



Identification of high-risk areas and ground fissures caused by land subsidence using the estimation of horizontal displacement components and subsidence gradient maps, case study: Kashan plain subsidence

Masoom Amighpey^{1✉} | Siyavash Arabi² | Fateme Ghoraiyan³

1. Corresponding Author, Land Surveying Department, National Cartographic Center of Iran, email: amighpey@yahoo.com

2. Land Surveying Department, National Cartographic Center of Iran, email: arabi.siyavash@gmail.com

3. Land Surveying Department, National Cartographic Center of Iran, email: ghoraiyanfateme@gmail.com

Article Info

Article type: Research Article

Article history:

Received: Nov. 12, 2024

Revised: Feb. 4, 2025

Accepted: Feb. 11, 2025

Published online: May. 2025

Keywords:

Interferometric Synthetic Radar,
Earth Subsidence,
Gradient of Vertical
Displacement,
Earth Surface Deformation Field.

ABSTRACT

Earth surface subsidence due to the over-extraction of underground water resources is considered a global crisis, which causes serious economic damage and threatens the safety of the residents of these areas. One of the most important subsidence risks is the formation and development of ground fissures. Identifying areas with surface ruptures can play a significant role in risk management and assessing, strengthening, and improving the structures located in these areas. The ground ruptures in the Kashan Plain are a clear example of surface ruptures caused by excessive extraction of underground water resources and land subsidence. Since horizontal displacements have also occurred in ruptures caused by land subsidence, estimating the horizontal component of subsidence can help locate the places where ruptures are formed. On the other hand, fissures occur in areas with asymmetric subsidence due to the change in the slope of the bedrock. Therefore, determination of the vertical displacement gradient can lead to the identification of places with high changes in the displacement rate and, as a result, the places where cracks are created. In this research, for the first time, the horizontal displacement component and the subsidence gradient map for Kashan Plain, obtained from the radar interferometry measurements. These maps are applied to identify the probable places of ruptures. Field visits have shown that the location of the ruptures is consistent with places with horizontal displacement and high subsidence gradients.

Cite this article: Amighpey, A., Arabi, S., & Ghoraiyan, F., (2025) Identification of high-risk areas and ground fissures caused by land subsidence using the estimation of horizontal displacement components and subsidence gradient maps, case study: Kashan plain subsidence, *Iranian Journal of Soil and Water Research*, 56 (3), 771-784.
<https://doi.org/10.22059/ijswr.2025.385160.669836>

© The Author(s).

Publisher: The University of Tehran Press.



DOI: <https://doi.org/10.22059/ijswr.2025.385160.669836>

EXTENDED ABSTRACT

Introduction

Earth surface subsidence is a gradual decrease in the height of the earth's surface due to human intervention, such as over-extraction of underground water, oil and gas extraction, mining activities, or as a result of tectonic phenomena, which can have a small horizontal displacement vector. Due to the lack of sustainable management of underground water resources, various regions in the world have faced widespread subsidence. One of the most important dangers of the subsidence phenomenon is the formation and development of ground fissures. Therefore, identifying the location of these fissures caused by subsidence is considered a key issue in urban management.

In Iran, the over-extraction of underground water resources and the global consequences of climate change have caused land subsidence in many areas of the country. As an example, Kashan Plain is a prominent example of subsidence areas with numerous cracks.

In this research, the displacement field obtained from the radar interferometric technique and its gradient are applied to predict ground fissures formed due to the subsidence of the Kashan Plain and to identify areas prone to creating future fissures. This analysis can be applied to identify and reduce damage to surface and subsurface structures in subsidence areas.

Method

In this research, the ground surface displacement field in Kashan plain is determined by processing Sentinel-1 satellite radar images with GMTSAR software. Consequently, the area affected by the subsidence phenomenon in Kashan plain has been identified and evaluated. To estimate the horizontal and vertical components of the displacement caused by the subsidence in the Kashan plain, 30 Sentinel-1 radar images of the area from the ascending orbit and 30 radar images of the area from the descending orbit from December 2020 to December 2022 obtained from the European Space Center. These images are processed with GMTSAR software.

On the other hand, since the areas with asymmetric subsidence are more prone to form cracks and sinkholes and damage to the surface and subsurface structures, in order to prepare the subsidence risk map, the land subsidence gradient map in Kashan plain was calculated.

Results and Discussion

The results show the areas with maximum horizontal displacement and maximum vertical displacement gradient are matched. A field visit to the subsidence area showed the creation of wide interconnected cracks and sinkholes in the areas with maximum horizontal displacement and a displacement gradient of more than 10%.

Therefore, it can be concluded that the gradient of vertical displacement and horizontal displacement determination can provide us with a map of high-risk areas of subsidence in terms of forming cracks on the surface and structures. Therefore, it is suggested to calculate these hazard maps for all subsidence areas in order to speed up the process of reviewing and consolidating local facilities and structures.

Author Contributions

All authors contributed equally to the conceptualization of the article and writing of the original and subsequent drafts.

Data Availability Statement

Data available on request from the authors.

Acknowledgements

The authors would like to thank the reviewers and editor for their critical comments that helped to improve the paper. The authors gratefully acknowledge the support and facilities provided by the National cartographic center of Iran.

Ethical considerations

The authors avoided data fabrication, falsification, plagiarism, and misconduct.

Conflict of interest

The author declares no conflict of interest.

شناسایی موقعیت مناطق پر مخاطره و شکاف‌های زمین ناشی از فرونشست با استفاده از برآورد مولفه مسطحاتی جابجایی و نقشه گرادیان فرونشست، مطالعه موردی: فرونشست دشت کاشان

معصومه آمیغ پی^۱ | سیاوش عربی^۲ | فاطمه قرائیان^۳۱. اداره کل نقشه‌برداری زمینی، سازمان نقشه‌برداری کشور، تهران، ایران. رایانامه: amighpey@yahoo.com۲. اداره کل نقشه‌برداری زمینی، سازمان نقشه‌برداری کشور، تهران، ایران. رایانامه: arabi.siavash@gmail.com۳. اداره کل نقشه‌برداری زمینی، سازمان نقشه‌برداری کشور، تهران، ایران. رایانامه: ghoraiyanfatemeh@gmail.com

اطلاعات مقاله	چکیده
نوع مقاله: مقاله پژوهشی	فرونشست سطح زمین در اثر استخراج بی‌رویه منابع آب زیرزمینی بحرانی جهانی محسوب می‌شود که موجب خسارت اقتصادی جدی و تهدید امنیت ساکنین این مناطق می‌شود. یکی از مهم‌ترین مخاطرات فرونشست ایجاد و گسترش شکاف در سطح زمین می‌باشد. شناسایی مناطق دچار گسیختگی سطحی می‌تواند کمک قابل‌توجهی در مدیریت ریسک این مناطق و بررسی و تحکیم و بهسازی سازه‌های واقع در این مناطق داشته باشد. شکاف‌های دشت کاشان نمونه بارزی از گسیختگی‌های سطحی ناشی از برداشت بی‌رویه از منابع آب زیرزمینی و فرونشست زمین می‌باشد. از آنجایی که در شکاف‌های ناشی از فرونشست زمین جابجایی مسطحاتی نیز اتفاق افتاده است، برآورد مؤلفه مسطحاتی فرونشست می‌تواند به مکان‌یابی محل ایجاد شکاف‌ها کمک کند. از دیگر سو، شکاف‌ها در مناطق دارای فرونشست نامتقارن، در اثر تغییر شیب سنگ‌بستر اتفاق می‌فتند. بنابراین برآورد گرادیان جابجایی قائم می‌تواند به شناسایی مکان‌های دارای تغییرات بالای نرخ جابجایی و در نتیجه محل‌های ایجاد شکاف منجر شود. در این تحقیق برای اولین بار با استفاده از میدان جابجایی اندازه‌گیری شده با تکنیک تداخل سنجی راداری، نقشه مؤلفه مسطحاتی جابجایی منطقه و نقشه گرادیان فرونشست دشت کاشان محاسبه شده و بر اساس این دو نقشه، مکان‌های محتمل ایجاد شکاف و گسیختگی در مناطق با جابجایی مسطحاتی بیش از یک سانتی‌متر در سال و نواحی با گرادیان فرونشست بیش از ۱۰ درصد شناسایی شد. همچنین بازدهی‌های میدانی نشان‌دهنده تطابق محل شکاف‌های ایجاد شده با مکان‌های دارای جابجایی مسطحاتی و گرادیان بالای فرونشست بوده است.
واژه‌های کلیدی:	
تداخل سنجی راداری،	
فرونشست زمین،	
گرادیان جابجایی قائم،	
میدان جابجایی سطحی زمین.	

استناد: آمیغ پی، معصومه، عربی، سیاوش، قرائیان؛ فاطمه، (۱۴۰۴) شناسایی موقعیت مناطق پر مخاطره و شکاف‌های زمین ناشی از فرونشست با استفاده از برآورد مولفه مسطحاتی جابجایی و نقشه گرادیان فرونشست، مطالعه موردی: فرونشست دشت کاشان، مجله تحقیقات آب و خاک ایران، ۵۶ (۳)، ۷۷۱-۷۸۴.

<https://doi.org/10.22059/ijswr.2025.385160.669836>

© نویسندگان.

ناشر: مؤسسه انتشارات دانشگاه تهران.

DOI: <https://doi.org/10.22059/ijswr.2025.385160.669836>

مقدمه

فرونشست سطح زمین، کاهش تدریجی ارتفاعی سطح زمین در اثر دخالت‌های انسانی مانند استخراج بی‌رویه آب زیرزمینی، استخراج نفت و گاز، فعالیت‌های معدنی و یا در اثر پدیده‌های تکنیکی می‌باشد که می‌تواند دارای بردار جابجایی افقی اندک باشد (Marker, 2013). به علت عدم مدیریت پایدار منابع آب زیرزمینی، مناطق مختلفی از جهان با فرونشست‌های گسترده مواجه شده است. پایش کمی گستره فرونشست می‌تواند نقش مؤثری در شناخت و کنترل فرونشست داشته باشد. اولین گزارش فرونشست در جهان با استفاده از تکرار مشاهدات ترازبایی دقیق در منطقه الوی منتشر شد (Robinson and Peterson, 1962). پس از آن تلاش‌های گسترده‌ای به منظور اندازه‌گیری نرخ و گستره فرونشست توسط مشاهدات ژئودتیکی همچون ترازبایی دقیق، GPS و تداخل سنجی راداری انجام شده است (Amelung et al., 1999; Hoffmann et al., 2003; Amighpey et al., 2008; Motagh et al., 2008; Galloway and Hoffmann, 2007; Dehghani et al., 2009; Higgins et al., 2014; Amighpey et al., 2016; Amighpey et al., 2023).

مخاطرات پدیده فرونشست ابعاد گسترده‌ای دارد که مهم‌ترین آن‌ها تخریب سیستم‌های آبیاری و خاک‌های حاصلخیز کشاورزی و تخریب آبخوان می‌باشد. از دیگر سو تغییر ناهمسان در ارتفاع و شیب زمین و کاهش بازدهی یا ایجاد تخریب در جریان‌های حیاتی و سازه‌های مهم، از دیگر آثار زیان‌بار فرونشست می‌باشد (Galloway et al., 2008). خسارت‌های ناشی از شکاف‌های زمین ترمیم‌ناپذیر، پرهزینه و مخرب می‌باشند. لذا شناسایی محل ایجاد شکاف‌ها و فروچاله‌های ناشی از فرونشست و شناسایی سازه‌های زیرسطحی و رو سطحی در معرض خطر امری کلیدی در مدیریت شهری محسوب می‌شود.

گزارش‌های متعدد بیانگر آن است که فرونشست زمین منجر به شکاف‌های گسترده‌ای در سطح زمین شده است. نخستین شکاف شناسایی شده ناشی از افت آب زیرزمینی و فرونشست در سال ۱۹۵۰ در آریزونا بوده است (Carpenter 1999). پس از آن، گسیختگی‌های زمینی مرتبط با فرونشست زمین ناشی از برداشت بی‌رویه آب‌های زیرزمینی در بسیاری از حوضه‌های آبرفتی در مناطق نیمه‌خشک و خشک از اواخر دهه ۱۹۷۰ گزارش شده است. این موارد در جنوب غرب آمریکا، مکزیک مرکزی، ایران، عربستان سعودی، پاکستان و چین گزارش شده است (Holzer et al., 1979; Bankher and Al-Harthia, 1999; Holzer and Galloway, 2007; Pacheco et al., 2006; Shi et al., 2007; Wang et al., 2009; Ziaie et al., 2009; Khan et al., 2013; Mahmoudpour et al., 2013; Carreon-Freyre et al., 2016; He et al., 2017). گسترش شکاف‌ها هم در مناطقی که از منابع طبیعی بهره‌برداری بی‌رویه می‌شود و هم در امتداد مرزهای منطقه مشاهده شده است.

فرونشست زمین می‌تواند در مناطقی که اختلاف فشردگی ایجاد شده است، موجب ایجاد شکاف در زمین شود (Conway, 2015). به‌عنوان نمونه، در آریزونا بیش از ۲۵۱ کیلومتر شکاف‌های سطحی ایجاد شده است. برخی از این شکاف‌ها به خطوط لوله، بزرگراه‌ها، جاده‌ها، راه‌آهن، سازه‌های کنترل سیل و خانه‌ها آسیب رسانده است (Conway, 2015). مکان‌هایی که با فرونشست نامتقارن روبرو می‌باشد، می‌تواند به‌عنوان مکان‌های پرمخاطره فرونشست از حیث آسیب به سازه‌های محل و ایجاد شکاف مطرح شود. لذا شناسایی این مناطق می‌تواند گام مؤثری در مدیریت مخاطرات ناشی از فرونشست و اعمال سیاست‌های تحکیم سازه و تهیه نقشه ریسک باشد.

تراکم، شکل، طول، میزان بازشدگی، عمق و جابجایی شکاف‌ها از محل به محل دیگر بسیار متفاوت است و عمدتاً به تغییرات سنگ چینه‌شناسی زیرخاک مربوط می‌شود. در برخی موارد تنها چند شکاف پراکنده ایجاد شده است و در برخی موارد شکاف‌های متعدد مشاهده شده است. در برخی موارد شکاف‌هایی با جابجایی عمودی بیش از ۲ متر دیده شده است که بیش از ۱۵ کیلومتر طول، ۱-۲ متر عرض و ۱۵-۲۰ متر عمق دارند. همچنین در این موارد، آسیب‌های اقتصادی، اجتماعی و زیست‌محیطی قابل توجهی گزارش شده است. این خسارت‌ها شامل گسیختگی محفظه‌های گمانه، لوله‌ها و کانال‌هایی است که برای برداشت آب‌های زیرزمینی و انتقال آب، نفت و گاز استفاده می‌شوند. این آسیب‌ها هم در زمین‌های کشاورزی مناطق روستایی و هم در مناطق شهری اتفاق افتاده است (Conway, 2015).

طبق نتایج به‌دست‌آمده از بسیاری از مطالعات، گسترش شکاف‌های زمین در مناطق فرونشست تحت تأثیر عوامل مختلفی مانند تغییرات سنگ‌بستر، ناهمگونی لایه‌های کواترنر، برداشت بیش‌ازحد از آب‌های زیرزمینی و فرونشست نامتقارن زمین قرار دارد (Wu and Yang et al., 2022; Zhang, 2003; Zhao and Li, 2009; Yang, 2022; Yuan and Zhang, 2019). نشان‌دادند که روند تغییر شکل سطح زمین در تطابق خوبی با تغییرات سنگ‌بستر می‌باشد. همچنین آن‌ها دریافتند که گرادیان نرخ فرونشست در هر دو طرف شکاف‌های ناشی از فرونشست به‌طور قابل توجهی تغییر کرده است.

در ایران نیز عدم سازگاری با اقلیم کشور و برداشت بی‌برنامه از منابع آب زیرزمینی از یک‌سو و پیامدهای جهانی تغییر اقلیم از دیگر سو

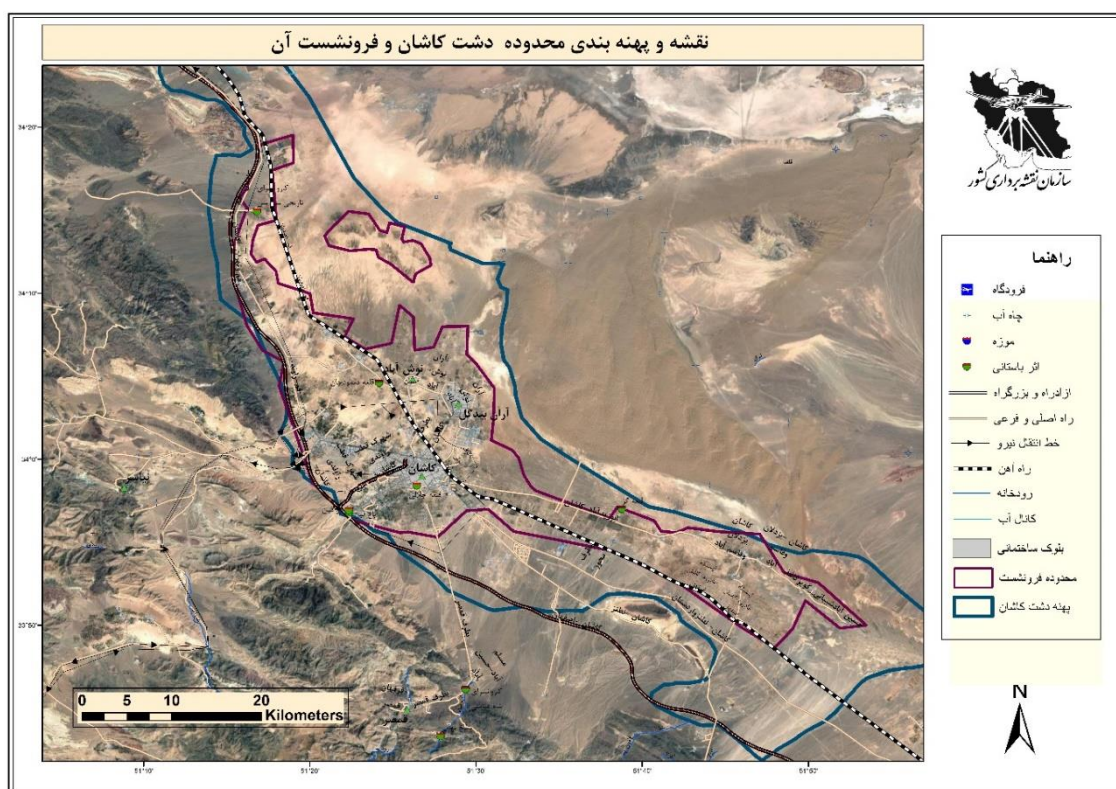
موجب فرونشست زمین در مناطق متعددی از کشور شده است (آمیغ پی و عربی، ۱۴۰۲). شناسایی مناطق فرونشست و طبقه‌بندی آن‌ها از لحاظ وسعت و نرخ جابجایی نخستین گام در جهت مدیریت این مخاطره می‌باشد.

دشت کاشان، یکی از دشتهای کشاورزی ایران است که در اثر استخراج بی‌رویه منابع آب زیرزمینی دچار فرونشست زمین شده است (آمیغ پی و عربی، ۱۴۰۲). از دیگر سو، در این دشت در اثر فرونشست زمین شکاف و گسیختگی‌های سطحی بلند و متعددی گزارش شده است (قاضی فرد و همکاران، ۱۳۹۰؛ فتحی و بیدگلی، ۱۴۰۰). قاضی فرد و همکاران (۱۳۹۰) با استفاده از نقشه فرونشست و بررسی‌های چاههای اکتشافی ژئوفیزیکی و بررسی افت سطح آب چاههای پی‌زومتری به این نتیجه رسیدند که در اثر افت سطح آب زیرزمینی در منطقه، فرونشست و تراکم عمودی متفاوت ایجاد شده است و تغییرات ضخامت رسوبات به دلیل آنومالی‌های سنگ‌بستر مهمترین دلیل ایجاد تراکم متفاوت و شکل‌گیری شکاف در دشت کاشان است. فتحی و نوریان (۱۴۰۰) با مدلسازی آب زیرزمینی میزان نشست ۱۵ سال اخیر را تخمین زده‌اند. نتایج این مطالعه نشان می‌دهد که نشست در منطقه

مورد مطالعه، هم از نظر مقدار و هم از نظر وسعت روند افزایشی دارد. در این تحقیق از میدان جابجایی به‌دست‌آمده از تکنیک تداخل سنجی راداری و نقشه‌گردایان آن برای پیش‌بینی شکاف‌های ایجادشده ناشی از فرونشست دشت کاشان و شناسایی مناطق مستعد ایجاد شکاف‌های آینده استفاده شده است. از این تحلیل می‌توان برای کمک به شناسایی و کاهش آسیب به سازه‌های سطحی و زیرسطحی مناطق فرونشست بهره برد.

فرونشست دشت کاشان و شکاف‌های آن

دشت کاشان یکی از مناطق مهم فلات مرکزی ایران محسوب می‌شود (شکل ۱). این دشت، با امتداد شمال غربی-جنوب شرقی می‌باشد. عرض این دشت در حدود ۲۰ کیلومتر بوده که در شمال به دشت قم و در جنوب به ارتفاعات مجاور منطقه نطنز و از غرب به ارتفاعات و از شرق به محدوده دریاچه نمک محدود شده است. دشت کاشان به دلیل اقلیم خشک فاقد رودخانه‌های بزرگ و دائمی است و تنها چندین رودخانه فصلی در آن جریان دارد. بنابراین آب زیرزمینی مهم‌ترین منبع آب در دشت کاشان محسوب شده که برای مصارف شرب، کشاورزی، صنعت و سایر نیازها استفاده می‌شود. طبق اعلان وزارت نیرو، آبخوان منطقه از نوع ممنوعه بحرانی می‌باشد. دشت کاشان از غرب و تا حدودی جنوب به مناطق کوهستانی (که از منابع اصلی تغذیه آبخوان محسوب می‌شود) و در شرق و شمال شرق به دامنه‌های تپه‌ماهوری با رسوبات ریزدانه محصور می‌شود.



شکل ۱. نقشه موقعیت دشت کاشان و محدوده فرونشست آن

مصرف بی‌رویه و مدیریت نشده منابع آب سطحی و زیرزمینی، کاهش نزولات جوی، الگوی کشت نامناسب و عدم آبیاری صحیح، حفر چاههای متعدد و بهره‌برداری بدون مجوز آن‌ها در چند دهه گذشته باعث بحرانی شدن وضعیت منابع آب زیرزمینی در اکثر دشتهای کشور شده است. استخراج بی‌رویه منابع آب زیرزمینی، موجب معضل فراگیر پدیده فرونشست زمین در اکثر دشتهای کشاورزی ایران شده است. دشت کاشان هم از جمله مناطقی است که به علت کاهش سطح تراز آب زیرزمینی ناشی از اضافه برداشت و البته خشکسالی، دچار فرونشست زمین شده است. شواهد میدانی نشان داده است که در برخی از مناطق دشت کاشان شکاف‌های کوچک و بزرگی در سطح زمین ایجاد شده است.

شکاف‌های زمین ترک‌های کششی هستند که در مناطق دارای تغییر نرخ فرونشست ایجاد می‌شوند. تغییرات نرخ معمولاً در نزدیک مناطق با سنگ‌بستر کم‌عمق اتفاق می‌افتد. شکاف‌های زمین به‌صورت ترک‌های باریک زیرسطحی توسعه پیدا می‌کنند. برخی از این ترک‌ها ممکن است به سطح زمین برسند و برخی ممکن است به‌صورت پنهان زیرسطحی بمانند. شکاف‌های زمین معمولاً بعد از بارندگی‌های شدید مشخص می‌شوند. در این زمان ترک‌های باریک مانع رواناب سطحی شده منجر به فرسایش می‌شوند. در این زمان، شکاف زمین باز می‌شود و شکاف گالی ایجاد می‌شود (Conway, 2015). یک شکاف گالی می‌تواند عرضی بیش از ۳ متر و عمقی بیش از ۱۰ متر داشته باشد (شکل ۲).



شکل ۲. نمونه شکاف گالی ایجاد شده در منطقه فرونشست دشت کاشان

مناطق شهری به دلیل تراکم جمعیت، ساختمان‌ها و جریان‌های حیاتی به‌طور ویژه آسیب‌پذیرتر می‌باشند. این پدیده می‌تواند به خیابان‌ها، پل‌ها و بزرگراه‌ها و راه‌آهن آسیب‌زده و خطوط آب‌رسانی، گاز، نفت و فاضلاب را مختل کرده و به پی ساختمان‌ها آسیب رسانده، موجب ترک در آن‌ها گردد. در این حالت سازه‌هایی که وسعت زیادتر و ارتفاع بیشتری دارند آسیب‌پذیرترند. به‌عنوان نمونه خطوط راه‌آهن، سدهای خاکی، تصفیه‌خانه‌ها و کانال‌ها از آسیب‌پذیری زیادتری برخوردار هستند. به‌طور کلی هر سازه‌ای که در مسیر شکل‌گیری شکاف یا فرو چاله واقع شده باشد، در معرض آسیب بیشتری قرار دارد. لذا پیش‌بینی محل ایجاد شکاف‌ها و درز ناشی از فرونشست زمین می‌تواند کمک شایانی به مدیریت ریسک این مناطق داشته باشد.

پایش میدان جابجایی سطحی زمین

بررسی کمی تغییرات سطح زمین، نقش کلیدی در شناخت و مهار پدیده فرونشست را دارد. بدین منظور در دهه‌های اخیر، تلاش گسترده‌ای به‌منظور اندازه‌گیری تغییرات پوسته زمین توسط تکنیک‌هایی مانند تداخل سنجی راداری، ترازبایی دقیق و GPS انجام شده است. اولین اندازه‌گیری کمی و آشکارسازی عددی فرونشست در ایران، با تکرار مشاهدات شبکه ترازبایی درجه یک ایران و محاسبه تغییر ارتفاعی ایستگاه‌های ترازبایی انجام شده است (Amighpey et al., 2008). در این تحقیق، فرونشست ۴۴ پهنه از استان‌های مختلف کشور محاسبه و شناسایی شده که اولین گزارش و اندازه‌گیری کمی فرونشست در ایران محسوب می‌شود. از دیگر مشاهدات ژئودتیک بررسی جابجایی سطحی زمین در کشور، مشاهدات GPS ایستگاه‌های دائمی ژئودینامیک می‌باشد که فرونشست را در مکان ایستگاه‌های مناطقی همچون

توس، نیشابور، کاشمر، کرمان و یزد آشکارسازی و اندازه‌گیری نموده است.

از دیگر سو، امروزه تکنیک تداخل سنجی راداری به‌عنوان یک تکنیک متداول برای اندازه‌گیری تغییر شکل سطحی پوسته زمین مطرح شده است. پوشش سراسری و قدرت تفکیک مکانی بالای تصاویر راداری و دقت قابل قبول این روش، این تکنیک را به‌عنوان ابزار نیرومندی برای مطالعه پدیده‌های مختلف زمین‌شناسی همچون زلزله، فرونشست، زمین‌لغزش و ... مطرح کرده است. تکنیک تداخل سنجی راداری جابجایی سطح زمین را با قدرت تفکیک مکانی چند متر در منطقه‌ای به وسعت بیش از ۴۰۰۰۰ کیلومتر مربع با دقت زیر سانتی‌متر اندازه‌گیری می‌کند. با به‌کارگیری انواع مشاهدات ژئودتیک شامل: مشاهدات ترازیبی دقیق، مشاهدات GPS ایستگاه‌های دائمی ژئودینامیک و تکنیک تداخل سنجی راداری (Amighpey and Arabi, 2024) نقشه جامع فرونشست ایران را محاسبه و ارزیابی نمودند.

یکی از محدودیت‌های تکنیک تداخل سنجی راداری اندازه‌گیری مقدار جابجایی در راستای خط دید ماهواره است. با در اختیار داشتن سه اینترفراگرام در هندسه‌های تصویربرداری متفاوت می‌توان به سه مؤلفه جابجایی سطح زمین رسید. غالباً تعیین مؤلفه شمالی جابجایی با استفاده از داده‌های ماهواره‌های با مدارهای قطبی با مشکل مواجه است، ولی یک ماهواره با زاویه میل حدود $60/12^\circ$ قادر است هر سه مؤلفه میدان جابجایی را تعیین کند.

(Wright et al., 2004) سعی کردند تا میدان جابجایی ۳ بعدی ناشی از زلزله ۲۰۰۲ نمانتین آلاسکا را با استفاده از چند اینترفراگرام در هندسه‌های متفاوت به دست آورند. این زلزله اولین زلزله‌ای بود که برای آن ۴ اینترفراگرام با هندسه تصویربرداری متفاوت وجود داشت. خطای مؤلفه شمالی بزرگتر از سیگنال بود، ولی آن‌ها توانستند مؤلفه‌های شرقی و شمالی جابجایی را به دست آورند. اگر $\hat{p}$ بردار سطری واحد (p_x, p_y, p_z) باشد که مؤلفه‌های بردار مشاهده از زمین به ماهواره را در یک سیستم مرجع محلی شرقی، شمالی، قائم نشان می‌دهد، تغییر برد مشاهده‌شده: r برحسب متر با رابطه (۱) به دست می‌آید:

$$[u_n \sin \theta - u_e \cos \theta] \sin i + u_i \cos i + \delta_r = r \quad (\text{رابطه ۱})$$

که در این رابطه θ زاویه آزیموت مدار ماهواره بر حسب درجه، i زاویه برخورد ماهواره در سطح زمین بر حسب درجه و δ_r خطای مشاهده (مثلاً در اثر عدم دسترسی به اطلاعات مداری دقیق، تأخیر اتمسفری، نا وابستگی فاز تصاویر، و مدل رقومی زمین نادرست) است. بنابراین داریم:

$$r = -\hat{p}u + \delta_r \quad (\text{رابطه ۲})$$

که در این معادله u بردار ستونی $(u_x, u_y, u_z)^T$ برحسب متر است که شامل مؤلفه‌های جابجایی در همان سیستم مختصات مرجع محلی می‌باشد.

در حالتی که بردار سرعت تغییر شکل زمین در دو راستای مسیر بالا گذر و مسیر پایین‌گذر را در اختیار داریم، برای هر پیکسل روی زمین دو مشاهده وجود دارد: دو بردار سرعت تغییر شکل زمین در راستای خط دید ماهواره مربوط به اینترفراگرام‌های بالا گذر و پایین‌گذر. این مشاهدات را با ماتریس R نشان می‌دهیم که $R = (r_1, r_2, r_3, r_4)^T$ ، که r_i جابجایی در جهت خط دید ماهواره برای جهات مختلف مشاهده برحسب متر است و داریم:

$$R = -P u + \Delta \quad (\text{رابطه ۳})$$

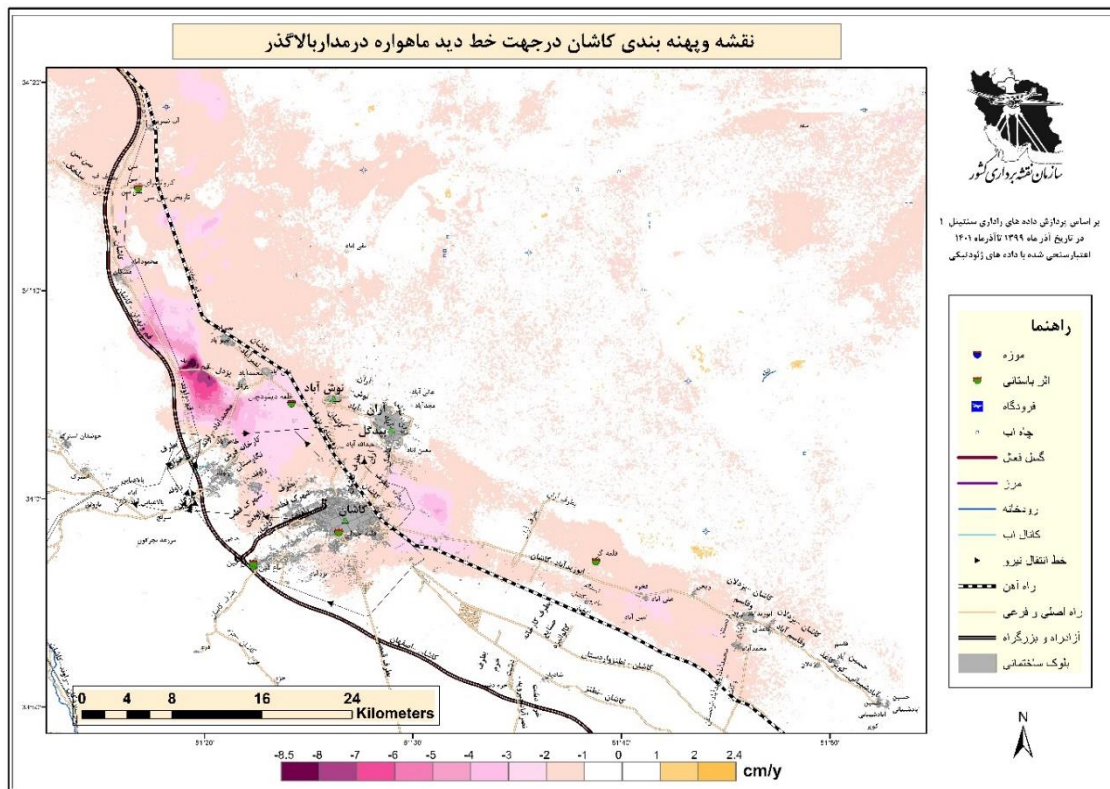
اگر $\sum_p^1$ ماتریس کوواریانس خطای تغییرات برد مشاهده‌شده باشد، داریم:

$$\hat{u} = -[P^T \sum_p^1 P]^{-1} P^T \sum_p^1 R \quad (\text{رابطه ۴})$$

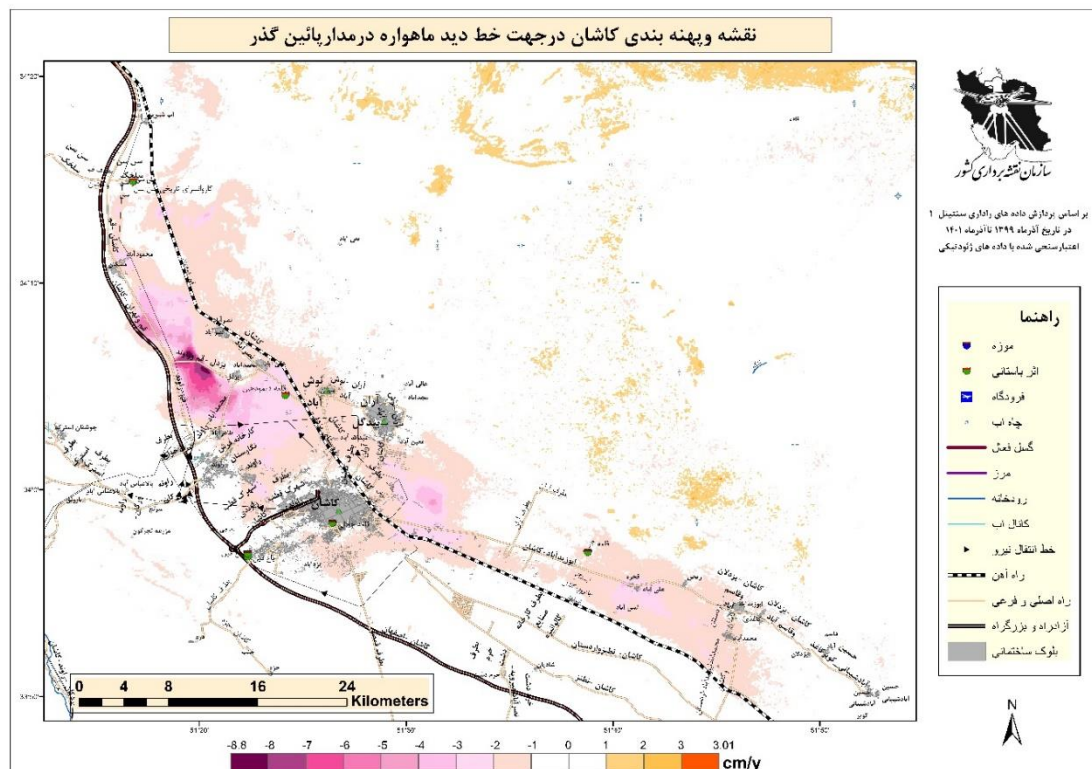
برآورد میدان جابجایی سطحی زمین در اثر فرونشست دشت کاشان با استفاده از تکنیک تداخل سنجی راداری

در این تحقیق با محاسبه میدان جابجایی سطحی زمین در دشت کاشان، با استفاده از پردازش تصاویر راداری ماهواره Sentinel-1 با نرم‌افزار GMTSAR با دقت ثبت هندسی بالا و صحت‌سنجی نتایج آن با مشاهدات ترازیبی دقیق و مشاهدات GPS ایستگاه‌های دائمی ژئودینامیک، منطقه تحت تأثیر پدیده فرونشست در دشت کاشان مورد شناسایی و ارزیابی قرار گرفته است. به‌منظور برآورد مؤلفه‌های مسطحاتی و قائم جابجایی ناشی از فرونشست سطح زمین در دشت کاشان، ۳۰ تصویر راداری Sentinel-1 منطقه از مدار بالا گذر و ۳۰ تصویر راداری منطقه از پایین‌گذر در بازه زمانی آذر ۱۳۹۹ تا آذر ۱۴۰۱ از مرکز فضایی اروپا اخذ و مورد پردازش قرار گرفت. همچنین مدل رقومی ارتفاعی SRTM با قدرت تفکیک مکانی ۳۰ متر به‌منظور حذف اثر توپوگرافی استفاده شد. شکل ۳ و نقشه جابجایی در راستای خط دید ماهواره برای مدارهای بالا گذر و پایین‌گذر را نشان می‌دهد. با توجه به آنکه مدار ماهواره Sentinel-1 مدار نزدیک به قطبی می‌باشد و بنابراین

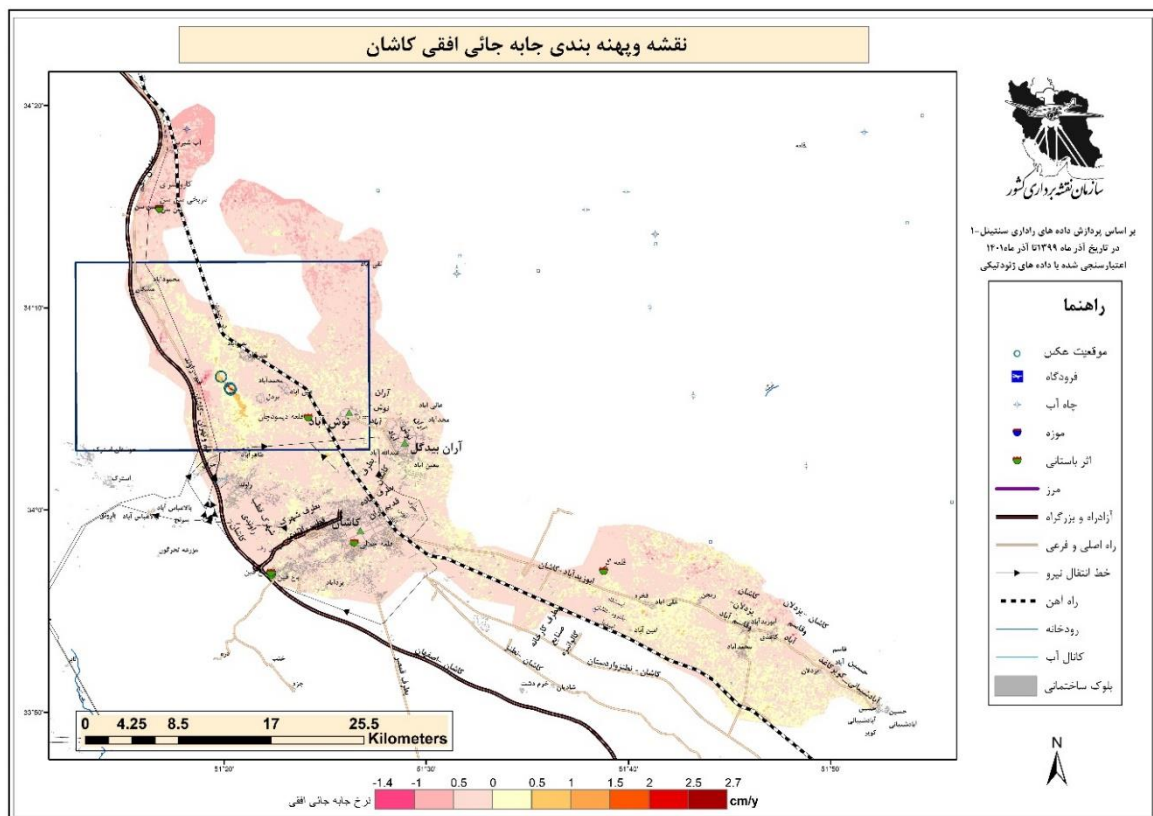
تصویربرداری در جهت دید ماهواره در جهت مؤلفه شمالی-جنوبی نزدیک به صفر می‌باشد و قادر به اندازه‌گیری جابجایی در راستای شمالی جنوبی با این ماهواره نمی‌باشیم. با استفاده از این مشاهدات و به‌کارگیری رابطه ۳ مؤلفه‌های جابجایی در راستای افقی و قائم جابجایی مطابق شکل‌های ۵ و ۶ محاسبه شده است.



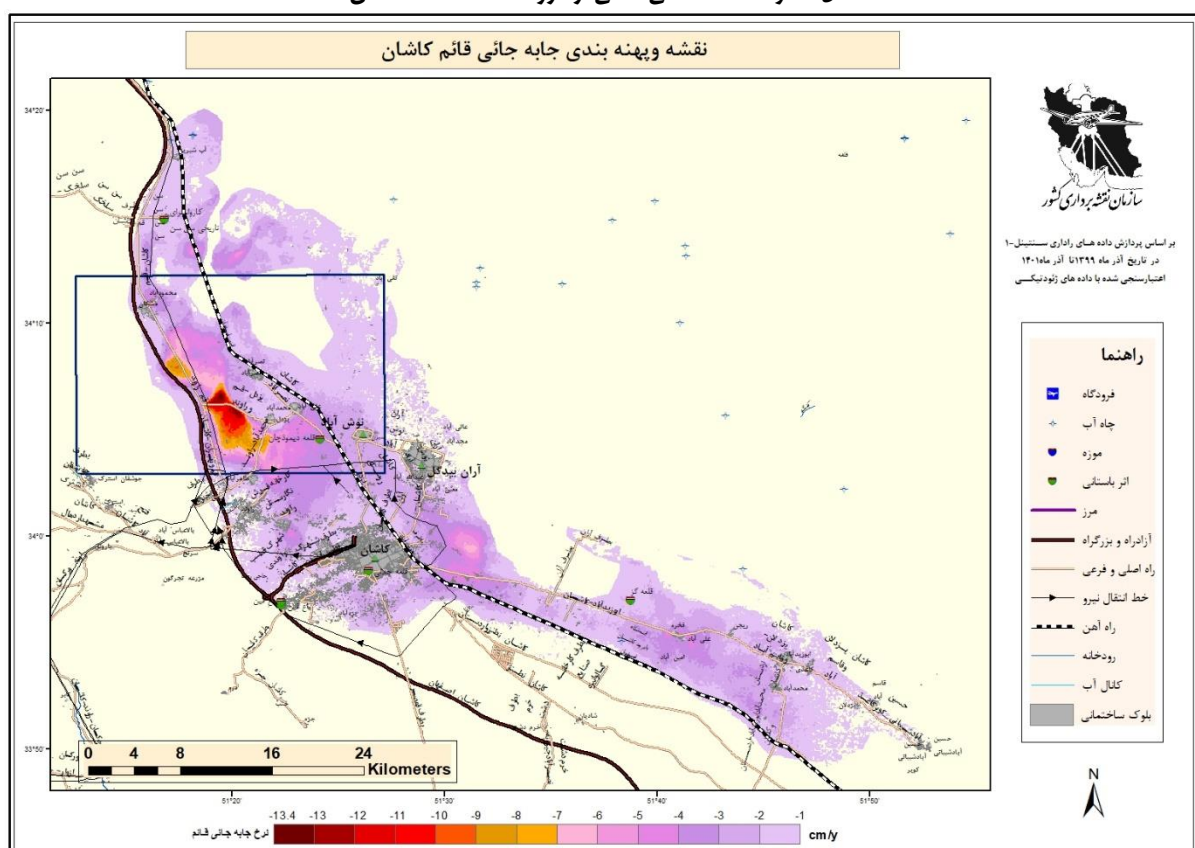
شکل ۳. نقشه جابجایی در راستای خط دید ماهواره برای مدار بالا گذر



شکل ۴. نقشه جابجایی در راستای خط دید ماهواره برای مدار پایین گذر



شکل ۵. مؤلفه مسطحاتی ناشی از فرونشست دشت کاشان



شکل ۶. جابجایی قائم ناشی از فرونشست دشت کاشان

همان طور که از شکل ۵ پیداست، مؤلفه مسطحاتی فرونشست در مقایسه با مؤلفه قائم بسیار کوچک تر است و مؤلفه غالب جابجایی در این موارد ارتفاعی می باشد. تنها در مکان های محدودی شاهد جابجایی مسطحاتی با بیشینه نرخ ۲٫۷ سانتی متر در سال می باشیم که با

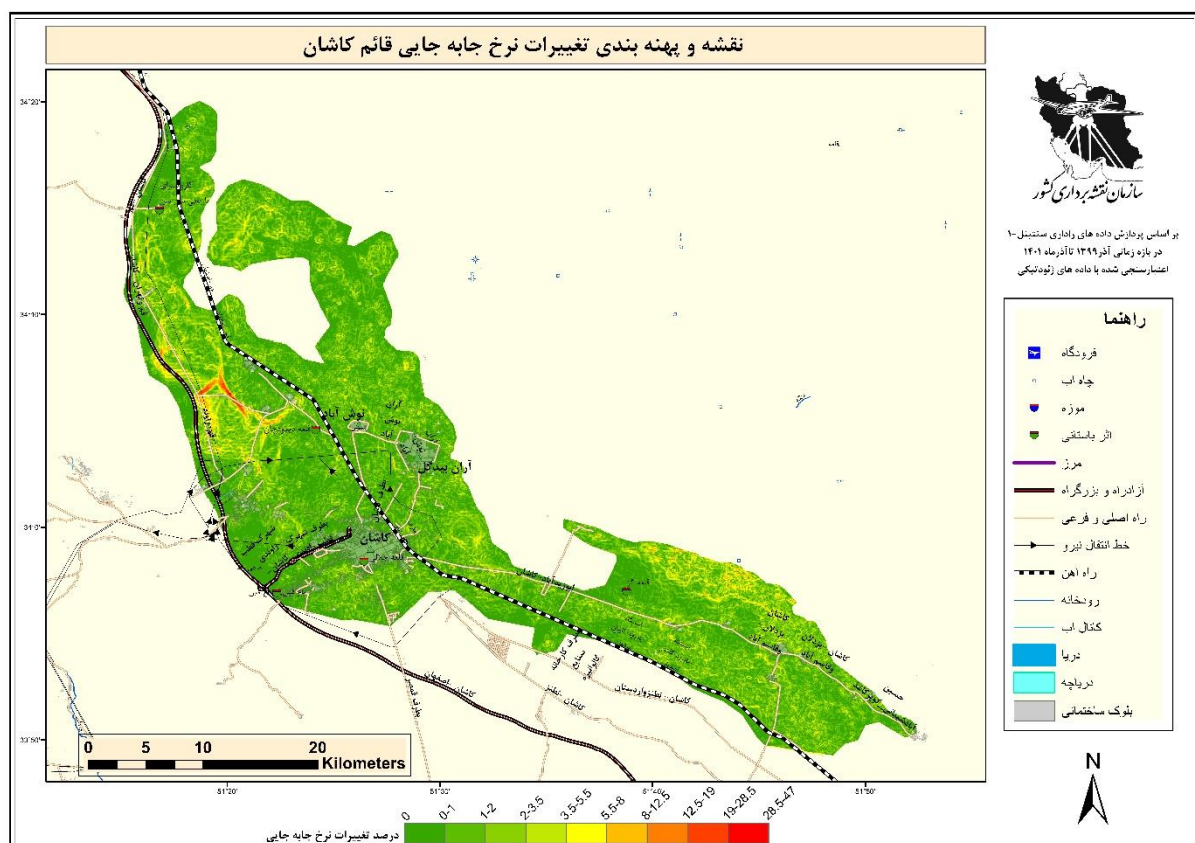
کادر آبی نشان داده شده است. به نظر می‌رسد نواحی دارای جابجایی افقی بیش از یک سانتی‌متر در سال، نواحی مستعد ایجاد شکاف باشد. از طرف دیگر، بررسی مؤلفه قائم جابجایی (شکل ۶) نشان می‌دهد که مناطقی به وسعت تقریبی ۳۱۰ کیلومترمربع در اطراف شهرهای کاشان و آران و بیدگل دچار فرونشست با بیشترین نرخ ۱۳/۱ سانتی‌متر در سال می‌باشد.

برآورد مؤلفه گرادیان سرعت فرونشست زمین در دشت کاشان

گرچه پدیده فرونشست، با اثرات مخرب خود کل پهنه درگیر را مورد تهدید قرار می‌دهد، اما مناطقی که در پهنه‌های دارای فرونشست نامتقارن واقع شده‌اند، نواحی مستعد برای ایجاد شکاف و فروچاله و آسیب به سازه‌های سطحی و زیرسطحی محسوب می‌شوند. در این راستا و به منظور تهیه نقشه مخاطره فرونشست، نقشه گرادیان سرعت فرونشست زمین در دشت کاشان محاسبه شد. نقشه گرادیان، بیانگر تغییرات نرخ جابجایی قائم می‌باشد. این نقشه، در حقیقت مشتق اول نقشه نرخ جابجایی قائم می‌باشد که برای هر پیکسل طبق رابطه زیر محاسبه می‌شود:

$$\text{slop} = \tan^{-1} \sqrt{\left(\left[\frac{dz}{dx}\right]^2 + \left[\frac{dz}{dy}\right]^2\right)} \quad (\text{رابطه ۵})$$

که در این رابطه، $\frac{dz}{dx}$ تغییرات نرخ جابجایی قائم در جهت شرقی-غربی و $\frac{dz}{dy}$ تغییرات نرخ جابجایی قائم در جهت شمالی-جنوبی می‌باشد. شکل ۷ نقشه درصد گرادیان سرعت فرونشست دشت کاشان را نمایش می‌دهد. همان‌طور که از این شکل پیداست، بیشینه درصد تغییرات در این دشت ۴۷ درصد بوده است. بیشتر پهنه فرونشست دشت، درصد تغییرات نرخ زیر ۶ درصد را تجربه می‌کنند. همین‌طور که از این شکل پیداست، نواحی پرمخاطره لزوماً نواحی مرزی فرونشست نمی‌باشد.

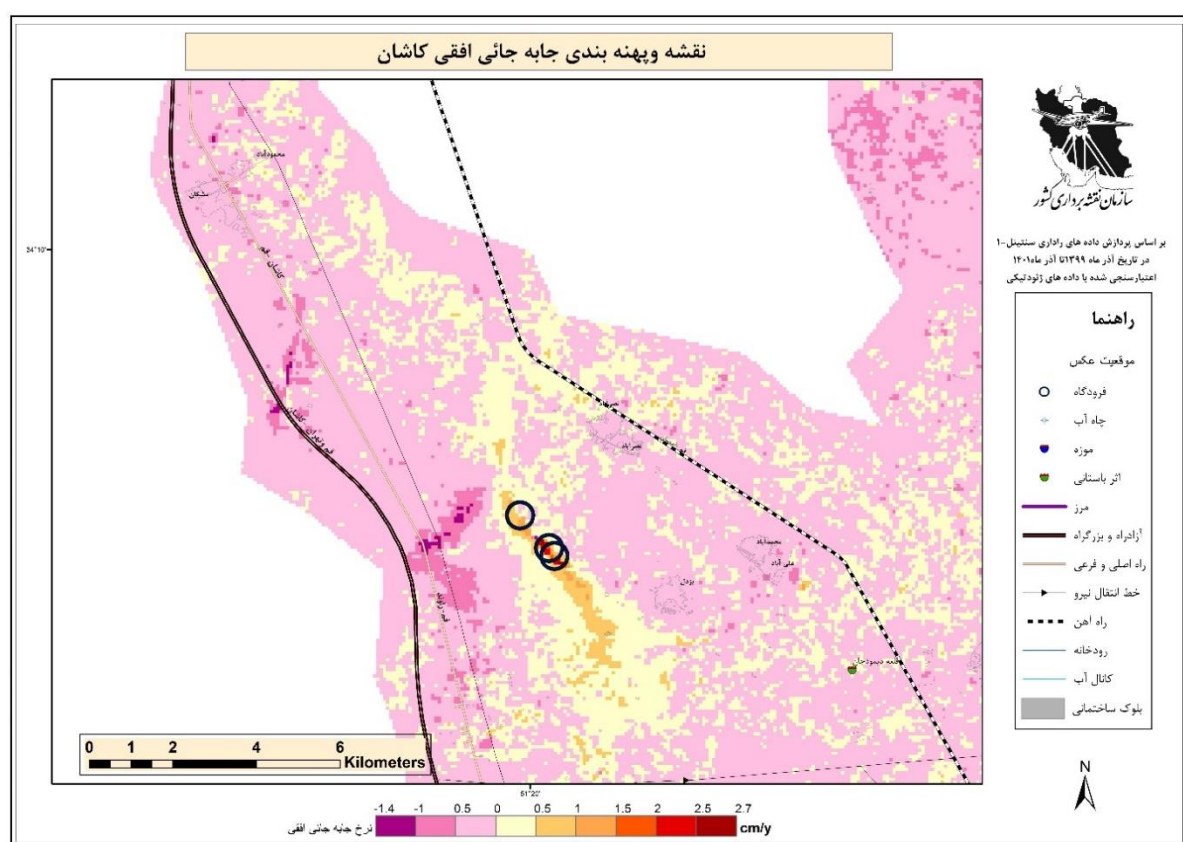


شکل ۷. نقشه و پهنه بندی تغییرات (گرادیان) نرخ جابجایی قائم کاشان

بحث و بررسی نتایج

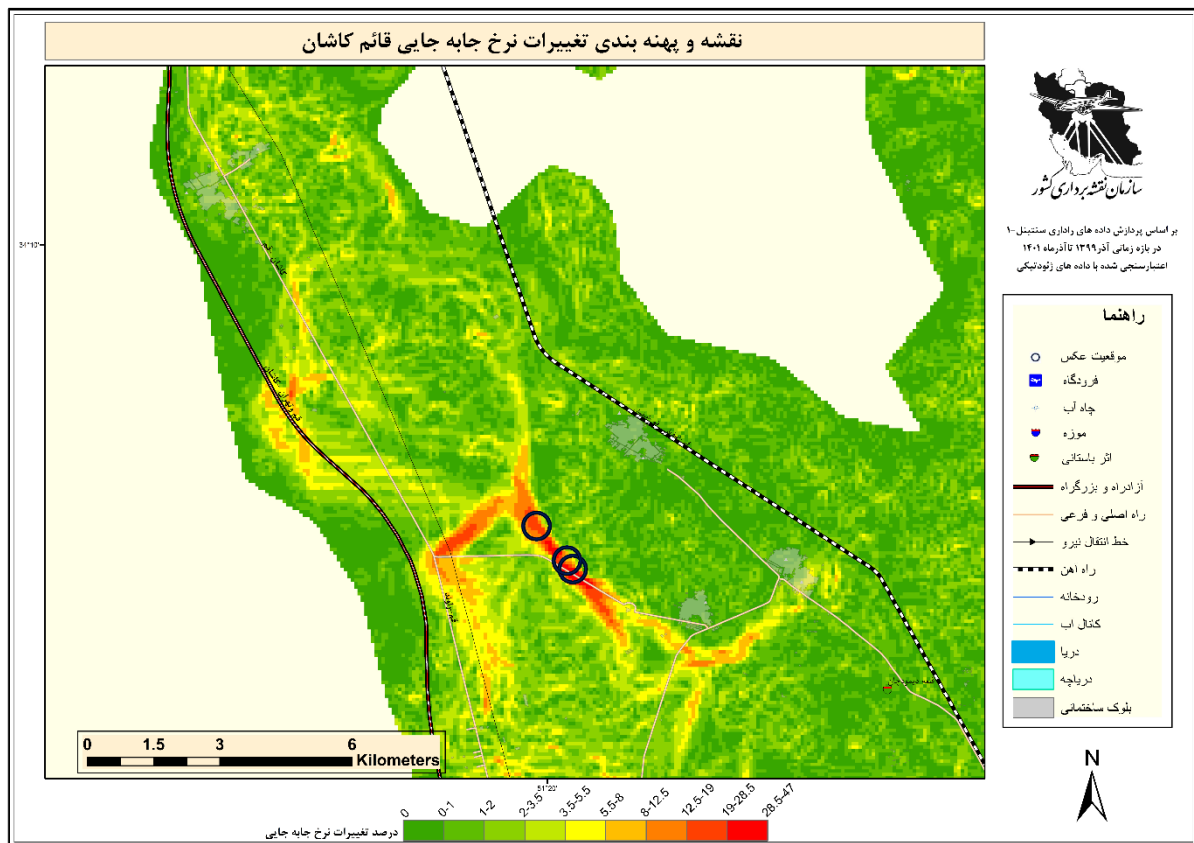
بررسی‌های میدانی مکان‌های ایجاد شکاف و گسیختگی در تحقیقات صورت گرفته نشان داده‌اند که شکاف‌های مناطق فرونشست دقیقاً در قسمت بالآمده سنگ‌بستر قرار دارد و به دلیل گستره ناهمگون آبخوان، تحت عمل پمپاژ آب در منطقه، با کاهش آب بیشتری در سفره

در این تحقیق، به منظور تخمین مناطق ایجاد شکاف در منطقه فرونشست دشت کاشان، از محاسبه مؤلفه مسطحاتی نرخ فرونشست که می‌تواند نشان‌دهنده مکان‌های دارای جابجایی افقی و در نتیجه ایجاد شکاف باشد استفاده شد (شکل ۴). همچنین نقشه گرادیان فرونشست که نشان‌دهنده مناطق دارای فرونشست نامتقارن می‌باشد، برآورد شد (شکل ۶). مقایسه شکل ۴ با شکل ۶ نشان‌دهنده تطابق نواحی با بیشترین درصد تغییرات نرخ فرونشست با نواحی دارای جابجایی مسطحاتی می‌باشد. به منظور مطالعه بیشتر، در شکل‌های ۸ و ۹، منطقه دارای جابجایی افقی بیشینه و گرادیان جابجایی قائم بیشینه که در شکل‌های ۴ و ۶ با کادر مشخص شده‌اند، در مقیاس بزرگتر نمایش داده شده است.



شکل ۸. منطقه دارای حایه افقی، بیشینه دشت کاشان

بررسی شکل‌های ۸ و ۹ نشان‌دهنده تطابق نواحی دارای جابجایی افقی بیشینه و گرادیان جابجایی قائم بیشینه می‌باشد. در حقیقت، هر دو نقشه نتایج یکسانی از معرفی نواحی مستعد ایجاد شکاف و درز و تخریب ناشی از فرونشست را نشان می‌دهند. به‌منظور بررسی نتایج محاسبات و راستی آزمایی آن‌ها، از نواحی مخاطره‌آمیز فرونشست از حیث ایجاد جابجایی افقی و گرادیان فرونشست، بازدید میدانی به عمل آمد. در این بازدید، محدوده فرونشست دشت کاشان از حیث ایجاد شکاف و فروچاله مورد بررسی قرار گرفت. شواهد میدانی نشان‌دهنده ایجاد شکاف‌ها و فرو چاله‌های گسترده به‌هم‌پیوسته در محدوده مناطق دارای جابجایی افقی بیشینه و دارای گرادیان جابجایی قائم بیش از ۱۰ درصد بود، به عبارتی شکاف‌های ایجادشده و عوارض سطحی به‌وفور در این مناطق مشاهده شد. شکل ۱۰ نمونه‌ای از شکاف‌های ایجادشده در منطقه محاسبه‌شده پرخطر فرونشست را نشان می‌دهد. موقعیت این تصاویر در عکس‌های ۸ و ۹ با دایره سیاه رنگ مشخص شده است. نمونه‌ای از کانال آب دچار شکستگی شده، درز و شکاف و فرو چاله‌های گسترده در این تصاویر دیده می‌شود. جدول ۱ میزان سرعت جابجایی مسطحاتی و گرادیان جابجایی قائم در موقعیت عکسهای شکل ۱۰ را نشان می‌دهد. بنابراین بازدید میدانی مؤید محاسبات انجام‌شده به‌منظور شناسایی محاسبات، مناطق ایجاد شکاف و درز بوده است.



شکل ۹. منطقه دارای گرادیان جابجایی قائم بیشینه دشت کاشان



ب-



الف-



د-



ج-

شکل ۱۰. نمونه ای از درز و شکاف، فرو چاله های گسترده و کانال آب دچار شکستگی شده در مناطق دارای جابجایی افقی بیشینه و گرادیان جابجایی قائم بیشینه در منطقه فرونشست دشت کاشان

شماره عکس	میزان سرعت جابجایی مسطحاتی و گرادیان جابجایی قائم در موقعیت عکسهای شکل ۱۰	درصد گرادیان تغییرات (درصد)
الف	۲.۱	۳۵
ب	۲.۲	۵۰
ج	۱.۱	۲۵
د	۲.۱	۲۸

نتیجه‌گیری

پیامدهای مخرب فرونشست شامل تخریب خاک حاصل خیز کشاورزی، کاهش ضریب ذخیره آبخوان‌ها، آسیب به سازه‌های سطحی (به‌عنوان مثال، خانه‌ها، بناهای تاریخی، و ساختمان‌های دیگر)، ترک‌خوردگی زیرساخت‌ها مانند خیابان‌ها، لوله‌های آب، راه‌آهن و باند فرودگاه، ایجاد مسیرهای انتقال آلاینده‌ها از سطح به سفره‌های کم‌عمق و ایجاد فرسایش شدید خاک و ایجاد توپوگرافی ناهمگون در نزدیکی گسیختگی است. بنابراین، فرونشست زمین و شکاف‌های ناشی از آن، مخاطره پیشرو تأسیسات سطحی و زیرسطحی در نواحی مختلف درگیر این پدیده می‌باشد. از آنجایی که مناطق با فرونشست نامتقارن، یکی از نواحی مستعد ایجاد شکاف و ترک در مناطق فرونشست می‌باشند، در این تحقیق تلاش شد با استفاده از محاسبه گرادیان نرخ فرونشست، نواحی نشست نامتقارن آشکار و به‌صورت نقشه ارائه شود. بازدیدهای میدانی نیز مؤید ایجاد شکاف در نواحی دارای گرادیان فرونشست بیش از ۱۰ درصد بوده است. از دیگر سو، گرچه رفتار پوسته زمین در اثر تخلیه منابع آب زیرزمینی غالباً به‌صورت قائم می‌باشد، اما این واکنش دارای مؤلفه کوچک افقی در برخی نواحی نیز می‌باشد. در این تحقیق با برآورد مؤلفه مسطحاتی ایجادشده در اثر فرونشست زمین، تلاش شد نواحی مستعد شکاف و درز شناسایی شود. نتایج نشان‌دهنده تطابق مکان‌های دارای جابجایی افقی حدود ۱ تا ۲ سانتی‌متر در سال با مناطق دارای گرادیان بالای جابجایی قائم و شکاف‌های ایجادشده در سطح زمین بوده است. همچنین نتایج پیش‌بینی محل شکافها با استفاده از نقشه گرادیان نرخ فرونشست و نقشه مؤلفه مسطحاتی فرونشست، با مشاهدات میدانی شکافهای گزارش‌شده در تحقیق قاضی فرد و همکاران (۱۳۹۰) تطابق داشت. با توجه به نتایج به‌دست‌آمده، مناطقی که با تغییر شیب سنگ‌بستر مواجه هستند، تغییر نرخ فرونشست متفاوتی در سطح زمین در اثر اضافه برداشت آب زیرزمینی از خود نشان می‌دهند و این منجر به ایجاد شکاف و ترک در سطح زمین و سازه‌های محل می‌شود. بنابراین محاسبه گرادیان و جابجایی مسطحاتی می‌تواند نقشه مناطق پرمخاطره فرونشست از حیث ایجاد شکاف و ترک در سطح زمین و تأسیسات را در اختیار ما قرار دهد. لذا محاسبه این نقشه‌های مخاطرات برای تمامی مناطق فرونشست، به‌منظور تسریع در روند بازیابی و تحکیم تأسیسات و سازه‌های محل پیشنهاد می‌گردد.

سپاس‌گزاری

نویسندگان مقاله تشکر خود را از سازمان نقشه‌برداری کشور برای تأمین هزینه مالی این پژوهش ابراز می‌دارند.

"هیچ‌گونه تعارض منافع بین نویسندگان وجود ندارد"

منابع

- آمیغ پی، معصومه؛ عربی، سیاوش (۱۴۰۱). اطلس جامع فرونشست در ایران. سازمان نقشه برداری کشور. تهران
- آمیغ پی، معصومه؛ عربی، سیاوش (۱۴۰۲). مطالعه وضعیت فرونشست زمین در اثر استخراج بی‌رویه آبهای زیرزمینی در ایران با استفاده از نقشه جامع فرونشست کشور. تحقیقات منابع آب ایران، ۱۹(۵)، ۱۴۵-۱۵۶. doi: 10.22034/iwtr.2023.186215
- قاضی فرد، اکبر؛ مصلح، علی؛ صفایی، همایون (۱۳۹۰). بررسی علل ایجاد فرونشست زمین در دشت کاشان و ارائه راهکارهای مناسب جهت جلوگیری از آن. وزارت نیرو. شرکت سهامی مدیریت منابع آب ایران. دفتر پژوهش‌های کاربردی.
- فتحی، محمد؛ نوریان بیدگلی، مجید (۱۴۰۰). ارزیابی نشست زمین ناشی از افت سطح ایستابی در دشت کاشان. نشریه علمی علوم و مهندسی آب و فاضلاب. سال ششم. شماره ۴. صفحات ۴۵-۵۷.

REFERENCES

- Amelung, F., D. Galloway, J.W. Bell, H.A. Zebker, and R.J. Lacznaiak, (1999). Sensing the ups and downs of Las Vegas: InSAR reveals structural control of land subsidence and aquifer system deformation. *Geology*, volume 27, pages 483–486.
- Amighpey, M, Arabi S, Talebi A, Jamoor Y (2008). Studying subsidence area in Iran applying Precise leveling remeasurement. *Surveying*, 20(4):5-15, (In Persian)
- Amighpey, M, Arabi, S (2016). Studying land subsidence in Yazd province, Iran, by integration of InSAR and levelling measurements. *Remote Sensing Applications: Society and Environment*, 4: 1-8
- Amighpey, M, Arabi S (2023). Comprehensive Iran subsidence atlas. National Cartographic Center of Iran, Tehran (In Persian)
- Amighpey, M., Arabi, S. (2024). Studying Land Subsidence in Iran Caused by Groundwater Over Extraction by Preparing the Comprehensive Subsidence Map of the Country. *Iran-Water Resources Research*, 19(5), pp. 145-156. doi: 10.22034/iwrr.2023.186215 (In Persian)
- Carpenter, MC (1999). Part I: South-Central Arizona. In: Galloway D, Jones DR, Ingebritsen SE (eds) *Land subsidence in the United States*. US Geol Surv Circ 1182, pp 65–78
- Conway, B. (2015). Land subsidence and earth fissures in south-central and southern Arizona, USA. *Hydrogeology Journal*. 24. 10.1007/s10040-015-1329-z.
- Dehghani M, Valadan Zoej M J, Entezam I, Mansourian A, & Saatchi S (2009). InSAR monitoring of progressive land subsidence in Neyshabour, northeast Iran. *Geophysical Journal International*, 178(1): 47-56.
- Fathi, M., Noorian Bidgholi, M (1400). Evaluation of land subsidence caused by water table drop in Kashan Plain. *Scientific Journal of Water and Sewerage Sciences and Engineering*, 6(4), pp 45-57.
- Galloway, D.L., and J. Hoffmann, (2007). The application of satellite differential SAR interferometry-derived ground displacements in hydrogeology. *Hydrogeology Journal*, volume 15, pages 133–154.
- Galloway, Devin & Bawden, Gerald & Leake, Stanley & Honegger, DG. (2008). Land subsidence hazards. Landslide and land subsidence hazards to pipelines. US Geol Surv Open-File Rep. 1164.
- Ghazi Fard, A, Mosleh, A, Safaei, H (2012). Investigating the causes of land subsidence in the Kashan Plain and providing appropriate solutions to prevent it. Ministry of Energy, Iran Water Resources Management Joint Stock Company, Applied Research Office.
- Higgins, S.A., Overeem, I., Steckler, M.S., Syvitski, J.P.M., Seeber, L. and Akhter, S.H. (2014). InSAR measurements of compaction and subsidence in the Ganges-Brahmaputra Delta, Bangladesh. *Journal of Geophysical Research - Earth Surface*, volume 119, pages 1768–1781, doi:10.1002/2014JF003117
- Hoffmann, J., D.L. Galloway, and H.A. Zebker, (2003). Inverse modeling of interbed storage parameters using land subsidence observations, Antelope Valley, California. *Water Resources Research*, volume 37, number 2, 1031 pages, doi:10.1029/2001WR001252
- Marker, B.R. (2013). Land Subsidence. In: Bobrowsky, P.T. (eds) *Encyclopedia of Natural Hazards*. Encyclopedia of Earth Sciences Series. Springer, Dordrecht. https://doi.org/10.1007/978-1-4020-4399-4_208
- Motagh M, Walter T R, Sharifi M A, Fielding E, Schenk A, Anderssohn J, Zschau J (2008). Land subsidence in Iran caused by widespread water reservoir overexploitation. *Geophysical Research Letters*, 35(16).
- Robinson GM, Peterson DE (1962). Notes on earth fissures in southern Arizona. US Geol Surv Cir 466, 7 pp
- Yang, C., Lv, S.; Hou, Z., Zhang, Q., Li, T., Zhao, C. (2022). Monitoring of Land Subsidence and Ground Fissure Activity Within the Su-Xi-Chang Area Based on Time-Series InSAR. *Remote Sens.* 14, 903. <https://doi.org/10.3390/rs14040903>
- Wright, T. J., B. E. Parsons, and Z. Lu (2004b). Toward mapping surface deformation in three dimensions using InSAR. *Geophys. Res. Lett.*, 31, L01607, doi:10.1029/2003GL018827.