

Estimation of Subsidence Rate and Groundwater Level Changes in Mashhad Plain

Somayeh Emadodin^{✉1}, Zahra Nazari Gazik²

1. Assistant Professor of Geography, University of Golestan, Gorgan, Iran

✉ E-mail: s.emadodin@gu.ac.ir

2. M.Sc Student of Environmental Hazards, Department of Geography, University of Golestan, Gorgan, Iran

E-mail: Zn99202@gmail.com



How to Cite: Emadodin, S; Nazari Gazik, Z. (2023). Estimation of Subsidence Rate and Groundwater Level Changes in Mashhad Plain. *Geography and Development*, 21 (73), 221-239.

DOI: <http://dx.doi.org/10.22111/GDIJ.2023.42816.3417>

Received:

2 July 2022

Received in revised form:

29 August 2023

Accepted:

27 September 2023

Published online:

1 June 2024

ABSTRACT

In the last decade, subsidence is occurring as a geomorphic hazard in a large part of Iran's plains, including Mashhad plain as one of the important plains. Investigating the subsidence rate and dealing with the causes and influencing factors for risk management is very important. Radar interferometry technique is a powerful tool in estimating subsidence with millimeter accuracy using phase observations. In this paper, 2017-2021 Sentinel 1A satellite data used in order to monitor the subsidence that occurred in Mashhad plain. The results of radar interferometry studies showed that 64 cm of subsidence occurred in the study area during the statistical period.

The information of piezometric wells in the collection area and their changes during the period 1991-2019 were examined in order to find the cause of subsidence. The water level of the wells has reached its maximum decrease in the studied period. The highest drop in the groundwater level has occurred in the central and southeastern regions of the studied area. The lands of the region mostly include gardens and irrigated cultivation. In general, the highest rate of subsidence has been created in areas with a sharp drop in the groundwater level, fine-grained soil texture, and high alluvial thickness.

Keywords:

Subsidence,
Mashhad Plain,
Radar Interferometry,
Sentinel -1,
Groundwater.



© the Author(s).

Publisher: University of Sistan and Baluchestan

Extended Abstract

1. Introduction

Land subsidence can be one of the most dangerous natural phenomena. This phenomenon sometimes occurs due to indiscriminate extraction of aquifers or subsurface dissolution and erosion. The phenomenon of land subsidence can cause irreparable financial and human losses and damage many surface and subsurface structures in urban areas and their suburbs. One of the newest and most effective methods in the study of subsidence is the interferometric technique of radar images. It is a powerful tool for measuring surface topography and its changes over time, and has the ability to estimate subsidence with millimeter accuracy using phase

observations, and can be used to determine the subsidence rate in a certain period of time. Due to the excessive use of underground water in the Mashhad plain, this region has a great potential for subsidence, which can cause many problems in the not so distant future. The aim of the current research is to investigate the subsidence of the Mashhad Plain in the period from 2017 to 2021 using Sentinel 1 radar images. And the effect of the drop of the underground water level on the amount of subsidence is investigated. Mashhad plain is located in Razavi Khorasan province. This area is the meeting point of 3 watersheds of Qaraqom, Central Iran and Atrak. This area is located in the

north of Razavi Khorasan province and it is limited from the north to the ridge of the heights of Hazar Masjid (Kepe Dagh), from the south to the heights of Binaloud and from the northwest to the watershed of Atrak, the length of the basin is about 150 kilometers and the highest point of elevation The watershed is 3300 meters at Binaloud peak and the lowest is 880 meters at the exit of the plain.

2. Methods and Material

In order to investigate the level of subsidence of Mashhad plain and its relationship with the drop of underground water level, first, the rate of land subsidence was calculated by radar interferometric method and then the trend of water level changes of piezometric wells during 28 years was investigated. Finally, the research results were verified by field surveys. In order to process by radar interferometric method, SNAP software was selected to obtain the final results of the subsidence rate based on the phase difference between the images taken on different dates. In order to study the latest status of the underground water level in the study area, the statistical information of piezometric wells from 1370 to 1398 was obtained from Razavi Khorasan regional water. Next, in GIS software, after annual averaging, using the IDW interpolation model, the underground water level map was prepared and evaluated.

3. Result and Discussion

In the investigations carried out with the SLC radar images of sentinel1 satellite in relation to the Mashhad plain, 5 images were processed two by two in the SNAP software and the amount of subsidence recorded for each period was 13 cm for 2017-2018, for the period 2018-2019 about 19 cm, 15 cm for 2019-2020 period and 17 cm for 2020-2021 period. After preparing the subsidence rate map, in order to validate the obtained results, the field visit and the information of 16 rings of piezometric wells of the areas where the subsidence occurred were used and the relationship between the

amount of groundwater loss and the subsidence of the area was analyzed.

4. Conclusion

According to the obtained results, the highest amount of subsidence has occurred in the central and southeastern areas of Mashhad plain (northwest of Mashhad city). The water levels of the wells have reached their maximum reduction in the period from 1991 to 2019. The amount of water level drop in this period was at least 4.87 meters and at most 158.23 meters and it happened mostly in the central and southeastern regions, which is affected by the decrease in rainfall, drought, irrigated farming in the region and excessive pressure on underground water sources in these years. The comparison between the analyzes extracted from the data of the well points and satellite images also shows the relationship between the lowering of the groundwater level and the subsidence of the land in the studied area.

Especially in the villages of Nomhan and Chahcheh, which have the highest drop in the underground water level and are located in the risk zone of high subsidence. It is necessary for organizations and institutions in charge to reduce any damage to human settlements, population and existing infrastructure in these areas by using the subsidence risk zoning map and by adopting appropriate policies and plans before the crisis occurs. Due to the fact that the main cause of subsidence in the Mashhad plain is the excessive exploitation of underground water, there should be a management of extraction. Harvesting management includes harvesting water from parts of the basin where the soil is coarser and the problem of land subsidence is less. For this purpose, it is necessary to know more precisely the geological features of the aquifer. Also, the optimal cultivation pattern should be prepared taking into account the climatic conditions and water and soil conditions of the region.

Keywords: Subsidence, Mashhad plain, Radar interferometry, Sentinel-1, Groundwater.

5. References

- Aghayary, L., Abedini, M., asghari, S (2022). Estimation of subsidence rate using radar interferometry technique and groundwater parameters and land use (Case study: Ardabil plain), *Quantitative Geomorphological Research*, Vol .11, N. 41,117-132.
[Doi: 10.22034/gmpj.2022.304999.1302](https://doi.org/10.22034/gmpj.2022.304999.1302) (In Persian)
- Agustan, A.S., Takeo, I (2016). Measuring Deformation in Jakarta through Long Term Synthetic Aperture Radar (SAR) Data Analysis, *Environmental Science* 47.
[DOI: 10.1088/1755-1315/47/1/012022](https://doi.org/10.1088/1755-1315/47/1/012022)
- Burgmann, R., Rosen, P.A., Fielding, E.J (2000). Synthetic aperture radar interferometry to measure earth's surface topography and its deformation. *Annual Review of Earth and Planetary Sciences*, Vol.28, 169-209.
- Crosetto, M., Gili, J.A., Monserrat, O., Cuevas-González, M., Corominas, J., Serral, D (2013). Interferometric SAR monitoring of the Vallcebre landslide (Spain) using corner reflectors, *Natural Hazards and Earth System Sciences*, Vol. 13, No 4, 923-933.
<https://doi.org/10.1016/j.jaredenv.2020.104238>
- Chen, M., Tomás, R., Li, Zh. Motagh, M., Li, T., Hu, L., Gong, H., Li, X., Yu, J., Gong, X (2016). Imaging Land Subsidence Induced by Groundwater Extraction in Beijing (China) Using Satellite Radar Interferometry, *Remote Sens*, 8(6), 468.
<https://www.mdpi.com/2072-4292/8/6/468>
- Du, Y., Feng, G., Peng, X., Li, Z (2017). Subsidence Evolution of the Leizhou Peninsula, China, Based on InSAR Observation from 1992 to 2010. *Applied sciences*, 7(5), 466.
<https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0303243418300205>
- Emadodin, S., Shadieemajd, N., Arekhi ,S (2020). Analysis of the impact of land use change on groundwater level drop) Case study: Mahidasht, Kermanshah province),*Journal of Natural Environmental Hazards*, Vol. 9, N. 25 ,125-142.
[Doi: 10.22111/jneh.2020.31698.1565](https://doi.org/10.22111/jneh.2020.31698.1565) (In Persian)
- Emadodin , S., Shahi, V., Arekhi, S., Agh Atabay, M (2022) Determining the Amount of Land Subsidence in Jajrood Alluvial Fan Using Differential Radar Interferometry Technique, *Physical Geography Research Quarterly*, Vol. 54, N. 2,169-183.
<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>(In Persian)
- Gharechelou, S., Akbari Ghoochani, H., Golian, S., Ganji, K (2021) Evaluation of land subsidence relationship with groundwater depletion using Sentinel-1 and ALOS-1 radar data (Case study: Mashhad plain), *Journal of RS and GIS for Natural Resources*, Vol. 12, N. 3 ,40-61.
[Doi: 10.30495/girs.2021.680336](https://doi.org/10.30495/girs.2021.680336) (In Persian)
- Goorabi, A., Karimi, M., Yamani, M., Perissin, D (2020). Land subsidence in Isfahan metropolitan and its relationship with geological and geomorphological settings revealed by Sentinel-1A InSAR observations. *Journal of Arid Environments*, Vol.181, 1-17.
<https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0140196320301385>
- Guo, J., Lv Zhou; Chaolong Yao; Jiyuan Hu (2016). Surface Subsidence Analysis by Multi-Temporal InSAR and GRACE: A Case Study in Beijing, *Sensors* 16(9), 1-18.
<https://www.mdpi.com/1424-8220/16/9/1495>
- Hafezi Moghaddas, N (2018). Land subsidence management in Mashhad plain, *Second Seminar of Engineering Geology and Environment of Mashhad, Ferdowsi University of Mashhad* (In Persian)
- Hamidi, R., Safari , H., Rostaei, M (2021). Physiochemical characteristics of Ore-bearing fluids for celestite occurrence in the Zagros fold-thrust belt: using micro thermometry studies, *Iranian Journal of Geology*, Vol. 15, N.60, 43-57.
[Doi: 20.1001.1.17357128.1400.15.60.3.1](https://doi.org/10.1001.1.17357128.1400.15.60.3.1)(In Persian)

- Janbaz fotamy, M. , Kholghi, M., Abdeh Kolahchi, A., Roostaei, M (2020). Land Subsidence Assessment due to Groundwater Exploration by using Differential Radar Interferometry Technique, Case Study: Qazvin province, Journal of Iran-Water Resources Research, Vol.16, N.3, 133-147.
[Doi: 20.1001.1.17352347.1399.16.3.10.8](https://doi.org/10.1001.1.17352347.1399.16.3.10.8) (In Persian)
- Jeanne, P., Faar, T. G., Rutqvist, J., Vasco, D. W (2019). Role of agricultural activity on land subsidence in the Jouquin Valley, California, Journal of Hydrology, Vol. 569, 462-469.
<https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0022169418309661>
- Khorrami, M., Abrishami, S., Maghsoud, Y (2020). Mashhad Subsidence Monitoring by Interferometric Synthetic Aperture Radar Technique, Amirkabir Journal of Civil Engineering, Vol.51, N.6, 1187-1204.
[Doi: 10.22060/ceej.2018.14300.5617](https://doi.org/10.22060/ceej.2018.14300.5617) (In Persian)
- 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.
<https://doi.org/10.3390/rs14153722>
- Moradi, A., Emadodin, S., Arekhi, S., Rezaei, KH (2020). Land subsidence analysis using radar interferometry technique, geotechnical and piezometric wells (case study: Urban region 18 Tehran), Journal of Spatial Analysis Environmental Hazards, Vol. 7, N. 1, 153-176.
<https://www.sid.ir> (In Persian)
- Mohammady, M., Pourghasemi, H.R., Amiri, M (2021). Investigation of Subsidence Susceptibility in the Semnan Plain Using Entropy Model, Journal of Watershed Management Research, Vol. 12, N. 23, 75-85 .
[Doi: 20.1001.1.22516174.1400.12.23.7.2](https://doi.org/10.1001.1.22516174.1400.12.23.7.2) (In Persian)
- Mohammadhasani, M., Shikh Shariate Kermani, B (2021). Determining the Rate of Land Subsidence using Radar Interferometry Technique (Case Study: Industrial Area West of Kerman), Journal of Transportation Research, Vol. 18, N. 3, 75-90.
[Doi: 10.22034/tri.2021.232651.2770](https://doi.org/10.22034/tri.2021.232651.2770) (In Persian)
- Notti, D., Mateos, R.M., Monserrate, O., Devanthery, N., Peinado, T., Roldan, F.J., Fernandez-Chacon, F., Galve, J.P., Lamas, F., Azanon, J.M. (2016). Lithological control of land subsidence induced by groundwater withdrawal in new urban AREAS (Granada Basin, SE Spain). Multiband DInSAR monitoring. Hydrological Process, Vol.30, 1-15.
<https://onlinelibrary.wiley.com/doi/abs/10.1002/hyp.10793>
- Salehi Moteahd , F., Hafezi Moghaddas ,N., Golamreza Lashkaripour, G.M., Dehghani, M (2019). Land Subsidence and its Consequences in Mashhad City by Integrating Radar Interferometry and Field Measurements, Journal of Engineering Geology, Vol. 13, N. 3, 435-462 (In Persian)
[Doi: 10.18869/acadpub.jeg.13.3.435](https://doi.org/10.18869/acadpub.jeg.13.3.435)
- Salehi Moteahd , F., Hafezi Moghaddas ,N., Lashkaripour, Dehghani, M (2020), Evaluation of geological causes of land subsidence in Mashhad plain and its effects on Mashhad city, Second Seminar of Engineering Geology and Environment of Mashhad, Ferdowsi University of Mashhad (In Persian)
<https://www.symposia.ir/EEGM02>
- Shafiei , N., GoliMokhtari, L., Amir Ahmadi, A., Zandi, R (2020) Investigation of subsidence of Noorabad plain aquifer using radar interferometry method, Quantitative Geomorphological Research, Vol. 8, N. 4, 93-111.
[Doi: 10.30495/girs.2023.685498](https://doi.org/10.30495/girs.2023.685498) (In Persian)
- Thoang, T.T., Giao, P.H (2015). Subsurface characterization and prediction of land subsidence for HCM City, Vietnam. Engineering Geology, 199, 107-124.
<https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0013795215300818>



بر آورد میزان فرونشست زمین با استفاده از تکنیک تداخل سنجی راداری و تغییرات تراز آب زیرزمینی (مطالعه موردی: دشت مشهد)

دکتر سمیه عمادالدین^{۱*}، زهرا نظری گزیک^۲

مقاله پژوهشی

چکیده

در دهه اخیر فرونشست به عنوان یک مخاطره ژئومورفیک در بخش وسیعی از دشت‌های ایران از جمله دشت مشهد به عنوان یکی از دشت‌های مهم در حال وقوع است؛ بنابراین بررسی میزان نرخ فرونشست و پرداختن به علل و عوامل تأثیرگذار در جهت مدیریت خطر، دارای اهمیت زیادی است. در این مقاله برای پایش فرونشست اتفاق افتاده در دشت مشهد، از تکنیک تداخل سنجی راداری با دقت میلی‌متری و از داده‌های ماهواره Sentinel 1A سال‌های ۲۰۱۷ تا ۲۰۲۱ استفاده شده است. نتیجه مطالعات حاصل از تداخل سنجی راداری نشان داد، در طول دوره آماری در منطقه مورد مطالعه ۶۴ سانتی‌متر فرونشست اتفاق افتاده است. در ادامه در جهت یافتن علت فرونشست، اطلاعات چاه‌های بی‌زومتری موجود در منطقه اخذ و تغییرات آن‌ها در طول دوره ۱۳۹۸-۱۳۷۰ بررسی شد. سطح آب چاه‌ها در بازه زمانی مورد مطالعه به بیشترین حد کاهش خود رسیده است. بیشترین میزان افت سطح آب زیرزمینی در مناطق مرکزی و جنوب شرقی محدوده مورد مطالعه رخ داده است که متأثر از کاهش بارندگی، خشکسالی و زمین‌های برنج و باغی زیاد در منطقه و فشار بیش از حد به منابع آب‌های زیرزمینی در این سال‌ها است. به طور کلی بیشترین نرخ فرونشست در مناطق با افت شدید سطح آب زیرزمینی، بافت خاک ریزدانه و ضخامت آبرفت زیاد اتفاق افتاده است.

جغرافیا و توسعه، شماره ۷۳، زمستان ۱۴۰۲
تاریخ دریافت: ۱۴۰۱/۰۴/۱۱
تاریخ بازنگری داوری: ۱۴۰۲/۰۶/۰۷
تاریخ پذیرش: ۱۴۰۲/۰۷/۰۵
صفحات: ۲۳۹-۲۲۱



واژه‌های کلیدی:
فرونشست، دشت مشهد، تداخل سنجی راداری، تصاویر راداری سنتینل ۱، آب زیرزمینی.

مقدمه

ویژگی‌های خاک و سنگ شود (حمیدی و همکاران، ۱۴۰۰: ۴۳). در ایران آب زیرزمینی منبع اصلی تأمین آب در بسیاری از مناطق است، به علاوه روش‌های قدیمی و نادرست کشاورزی نیاز به منابع آب را بیشتر کرده است که این موضوع منجر به بهره‌برداری بیش از حد از منابع آب زیرزمینی می‌شود. افزایش تنش و فشار منجر به فشردگی و در نتیجه فرونشست زمین می‌شود (محمدی و همکاران، ۱۴۰۰: ۷۶). متأسفانه شدت فرونشست در دشت‌های ایران، دست‌کم ۹۰ برابر بیشتر از بحرانی‌ترین شرایط در کشورهای توسعه‌یافته جهان است. نرخ فرونشست سالانه چهار میلی‌متر در

پدیده فرونشست به حرکت قائم رو به پایین سطح زمین گفته می‌شود که می‌تواند با بردار اندکی افقی همراه باشد که در مقیاس بزرگ به صورت تدریجی یا آنی رخ می‌دهد (جانباز قومی و همکاران، ۱۳۹۹: ۱۳۴). فرونشست سطح زمین می‌تواند یکی از خطرناک‌ترین پدیده‌های طبیعی باشد. این پدیده گاهی به دلیل برداشت بی‌رویه از آبخوان‌ها یا انحلال و فرسایش زیرسطحی رخ می‌دهد و می‌تواند منجر به حوادث جبران‌ناپذیری مانند آسیب به زیرساخت‌ها و حتی نابودی منابع آب‌های زیرزمینی در مناطق حساس از نظر

s.emadodin@gu.ac.ir

Zn99202@gmail.com

۱. استادیار گروه جغرافیا، دانشگاه گلستان، گرگان، ایران (نویسنده مسئول)

۲. دانشجوی کارشناسی ارشد مخاطرات محیطی، دانشگاه گلستان، گرگان، ایران

مطابق با نتایج در پکن، فرونشست به صورت ناهموار و به‌طور بارز مشخص شده است. بیشترین نرخ فرونشست در محدوده مرکزی شهر و در حدود ۱۰ میلی‌متر در سال است که مقدار آن در محدوده تانژو به بیش از ۱۴۰ میلی‌متر در سال رسیده است. بررسی‌هایی که در این مطالعه روی آب‌های زیرزمینی انجام شد، ارتباط بالای میزان فرونشست زمین و افت سطح آب‌های زیرزمینی را نشان داد. به‌طوری‌که شکل فرونشست و افت سطح آب‌های زیرزمینی منطبق بر هم به‌دست آمده است. آگوستان 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. دو و همکاران (۲۰۱۷) به ارزیابی میزان فرونشست شبه‌جزیره لیژاوو در چین با استفاده از تصاویر راداری پرداخته‌اند. در این تحقیق از روش تداخل سنجی راداری و تصاویر سال‌های ۱۹۹۲ تا ۲۰۱۰ استفاده شده است. نتایج تحقیق بیانگر این است که حداکثر میزان فرونشست با ۳۲- میلی‌متر در نوار خط ساحلی اتفاق افتاده است. جین و همکاران (۲۰۱۹) به بررسی نقش فعالیت‌های کشاورزی در فرونشست زمین در دره سان خواکین در کالیفرنیا پرداختند. خشکسالی‌های ۲۰۰۷ تا ۲۰۱۰ و ۲۰۱۲ موجب افزایش شدید استفاده از آب‌های زیرزمینی در منطقه مورد مطالعه و در نتیجه باعث فرونشست شد. یافته‌های اصلی آن‌ها نشان داد در مناطقی که تقاضای استفاده از آب زیرزمینی بیشتر باشد، فرونشست زمین نیز در منطقه زیاد است. آن‌ها با استفاده از تصاویر ماهواره‌ای و مدل‌سازی، مکان‌هایی که در آینده بیشتر در معرض تخریب قرار دارند را شناسایی و مدیریت منابع آب زیرزمینی را پیشنهاد دادند. گورابی و همکاران (۲۰۲۰) در بررسی

کشورهای پیشرفته بحرانی قلمداد می‌شود، این درحالی است که در سال ۱۳۸۵، نرخ فرونشست در کشور ما ۱۷ سانتی‌متر در سال بوده که در سال ۱۳۹۰ به ۳۶ سانتی‌متر در سال افزایش پیدا کرده است (حمیدی و همکاران، ۱۴۰۰: ۴۴). دشت مشهد یکی از دشت‌های مهم در استان خراسان رضوی است که یکی از منابع آبی پشتیبان برای استفاده در کشاورزی و صنعت است. فشار بیش از حد به منابع آب زیرزمینی با پمپاژ زیاد و کمبود بارش باعث شده است که تغذیه آبخوان به‌خوبی صورت نگیرد. افت سطح آب زیرزمینی در دشت مشهد اثرات نامناسبی را بر آبدهی چاه‌ها، تخریب قنوات، کیفیت آب و فرونشست زمین خواهد داشت (قره چلو و همکاران، ۱۴۰۰: ۱۱).

یکی از جدیدترین و مؤثرترین روش‌ها در مطالعه فرونشست، تکنیک تداخل‌سنجی تصاویر راداری است. یک ابزار قوی برای اندازه‌گیری توپوگرافی سطح و تغییرات آن در طول زمان است (Burgmann et al, 2000: 169 & 170) و توانایی برآورد فرونشست را با دقت میلی‌متری با استفاده از مشاهدات فاز دارا هستند (Crosetto et al, 2013: 923) و می‌تواند در تعیین میزان فرونشست در بازه زمانی مشخص مورد استفاده قرار گیرد.

با توجه به اهمیت موضوع مورد مطالعه، در طی سال‌های اخیر تحقیقات متعددی در سطح جهان و ایران در رابطه با فرونشست با تکنیک تداخل‌سنجی راداری صورت گرفته است. گوآ و همکاران (۲۰۱۶) به بررسی رابطه بین فرونشست زمین و تغییرات آب‌های زیرزمینی در پکن پایتخت چین پرداختند. در این مطالعه نرخ فرونشست با تکنیک تداخل‌سنجی راداری و با استفاده از ۱۸ تصویر ENVISAT ASAR بین سال‌های ۲۰۰۷ تا ۲۰۱۰ بررسی شد. میزان فرونشست حاصل از این مطالعات با دقت کمتر از ۵ میلی‌متر تأیید شد.

فرونشست زمین در کلان‌شهر اصفهان با تصاویر Sentinel-1 میزان فرونشست زمین را به میزان ۵- تا ۱۰۰- میلی‌متر در سال برآورد کردند که از جنوب به بخش‌های شمالی، شمال شرقی و شرقی کلان‌شهر اصفهان افزایش می‌یابد، درحالی‌که بخش‌های جنوبی شهر تقریباً یک منطقه پایدار هستند و میزان فرونشست قابل توجه در آن مشاهده نمی‌شود. خان و همکاران (۲۰۲۲) به بررسی فرونشست زمین در شهر اسلام‌آباد 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 کرده‌اند. خرمی و همکاران در سال ۱۳۹۸ به بررسی فرونشست شهر مشهد با روش تداخل‌سنجی راداری پراکنشگر دائمی از سال ۲۰۱۴ تا ۲۰۱۷ پرداختند و بیشینه میزان فرونشست را ۱۴ سانتی‌متر به‌دست آوردند. مرادی و همکاران (۱۳۹۹) در تحلیل فرونشست با استفاده از تکنیک تداخل‌سنجی راداری، اطلاعات چاه‌های ژئوتکنیکی و پیژومتری در منطقه ۱۸ شهر تهران به این نتیجه رسیدند که منطقه ۱۸ شهری روی مخروط افکنه جوان کن که توزیع بالای گراول و متخلخل را در عمق‌های تحتانی دارد، قرار گرفته است. با توجه به عمق چاه‌های موجود در منطقه که ضخامت بالای آبرفت را نشان می‌دهد، به همراه افت سطح ایستابی و خالی شدن خلل و فرج بین دانه‌بندی‌ها که منجر به افزایش وزن آبرفت در جهت نیروی گرانشی می‌شود، وجود پدیده فرونشست را موجه نشان می‌دهد. حداکثر میزان فرونشست به‌دست‌آمده از مطالعه تداخل‌سنجی راداری در حدود ۴۳۰ میلی‌متر و در محدوده محله یافت‌آباد است. نرخ فرونشست از غرب به شرق و از شمال به جنوب با افزایش همراه است. به‌طوری‌که قسمت شرقی و جنوبی منطقه مورد مطالعه در پهنه کامل فرونشست قرار گرفته است. با توجه به نتایج به‌دست‌آمده از مطالعه تداخل‌سنجی

راداری، بخش شرقی منطقه ۱۸ شهری بیشترین تأثیر را از پدیده فرونشست دارد. شفیع‌ی و همکاران (۱۳۹۹) در بررسی فرونشست آبخوان دشت نورآباد با استفاده از روش تداخل‌سنجی راداری به این نتیجه رسیدند که در محدوده دشت در بازه زمانی ۱۲ ساله بیشترین میزان افت آب زیرزمینی (۲۲- متر) در بخش‌های شرقی، جنوبی و مرکزی آبخوان واقع در چاه‌های پیژومتری اسکان عشایر، خومه‌زار، شهرک صنعتی، تل مشکی و شور است. نقشه‌های حاصل از فرونشست نشان داد که نرخ نشست در هر سال میانگین ۴ سانتی‌متر و طی بازه زمانی ۴ ساله حدود ۱۶ سانتی‌متر است. آقاییاری و همکاران (۱۴۰۱) در بررسی فرونشست دشت اردبیل از سال ۲۰۱۶ تا ۲۰۲۰، مجموع 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 مصارف بالای کشاورزی داشته‌اند، رخ داده است.

با توجه به مصرف بی‌رویه آب‌های زیرزمینی در دشت مشهد، این منطقه از استعداد فرونشست زیادی برخوردار است که می‌تواند در آینده‌ای نه‌چندان دور، مشکلات جانی، مالی و حتی اقتصادی در سطح کلان را در پی داشته باشد. در همین راستا هدف تحقیق حاضر، بررسی وضعیت فرونشست دشت مشهد در بازه زمانی ۲۰۱۷ تا سال ۲۰۲۱ با استفاده از تصاویر راداری سنتینل ۱ است و تأثیر افت سطح آب‌های زیرزمینی در میزان فرونشست بررسی می‌شود.

روش پژوهش

به‌منظور بررسی میزان فرونشست دشت مشهد و ارتباط آن با افت سطح آب‌های زیرزمینی، ابتدا میزان فرونشست زمین به روش تداخل‌سنجی راداری محاسبه شد و سپس روند تغییرات سطح آب چاه‌های پیژومتری در طول ۲۸ سال مورد بررسی قرار گرفت. درنهایت نتایج

به منظور پردازش به روش تداخل‌سنجی راداری، نرم‌افزار SNAP انتخاب شد تا نتایج نهایی نرخ فرونشست براساس اختلاف فاز بین تصاویر اخذشده در تاریخ‌های متفاوت به دست آید. شکل ۱ مراحل انجام تداخل‌سنجی رادار را نشان می‌دهد.

به منظور مطالعه آخرین وضعیت سطح آب‌های زیرزمینی منطقه مورد مطالعه، اطلاعات آماری چاه‌های پیژومتری سال‌های ۱۳۷۰ تا ۱۳۹۸ از آب منطقه‌ای خراسان رضوی اخذ شد که در ادامه در نرم‌افزار GIS بعد از میانگین‌گیری سالانه با استفاده از مدل درون‌یابی IDW نقشه سطح آب زیرزمینی تهیه و مورد ارزیابی قرار گرفت.

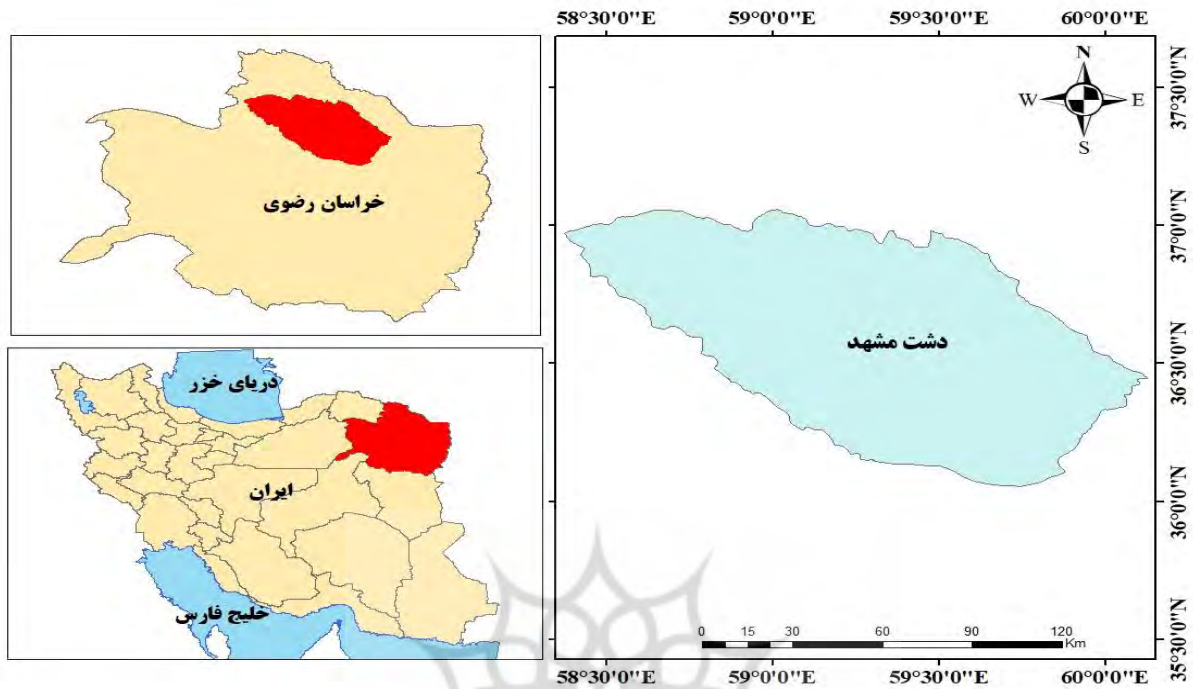
تحقیق با پیمایش‌های میدانی مورد صحت‌سنجی قرار گرفت.

امروزه تکنیک تداخل‌سنجی راداری به‌عنوان یک ابزار قوی برای اندازه‌گیری تغییر شکل سطحی پوسته زمین در طول زمان استفاده می‌شود و می‌تواند اطلاعات ارزشمندی درباره پایش فرونشست ارائه دهد (Notti et al, 2016: 1). روش تداخل‌سنجی راداری با مقایسه سیگنال‌های فاز برگشتی دو دسته داده‌های رادار دریچه مصنوعی که از یک منطقه در دو زمان مختلف اخذ شده‌اند، قادر به اندازه‌گیری تغییرات سطح زمین در آن بازه زمانی است (محمدحسینی و شیخ شریعتی کرمانی، ۱۴۰۰: ۷۷). برای انجام فرایند تداخل‌سنجی از تصاویر راداری Sentinel-1 سال‌های ۲۰۱۷ تا ۲۰۲۰ با فرمت (SLC) تک‌منظر با پوراریزاسیون (۷۷) (جدول ۱) برای محاسبه میزان جابجایی استفاده شده است.

جدول ۱: مشخصات تصاویر راداری مورد استفاده

شماره	تاریخ تصویر	فرمت تصویر	حالت تصویربرداری	گذر تصویربرداری	خط مبنا (متر)
۱	۲۰۱۷/۰۳/۱۷	Slc	Iw	صعودی	۱۶۳ تا ۱۱۰-
۲	۲۰۱۸/۰۱/۲۳	Slc	Iw	صعودی	۱۶۳ تا ۱۱۰-
۳	۲۰۱۹/۰۲/۲۳	Slc	Iw	صعودی	۱۶۳ تا ۱۱۰-
۴	۲۰۲۰/۰۱/۱۰	Slc	Iw	صعودی	۱۲۹ تا ۱۱۰-
۵	۲۰۲۱/۰۱/۱۲	Slc	Iw	صعودی	۱۲۸ تا ۳۳-

مأخذ: نگارندگان، ۱۴۰۱



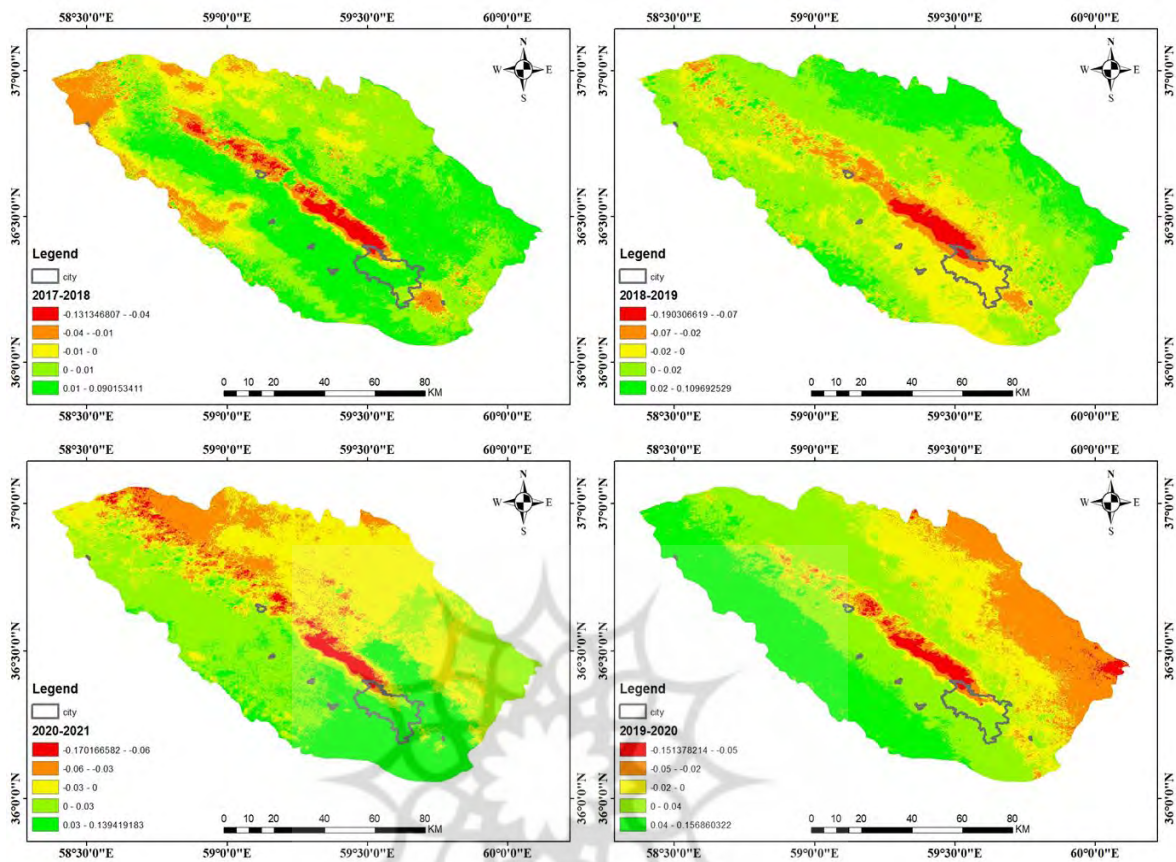
شکل ۲: محدوده مورد مطالعه

تهیه و ترسیم: نگارندگان، ۱۴۰۱

بحث و نتایج

به ترتیب ۱۳ سانتی متر برای ۲۰۱۸-۲۰۱۷، برای دوره ۲۰۱۹-۲۰۱۸ حدود ۱۹ سانتی متر، ۱۵ سانتی متر برای دوره ۲۰۲۰-۲۰۱۹ و ۱۷ سانتی متر برای دوره ۲۰۲۰-۲۰۲۱ به دست آمد (شکل ۳).

در بررسی‌های انجام شده با تصاویر راداری SLC ماهواره سنتیل ۱ در رابطه با دشت مشهد ۵ تصویر به صورت دوبه دو در نرم افزار SNAP مورد پردازش قرار گرفت و میزان فرونشست‌های ثبت شده برای هر دوره



شکل ۳: تغییرات فرونشست از سال ۲۰۱۷ تا ۲۰۲۱

تهیه و ترسیم: نگارندگان، ۱۴۰۱

مناطقى كه فرونشست اتفاق افتاد، استفاده شد و ارتباط بین میزان افت آب‌های زیرزمینی با فرونشست منطقه تحلیل شده است.

پس از تهیه نقشه میزان فرونشست، به منظور اعتبارسنجی نتایج به دست آمده، از بازدید میدانی (شکل ۴) و اطلاعات ۱۶ حلقه چاه‌های پیژومتری

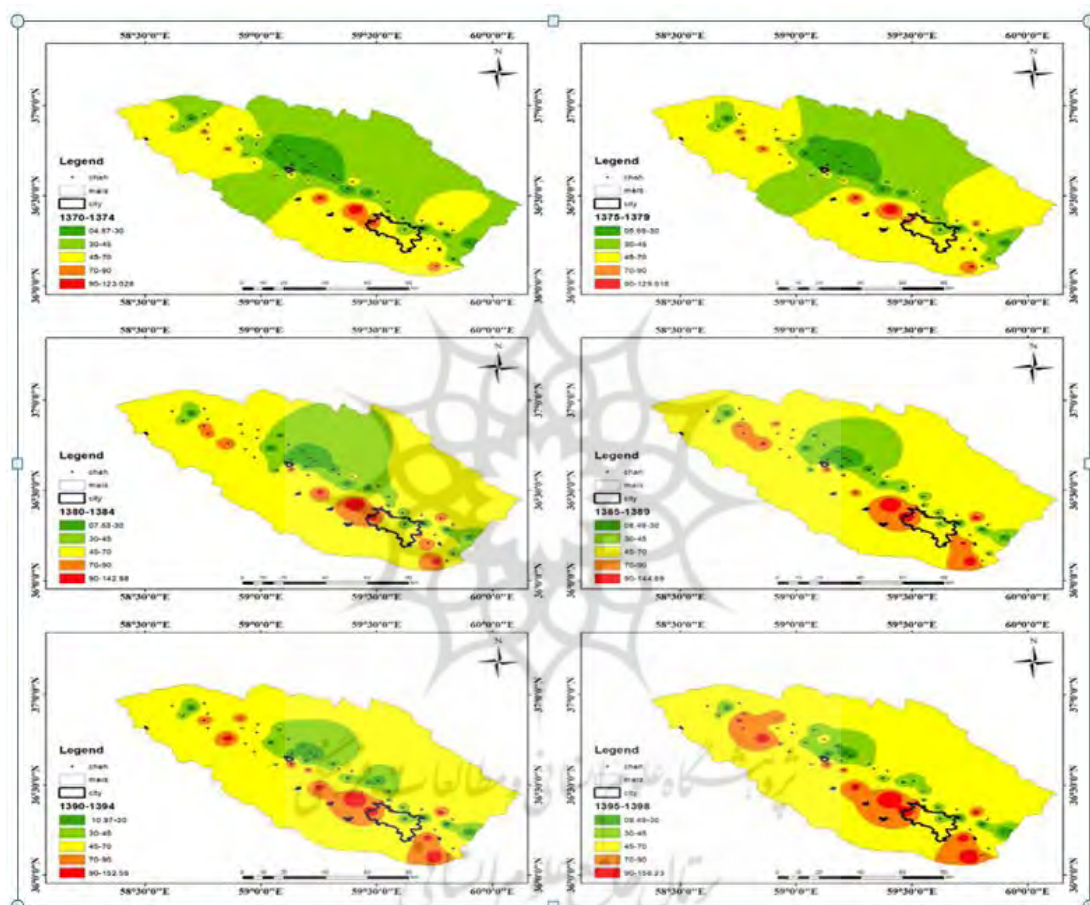


شکل ۴: نمونه‌هایی از فرونشست در منطقه مورد مطالعه

تهیه و ترسیم: نگارندگان، ۱۴۰۱

به دلیل افزایش تعداد چاه‌های عمیق و تخلیه از آبخوان نسبت به سایر قسمت‌های دشت باشد. این میزان افت با نقشه‌های فرونشست به دست آمده از تصاویر راداری در سال‌های مورد بررسی مطابقت نشان می‌دهد.

براساس شکل ۵ که نقشه تراز آب زیرزمینی دشت مشهد را از سال ۱۳۷۰ تا ۱۳۹۸ نشان می‌دهد، می‌توان بیان کرد که طی سال‌های مذکور بیشترین افت سطح آب در بخش مرکز و جنوب اتفاق افتاده است که مقدار آن بین ۴,۸۷ تا ۱۵۸,۲۳ متر می‌رسد که می‌تواند



شکل ۵: نقشه اختلاف ارتفاع براساس متر از سال ۱۳۷۰ تا ۱۳۹۸

تهیه و ترسیم: نگارندگان، ۱۴۰۱

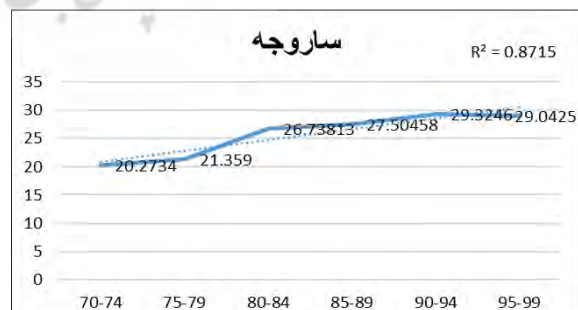
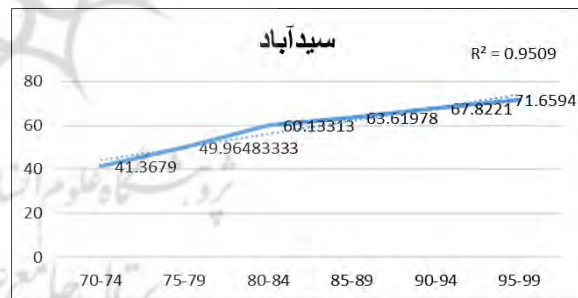
یکه‌لنگه، جیم‌آباد، شورچه، سیدآباد، سهل‌الدین، چچچه، ساروچه، تنگل شور، نومهن و جمع‌آباد روند افت آب به صورت صعودی بوده و در بقیه چاه‌های مورد بررسی ابتدا افت آب کم شده و دوباره افزایش یافته است. شکل ۷ موقعیت روستاهایی که بیشترین افت سطح آب زیرزمینی را دارد، نشان می‌دهد.

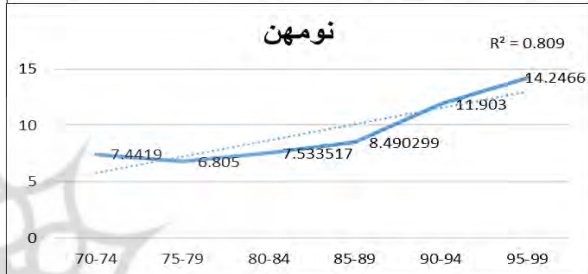
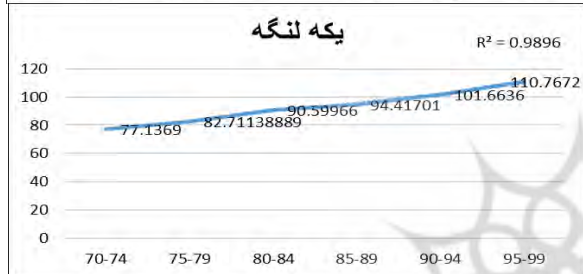
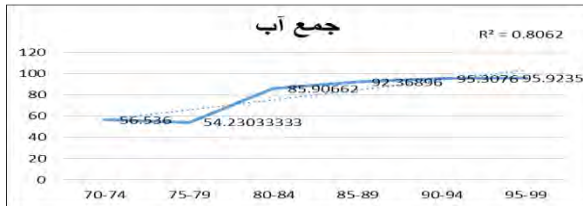
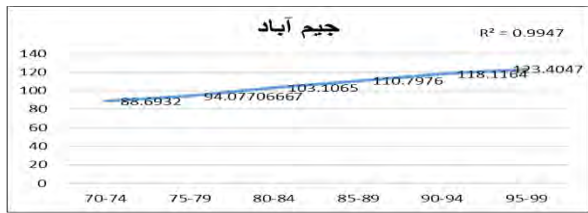
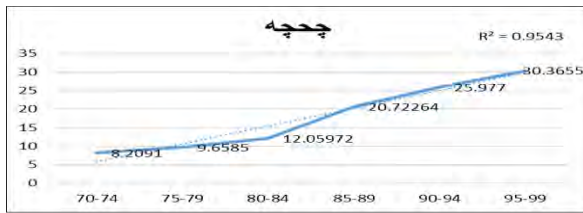
با به دست آوردن نمودارهای افت و خیز تراز آب و با به دست آوردن R^2 از روند افت و خیز چاه‌ها و همچنین میزان افت سطح آب زیرزمینی برای مختصات هر کدام از چاه‌های محدوده، رابطه معناداری آن‌ها مورد بررسی قرار گرفت (جدول ۲ و شکل ۶). براساس نمودارهای سطح آب در چاه‌های مؤمن‌آباد،

جدول ۲: میزان افت سطح آب چاه‌ها در طول دوره آماری

نام محل	X	Y	70-74	75-79	80-84	85-89	90-94	95-99
مؤمن آباد	656500	4080500	78.2992	79.26124	84.15227	89.04577	89.8893	96.0171
نومهن	697700	4061500	7.4419	6.805	7.533517	8.490299	11.903	14.2466
هاشم آباد	702100	4040600	96.1051	96.37424	98.63655	77.16157	98.5155	98.3294
یکه لنگه	665800	4069800	77.1369	82.71139	90.59966	94.41701	101.6636	110.7672
اخلمد	676100	4061450	66.8429	56.35767	58.96394	58.76418	59.9958	63.2934
تنگل شور- مرغ پردک	754500	4004200	26.1418	27.47786	30.99056	38.60882	44.7763	48.045
جمع آب	690600	4054500	56.536	54.23033	85.90662	92.36896	95.3076	95.9235
جوی پایین	706800	4054800	15.2623	17.566	22.88619	20.43068	22.3215	34.9135
جیم آباد	748200	3999500	88.6932	94.07707	103.1065	110.7976	118.1164	123.4047
چحچه	712600	4046400	8.2091	9.6585	12.05972	20.72264	25.977	30.3655
ساروجه	685500	4075300	20.2734	21.359	26.73813	27.50458	29.3246	29.0425
سهل الدین	720500	4043750	11.8268	15.19217	19.42343	22.82881	25.0138	25.9966
سیدآباد	672500	4066500	41.3679	49.96483	60.13313	63.61978	67.8221	71.6594
شفیع	658000	4075850	70.9717	72.37327	75.16252	78.01997	49.8367	78.7179
شورچه	651550	4088200	13.4926	14.0683	15.46278	16.81725	16.6116	16.7824
شیر حصار	714100	4050500	64.5675	43.63933	49.9465	55.2815	57.679	63.3439

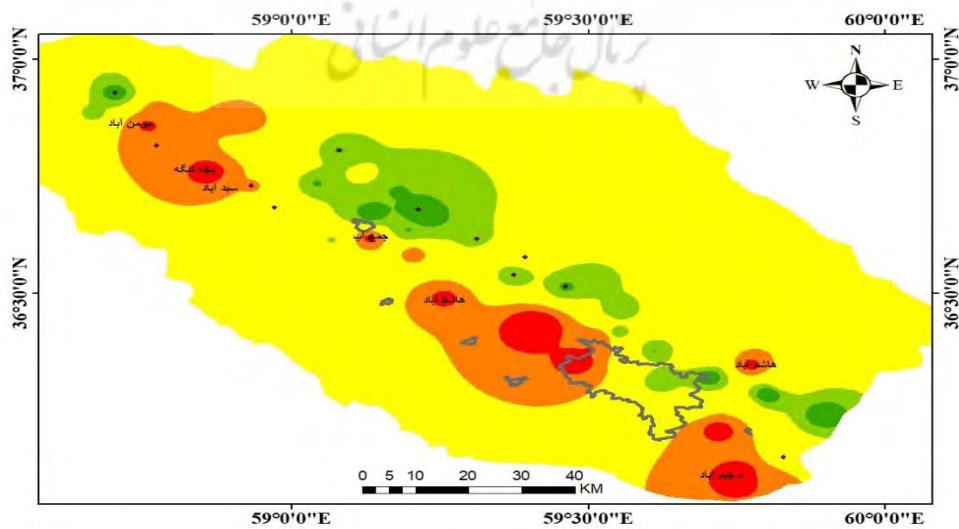
مأخذ: نگارندگان، ۱۴۰۱





شکل ۶: نمودار اختلاف ارتفاع براساس متر از سال ۱۳۷۰ تا ۱۳۹۸

تهیه و ترسیم: نگارندگان، ۱۴۰۱



شکل ۷: موقعیت روستاهایی که بیشترین افت سطح آب زیرزمینی را دارند

تهیه و ترسیم: نگارندگان، ۱۴۰۱

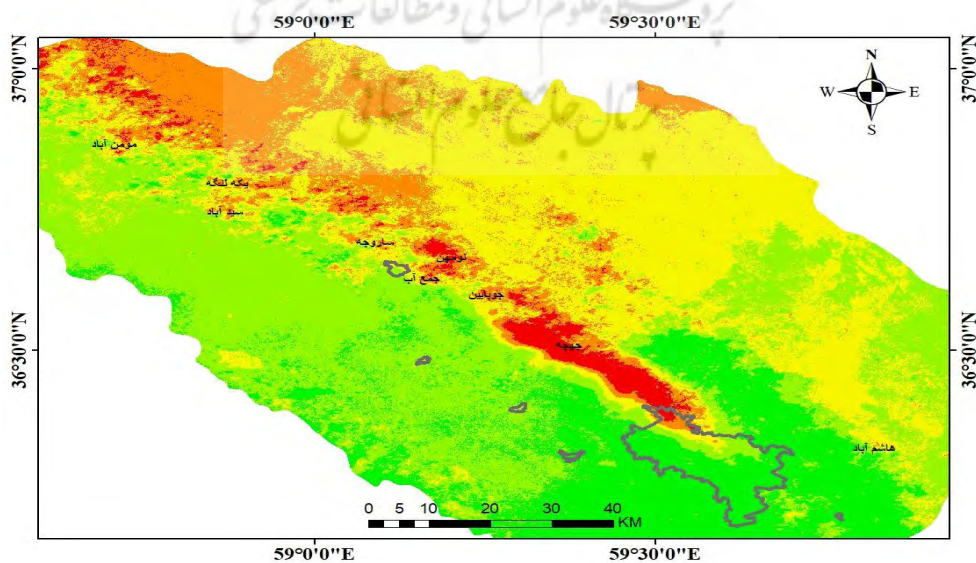
فرونشست در مؤمن آباد، نومهن، یکه لنگه، جوی پایین، چچچه، ساروجه، شورچه و شیر حصار اتفاق افتاده است. بررسی جدول ۳ نشان می‌دهد که افت سطح آب چاه با فرونشست رابطه مستقیم دارد. شکل ۸ موقعیت روستاهایی که فرونشست در آن اتفاق افتاده است را نشان می‌دهد.

باتوجه به جدول ۳ فرونشست در سال ۲۰۱۷-۲۰۱۸ در چاه نومهن، چچچه و شورچه و در سال ۲۰۱۸-۲۰۱۹ فرونشست در روستاهای مؤمن آباد، نومهن، هاشم آباد، یکه لنگه، جمع آب، جیم آباد، چچچه، سهل الدین، سیدآباد و شیر حصار در سال ۲۰۱۹-۲۰۲۰ فرونشست در نومهن، چچچه و سهل الدین و در سال ۲۰۲۰-۲۰۲۱

جدول ۳: رابطه چاه آب با فرونشست

اسم چاه	X	Y	2017-2018	2018-2019	2019-2020	2020-2021
مؤمن آباد	656500	4080500	0.007784	-0.01273	0.010605	-0.04494
نومهن	697700	4061500	-0.00225	-0.00329	-0.00807	-0.0543
هاشم آباد	702100	4040600	0.016091	-0.00137	0.024882	0.020286
یکه لنگه	665800	4069800	0.023736	-0.00633	0.023871	-0.01568
اخلمد	676100	4061450	0.017813	0.002729	0.030122	0.01747
تنگل شور	754500	4004200	0.006987	0.000271	0.009975	0.056928
جمع آب	690600	4054500	0.003735	-0.00787	0.01267	0.013069
جوی پایین	706800	4054800	0.004091	0.004078	0.004814	-0.00949
جیم آباد	748200	3999500	0.006045	-0.00478	0.00344	0.057265
چچچه	712600	4046400	-0.05682	-0.10062	-0.06981	-0.09555
ساروجه	685500	4075300	0.007417	0.008032	0.00934	-0.03619
سهل الدین	720500	4043750	0.016763	-0.0115	-0.00038	0.011655
سیدآباد	672500	4066500	0.017331	-0.00745	0.020798	0.003162
شفیع	658000	4075850	0.016213	0.00672	0.032604	0.007177
شورچه	651550	4088200	-0.00224	0.007548	0.06854	-0.01849
شیر حصار	714100	4050500	0.011518	-0.00431	0.007009	-0.01934

مأخذ: نگارندگان، ۱۴۰۱



شکل ۸: موقعیت روستاها با فرونشست در منطقه مورد مطالعه

تهیه و ترسیم: نگارندگان، ۱۴۰۱

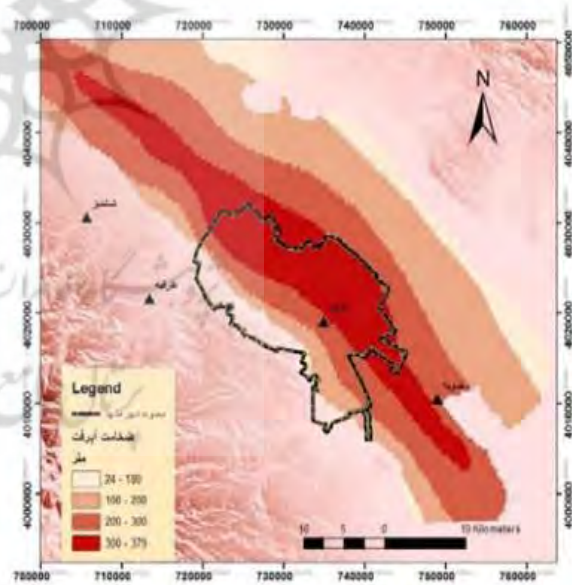
عمده‌ای که رسوبات و سنگ کف را برش می‌زنند، در شکل ۱۱ مشخص هستند. فعالیت این گسل‌ها سبب ایجاد حوضه‌ای فروافتاده بین گسل F2 و گسل شمال مشهد شده است و در این منطقه ضخامت آبرفت افزایش می‌یابد. در زیر آبرفت‌های این بخش نیز نهشته‌های سست و جوان مارنی مربوط به نئوژن واقع شده‌اند. به‌طور کلی نهشته‌های بین گسل F1 و F2 از نوع رسوبات درشت‌دانه است و در این محدوده فرونشست زمین با نرخ کمتری ایجاد شده است. ریزدانه‌ترین رسوبات در محدوده بین گسل شمال مشهد و گسل F2 قرار دارند و در اثر عملکرد نرمال گسل F2 و جابه‌جایی مخروط‌افکنه، این رسوبات بر جای گذاشته شده‌اند که در این محدوده نرخ فرونشست افزایش یافته است (صالحی‌متعهد و همکاران، ۱۳۹۶: ۳۵ و ۳۶)

نتایج بررسی‌های زمین‌شناسی، مطالعات ژئوفیزیکی و حفاری‌های اکتشافی انجام‌شده در سطح آبخوان آبرفتی دشت مشهد بیانگر ناهمواربودن مورفولوژی سنگ کف بوده است. سنگ کف در بعضی نقاط در سطح ظاهر شده و در برخی نقاط ضخامت آبرفت روی آن به ۳۰۰ متر نیز می‌رسد. در شکل ۱۰ نقشه ضخامت آبرفت در محدوده دشت مشهد نشان داده شده است. با توجه به این نقشه می‌توان بیان کرد که با فاصله‌گرفتن از ارتفاعات و نزدیک‌تر شدن به مرکز دشت، ضخامت آبرفت افزایش می‌یابد و احتمال رخ‌دادن فرونشست نیز بیشتر می‌شود. مقایسه میان نقشه نرخ فرونشست و نقشه ضخامت آبرفت نشان می‌دهد که غیر از محدوده شهری، بیشترین نرخ فرونشست در بخش‌هایی که آبرفت ضخامت زیادی داشته، مشاهده می‌شود. گسل‌های



شکل ۱۱: نقشه موقعیت گسل‌ها و مخروط‌افکنه‌ها در محدوده دشت مشهد

مأخذ: صالحی‌متعهد و همکاران، ۱۳۹۶



شکل ۱۰: ضخامت آبرفت در محدوده دشت مشهد

SNAP تعیین شد و از داده‌های چاه‌های پیژومتری و بازدید میدانی به‌منظور صحت‌سنجی و تفسیر نتایج استفاده شد. میزان فرونشست در طول ۴ دوره آماری در منطقه مورد مطالعه ۶۴ سانتی‌متر به‌دست آمد. میزان فرونشست‌های ثبت‌شده هر دوره به‌ترتیب ۱۳

نتیجه

در این پژوهش فرونشست زمین در دشت مشهد مورد بررسی قرار گرفت و نرخ فرونشست منطقه در بازه زمانی ۲۰۱۷ تا ۲۰۲۱ میلادی با تصاویر راداری پایین‌گذر ماهواره Sentinel-1A و با استفاده از نرم‌افزار

سانتی‌متر برای ۲۰۱۷-۲۰۱۸ برای دوره ۲۰۱۸-۲۰۱۹ حدود ۱۹ سانتی‌متر، ۱۵ سانتی‌متر برای دوره ۲۰۲۰-۲۰۱۹ و ۱۷ سانتی‌متر برای دوره ۲۰۲۱-۲۰۲۰ میلادی به دست آمد. براساس نتایج به دست آمده بیشترین میزان فرونشست در مناطق مرکزی و جنوب شرق دشت مشهد (شمال غربی شهر مشهد) اتفاق افتاده است. سطح آب چاه‌ها در بازه زمانی ۱۳۷۰ تا ۱۳۹۸ به بیشترین حد کاهش خود رسیده‌اند. میزان افت سطح آب در این بازه زمانی حداقل ۴/۸۷ متر و حداکثر ۱۵۸/۲۳ متر بوده است و بیشتر در مناطق مرکزی و جنوب شرقی رخ داده است که متأثر از کاهش بارندگی، خشکسالی، کشت آبی در منطقه و فشار بیش از حد به منابع آب‌های زیرزمینی در این سال‌هاست.

مقایسه بین تحلیل‌های مستخرج از داده‌های نقاط چاه و تصاویر ماهواره‌ای نیز مؤکد رابطه بین پایین آمدن سطح آب‌های زیرزمینی و فرونشست زمین در منطقه مورد مطالعه است، به خصوص در روستاهای نومهن و چچه که بیشترین میزان افت سطح آب زیرزمینی را

دارد و در پهنه خطر فرونشست زیاد نیز قرار دارند. نتایج مطالعه با نتایج صالحی متعهد و همکاران (۱۳۹۵) و قره‌چلو و همکاران (۱۴۰۰) که عامل اصلی فرونشست منطقه را برداشت بی‌رویه از آب‌های زیرزمینی عنوان کردند، همخوانی دارد. ضرورت سازمان‌ها و نهادهای متولی با استفاده از نقشه پهنه‌بندی خطر فرونشست و با اتخاذ سیاست‌ها و برنامه‌ریزی‌های مناسب، پیش از وقوع بحران درصدد کاهش هر گونه آسیب به سکونتگاه‌های انسانی، جمعیت و زیرساخت‌های موجود در این مناطق باشند. با توجه به اینکه عامل اصلی فرونشست در دشت مشهد بهره‌برداری بیش از حد آب‌های زیرزمینی است، بایستی مدیریت برداشت وجود داشته باشد. مدیریت برداشت شامل برداشت آب از بخش‌هایی از حوضه که خاک درشت‌دانه‌تر بوده و مشکل نشست زمین کمتر است. برای این منظور نیاز به شناخت دقیق‌تر اختصاصات زمین‌شناسی آبخوان است. همچنین الگوی کشت بهینه با در نظر گرفتن وضعیت اقلیمی و شرایط آب و خاک منطقه تهیه شود.

منابع

آقایی، لیلیا؛ موسی عابدینی؛ صیاد اصغری سراسکانرود (۱۴۰۱). برآورد میزان فرونشست با استفاده از تکنیک تداخل سنجی راداری و پارامترهای آب‌های زیرزمینی و کاربری اراضی (مطالعه موردی: دشت اردبیل)، مجله پژوهش‌های ژئومورفولوژی کمی. دوره ۱۱. شماره ۱. صفحات ۱۳۲-۱۱۷.

[Doi: 10.22034/gmpj.2022.304999.1302](https://doi.org/10.22034/gmpj.2022.304999.1302)

جانباز فوتمی، مهدیه؛ مجید خلقی؛ عبدالنبی عبده کلاهچی؛ مه آسا روستایی (۱۳۹۹). بررسی فرونشست زمین ناشی از تغییرات سطح ایستابی آب زیرزمینی با استفاده از روش تداخل سنجی تفاضلی راداری: مطالعه موردی: استان قزوین، مجله تحقیقات منابع آب ایران. دوره ۱۶. شماره ۳. صفحات ۱۴۷-۱۳۳.

[Doi: 20.1001.1.17352347.1399.16.3.10.8](https://doi.org/10.1001.1.17352347.1399.16.3.10.8)

حافظی مقدس، ناصر (۱۳۹۶). مدیریت فرونشست زمین در دشت مشهد، دومین همایش زمین‌شناسی مهندسی و محیط‌زیست شهر مشهد، دانشگاه فردوسی مشهد.

<https://www.symposia.ir/EEGM02>

حمیدی، رضوانه؛ حجت‌الله صفری؛ مه آسا روستایی (۱۴۰۰). بررسی عوامل ساختاری و غیرساختاری مؤثر بر فرونشست دشت گرگان - آق‌قلا - علی‌آباد با تلفیق نتایج روش تداخل‌سنجی تفاضلی راداری و اطلاعات زیرسطحی، نشریه زمین‌شناسی ایران. دوره ۱۵. شماره ۶۰. صفحات ۴۳-۵۷.

[Doi: 20.1001.1.17357128.1400.15.60.3.1](https://doi.org/10.1001.1.17357128.1400.15.60.3.1)

خرمی، محمد؛ سعید ابریشمی؛ یاسر مقصودی (۱۳۹۸). تعیین فرونشست شهر مشهد به روش تداخل‌سنجی راداری پراکنشگر دائمی، نشریه مهندسی عمران امیرکبیر. دوره ۵۱. شماره ۶. صفحات ۱۲۰۴-۱۱۸۷.

[Doi: 10.22060/ceej.2018.14300.5617](https://doi.org/10.22060/ceej.2018.14300.5617)

شفیعی، نجمه؛ لیلا گلی مختاری؛ ابوالقاسم امیراحمدی؛ رحمان زندی (۱۳۹۹). بررسی فرونشست دشت نورآباد با استفاده از روش تداخل‌سنجی راداری، پژوهش‌های ژئومورفولوژی کمی. دوره ۸. شماره ۴. صفحات ۹۳-۱۱۱.

[Doi: 10.30495/girs.2023.685498](https://doi.org/10.30495/girs.2023.685498)

صالحی‌متعهد، فهمیه؛ ناصر حافظی‌مقدس؛ غلامرضا لشکری‌پور؛ مریم دهقانی (۱۳۹۵). ارزیابی فرونشست زمین به کمک تلفیق روش تداخل‌سنجی راداری و اندازه‌گیری‌های میدانی و بررسی دلایل و اثرات آن بر شهر مشهد، مجله زمین‌شناسی مهندسی. دوره ۱۳. شماره ۳. صفحات ۴۶۲-۴۳۵.

[Doi: 10.18869/acadpub.jeg.13.3.435](https://doi.org/10.18869/acadpub.jeg.13.3.435)

صالحی‌متعهد، فهمیه؛ ناصر حافظی‌مقدس؛ غلامرضا لشکری‌پور؛ مریم دهقانی (۱۳۹۶). ارزیابی علل زمین‌شناختی فرونشست زمین در دشت مشهد و اثرات آن بر شهر مشهد، دومین همایش زمین‌شناسی مهندسی و محیط‌زیست شهر مشهد. دانشگاه فردوسی مشهد.

<https://www.symposia.ir/EEGM02>

قره‌چلو، سعید؛ حسام اکبری‌قوچانی؛ سعید گلیان؛ کامران گنجی (۱۴۰۰). ارزیابی میزان فرونشست در ارتباط با آب‌های زیرزمینی با کمک ماهواره راداری سنتینل ۱ و الوس ۱ (منطقه مورد مطالعه: دشت مشهد)، مجله سنجش‌ازدور و سامانه اطلاعات جغرافیایی در منابع طبیعی. دوره ۱۲. شماره ۳. صفحات ۱۱-۱۴.

[Doi: 10.30495/girs.2021.680336](https://doi.org/10.30495/girs.2021.680336)

مرادی، آیدین؛ سمیه عمادالدین؛ صالح آرخی؛ خلیل رضایی (۱۳۹۹). تحلیل فرونشست زمین با استفاده از تکنیک تداخل‌سنجی راداری، اطلاعات چاه‌های ژئوتکنیکی و پی‌زومتری، نشریه تحلیل فضایی مخاطرات محیطی. سال ۷. شماره ۱. صفحات ۱۷۶-۱۵۳.

[Doi: 10.29252/jsaeh.7.1.11](https://doi.org/10.29252/jsaeh.7.1.11)

محمدی، مجید؛ حمیدرضا پورقاسمی؛ مجتبی امیری (۱۴۰۰). ارزیابی حساسیت‌پذیری فرونشست زمین در دشت سمنان با استفاده از مدل آنتروپی، پژوهشنامه مدیریت حوزه آبخیز. سال ۱۲. شماره ۲۳. صفحات ۸۵-۷۵.

[Doi: 20.1001.1.22516174.1400.12.23.7.2](https://doi.org/10.1001.1.22516174.1400.12.23.7.2)

محمد حسنی، محمد؛ بهناز شیخ شریعتی کرمانی (۱۴۰۰). تعیین میزان فرونشست زمین با استفاده از تکنیک تداخل‌سنجی راداری (مطالعه موردی: شریان‌های حمل‌ونقلی منطقه غرب شهر کرمان)، فصلنامه علمی پژوهشنامه حمل‌ونقل. دوره ۳. شماره ۶۸. صفحات ۷۵-۹۰.

[Doi: 10.22034/tri.2021.232651.2770](https://doi.org/10.22034/tri.2021.232651.2770)

Referebces

- 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](https://doi.org/10.1088/1755-1315/47/1/012022)
- Burgmann, R., Rosen, P.A., Fielding, E.J (2000). Synthetic aperture radar interferometry to measure earth's surface topography and its deformation. *Annual Review of Earth and Planetary Sciences*, Vol.28, 169-209.
- Crosetto, M., Gili, J.A., Monserrat, O., Cuevas-González, M., Corominas, J., Serral, D (2013). Interferometric SAR monitoring of the Vallcebre landslide (Spain) using corner reflectors, *Natural Hazards and Earth System Sciences*, Vol. 13, No 4, 923-933.
<https://doi.org/10.1016/j.jaredenv.2020.104238>
- Chen, M., Tomás, R., Li, Zh., Motagh, M., Li, T., Hu, L., Gong, H., Li, X., Yu, J., Gong, X. (2016). Imaging Land Subsidence Induced by Groundwater Extraction in Beijing (China) Using Satellite Radar Interferometry, *Remote Sens*, 8(6), 468.
<https://www.mdpi.com/2072-4292/8/6/468>
- Du, Y., Feng, G., Peng, X., Li, Z (2017). Subsidence Evolution of the Leizhou Peninsula, China, Based on InSAR Observation from 1992 to 2010. *Applied sciences*, 7(5),466.
<https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0303243418300205>
- Goorabi, A., Karimi, M., Yamani, M., Perissin, D (2020). Land subsidence in Isfahan metropolitan and its relationship with geological and geomorphological settings revealed by Sentinel-1A InSAR observations. *Journal of Arid Environments*, Vol.181, 1-17.
<https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0140196320301385>
- Guo, J., Lv Zhou; Chaolong Yao; Jiyuan Hu (2016). Surface Subsidence Analysis by Multi-Temporal InSAR and GRACE: A Case Study in Beijing, *Sensors*,16(9).1-18.
<https://www.mdpi.com/1424-8220/16/9/1495>
- Jeanne, P., Faar, T. G., Rutqvist, J., Vasco, D. W (2019). Role of agricultural activity on land subsidence in the Jouquin Valley, California, *Journal of Hydrology*, Vol. 569, 462 -469.
<https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0022169418309661>
- 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.
<https://doi.org/10.3390/rs14153722>
- Notti, D., Mateos,R.M., Monserrate, O., Devanthery, N., Peinado, T., Roldan, F.J., Fernandez-Chacon,F., Galve, J.P., Lamas,F., Azanon, J.M.(2016). Lithological control of land subsidence induced by groundwater withdrawal in new urban AREAS (Granada Basin, SE Spain). *Multiband DInSAR monitoing. Hydrological Process*, Vol.30, 1-15.
<https://onlinelibrary.wiley.com/doi/abs/10.1002/hyp.10793>