University of Sistan and Baluchestan

Geography and Development

Print ISSN: 1735 - 0735 Online ISSN: 2676-7791

Homepage: https://gdij.usb.ac.ir

Evaluation of the Amount of Subsidence of the Urban Area and Urban Periphery of Jahrom using Radar Interferometric Method

Mostafa Mohammadi Dehcheshmeh[1]✉, Azam Ebrahimi[2]

1. Professor of Geography and Urban Planning, Shahid Chamran University of Ahvaz, Ahvaz, Iran
✉ E-mail: m.mohammadi@scu.ac.ir
2. Ph. D Student of Geography and Urban Planning, Shahid Chamran University of Ahvaz, Ahvaz, Iran
E-mail: az-ebrahimi@stu.scu.ac.ir

How to Cite: Mohammadi Dehcheshmeh, M; Ebrahimi, A. (2026). Evaluation of the Amount of Subsidence of the Urban Area and Urban Periphery of Jahrom using Radar Interferometric Method. *Geography and Development,* 24 (82), 193-210.

DOI: http://dx.doi.org/10.22111/GDIJ.2025.50205.3692

Received:
6 November 2024
Received in revised form:
10 April 2025
Accepted:
26 April 2025
Published online:
8 March 2026

Keywords:
Subsidence,
Decline in groundwater resources,
Jahrom,
SNAP.

ABSTRACT

The increasing trend of population and excessive use of underground water resources have caused many cities in the country to be at risk of subsidence. Among the cities that have faced the challenge of subsidence in recent years is the city of Jahorm in Fars province. Considering the importance of the subject, in this research, the evaluation of the subsidence of the urban area and the urban periphery of Jahrom has been discussed. In this research, Sentinel 1 radar images, Landsat satellite images, and information on groundwater resources of the region were used as the most important research data. The most important research tools included SNAP and ArcGIS software. The most important research tools included SNAP and ArcGIS software. In this research, first the rate of subsidence of the area was calculated and then its relationship with environmental factors was analyzed. Based on the results, the study area has experienced a maximum of 234 mm of subsidence during a 1-year period. The results of the spatial analysis of the subsidence indicate that in a general trend, the rate of subsidence towards the northern areas of Jahrom city has an increasing trend, and in total, the rate of subsidence in the urban area of Jahrom is between 28 and 179 mm. Given that the highest rate of subsidence was in agricultural lands and areas with the highest decline in groundwater resources, it can be said that the main reason for the subsidence of the region was the intensive exploitation of groundwater resources.

 Publisher: University of Sistan and Baluchestan

1. Introduction

Today, the increasing trend of population and the lack of surface water resources have caused many plains of the country to face a sharp drop in underground water resources in recent years. A sharp drop in underground water resources will be associated with many risks, including subsidence. In fact, excessive extraction of underground water resources causes many environmental risks, among which land subsidence is very important. The risk of subsidence, unlike many risks such as floods and earthquakes, is imperceptible and in the long term it causes many damages such as cracking of buildings, tilting of elevated facilities, loss of agricultural land, creation of sinkholes, etc. The areas that are exposed to this risk are facing many challenges. Among the areas that are at risk of subsidence are the plains of arid and semi-arid regions, including the plains of Iran. Jahorm plain in Fars province is one of the plains of Iran that is at risk of subsidence. Jahrom Plain is located in a semi-arid region, and due to the lack of rainfall and surface water resources, it has faced a sharp drop in underground water resources in recent years, and this issue has caused Jahrom Plain to face the risk of subsidence. Considering the importance of the subject, in this research, using radar images, the amount of subsidence of the urban area and the urban periphery of Jahrom has been evaluated.

2. Materials and Methods

In this research, Sentinel 1 radar images, Landsat satellite images, information about the groundwater resources of the region, and the 30-meter SRTM digital elevation model were used as the most important research data. The most important tools used in the research included SNAP software (to perform radar interferometry) and ArcGIS (to prepare the required maps). Considering the subject and objectives, this research was conducted in several stages. In the first stage, radar interferometry and SNAP software were used to prepare a subsidence map of the region. In the second stage, the geomorphological units of the region were mapped using Google Earth images and the subsidence situation in these units was analyzed. In the third stage, a map of the groundwater resources decline in the region was prepared based on information from 10 piezometric wells and the Spline interpolation method, and then its relationship with the subsidence was explained. In the fourth stage, in order to prepare a land use map of the region, images from Landsat 8 and 9 and Sentinel 1 satellites, as well as the Google Earth Engine system, were used. After preparing the land use map of the region, its relationship with the subsidence that occurred was analyzed.

3. Results and Discussion

From the point of view of geomorphology, the study area is located in the plains unit and leads from the surroundings to the mountain unit. Jahorm city is located at an altitude of about 1050 meters above sea level, and the difference in altitude with the peripheral areas, including its northern areas, is very small. The location of the urban area and the urban outskirts of Jahrom in the plain and its low height difference has caused a large part of the region to include areas with a slope of less than 10%. The difference in height and low slope of the study area has caused this area to be free of obstacles and limiting landforms, and this problem has provided the ground for the development of agricultural lands and pressure on underground water resources. In fact, considering that Jahrom Plain lacks permanent rivers and sufficient surface water resources, the development of agricultural lands is associated with the increase in the exploitation of underground water resources, and this issue creates the ground for the occurrence of subsidence in the urban area and urban outskirts of Jahrom. has provided According to the report of the Water and Regional Organization of Fars Province, Jahorm plain has been one of the forbidden plains since 1953, and more than 2000 unauthorized wells have been identified in it in recent years. The total results obtained from this section indicate that the hydrogeomorphological situation of Jahrom Plain and the development of agricultural lands, regardless of the water power of the region, have provided the ground for the occurrence of subsidence risk in this region.

4. Conclusion

Due to the fact that Jahorm Plain is located in a semi-arid region from the point of view of climate and faces a shortage of surface water resources, therefore, underground water sources are used to supply water for agriculture and industrial and domestic purposes, and this problem causes There has been a sharp drop in the underground water resources in this plain and as a result there has been a risk of subsidence in the Jahrom plain, especially the urban area and outskirts of Jahrom. Considering the importance of the topic, in this research, using the radar images of Sentinel 1, the amount of subsidence that occurred in the urban area and outskirts of Jahrom from 01/06/2021 to 01/01/2022 has been evaluated. Based on the results, the study area has experienced a maximum of 234 mm of subsidence during the period of 1 year. The spatial distribution analysis of the occurred subsidence shows that in a general trend, the amount of subsidence towards the northern areas of Jahrom city has an increasing trend, and in total, the amount of subsidence in the urban area of Jahrom is between 28 and 179 mm. The total results of this research have shown that the city of Jahrom is facing significant subsidence, which can become a harmful risk if the current situation continues, so it is necessary to study the process of subsidence and its control strategies, including the control of overconsumption. There should be more monitoring of underground water sources.

Keywords: Subsidence, Decline in groundwater resources, Jahrom, SNAP.

5. References

Asadi, M., Ganjaeian, H., Javedani, M. and Ghaderi Hasab, M. (2021). Evaluation of the Relationship between Natural Factors and Subsidence in Ivanaki Plain Using Radar Imaging. Hydrogeology, 6(1), 13-22.
https://doi.org/10.22034/hydro.2021.13016

Bozzano, F., Esposito, C., Franchi, S., Mazzanti, P., Perissin, D., & Rocca, A. (2015). Understanding the subsidence process of a quaternary plain by combining geological and hydrogeological modelling with satellite InSAR data: the acque albule plain case study. Remote Sens. Environ. 168, 219-238.
https://doi.org/10.1016/j.rse.2015.07.010

Chaussard, E., Wdowinski, S., Cabral-Cano, E., & Amelung, F. (2014). Land subsidence in central Mexico detected by ALOS InSAR time-series, Remote Sensing of Environment, V 140.
http://dx.doi.org/10.1016/j.rse.2013.08.038

Chen, B., Gong, H., Li, X., Lei, K., Ke, Y., Duan, G., & Zhou, C. (2015). Spatial correlation between land subsidence and urbanization in Beijing, China, Natural Hazards, 75, 2637-2652.
http://dx.doi.org/10.1007/s11069-014-1451-6

Dehghani M. (2014). An Enhanced Algorithm based on Radar Interferometry for Monitoring Land Subsidence Caused by Over-Exploitation of Groundwater. Jgit, 2(2), 61-73.
http://jgit.kntu.ac.ir/article-1-135-fa.html

Ebrahimi, A., Ghasemi, A., & Ganjaeian, H. (2020). Monitoring the Subsidence Rate of Pakdasht Urban Area Using Radar interferometry method. Geography and Human Relationships, 2(4), 29-41.
https://dor.isc.ac/dor/20.1001.1.26453851.1399.2.4.3.1

Ebrahimi, A., Ghasemi, A., & Ganjaeian, H. (2020). Monitoring the Subsidence Rate of Pakdasht Urban Area Using Radar interferometry method. Geography and Human Relationships, 2(4), 29-41.
https://dor.isc.ac/dor/20.1001.1.26453851.1399.2.4.3.1

Ganjaeian, H. (2020). Geomorphological hazards of urban areas, study methods and control strategies. Entekhab publication, 144.
https://www.gisoom.com/book/11628118

Ganjaeian, H. (2024). Identification of sinkhole-prone areas using radar images (Case study: Qorveh Plain). Environmental erosion research, 14(2), 87-105.
http://dx.doi.org/10.61186/jeer.14.2.6

Ganjaeian, H., Asadi, M., Menbari, F., & Ebrahimi, A. (2023). Analysis of Subsidence Status in Hamedan Urban Area using Radar and Satellite Images. Journal of Geography and Environmental Hazards, 11(4), 236-221.
https://doi.org/10.22067/geoeh.2022.76383.1217

Ganjaeian, H., Ghasemi, A., Ebrahimi, A., & Asadpor, Z. (2019). Evaluation of subsidence rate of Hamadan-Bahar plain using SBAS time series method. Journal of Arid Regions Geographic Studies, 10(36), 62-73.
https://jargs.hsu.ac.ir/article_161495.html

Ganjaeian, H., Menbari, F., Ghasemi, A., & Nosrati, M. (2023). Assessment and analysis of subsidence risk in Kaboudar Ahang-Famenin plain. Scientific- Research Quarterly of Geographical Data (SEPEHR), 31(124), 75-86.
https://doi.org/10.22131/sepehr.2023.553000.2871

Hongdong, F., Kazhong, D., Chengyu, J., Chuanguang, Z., & Jiqun, X. (2011). Land subsidence monitoring by D-InSAR technique. Mining Science and Technology (China), 21, 869-872.
http://dx.doi.org/10.1016/j.mstc.2011.05.030

Khan, S. D., Faiz, M. I., Gadea, C. A., & A, Ahmad. (2023). Study of land subsidence by radar interferometry and hot spot analysis techniques in the Peshawar Basin, Pakista. The Egyptian Journal of Remote Sensing and Space Science, 26 (1), 173-184.
https://doi.org/10.1016/j.ejrs.2023.02.001

Mehrabi, A., Karimi, S., & Khalesi, M. (2023). Spatial Analysis of Jiroft Plain Subsidence Using the Coherence Pixel Technique (CPT). Geography and Environmental Planning, 34(1), 99-116.
https://doi.org/10.22108/gep.2022.133667.1525

Mohammahkhan, S., Ganjaeian, H., Garosi, L., & Zanganetabar, Z. (2020). Assessing the impact of groundwater drop on the subsidence rate using the Sentinel-1 Radar images - Case study: Qorveh Plain. Scientific- Research Quarterly of Geographical Data (SEPEHR), 28(112), 219-229.
https://doi.org/10.22131/sepehr.2020.38617

Mohammahkhan, S., Ganjaeian, H., Shahri, S., & Abbaszade, A. (2019). Predicting the trend of urban development toward hazardous areas using multi temporal images (Case Study: Marivan City). Scientific- Research Quarterly of Geographical Data (SEPEHR), 28(110), 107-117.
https://doi.org/10.22131/sepehr.2019.36615

Mohammadi Dehcheshmeh, M., Alizadeh, M., & Parvezyan, A. (2019). Location Urban Haven Based Passive Defense (The city Kuhdasht). Geographical Planning of Space, 9(32), 149-162.
https://doi.org/10.30488/gps.2019.91914

Motagh, M., Djamour, Y., Walter, T. R., Wetzel, H.U., Zschau, J., & Arabi, S. (2007). Land subsidence in Mashhad Valley, northeast Iran: results from InSAR, levelling and GPS. Geophysical Journal International, 168(2): 518-526.
http://dx.doi.org/10.1111/j.1365-246X.2006.03246.x

Mousavi, S. M., Jafari, H., Momeni, A. A., & Sepehri, J. (2019). Investigating land subsidence due to groundwater over-exploitation in Kerdi-Shirazi plain, Hormozgan Province. Journal of Natural Environmental Hazards, 8(22), 95-110.
https://doi.org/10.22111/jneh.2019.26537.1443

Nayyeri, H., Ganjaeian, H., & Amani, K. (2018). Evaluation of Environmental Indicator of Perimeters of the Land Suitability for the Development of the Sarvabad City by Combining Two Models of Network Analysis and Fuzzy Logic. Journal of Urban Social Geography, 5(1), 49-62.
https://doi.org/10.22103/JUSG.2018.1961

Nayyeri, H., Salari, M., Ganjaeian, H., Amani, K. (2017). Geomorphological Assessment of Land Suitability for the Physical Expansion of Sanandaj City Applying Restricted Areas. Geographical Urban Planning Research (GUPR), 5(1), 127-145.
https://doi.org/10.22059/jurbangeo.2017.63213

Negahban, S., Ganjaeian, H., Ebrahimi, A. & Emami, K. (2019). Monitoring and predicting the trend of changes in residential areas using multi-timed images (Case study: Songhor city). Journal of the Earth and Space Physics, 45(2), 343-354.
https://doi.org/10.22059/jesphys.2019.275076.1007084

Negahban, S., Ganjaeiyan, H., Feraydooni Kordestani, M., & Cheshmeh sefidi, Z. (2019). Assessing the physical development of cities and extending to geomorphological prohibited areas Using LCM (Case Study: Sanandaj City). Journal of Natural Environmental Hazards, 8(20), 39-52.
https://doi.org/10.22111/jneh.2018.21943.1317

Negahban, S., Peysoozi, T., Ganjaeian, H., & Norozi, M. (2021). Identify areas prone to landslide and vertical displacement using Radar images (Case study: Lavasan urban area and urban margin). Journal of Geography and Environmental Hazards, 10(3), 1-18.
https://doi.org/10.22067/geoeh.2021.71728.1094

Pacheco, J., Arzate, J., Rojas, E., Arroyo, M., Yutsis, V., & Ochoa, G. (2006). Delimitation of ground failure zones due to land subsidence using gravity data and finite element modeling in the Queretaro valley, Mexico. Engineering Geology, 84:143-160.
http://dx.doi.org/10.1016/j.enggeo.2005.12.003

Ranjbar Barough, Z., & fathallahzadeh, M. (2022). Investigation of land subsidence, using time series of radar images and its relationship with groundwater level changes (Case study: Karaj metropolis). Quantitative Geomorphological Research, 10(4), 138-155.
https://dorl.net/dor/20.1001.1.22519424.1401.10.4.8.3

Rokni, J., Hossinzadeh, R., Lashkaripour, G.R., & Velayati, S. A. (2016). Survey of Land Subsidence, Perspective and Geomorphology Developments in the Denser Plains, Case study: Neyshabour Plain. Journal of Arid Regions Geographic Studies, 7(24), 21-38.
https://jargs.hsu.ac.ir/article_161414.html

Safari, A., Jafari, F. (2016). Measuring the amount and zoning of land subsidence risk using radar interferometry (case study: Karaj-Shahriar plain). Iranian Geographical Society, 4 (48), 188-175.
https://www.sid.ir/paper/150233

Salari, M., Nayeri, H., Amani, K. & Ganjaeian, H. (2017). Locating Suitable Directions for Kamyaran Urban Development through a Hazardology Approach based on the Application of Geomorphologically Restricted Areas. Environmental Management Hazards, 4(4), 419-436.
https://doi.org/10.22059/jhsci.2018.252694.341

Salari, M., Nayyeri, H., Ganjaeian, H., Amani, K. (2020). Assessment and Prediction of the process of expansion of residential areas with Geomorphological Approach and Environmental Management (Case Study: Paveh City). Quantitative Geomorphological Research, 9(1), 86-101.
https://doi.org/10.22034/gmpj.2020.109536

Sharifi Kiya, M. (2012). Determining the rate and extent of land subsidence using radar interferometry (D-InSAR) in the Nogh-Bahram plain. Journal of Spatial Planning and Planning, 16 (3), 77-55.
http://hsmsp.modares.ac.ir/article-21-5076-fa.html

Sheng, H., Zhou, L., Huang, C., Ma, S., Xian, L., Chen, Y., & Yang., F. (2023). Surface Subsidence Characteristics and Causes in Beijing (China) before and after COVID-19 by Sentinel-1A TS-InSAR. Remote Sensing, 15 (5).
http://dx.doi.org/10.3390/rs15051199

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.
https://doi.org/10.1016/j.isprsjprs.2019.05.005

جغرافیا و توسعه

شاپا چاپی: ۱۷۳۵-۰۷۳۵ شاپا الکترونیکی: ۲۶۷۶-۷۷۹۱

https://gdij.usb.ac.ir

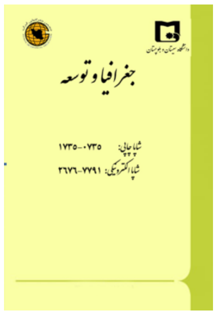
دانشگاه سیستان و بلوچستان

ارزیابی میزان فرونشست محدودهٔ شهری و حاشیه شهری جهرم با استفاده از روش تداخل‌سنجی راداری

دکتر مصطفی محمدی‌ده‌چشمه[1]*، اعظم ابراهیمی[2]

مقاله پژوهشی

جغرافیا و توسعه، شمارهٔ ۸۲، بهار ۱۴۰۵
تاریخ دریافت: ۱۴۰۳/۰۸/۱۶
تاریخ بازنگری داوری: ۱۴۰۴/۰۱/۲۱
تاریخ پذیرش: ۱۴۰۴/۰۲/۰۶
صفحات: ۲۱۰-۱۹۳



چکیده

روند افزایشی جمعیت و استفادهٔ بیش‌ازحد از منابع آب زیرزمینی، سبب شده است تا بسیاری از شهرهای کشور در معرض مخاطرهٔ فرونشست قرارگیرند. از جمله شهرهایی که در طی سال‌های اخیر با چالش فرونشست مواجه شده است، شهر جهرم در استان فارس می‌باشد. با توجه به اهمیت موضوع، در این پژوهش به ارزیابی فرونشست محدودهٔ شهری و حاشیهٔ شهری جهرم پرداخته شده است. در این تحقیق، از تصاویر راداری سنتنیل ۱، تصاویر ماهوارهٔ لندست و اطلاعات مربوط به منابع آب زیرزمینی منطقه، به‌عنوان مهم‌ترین داده‌های تحقیق استفاده شده است. مهم‌ترین ابزارهای تحقیق شامل نرم‌افزارهای «SNAP» و «ArcGIS» بوده است. در این تحقیق ابتدا میزان فرونشست منطقه محاسبه شده، سپس به تحلیل ارتباط آن با عوامل محیطی پرداخته شده است. براساس نتایج حاصله، محدودهٔ مطالعاتی در طی دورهٔ زمانی ۱ ساله با ماکزیمم ۲۳۴ میلی‌متر فرونشست مواجه شده است. نتایج آنالیز مکانی فرونشست رخ‌داده بیانگر این است که در یک روند کلی، میزان فرونشست به‌سمت مناطق شمالی شهر جهرم دارای روند افزایشی است و در مجموع میزان فرونشست در محدودهٔ شهری جهرم بین ۲۸ تا ۱۷۹ میلی‌متر است. با توجه به این‌که بیش‌ترین میزان فرونشست در محدودهٔ اراضی کشاورزی و مناطق دارای بالاترین افت منابع آب زیرزمینی بوده است؛ بنابراین می‌توان‌گفت که دلیل اصلی فرونشست منطقه، بهره‌برداری شدید از منابع آب زیرزمینی بوده است.

واژه‌های کلیدی:
فرونشست، افت منابع آب زیرزمینی، جهرم، «SNAP».

مقدمه

طی سال‌های اخیر، روند افزایشی جمعیت و توسعهٔ فعالیت‌های انسانی، سبب وقوع و یا تشدید احتمال وقوع مخاطرات طبیعی از جمله فرونشست شده است *(نگهبان و همکاران، ۱۳۹۸: ۴۰)*. امروزه روند افزایشی جمعیت و کمبود منابع آب سطحی سبب شده است تا در طی سال‌های اخیر بسیاری از دشت‌های کشور با افت شدید منابع آب زیرزمینی مواجه باشند *(محمدخان و همکاران، ۱۳۹۸: ۱۰۸؛ گنجائیان، ۱۳۹۹: ۷۱)*. افت شدید منابع آب زیرزمینی با مخاطرات زیادی از جمله فرونشست همراه خواهدبود. در واقع، برداشت بیش‌ازحد منابع آب زیرزمینی سبب مخاطرات زیست‌محیطی زیادی می‌شود که در بین آن‌ها فرونشست زمین از اهمیت زیادی برخوردار می‌باشد *(موسوی و همکاران، ۱۳۹۸: ۹۶؛ Hongdong et al, 2011: 870)*.

مخاطرهٔ فرونشست برخلاف بسیاری از مخاطرات مانند سیل و زمین‌لرزه، به‌صورت نامحسوس است و در بلندمدت سبب بروز خسارات زیادی می‌شود *(گنجائیان، ۱۴۰۳: ۸۸)* که از جمله آن‌ها می‌توان به؛ ترک‌خوردگی ساختمان‌ها، کج‌شدگی تأسیسات مرتفع، ازبین‌رفتن اراضی کشاورزی، ایجاد فروچاله و غیره اشاره کرد *(شریفی‌کیا،*

۱. استاد گروه جغرافیا و برنامه‌ریزی شهری، دانشگاه شهید چمران اهواز، اهواز، ایران (نویسنده مسئول) m.mohammadi@scu.ac.ir
۲. دانشجوی دکتری جغرافیا و برنامه‌ریزی شهری، دانشگاه شهید چمران اهواز،اهواز، ایران az-ebrahimi@stu.scu.ac.ir

۱۳۹۱: ۵۶)؛ بنابراین مناطقی که در معرض این مخاطره قراردارند، با چالش‌های زیادی مواجه هستند *(نگهبان و همکاران، ۱۴۰۰: ۲؛ گنجائیان و همکاران، ۱۴۰۱: ۷۶)*. از جمله مناطقی که در معرض مخاطرهٔ فرونشست قراردارد، دشت‌های مناطق خشک و نیمه‌خشک *(پاچکو[1] و همکاران، ۲۰۰۶: ۱۴۴)* از جمله دشت‌های ایران است *(رکنی و همکاران، ۱۳۹۵: ۲۲)*. از میان دشت‌های ایران که در معرض مخاطرهٔ فرونشست قراردارد، دشت جهرم در استان فارس را می‌توان نام برد. دشت جهرم در منطقهٔ نیمه‌خشک واقع شده است و به‌دلیل کمبود بارش و منابع آب سطحی، طی سال‌های اخیر با افت شدید منابع آب زیرزمینی مواجه شده و همین مسئله سبب شده است تا دشت جهرم با مخاطرهٔ فرونشست مواجه شود. با توجه به اهمیت موضوع، در این پژوهش با استفاده از تصاویر راداری به ارزیابی میزان فرونشست محدودهٔ شهری و حاشیهٔ شهری جهرم و تحلیل عوامل مؤثر در وقوع آن پرداخته شده است.

در ارتباط با موضوع مورد مطالعه تحقیقات مختلفی صورت گرفته است که از جملهٔ آن‌ها می‌توان به معتق[2] و همکاران (۲۰۰۷) اشاره کرد که با استفاده از روش تداخل‌سنجی راداری، میزان فرونشست سالانهٔ دشت مشهد را حداکثر ۲۸ تا ۳۰ سانتی‌متر محاسبه‌کرده‌اند. چوسارد[3] و همکاران (۲۰۱۴) با استفاده از تصاویر راداری «ALOS»، ماکزیمم فرونشست شهر مکزیکوسیتی را ۳۰ سانتی‌متر در سال برآورد کرده‌اند. چن[4] و همکاران (۲۰۱۵) با استفاده از تصاویر راداری «ENVISAT»، میزان فرونشست شهر پکن را بیش از ۵ سانتی‌متر در سال برآورد کرده‌اند. بوزانو[5] و همکاران (۲۰۱۵) با استفاده از تصاویر راداری «ENVISAT» و روش تداخل‌سنجی راداری، میزان فرونشست دشت «اکه آلبو»[6] در طی سال‌های ۲۰۰۷ تا ۲۰۱۰ را ۸ سانتی‌متر محاسبه کرده‌اند. ژائو[7] و همکاران (۲۰۱۹) با استفاده از روش تداخل‌سنجی راداری، میزان فرونشست سالانهٔ زمین در منطقهٔ ساحلی «شانگهای چین» را حدود ۳ سانتی‌متر محاسبه کرده‌اند. خان[8] و همکاران (۲۰۲۳) با استفاده از روش تداخل‌سنجی راداری، میزان فرونشست سالانهٔ حوضهٔ «پیشاور» پاکستان را ۳/۲۳ سانتی‌متر برآورد کرده‌اند. شنگ[9] و همکاران (۲۰۲۳) با استفاده از روش تداخل‌سنجی راداری نشان‌دادند که میزان فرونشست زمین در پکن چین در دورهٔ بعد از کرونا دارای روند کاهشی بوده است. دهقانی (۱۳۹۳) با استفاده از ۱۲ تصویر «ENVISAT ASAR» و روش تداخل‌سنجی راداری، ماکزیمم فرونشست دشت مشهد را ۲۳ سانتی‌متر در سال برآورد کرده است. صفاری و جعفری (۱۳۹۵) با استفاده از روش تداخل‌سنجی راداری، میزان فرونشست دشت شهریار-کرج را ۱۳/۶ سانتی‌متر در سال برآورد کرده‌اند. گنجائیان و همکاران (۱۳۹۸) با استفاده از تصاویر راداری سنتینل ۱ و روش سری زمانی «SBAS» میزان فرونشست دشت همدان-بهار در طی دورهٔ زمانی ۲ ساله را حدود ۱۳/۳ سانتی‌متر محاسبه‌کرده‌اند. رنجبرباروق و فتح‌اله‌زاده (۱۴۰۱) با استفاده از تصاویر راداری سنتینل ۱ و روش سری زمانی «SBAS»، ماکزیمم فرونشست کلان‌شهر کرج را ۱۴/۵

1. Pacheco
2. Motagh
3. Chaussard
4. Chen
5. Bozzano
6. Acque albule
7. Zhao
8. Khan
9. Sheng

سانتی‌متر برآورد کرده‌اند. مهرابی و همکاران (۱۴۰۲) با استفاده از تصاویر راداری سنتینل ۱، میزان فرونشست دشت جیرفت را بین ۱۱ تا ۱۴ سانتی‌متر در سال برآورد کرده‌اند. در راستای تحقیقات پیشین، هدف از این تحقیق، ارزیابی میزان فرونشست در محدودهٔ شهری و حاشیهٔ شهری جهرم است.

داده‌ها و روش‌ها

معرفی منطقهٔ مورد مطالعه

محدودهٔ مطالعاتی تحقیق حاضر منطبق بر محدودهٔ شهری و حاشیهٔ شهری جهرم است. شهر جهرم، مرکز شهرستان جهرم است و از نظر تقسیمات سیاسی در استان فارس قراردارد (شکل ۱). این شهر با طول حدود ۱۱ کیلومتر و عرض حدود ۶ کیلومتر و همچنین با جمعیت حدود ۱۴۰۰۰۰ نفر از جمله شهرهای پرجمعیت استان فارس محسوب می‌شود. جهرم در ارتفاع حدود ۱۰۵۰ متری از سطح دریا قراردارد و از نظر ژئومورفولوژی در واحد دشت قرار گرفته است. همچنین از نظر آب‌وهوایی، جهرم در منطقهٔ نیمه‌خشک قرارگرفته و آب‌وهوای آن گرم و در نواحی کوهستانی معتدل است.

شکل ۱: نقشهٔ موقعیت منطقهٔ مورد مطالعه

تهیه و ترسیم: نگارندگان، ۱۴۰۴

روش مطالعه

در این تحقیق از تصاویر راداری سنتنیل ۱ (جدول ۱)، تصاویر ماهوارهٔ لندست، اطلاعات مربوط به منابع آب زیرزمینی منطقه و مدل رقومی ارتفاعی ۳۰ متر «SRTM» به‌عنوان مهم‌ترین داده‌های تحقیق استفاده شده است. مهم‌ترین ابزارهای مورد استفاده در تحقیق شامل نرم‌افزارهای «SNAP» (به‌منظور انجام روش تداخل‌سنجی راداری) و «ArcGIS» (به‌منظور تهیهٔ نقشه‌های مورد نیاز) بوده است. با توجه به موضوع و اهداف مورد نظر، این تحقیق در چند مرحله انجام شده است که در ادامه به تشریح آن‌ها پرداخته می‌شود:

جدول ۱: مشخصات تصاویر مورد استفاده

ماهواره	تاریخ	نوع تصویر	Pass	پلاریزیشن	دورهٔ زمانی
سنتینل ۱	۰۱/۲۰۲۱/۰۶	SLC	Descending	VV	۰
سنتینل ۱	۰۱/۲۰۲۲/۰۱	SLC	Descending	VV	۳۶۰

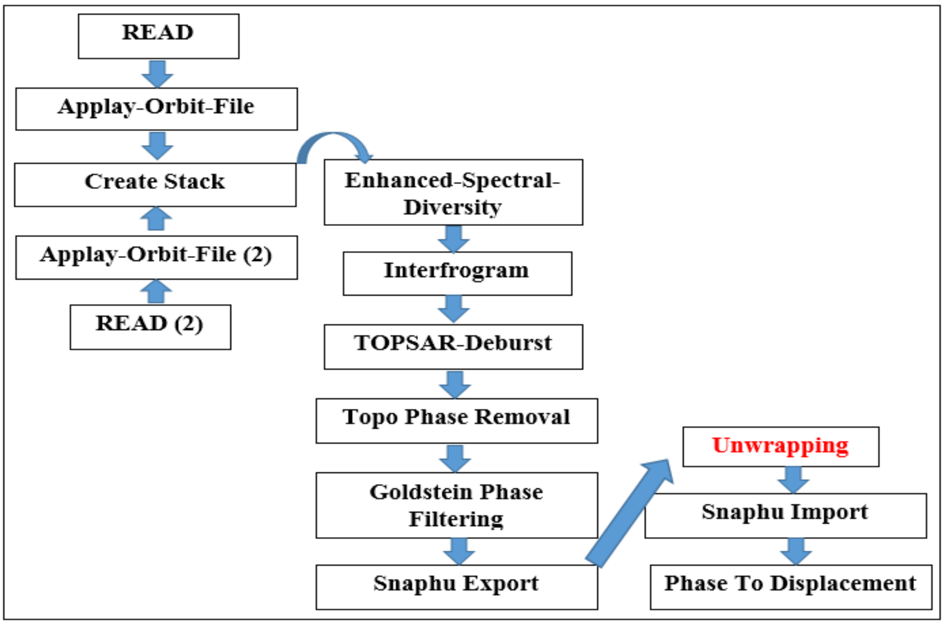
مأخذ: نگارندگان، ۱۴۰۴

– **مرحلهٔ اول (تهیهٔ نقشهٔ فرونشست منطقه):** در این تحقیق به‌منظور تهیهٔ نقشهٔ فرونشست منطقه از روش تداخل‌سنجی راداری و نرم‌افزار «SNAP» استفاده شده است. این نرم‌افزار برای کار با داده‌های «Sentinel» طراحی شده است. پس از انجام مراحل تداخل‌سنجی راداری (شکل ۲) برای تبدیل اختلاف فازها به جابه‌جایی عمودی، از یک نرم‌افزار واسطه به‌نام «Snaphu» جهت بازکردن فازها استفاده شده است. برای این‌منظور پس از انجام مراحل تداخل‌سنجی راداری از اینترفروگرام تهیه‌شده با استفاده از عملگر «Snaphu Export» خروجی گرفته شده است. سپس فایل خروجی گرفته‌شده به‌منظور بازکردن فازها وارد نرم‌افزار«Snaphu»[1] شده است. بازکردن (unwrapping) فاز دو بُعدی فرآیند بازیابی داده‌های فاز یکنواخت از یک آرایهٔ دو بُعدی مقادیر فاز شناخته‌شده تنها خارج‌قسمت رادیان pi[2] است. در مرحلهٔ بعدی فازهای بازشده وارد نرم‌افزار «Snap» شده و با استفاده از رابطهٔ ۱ اختلاف فاز به جابه‌جایی عمودی در سیستم متریک تبدیل شده است. در این رابطه، جابه‌جایی عمودی با استفاده از فاز بازشده ($\emptyset unw$) در طول موج متوسط تصویر (λ) تقسیم بر منفی چهار در عدد پی در کسینوس زاویه تابش تصویر به‌دست‌می‌آید *(ابراهیمی و همکاران، ۱۳۹۹: ۳۵)*.

رابطه ۱: تبدیل اختلاف فاز به جابه‌جایی عمودی

$$Vert\_Displ = \frac{\emptyset unw * \lambda}{-4\pi * cos\theta inc}$$

1 . http://step.esa.int/main/third-party-plugins-2/snaphu/



شکل ۲: مراحل انجام تداخل‌سنجی راداری

تهیه و ترسیم: نگارندگان، ۱۴۰۴

- **مرحلهٔ دوم (تحلیل ارتباط وضعیت ژئومورفولوژی و فرونشست رخداده):** با توجه به این‌که یکی از عوامل مؤثر در وقوع فرونشست، وضعیت ژئومورفولوژی مناطق است، در این تحقیق با استفاده از تصاویر «گوگل‌ارث» نقشهٔ واحدهای ژئومورفولوژی منطقه تهیه شده و به تحلیل وضعیت فرونشست رخداده در این واحدها پرداخته شده است.

- **مرحلهٔ سوم (تحلیل ارتباط افت منابع آب زیرزمینی و فرونشست رخداده):** با توجه به این‌که یکی از عوامل اصلی وقوع فرونشست، افت منابع آب زیرزمینی است، در این پژوهش برمبنای اطلاعات ۱۰ چاه پیزومتری و روش درونیابی «Spline»، نقشهٔ افت منابع آب زیرزمینی منطقه تهیه شده و سپس به تشریح ارتباط آن با فرونشست رخداده پرداخته شده است.

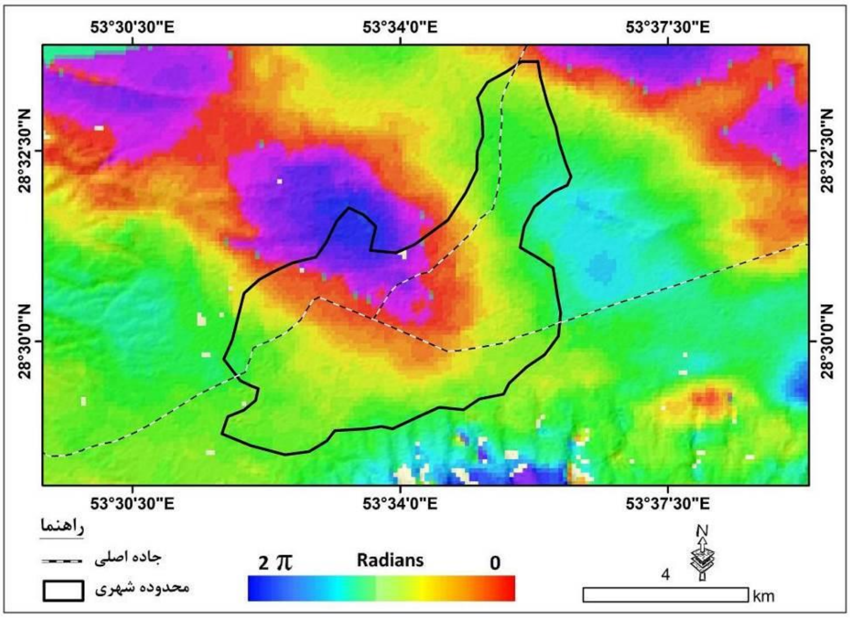
-**مرحلهٔ چهارم (تحلیل ارتباط وضعیت کاربری اراضی و فرونشست رخداده):** با توجه به این‌که سامانهٔ گوگل‌ارث انجین کاربرد زیادی در پایش وضعیت سطح زمین و تغییرات آن داردعشsafarsafa، در این مرحله به‌منظور تهیهٔ نقشهٔ کاربری اراضی منطقه، از تصاویر ماهواره‌های لندست ۸ و ۹ و سنتنیل ۱ و همچنین سامانهٔ گوگل‌ارث‌انجین استفاده شده و پس از تهیهٔ نقشهٔ کاربری اراضی منطقه، به تحلیل ارتباط آن با فرونشست رخداده پرداخته شده است.

نتایج و بحث

ارزیابی میزان فرونشست منطقه

در این پژوهش به‌منظور ارزیابی وضعیت فرونشست منطقهٔ مورد مطالعه، از تصاویر راداری سنتینل ۱ مربوط به دورهٔ زمانی ۱ ساله (۲۰۲۱/۰۱/۰۶ تا ۲۰۲۲/۰۱/۰۱) استفاده شده است. به‌منظور تهیهٔ نقشهٔ فرونشست منطقه، ابتدا نقشهٔ اینترفروگرام منطقه تهیه شده است (شکل ۳). اینترفروگرام از حاصل‌ضرب یک تصویر راداری در مختلط مزدوج تصویر دوم به‌دس می‌آید. پس از تشکیل اینترفروگرام با استفاده از عملگر «TOPSAR-Deburst» فاصلهٔ بین

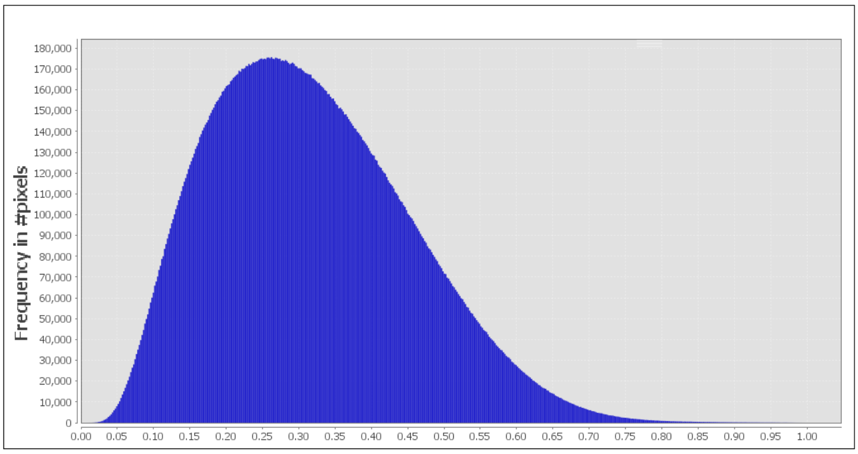
نوارهای تصویربرداری برداشته شده، سپس به‌منظور حذف تأثیر عوامل توپوگرافی، این عوامل حذف شده و در نهایت، با اعمال فیلترینگ کیفیت تصاویر افزایش یافته است.



شکل ۳: نقشهٔ اینترفروگرام منطقهٔ مورد مطالعه

تهیه و ترسیم: نگارندگان، ۱۴۰۴

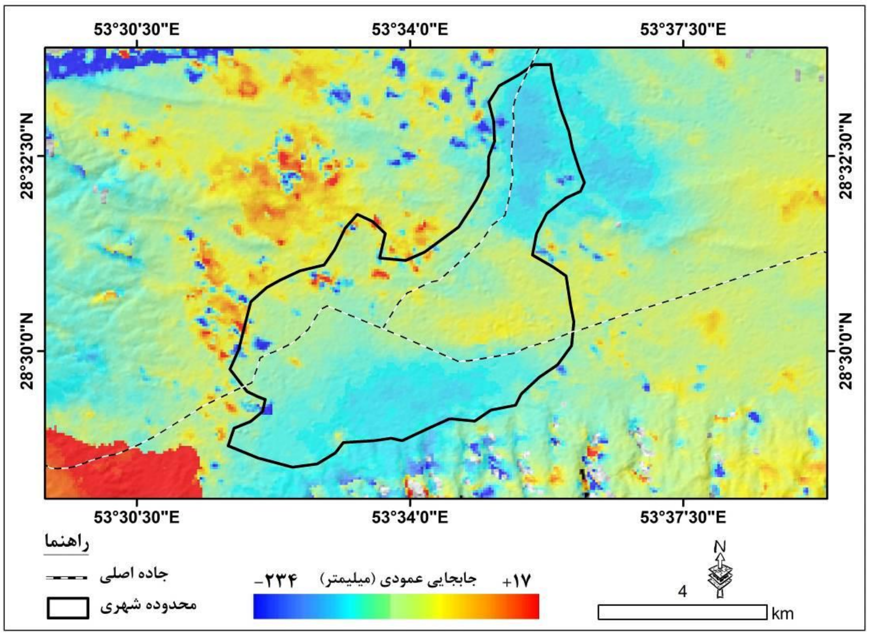
پس از تشکیل اینترفرگرام به‌منظور ارزیابی امکان انجام تداخل‌سنجی با استفاده از دو تصویر حاضر، میزان همدسی (Coherence) آن‌ها محاسبه شده است (شکل ۴) که با توجه به نتایج به‌دست‌آمده، بیش‌ترین میزان همبستگی تصاویر بین ۲۰/. تا ۳۰/. قراردارد که در سطح قابل قبولی می‌باشد.



شکل ۴: نمودار میزان همدسی تصاویر

تهیه و ترسیم: نگارندگان، ۱۴۰۴

در مرحلهٔ بعد، از یک نرم‌افزار واسطه به‌نام «Snaphu» جهت بازکردن فازها استفاده شده است و فازهای بازشده وارد نرم‌افزار «Snap» شده و با استفاده از رابطهٔ ۱ اختلاف فاز به جابه‌جایی عمودی در سیستم متریک تبدیل و در نهایت نقشهٔ نهایی تهیه شده است (شکل ۵). براساس نقشهٔ تهیه‌شده، محدودهٔ مطالعاتی طی دورهٔ زمانی ۱ ساله بین ۱۷+ تا ۲۳۴- میلی‌متر جابه‌جایی داشته است. بر این اساس می‌توان‌گفت که ماکزیمم فرونشست منطقه ۲۳۴ میلی‌متر بوده است. آنالیز پراکنش مکانی فرونشست رخ‌داده بیانگر این است که در یک روند کلی، میزان فرونشست به‌سمت مناطق شمالی شهر جهرم دارای روند افزایشی است و در مجموع میزان فرونشست در محدودهٔ شهری جهرم بین ۲۸ تا ۱۷۹ میلی‌متر است.



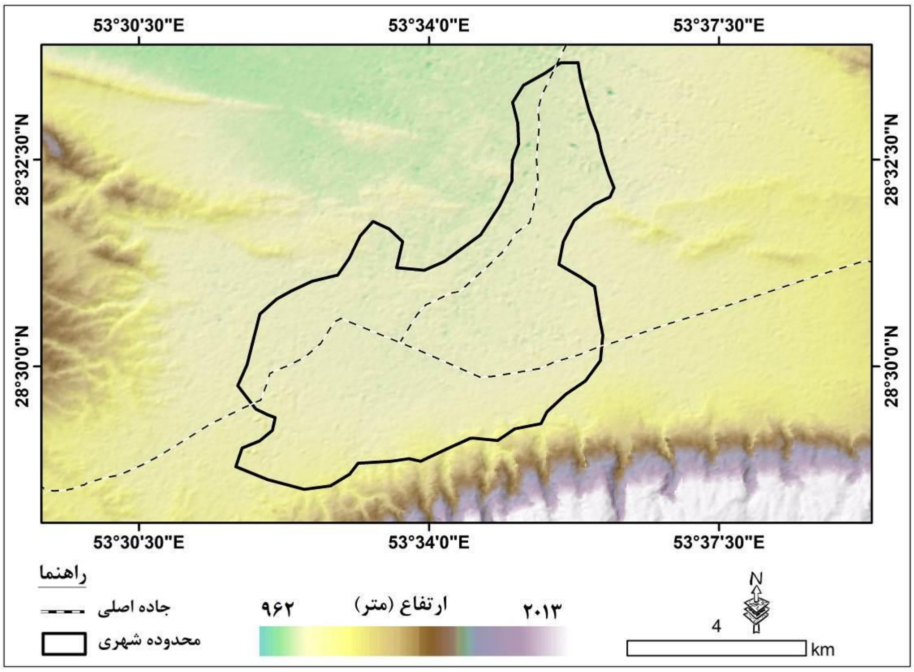
شکل ۵: نقشهٔ میزان فرونشست محدودهٔ مطالعاتی از تاریخ ۲۰۲۱/۰۱/۰۶ تا ۲۰۲۲/۰۱/۰۱

تهیه و ترسیم: نگارندگان، ۱۴۰۴

تحلیل وضعیت ژئومورفولوژی منطقه و ارتباط آن با فرونشست رخ‌داده

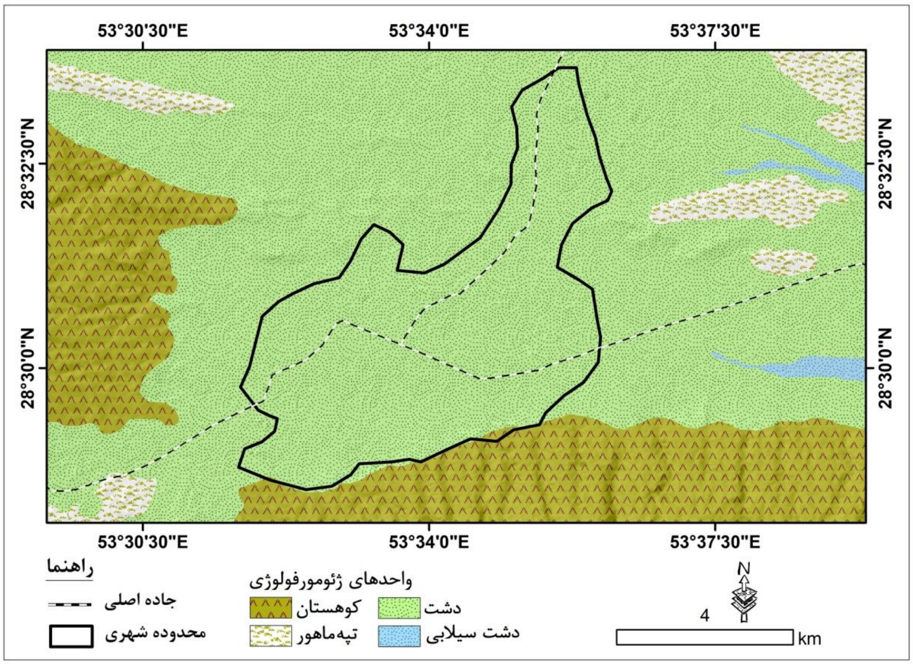
شهر جهرم در ارتفاع حدود ۱۰۵۰ متری از سطح دریا قراردارد و اختلاف ارتفاع آن با مناطق حاشیه‌ای از جمله مناطق شمالی آن، بسیارکم است (شکل ۶). قرارگرفتن محدودهٔ شهری و حاشیهٔ شهری جهرم در واحد دشت و اختلاف ارتفاع کم آن سبب شده است تا بخش زیادی از منطقه را مناطق با شیب کم‌تر از ۱۰ درصد دربرگیرد. اختلاف ارتفاع و شیب کم محدودهٔ مطالعاتی سبب شده است تا این محدوده فاقد موانع و عوارض محدودکننده باشد. همچنین با توجه به این‌که وضعیت ژئومورفولوژی هر منطقه تعیین‌کنندهٔ توانمندی‌ها و محدودیت‌های آن منطقه جهت انجام فعالیت‌های مختلف است *(سالاری و همکاران، ۱۳۹۶: ۴۳۷؛ نیری و همکاران، ۱۳۹۷: ۵۰)*، در این پژوهش نقشهٔ واحدهای ژئومورفولوژی منطقه تهیه شده است (شکل ۷). بررسی وضعیت ژئومورفولوژی منطقهٔ مورد مطالعه بیانگر این است که بخش زیادی از این منطقه را واحد دشت دربرگرفته است و با توجه به این‌که واحد دشت، فاقد موانع محدودکننده جهت توسعهٔ اراضی کشاورزی و سکونتگاهی است *(نیری و همکاران، ۱۳۹۶: ۱۲۶)*؛ بنابراین بخش زیادی از این واحد را اراضی کشاورزی و نواحی سکونتگاهی دربرگرفته است. با توجه به این‌که نوع

کاربری‌های اراضی نقش تعیین‌کننده‌ای در تغییرات محیطی و وقوع مخاطرات دارد؛ بنابراین می‌توان‌گفت که نوع واحدهای ژئومورفولوژی در بروز مخاطرهٔ فرونشست منطقه نقش مهمی داشته است.



شکل ۶: نقشهٔ وضعیت ارتفاعی منطقهٔ مورد مطالعه

تهیه و ترسیم: نگارندگان، ۱۴۰۴

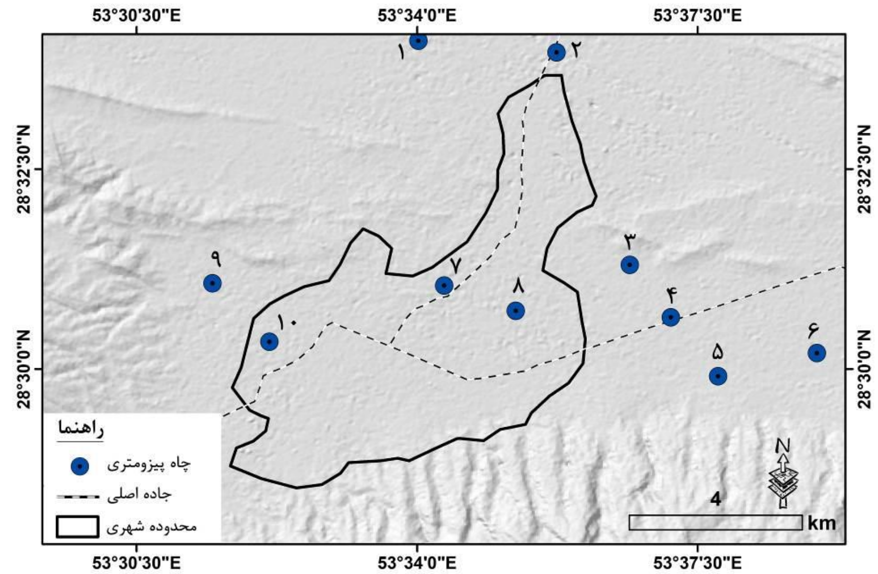


شکل ۷: نقشهٔ واحدهای ژئومورفولوژی منطقه

تهیه و ترسیم: نگارندگان، ۱۴۰۴

تحلیل ارتباط افت منابع آب زیرزمینی و فرونشست رخداده

افت منابع آب زیرزمینی، عامل اصلی بروز مخاطرهٔ فرونشست محسوب می‌شود *(اسدی و همکاران، ۱۴۰۰: ۱۴؛ گنجائیان و همکاران، ۱۴۰۱: ۲۲۲)*. با توجه به اهمیت موضوع، در این پژوهش به‌منظور بررسی وضعیت افت منابع آب زیرزمینی منطقه، از اطلاعات ۱۰ چاه پیزومتری استفاده شده که موقعیت آن‌ها در شکل ۸ نشان‌داده شده است.



شکل ۸: نقشهٔ موقعیت چاه‌های پیزومتری مورد مطالعه

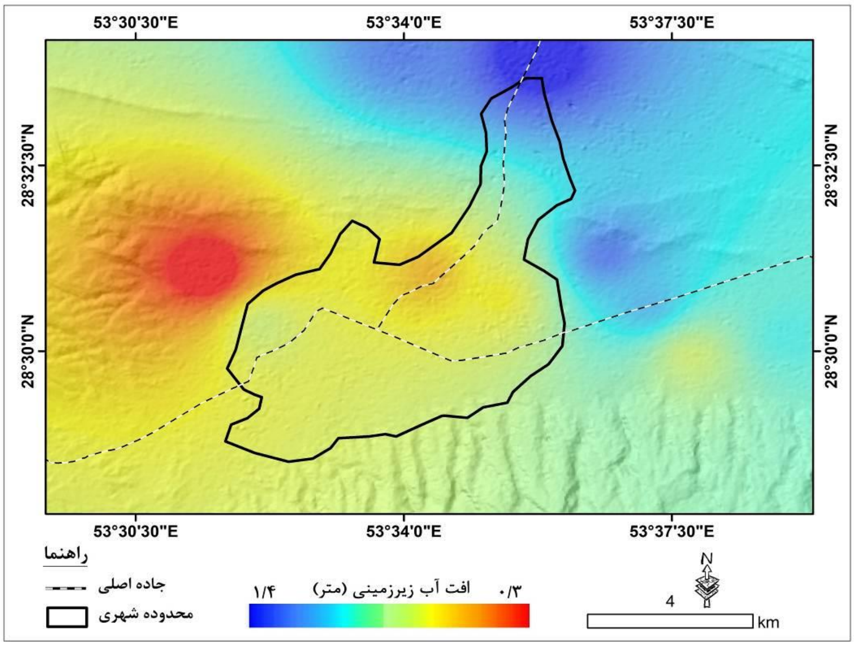
تهیه و ترسیم: نگارندگان، ۱۴۰۴

نتایج آنالیز افت آب زیرزمینی در منطقهٔ مورد مطالعه بیانگر است که در بیش‌تر چاه‌های منطقه، میانگین سالانهٔ افت آب زیرزمینی بیش از ۱ متر بوده است (جدول ۲). بر اساس نتایج به‌دست‌آمده، چاه شماره ۲ که در بخش شمالی محدودهٔ شهری جهرم قراردارد، با میانگین افت سالانه ۱/۴ متر، دارای بیش‌ترین میانگین افت آب زیرزمینی بوده است. پس از ارزیابی وضعیت افت سالانهٔ آب زیرزمینی چاه‌های مورد مطالعه، با استفاده از روش درون‌یابی «Spline»، نقشهٔ میانگین افت آب زیرزمینی منطقه تهیه شده است (شکل ۹). بر اساس نقشهٔ تهیه‌شده، مناطق شمالی محدودهٔ شهری جهرم دارای بالاترین افت منابع آب زیرزمینی بوده است و با توجه به این‌که بیش‌ترین میزان فرونشست نیز مربوط به این مناطق بوده است؛ بنابراین می‌توان‌گفت که بین افت منابع آب زیرزمینی و فرونشست منطقه، ارتباط مستقیم و معناداری وجود دارد. در واقع، با توجه به این‌که دشت جهرم فاقد رودخانه‌های دائمی و منابع آب سطحی کافی است، توسعهٔ اراضی کشاورزی با افزایش بهره‌برداری از منابع آب زیرزمینی همراه است و همین مسئله زمینه را برای وقوع فرونشست در محدودهٔ شهری و حاشیهٔ شهری جهرم فراهم آورده است. براساس گزارش سازمان آب منطقه‌ای استان فارس، دشت جهرم از سال ۱۳۴۲ جزء دشت‌های ممنوعه بوده و در طی سال‌های اخیر، بیش از ۲۰۰۰ چاه غیرمجاز در آن شناسایی شده است. مجموع نتایج حاصله از این بخش بیانگر این است که وضعیت هیدروژئومورفولوژی دشت جهرم و توسعهٔ اراضی کشاورزی بدون توجه به توان آبی منطقه، زمینه را برای بروز مخاطرهٔ فرونشست در این منطقه فراهم آورده است.

جدول ۲: وضعیت افت منابع آب زیرزمینی در چاه‌های پیزومتری مورد مطالعه

شماره چاه	دوره زمانی مورد مطالعه	میانگین افت سالانه (متر)
۱	۱۳۸۱-۱۳۹۸	۱/۲
۲	۱۳۸۱-۱۳۹۸	۱/۴
۳	۱۳۸۱-۱۳۹۸	۱/۲
۴	۱۳۸۱-۱۳۹۸	۱/۱
۵	۱۳۸۱-۱۳۹۸	۰/۸
۶	۱۳۸۱-۱۳۹۸	۱
۷	۱۳۸۱-۱۳۹۸	۰/۶
۸	۱۳۸۱-۱۳۹۸	۰/۷
۹	۱۳۸۱-۱۳۹۸	۰/۳
۱۰	۱۳۸۱-۱۳۹۸	۰/۸

مأخذ: سازمان آب و منطقه‌ای استان فارس



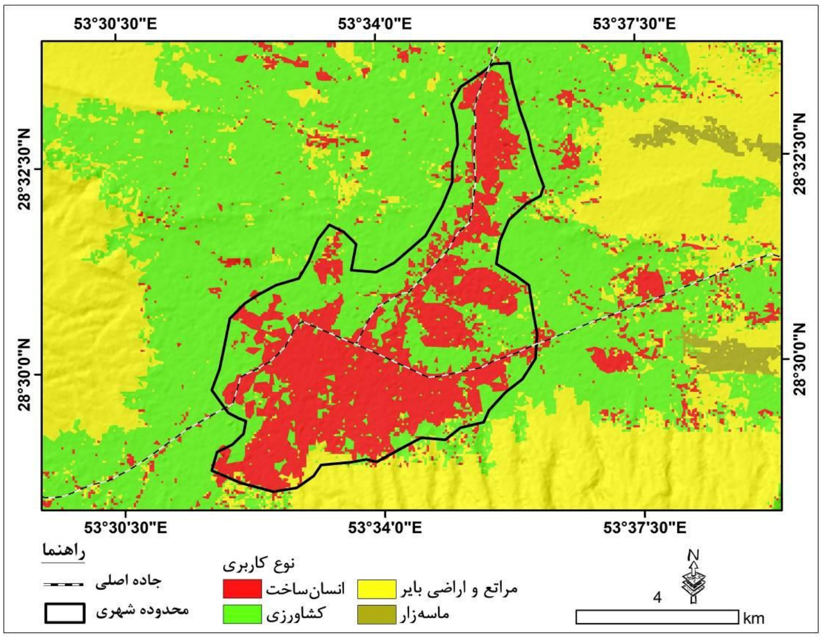
شکل ۹: نقشهٔ میانگین افت منابع آب زیرزمینی منطقهٔ مورد مطالعه

تهیه و ترسیم: نگارندگان، ۱۴۰۴

تحلیل ارتباط وضعیت کاربری اراضی و فرونشست رخداده

با توجه به این‌که نوع کاربری اراضی، تعیین‌کنندهٔ وضعیت فعالیت‌های انسانی و میزان تأثیرات آن بر محیط‌زیست است (*محمدخان و همکاران، ۱۳۹۸: ۲۰۲۰؛ نگهبان و همکاران، ۱۳۹۸: ۳۴۴؛ سالاری و همکاران، ۱۳۹۹: ۸۷*) و همچنین نقش مستقیمی در وقوع فرونشست دارد، در این بخش با استفاده از تصاویر ماهواره‌های سنتینل ۱ و لندست ۸ و ۹ و سامانهٔ گوگل‌ارث‌انجین، نقشهٔ کاربری اراضی منطقه تهیه شده است (شکل ۱۰). براساس نقشهٔ تهیه‌شده، بخش

زیادی از وسعت منطقهٔ مورد مطالعه را اراضی کشاورزی و نواحی سکونتگاهی دربرگرفته است. در واقع، تحت‌تأثیر وضعیت ژئومورفولوژی منطقه، بخش زیادی از وسعت منطقه به اراضی کشاورزی اختصاص یافته و با توجه به این‌که آب مورد استفاده در بخش کشاورزی منطقه از طریق منابع آب زیرزمینی تأمین می‌شود؛ بنابراین کاربری کشاورزی منطقه، نقش اصلی را در فرونشست زمین داشته است. همچنین لازم به ذکر است که در بخش‌های جنوبی محدودهٔ شهری جهرم نیز میزان فرونشست بیش‌تر از سایر نواحی بوده است. با توجه به این‌که در این منطقه نیز با تراکم زیاد نواحی سکونتگاهی مواجه هستیم؛ بنابراین می‌توان‌گفت که علاوه بر افت منابع آب زیرزمینی، ساخت‌وسازها و خصوصاً سازه‌های سنگین منطقه، در تشدید نرخ فرونشست منطقه مؤثر بوده‌اند.



شکل ۱۰: نقشهٔ کاربری اراضی منطقهٔ مورد مطالعه

تهیه و ترسیم: نگارندگان، ۱۴۰۴

نتیجه‌گیری

شهر جهرم در واحد دشت قراردارد و ازنظر ژئومورفولوژی، فاقد موانع محدودکننده جهت توسعهٔ اراضی کشاورزی است. روند افزایشی جمعیت و توسعهٔ اراضی کشاورزی در دشت جهرم سبب افزایش فشار بر منابع آب زیرزمینی در این دشت شده است. در واقع، با توجه به این‌که دشت جهرم از نظر اقلیمی در منطقهٔ نیمه‌خشک قراردارد و با کمبود منابع آب سطحی مواجه است؛ بنابراین جهت تأمین آب مورد نیاز کشاورزی و مصارف صنعتی و خانگی، از منابع آب زیرزمینی استفاده می‌شود و همین مسئله سبب شده است تا میانگین سالانهٔ افت منابع آب زیرزمینی در این منطقه بیش از ۱ متر باشد. افت شدید منابع آب زیرزمینی باعث وقوع مخاطرهٔ فرونشست در دشت جهرم و خصوصاً محدودهٔ شهری و حاشیهٔ شهری جهرم شده است. با توجه به اهمیت موضوع، در این پژوهش با استفاده از تصاویر راداری سنتنیل ۱ به ارزیابی میزان فرونشست رخداده در محدودهٔ شهری و حاشیهٔ شهری جهرم از تاریخ ۲۰۲۱/۰۱/۰۶ تا ۲۰۲۲/۰۱/۰۱ پرداخته شده است. براساس نتایج حاصله، محدودهٔ مطالعاتی طی دورهٔ زمانی ۱ ساله با ماکزیمم ۲۳۴ میلی‌متر فرونشست مواجه شده است. آنالیز پراکنش مکانی فرونشست رخداده

بیانگر این است که در یک روند کلی، میزان فرونشست به‌سمت مناطق شمالی شهر جهرم دارای روند افزایشی است و در مجموع میزان فرونشست در محدودهٔ شهری جهرم بین ۲۸ تا ۱۷۹ میلی‌متر است. مجموع نتایج حاصله از این پژوهش نشان‌داده است که شهر جهرم با فرونشست قابل‌توجهی مواجه است که در صورت تداوم وضع موجود می‌تواند به یک مخاطرهٔ زیانبار تبدیل شود؛ بنابراین لازم است تا بر روند فرونشست و راهکارهای کنترل آن از جمله کنترل مصرف بیش‌ازحد منابع آب زیرزمینی نظارت بیش‌تری صورت‌گیرد.

منابع

ابراهیمی، عطرین؛ افشان قاسمی؛ حمید گنجائیان (۱۳۹۹). پایش میزان فرونشست محدوده شهری پاکدشت با استفاده از روش تداخل‌سنجی راداری، جغرافیا و روابط انسانی. دوره ۲. شماره ۸. صفحات ۴۱-۲۹.
https://dorl.net/dor/20.1001.1.26453851.1399.2.4.3.1

اسدی، معصومه؛ حمید گنجائیان؛ مهناز جاودانی؛ مهدیه قادری‌حسب (۱۴۰۰). ارزیابی ارتباط بین عوامل طبیعی و میزان فرونشست در دشت ایوانکی با استفاده از تصاویر رادار. هیدروژئولوژی، دوره ۶. شماره ۱: صفحات ۲۲-۱۲.
https://doi.org/10.22034/hydro.2021.13016

دهقانی، مریم (۱۳۹۳). ارائه الگوریتمی جدید بر مبنای تکنیک تداخل سنجی راداری به منظور پایش فرونشست سطح زمین ناشی از استخراج آب‌های زیرزمینی. نشریه مهندسی فناوری اطلاعات مکانی، دوره ۲. شماره ۲. صفحات ۷۳-۶۱.
http://jgit.kntu.ac.ir/article-1-135-fa.html

رکنی، جعفر؛ سیدرضا حسین‌زاده؛ غلامرضا لشکری‌پور؛ سعداله ولایتی (۱۳۹۵). بررسی فرونشست زمین، چشم‌اندازها وتحولات ژئومورفولوژی ناشی ازآن در دشت‌های تراکمی، مطالعات جغرافیایی مناطق خشک. دوره ۶. شماره ۲۴. صفحات ۳۸-۲۱.
https://jargs.hsu.ac.ir/article_161414.html

رنجبرباروق، زهرا؛ محمد فتح‌اله‌زاده (۱۴۰۱). بررسی فرونشست زمین با استفاده از سری زمانی تصاویر راداری و ارتباط آن با تغییرات تراز آب‌های زیرزمینی (مطالعه موردی: کلان شهر کرج)، پژوهش‌های ژئومورفولوژی کمی، دوره ۱۰. شماره ۴. صفحات ۱۵۵- ۱۳۸.
https://dorl.net/dor/20.1001.1.22519424.1401.10.4.8.3

سالاری، ممند؛ هادی نیری؛ حمید گنجائیان؛ خبات امانی (۱۳۹۶). مکان‌گزینی جهات مناسب توسعهٔ شهری کامیاران با رویکرد مخاطره‌شناسی مبتنی بر اعمال مناطق ممنوع ژئومورفولوژیکی. مدیریت مخاطرات محیطی، دوره ۴. شماره ۴. صفحات ۴۳۶-۴۱۹.
https://doi.org/10.22059/jhsci.2018.252694.341

سالاری، ممند؛ هادی نیری؛ حمید گنجائیان؛ خبات امانی (۱۳۹۹). ارزیابی و پیش بینی روند توسعه فیزیکی نواحی سکونتگاهی با تأکید بر رویکرد ژئومورفولوژیک و مدیریت محیط (مطالعه موردی: شهر پاوه)، پژوهش‌های ژئومورفولوژی کمی، دوره ۹. شماره ۱. صفحات ۱۰۱-۸۶.
https://doi.org/10.22034/gmpj.2020.109536

شریفی‌کیا، محمد (۱۳۹۱). تعیین میزان و دامنه فرونشست زمین به کمک روش تداخل‌سنجی راداری (D-InSAR) در دشت نوق- بهرمان، مجله برنامه‌ریزی و آمایش فضا. دوره ۱۶. شماره ۳. صفحات ۷۷-۵۵.
http://hsmsp.modares.ac.ir/article-21-5076-fa.html

صفاری، امیر؛ فرهاد جعفری (۱۳۹۵). سنجش مقدار و پهنه‌بندی خطر فرونشست زمین با استفاده از روش تداخل سنجی راداری (مطالعه موردی: دشت کرج -شهریار)، انجمن جغرافیای ایران. دوره ۴. شماره ۴۸. صفحات ۱۸۸-۱۷۵.
https://www.sid.ir/paper/150233

گنجائیان، حمید (۱۳۹۹). مخاطرات ژئومورفولوژیک مناطق شهری، روش‌های مطالعه و راهکارهای کنترل آن، انتشارات انتخاب. ۱۴۴ صفحه.
https://www.gisoom.com/book/11628118

گنجائیان، حمید (۱۴۰۳). شناسایی مناطق در معرض ایجاد فروچاله با استفاده از تصاویر راداری (مطالعه موردی: دشت قروه)، پژوهش‌های فرسایش محیطی. دوره ۱۴. شماره ۲. صفحات ۱۰۵-۸۷.
http://dx.doi.org/10.61186/jeer.14.2.6

گنجائیان، حمید؛ معصومه اسدی؛ فاطمه منبری؛ عطرین ابراهیمی (۱۴۰۱). تحلیل وضعیت فرونشست محدوده شهری همدان با استفاده از تصاویر راداری و ماهواره‌ای، جغرافیا و مخاطرات محیطی. دوره ۱۱. شماره ۴. صفحات ۲۳۶-۲۲۱.
https://doi.org/10.22067/geoeh.2022.76383.1217

گنجائیان، حمید؛ افشان قاسمی؛ عطرین ابراهیمی؛ زهرا اسدپور (۱۳۹۸). ارزیابی میزان فرونشست دشت همدان- بهار با استفاده از روش سری زمانی SBAS. مطالعات جغرافیایی مناطق خشک، دوره ۹. شماره ۳۶. صفحات ۷۳-۶۲.
https://jargs.hsu.ac.ir/article_161495.html

گنجائیان، حمید؛ فاطمه منبری؛ افشان قاسمی؛ مژگان نصرتی (۱۴۰۱). ارزیابی و تحلیل مخاطره فرونشست در دشت کبودرآهنگ- فامنین. سپهر، دوره ۳۱. شماره ۱۲۴. صفحات ۸۶-۷۵.
https://doi.org/10.22131/sepehr.2023.553000.2871

محمدخان، شیرین؛ حمید گنجائیان؛ سمیه شهری؛ امیرعلی عباس‌زاده (۱۳۹۸). پیش‌بینی روند توسعه شهری به سمت مناطق مخاطره‌آمیز با استفاده از تصاویر چندزمانه (مطالعه موردی: شهر مریوان)، سپهر. دوره ۲۸. شماره ۱۱۰. صفحات ۱۱۷-۱۰۷.
https://doi.org/10.22131/sepehr.2019.36615

محمدخان، شیرین؛ حمید گنجائیان؛ لیلا گروسی؛ زهرا زنگنه‌تبار (۱۳۹۸). ارزیابی تأثیر افت آب‌های زیرزمینی بر میزان فرونشست با استفاده از تصاویر راداری سنتینل-۱؛ محدوده مورد مطالعه: دشت قروه. سپهر، دوره ۲۸. شماره ۱۱۲. صفحات ۲۲۹-۲۱۹.
https://doi.org/10.22131/sepehr.2020.38617

موسوی، سیده‌محدثه؛ هادی جعفری؛ علی‌اکبر مومنی؛ جهانگیر سپهری (۱۳۹۸). بررسی فرونشست زمین ناشی از برداشت بی‌رویه آب زیرزمینی در دشت کردی شیرازی، استان هرمزگان. مخاطرات محیط طبیعی. دوره ۸. شماره ۲۲. صفحات ۱۱۰-۹۵.
https://doi.org/10.22111/jneh.2019.26537.1443

مهرابی، علی؛ صادق کریمی؛ مهران خالصی (۱۴۰۲). تحلیل فضایی فرونشست دشت جیرفت با استفاده از تکنیک پیکسل‌های کوهرنس (CPT)، جغرافیا و برنامه‌ریزی محیطی. دوره ۳۴. شماره ۱. صفحات ۱۱۶-۹۹.
https://doi.org/10.22108/gep.2022.133667.1525

نگهبان، سعید؛ تینا پی‌سوزی؛ حمید گنجائیان؛ میلاد نوروزی (۱۴۰۰). شناسایی مناطق مستعد وقوع زمین‌لغزش و جابجایی عمودی با استفاده از تصاویر راداری (مطالعه موردی: محدوده شهری و حاشیه شهری لواسان)، جغرافیا و مخاطرات محیطی. دوره ۱۰. شماره ۳. صفحات ۱۸-۱.
https://doi.org/10.22067/geoeh.2021.71728.1094

نگهبان، سعید؛ حمید گنجائیان؛ عطرین ابراهیمی؛ کامیار امامی (۱۳۹۸). پایش و پیش‌بینی روند تغییرات نواحی سکونتگاهی با استفاده از تصاویر چند زمانه (مطالعه موردی: شهر سنقر). فیزیک زمین و فضا، دوره ۴۵. شماره ۲. صفحات ۳۵۴-۳۴۳.
https://doi.org/10.22059/jesphys.2019.275076.1007084

نگهبان، سعید؛ حمید گنجائیان؛ مژده فریدونی‌کردستانی؛ زیبا چشمه‌سفیدی (۱۳۹۸). ارزیابی توسعه فیزیکی شهرها و گسترش به سمت مناطق ممنوعه ژئومورفولوژیکی با استفاده از LCM (مطالعه موردی: شهر سنندج)، مخاطرات محیط طبیعی. دوره ۸. شماره ۲۰. صفحات ۵۲-۳۹.
https://doi.org/10.22111/jneh.2018.21943.1317

نیری، هادی؛ ممند سالاری؛ حمید گنجائیان؛ خبات امانی (۱۳۹۶). ارزیابی ژئومورفولوژیکی تناسب زمین برای گسترش کالبدی شهر سنندج با اعمال مناطق ممنوعه، پژوهش‌های جغرافیای برنامه‌ریزی شهری. دوره ۵. شماره ۱. صفحات ۱۴۷-۱۲۵.
https://doi.org/10.22059/jurbangeo.2017.63213

نیری، هادی؛ حمید گنجائیان؛ خبات امانی (۱۳۹۷). ارزیابی شاخص‌های محیطی تناسب زمین برای گسترش کالبدی شهر سروآباد با تلفیق دو مدل تحلیل شبکه‌ای و منطق فازی، جغرافیای اجتماعی شهری. دوره ۵. شماره ۱. صفحات ۶۲-۴۹.
https://doi.org/10.22103/JUSG.2018.1961

References

Bozzano, F., Esposito, C., Franchi, S., Mazzanti, P., Perissin, D., & Rocca, A. (2015). Understanding the subsidence process of a quaternary plain by combining geological and hydrogeological modelling with satellite InSAR data: the acque albule plain case study. Remote Sens. Environ. 168, 219-238.
https://doi.org/10.1016/j.rse.2015.07.010

Chaussard, E., Wdowinski, S., Cabral-Cano, E., & Amelung, F. (2014). Land subsidence in central Mexico detected by ALOS InSAR time-series, Remote Sensing of Environment, V 140.
http://dx.doi.org/10.1016/j.rse.2013.08.038

Chen, B., Gong, H., Li, X., Lei, K., Ke, Y., Duan, G., & Zhou, C. (2015). Spatial correlation between land subsidence and urbanization in Beijing, China, Natural Hazards, 75, 2637-2652.
http://dx.doi.org/10.1007/s11069-014-1451-6

Hongdong, F., Kazhong, D., Chengyu, J., Chuanguang, Z., & Jiqun, X. (2011). Land subsidence monitoring by D-InSAR technique, Mining Science and Technology (China), 21, 869-872.
http://dx.doi.org/10.1016/j.mstc.2011.05.030

Khan, S. D., Faiz, M. I., Gadea, C. A., & A, Ahmad. (2023). Study of land subsidence by radar interferometry and hot spot analysis techniques in the Peshawar Basin, Pakista. The Egyptian Journal of Remote Sensing and Space Science, 26 (1), 173-184.
https://doi.org/10.1016/j.ejrs.2023.02.001

Motagh, M., Djamour, Y., Walter, T. R., Wetzel, H.U., Zschau, J., & Arabi, S. (2007). Land subsidence in Mashhad Valley, northeast Iran: results from InSAR, levelling and GPS. Geophysical Journal International, 168(2): 518-526.
http://dx.doi.org/10.1111/j.1365-246X.2006.03246.x

Pacheco, J., Arzate, J., Rojas, E., Arroyo, M., Yutsis, V., & Ochoa, G. (2006). Delimitation of ground failure zones due to land subsidence using gravity data and finite element modeling in the Queretaro valley, Mexico. Engineering Geology, 84:143-160.
http://dx.doi.org/10.1016/j.enggeo.2005.12.003

Sheng, H., Zhou, L., Huang, C., Ma, S., Xian, L., Chen, Y., & Yang., F. (2023). Surface Subsidence Characteristics and Causes in Beijing (China) before and after COVID-19 by Sentinel-1A TS-InSAR. Remote Sensing, 15 (5).
http://dx.doi.org/10.3390/rs15051199

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.
https://doi.org/10.1016/j.isprsjprs.2019.05.005