



Analysis of the role of human factors in the occurrence of subsidence using satellite images and radar (Case study: Pishva city)

Mehdi Safari Namivandi^{1✉} | Masoume Asadi² | Saiad Irani Haris³ | Abolfazl Amini⁴

1. Corresponding Author, Department of Geomorphology, Faculty of Geography, University of Kharazmi, Tehran, Iran. safarimehdi534@gmail.com

2. Research Institute of Soil Conservation and Watershed Management, Agricultural Research, Education and Extension Organization, Tehran, Iran. Asadi_zhina@yahoo.com

3. Department of Geography and Urban Planning, Faculty of Geography, National Defense University, Tehran, Iran. S.irani83@yahoo.com

4. Department of Computer Software, Allameh Rafiei University, Qazvin, Iran. abolfazlamini.academic67@gmail.com

Article Information

Research Paper

Vol: 15
No: 57
P: 23-39
Received: 2023-08-15
Revised: 2023-09-07
Accepted: 2023-09-08
Published: 2024-11-01

Keywords:

- Landuse Changes
- Subsidence
- Pishva city
- Sentinel 1
- Small BAseline Subset (SBAS)

Cite this Article:

Safari Namivandi, Mehdi., Asadi, Masoume., Irani Haris, Sajad & Amini, Abolfazl. (2024). Analysis of the role of human factors in the occurrence of subsidence using satellite images and radar (Case study: Pishva city). *Journal of Arid Regions Geographic Studies* 15(57): 23-39.
doi: 10.22034/jargs.2023.409440.1053

Publisher: Hakim Sabzevari University

© The Author(s)



[10.22034/jargs.2023.409440.1053](https://doi.org/10.22034/jargs.2023.409440.1053)

Abstract

Aim: Land subsidence is an invisible danger that has faced many cities in Iran, including Pishva, with a serious challenge. The importance of subsidence has led to the evaluation of the amount of subsidence in the urban area and outskirts of Pishva using radar images and the SBAS time series method (2020-2022) in this research.

Material & Method: In this research, Landsat satellite images, Sentinel 1 radar images, and library information were used as research data to achieve the desired goals. The working method has been that first, using satellite images, the trend of land use changes in the region has been evaluated, and then, based on the available information, the state of the decline of underground water resources in the region has been investigated. In the following, the subsidence rate of the region has been calculated using the SBAS time series method.

Finding: The results of this research have shown that the studied area has subsided between 107 and 411 mm during a 2-year period (2020 to 2022), based on which it can be said that the maximum annual subsidence of the area is more than 20 cm. The results of the evaluation of land use changes in the region have shown that during the 30 years (1991 to 2021), the land use of manufactured areas has increased from 2.2 to 9.6 square kilometers. Also, the level of piezometric wells in the region has faced an annual drop of more than 1 meter.

Conclusion: Considering that the development of manufactured uses is associated with an increase in the pressure on the earth's surface, and also the development of residential and industrial areas is associated with an increase in the use of underground water resources, the changes in land uses during recent years, the context has provided for subsidence in the region.

Innovation: The method's high precision allows the research results to be used for various construction planning.

Extended Abstract

1. Introduction

Usually, land subsidence is referred to as vertical downward movements of the earth's surface, which a small horizontal vector can accompany. This phenomenon is a global and morphological problem affected by human activities and natural factors. The increasing trend of population and the development of constructions, as well as the overexploitation of underground resources, have caused the risk of subsidence to be raised as one of the critical risks in many countries, including Iran, in recent years. Considering that no special measures have been taken in Iran to prevent subsidence, the risk of subsidence will be one of the most critical challenges for advancing Iranian cities, especially cities in arid and semi-arid regions. Landslides are one of the most important natural hazards that have many consequences, but they have received less attention due to low human casualties compared to other natural disasters. The occurrence of this phenomenon in the plains and especially in urban areas causes much damage. Among the areas at risk of subsidence are the cities of Tehran province, including Pishva. Pishva is located in the Varamin Plain, a semi-arid region that has been associated with the increasing trend of population and industrial development in recent years due to its proximity to the city of Tehran. Since the increasing trend of population and human activities in this region has not been proportional to its environmental capabilities, the Pishva Plain has faced the risk of subsidence in recent years. Considering the issue's importance, in this research, the amount of subsidence in the urban area and the urban periphery of Pishva and the analysis of the factors influencing its occurrence have been evaluated.

2. Materials and methods

In this research, Landsat satellite images, Sentinel 1 radar images, and library information were used as research data to achieve the desired goals. The essential tools used in the research include ENVI, IDRISI, GMT, and ArcGIS, which were used to prepare land use maps, analyze land use changes, prepare subsidence maps, and prepare final maps, respectively. Also, the models used in the research included the maximum likelihood model, LCM model, and SBAS time series model, which were used to prepare land use maps, analyze land use changes, and prepare the final subsidence map, respectively. This research has been done in two stages. In the first stage, using Landsat satellite images from 1991, 2001, 2011, and 2021, the trend of land use changes in the study area has been evaluated. In the second stage, the amount of subsidence in the studied area was evaluated using Sentinel 1 radar images, radar interferometry method, and SBAS time series.

3. Discussion and results

Pishva is located in the east of Tehran. This city is located in the Varamin Plain and has faced the phenomenon of subsidence in recent years. The importance of subsidence and its imperceptible process caused this research to evaluate the subsidence rate of this plain using the SBAS time series method. The results obtained from this research have shown that the urban area and outskirts of Pishva have subsided between 107 and 411 mm during a period of 2 years. The investigations carried out in this research have shown that the main reason for the subsidence that occurred in the region was human activities. However, the geomorphological situation of the region has also provided the ground for its subsidence. The natural and human geography of Pishva city has caused this city and its adjacent areas to be associated with much development in recent years. The geomorphological situation of this region has caused it to be devoid of obstacles and limited landforms for the development of manufactured uses and agricultural lands. Also, the location of Pishva near Tehran has provided the basis for the increase in population and the development of industries in the areas adjacent to Pishva. According to the mentioned cases, natural and human factors have caused this area to undergo much development in recent years, and changes in land use have accompanied this development.

4. Conclusion

The results of this research have shown that the studied area has subsided between 107 and 411 mm during a 2-year period (2020 to 2022), based on which it can be said that the maximum annual subsidence of the area is more than 20 cm. In this research, to evaluate the effective factors in the subsidence of the region, the geomorphology and land use changes of the region from 1991 to 2021 have been investigated. The results of evaluating the region's geomorphology show that the study area corresponds to the plain and has

no limiting obstacles. This problem has provided the basis for developing manufactured uses and regional agricultural lands. Also, the results of the evaluation of land use changes in the region have shown that during the 30-year period (1991 to 2021), manufactured areas have faced a significant increase, so this use had an area of 2.2 square kilometers in 1991. (Equivalent to 5.5% of the region's area), which has increased to 6.9 square kilometers (equivalent to 17.2% of the region's area) in 2021. Considering that the development of manufactured uses is associated with an increase in the pressure on the earth's surface, and also the development of residential and industrial areas is associated with an increase in the use of underground water resources, the changes in land uses during recent years, the context has provided for subsidence in the region. According to the mentioned cases, one of the main reasons for subsidence in the urban area and outskirts of Pishva has been human activities, including the development of manufactured uses.

5. Acknowledgment & Funding

- The manuscript did not receive a grant from any organization

6. Conflict of Interest

- The authors declare no conflict of interest.

تحلیل نقش عوامل انسانی در وقوع فرونشست با استفاده از تصاویر ماهواره‌ای و راداری (مطالعه موردی: شهر پیشوا)

مهدی صفری نامیوندی^۱ ✉، معصومه اسدی^۲، صیاد ایرانی هریس^۳، ابوالفضل امینی^۴

- ۱- نویسنده مسئول، گروه ژئومورفولوژی، دانشکده جغرافیا، دانشگاه خوارزمی، تهران، ایران. safarimehdi534@gmail.com
- ۲- پژوهشگر حفاظت خاک و آبخیزداری، سازمان تحقیقات، آموزش و ترویج کشاورزی، تهران، ایران. Asadi_zhina@Yahoo.com
- ۳- گروه ژئوپلیتیک، دانشکده جغرافیا و برنامه‌ریزی شهری، دانشگاه عالی دفاع ملی، تهران، ایران. S.irani83@yahoo.com
- ۴- گروه کامپیوتر و نرم‌افزار، دانشگاه علامه رفیعی، قزوین، ایران. abolfazlamini.academic67@gmail.com

چکیده:

هدف: فرونشست زمین مخاطره نامحسوسی است که بسیاری از شهرهای کشور از جمله شهر پیشوا را با چالش جدی مواجه کرده است. اهمیت موضوع فرونشست سبب شده تا در این پژوهش با استفاده از تصاویر راداری و روش سری زمانی SBAS، به ارزیابی میزان فرونشست در محدوده شهری و حاشیه شهری پیشوا در طی سال‌های ۲۰۲۰ تا ۲۰۲۲ پرداخته شود.

روش و داده: در این پژوهش به منظور دستیابی به اهداف موردنظر از تصاویر ماهواره لندست، تصاویر راداری سنتینل ۱، اطلاعات مربوط به چاه‌های پیرومتری منطقه و اطلاعات کتابخانه‌ای به‌عنوان داده‌های تحقیق استفاده شده است. روش کار به این صورت بوده است که ابتدا با استفاده از تصاویر ماهواره‌ای، روند تغییرات کاربری اراضی منطقه ارزیابی شده است و سپس بر مبنای اطلاعات موجود، وضعیت افت منابع آب زیرزمینی منطقه بررسی شده است. در ادامه با استفاده روش سری زمانی SBAS، نرخ فرونشست منطقه محاسبه شده است.

یافته‌ها: نتایج حاصله از این پژوهش نشان داده است که منطقه مورد مطالعه در طی دوره زمانی ۲ ساله (۲۰۲۰ تا ۲۰۲۲) بین ۱۰۷ تا ۴۱۱ میلی‌متر فرونشست داشته است که بر این اساس می‌توان گفت که ماکزیمم فرونشست سالانه منطقه بیش از ۲۰ سانتی‌متر است. نتایج ارزیابی تغییرات کاربری اراضی منطقه نشان داده است که در طی دوره زمانی ۳۰ ساله (۱۹۹۱ تا ۲۰۲۱)، کاربری نواحی انسان‌ساخت از ۲/۲ به ۶/۹ کیلومتر مربع افزایش یافته است و همچنین سطح چاه‌های پیرومتری منطقه با افت سالانه بیش از ۱ متر مواجه شده‌اند.

نتیجه‌گیری: با توجه به اینکه توسعه کاربری‌های انسان‌ساخت با افزایش فشار با سطح زمین همراه است و همچنین توسعه نواحی سکونتگاهی و صنعتی با افزایش استفاده از منابع آب زیرزمینی همراه است، بنابراین تغییرات کاربری‌های اراضی و افت منابع آب زیرزمینی در طی سال‌های اخیر، زمینه را برای وقوع فرونشست در منطقه فراهم آورده است.

نوآوری، کاربرد نتایج: این تحقیق بر خلاف بسیاری از تحقیقات پیشین، علاوه بر برآورد نرخ فرونشست، به تحلیل عوامل مؤثر در وقوع فرونشست نیز پرداخته است. با توجه به دقت بالای روش مورد استفاده، از نتایج این تحقیق می‌توان جهت برنامه‌ریزی‌های مختلف عمرانی بهره گرفت.

اطلاعات مقاله

مقاله پژوهشی

شماره: ۱۵

دوره: ۵۷

صفحه: ۳۹-۲۳

تاریخ دریافت: ۱۴۰۲/۰۵/۲۴

تاریخ ویرایش: ۱۴۰۲/۰۶/۱۶

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۲/۰۶/۱۷

تاریخ انتشار: ۱۴۰۳/۰۸/۱۱

کلیدواژه‌ها:

- تغییرات کاربری اراضی
- فرونشست
- شهر پیشوا
- سنتینل ۱
- روش‌های طول خط مبنای کوتاه

نحوه ارجاع به این مقاله:

صفری نامیوندی، مهدی، اسدی، معصومه، ایرانی هریس، صیاد و امینی، ابوالفضل. (۱۴۰۳). تحلیل نقش عوامل انسانی در وقوع فرونشست با استفاده از تصاویر ماهواره‌ای و راداری (مطالعه موردی: شهر پیشوا). *مطالعات جغرافیایی مناطق خشک*، ۱۵(۵۷): ۳۹-۲۳.

doi: 10.22034/jargs.2023.409440.1053

ناشر: دانشگاه حکیم سبزواری



© نویسنده(گان).

۱ - مقدمه

به‌طور معمول فرونشست زمین به حرکات قائم رو به پایین سطح زمین که می‌تواند با بردار اندک افقی همراه باشد، گفته می‌شود (Amighpay, 2009). این پدیده مسئله‌ای جهانی و پدیده‌ای مورفولوژیکی است که متأثر از فعالیت‌های انسانی و عوامل طبیعی است (Safari et al., 2016; Higgins, 2013). روند افزایشی جمعیت و توسعه ساخت‌وسازها و همچنین بهره‌برداری بیش از حد از منابع زیرزمینی سبب شده است (Chen, 2010) تا مخاطره فرونشست در طی سال‌های اخیر به‌عنوان یکی از مخاطرات مهم در بسیاری از کشورها از جمله ایران مطرح شود. با توجه به اینکه در ایران به‌منظور پیش‌گیری از روند فرونشست، اقدامات خاصی صورت نگرفته است، مخاطره فرونشست به‌عنوان یکی از مهم‌ترین چالش‌های پیشروی شهرهای ایران خصوصاً شهرهای نواحی خشک و نیمه‌خشک خواهد بود (Ganjaeian, 2020).

فرونشست از جمله مهم‌ترین مخاطرات طبیعی است که پیامدهای فراوانی به همراه دارد (Chen et al., 2016) اما به علت تلفات کم انسانی در مقایسه با سایر سوانح طبیعی، کم‌تر مورد توجه قرار گرفته است. وقوع این پدیده در دشت‌ها و خصوصاً مناطق شهری سبب خسارات زیادی می‌شود (Khorsandi Aghai, 2015; Shi, 2022). وضعیت هیدرواقلمی و ژئومورفولوژی ایران سبب شده است تا بسیاری از شهرها در معرض این مخاطره باشند. شهر پیشوا در دشت ورامین و در منطقه نیمه‌خشک قرار دارد که به دلیل مجاورت با شهر تهران در طی سال‌های اخیر با روند افزایشی جمعیت و توسعه صنایع همراه بوده است. با توجه به اینکه روند افزایشی جمعیت و فعالیت‌های انسانی این منطقه، متناسب با توانمندی‌های محیطی آن نبوده است، بنابراین در طی سال‌های اخیر دشت پیشوا با مخاطره فرونشست مواجه شده است. با توجه به اهمیت موضوع، در این پژوهش به ارزیابی میزان فرونشست محدوده شهری و حاشیه شهری پیشوا و تحلیل عوامل مؤثر در وقوع آن پرداخته شده است.

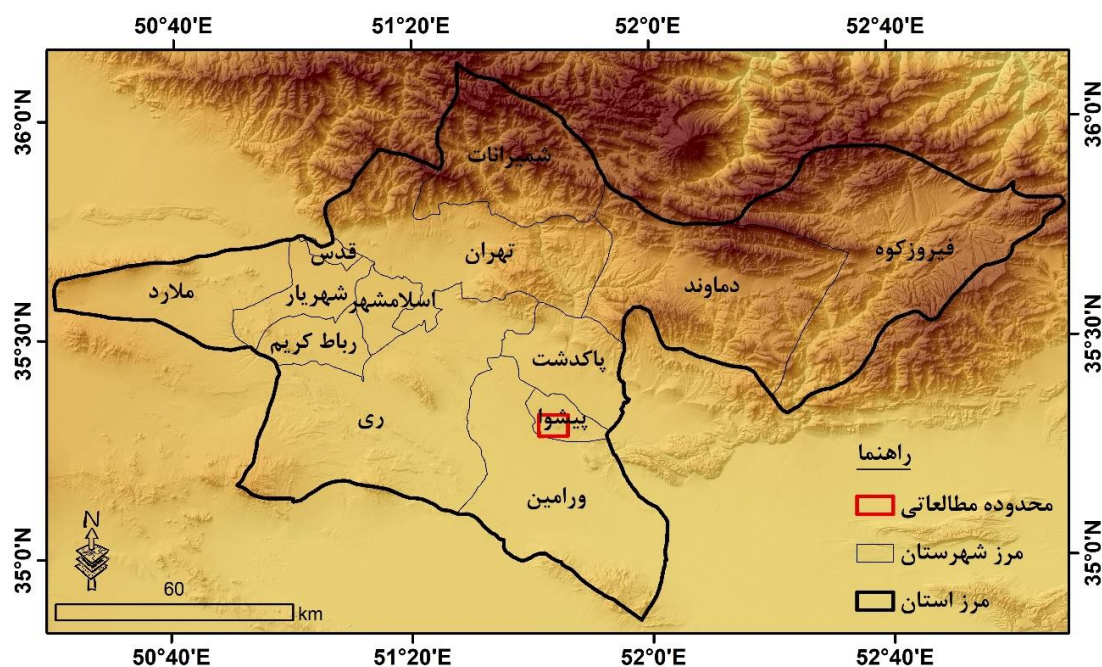
در ارتباط با روش تداخل‌سنجی راداری و سری‌های زمانی، تحقیقات مختلفی در سطح ایران و جهان صورت گرفته است که از جمله آن‌ها می‌توان به راکولس و همکاران اشاره کرد که با استفاده از این روش‌ها، میزان فرونشست شهر پراتو را حدود ۸/۳ سانتی‌متر در سال محاسبه کرده‌اند (Raucoules et al., 2003). حسیه و همکاران میزان فرونشست دشت پینگ‌تونگ در جنوب تایوان را در فصل مرطوب ۰/۳۱ سانتی‌متر در سال و در فصل خشک ۳/۳۷ سانتی‌متر در سال محاسبه کرده‌اند (Hsieh et al., 2011). بوزانو و همکاران میزان فرونشست دشت آکه آلبو در طی سال‌های ۲۰۰۷ تا ۲۰۱۰ را حدود ۸۰ میلی‌متر محاسبه کرده‌اند (Bozzano et al., 2015). آگاروال و همکاران میزان فرونشست سالانه برای شهر لندن ۲۴ میلی‌متر و برای شهر دهلی ۱۸ میلی‌متر محاسبه کرده‌اند (Agarwal et al., 2021). مالیک و همکاران میزان فرونشست شهر دهلی را حدود ۱۵ میلی‌متر در سال محاسبه کرده است (Malik et al., 2022). لی و همکاران میزان فرونشست در بخش‌های شمالی دشت هنان را حدود ۱۱ میلی‌متر در سال برآورده کرده‌اند (Li et al., 2022). وانگ و همکاران میزان فرونشست در منطقه دچانگ چین را حدود ۴۱ میلی‌متر در سال برآورد کرده‌اند (Wang et al., 2022). بوخاری و همکاران میزان فرونشست زمین در شهر گوآدار پاکستان را بین ۳۲ تا ۹۲ میلی‌متر در طی دوره زمانی ۲ ساله برآورده کرده‌اند (Bokhari et al., 2023). شنگ و همکاران با استفاده از تصاویر راداری به ارزیابی میزان فرونشست شهر پکن در طی سال‌های ۲۰۱۸ تا ۲۰۲۲ پرداختند و میزان فرونشست سالانه آن را ماکزیمم ۵۷ میلی‌متر برآورد کرده‌اند (Sheng et al., 2023). همچنین در ایران نیز المدرسی و حشمتی میزان فرونشست دشت نیشابور را بین ۴ تا ۱۸ سانتی‌متر در سال برآورد کرده‌اند (Al-Madrasi & Heshmati, 2015). بابایی و همکاران میزان فرونشست قسمت جنوب غربی تهران را حدود ۶۱ میلی‌متر در سال محاسبه کرده‌اند (Babaei et al., 2017). صالحی‌متعهد و همکاران میزان فرونشست دشت مشهد را ماکزیمم ۲۰ سانتی‌متر در سال برآورده کرده‌اند (Salehi-Motahed et al., 2019). مقصودی و همکاران میزان فرونشست مناطق جنوبی تهران و دشت شهریار را ۱۵ سانتی‌متر در سال برآورد کرده‌اند (Maghsoudi et al., 2019). گنجائیان و همکاران میزان فرونشست در دشت کبودرآهنگ-فامنین را بین ۲۹ تا ۲۱۶ میلی‌متر در طی سال‌های ۲۰۱۵ تا ۲۰۲۰ محاسبه کرده‌اند (Ganjaeian et al., 2022). طالبی‌نیا و همکاران با استفاده از سری زمانی SBAS، میزان فرونشست دشت اصفهان را بین ۸/۲۰ تا ۲/۱۴ سانتی‌متر در طی سال‌های ۱۳۹۷ تا ۱۳۹۸ برآورده کرده‌اند (Talebinia et al., 2022). آقایی و همکاران میزان فرونشست دشت اردبیل در طی سال‌های ۲۰۱۶ تا ۲۰۲۰ را ۲۲ سانتی‌متر برآورد کرده‌اند (Aghayari et al., 2022). مهربانی و همکاران میزان فرونشست دشت جیرفت در سال ۲۰۱۴ و ۲۰۲۲ را به ترتیب ۱۱ و ۱۳ سانتی‌متر برآورد کرده‌اند (Mehrabi et al., 2022). در راستای تحقیقات

پیشین، هدف از این تحقیق، ارزیابی فرونشست محدوده شهری و حاشیه شهری پیشوا در استان تهران است. بر خلاف بسیاری از تحقیقات پیشین، در این تحقیق علاوه بر برآورد نرخ فرونشست، به تحلیل عوامل مؤثر در وقوع فرونشست نیز پرداخته شده است.

۲- مواد و روش‌ها

۲-۱- منطقه مورد مطالعه

محدوده مطالعاتی تحقیق حاضر با وسعت حدود ۶۰ کیلومترمربع شامل محدوده شهری و حاشیه شهری پیشوا است (انتخاب محدوده به دلیل قرار گرفتن شهر پیشوا در دشت بحرانی ورامین و همچنین عدم توجه به این محدوده در تحقیقات پیشین بوده است). شهر پیشوا از نظر موقعیت جغرافیایی در طول ۵۱° ۴۴' شرقی و عرض ۱۹' ۳۵° شمالی قرار دارد و مرکز شهرستان پیشوا محسوب می‌شود که در جنوب استان تهران قرار دارد. شهرستان پیشوا از سمت جنوب به شهرستان ورامین و از سمت شمال به شهرستان پاکدشت منتهی می‌شود (شکل ۱). محدوده مطالعاتی از نظر تقسیمات مورفوتکتونیکی در حد فاصل واحد البرز و ایران مرکزی قرار دارد. از نظر ژئومورفولوژی به دلیل قرار گرفتن در واحد دشت، دارای اختلاف ارتفاع و شیب کمی است. همچنین از نظر اقلیمی (بر اساس طبقه‌بندی دومارتن) نیز با توجه به موقعیت جغرافیایی که دارد، دارای زمستان‌های گرم و خشک و تابستان‌ها نیمه مرطوب است.



شکل ۱. نقشه موقعیت منطقه مورد مطالعه

۲-۲- روش تحقیق

در این پژوهش به منظور دستیابی به اهداف موردنظر از تصاویر ماهواره لندست، اطلاعات مربوط به ۴ چاه پیژومتری در منطقه مورد مطالعه، تصاویر راداری سنتینل ۱ و اطلاعات کتابخانه‌ای به‌عنوان داده‌های تحقیق استفاده شده است. مهم‌ترین ابزارهای مورد استفاده در تحقیق شامل ArcGIS و GMT، SPSS، IDRISI، ENVI و ArcGIS بوده است که از به ترتیب جهت تهیه نقشه‌های کاربری اراضی، آنالیز تغییرات کاربری اراضی، ارزیابی افت منابع آب زیرزمینی، تهیه نقشه فرونشست و تهیه نقشه‌های نهایی مورد استفاده قرار گرفته‌اند. همچنین مدل‌های مورد استفاده در تحقیق نیز شامل مدل حداکثر احتمال، مدل LCM و مدل سری زمانی SBAS^۲ بوده است که به ترتیب برای تهیه نقشه‌های کاربری اراضی، آنالیز تغییرات کاربری اراضی و تهیه نقشه نهایی فرونشست، استفاده شده‌اند. این پژوهش به صورت کلی در سه مرحله انجام شده است که در ادامه به تشریح آن‌ها پرداخته شده است:

1. Land Change modeler (LCM)
2. Small BASeline Subset (SBAS)

مرحله اول (ارزیابی روند تغییرات کاربری اراضی): با توجه به اینکه یکی از عوامل مؤثر در وقوع فرونشست، تغییرات کاربری اراضی است. در این پژوهش با استفاده از تصاویر ماهواره لندست مربوط به سال‌های ۱۹۹۱، ۲۰۰۱، ۲۰۱۱ و ۲۰۲۱، روند تغییرات کاربری اراضی در منطقه مورد مطالعه ارزیابی شده است. در این مرحله، پس از تهیه تصاویر مورد نظر، در نرم‌افزار ENVI پیش‌پردازش‌های لازم شامل تصحیحات رادیومتریک و اتمسفری (Eastman, 2006) بر روی تصاویر انجام شده است. خطاهای هندسی مربوط به موقعیت پدیده یا پیکسل‌ها در تصویر نسبت به دیگر پدیده‌ها و موقعیت مطلق آن و خطای رادیومتریک مربوط به میزان بازتاب ثبت شده در تصویر است. برای بررسی وضعیت هندسی تصاویر و اطمینان از مناسب بودن هندسه تصاویر، لایه‌های برداری جاده‌های منطقه مورد مطالعه استخراج و روی تصاویر ماهواره‌ای قرار داده شده است. با توجه به اهمیت پیش‌پردازش‌های مذکور، این پیش‌پردازش‌ها بر روی تصاویر اعمال شده است. لازم به ذکر است برای تصاویر مربوط به لندست ۷، قبل از تصحیحات هندسی و رادیومتریک، ابتدا نوار راه راه موجود بر روی تصاویر با استفاده از افزونه Gap fill در نرم‌افزار ENVI 5/3 رفع شده است. پس از انجام تصحیحات مورد نیاز بر روی تصاویر، از روش طبقه‌بندی نظارت شده برای تهیه نقشه‌های کاربری اراضی استفاده شده است. از میان روش‌های طبقه‌بندی نظارت‌شده، از روش حداکثر احتمال^۱ (به دلیل دقت بالایی که دارد) استفاده شده است. به‌منظور انجام این نوع طبقه‌بندی، نمونه‌های تعلیمی در ۳ کلاس نواحی سکونتگاهی و انسان‌ساخت، اراضی کشاورزی، مراتع و اراضی بایر تعریف شده است و به این صورت نقشه‌های کاربری اراضی منطقه در طی سال‌های ۱۹۹۱ تا ۲۰۲۱ تهیه شده است. پس از تهیه نقشه‌های کاربری اراضی، به‌منظور ارزیابی دقت نقشه‌های تهیه شده، ضریب کاپای نقشه‌ها محاسبه شده است (جدول ۱). پس از تهیه نقشه‌های کاربری اراضی، نقشه‌های تهیه شده وارد نرم‌افزار IDRISI شده است و سپس با استفاده از مدل LCM به تجزیه و تحلیل تغییرات صورت گرفته پرداخته شده است.

جدول ۱. مشخصات تصاویر ماهواره‌ای مورد استفاده

نوع ماهواره	سنجنده	تاریخ	ضریب کاپا (درصد)
لندست ۵	TM	۱۹۹۱/۰۷/۰۹	۸۷/۸
لندست ۵	TM	۲۰۰۱/۰۷/۲۹	۹۰/۵
لندست ۷	ETM	۲۰۱۱/۰۷/۰۹	۹۱/۱
لندست ۸	OLI	۲۰۲۱/۰۷/۰۷	۹۳/۳

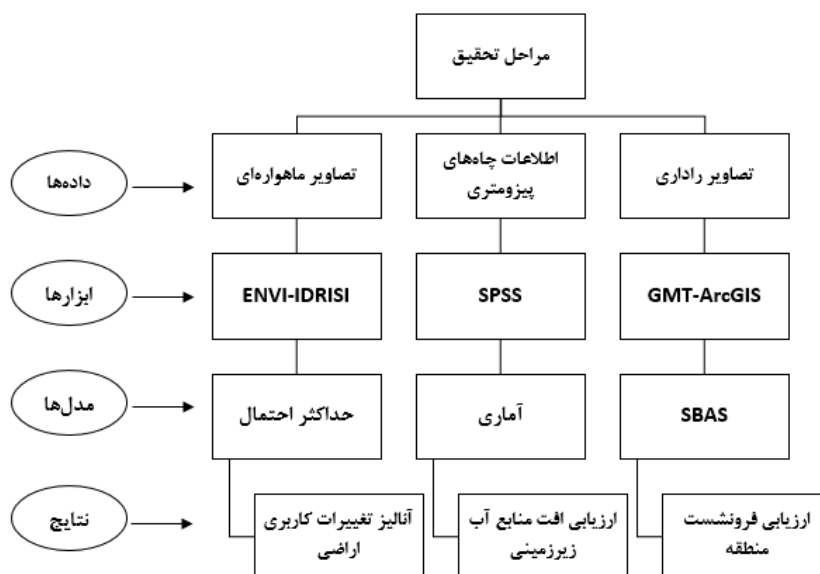
مرحله دوم (ارزیابی وضعیت افت منابع آب زیرزمینی): با توجه به اینکه یکی از مهم‌ترین عوامل فرونشست، افت منابع آب زیرزمینی است. در این پژوهش با استفاده از اطلاعات مربوط به ۴ چاه پیژومتری در منطقه مورد مطالعه، وضعیت افت منابع آب زیرزمینی منطقه ارزیابی شده است و سپس ارتباط آن با فرونشست رخ داده در منطقه تحلیل شده است.

مرحله سوم (ارزیابی فرونشست منطقه): در این مرحله با استفاده از تصاویر راداری سنتینل ۱ و روش تداخل‌سنجی راداری و سری زمانی SBAS، به ارزیابی میزان فرونشست در منطقه مورد مطالعه پرداخته شده است. به‌منظور اجرای مدل سری زمانی SBAS، ابتدا ۱۳ تصویر راداری سنتینل ۱ مربوط به دوره زمانی ۲ ساله (از تاریخ ۲۰۲۰/۰۱/۰۹ تا ۲۰۲۲/۰۱/۱۰) تهیه شده است (جدول ۲). پس از تهیه تصاویر مورد نظر، با استفاده از نرم‌افزار GMTSAR، پیش‌پردازش‌های لازم بر روی تصاویر شامل تصحیحات مداری، حذف خطای توپوگرافی و فیلتر تصاویر انجام شده است. پس از انجام پیش‌پردازش‌های لازم، بر مبنای بیس‌لاین زمانی تصاویر، نقشه‌های اینترفروگرام منطقه تهیه شده است. پس از تهیه نقشه‌های اینترفروگرام، به‌منظور تهیه نقشه نهایی فرونشست، از روش سری زمانی SBAS استفاده شده است.

جدول ۲. مشخصات تصاویر راداری مورد استفاده

ردیف	تاریخ	نوع	حالت مداری	پلاریزیشن
۱	۲۰۲۰/۰۱/۰۹	SLC	نزولی	VV
۲	۲۰۲۰/۰۲/۲۶	SLC	نزولی	VV
۳	۲۰۲۰/۰۴/۱۴	SLC	نزولی	VV
۴	۲۰۲۰/۰۶/۱۳	SLC	نزولی	VV
۵	۲۰۲۰/۰۸/۱۲	SLC	نزولی	VV
۶	۲۰۲۰/۱۰/۲۳	SLC	نزولی	VV
۷	۲۰۲۰/۱۲/۲۲	SLC	نزولی	VV
۸	۲۰۲۱/۰۲/۰۸	SLC	نزولی	VV
۹	۲۰۲۱/۰۴/۰۹	SLC	نزولی	VV
۱۰	۲۰۲۱/۰۶/۰۸	SLC	نزولی	VV
۱۱	۲۰۲۱/۰۸/۰۷	SLC	نزولی	VV
۱۲	۲۰۲۱/۱۰/۱۸	SLC	نزولی	VV
۱۳	۲۰۲۲/۰۱/۱۰	SLC	نزولی	VV

روش سری زمانی SBAS: در یک تداخل نگاشت اطلاعات اختلاف فاز دو تصویر که گویای اختلاف فاصله عارضه تا سنجنده در دو زمان تصویربرداری است، وجود دارد. به کمک مقدار اختلاف فاز می‌توان متغیرهای مختلف از جمله میزان جابه‌جایی سطح زمین تا کسری از سانتی‌متر و اطلاعات توپوگرافی سطح زمین را با دقت ۱۰ متر استخراج کرد؛ اما با توجه به اینکه هر تداخل نگار شامل منطقه بزرگی با همبستگی پایین است، بنابراین نتایج آن قابل اعتماد نیست به همین دلیل روش تداخل سنجی راداری به تنهایی نمی‌تواند تغییرات صورت گرفته را نشان داد. در این راستا برای حل مشکل، روش‌های مختلفی پیشنهاد شده است که یکی از آن‌ها روش سری زمانی SBAS است (Zhao, 2013). در این روش تنها زوج تصاویری مورد استفاده قرار می‌گیرند که مؤلفه قائم خط مبنای آن‌ها کم‌تر از مقدار بحرانی خط مبنا باشد، همچنین خط مبنا زمانی^۱ آن‌ها نیز هم‌زمان کمینه باشد. به این ترتیب، فقط تداخل نگارهایی تشکیل می‌شوند که کیفیت مناسبی داشته باشند. پس از تشکیل این تداخل نگارها، یک شبکه از تصاویر ایجاد می‌شود، سپس با استفاده از روش کم‌ترین مربعات، مقدار جابجایی هر پیکسل تخمین زده می‌شود (Dong et al et al., 2014). در شکل ۲ فلوجارت تحقیق نشان داده شده است.

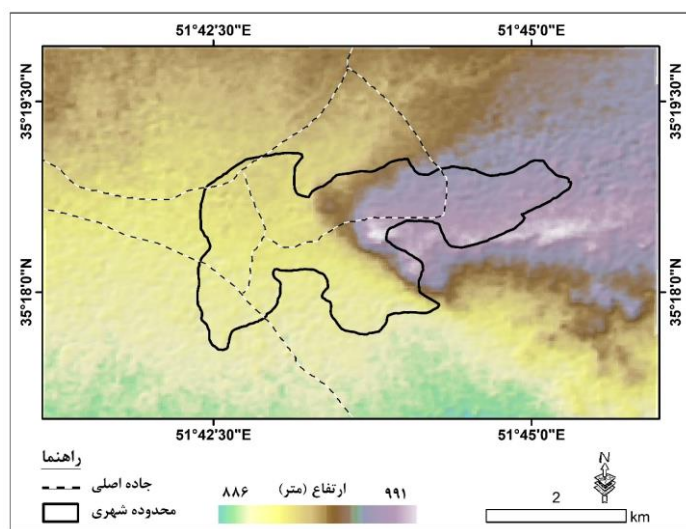


شکل ۲. فلوجارت تحقیق

۳- بحث و نتایج

۳-۱- بررسی وضعیت ژئومورفولوژی منطقه

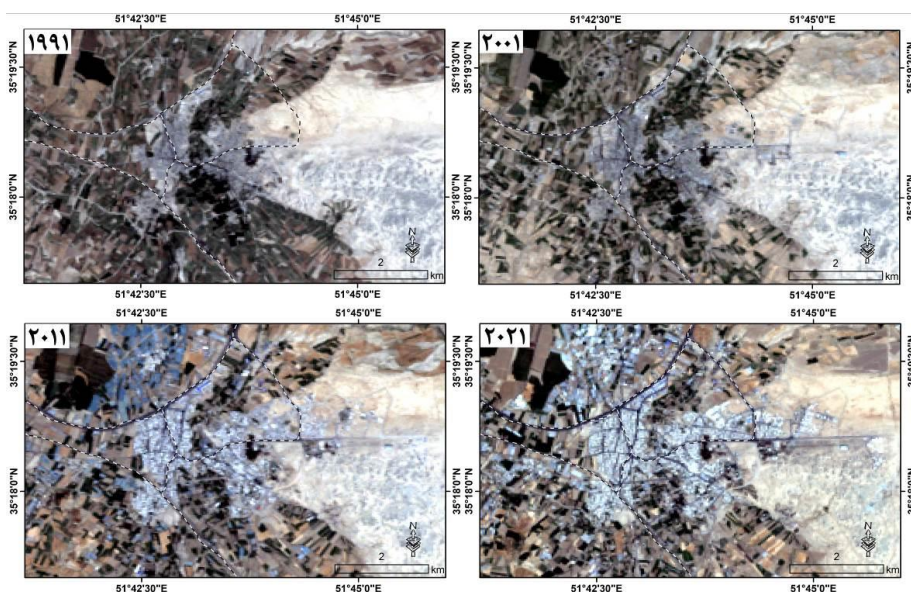
محدوده شهری و حاشیه شهری پیشوا از نظر وضعیت ژئومورفولوژی در واحد دشت قرار گرفته است. این محدوده از نظر ارتفاعی در بین ارتفاع ۸۸۶ تا ۹۹۱ متری از سطح دریا قرار دارد (شکل ۳) و با توجه به اختلاف ارتفاعی کمی که دارد، بخش زیادی از آن در طبقه شیب کم‌تر از ۵ درصد قرار گرفته است. با توجه به موارد مذکور، محدوده مطالعاتی از نظر ژئومورفولوژی دارای محدودیت خیلی کمی است و موانع محدودکننده جهت توسعه کاربری‌های انسان‌ساخت و اراضی کشاورزی ندارد و همین مسئله سبب گسترش کاربری‌های انسان‌ساخت و توسعه اراضی کشاورزی در این منطقه شده است که این کاربری‌های زمینه‌ساز وقوع فرونشست در این منطقه شده‌اند. بر این اساس می‌توان گفت که یکی از عوامل مؤثر در وقوع فرونشست منطقه، وضعیت ژئومورفولوژی آن بوده است.



شکل ۳. نقشه وضعیت ارتفاعی منطقه مورد مطالعه

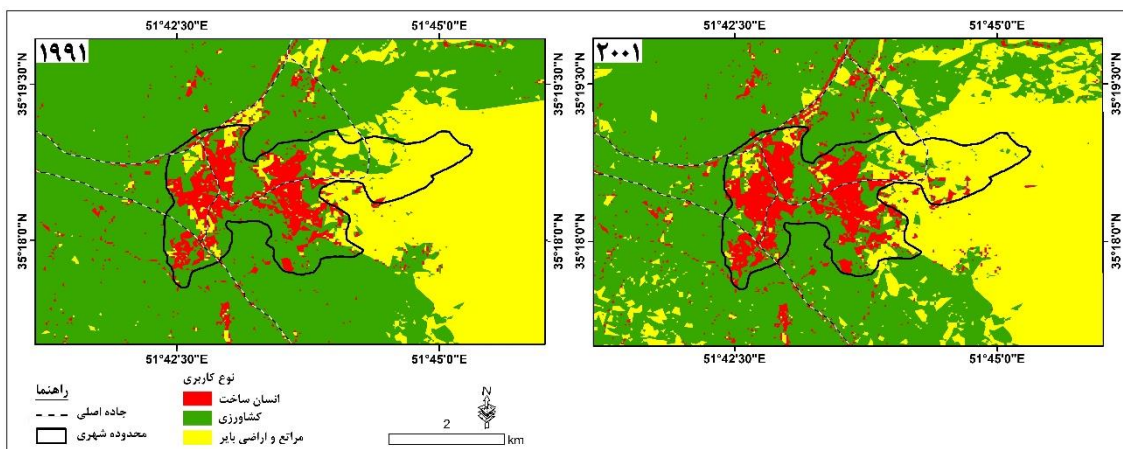
۳-۲- ارزیابی روند تغییرات کاربری اراضی

با توجه به اینکه یکی از عوامل مؤثر در وقوع فرونشست، نوع کاربری‌های اراضی و تغییرات آن است، در این پژوهش به بررسی روند تغییرات کاربری اراضی منطقه در طی سال‌های ۱۹۹۱ تا ۲۰۲۱ پرداخته شده است. به منظور بررسی تغییرات کاربری اراضی منطقه، از تصاویر ماهواره لندست مربوط به سال‌های ۱۹۹۱، ۲۰۰۱، ۲۰۱۱ و ۲۰۲۱ استفاده شده است (شکل ۴).

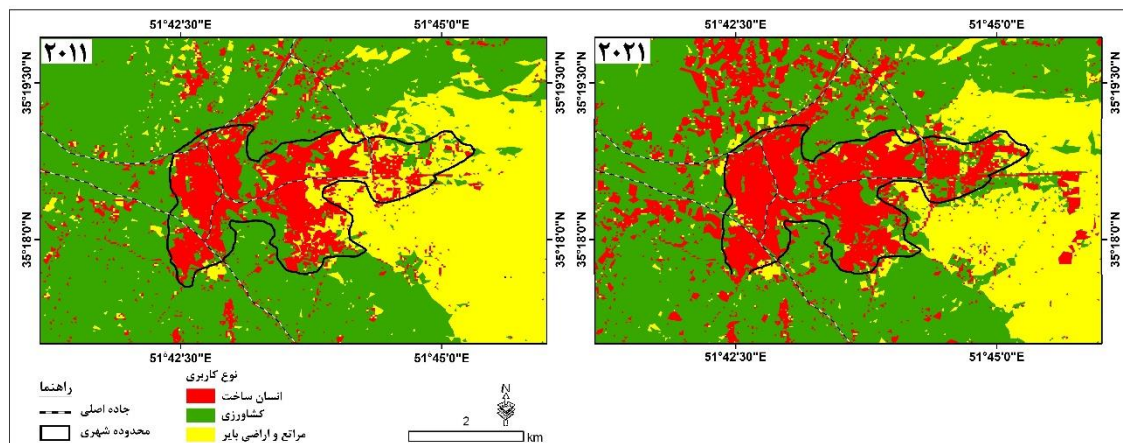


شکل ۴. نقشه تصاویر ماهواره‌ای منطقه مورد مطالعه

پس از تهیه تصاویر مورد نظر و انجام پیش‌پردازش‌های لازم، با استفاده از روش حداکثر احتمال، نقشه کاربری‌های اراضی منطقه در ۳ کلاس کاربری انسان‌ساخت، کاربری کشاورزی و کاربری مراتع و اراضی بایر و مراتع تهیه شده است (شکل‌های ۵ و ۶).



شکل ۵. نقشه‌های کاربری اراضی منطقه در طی سال‌های ۱۹۹۱ و ۲۰۰۱

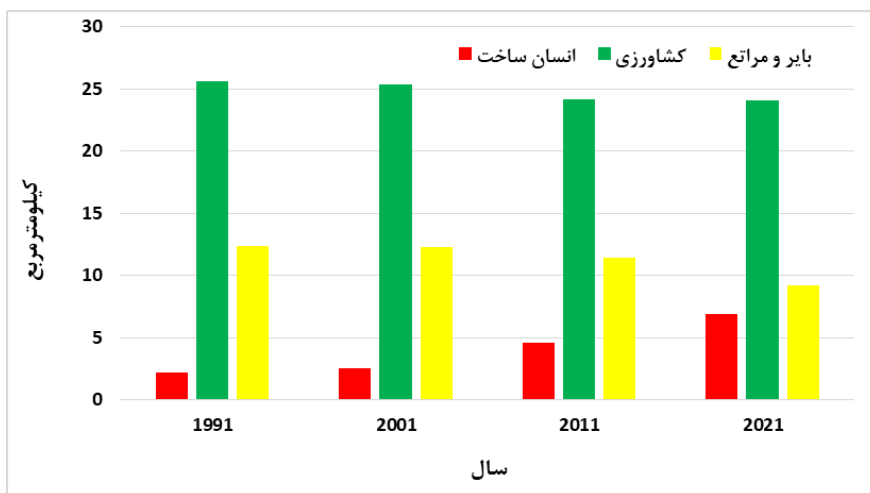


شکل ۶. نقشه‌های کاربری اراضی منطقه در طی سال‌های ۲۰۱۱ و ۲۰۲۱

بررسی وضعیت کاربری‌های اراضی منطقه مورد مطالعه بیانگر تغییرات آن‌ها در طی دوره زمانی مورد مطالعه است. بر اساس نتایج حاصله (جدول ۳ و شکل ۷)، کاربری نواحی انسان‌ساخت در سال ۱۹۹۱، $2/2$ کیلومترمربع وسعت داشته است (معادل $5/5$ درصد از وسعت منطقه) که این میزان در طی سال‌های ۲۰۰۱، ۲۰۱۱ و ۲۰۲۱ به ترتیب به $2/5$ ، $4/6$ و $6/9$ کیلومترمربع (معادل $17/2$ درصد از وسعت منطقه) افزایش یافته است. کاربری اراضی کشاورزی در سال ۱۹۹۱، $25/6$ کیلومترمربع وسعت داشته است (معادل $63/7$ درصد از وسعت منطقه) که این میزان در طی سال‌های ۲۰۰۱، ۲۰۱۱ و ۲۰۲۱ به ترتیب به $25/4$ ، $24/2$ و $24/1$ کیلومترمربع (معادل 60 درصد از وسعت منطقه) کاهش یافته است. همچنین کاربری مراتع و اراضی بایر در سال ۱۹۹۱، $12/4$ کیلومترمربع وسعت داشته است (معادل $30/8$ درصد از وسعت منطقه) که این میزان در طی سال‌های ۲۰۰۱، ۲۰۱۱ و ۲۰۲۱ به ترتیب به $11/3$ ، $9/2$ و $11/4$ کیلومترمربع (معادل $22/9$ درصد از وسعت منطقه) کاهش یافته است. نتایج آنالیز تغییرات صورت گرفته نشان داده است که در طی دوره زمانی مورد مطالعه (۱۹۹۱ تا ۲۰۲۱)، کاربری‌های انسان‌ساخت شامل نواحی سکونتگاهی، تأسیسات صنعتی و غیره دارای روند افزایشی بوده است و همین مسئله سبب کاهش مساحت کاربری‌های کشاورزی و اراضی بایر شده است. با توجه به اینکه توسعه کاربری‌های انسان‌ساخت با افزایش فشار بر سطح زمین همراه است و همچنین توسعه نواحی سکونتگاهی و صنعتی با افزایش استفاده از منابع آب زیرزمینی همراه است، بنابراین تغییرات کاربری‌های اراضی در طی سال‌های اخیر، زمینه را برای وقوع فرونشست در منطقه فراهم آورده است.

جدول ۷. مساحت و درصد مساحت کاربری‌های اراضی منطقه در طی سال‌های ۱۹۹۱ تا ۲۰۲۱ (بر حسب کیلومتر مربع)

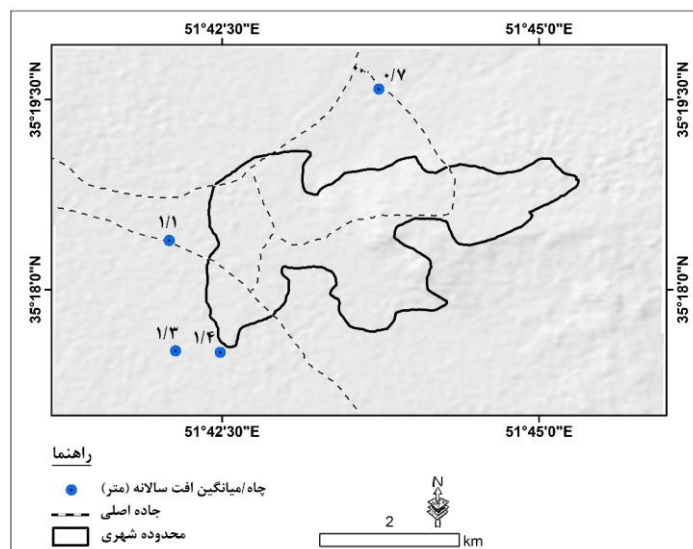
۲۰۲۱	۲۰۱۱	۲۰۰۱	۱۹۹۱	نوع کاربری	
۶/۹	۴/۶	۲/۵	۲/۲	مساحت	انسان ساخت
۱۷/۲	۱۱/۴	۶/۲	۵/۵	درصد	
۲۴/۱	۲۴/۲	۲۵/۴	۲۵/۶	مساحت	کشاورزی
۶۰	۶۰/۲	۶۳/۲	۶۳/۷	درصد	
۹/۲	۱۱/۴	۱۲/۳	۱۲/۴	مساحت	مراعات و اراضی بایر
۲۲/۹	۲۸/۴	۳۰/۶	۳۰/۸	درصد	



شکل ۷. نمودار مساحت کاربری‌های اراضی منطقه در طی سال‌های ۱۹۹۱ تا ۲۰۲۱

۳-۳- ارزیابی وضعیت منابع آب زیرزمینی منطقه

در این پژوهش به منظور بررسی وضعیت فرونشست در منطقه مورد مطالعه، از اطلاعات مربوط به ۴ چاه پیژومتری در منطقه مورد مطالعه استفاده شده است. بررسی وضعیت چاه‌های مورد مطالعه نشان داده است که این چاه‌ها در طی سال‌های اخیر با افت آب زیادی مواجه شده‌اند به طوری که میانگین افت سالانه سطح آب زیرزمینی در این چاه‌ها بین ۰/۷ تا ۱/۴ بوده است که در یک روند کلی از سمت شمال منطقه به سمت جنوب منطقه، میانگین افت بیش‌تر بوده است (شکل ۸). با توجه به افت زیاد منابع آب زیرزمینی در منطقه مورد مطالعه، می‌توان گفت که یکی از دلایل اصلی فرونشست منطقه، افت شدید منابع آب زیرزمینی بوده است.



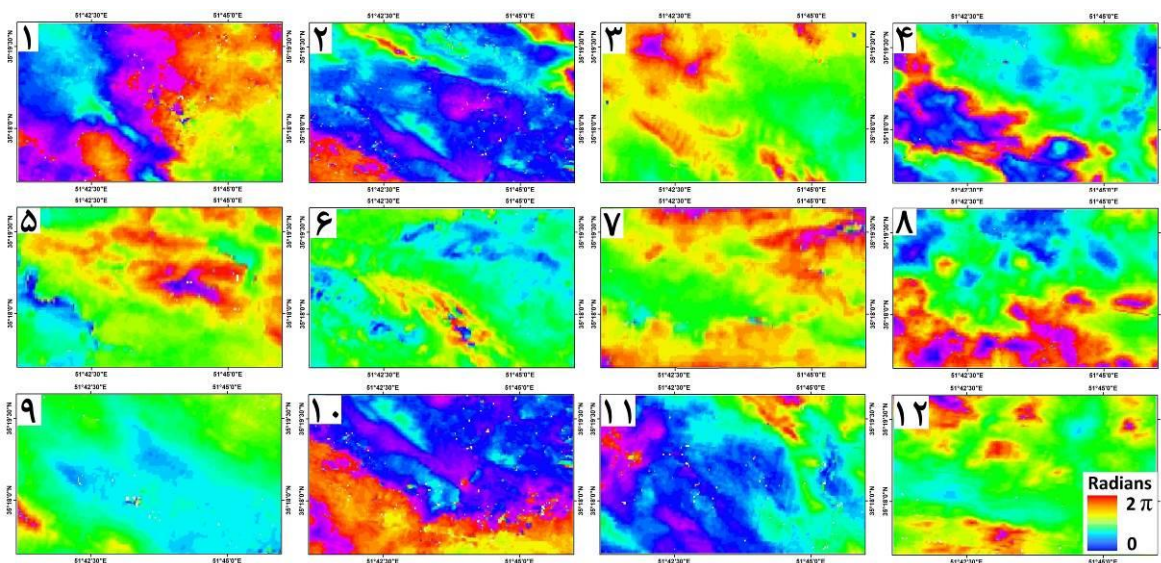
شکل ۸. نقشه موقعیت و میانگین سالانه افت (متر) چاه‌های مورد مطالعه (منبع: سازمان آب و منطقه‌ای استان تهران)

۳-۴- ارزیابی میزان فرونشست منطقه مورد مطالعه

در این پژوهش به منظور ارزیابی وضعیت فرونشست منطقه از تصاویر راداری سنتینل ۱ و روش سری زمانی SBAS استفاده شده است و میزان فرونشست منطقه از تاریخ ۲۰۲۰/۰۱/۰۹ تا ۲۰۲۲/۰۱/۱۰ ارزیابی شده است. به منظور اجرای سری زمانی SBAS، ابتدا نقشه‌های اینترفروگرام منطقه تهیه شده است. تهیه نقشه‌های اینترفروگرام بر اساس زوج تصاویری بوده است که با توجه به بیس لاین زمانی انتخاب شده‌اند (جدول ۴). در واقع، ابتدا بر مبنای تاریخ تصاویر، جفت تصاویر مورد نظر انتخاب شده و پس از انجام پیش‌پردازش‌های لازم، نقشه‌های اینترفروگرام منطقه تهیه شده است (شکل ۹).

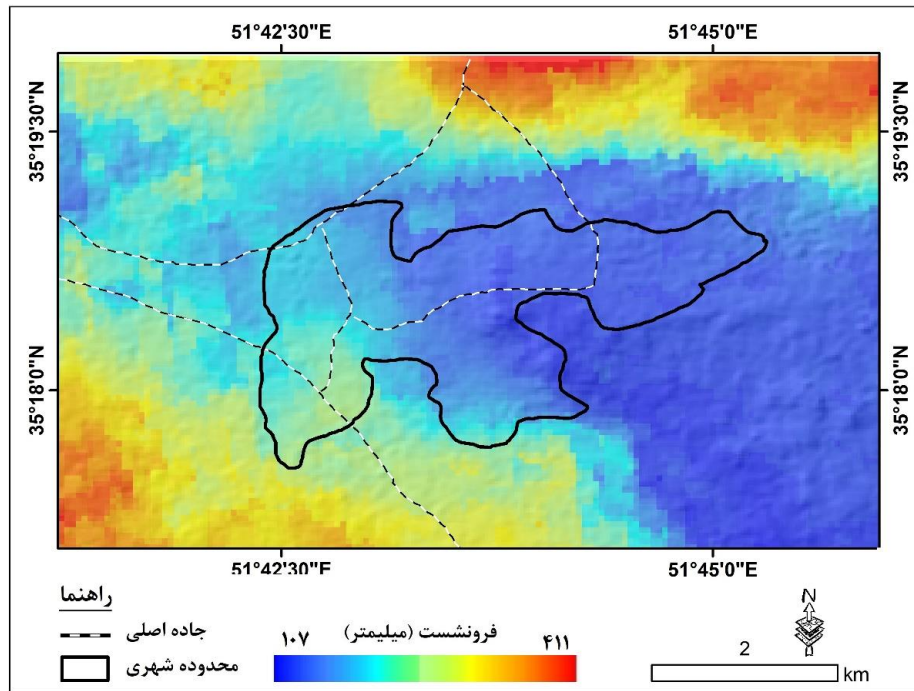
جدول ۴. زوج تصاویر مورد نظر جهت تهیه نقشه‌های اینترفروگرام

شماره در شکل	زوج تصاویر	شماره در شکل	زوج تصاویر
۱	۲۰۲۰/۰۲/۲۶ - ۲۰۲۰/۰۱/۰۹	۷	۲۰۲۰/۰۱/۰۹ - ۲۰۲۱/۰۲/۰۸
۲	۲۰۲۰/۰۴/۱۴ - ۲۰۲۰/۰۲/۲۶	۸	۲۰۲۱/۰۴/۰۹ - ۲۰۲۱/۰۲/۰۸
۳	۲۰۲۰/۰۶/۱۳ - ۲۰۲۰/۰۴/۱۴	۹	۲۰۲۱/۰۶/۰۸ - ۲۰۲۱/۰۴/۰۹
۴	۲۰۲۰/۰۸/۱۲ - ۲۰۲۰/۰۶/۱۳	۱۰	۲۰۲۱/۰۸/۰۷ - ۲۰۲۱/۰۶/۰۸
۵	۲۰۲۰/۱۰/۲۳ - ۲۰۲۰/۰۸/۱۲	۱۱	۲۰۲۱/۱۰/۱۸ - ۲۰۲۱/۰۸/۰۷
۶	۲۰۲۰/۱۲/۲۲ - ۲۰۲۰/۱۰/۲۳	۱۲	۲۰۲۱/۱۰/۱۸ - ۲۰۲۲/۰۱/۱۰

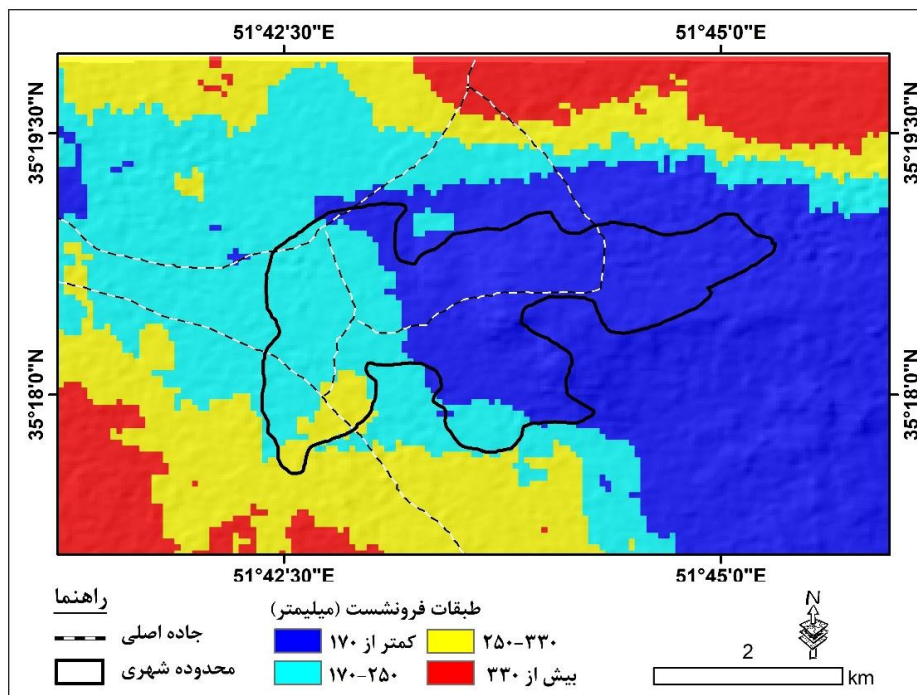


شکل ۹. نقشه‌های اینترفروگرام منطقه

پس از تهیه نقشه‌های اینترفروگرام، با استفاده از روش سری زمانی SBAS، نقشه میزان جابه‌جایی عمودی منطقه از تاریخ ۲۰۲۰/۰۱/۰۹ تا ۲۰۲۲/۰۱/۱۰ تهیه شده است (شکل ۱۰). بر اساس نقشه تهیه شده، محدوده مطالعاتی در طی دوره زمانی ۲ ساله بین ۱۰۷ تا ۴۱۱ میلی‌متر فرونشست داشته است که قابل توجهی است به طوری که ماکزیمم فرونشست منطقه در طی دوره زمانی ۲ ساله حدود ۴۱۱ میلی‌متر و به عبارتی سالانه بیش از ۲۰ سانتی‌متر بوده است. در شکل ۱۱ نقشه طبقه‌بندی فرونشست رخ داده نشان داده شده است که بررسی روند مکانی فرونشست منطقه بیانگر این است که بیش‌ترین میزان فرونشست مربوط به مناطق جنوب غربی و شمال شرقی محدوده شهری پیشوا بوده است و در بین مناطق مختلف شهر پیشوا، مناطق جنوبی و غربی آن دارای فرونشست بیش‌تری بوده‌اند.



شکل ۱۰. نقشه فرونشست منطقه مورد مطالعه در طی دوره زمانی ۲ ساله



شکل ۱۱. نقشه طبقات فرونشست منطقه مورد مطالعه در طی دوره زمانی ۲ ساله

۳-۵- تحلیل نتایج

شهر پیشوا در شرق شهر تهران قرار دارد. این شهر در دشت ورامین واقع شده است و در طی سال‌های اخیر با پدیده فرونشست مواجه شده است. اهمیت موضوع فرونشست و روند نامحسوس آن سبب شد تا در این پژوهش با استفاده از روش سری زمانی SBAS، نرخ فرونشست این دشت مورد ارزیابی قرار گیرد. نتایج به دست آمده از این پژوهش نشان داده است که محدوده شهری و حاشیه شهری پیشوا در طی دوره زمانی ۲ ساله، بین ۱۰۷ تا ۴۱۱ میلی‌متر فرونشست داشته است. بررسی‌های صورت گرفته در این پژوهش نشان

داده است که دلیل اصلی فرونشست رخ داده در منطقه، فعالیت‌های انسانی از جمله تغییرات کاربری اراضی و افت منابع آب زیرزمینی بوده است، هرچند وضعیت ژئومورفولوژیکی منطقه نیز زمینه را برای وقوع فرونشست منطقه فراهم کرده است. وضعیت جغرافیای طبیعی و انسانی شهر پیشوا سبب شده است تا این شهر و مناطق مجاور آن در طی سال‌های اخیر با توسعه زیادی همراه باشد. در واقع، وضعیت ژئومورفولوژیکی این منطقه سبب شده است تا این منطقه فاقد موانع و لندفرم‌های محدودکننده جهت توسعه کاربری‌های انسان ساخت و اراضی کشاورزی باشد. همچنین قرار گرفتن شهر پیشوا در نزدیکی شهر تهران زمینه را برای افزایش جمعیت و توسعه صنایع در مناطق مجاور شهر پیشوا فراهم آورده است. با توجه به موارد مذکور، عوامل طبیعی و انسانی سبب شده است تا این منطقه در طی سال‌های اخیر با توسعه زیادی همراه باشد و این توسعه با تغییرات کاربری اراضی همراه بوده است. با توجه به اینکه تغییرات کاربری اراضی این منطقه با افزایش فشار بر سطح زمین و همچنین افزایش بهره‌برداری از منابع آب زیرزمینی همراه بوده است، بنابراین می‌توان گفت که یکی از دلایل اصلی وقوع فرونشست در محدوده شهری و حاشیه شهری پیشوا، فعالیت‌های انسانی از جمله توسعه کاربری‌های انسان ساخت و استفاده بیش از حد از منابع آب زیرزمینی بوده است.

۴- نتیجه‌گیری

فرونشست زمین مخاطره نامحسوسی است که بسیاری از شهرهای کشور از جمله شهر پیشوا را با چالش جدی مواجه کرده است. اهمیت موضوع فرونشست سبب شده تا در این پژوهش با استفاده از تصاویر راداری و روش سری زمانی SBAS، به ارزیابی میزان فرونشست در محدوده شهری و حاشیه شهری پیشوا پرداخته شود. نتایج حاصله از این پژوهش نشان داده است که منطقه مورد مطالعه در طی دوره زمانی ۲ ساله (از تاریخ ۲۰۲۰/۰۱/۰۹ تا ۲۰۲۲/۰۱/۱۰) بین ۱۰۷ تا ۴۱۱ میلی‌متر فرونشست داشته است که بر این اساس می‌توان گفت که ماکزیمم فرونشست سالانه منطقه بیش از ۲۰ سانتی‌متر است. با توجه به نتایج حاصله، شهر پیشوا نسبت به شهر اردبیل (Aghayari et al., 2022) دارای فرونشست بیش‌تر و نسبت به مناطق جنوبی شهر تهران (Maghsoudi et al., 2019) دارای فرونشست کم‌تری بوده است.

در این پژوهش به منظور ارزیابی عوامل مؤثر در وقوع فرونشست منطقه، به بررسی وضعیت ژئومورفولوژی و تغییرات کاربری اراضی منطقه در طی سال‌های ۱۹۹۱ تا ۲۰۲۱ پرداخته شده است. نتایج حاصله از ارزیابی وضعیت ژئومورفولوژی منطقه نشان داده است که محدوده مطالعاتی منطبق بر واحد دشت و فاقد موانع محدودکننده است و همین مسئله زمینه را برای توسعه کاربری‌های انسان ساخت و اراضی کشاورزی در منطقه فراهم آورده است. همچنین نتایج ارزیابی تغییرات کاربری اراضی منطقه نشان داده است که در طی دوره زمانی ۳۰ ساله (از تاریخ ۱۳۹۱/۰۷/۰۹ تا ۲۰۲۱/۰۷/۰۷) کاربری نواحی انسان ساخت با روند افزایشی قابل توجهی مواجه شده است به طوری که این کاربری در سال ۱۹۹۱، ۲/۲ کیلومترمربع وسعت داشته است (معادل ۵/۵ درصد از وسعت منطقه) که این میزان در سال ۲۰۲۱ به ۶/۹ کیلومترمربع (معادل ۱۷/۲ درصد از وسعت منطقه) افزایش یافته است. با توجه به اینکه توسعه کاربری‌های انسان ساخت با افزایش فشار بر سطح زمین همراه است و همچنین توسعه نواحی سکونتگاهی و صنعتی با افزایش استفاده از منابع آب زیرزمینی همراه است، بنابراین تغییرات کاربری‌های اراضی در طی سال‌های اخیر، زمینه را برای وقوع فرونشست در منطقه فراهم آورده است. با توجه به موارد مذکور، یکی از دلایل اصلی وقوع فرونشست در محدوده شهری و حاشیه شهری پیشوا، فعالیت‌های انسانی از جمله توسعه کاربری‌های انسان ساخت بوده است.

۵- سپاس‌گزاری

این مقاله با حمایت‌های معنوی دانشگاه خوارزمی تهران صورت گرفته است.

۶- منابع

- آقایی، لایلا؛ عابدینی، موسی؛ اصغری سراسکانرود، صیاد. (۱۴۰۱). برآورد میزان فرونشست با استفاده از تکنیک تداخل سنجی راداری و پارامترهای آب‌های زیرزمینی و کاربری اراضی (مطالعه موردی: دشت اردبیل). پژوهش‌های ژئومورفولوژی کمی، ۱۱(۱)، ۱۱۷-۱۳۲. doi: 10.22034/gmpj.2022.304999.1302
- المدرسی، سیدعلی؛ حشمتی، شیما. (۱۳۹۴). مدل‌سازی فرونشست دشت نیشابور با استفاده از سری‌های زمانی و تکنیک DINSAR. مجله جغرافیا و برنامه‌ریزی محیطی، ۲۶(۱)، ۸۴-۶۷.

- آمیغبی، معصومه؛ عربی، سیاوش؛ طالبی، علی. (۱۳۸۸). بررسی فرونشست یزد با استفاده از روش تداخل سنجی راداری و ترازبایی دقیق. *مجله علوم زمین*، ۲۰ (۷۷)، ۱۶۴-۱۵۷.
- بابایی، سیداسان؛ خزایی، صفا؛ قاصرمبارکه، فروزان. (۱۳۹۶). پردازش سری زمانی تداخل سنجی تصاویر راداری COSMO-SkyMed به منظور محاسبه نرخ فرونشست در محدوده سازه‌های زمینی و زیرزمینی در شهر تهران. *نشریه علوم و فنون نقشه برداری*، ۷ (۱)، ۶۷-۵۵.
- صالحی‌متعهد، فهیمه؛ حافظی مقدس، ناصر؛ لشکری پور، غلامرضا؛ دهقانی، مریم. (۱۳۹۸). ارزیابی فرونشست زمین به کمک تلفیق روش تداخل سنجی راداری و اندازه‌گیری‌های میدانی و مطالعه دلایل و اثرات آن بر شهر مشهد. *نشریه زمین شناسی مهندسی*، ۱۳ (۳)، ۴۶۳-۴۳۵.
- صفاری، امیر؛ جعفری، فرهاد؛ توکلی صبور، سیدمحمد. (۱۳۹۵). پایش فرونشست زمین و ارتباط آن با برداشت آب‌های زیرزمینی (مطالعه موردی: دشت کرج-شهریار). *پژوهش‌های ژئومورفولوژی کمی*، ۵ (۲)، ۹۳-۸۲.
- گنجائیان، حمید. (۱۳۹۹). مخاطرات ژئومورفولوژیک مناطق شهری، روش‌های مطالعه و راهکارهای کنترل آن. *نشر انتخاب*، ۱۱۴ صفحه.
- گنجائیان، حمید؛ منبری، فاطمه؛ قاسمی، افشان؛ نصرتی، مژگان. (۱۴۰۱). ارزیابی و تحلیل مخاطره فرونشست در دشت کبودآهنگ-فامنین. *مجله سپهر*، ۳۱ (۱۲۴)، ۸۶-۷۵.
- مقصودی، یاسر؛ امانی، رضا؛ احمدی، حسن. (۱۳۹۸). بررسی رفتار فرونشست زمین در منطقه غرب تهران با استفاده از تصاویر سنجنده سنتینل ۱ و تکنیک تداخل سنجی راداری مبتنی بر پراکنش گرهای دائمی. *مجله تحقیقات منابع آب ایران*، ۱۵ (۱)، ۳۱۳-۲۹۹.
- مهرابی، علی؛ کریمی، صادق؛ خالصی، مهران. (۱۴۰۲). تحلیل فضایی فرونشست دشت جیرفت با استفاده از تکنیک پیکسل‌های کوهرنس (CPT). *جغرافیا و برنامه‌ریزی محیطی*، ۳۴ (۱)، ۹۹-۱۱۶. doi: 10.22108/gep.2022.133667.1525.۱۱۶-۹۹

References

- Agarwal, V., Kumar, A., Gee, D., Grebby, S., Gomes, R. L., Marsh, S. 2021. Comparative Study of Groundwater-Induced Subsidence for London and Delhi Using PSInSAR. *Remote Sens*, 13 (23). <http://dx.doi.org/10.3390/rs13234741>
- Aghayari, L., Abedini, M., Asghari-Saraskanroud, S. 2022. Estimating the rate of subsidence using radar interferometry technique and groundwater and land use parameters (Case study: Ardabil plain). *Quantitative Geomorphology Research*, 11 (1), 117-132. <https://dorl.net/dor/20.1001.1.22519424.1401.11.1.7.9> [In Persian]
- Al-Madrasi, S.A., Heshmati, S. 2015. Modeling the subsidence of the Neyshabur plain using time series and DINSAR technique. *Journal of Geography and Environmental Planning*, 26 (1), 84-67. <https://dorl.net/dor/20.1001.1.20085362.1394.26.1.5.4> [In Persian]
- Amighpay, M., Arabi, S., Talebi, A. 2009. Investigation of Yazd subsidence using radar interferometry and precise leveling. *Earth Sciences*, 20 (77), 157-164. <https://www.sid.ir/paper/32299/fa> [In Persian]
- Babaei, S., Khazaei, S., Qasere-Mobarakeh, F. 2017. Interferometric time series processing of COSMO-SkyMed radar images to calculate subsidence rates within the area of ground and underground structures in Tehran. *Surveying Sciences and Technologies*, 7 (1), 55-67. <https://elmnet.ir/doc/1723625-2401> [In Persian]
- Bokhari, R., Shu, H., Tariq, A., Al-Ansari, N., Guluzade, R., Chen, T., Jamil, A., Aslam, M. 2023. Land subsidence analysis using synthetic aperture radar data, *Heliyon*, 9 (3). <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2023.e14690>
- 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*. 168, 219-238. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2015.07.010>
- 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. <http://dx.doi.org/10.3390/rs8060468>

- Chen.C., Wang.C., Chen Kuo. L. 2010. Correlation between groundwater level and variations in land subsidence area of the Choshuichi Alluvial Fan. Taiwan. *Geology*, 115, 122–131. <http://dx.doi.org/10.1016/j.enggeo.2010.05.011>
- Dong, S., Samsonov, S., Yin, H., Ye, S., Cao, Y. 2014. Time-series analysis of subsidence associated with rapid urbanization in Shanghai, China measured with SBAS InSAR method. *Environmental earth sciences*, 72(3), 677-691. <http://dx.doi.org/10.1007/s12665-013-2990-y>
- Eastman, J. R. (2006). IDRISI Andes. Guide to GIS and Image Processing. *Clark Labs*, Clark University, Worcester, MA. <https://www.researchgate.net/profile/Ronald-Eastman-2/publication/242377547>
- Ganjaian, H. 2019. Geomorphological hazards of urban areas, study methods and control strategies. *Entebbe Publishing*, 114 pages. <https://www.gisoom.com/book/11628118> [In Persian]
- Ganjaian, H., Manbari, F., Ghasemi, A., Nosrati, M. 2022. Assessment and analysis of subsidence risk in the Kabudarahang-Famenin plain. *Sepehr*, 31 (124), 75-86. <https://doi.org/10.22131/sepehr.2023.553000.2871> [In Persian]
- Higgins, S., Overeem, I., Tanaka, A., & Syvitski, J. M. 2013. Land subsidence at aquaculture facilities in the Yellow River delta, China. *Geophysical Research Letters*, 40, 3898–3902. <http://dx.doi.org/10.1002/grl.50758>
- Hsieh, C., Shih, T., Hu, J., Tung, H., Huang, M., Angelier, J. 2011. Using differential SAR interferometry to map land subsidence: A case study in the Pingtung Plain of SW Taiwan. *Nat. Hazards*. 58, 1311–1332. <http://dx.doi.org/10.1007/s11069-011-9734-7>
- Khorsandi Aghai, A. 2015. Survey of land subsidence– case study: The land subsidence formation in artificial recharge ponds at South Hamadan Power Plant, northwest of Iran, Indian Academy of Sciences, *J. Earth Syst.* 1, 261–268. <http://dx.doi.org/10.1007/s12040-014-0532-y>
- Li, Y., Zuo, X., Xiong, P., Chen, Z., Yang, F., Li, X., 2022. Monitoring Land Subsidence in North-central Henan Plain using the SBAS-InSAR Method with Sentinel-1 Imagery Data, *Journal of the Indian Society of Remote Sensing*, V 50, pp: 635–655. https://ui.adsabs.harvard.edu/link_gateway/2022JISRS..50..635L/doi:10.1007/s12524-021-01484-6
- Maghsoudi, Y., Amani, R., Ahmadi, H. (2019). Investigation of land subsidence behavior in the western region of Tehran using Sentinel 1 sensor images and radar interferometry technique based on permanent scatterers. *Iranian Water Resources Research*, 15 (1), 313-299. <https://dorl.net/dor/20.1001.1.17352347.1398.15.1.22.9> [In Persian]
- Malik, K., Kumar, D., Perissin, D., Pradhan, B. 2022. Estimation of ground subsidence of New Delhi, India using PS-InSAR technique and Multi-sensor Radar data, Estimation of ground subsidence of New Delhi, India using PS-InSAR technique and Multi-sensor Radar data, *Advances in Space Research*, 69 (4), 1863-1882. <https://doi.org/10.1016/j.asr.2021.08.032>
- Mehrabi, A., Karimi, S., Khalesi, M. 2014. Spatial analysis of Jiroft plain subsidence using the Coherence Pixel Technique (CPT). *Geography and Environmental Planning*, 34 (1), 116-99. <https://doi.org/10.22108/gep.2022.133667.1525> [In Persian]
- Raucoules, D., le Mouelic, S., Carnec, C., Maisons, C., King, C. 2003. Urban subsidence in the city of Prato (Italy) monitored by satellite radar interferometry. *Int. J. Remote Sens.* 24 (4), pp: 891–897. <http://dx.doi.org/10.1109/IGARSS.2002.1025896>
- Safari, A., Jafari, F., Tavakoli Sabour, S. M. 2016. Monitoring of land subsidence and its relationship with groundwater withdrawal (Case study: Karaj-Shahryar plain). *Quantitative Geomorphology Research*, 5 (2), 82-93. <https://dorl.net/dor/20.1001.1.22519424.1395.5.2.6.8> [In Persian]
- Salehi-Motahed, F., Hafezi-Moghadas, N., Lashkaripour, G., Dehghani, M. 2019. Land subsidence assessment using a combination of radar interferometry and field measurements and a study of its causes and effects on the city of Mashhad. *Engineering Geology*, 13 (3), 435-463. <https://www.sid.ir/paper/390838/fa> [In Persian]
- 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>
- Shi, X., Chen, C., Dat, K., Deng, J., Wen, N., Yin, Y., Dong, X. 2022. Monitoring and Predicting the Subsidence of Dalian Jinzhou Bay International Airport, China by Integrating InSAR Observation and Terzaghi Consolidation Theory. *Remote Sens.* 14 (10). <https://doi.org/10.3390/rs14102332>
- Talebinia, M., Khosravi, H., Zehtabian, G., Malekian, A., Keshtkar, H. (2012). Studying the subsidence process of Isfahan plain using differential radar interferometry technique. *Remote Sensing and Geographic Information Systems in Natural Resources*, 14 (3), 12-9. <https://doi.org/10.30495/girs.2023.690220> [In Persian]

- Wang, H., Jia, C., Ding, P., Feng, K., Yang, X., Zhu, X., 2022. Analysis and Prediction of Regional Land Subsidence with InSAR Technology and Machine Learning Algorithm, *Journal of Civil Engineering*, (25). <http://dx.doi.org/10.1007/s12205-022-1067-4>
- Zhou, Z. 2013. The applications of InSAR time series analysis for monitoring long-term surface change in peatlands, University of Glasgow. <https://theses.gla.ac.uk/4875/1/2013>