



Estimation of the Subsidence rate of a Part of Sarab City Affected by the Great Turkmenchai Earthquake and the Condition of Underground Water

Sayyad Asghari Saraskanroud^{1✉}, Shiva Safari², Elham Mollanouri³

1. Corresponding author, Associate professor of Geomorphology, University of Mohagheh Ardabili, Ardabil, Iran.

E-mail: sayyad.sasghari21@gmail.com

2. Master, Department of Physical Geography, Faculty of Social Sciences, Mohagheh Ardabili University, Ardabil, Iran.

E-mail: safari.shiva@gmail.com

3. Phd student, Department of Physical Geography, Faculty of Social Sciences, Mohagheh Ardabili University, Ardabil, Iran. E-mail: e.mollanouri@gmail.com

Article Info

Article type:

Research Article

Article history:

Received: 7 April 2021

Revised: 12 March 2023

Accepted: 25 June 2023

Published: 20 November 2024

Keywords:

radar interferometry, SBAS technique, displacement rate, underground water, earthquake.

ABSTRACT

Land subsidence usually occurs in cities and surrounding areas due to the indiscriminate harvesting of underground aquifers and the natural risk of earthquakes, the result of which may be revealed in the long term in residential areas and facilities as well as geomorphological landforms. Therefore, in order to better evaluate and manage resources, time and place monitoring of subsidence is necessary. In investigating land subsidence, identifying the extent and rate of this phenomenon is an important step, but due to the slow rate of subsidence, ground measurements may not be cost-effective and require special equipment. Therefore, remote sensing technology and SBAS radar interferometric technique with the possibility of long-term monitoring of the subsidence phenomenon and solving the problems of the traditional D-InSAR method can be useful in this kind of study. In the last few years, Iran has faced a crisis of earthquakes and subsidence in different regions. On the other hand, the problem of indiscriminate mining of underground aquifers is also discussed by researchers. One of the recent big earthquakes is the earthquake of 17 November 2018 in Turkmenchai, 25 km from Sarab, which was accompanied by a significant vertical displacement. Therefore, it seems necessary to investigate the subsidence of this area. The aim of this study is to estimate the subsidence rate of a part of Sarab city using the SBAS radar interferometry technique and the Sentinel 1 radar image series in the period from 2018 to 2021. Another goal of this study is to investigate the condition of the groundwater table in the subsiding areas as well as the land use condition of the region. The use of the SBAS technique considering the great earthquake of November 1998 and the condition of underground aquifers in this area can be considered an innovation of the present study.

Cite this article: Asghari Saraskanroud, S., Safari, Sh., & Mollanouri, E. (2024). Estimation of the Subsidence rate of a Part of Sarab City Affected by the Great Turkmenchai Earthquake and the Condition of Underground Water. *Journal of Geography and Planning*, 28 (89), 1-16. <http://doi.org/10.22034/gp.2023.55307.3099>



© The Author(s).

DOI: <http://doi.org/10.22034/gp.2023.55307.3099>

Publisher: University of Tabriz.

Extended Abstract

Introduction

Land subsidence usually occurs in cities and surrounding areas due to the indiscriminate harvesting of underground aquifers and the natural risk of earthquakes, the result of which may be revealed in the long term in residential areas and facilities as well as geomorphological landforms. Therefore, in order to better evaluate and manage resources, time and place monitoring of subsidence is necessary. In investigating land subsidence, identifying the extent and rate of this phenomenon is an important step, but due to the slow rate of subsidence, ground measurements may not be cost-effective and require special equipment. Therefore, remote sensing technology and SBAS radar interferometric technique with the possibility of long-term monitoring of the subsidence phenomenon and solving the problems of the traditional D-InSAR method can be useful in this kind of study. In the last few years, Iran has faced a crisis of earthquakes and subsidence in different regions. On the other hand, the problem of indiscriminate mining of underground aquifers is also discussed by researchers. One of the recent big earthquakes is the earthquake of 17 November 2018 in Turkmenchai, 25 km from Sarab, which was accompanied by a significant vertical displacement. Therefore, it seems necessary to investigate the subsidence of this area. The aim of this study is to estimate the subsidence rate of a part of Sarab city using the SBAS radar interferometry technique and the Sentinel 1 radar image series in the period from 2018 to 2021. Another goal of this study is to investigate the condition of the groundwater table in the subsiding areas as well as the land use condition of the region. The use of the SBAS technique considering the great earthquake of November 1998 and the condition of underground aquifers in this area can be considered an innovation of the present study.

Data and Method

In the current research, SBAS interferometric technique was used with the time series processing of Sentinel 1 images in the period of 11/14/2018 to 01/02/2021 to investigate the subsidence of a part of Sarab city. The technique of differential radar interferometry is for extracting a map of the shape of the earth's surface on a large scale with an accuracy of centimeters to millimeters. SBAS technology is based on the singular value decomposition (SVD) algorithm and based on a suitable combination of interference of differential views to analyze time series and obtain the average annual displacement rate (subsidence rate) of the studied area on SAR images. In the following, the land use map of the studied area in 7 classes (barren, communication road, rainfed and water agriculture, residential area, river, snow cover, water, poor pasture) using the Landsat 8 image of 2021, with the necessary pre-processing Using the FLAASH model and object-oriented technique, it has been done to investigate the subsidence in different uses. In the continuation of the research, the data obtained from the regional water organization related to piezometric stations have been used to estimate the state of the groundwater table in the region.

Results and Discussion

In the present study, after improving the accuracy of baseline measurement in radar images, the connection graph was formed and the master cloud image was selected. And then using the Goldstein filter (Werner, 1998) and applying the least squares method, the interferograms were formed and the displacement value was calculated. According to the findings, we see an uplift in the northern parts of Sarab city and scattered subsidence in different areas with maximum and minimum values of 2-9 cm per year in the region. The remarkable thing is the changes after the great Turkmenchai earthquake and around 2021 in this region. According to the findings, the highest rate of subsidence is observed around agricultural use and pasture, which is more obvious around the city of Sarab. The investigation of the underground water table in the region showed that the underground water has been experiencing ups and downs from 2003 to 2018, but since the beginning of 2019, a sudden decrease in the water table level has been observed. Therefore, both the lowering of the underground water level and the big earthquake can be the cause of the subsidence of the region, but according to the studies, it seems that the 2019 earthquake was more effective. On the other hand, fault plates and fractures and their impact on the penetration of running water and the abundance and quality of underground water resources cannot be ignored.

Conclusion

According to the results of the present study, four cases are significant; one is that the subsidence that occurred in the region can be affected by the drop of underground water. The second case is the time of subsidence, which seems to have a stronger role in the occurrence of earthquakes; The third case is the fluctuations of the aquifers, which according to the mentioned materials can be due to the movements of the fault plates and the change of the direction of the aquifers and the permeability pattern. The fourth case is the earthquake of November 8, 2019, in Turkmenchai, which is not unlikely to be due to the change in the condition of the table and the drop that happened in them. According to the surveys, it seems that all four cases can be involved in the changes in the region. But each case needs to be investigated separately and in detail. It is worth mentioning that the amount of subsidence obtained in the region needs to be checked by experts and provide suitable solutions to reduce the rate of subsidence. It is suggested to use other techniques in future studies, such as the PSI technique in the region or other areas where there is a possibility of subsidence. Investigating the influencing factors in the drop of underground water is another suggestion of this study.



بررسی تغییرات ارتفاعی سطح زمین با استفاده از تکنیک تداخل سنجی راداری SBAS در بخشی از شهرستان سراب

صیاد اصغری سراسکانرود^۱، شیوا صفری^۲، الهام ملانوری^۳

۱. نویسنده مسئول، استاد گروه جغرافیای طبیعی، دانشکده علوم اجتماعی، دانشگاه محقق اردبیلی، اردبیل، ایران. رایانامه: S.asghari@uma.ac.ir

۲. کارشناسی ارشد، گروه جغرافیای طبیعی، دانشکده علوم اجتماعی، دانشگاه محقق اردبیلی، اردبیل، ایران. رایانامه: shiva@gmail.com

۳. دانشجوی دکتری، گروه جغرافیای طبیعی، دانشکده علوم اجتماعی، دانشگاه محقق اردبیلی، اردبیل، ایران. رایانامه: e.mollanuri@gmail.com

اطلاعات مقاله

چکیده

نوع مقاله:

مقاله پژوهشی

جابه جایی زمین یکی از بارزترین آثار نامحسوس مخاطره‌ی طبیعی زلزله شناخته می‌شود. در مطالعه حاضر از تکنیک تداخل سنجی راداری (SBAS) با استفاده از تصاویر سنتینل ۱ (۲۰۱۸ الی ۲۰۲۱) جهت برآورد جابجایی و از تصویر لندست ۸ سال ۲۰۱۸ جهت استخراج طبقات کاربری اراضی در قسمتی از شهرستان سراب استفاده شده است. همچنین داده‌های اخذ شده از سازمان آب منطقه‌ای جهت بررسی وضعیت آب‌های زیرزمینی در ارتباط با فرونشست ناشی از جابجایی استفاده شده است. طبق یافته‌ها و بررسی نقشه کاربری اراضی منطقه مورد مطالعه، فرونشست در نقاط مختلف قابل مشاهده است و در اطراف مناطق کشاورزی و مراکز به ۹ سانتی‌متر در سال نیز می‌رسد. همچنین در بعضی نقاط میزان بالآمدگی تا ۱۲ سانتی متر برآورد شده است. بررسی وضعیت سفره‌ها نشان دهنده‌ی افت سطح آب‌های زیرزمینی در اکثر ایستگاه‌ها بخصوص افت ناگهانی از ابتدای سال ۹۸ می‌باشد. با توجه به اینکه رابطه‌ی مستقیم برداشت از آب‌های زیرزمینی و پدیده‌ی فرونشست کاملاً اثبات شده است؛ ولی بعد از زلزله ۵٫۹ ریشتری آبان ۱۳۹۸ تغییرات ناگهانی در وضعیت فرونشست منطقه رخ داده است. بنابراین بنظر می‌رسد جابجایی منطقه، بیشتر تحت تاثیر زلزله باشد.

تاریخ دریافت: ۱۴۰۱/۱۱/۱۸

تاریخ بازنگری: ۱۴۰۱/۱۲/۲۱

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۲/۰۴/۰۴

تاریخ انتشار: ۱۴۰۳/۰۸/۳۰

کلیدواژه‌ها:

تداخل سنجی راداری،

تکنیک SBAS،

نرخ جابجایی،

آب زیرزمینی، زلزله.

استناد: اصغری سراسکانرود، صیاد؛ صفری، شیوا و ملانوری، الهام (۱۴۰۳). بررسی تغییرات ارتفاعی سطح زمین با استفاده از تکنیک تداخل سنجی راداری SBAS در

بخشی از شهرستان سراب. جغرافیا و برنامه‌ریزی، ۲۸ (۸۹)، ۱-۱۶.

<http://doi.org/10.22034/gp.2023.55307.3099>



© نویسندگان.

ناشر: دانشگاه تبریز.

مقدمه

جابه‌جایی زمین تغییر شکل تدریجی، فروریختن یا بالا آمدن ناگهانی سطح زمین است که ناشی از عوامل طبیعی و انسانی می‌باشد (Galloway et al., 2011 Shi et al., 2016). با اینکه فرونشست زمین معمولاً با نرخ چند سانتی متر در سال اتفاق می‌افتد اما خطرات احتمالی ناشی از آن از جمله، آسیب به زیرساخت‌ها، تخریب خاک و آبگرفتگی در مناطق ساحلی یکی از مخاطراتی است که امروزه توجه کارشناسان مربوطه را به خود جلب کرده است (Holzer et al., 2005 Ranjgar et al., 2021). فرونشست زمین معمولاً در شهرها و مناطق اطراف شهری، به دلیل بهره‌برداری بیش از حد از آب‌های زیرزمینی بخصوص در مناطقی با اقلیم خشک و نیمه خشک که کشور ایران نیز جزو این مناطق است، رخ می‌دهد و مناطق شهری را با خطرات و آسیب‌هایی روبه‌رو می‌کند (احمدی و همکاران، ۱۳۹۷). زلزله نیز به عنوان یکی از مخاطرات سریع، تهدیدی در حال رشد برای جوامع انسانی محسوب می‌شود و در این میان زمین لرزه‌های بزرگ منجر به آثار محسوس مانند مرگ‌ومیر و همچنین آثار نامحسوسی همچون حرکت قائم زمین به صورت فرونشست و بالا آمدگی می‌شوند که نتیجه آن ممکن است در بلند مدت در نواحی سکونتگاهی و تأسیسات و همچنین لندفرم‌های ژئومورفولوژی آشکار شود (Dehghani et al., 2009; Pan et al., 2019). بنابراین جهت ارزیابی و مدیریت بهتر منابع، نظارت زمانی و مکانی فرونشست ضروری می‌باشد (Dehghani et al., 2009). در بررسی فرونشست زمین، تشخیص محدوده و نرخ این پدیده گامی مهم است؛ اما با توجه به نرخ کند فرونشست اندازه‌گیری‌های زمینی بخصوص در مناطق وسیع ممکن است با چالش‌هایی روبه‌رو بوده و نیاز به فناوری پیشرفته‌ای داشته باشد (اصغری و همکاران، ۱۴۰۱). در این میان تکنیک‌های سنجش از دوری با استفاده از تصاویر راداری با توجه به پوشش سراسری و قدرت تفکیک مکانی خوب این تصاویر می‌توانند در این دست از مطالعات بسیار مفید باشند. تکنیک‌های تداخل سنجی In-SAR از جمله D-InSAR^۱ و SBAS^۲ جزو روش‌های پرکاربرد مطالعه جابجائی قائم زمین می‌باشند. با وجود اینکه محققین در مطالعات متعددی در سطح بین‌المللی، با بهره‌گیری از تکنیک D-InSAR به نتایج خوبی در شناسایی جابجائی زمین در مناطق مختلف دست یافته‌اند، اما محدودیت خط مبنای زمانی در این تکنیک می‌تواند منجر به عدم همبستگی شده و به‌ویژه زمانی که خط مبنای خیلی طولانی است باعث پایین آمدن دقت نظارت شود. بنابراین تکنیک SBAS با رفع محدودیت تکنیک D-InSAR جهت پاسخگویی به پایش بلند مدت پدیده‌ی فرونشست و بالا آمدگی می‌تواند انتخاب مناسبی باشد (chan et al., 2021). به همین جهت تکنیک تداخل سنجی SBAS با استفاده از سری تصاویر SAR اخذ شده از سنسورهای رادار فضایی، پتانسیل خوبی در مطالعه پدیده فرونشست زمین داشته و مشکلات روش سنتی D-INSAR را برطرف می‌کند (Tapete et al., 2011; Agapiou et al., 2020; Bui et al., 2020; Pawluszek-Filipiak et al., 2020).

احمدی و همکاران (۱۳۹۷) در مطالعه‌ای با عنوان مطالعه فرونشست دشت خرمدره با استفاده از تکنیک تداخل سنجی راداری و بررسی مخاطرات آن پرداخته‌اند. نتایج این تحقیق نرخ فرونشست سالانه ۳۵ میلی متری را در بازه زمانی ۲۰۰۳-۲۰۰۵ با استفاده از تصاویر ENVISAT و تکنیک Ps-InSAR و نرخ فرونشست سالانه ۴۹ میلیمتری را در بازه زمانی ۲۰۱۴-۲۰۱۷ با استفاده از تصاویر Sentinel 1 و تکنیک SBAS در دشت خرمدره نشان داده است. بررسی نتایج این محققین با داده‌های ایستگاه GPS خرمدره و ترازبایی دقیق بیانگر افزایش روند فرونشست در این دشت بوده است. این محققین دلیل فرونشست در منطقه را بالا بودن کاربری کشاورزی و برداشت از چاه‌های زیرزمینی دانسته‌اند و مخاطره فرونشست را تهدیدی برای خطوط راه آهن و راه‌های اصلی و بزرگراه موجود در منطقه دانسته‌اند. محمدخانی و همکاران (۱۳۹۸) در مطالعه‌ای به ارزیابی تاثیر افت آب‌های زیرزمینی بر میزان فرونشست با استفاده از تصاویر راداری سنتینل ۱ در دشت قروه ایران در بازه زمانی فروردین ۲۰۱۶ تا اسفند ۲۰۱۷ پرداختند. آن‌ها از داده‌های چاه‌های پیژومتری و رسوب‌شناسی و ۱۶ تصویر راداری سنتینل ۱ با اعمال تکنیک

^۱Differential Interferometric Synthetic Aperture Radar

^۲Small Baseline Subsets InSAR

SBAS استفاده کرده‌اند. نتایج بررسی این محققین افت سطح آب‌های زیرزمینی بر اثر بهره‌برداری از این منابع بویژه در مناطق شرقی و فرونشست ۲۱۶ میلیمتری در طی دو سال در حاشیه شرقی و غرب این دشت را نشان داد. رجبی و همکاران (۱۳۹۹) در مطالعه‌ای به بررسی مخاطره فرونشست در شهرهای غربی استان همدان با استفاده از تصاویر راداری پرداخته‌اند. طبق نتایج این محققین، بیشترین میزان فرونشست در مناطقی با بیشترین میزان افت آب زیرزمینی رخ داده و رابطه‌ی معناداری بین افت سطح آب زیرزمینی و فرونشست (۰/۷) وجود دارد. صدری کیا (۱۴۰۱) در مطالعه‌ای به بررسی فرونشست دشت سراب با استفاده از تکنیک پراکنش‌گرهای دائمی در بازه‌ی زمانی ۲۰۱۷ تا ۲۰۲۰ پرداخته است. این پژوهشگر فرونشست ۴۵ میلیمتری سالانه را برای منطقه تخمین زده است. همچنین کاهش چند متری سطح ایستابی آب‌های زیرزمینی در مناطق فرونشست توسط این پژوهشگر اشاره شده است. طبق نتیجه این پژوهشگر با استفاده از معادله رگرسیونی رابطه معنی‌داری بین افت سطح آب‌های زیرزمینی و نرخ فرونشست مشاهده شده است. ژوا^۱ و همکاران (۲۰۲۰) در مطالعه‌ای به ارزیابی پتانسیل فرونشست زمین در فرودگاه تازه تاسیس شیامن با کد XXNA واقع در زمین‌های احیا شده ساحلی جنوب شرقی چین پرداخته‌اند. این محققین چنین زمین‌هایی را مستعد فرونشست دانسته و منطقه مورد مطالعه را با استفاده از نتایج به دست آمده از داده سنتینل ۱ و تکنیک InSAR در بازه زمانی ژانویه ۲۰۱۸ تا آوریل ۲۰۱۹ به دلیل فشردگی زمین و شن و پر کردن لایروپ‌ها به شدت تحت تاثیر فرونشست معرفی کرده و آن را تهدیدی برای کاربری زمین در آینده دانسته‌اند. یکی از نتایج مهم این محققین کارایی روش In-SAR در شناسایی مناطق بزرگ تحت فرونشست می‌باشد. آفاپو^۲ و همکاران (۲۰۲۰) در مطالعه‌ای به شناسایی جابجایی با استفاده از تحلیل‌های سری زمانی و تکنیک InSAR و Hyp3^۳ در مناطق باستانی قبرس پس از زلزله ۵٫۶ ریشتری در سال ۲۰۱۵ پرداخته‌اند. این محققین تصاویر راداری مانند سنتینل ۱ را فرصت مناسب و یک راهبرد سیستماتیک جهت مطالعه مناطق باستانی بخصوص بعد از زلزله دانسته‌اند. پردازش جفت تصاویر سنتینل ۱ قبل و بعد از زلزله با استفاده از پلتفرم Hyp3 توانست جابجایی‌های کوچک در منطقه مورد مطالعه را در کمتر از یک ساعت نشان داده است. سسکاتلی^۴ و همکاران (۲۰۲۰) در مطالعه‌ای به مدل سازی عددی فرونشست زمین مرتبط با برداشت آب زیرزمینی در ایتالیای مرکزی از سال ۲۰۱۵ تا ۲۰۱۸ پرداخته‌اند. این محققین برای شناسایی ارتباط پیچیده شرایط حوضه‌های آبریز و جابجایی زمین، یک مدل هیدرولوژیکی توسعه دادند. توزیع پارامتر هیدرودینامیکی کالیبره و ارزیابی شده بوسیله میانگین اندازه‌گیری PSI^۵ با داده سنتینل ۱، نشان می‌دهد که احتمالاً فرونشست در منطقه پیستویا مرتبط با برداشت آب‌های زیرزمینی می‌باشد. این محققین در ادامه جهت ارزیابی از سناریو سازی تا سال ۲۰۵۰ استفاده کردند که منجر به توسعه چندین نقشه خطر فرونشست از شهر پیستویا شد که تاثیر استخراج آب‌های زیرزمینی را در کنترل فرونشست زمین در منطقه را نشان می‌دهد. بوی^۶ و همکاران (۲۰۲۱) مطالعه‌ای تحت عنوان شناسایی تغییر فرم زمین بوسیله داده سنتینل ۱ و تکنیک InSAR و ارتباط با تغییر سطح آب‌های زیرزمینی در هانوی ویتنام انجام داده‌اند. این محققین تکنیک InSAR را یکی از روش‌های معمول سنجش از دوری برای مشاهده و پایش فرونشست زمین معرفی کرده‌اند. همچنین مشاهده فرونشست با استفاده از هر دو روش SBAS و PSInSAR را سازگار در الگوهای مکانی و آماری دانسته‌اند. طبق نتایج این محققین کاهش ۰/۳۱ متری سالانه آب زیرزمینی در موقعیت مربوط به دو چاه Q57a و Q58a با میزان فرونشست سطحی حدود ۶-۸ میلیمتر در سال بوده است و چاه Q68a با بیشترین میزان افت آب زیرزمینی یعنی ۰/۹ میلیمتر در سال پاسخی به میزان فرونشست ۷ میلیمتری در سال بوده است. دکلرک^۷ و همکاران (۲۰۲۱) به بررسی فرونشست در اطراف رودخانه‌ی شلده در شهر آنتورپ پرداخته‌اند. این شهر بزرگترین و پرجمعیت‌ترین شهر کشور بلژیک و به عنوان دومین

^۱Zhuo^۲Agapiou^۳Hybrid Pluggable Processing Pipeline^۴Ceccatelli^۵persistent scatterer interferometry^۶Bui^۷Declercq

بندر اروپا است که محل دفن زباله و رسوبات بوده و تحت تاثیر فرونشست می‌باشد. این محققین از تکنیک پراکنش‌گرهای دائمی^۱ در مطالعه خود استفاده کرده‌اند. طبق نتایج این محققین متوسط نرخ خط دید سالانه^۲ فرونشست در سال‌های ۱۹۹۲-۲۰۰۱ با استفاده از داده ERS1/2 مقدار ۳/۴ میلیمتر، در سال‌های ۲۰۰۳-۲۰۱۰ با استفاده از داده ENVISAT مقدار ۲/۷۱ میلیمتر و در سال‌های ۲۰۱۶-۲۰۱۹ با استفاده از داده سنتینل A1 مقدار ۲/۱۱- میلیمتر برآورد شده است. طبق نتایج این محققین کاهش تدریجی در متوسط نرخ فرونشست سالانه در مقیاس جهانی مستقل از تغییرات مهم محلی در مناطق مختلف در امتداد رودخانه شلده می‌باشد.

نتایج حاصل از پژوهش محققین در مورد جابجایی قائم زمین نشان دهنده اهمیت مطالعه در این زمینه بوده و استفاده از ابزارهای جدید سنجش از دوری در این مورد بسیار حائز اهمیت می‌باشد. ایران طی چند سال اخیر با بحران زمین لرزه روبه رو بوده است؛ زلزله‌های پیاپی همراه پس لرزه‌های آن، باعث بوجود آمدن بالآمدگی و فروافتادگی‌ها شده است (مدیرزاده و همکاران، ۱۴۰۱). یکی از زلزله‌هایی که اخیراً در ایران رخ داده است، زلزله ۲۰۱۹/۱۱/۱۷ ساعت ۲۲:۴۷:۰۴ به وقت بین‌المللی به بزرگی ۵/۹ ریشتر (مرکز لرزه نگاری کشور) و ۰۲:۱۷:۰۳ بامداد به وقت محلی بوده است. این زمین لرزه که در استان آذربایجان شرقی ۲۴ کیلومتری حوالی ترک و ۲۵ کیلومتری سراب و ۱۸ کیلومتری ترکمنچای رخ داد سبب بروز خسارات محسوس زیادی به سکونتگاه‌های منطقه شده است و همچنین با جابجایی قائم قابل توجهی همراه بوده است. طبق گزارش سازمان نقشه برداری کشور به عنوان متولی پایش تغییرات پوسته ی زمین و بر اساس پردازش‌های راداری و ژئودتیک، سراب یکی از دشت‌های استان آذربایجان شرقی است که توسط خطر جابجایی و بوئژه فرونشست تهدید می‌شود (fa.ncc.gov.ir). جابه‌جایی قائم می‌تواند بر نواحی سکونتگاهی و سازه‌ها اثرات مستقیم داشته باشد و زمینه‌ی گسیختگی و حرکت دامنه‌ها را فراهم کند. قابل ذکر است برخی از اثرات جابجایی زمین ممکن است به مرور زمان بروز کند. به علاوه خطر فرونشست ناشی از افت سطح آب‌های زیرزمینی اثبات شده و به عنوان خطر جهانی تلقی می‌شود. با توجه به اعلام شرکت آب منطقه‌ای استان آذربایجان شرقی در سال ۱۳۹۵، سالانه حدود ۱۵ میلیون متر مکعب آب از چاه‌های مجاز سراب اضافه برداشت شده است (صدری کیا، ۱۴۰۱). با توجه به مطالب ذکر شده و نزدیکی شهرستان سراب به کانون زلزله بزرگ ترکمنچای بررسی جابجایی منطقه سراب و عوامل احتمالی تاثیر گذار در آن و تغییراتی که می‌تواند موجب شود، ضروری بوده و می‌تواند آگاهی‌های لازم را در اختیار کارشناسان و برنامه‌ریزان قرار دهد. بنابراین، هدف از مطالعه حاضر برآورد نرخ جابجایی قسمتی از شهرستان سراب با استفاده از تکنیک تداخل سنجی راداری SBAS و سری تصاویر راداری سنتینل ۱ در بازه‌ی زمانی ۲۰۱۸ تا ۲۰۲۱ می‌باشد. بررسی وضعیت سطح سفره‌ی آب‌های زیرزمینی مناطق تحت فرونشست و همچنین وضعیت کاربری اراضی منطقه از اهداف دیگر این مطالعه است. استفاده از تکنیک SBAS با مد نظر قرار دادن زلزله بزرگ آبان ۹۸ و وضعیت سفره‌های زیرزمینی این منطقه را می‌توان به عنوان نوآوری مطالعه حاضر در نظر گرفت.

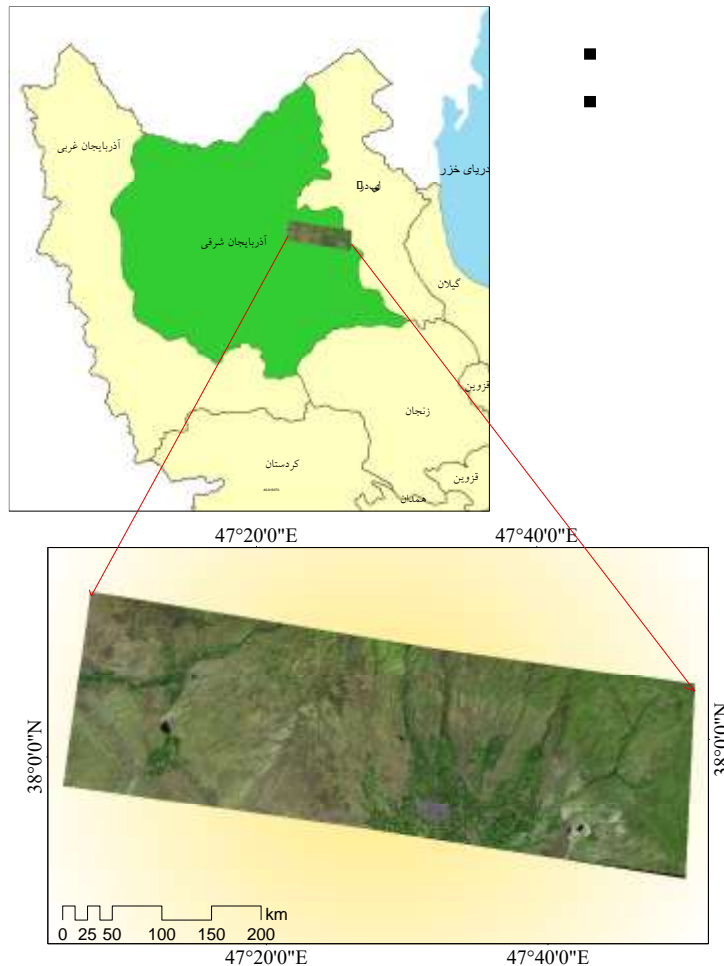
منطقه مورد مطالعه

منطقه مورد مطالعه بخشی از شهرستان سراب با وسعت ۱۲۹۰ کیلومتر را شامل می‌شود. شهر سراب یکی از شهرهای استان آذربایجان شرقی و مرکز اداری شهرستان سراب است. این شهر با جمعیت حدود ۴۵,۰۳۱ نفر، هفتمین شهر استان محسوب می‌شود. شهر سراب در منطقه‌ای به وسعت ۱۳ کیلومتر مربع گسترده شده است. این شهرستان در ۸۶ کیلومتری غرب اردبیل، ۱۳۴ کیلومتری شرق تبریز و ۱۸۵ کیلومتری میانه واقع شده است. مهمترین منبع تامین آب کشاورزی این منطقه، آب‌های زیرزمینی می‌باشد بنابراین مطالعات زیادی در رابطه با آب‌های زیرزمینی از سال ۱۹۶۳ آغاز شده است. شهرستان سراب از شمال و شرق توسط کوهستان سبلان و رشته کوه قوشا داغ و از سمت جنوب توسط ارتفاعات بزغوش احاطه شده و تنها از سمت غرب

^۱Persistent Scatterer Interferometry (PSInSAR)

^۲Line of Sight velocity

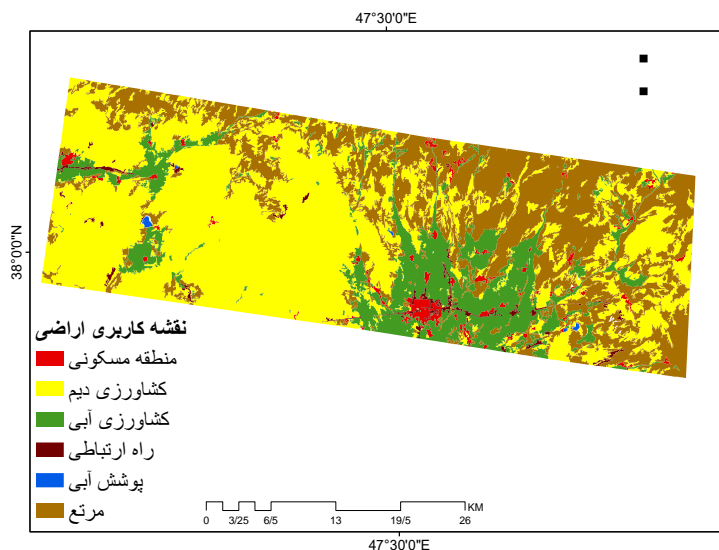
با مانع ارتفاعی روبه رو نیست (صدری کیا، ۱۴۰۱). مهمترین رودخانه‌های جاری در شهرستان سراب عبارتند از سوین، آغمیون، پسلر و تاجیار رود وائق چای، که از اطراف سرچشمه می‌گیرند و بعد از روستای اندرآب به هم پیوسته و با نام آجی‌چای از شرق به غرب جریان یافته و در نهایت به دریاچه ارومیه می‌ریزند. این منطقه عمدتاً از سنگ‌های آذرآواری دوران سوم و نهشته‌های آبرفتی دوران چهارم تشکیل شده است. شهرستان سراب شش دره آبرفتی دارد که رسوبات آن‌ها در سمت پایین دست به هم ملحق می‌شوند و دشت سراب را به وجود می‌آورند. از نظر زمین‌ساختی، تشکیل دشت سوبسیدانس سراب وابسته به فاز تکتونیکی میوپلیوسن است و این حوضه اغلب از رسوب‌های میوسن، پلیوسن کواترنر با ضخامت زیاد پوشیده شده است. گسل‌های متعددی در شکل‌گیری آن مؤثر بوده‌اند که در این میان گسل‌های دامنه شمالی بزقوش و دامنه جنوب سبلان، نقش اساسی در شکل‌گیری آن داشته‌اند. سازندهای زمین‌شناسی که در منطقه برنزد دارند، به ترتیب سنی از قدیم به جدید شامل؛ کنگلومرا و ماسه‌سنگ به سن پلیومیوسن Ngc، مارن ژیبسی ماسه‌سنگ دار به سن میوسن Mmg، ولکانیک‌های پلیوسن Plv، کنگلومرا و ولکانیک‌های پلیوکواترنر Plqv و PLqc و پادگانه‌های آبرفتی Qt به سن کواترنر مرتبط است. نوع اقلیم دشت نیز، بر اساس روش آمبرژه، نیمه خشک سرد است. شکل ۱ منطقه مورد مطالعه را نشان می‌دهد.



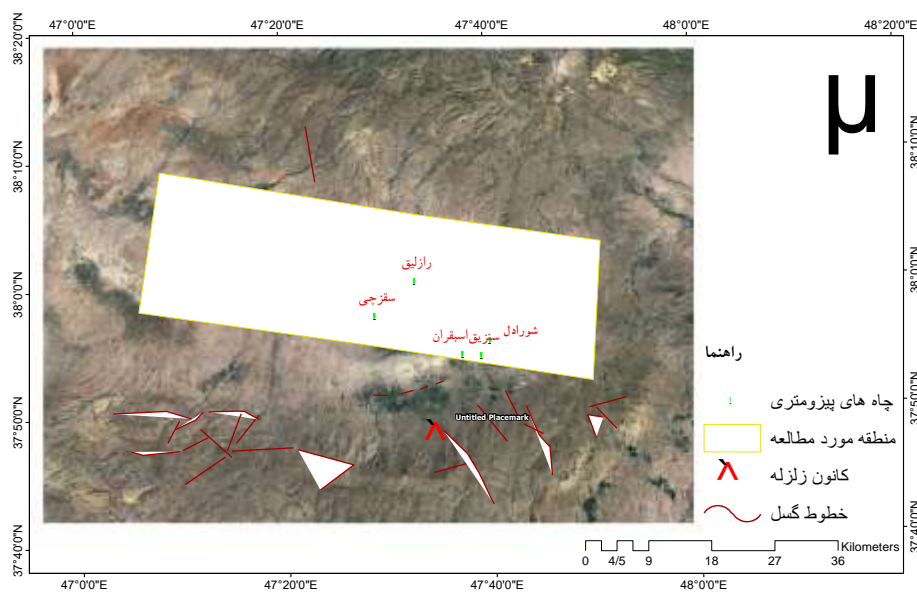
شکل (۱). منطقه مورد مطالعه

شکل ۲ نقشه طبقات کاربری اراضی منطقه در ۶ طبقه (راه ارتباطی، کشاورزی دیم، کشاورزی آبی، منطقه مسکونی، پوشش آبی و مرتع) را نشان می‌دهد. همچنین از داده‌های اخذ شده از سازمان آب منطقه‌ای مربوط به ایستگاه‌های پیژومتری سنزریق،

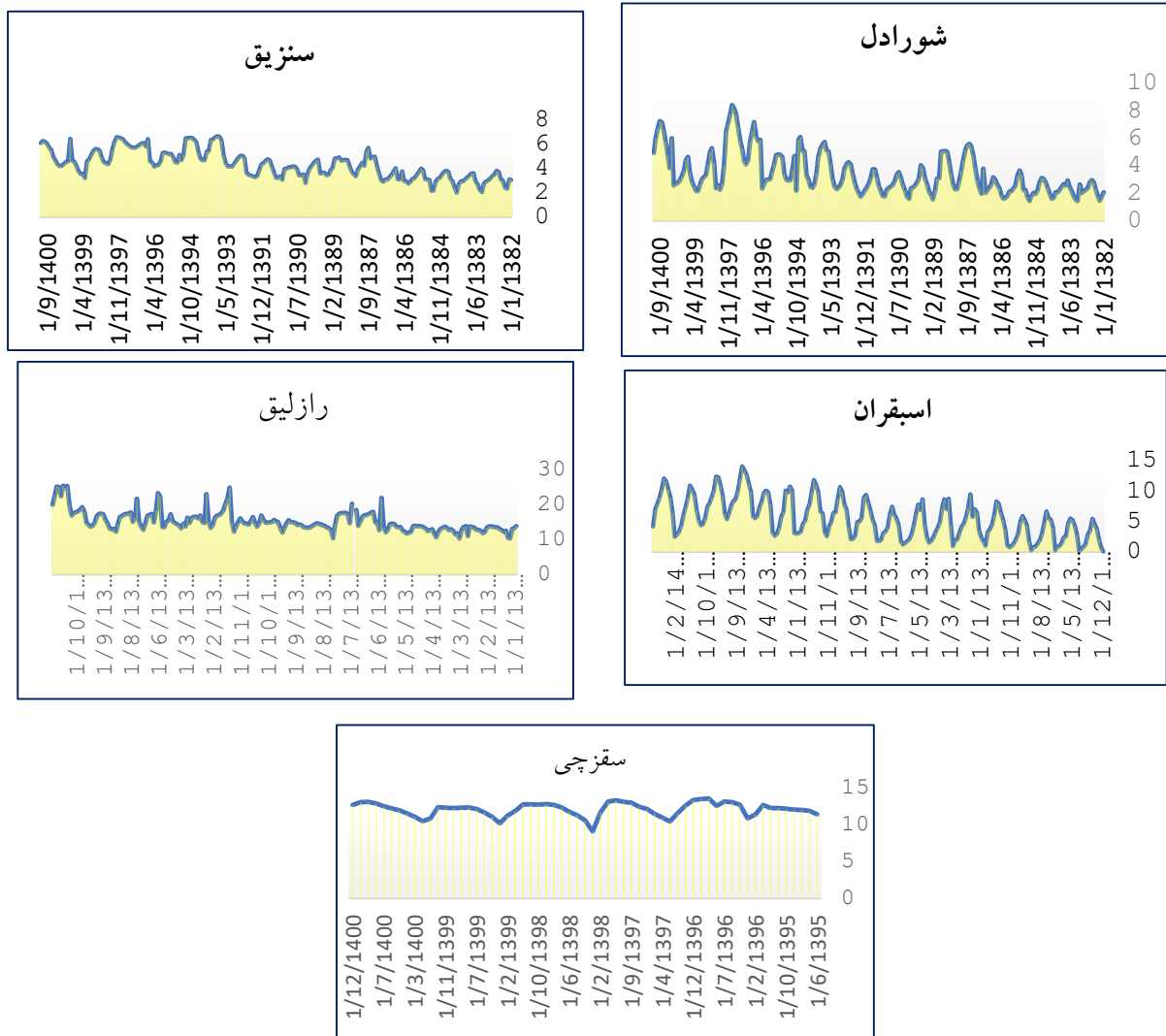
اسبقران، شورادل، رازلیق و سقرچی جهت تخمین وضعیت سطح سفره‌ی آب‌های زیرزمینی منطقه استفاده شده است. موقعیت چاه‌های پیژومتری مورد بررسی در منطقه مورد مطالعه به همراه موقعیت کانون زلزله و خط گسل حوالی آن در شکل ۳ قابل مشاهده است. همچنین در شکل ۴ می‌توان نمودار مربوط به وضعیت سفره‌های مرتبط با ایستگاه‌های مورد بررسی را مشاهده کرد. شکل ۵ نیز نمونه‌ای از استحصال آب‌های زیرزمینی منطقه را نشان می‌دهد.



شکل (۲). نقشه‌ی کاربری اراضی منطقه



شکل (۳). موقعیت چاه‌های پیژومتری



شکل (۴). نمودار وضعیت سفره‌ی آب‌های زیرزمینی در ایستگاه‌های مورد مطالعه



شکل (۵). نمونه‌هایی از استحصال آب‌های زیرزمینی و تأمین نیازهای آبی اراضی کشاورزی موجود در دشت سراب

مواد و روش

در مطالعه حاضر از ۱۵ تصویر SAR سنتینل ۱A در بازه زمانی ۲۰۱۸/۱۱/۱۴ تا ۲۰۲۱/۰۱/۰۲ با استفاده از تکنیک تداخل سنجی راداری SBAS جهت بررسی فرونشست منطقه مورد مطالعه استفاده شده است. جدول (۱) مشخصات تصاویر مورد استفاده را نشان می‌دهد. این سنجنده فعال در باند C (۴۰۵، GHZ) می‌باشد که SAR-C نام دارد. این تصاویر با توجه به عدم حساس بودن به شرایط اقلیمی و عمق نفوذ مناسب باند C، در این دست از مطالعات توصیه شده و مورد استفاده در روش‌های پردازشی، نظیر تکنیک تداخل سنجی می‌باشد (سیفی و همکاران، ۱۳۹۸). داده‌های در دسترس از این سنجنده، شامل داده‌ی خام ۱ (سطح صفر)، محصول SLC^۲، محصول ۳GRD و ... می‌باشند. محصول SLC دارای اندازه و فاز بوده که امکان تداخل سنجی را فراهم می‌کند.

جدول (۱). مشخصات تصاویر راداری مورد استفاده

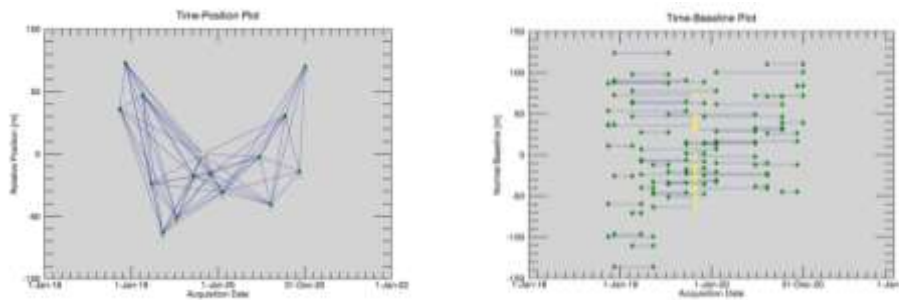
Sl no	sat	Date of Acquisition	Polarization	product	Beam	Perpendicular Baseline (m)
1	S-1A	۲۰۱۸/۱۱/۱۴	VH	SLC	IW	35.98
2	S-1A	۲۰۱۸/۱۲/۰۸	VH	SLC	IW	74.72
3	S-1A	۲۰۱۹/۰۲/۱۸	VH	SLC	IW	47.02
4	S-1A	۲۰۱۹/۳/۲۶	VH	SLC	IW	-23.69
5	S-1A	۲۰۱۹/۰۵/۱۳	VH	SLC	IW	-63.38
6	S-1A	۲۰۱۹/۰۷/۱۲	VH	SLC	IW	-51.21
7	S-1A	۲۰۱۹/۰۹/۲۲	VH	SLC	IW	-17.75
8	S-1A	۲۰۱۹/۱۰/۲۸	VH	SLC	IW	0.0
9	S-1A	۲۰۱۹/۱۲/۰۳	VH	SLC	IW	-15.84
10	S-1A	۲۰۲۰/۰۱/۲۰	VH	SLC	IW	-30.65
11	S-1A	۲۰۲۰/۰۶/۲۴	VH	SLC	IW	-2.11
12	S-1A	۲۰۲۰/۰۸/۱۱	VH	SLC	IW	-40.47
13	S-1A	۲۰۲۰/۱۰/۱۰	VH	SLC	IW	30.74
14	S-1A	۲۰۲۰/۱۲/۰۹	VH	SLC	IW	-14.05
15	S-1A	۲۰۲۱/۰۱/۰۲	VH	SLC	IW	69.96

تکنیک SBAS جهت تخمین تغییر شکل سطح زمین و برای بررسی تکامل تغییر شکل در طول زمان با نرم افزار ساراسکیپ استفاده می‌شود (Babu et al., 2019). تکنولوژی SBAS از الگوریتم SVD^۱ و بر مبنای ترکیبی مناسب از تداخل نماهای تفاضلی برای تحلیل سری‌های زمانی و به دست آوردن نرخ میانگین جابجایی سالانه منطقه مورد مطالعه بر روی تصاویر SAR عمل می‌کند (brardino et al., 2002). در روش تحلیل سری زمانی با استفاده از تکنیک SBAS از زوج تصاویری استفاده می‌شود که مؤلفه قائم خط مبنای مکانی و خط مبنای زمانی از مقدار بحرانی کمتر باشد (محمدخانی و همکاران، ۱۳۹۸). جهت شناسایی این زوج تصاویر از گراف اتصال^۲ استفاده شده است که خروجی آن دو تصویر برای تعیین شبکه اتصالات و خط مبنای نرمال^۳ می‌باشد. شکل ۶.

^۱singular value decomposition

^۲connection graph

^۳Normal Baseline



شکل (۶). شکل سمت راست: شبکه اتصالات شکل سمت چپ: تداخل نگارهای تشکیل شده بین تصاویر

در ادامه جهت تصحیح و بازگشایی فاز نیاز به انتخاب پیکسل‌هایی با نسبت سیگنال به نویز بالا می‌باشد که از طریق الگوریتم MCF (Chen et al., 2021) و بارگذاری نقاط کنترل (GCP) انتخاب شده با پراکندگی مناسب و در مناطقی که حداقل توپوگرافی صورت گرفت. نتیجه این مرحله تولید فازهای ناشی از جابجایی‌هایی است که تصحیح اتمسفری نشده‌اند که الگوریتم SBAS از طریق اعمال فیلتر اقدام به تصحیح فاز می‌نماید و بنابراین فازهای باقیمانده فقط ناشی از جابجایی سطح و وارونگی فاز خواهد بود (Ferretti et al., 2000). در مطالعه حاضر از فیلتر گلدستاین مطرح شده توسط گلدستاین^۲ (۱۹۹۸) استفاده شده است. سپس با اعمال روش کمترین مربعات بر روی شبکه، تداخل سنج‌ها تشکیل شده، مقدار جابجایی هر پیکسل محاسبه می‌شود. برای ارزیابی فاز، تعداد N+1 تصویر برداشت شده از منطقه مورد مطالعه در بازه زمانی مورد بررسی در نظر گرفته می‌شود و تداخل سنج‌های مربوط به جفت تصاویر با توجه به گراف تشکیل شده و بررسی خطوط مبنای زمانی و مکانی تشکیل می‌شود. رابطه ۱ تعداد تداخل سنج‌های ممکن (M) را تعیین می‌کند (احمدی و همکاران، ۱۳۹۷).

$$\frac{N+1}{2} \leq M \leq \frac{N+1}{2} \quad \text{رابطه (۱)}$$

فاز تفاضلی برای هر پیکسل هم‌دوس با مختصات (x,r) در تداخل سنج رام که شامل دو تصویر راداری در زمان‌های a و b می‌باشد بصورت رابطه ۲ مشخص می‌شود.

$$\delta\varphi_j^{diff}(x,r) = \varphi(t_b \cdot x,r) - \varphi(t_a \cdot x,r) = \delta\varphi_j^{disp}(x,r) \approx \frac{4\pi}{\lambda} [d(t_b \cdot x,r) - d(t_a \cdot x,r)] \quad \text{رابطه (۲)}$$

که در آن طول موج رادار، $\varphi(t_a \cdot x,r)$ فاز پیکسل در زمان a و $\varphi(t_b \cdot x,r)$ فاز پیکسل در زمان b، $d(t_a \cdot x,r)$ و $d(t_b \cdot x,r)$ جابجایی سطحی در راستای خط دید ماهواره (LOS) به ترتیب در زمان t_a و t_b هستند. رابطه ۳ سیستم ماتریسی M معادله N مجهولی که مقادیر فاز اندازه‌گیری شده را به مقادیر فاز در طول زمان مرتبط می‌کند.

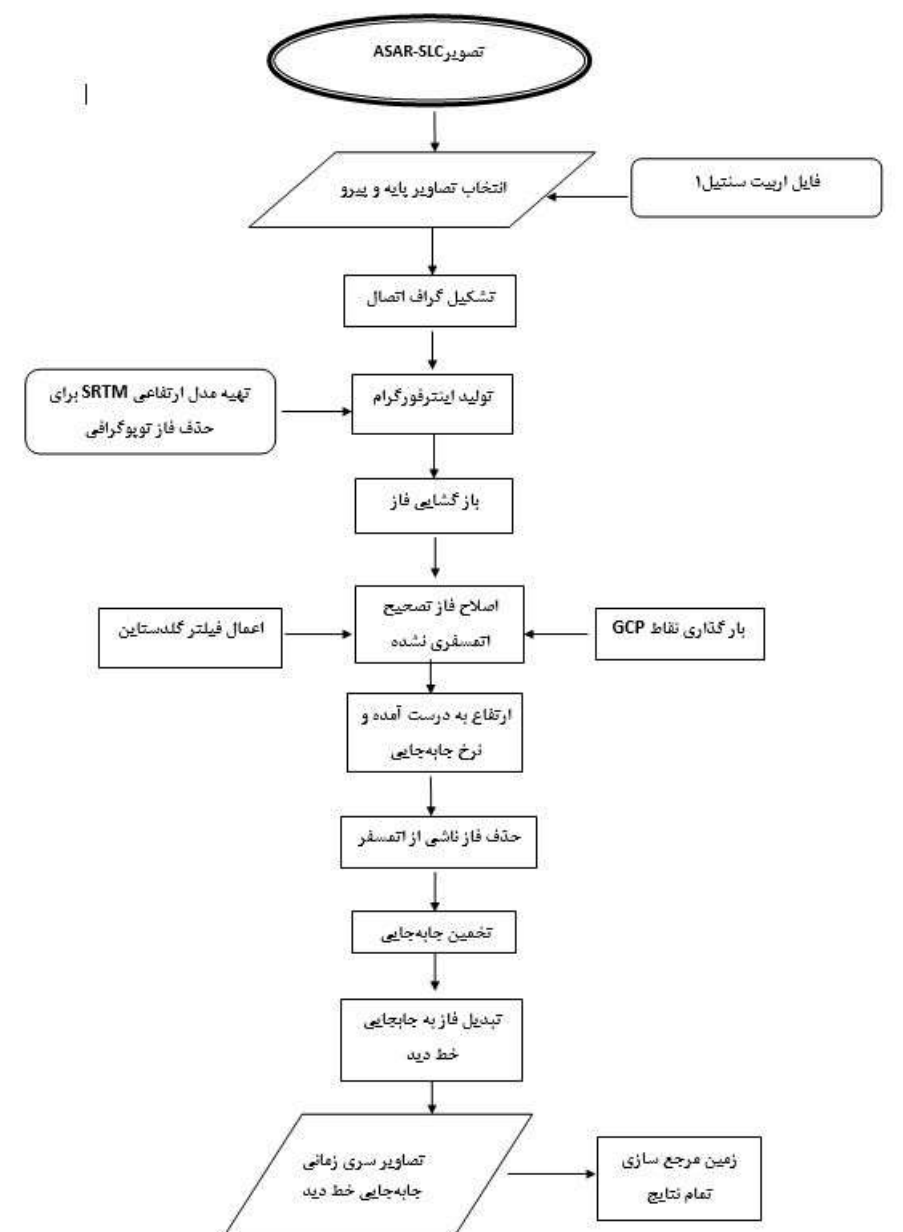
$$A\varphi = \delta\varphi \quad \text{رابطه (۳)}$$

که در رابطه مذکور A ماتریس ضرایب، φ بردار مجهولات (تغییرات فاز در زمان) و $\delta\varphi$ بردار معلومات (مقادیر فاز اندازه‌گیری شده در هر تداخل سنج) را نشان می‌دهد. از معکوس سازی به روش کمترین مربعات، می‌توان سری زمانی فاز و در نهایت نرخ جابجایی را برای هر پیکسل محاسبه کرد.

شکل ۷ روند کلی تکنیک SBAS را نشان می‌دهد.

^۱Minimum cost flow

^۲Goldstein



شکل (۷). روند کلی تکنیک تداخل سنجی SBAS

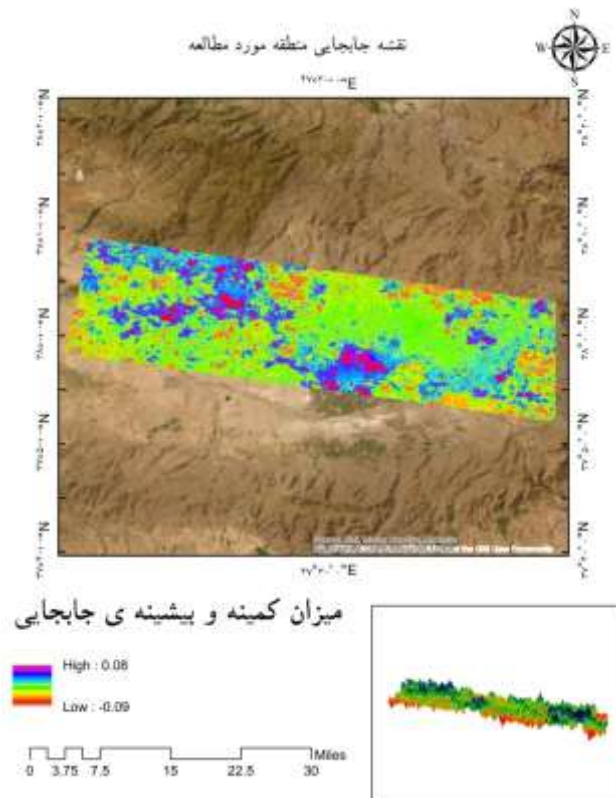
در ادامه پژوهش نقشه‌ی کاربری اراضی منطقه مورد مطالعه با استفاده از تصویر لندست ۸ سال ۲۰۱۸ (جدول ۲)، با اعمال پیش پردازش‌های لازم با استفاده از مدل FLAASH و تکنیک شیء‌گرا جهت بررسی فرونشست در کاربری‌های مختلف استخراج شده است. طبقه‌بندی شیء‌گرا یکی از روش‌های رایج برای طبقه‌بندی تصویر است که در آن علاوه بر ارزش‌های عددی از اطلاعات مربوط به بافت، شکل و تن رنگ در فرآیند طبقه‌بندی استفاده می‌شود. این روش، محدودیت روش پیکسل پایه در شناسایی پدیده‌ها با ارزش‌های عددی یکسان را بر روی تصاویر رقومی را شامل نمی‌شود (کاکه ممی و همکاران، ۱۳۹۹). سگمنت سازی اساس طبقه‌بندی شیء‌گرا محسوب می‌شود و هر چه قدر فرآیند سگمنت سازی با مدنظر قرار دادن پارامترهایی همچون مقیاس، شکل، نرمی و فشردگی با دقت بیشتری صورت بگیرد، مستقیماً در کیفیت طبقه‌بندی تأثیرگذار خواهد بود (سیفی و همکاران، ۱۳۹۸). در مطالعه حاضر روش قطعه‌بندی چند مقیاسه با آزمون و خطای نتایج سگمنت سازی با مقادیر مقیاس، نرمی و فشردگی به ترتیب ۰/۶ و ۰/۴ و ۰/۶۰ در نظر گرفته شده است.

جدول (۲). مشخصات تصویر لندست

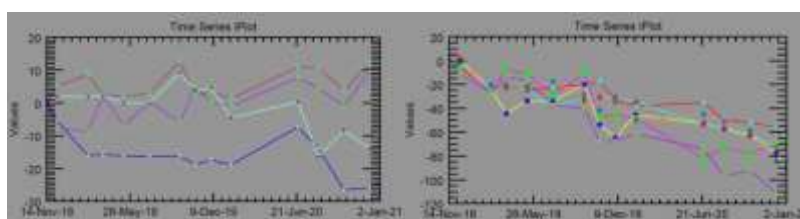
نوع ماهواره	نوع سنجنده	مسیر	گذر	تاریخ
لندست ۸	OLI	۱۶۷	۳۴	۲۰۱۸/۰۹/۰۳

یافته‌ها

شکل ۸ نقشه جابه‌جایی و شکل ۹ نمودارهای مربوط به فرونشست و بالاآمدگی بر حسب میلی‌متر در سال، در منطقه‌ی مورد مطالعه را نشان می‌دهد. قابل ذکر است این نمودارها با مدنظر قرار دادن چند نمونه جهت نمایش در نمودار استخراج شده‌اند. مقادیر منفی نشان دهنده‌ی فرونشست و مقادیر مثبت نشان دهنده‌ی بالاآمدگی می‌باشد. با توجه به یافته‌ها شاهد بالا آمدگی در قسمت‌های شمالی شهر سراب، و پراکندگی فرونشست در مناطق مختلف با مقادیر حداکثر و حداقل ۹ و ۲ سانتی‌متر در سال، در منطقه هستیم. نکته قابل توجه تغییرات بعد از زلزله بزرگ ترکمنچای و حوالی سال ۲۰۲۱ در این منطقه می‌باشد؛ که این موضوع در نمودارها کاملاً مشخص است؛ به طوری که قبل از سال ۲۰۱۹ فرونشست یا بالاآمدگی چشمگیری در منطقه مشاهده نمی‌شود.

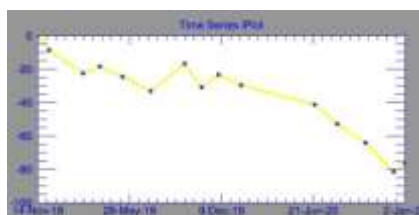


شکل (۸). نقشه ی جابه‌جایی منطقه ی مورد مطالعه



(ب)

(الف)



(ج)

شکل (۹). (الف) نمودار فرونشست چند نقطه نمونه، (ب) نمودار بالا آمدگی چند نقطه نمونه (ج) متوسط نرخ فرونشست منطقه (محورهای عمودی و افقی به ترتیب میزان جابجایی و زمان آن را نشان می‌دهد)

همان‌طور که از نقشه‌ها مشخص است کاربری کشاورزی آبی میزان قابل توجهی از اراضی اطراف شهر سراب را به خود اختصاص داده است، که مستلزم برداشت از سفره‌ی آب‌های زیرزمینی می‌باشد. بیشترین میزان نرخ فرونشست نیز در حوالی کاربری کشاورزی و مرتع نزدیک ۹ سانتی متر در سال که در اطراف خود شهر سراب بارزتر است، مشاهده می‌شود. ایستگاه‌های اسبقران، شورادل و سنزریق واقع در جنوب شرقی سراب از سال ۸۲ تا سال ۹۷ با افت و خیز آب زیرزمینی روبه‌رو هستند ولی در سال ۹۸ کاهش ناگهانی سطح سفره در آنها مشاهده می‌شود. میزان افت آب این ایستگاه‌ها در سال ۹۸ به طور تقریبی نسبت به سال ۹۷ به ترتیب ۹، ۶، ۴ میلیمتر برآورد شده است. ایستگاه‌های رازلیق و سقزچی واقع در قسمت شمالی و جنوب غربی سراب به ترتیب افت ۱۰ و ۴ میلیمتری آب زیرزمینی را در سال ۹۸ نسبت به سال ۹۷ تجربه کرده‌اند. لازم به ذکر است افت مشاهده شده در آب‌های زیرزمینی در ایستگاه‌های مختلف متغیر بوده و از ابتدای سال ۹۸ رخ داده است. به‌طوری‌که در ایستگاه‌های رازلیق، سقزچی و شورادل میزان افت قبل از زلزله آبان و در ایستگاه‌های سنزریق و اسبقران بعد از زلزله رخ داده است. بیشترین میزان افت آب زیرزمینی در ایستگاه اسبقران و تقریباً ۹ میلی متر برآورد شده است؛ در ضمن این ایستگاه نسبت به ایستگاه‌های دیگر به خط گسل و کانون زلزله نزدیکتر است

طبق یافته‌ها افت سطح آب‌های زیرزمینی از سال ۲۰۱۸ و قبل از زلزله بزرگ ترکمنچای قابل مشاهده می‌باشد؛ و از آنجایی که خشک شدن صفحات گسلی که افزایش زاویه اصطکاک داخلی را به دنبال خواهد داشت (الیاسی، ۱۳۸۲)، به طور غیرمستقیم می‌تواند عامل تشدید وقوع زلزله باشد؛ بنابراین افت سطح آب‌های زیرزمینی در وقوع زلزله آبان ۲۰۱۹ نمی‌تواند بی‌تاثیر باشد. به‌طوری‌که خیاطی (۱۳۹۶) در مطالعه‌ای به این موضوع اشاره کرده و افت سطح آب‌های زیرزمینی و خشکی صفحات گسلی را به عنوان محرکی برای برخی از زمین لرزه‌ها مطرح کرده است. از طرفی گسل‌ها بسته به نوعشان تاثیرات مختلفی بر وضعیت آبخوان‌ها دارند و صفحات گسلی و شکستگی‌ها در نفوذ آب‌های جاری و وضعیت فراوانی و کیفیت منابع آب زیرزمینی به طور تعیین کننده‌ای می‌توانند اثر گزار باشند؛ پال و همکاران (۲۰۱۲) نیز بالا بودن زاویه اصطکاک برای سطوح سنگی خشک را مطرح کرده و ورود آب و افزایش فشار منفذی را عامل کاهش مقاومت اصطکاکی و در نتیجه وقوع لغزش دانسته‌اند. بنابراین با توجه به نزدیکی منطقه مورد مطالعه به کانون زلزله حرکات گسلی و تاثیر آن بر افت یا افزایش آب‌های زیرزمینی منطقه دور از

ذهن نمی‌باشد. البته بحث برداشت از سطح سفره‌های زیرزمینی یا افت بوجود آمده در آن، تحت تاثیر عوامل گوناگون از جمله تغییرات اقلیمی و کاهش بارندگی و یا کاهش نفوذ پذیری در اثر تغییرات کاربری بخصوص در کاربری‌های مسکونی و صنعتی و تاثیر آن در فرونشست منطقه غیر قابل انکار است؛ به طوری که عابدینی و همکاران (۱۴۰۰)، شفیی و همکاران (۱۳۹۹) در مطالعات خود به رابطه مستقیم فرونشست و افت سطح آب‌های زیرزمینی اشاره کرده‌اند. اما باید توجه داشت که فرونشست یا بالآمدگی اتفاق افتاده در منطقه بعد از زلزله بزرگ چشمگیرتر است؛ بنابراین هر دو عامل افت سطح آب‌های زیرزمینی و زلزله بزرگ می‌توانند عامل فرونشست منطقه باشند ولی طبق بررسی‌ها، بنظر می‌رسد زلزله ۲۰۱۹ تاثیر گزارتر بوده است.

نتیجه‌گیری

تکنیک تداخل‌سنجی راداری SBAS می‌تواند اطلاعات دقیقی راجع به مخاطره فرونشست در اختیار محققین قرار دهد؛ به طوری که مطالعات متعدد نشان داده است که فن‌آوری SBAS-InSAR از دقت نظارت بالایی برخوردار بوده و نتایج بسیار خوبی را می‌توان در رابطه با فرونشست و سایر بلایای زمین‌شناسی از آن به دست آورد (Zhang et al., 2020). بررسی نقشه‌های پژوهش حاضر نشان دهنده‌ی وقوع پدیده‌ی فرونشست در منطقه‌ی مورد مطالعه می‌باشد که بیشترین نرخ فرونشست با مقدار ۹ سانتی متر در سال در اطراف مناطق کشاورزی و مراتع اتفاق افتاده و متوسط نرخ فرونشست در بازه‌ی زمانی مورد مطالعه حدود ۸۰ میلی‌متر در سال معادل ۸ سانتی‌متر برآورد شده است. همچنین نرخ بالآمدگی ۱۲ سانتی متری در سال در مناطق مختلف محدوده‌ی مورد مطالعه قابل مشاهده می‌باشد. با اینکه بنظر می‌رسد فرونشست رخ داده در منطقه تحت تاثیر افت آب‌های زیرزمینی باشد اما با توجه به نتایج مطالعه حاضر و زمان وقوع فرونشست احتمال اینکه فرونشست رخ داده در منطقه بر اثر زلزله بزرگ آبان ۱۳۹۸ باشد، بیشتر است. نکته مهم و قابل تامل در ارتباط با وضعیت سفره‌ها افت ناگهانی آب‌های زیرزمینی در هر پنج ایستگاه از ابتدای سال ۹۸ نسبت به سال ۹۷ می‌باشد. این مساله یعنی خشکی گسل‌ها و افزایش زاویه اصطکاک خود می‌تواند عامل وقوع یا تشدید زمین لرزه بزرگ ترکمنچای باشد. بنابراین طبق یافته‌ها چهار مورد در مطالعه حاضر قابل توجه است؛ یکی اینکه فرونشست رخ داده در منطقه می‌تواند تحت تاثیر افت آب‌های زیرزمینی باشد؛ مورد دوم زمان جابجایی است که بنظر می‌رسد زلزله در وقوع آن نقش پررنگ‌تری دارد؛ مورد سوم نوسانات سطح سفره‌ها می‌باشد که طبق مطالب ذکر شده می‌تواند بر اثر حرکات صفحات گسلی و تغییر مسیر آبخوان‌ها و الگوی نفوذپذیری باشد؛ مورد چهارم زلزله ۸ نوامبر ۲۰۱۹ ترکمنچای می‌باشد که بعید نیست بر اثر تغییر وضعیت سفره‌ها و افت اتفاق افتاده در آن‌ها باشد؛ که با توجه به بررسی‌ها، بنظر می‌رسد هر چهار مورد می‌تواند در تغییرات اتفاق افتاده در منطقه دخیل باشد؛ اما نیاز است هر کدام از موارد به صورت جداگانه و مفصل مورد بررسی قرار گیرند. قابل ذکر است میزان فرونشست به دست آمده در منطقه نیاز به بررسی توسط کارشناسان و ارائه راهکارهای مناسب کاهش نرخ فرونشست از جمله بهبود وضعیت سفره‌های زیرزمینی و اصلاح روش‌های مدیریت منابع آب، دارد. پیشنهاد می‌شود در مطالعات آینده از تکنیک‌های دیگری نظیر تکنیک پراکنش‌گرهای دائمی در منطقه و یا سایر مناطقی که احتمال وقوع فرونشست در آنها وجود دارد استفاده شود. بررسی عوامل تاثیر گذار در افت آب‌های زیرزمینی پیشنهاد دیگر این مطالعه می‌باشد.

References

- Ahmadi, Naimeh, Mousavi, Zahra, Masoumi, Zohreh. (2018). Study of subsidence of Khoramdreh plain using radar interferometry technique and its risk assessment. *Iranian Journal of Remote Sensing and GIS*, 10(3), 33-52.
- Asghari Saraskanroud, Sayyad, Akhal Naziri, Mehdi, Elnaz, Piroozi. (2018). Zoning of the area of land subsidence risk in the central plain of Alborz province using radar interferometry technique and ARAS multi-criteria analysis algorithm. *Ecohydrology*, 9(2), 353-371.
- Elyasi, Mohsen. (2004). Determination of the internal friction angle of rocks using shear surfaces with slip scratches. *Journal of Sciences of the University of Tehran*, 30(2), 313-299.
- Khayati, Solmaz. (2017). The effect of groundwater depletion on fault activation and earthquake probability. *International Conference on Natural Resources Management in Developing Countries*.
- Rajabi, Masoumeh, Roustaei, Shahram, Javadi, Seyed Mohammad Reza. (2013). Assessment of subsidence in western cities of Hamedan province using radar images. *Scientific Journal of Geography and Planning*, 26(81), 81-96.
- Seifi, Houshang, Ghorbani, Esmaeil. (2019). Estimating snow cover level through object-oriented techniques using OLI and TIRS sensor images - Case study: Sahand Mountain. *Scientific-Research Quarterly Journal of Geographic Information "Sepehr"*, 28(109), 77-91.
- Seifi, Houshang, Feizizadeh, Bakhtiar. (2019). Application of interferometry method and radar remote sensing images in estimating snow depth and water extractable from it in Yamchi watershed. *Iranian Water Resources Research*, 15(1), 341-355.
- Shafiee, Najmeh, Goli Mokhtari, Leila, Amir Ahmadi, Abolghasem, Zandi, Rahman. (1400). Spatial analysis of land subsidence and groundwater depletion using the GWR model (Case study: Noorabad Mamasani aquifer). *Scientific Journal of Geography and Planning*, 25(76), 159-171.
- Sadriki, Mansoureh. (2014). Monitoring land subsidence by time series analysis of permanent scatterers and groundwater level changes; (Case study of Sarab Plain). *Iranian Water Resources Research*, 18(2), 1-18
- Abedini, Moussa, Ebadi, Elhameh, Qale, Ehsan. (2014). Investigation of Mahidasht Plain subsidence in Kermanshah Province using radar interferometry. *Scientific Journal of Geography and Planning*, 26(79), 207-220.
- Kakeh Mami, Azad, Ghorbani, Ardavan, Asghari Saraskanroud, Sayyad, Qale, Ehsan, Ghaffari, Sahar. (2019). Investigation of the relationship between land use changes and land cover Vegetation with ground surface temperature in Namin County. *Remote Sensing and Geographic Information Systems in Natural Resources*, 11(2), 27-48.
- Modirzadeh, Reyhaneh, Emami, Rashed, Asghari Saraskanroud, Sayyad, Rostami, Aref. (1401). Estimating the amount of ground surface displacement during the July 2010 earthquake in northwest Iran - Study area: Qatour city. *Quarterly Journal of Geographic Information "Sepehr"*, 31(122), 207-2019.
- Mohammadkhani, Korosh, Nazif, Samaneh. (1398). Topographic surveys using two and three frequency differential global positioning systems in Tell Takht, Pasargad. *Quarterly Journal of Geographic Information "Sepehr"*, 28(112), 93-107.
- Negahban, Saeed, Ganjaian, Hamid, Saeedi, Shahla, Ghasemi, Afshan. (2019). Study of vertical displacement resulting from the 17/8/98 Turkmanchay earthquake using the InSAR method. *Earth and Space Physics*, 46(3), 445-456.
- Agapiou, A., & Lysandrou, V. (2020). Detecting Displacements within Archaeological Sites in Cyprus

- after a 5.6 Magnitude Scale Earthquake Event through the Hybrid Pluggable Processing Pipeline (HyP3) Cloud-Based System and Sentinel-1 Interferometric Synthetic Aperture Radar (InSAR) Analysis. *IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing*, 13, 6115–6123. <https://doi.org/10.1109/JSTARS.2020.3028272>
- Bui, L. K., Le, P. V. V., Dao, P. D., Long, N. Q., Pham, H. V., Tran, H. H., & Xie, L. (2021). Recent land deformation detected by Sentinel-1A InSAR data (2016–2020) over Hanoi, Vietnam, and the relationship with groundwater level change. *GIScience and Remote Sensing*, 58(2), 161–179. <https://doi.org/10.1080/15481603.2020.1868198>
- Berardino, P.; Fornaro, G.; Lanari, R.; Sansosti, E. 2002. A new algorithm for surface deformation monitoring based on small baseline differential SAR interferograms. *IEEE Trans. Geosci. Remote Sens.*, 40, 2375–2383.
- Babu, A., & Kumar, S. (2019). SBAS interferometric analysis for volcanic eruption of Hawaii island. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 370, 31–50. <https://doi.org/10.1016/j.jvolgeores.2019.01.011>
- Ceccatelli, M., Del Soldato, M., Solari, L., Fanti, R., Mannori, G., & Castelli, F. (2021). Numerical modelling of land subsidence related to groundwater withdrawal in the Firenze-Prato-Pistoia basin (central Italy). *Hydrogeology Journal*, 29(2), 629–649. <https://doi.org/10.1007/s10040-020-02255-2>
- Chen, Y., Yu, S., Tao, Q., Liu, G., Wang, L., & Wang, F. (2021). Accuracy Verification and Correction of D-InSAR and SABAS in Monitoring Surface Subsidence, Shandong University of Science and Technology 13(21), 4365; <https://doi.org/10.3390/rs13214365>
- Declercq, P. Y., Gérard, P., Pirard, E., Walstra, J., & Devleeschouwer, X. (2021). Long-term subsidence monitoring of the alluvial plain of the scheldt river in antwerp (Belgium) using radar interferometry. *Remote Sensing*, 13(6). <https://doi.org/10.3390/rs13061160>
- Dehghani, M., Zojj, M. J. V., Saatchi, S., Biggs, J., Parsons, B., & Wright, T. (2009). Radar interferometry time series analysis of Mashhad subsidence. *Journal of the Indian Society of Remote Sensing*, 37(1), 147–156. <https://doi.org/10.1007/s12524-009-0006-x>
- Ferretti, A., Prati, C., & Rocca, F. (2001). Permanent scatterers in SAR interferometry. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 39(1), 8–20. <https://doi.org/10.1109/36.898661>
- Goldstein, M., and Werner, L. 1998. Radar interferogram filtering for geophysical applications. *Geophysical Research Letters*, 25: 21. 4035-4038.
- Galloway, D. L., & Burbey, T. J. (2011). Review: Regional land subsidence accompanying groundwater extraction. *Hydrogeology Journal*, 19(8), 1459–1486. <https://doi.org/10.1007/s10040-011-0775-5>
- Holzer, T. L., & Galloway, D. L. (2007). Impacts of land subsidence caused by withdrawal of underground fluids in the United States. *Humans as Geologic Agents*. [https://doi.org/10.1130/2005.4016\(08\)](https://doi.org/10.1130/2005.4016(08))
- Pan, S. T., Cheng, Y. Y. and Lin, C. H., 2019, Extrication time and earthquake-related mortality in the 2016 Taiwan earthquake, *Journal of the Formosan Medical Association*, 118(11), 1504-1514.
- Pal, S., Kaynia, A., Bhasin, R., & Paul, D. (2011) Earthquake Stability Analysis of Rock Slopes: a Case Study. *Rock Mechanics and Rock Engineering*, 45, 205-2012
- Pawluszek-Filipiak, K., & Borkowski, A. (2020). Integration of DInSAR and SBAS techniques to determine mining-related deformations using Sentinel-1 data: The case study of rydułtowy mine in Poland. *Remote Sensing*, 12(2). <https://doi.org/10.3390/rs12020242>
- Ranjgar, B., Razavi-Termeh, S. V., Foroughnia, F., Sadeghi-Niaraki, A., & Perissin, D. (2021). Land subsidence susceptibility mapping using persistent scatterer SAR interferometry technique and

optimized hybrid machine learning algorithms. *Remote Sensing*, 13(7).
<https://doi.org/10.3390/rs13071326>

Shi, X., Jiang, S., Xu, H., Jiang, F., He, Z., & Wu, J. (2016). The effects of artificial recharge of groundwater on controlling land subsidence and its influence on groundwater quality and aquifer energy storage in Shanghai, China. *Environmental Earth Sciences*, 75(3), 1–18.
<https://doi.org/10.1007/s12665-015-5019-x>

Tapete, D., Fanti, R., Cecchi, R., Petrangeli, P., & Casagli, N. (2012). Satellite radar interferometry for monitoring and early-stage warning of structural instability in archaeological sites. *Journal of Geophysics and Engineering*, 9(4). <https://doi.org/10.1088/1742-2132/9/4/S10>

Zhao, F.; Meng, X.; Zhang, Y.; Chen, G.; Su, X.; Yue, D. 2019. Landslide Susceptibility Mapping of Karakorum Highway Combined with the Application of SBAS-InSAR Technology. *Sensors*, 19, 2685.

Zhang, M.; Ge, Y.; Xue, Y.; Zhao, J. Identification of geomorphological hazards in an underground coal mining area based on an improved region merging watershed algorithm. *Arab. J. Geosci.* 2020, 13.