian]
12. Joughin, I., Winebrenner, D. P., & Krabill, W. B. (1998). Observations of ice-sheet motion in Greenland with synthetic aperture radar interferometry. *Journal of Glaciology*, 44(148), 243-252.

[ Downloaded from jircsa.ir on 2026-10-31 ]
[ DOR: 20.1001.1.24235970.1404.13.2.3.5 ]

13. Kalali Moghadam, Zh. (2014). Evaluation of the effects of water crisis and land subsidence in rural areas of the Neyshabur plain. *Geography and Regional Development*, 22(2), 201-169, doi:10.22067/jgrd.2024.86096.1379. [In Persian]
14. Khan, J., R, X., Afaq Hussain, M., & Qasim Jan, M. (2022). Monitoring land subsidence using PS-InSAR technique in Rawalpindi and Islamabad, Pakistan, *Remote Sensing*, 14,3722, 1-25, 10.3390/rs14153722
15. Kiani, Sh., Mazidi, A., & Hosseini, S. Z. Al-A. (2024). Identification of subsidence areas using radar interferometry (Case study; Damane plain). *Journal of Applied Researches in Geographical Sciences*, 74 (24), 76-96, doi:10.61186/jgs.24.74.14. [In Persian]
16. Lanari, R., Lundgren, P., Manzo, M. & Casu, F. (2004). Satellite radar interferometry time series analysis of surface deformation for LosAngeles, California. *Geophysical Research Letters*, 31, doi:10.1029/2004GL021294.
17. Lashgaripour, Gh., Ghafouri, M., Soeyzi, Z., & Peyvandi, Z.(2005). Groundwater level drop and ground subsidence in Mashhad plain. *Conference of Geological Societies of Iran*. [In Persian]
18. Liu, C.W., Lin, W.S. & Cheng, L.H. (2006). Estimation of land subsidence caused by loss of smectite inter layer water in shallow aquifer systems. *Hydrogeology Journal*, 14:508-525, doi:10.1007/s10040-005-0459-0
19. Mohammadkhan, Sh., Ganjaian, H., Grosi, L., & Zanganehtabar, Z. (2019). Evaluating the impact of groundwater depletion on subsidence using Sentinel-1 radar images; Study area: Qorveh Plain. *Quarterly Scientific and Research Journal of Geographic Information*, 28(112), 219-229, doi:10.22131/sepehr.2020.38617. [In Persian]
20. Motamedi Rad, M., & Bahrami. Sh. (2022). Analyzing the rate of concentration and pollution of heavy metals of sediments (case study: Gelian catchment in North Khorasan province). *Journal of Geographical Studies of Mountainous Areas*, 3(10), 57 -81, doi:10.52547/gsma.3.2.57. [In Persian]
21. Motamedi Rad, M., Arjmandzadeh, R., Amiri, E., & Amiri, F. (2025). Time series analysis of the subsidence of Esfarayen plain using radar interferometric method. *Applied Researches in Geographical Sciences*, 25 (78), 376-397, doi:10.61186/jgs.25.78.22. [In Persian]
22. Pacheco, J., Arzate, J., Rojas, E., Arroyo, M., Yutsis, V., & Ochoa, G. (2006). Delimitation of ground failure zones due to land subsidence usind gravity data and finite element modeling in the Queretaro valley, Mexico. *Engineering Geology*, 84:143-160, 10.1016/j.enggeo.2005.12.003
23. Rafiei, F., Gharechelo, S., & Gelian, S. (2014). Evaluation of the interaction of aquifer with land subsidence and its relationship with groundwater level and vegetation changes using differential radar interferometry technique, *Remote Sensing and Geographic Information Systems in Natural Resources*, 12(2), 53-73, doi:10.30495/GIRS.2023.689174. [In Persian]
24. Rafiei, F., Gharechelo, S., &Gelian, S. (2019). Evaluating the impact of groundwater depletion on the rate of subsidence of the Samalghan Plain using radar interferometry, First National Conference on Data Mining in Earth Sciences, Faculty of Earth Sciences Engineering, Arak University of Technology. [In Persian]
25. Salehi, R., Ghafoori, M., Lashkaripour, G.R., & Dehghani, M. (2013). Evaluation Of Land Subsidence In Southern Mahyar Plain Using RADAR Interferometry. *Iranian of Irrigation & Water Engineering*, 3(11), 47-57, https://sid.ir/paper/247268/en. [In Persian]
26. Seifi, Y., & Mirzaei, R. (2017). Comparison of spatial interpolation methods to mapp heavy metals concentrations in surface soil of Aran-O-Bidgol city. *Journal of Environmental Science and Technology*, 19(1), 147-131, doi:10.22034/jest.2017.10341. [In Persian]
27. Shafiei, N, Goli Mokhtari, L., Amirahmadi, A.Gh. & Zandi, R. (2020). Investigation of subsidence of Noorabad plain aquifer using radar interferometry method. *Quantitative Geomorphological Researches*, 8(4), 93-111, doi:10.22034/gmpj.2020.106424. [In Persian]
28. Shankar,H., Singh,D., & Chauhan,P.(2024). Investigation of groundwater induced land subsidence in Ludhiana City using InSAR and Sentinel-1 data, *Quaternary Science Advances13*, 100151, doi:10.1016/ j.qsa.2023.100151. [In Persian]
29. Smith, R. G., Knight, R., Chen, J., Reeves, J. A., Zebker, H. A., Farr, T., & Liu, Z. (2017). Estimating the permanent loss of groundwater storage in the southern S an J oaquin V alley, C alifornia. *Water Resources Research*, *53*(3), 2133-2148.

[ Downloaded from jircsa.ir on 2026-10-31 ]
[ DOR: 20.1001.1.24235970.1404.13.2.3.5 ]

30. Zanganeh Asadi, M. A,. Zandi, R., & Shafiei, N. (2013). Measurement and evaluation of rice and summer crops cultivation and its impact on the subsidence crisis of Noor Abad Mamasani aquifer, *Quantitative Geomorphology Research*, 12(2)46, 184-199, doi:10.22034/gmpj.2023.393690.1432. [In Persian]
31. Zhao, Q., Ma. G., Wang. Q., Yang. T., Liu, M., Gao, W., Falabella, F., Mastro, P., & 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, doi:10.1016/j.isprsjprs.2019.05.005.

[ Downloaded from jircsa.ir on 2026-10-31 ]

[ DOR: 20.1001.1.24235970.1404.13.2.3.5 ]