



<https://gеп.uis.ac.ir/?lang=en>
Geography and Environmental Planning
E-ISSN: 2252- 0910
Document Type: Research Paper
Vol. 34, Issue 1, No.89, Spring 2023, pp. 1- 3
Received: 21/05/2022 Accepted: 26/10/2022

Spatial Analysis of Jiroft Plain Subsidence Using the Coherence Pixel Technique (CPT)

Ali Mehrabi¹ *, Sadegh Karimi², Mehran Khalesi³

1- Associate Professor, Department of Geography and Urban Planning, Shahid Bahonar University of Kerman, Kerman, Iran
Mehrabi@uk.ac.ir

2- Associate Professor, Department of Geography and Urban Planning, Shahid Bahonar University of Kerman, Kerman, Iran
karimi@uk.ac.ir

3- M.Sc. Student of Environmental Hazards, Department of Geography and Urban Planning, Shahid Bahonar University of Kerman, Kerman, Iran
mehran.khalesi@ens.uk.ac.ir

Abstract

The phenomenon of land subsidence is one of the most important environmental hazards that have affected many plains of the country today. Jiroft Plain located in Kerman Province is also one of the areas where subsidence effects are evident. In this research, besides analyzing the spatial subsidence of Jiroft Plain and determining the extent and trend of its spread over a period of time, the effective factors in this phenomenon were investigated. For this purpose, the Sentinel-1 radar images related to the years of 2014-2022 were used. The Coherence Pixel Technique (CPT) was utilized to map the affected areas and determine the subsidence rate. The results of this method showed that the subsidence rate in Jiroft Plain had increased from 11 cm in 2014 to 13 cm in 2022. In addition, its area had increased during this period and the expansion trend had moved towards the northern areas of the plain. To analyze the causative factors of this phenomenon, in addition to studying the changes in the groundwater level of the plain and its relationship with subsidence, the roles of faults and soil thickness in creating or intensifying this phenomenon were investigated. The results showed that in addition to the uncontrolled abstraction from the aquifer, the subsidence of Jiroft Plain was affected by Sabzevaran Fault, while subsidence intensity was higher in the areas with higher soil thickness.

Keywords: subsidence, groundwater, fault, spatial relationship, Jiroft Plain

*Corresponding Author

Mehrabi, A., karimi, S., & khalesi, M. (2023). Spatial analysis of Jiroft plain subsidence using coherence pixel technique (CPT). *Geography and Environmental Planning*, 34 (1), 1 - 3



2252-0910 © University of Isfahan

This is an open access article under the CC BY-NC 4.0 License (<https://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0>)



10.22108/GEP.2022.133667.1525



20.1001.1.20085362.1402.34.1.2.7

Introduction

The phenomenon of subsidence is one of the growing and fundamental problems in most human societies, which often occurs as a result of human activities. Improper use of water in agricultural and industrial sectors due to the increasing population growth has led to adverse quantitative and qualitative effects on water resources. Understanding the spatial extent and measuring the amount of subsidence as accurately as possible can be considered as the first step in studying this phenomenon. Therefore, by recognizing the spatial characteristics and temporal behavior of this phenomenon, it is possible to present and develop a regional model of it as well as practical and basic solutions to reduce the damage associated with it and prevent its future trends. The use of radar interferometry method in recent years as an efficient tool for monitoring displacements caused by various phenomena, such as volcanoes, subsidence, earthquakes, and landslides, etc., has been considered by earth scientists. The advantages of this method compared to the previous one include the possibility of calculating displacements with centimeter-level accuracy, providing continuous and extensive spatial coverage, and having the ability to operate it in any weather conditions. So far, various studies have qualitatively identified the relationship between groundwater level declines and occurrence of subsidence. However, few studies have tested this relationship quantitatively. Jiroft Plain has been facing a serious drought crisis and declining groundwater levels in recent years. In fact, changes in the agricultural pattern, reduced rainfall, and occurrence of continuous droughts have led to unplanned and unprincipled use of groundwater resources and decline of groundwater levels in the catchment area of Jiroft Plain and have provided conditions for the occurrence and expansion of land subsidence. Therefore, subsidence monitoring has been proposed as an efficient method for identifying and displaying the regional situations in terms of the risk of land subsidence by planners and managers and made it possible to plan and implement appropriate prevention programs. Therefore, the purpose of this paper was spatial analysis of Jiroft Plain subsidence and evaluation of the effects of uncontrolled groundwater abstraction on land subsidence and fault development. To this end, 73 Sentinel-1 images related to the period of 2014-2021 were processed by using the CPT technique. The darkest areas were related to agricultural areas, which had the least amounts of coherence since their vegetations had not remained constant over time and caused a temporal correlation in the interfering phase.

Methodology

The first step in the CPT processing was production of differential interferometers. Initially, the images were referenced in pairs and the interferometers were selected from the items that had spatial and temporal baselines of less than 100 and 365 m, respectively. Based on this, 72 mapping overlays were generated. Along with the various interferences, the related coherence maps were generated. Coherence is a good estimator of phase quality and is used in the pixel selection phase. Coherence values range from 0 that shows a completely uncorrelated phase or pure noise to 1 that indicates a coherent or noise-free phase. In the second step, differential interferometers were processed to obtain the deformation time series, which included linear and nonlinear components and DEM error. Not all image pixels are suitable for processing due to lacking correlation. Among the various pixel selection criteria, a coherence-based criterion was used. Therefore, all the pixels that had a mean coherence value of less than 0.6 were discarded. Figure 3 shows the coherence map created by the CPT for Jiroft Plain where the brightest areas showed the most coherent areas, which corresponded to barren lands, mountainous lands and highlands, and residential areas because they showed very little change over time.

Discussion


Figure 4 shows the magnitude of the shifts that occurred along the satellite's line of sight as a result of Sentinel-1 data processing from April 12, 2014 to September 21, 2021. The total number of pixels calculated from the Sentinel-1 data set by the CPT technique reached 2571. The calculations revealed a high deformation rate with a maximum speed of up to -13 cm per year for satellite visibility in the central and southern parts of Jiroft Plain from 2014 to 2021. The positive values indicated that the

surface was rising. Most of these values were located in the mountains around the plain. Motion may be related to tectonic factors and the isostatic process. In contrast, the negative values indicated subsidence, which was mainly concentrated in the central and southern parts of the plain. As can be seen in Figure 4, the displacements in the direction of satellite view of the points varied from +3 to -13 mm. In addition, the results showed the increasing trend of subsidence over time in Jiroft Plain. From 2014 to 2022, the area affected by subsidence had increased from 530 km² in 2014 to 580 km² in 2022, showing an expansion from the southern to the northern areas of the plain. In addition to the extent of the subsidence rate, it had increased from 11 cm in 2014 to 13 cm in 2022.

Conclusion

In this study, the subsidence phenomenon of Jiroft Plain was investigated and its relationship with various factors was analyzed. The displacements that had occurred and were then obtained from the CPT technique indicated that the study area had undergone progressive subsidence. The subsidence rate in the southern and southeastern parts of the plain had increased from 11 cm to 13 cm per year over an 8-year period. In addition, during this period, the area affected by this phenomenon had increased from 530 to 580 km² and had been drawn to the northern parts of the plain over time. Investigation of groundwater level changes in Jiroft Plain and its compliance with the subsidence areas showed that improper abstraction from the aquifer had been an important and key factor in creating this phenomenon. In addition, it is worth noting that the areas with the highest subsidence rate corresponded to the areas with the highest soil thickness. Thus, their impacts on the subsidence were investigated due to the enclosure of Jiroft Plain by faults. The results of this study showed that Sabzevaran Fault had controlled subsidence and affected this phenomenon. Finally, the subsidence of Jiroft Plain could be considered as a result of two factors, one was the uncontrolled abstraction of groundwater and the other one was the activity of faults, which could affect each other. This issue had intensified the subsidence phenomenon.

تحلیل فضایی فرونشست دشت جیرفت با استفاده از تکنیک پیکسل‌های کوهرنس (CPT)

علی مهرابی ^{*}، دانشیار گروه جغرافیا و برنامه‌ریزی شهری، دانشکده ادبیات و علوم انسانی، دانشگاه شهید باهنر کرمان، کرمان،

ایران

mehrabi@uk.ac.ir

صادق کریمی، دانشیار گروه جغرافیا و برنامه‌ریزی شهری، دانشگاه شهید باهنر کرمان، کرمان، ایران

karimi@uk.ac.ir

مهران خالصی، دانشجوی کارشناسی ارشد مخاطرات محیطی، دانشگاه شهید باهنر کرمان، کرمان، ایران

mehran.khalesi@ens.uk.ac.ir

چکیده

پدیده فرونشست سطح زمین یکی از مهم‌ترین مخاطرات محیطی است که امروزه بسیاری از دشت‌های کشور را تحت‌تأثیر قرار داده است. دشت جیرفت واقع در استان کرمان نیز یکی از مناطقی است که آثار فرونشست در آن مشهود است. در این پژوهش سعی شده است، ضمن تحلیل فضایی فرونشست دشت جیرفت و تعیین میزان و روند گسترش آن طی یک دوره زمانی، عوامل مؤثر در این پدیده کنکاش شود. بدین منظور از تصاویر راداری سنتینل ۱ مربوط به سال‌های ۲۰۱۴ تا ۲۰۲۲ استفاده شد. برای تهیه نقشه مناطق درگیر و تعیین نرخ فرونشست از تکنیک پیکسل‌های کوهرنس استفاده شد. نتایج حاصل از این روش نشان‌دهنده آن است که نرخ فرونشست در دشت جیرفت به‌طور فزاینده‌ای در حال افزایش است. به‌طوری که از ۱۱ سانتی‌متر در سال ۲۰۱۴ به ۱۳ سانتی‌متر در سال ۲۰۲۲ رسیده است. علاوه بر آن طی این مدت بر وسعت این مناطق افزوده شده و روند گسترش به‌سمت مناطق شمالی دشت در حرکت است. به‌منظور تحلیل عوامل مسبب این پدیده، علاوه بر بررسی تغییرات سطح آب‌های زیرزمینی دشت و ارتباط آن با فرونشست، نقش گسل‌ها و همچنین ضخامت خاک در ایجاد یا تشدید این پدیده بررسی شد. نتایج حاصل نشان‌دهنده آن است که علاوه بر برداشت بی‌رویه از آبخوان، فرونشست دشت جیرفت تحت‌تأثیر گسل سوزاران نیز قرار دارد و شدت فرونشست در مناطق با ضخامت خاک بیشتر، بالاتر است.

واژه‌های کلیدی: فرونشست، آب‌های زیرزمینی، گسل، ارتباط مکانی، دشت جیرفت

*نویسنده مسؤول

مهرابی، علی، کریمی، صادق و خالصی، مهران. (۱۴۰۱). تحلیل فضایی فرونشست دشت جیرفت با استفاده از تکنیک پیکسل‌های کوهرنس (CPT). *جغرافیا و برنامه‌ریزی محیطی*، ۳۴ (۱)، ۹۹-۱۱۶.

مقدمه

پدیده فرونشست یکی از مشکلات روزافزون و اساسی در بیشتر جوامع انسانی است که اغلب در اثر فعالیت‌های بشر رخ می‌دهد. فرونشست نشان‌دهنده فرورفتگی سطح زمین بر اثر فعالیت‌های انسانی نظیر برداشت بی‌رویه از آب‌های زیرزمینی و معدنکاری و عوامل گوناگون طبیعی مانند تکتونیک، تحکیم خاک و فرایند انحلال است. استفاده بی‌رویه از آب در مصارف کشاورزی و صنعتی در نتیجه رشد روزافزون جمعیت به ایجاد اثرات نامطلوب کمی و کیفی در منابع آب منجر شده است. علاوه بر این، افزایش استفاده از آب‌های زیرزمینی به‌ویژه در حوضه‌هایی که با نهشته‌های آبرفتی، دریاچه‌ای تحکیم نیافته یا دریایی کم عمق انباشته گشته‌اند، باعث ایجاد فرونشست می‌شود. بهره‌برداری بیش‌ازحد از آب زیرزمینی در بسیاری از دشت‌های ایران، به رخداد فرونشست در آنها منجر شده است (یاراحمدی، ۱۳۹۵؛ Jafari et al., 2016, p. 833). برای چندین دهه، آب‌های زیرزمینی به‌طور گسترده در سفره‌های زیرزمینی برای اهداف خانگی، کشاورزی و صنعتی بهره‌برداری شده‌اند. این امر نیاز به تغذیه مصنوعی بعدی برای متعادل کردن کاهش آب زیرزمینی و کنترل فرونشست زمین دارد (Aggarwal et al., 2022, p. 178). بهره‌برداری طولانی‌مدت از آب‌های زیرزمینی و تغذیه مجدد در سفره‌های زیرزمینی محدود، فشار پیرومتریک و منفذی را در سفره‌های زیرزمینی تغییر می‌دهد. طبق اصل تنش مؤثر، سیستم‌های آبخوان به دلیل این تغییرات متراکم و به فرونشست زمین منجر می‌شوند (Hu et al., 2019; Castellazzi et al., 2016, p. 103)؛ بنابراین درک فرونشست زمین، فرایند تراکم ناشی از بهره‌برداری و تغذیه آب‌های زیرزمینی ضروری است. استحصال یا تغذیه مجدد آب‌های زیرزمینی به ترتیب باعث فرونشست یا بالآمدن زمین می‌شود و این امر آسیب چشمگیری به ساختمان‌ها، زیرساخت‌ها و ظرفیت ذخیره آب سفره‌ها وارد می‌کند (Hu et al., 2019).

شناخت گستره فضایی و اندازه‌گیری هرچه دقیق‌تر میزان فرونشست، اولین گام در جهت مطالعه این پدیده دانسته می‌شود؛ بنابراین با شناخت مشخصات مکانی و رفتار زمانی این پدیده، مدل منطقه‌ای آن ارائه و توسعه داده و از این طریق راهکارهایی عملی و اساسی در راستای کاهش خسارات مرتبط با آن و جلوگیری از روند آتی اتخاذ می‌شود. برای محاسبه فرونشست زمین روش‌های مختلف غیر ژئودیتیکی و ژئودیتیکی وجود دارند. استفاده از GPS، توتال استیشن و لیزر اسکنر از جمله روش‌های ژئودیتیکی محسوب می‌شوند. با وجود اینکه این روش‌ها، اندازه‌گیری‌های دقیق و پیوسته‌ای را باعث می‌شوند، هیچ‌کدام قابلیت تعیین وسعت و الگوی فضایی پدیده فرونشست را ندارند (Liu et al., 2021, p. 17). از طرف دیگر، اغلب انجام‌دادن هرکدام از این روش‌ها به‌ویژه برای مناطق وسیع بسیار پرهزینه و زمان‌بر خواهد بود؛ در نتیجه وجود چنین محدودیت‌هایی همواره از چالش‌های اساسی استفاده از این روش‌ها محسوب می‌شود. با ظهور سنجنده‌های راداری در دهه ۱۹۹۰ و توسعه سریع آن، افقی بسیار امیدوارکننده و تازه پیش روی محققان علوم زمین قرار گرفت (یاراحمدی، ۱۳۹۵). استفاده از روش ایتروفرومتری راداری در سال‌های اخیر به‌عنوان ابزاری کارآمد برای پایش جابجایی‌های ناشی از پدیده‌های مختلفی نظیر آتشفشان، فرونشست، زلزله و زمین لغزش و غیره مورد توجه محققان علوم زمین قرار گرفته است (Liu et al., 2021, p. 17; Ghazifard et al., 2017, p. 778). از مزایای این روش در مقایسه با روش پیشین، به امکان محاسبه جابجایی‌ها با دقت سانتی‌متر و پایین‌تر، پوشش مکانی پیوسته و وسیع و قابلیت فعالیت در هر شرایط آب‌وهوایی اشاره می‌شود.

تاکنون پژوهش‌های مختلفی، به صورت کیفی، ارتباط بین افت سطح آب زیرزمینی و وقوع پدیده فرونشست را مشخص کرده‌اند (شریفی کیا، ۱۳۹۱، ص. ۳۴؛ صالحی و همکاران، ۱۳۹۲، ص. ۴۷؛ شفیع و همکاران، ۱۴۰۰، ص. ۱۵۹؛ Masoumi et al., 2022, p. 17 Liu et al., 2017)؛ اما مطالعات کمی این ارتباط را به صورت کمی آزمایش کرده‌اند. بهنیا فر و همکاران (۱۳۸۹، ص. ۱۳۱) عوامل مؤثر بر فرونشست دشت مشهد و پیامدهای ژئومورفیک آن را بررسی کردند. براساس نتایج این پژوهش، اگرچه گروهی از عوامل در ایجاد این پدیده مؤثر بوده‌اند، مهم‌ترین آنها به خصوص در دشت مشهد، برداشت بی‌رویه از سفره آب زیرزمینی و نفوذ نکردن آب برگشتی شرب، صنعت و کشاورزی به این دشت بوده است. شریفی کیا (۱۳۹۱، ص. ۳۴) با استفاده از تصاویر راداری، فرونشست زمین را در دشت نوق-بهرمان در استان کرمان بررسی کردند. نتایج نشان‌دهنده آن بود که این منطقه سالانه به‌طور متوسط ۳۰ سانتی‌متر فرونشست دارد. رکنی و همکاران (۱۳۹۵، ص. ۶۵) پژوهشی با عنوان بررسی فرونشست زمین، چشم‌اندازها و تحولات ژئومورفولوژی ناشی از آن در دشت‌های تراکمی مطالعه موردی: دشت نیشابور انجام دادند. در این پژوهش با توجه به افت سطح آب‌های زیرزمینی که حاصل آن نشست زمین و ایجاد شکاف در بخش‌های مختلف این دشت بوده، تغییرات ژئومورفولوژیکی دشت و شکاف‌ها و ترک‌های حاصل از فرونشست زمین بررسی شده است. رنجبر و جعفری (۱۳۸۸، ص. ۲۳) با بررسی عوامل مؤثر در فرونشست زمین دشت اشتهارد به این نتیجه رسیدند که برداشت بی‌رویه از منابع آب زیرزمینی و وجود سازندهای تبخیری در این منطقه از مؤثرترین عوامل فرونشست زمین است. محمدخان و همکاران (۱۳۹۸) تأثیر افت آب‌های زیرزمینی را بر میزان فرونشست با استفاده از تصاویر راداری سنتینل-۱ محدوده دشت قروه ارزیابی کردند. نتایج حاصل از بررسی وضعیت آب‌های زیرزمینی دشت قروه نشان‌دهنده افزایش میزان بهره‌برداری از منابع آب زیرزمینی و در نتیجه افت سطح آب در این دشت است که بیشترین میزان افت سطح آب در مناطق شرقی دشت قروه صورت گرفته است. نظم فر و شیرزادگرجان (۱۴۰۱) دشت مشکین استان اردبیل را مورد پایش فرونشست قرار داده‌اند. نتایج حاصل نشان‌دهنده آن است که دلیل اصلی فرونشست دشت، برداشت بی‌رویه از منابع آب زیرزمینی بوده است و بیشینه نرخ فرونشست به ۳۵ سانتی‌متر در سال نیز می‌رسد.

ماتئوس و همکاران، فرونشست زمین را در محدوده وگا گرانادا، اسپانیا با استفاده از داده‌های راداری سنتینل-۱ بین سال‌های ۲۰۱۵ تا ۲۰۱۶ مورد پایش قرار داده‌اند. نتایج تحقیق نشان‌دهنده آن است که بیشترین میزان فرونشست زمین مربوط به یک دوره طولانی و خشک در منطقه بوده است (Mateos et al., 2017). وانگ و همکاران، مقدار فرونشست زمین را در منطقه گوانگژو چین ۸ میلی‌متر در سال برآورد کرده‌اند که ارتباط مستقیم با برداشت بی‌رویه آب‌های زیرزمینی دارد (Wang et al., 2017). مقصودی و همکاران، در دو بازه‌ی زمانی ۲۰۰۷ تا ۲۰۰۹ و ۲۰۱۵ تا ۲۰۱۶ نرخ فرونشست منطقه جاوا را در اندونزی طبق داده‌های سنتینل-۱/۶ میلی‌متر در سال گزارش کرده است (Maghsoudi et al., 2018). جینی و همکاران وجود ارتباط را بین برداشت بی‌رویه منابع آب و فرونشست زمین در دره سان جویکین کالیفرنیا بررسی و تأیید می‌کنند (Jeanne et al., 2019). سیان و همکاران، با استفاده از تداخل سنجی پراکندگی دائمی و تصاویر سنتینل-۱، تصاویر (COSMO-SkyMed) و تصاویر (TerraSAR-X)،

فرونشست زمین را در مناطق ساحلی آفریقا بررسی کردند (Cian et al., 2019). فیاسچی و همکاران جابجایی زمین را با استفاده از روش پیکسل‌های کوهرنس و روش پراکنش‌کننده‌های دائمی، در مناطق معتدل اقیانوسی جمهوری ایرلند مطالعه کردند (Fiaschi et al., 2019). پولیشیک فیلیپاک و بورکوفسکی، بیشترین فرونشست تجمعی ناشی از استخراج معدن را در یکی از معادن قدیمی کشور لهستان با استفاده از ترکیب دو روش تداخل سنجی تفاضلی (DinSAR) و پراکنشگرهای پایدار (PSI) بررسی کردند. براساس نتیجه به‌دست‌آمده بیشترین نشست عمودی زمین به‌طور تجمعی در منطقه مورد مطالعه ۱ متر به‌طور سالانه بوده است (Pawluszek-Filipiak & Borkowski, 2021). ال کمالی و همکاران، تحلیل فضایی فرونشست زمین را در منطقه ریمه، امارات متحده عربی بررسی کردند. نتایج این تحقیق نشان‌دهنده آن است که سرعت فرونشست در این محدوده ۴۰ میلی‌متر در سال است که به علت افت ۱۲ متری سطح آب‌های زیرزمینی رخ داده است (El Kamali et al., 2021).

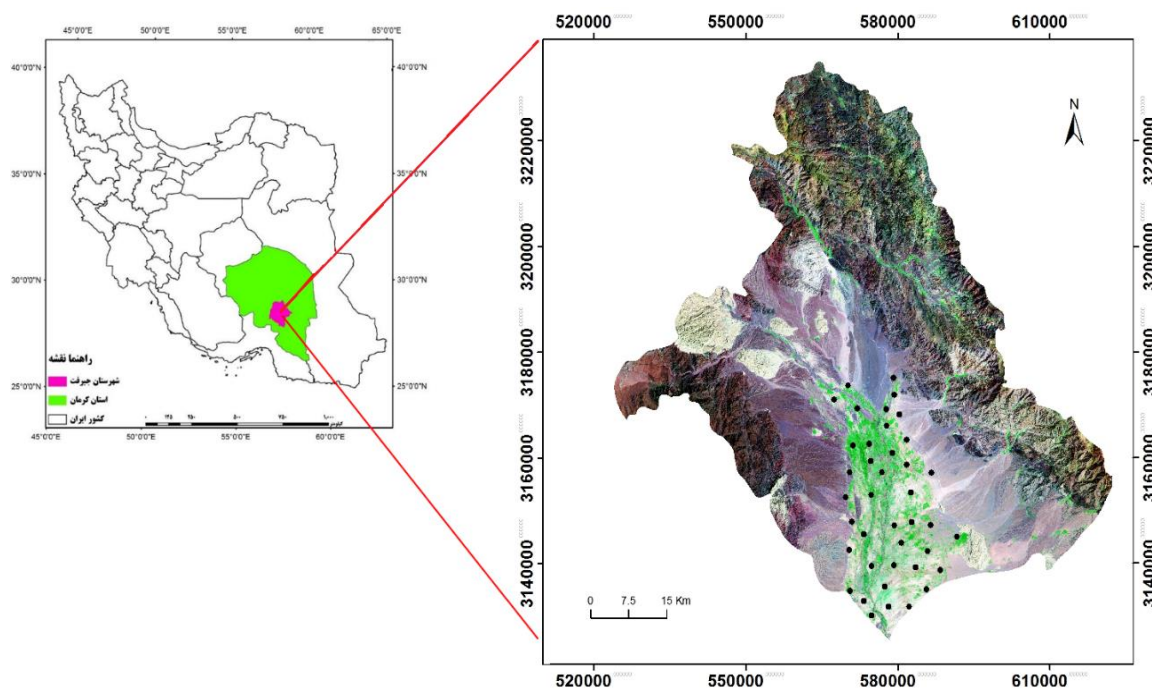
پژوهش‌های نامبرده اغلب مسئله فرونشست را تنها از یک منظر و آن هم برداشت بی‌رویه منابع آبی بررسی کرده‌اند؛ در حالی که پژوهش حاضر درصدد است تا عوامل مختلف و متفاوت مؤثر را در امر فرونشست تحلیل و ارتباط احتمالی این عوامل را بررسی کند؛ همچنین استفاده از تکنیک پیکسل‌های کوهرنس در راستای هدف مدنظر یکی دیگر از وجوه متمایز این پژوهش را تشکیل می‌دهد.

ضرورت انجام این پژوهش این‌گونه بیان می‌شود که در دوره بیست‌ساله اخیر، وقوع فرونشست و همچنین فروچاله‌ها به‌عنوان یکی از نگرانی‌های جدی در دشت جیرفت مطرح شده است (ندیری و همکاران، ۱۳۹۵، ص. ۱۱۵). دشت جیرفت طی سالیان اخیر به‌طور جدی با بحران خشک‌سالی و کاهش سطح آب زیرزمینی مواجه بوده است (رضایی و همکاران، ۱۳۹۴، ص. ۱۱۶). به‌علاوه، به نظر می‌رسد که در آینده نیز با توجه به تغییرات اقلیمی و با فرض ادامه یافتن شرایط موجود در بهره‌برداری از منابع آبی، کاهش سطح آب‌های زیرزمینی در این منطقه به‌طور چشمگیری ادامه خواهد یافت (شادفر و همکاران، ۱۳۹۴، ص. ۱۰۱). در واقع تغییرات الگوی کشاورزی، کاهش بارندگی و بروز خشک‌سالی‌های پیوسته به استفاده بدون برنامه و غیراصولی از منابع آب زیرزمینی و افت سطح آب‌های زیرزمینی در حوزه آبریز دشت جیرفت منجر شده و شرایط را برای وقوع و گسترش فرونشست زمین فراهم آورده است؛ بنابراین بررسی و پایش فرونشست به‌عنوان روشی کارآمد در شناسایی و نمایش وضعیت منطقه از نظر خطر وقوع فرونشست زمین برای برنامه‌ریزان و مدیران مطرح شده است و امکان طرح‌ریزی و اجرای برنامه‌های پیشگیری مناسب را میسر می‌کند؛ در نتیجه هدف این پژوهش، تحلیل فضایی فرونشست دشت جیرفت و ارزیابی اثرات برداشت بی‌رویه آب زیرزمینی بر فرونشست زمین و توسعه گسل‌هاست. در راستای این هدف، ۷۳ تصویر ستینل ۱ مربوط به دوره زمانی سال‌های ۲۰۱۴-۲۰۲۱ با استفاده از تکنیک CPT پردازش شد.

محدوده مورد مطالعه

دشت جیرفت با مساحت ۴۹۴۳ کیلومتر مربع میان طول‌های جغرافیایی ۵۷ درجه و ۲۰ دقیقه تا ۵۸ درجه و ۱۷ دقیقه شرقی و عرض‌های جغرافیایی ۲۸ درجه و ۱۱ دقیقه تا ۲۹ درجه شمالی در جنوب ایران و در استان کرمان قرار دارد. ارتفاع دشت جیرفت از سطح دریا ۵۵۰ تا ۸۰۰ متر متغیر است. این منطقه از نظر آب‌وهوایی جزو مناطق نیمه خشک به

شمار می‌آید و متوسط بارندگی سالانه آن در یک دوره درازمدت چهل ساله ۱۷۰ میلی‌متر است. سفره آب‌های زیرزمینی دشت جیرفت بین دو لایه محکم از گل پوشیده شده است و سفره‌ای تحت فشار را تشکیل می‌دهد که منبع تأمین آب آنها به‌طور تقریبی از ارتفاعات جیرفت و کوه‌های رابر، بافت و جبالبارز است. دشت جیرفت با افت سالانه سطح آب زیرزمینی به میزان ۱ متر و کسری حجم مخزن متوسط سالانه ۲۵ میلیون متر مکعب از سال ۱۳۸۳ توسط وزارت نیرو در اجرای مقررات مربوطه جزء دشت‌های ممنوعه اعلام شده و به دلیل تداوم روند افت و بهبود نیافتن سطح آب زیرزمینی جزء دشت‌های بحرانی است (شرکت سهامی آب و منطقه‌ای شهرستان جیرفت، ۱۴۰۰)



شکل (۱) نقشه موقعیت منطقه مورد مطالعه (منبع نگارندگان، ۱۴۰۱)

Figure (1) Location of the study area

روش‌شناسی پژوهش

داده‌های مورد استفاده

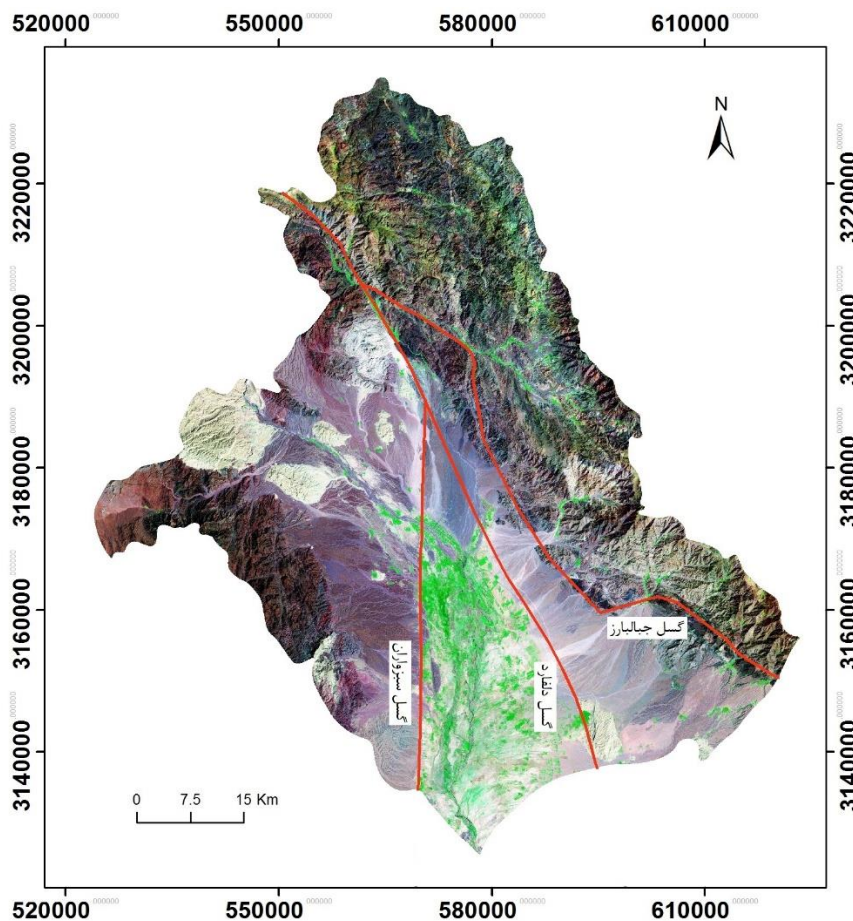
در این پژوهش از ۳۳ تصویر سنجنده Sentinel 1، ماهواره Soyuz سازمان فضایی اروپا با فرمت SLC از نوع مد IWS با پلاریزاسیون VV، مربوط به تاریخ‌های ۲۰۱۴/۰۴/۱۲ و ۲۰۲۱/۰۹/۲۱. این داده‌ها به تصاویر تک منظر تبدیل شده‌اند و اطلاعات آنها به هیچ عنوان مخدوش نشده است؛ همچنین مدل ارتفاع رقومی ۳۰ متری SRTM برای منطقه مورد مطالعه استفاده شد. جدول (۱) نشان‌دهنده مشخصات داده‌های مورد استفاده در این پژوهش است. به‌منظور ارزیابی منابع آب زیرزمینی دشت تعداد ۴۰ نمونه آب از چاه‌های منطقه مورد مطالعه جمع‌آوری شد که موقعیت چاه‌های نمونه‌برداری در شکل (۱) ارائه شده است.

جدول (۱) مشخصات تصاویر سنتینل ۱ مورد استفاده در تحقیق (منبع نگارندگان، ۱۴۰۱)

Table (1) The list of Sentinel 1 images used in the research

نوع گذر ماهواره	شماره گذر	محدوده زمانی	تعداد تصاویر	تعداد اینترفروگرام‌ها
نزولی	۴۸۸	۲۰۲۱/۰۹/۲۱ - ۲۰۱۴/۰۴/۱۲	۷۳	۷۲

دشت جیرفت به لحاظ قرار گرفتن در زون ساختاری ایران مرکزی، به لحاظ تکتونیکی پهنه‌ای فعال است؛ در نتیجه گسل‌های فعال زیادی نیز در منطقه وجود دارد (رشیدی و همکاران، ۱۳۹۶). به منظور تعیین ارتباط بین فرونشست با گسل‌ها، نقشه گسل‌های محدوده مورد مطالعه تهیه شد (شکل ۲)؛ همان‌طور که در شکل (۲) مشاهده می‌شود، سه گسل مهم سبزواران، جبال بارز و دلفارد محدوده مورد مطالعه را تحت تأثیر قرار داده‌اند. برای آماده‌سازی و انجام تجزیه و تحلیل‌های نهایی از نرم‌افزارهای SNAP، StaMPS و ArcGIS 10.3 استفاده شد.



شکل (۲) موقعیت گسل‌های منطقه (منبع نگارندگان، ۱۴۰۱)

Figure (2) The location of region faults

تکنیک پیکسل‌های منسجم (CPT)

ابتدا الگوریتم تکنیک پیکسل‌های منسجم (CPT) در دانشگاه کاتالونیا به‌عنوان تکنیکی پیشرفته DInSAR برای استخراج حرکت خطی و غیرخطی از مجموعه‌ای از تداخل‌نگارهای تفاضلی و تصاویر با کوهرنسی بالا توسعه داده

شد (Blanco-Sánchez et al., 2008, p. 1167; Navarro-Hernández et al., 2020; Duque et al., 2007, p. 7). اینترفروگرام تفاضلی یک تداخل نگاشت معمولی است که فاز توپوگرافی آن حذف شده است. این بخش با استفاده از اطلاعات مداری و DEM خارجی محاسبه می‌شود. فاز تداخلی واقعی یک پیکسل منفرد نه تنها شامل تغییر شکل بین زمان‌های دریافت دو تصویر SAR بوده، بلکه حاوی مؤلفه‌های دیگری است که اطلاعات مختلفی را پنهان می‌کند. هدف از این الگوریتم، جداسازی فاز جابه‌جایی از بقیه فازها در مجموعه تداخل نگارهاست. عبارت زیر نشان‌دهنده تمام مؤلفه‌های فاز تداخل سنجی است (Blanco-Sánchez et al. 2008):

$$\phi(T, B_n) = \frac{4\pi}{\lambda} \cdot (v \cdot T + \beta) + \frac{4\pi}{\lambda} \frac{B_n}{r_0 \sin \theta} \cdot \varepsilon + n_{atm} + n \quad (1) \text{ رابطه}$$

که در آن ϕ فاز تداخل سنجی در یک پیکسل است، λ طول موج، (T, B_n) خطوط پایه زمانی و مکانی هستند، v نرخ خطی تغییر شکل، β تغییر شکل غیرخطی، r_0 فاصله سنسور، θ زاویه فرود محلی، ε خطای DEM، n_{atm} مربوط به فاز اتمسفر و n نویز است.

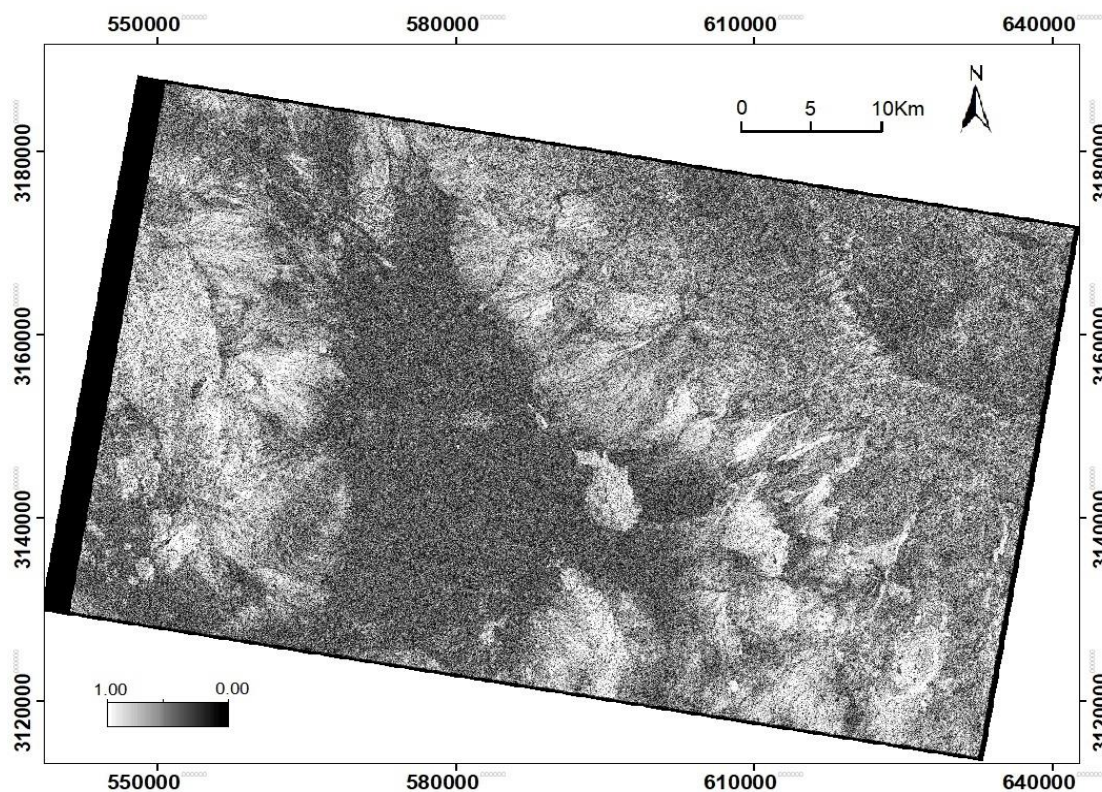
رویکرد روش CPT در چهار بخش اصلی خلاصه می‌شود. اولین مورد، شامل بهینه‌سازی انتخاب تداخل نگارها با در نظر گرفتن خطوط پایه زمانی و مکانی مناسب برای به حداکثر رساندن تشخیص پیکسل‌ها، بهینه‌سازی استخراج خطای تغییر شکل و DEM و کاهش میزان داده‌ها برای پردازش است. مرحله دوم، انتخاب پیکسل‌هایی است که کیفیت فاز کافی و مطلوبی دارند. مرحله سوم، تخمین فاز تغییر شکل است. برای این هدف، الگوریتم، نرخ خطی تغییر شکل و خطای DEM را از طریق تنظیم و اعمال مدلی خطی بر روی داده‌ها در نظر می‌گیرد. آخرین مرحله تخمین فاز غیرخطی تغییر شکل است. هنگامی که فاز خطی تغییر شکل و خطای DEM محاسبه و سهم آنها از تداخل نگارها حذف شد، CPT از رفتار متفاوت پدیده‌های جوی و فاز غیرخطی تغییر شکل برای جداسازی سهم آنها از فاز اصلی استفاده می‌کند. در این مرحله، ترکیبی از فیلترهای زمانی و مکانی برای استخراج فاز اتمسفر از فاز غیرخطی تغییر شکل، اعمال می‌شود (Duque et al, 2007, p. 7). از آنجایی که در این روش مرحله تخمین فاز تغییر شکل بعد از انتخاب پیکسل‌های با کوه‌رنسی زیاد انجام و پیکسل‌های مورد بررسی محدود می‌شود، دقت کار بیشتر از روش‌های معمول در تداخل سنجی است و این امر باعث می‌شود که در این پژوهش از این روش استفاده شود.

روش انجام کار

اولین مرحله پردازش CPT، تولید تداخل نگارهای تفاضلی است. ابتدا تصاویر به صورت دو به دو هم‌مرجع شده و تداخل نگارها از بین مواردی انتخاب می‌شوند که دارای خطوط مبنا مکانی کوچک‌تر از ۱۰۰ متر و خطوط پایه زمانی کوچک‌تر از ۳۶۵ باشند. بر این اساس ۷۲ تداخل نگاشت تولید شد. همراه با تداخل نگارهای مختلف، نقشه‌های کوه‌رنسی مرتبط با آنها نیز تولید می‌شوند. میزان کوه‌رنسی تخمین‌گر خوبی برای کیفیت فاز است و در مرحله انتخاب پیکسل از آن استفاده می‌شود. مقادیر کوه‌رنسی از ۰، فاز به طور کامل غیرهمبسته یا نویز خالص تا ۱، فاز منسجم یا بدون نویز، متغیر است.

در مرحله دوم برای به دست آوردن سری‌های زمانی تغییر شکل که شامل مؤلفه‌های خطی و غیرخطی و خطای

DEM می‌شود، تداخل‌نگارهای تفاضلی پردازش می‌شوند. همه پیکسل‌های تصویر به دلیل نبود همبستگی برای پردازش مناسب نیستند. میان معیارهای مختلف انتخاب پیکسل، از معیار مبتنی بر کوهرنسی استفاده شد؛ بنابراین تمام پیکسل‌های با میانگین مقدار کوهرنسی زیر ۰/۶ کنار گذاشته شدند. شکل (۳) نشان‌دهنده نقشه کوهرنسی ایجادشده توسط CPT برای دشت جیرفت است که در آن روشن‌ترین مناطق، کوهرنس‌ترین مناطق هستند که بر روی زمین‌های بایر، مناطق کوهستانی و مرتفع و مناطق مسکونی انطباق دارند؛ زیرا این پدیده‌ها در طول زمان نشان‌دهنده تغییر بسیار کمی هستند. از سوی دیگر، تاریک‌ترین مناطق مربوط به کشاورزی است. آنها کمترین مقدار هم‌دوسی را دارند؛ زیرا پوشش گیاهی در طول زمان ثابت نمی‌ماند و باعث ایجاد عدم همبستگی زمانی در فاز تداخل‌سنجی می‌شود.



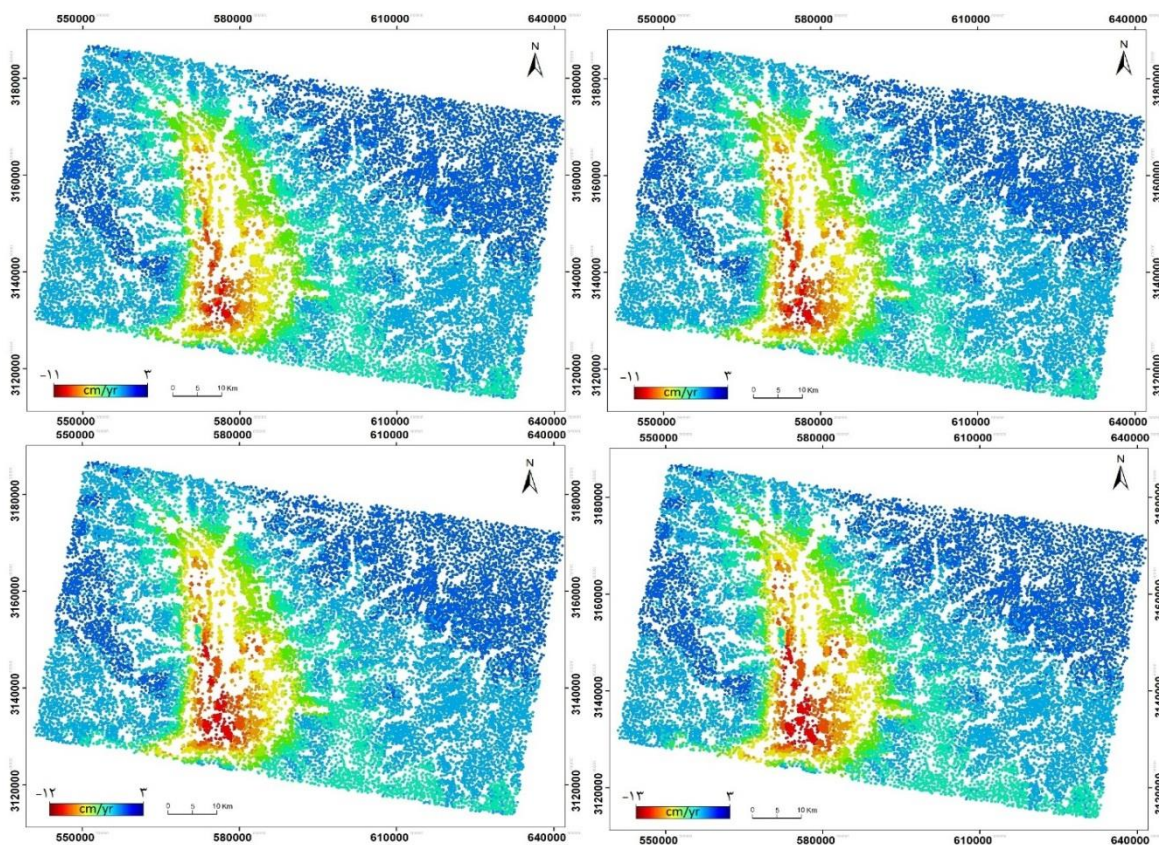
شکل (۳) نقشه کوهرنسی متوسط منطقه مورد مطالعه مربوط به سال‌های ۲۰۱۴ تا ۲۰۲۱ (منبع نگارندگان، ۱۴۰۱)

Figure (3) The average coherence map of the study area for the years 2014 to 2021

یافته‌های پژوهش و تجزیه و تحلیل آنها

شکل (۴) نشان‌دهنده مقادیر جابه‌جایی‌های رخ داده در امتداد خط دید ماهواره در نتیجه انجام پردازش داده‌های سنتینل ۱ از تاریخ ۱۲ آوریل ۲۰۱۴ تا ۲۱ سپتامبر ۲۰۲۱ است. تعداد کل پیکسل‌های محاسبه‌شده از مجموعه داده‌های سنتینل ۱ با تکنیک CPT به ۲۵۷۱ رسید. محاسبات انجام‌شده نشان‌دهنده نرخ تغییر شکل زیادی با سرعت حداکثر تا ۱۳- سانتی‌متر در سال در جهت دید ماهواره از سال ۲۰۱۴ تا ۲۰۲۱ در نواحی مرکز و بخش‌های جنوبی دشت جیرفت است. مقادیر مثبت نشان‌دهنده آن است که سطح در حال بالا آمدن است. بیشتر این ارزش‌ها در کوه‌های

اطراف دشت قرار دارند. حرکت ممکن است مربوط به عوامل تکتونیکی و فرایند ایزوستازی باشد. در مقابل، مقادیر منفی نشان‌دهنده فرونشست است که اغلب متمرکز بر نواحی مرکزی و جنوبی دشت قرار دارد؛ همان‌طور که در شکل (۴) مشاهده می‌شود، جابه‌جایی در راستای دید ماهواره نقاط از ۳+ میلی‌متر تا ۱۳- میلی‌متر متغیر است. جابه‌جایی‌های رخ داده در جهت دید ماهواره است. به‌طوری که اعداد مثبت نشان‌دهنده نزدیک شدن سطح به ماهواره و بالآمدگی و اعداد منفی نشان‌دهنده فاصله گرفتن سطح از ماهواره و فرافتادگی است. نقاط قرمز رنگ واقع در محدوده مورد مطالعه در طول یک سال دچار بیش از ۱۱ تا ۱۳ میلی‌متر فرونشست شده‌اند. علاوه بر آن، نتایج به‌دست آمده نشان‌دهنده روند فزاینده گسترش محدوده فرونشست طی گذشت زمان در دشت جیرفت است. به‌طوری که از سال ۲۰۱۴ تا ۲۰۲۲ وسعت مناطق درگیر با پدیده فرونشست از ۵۳۰ کیلومترمربع در سال ۲۰۱۴ به ۵۸۰ کیلومترمربع در سال ۲۰۲۲ رسیده و جهت گسترش نیز در از نواحی جنوبی دشت به سمت مناطق شمالی است؛ همچنین علاوه بر وسعت نرخ فرونشست نیز طی بازه زمانی مطالعاتی افزایش یافته است. به‌طوری که از نرخ ۱۱ سانتی‌متر در سال ۲۰۱۴ به ۱۳ سانتی‌متر در سال ۲۰۲۲ رسیده است.

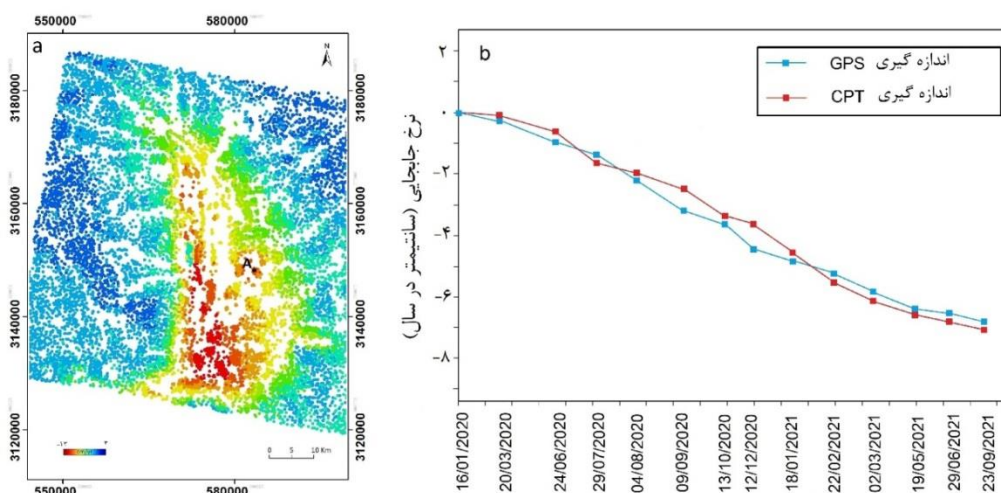


شکل (۴) نقشه جابه‌جایی منطقه مورد مطالعه مربوط به دوره زمانی a: ۲۰۱۴-۲۰۱۶ b: ۲۰۱۶-۲۰۱۸ c: ۲۰۱۸-۲۰۲۰ d: ۲۰۲۰-۲۰۲۲ (منبع نگارندگان، ۱۴۰۱)

Figure (4) The displacement map of the study area related to the period a: 2014-2016 b: 2016-2018 c: 2020-2018 d: 2022-2020

اعتبارسنجی

اعتبارسنجی روش کار براساس اندازه‌گیری‌های دقیق مشاهدات GPS واقع در شهر عنبرآباد انجام شد که متعلق به مرکز ملی نقشه‌برداری ایران است. اندازه‌گیری GPS این نقطه از سال 2020 تا 2021 با استفاده از گیرنده Leica GX 1220 انجام گرفته است. سری زمانی تغییر شکل به‌دست‌آمده از اندازه‌گیری‌های GPS و روش CPT در نقطه A ترسیم شد که در شکل (۵) آمده است؛ همان‌طور که در شکل (۵b) مشاهده می‌شود و مقایسه نمودار سری زمانی جابه‌جایی دو روش نشان می‌دهد، جابه‌جایی به‌دست‌آمده از هر دو روش اندازه‌گیری با یکدیگر مطابقت دارد؛ همچنین میزان خطای RMSE بین دو نمودار ۰/۱۴۲ میلی‌متر برآورد شد.

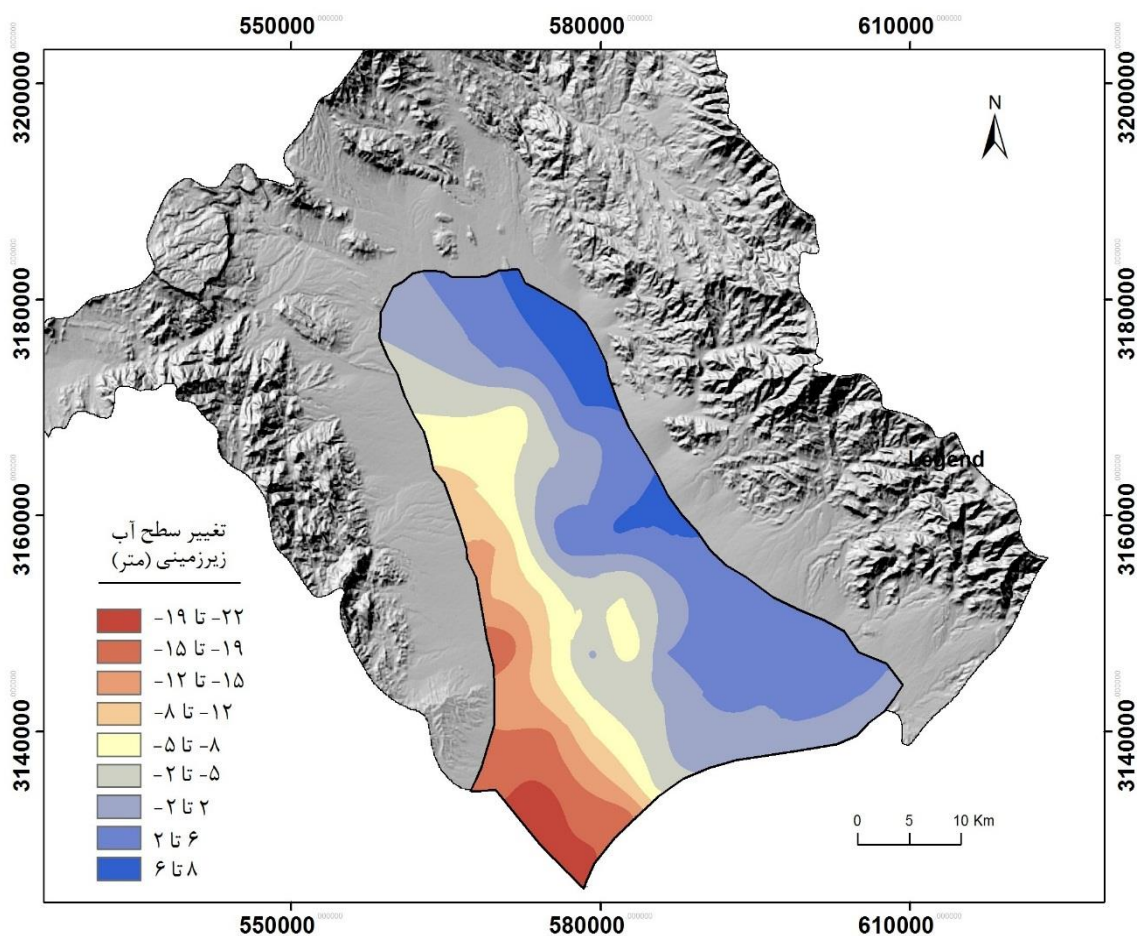


شکل (۵) اعتبارسنجی نقشه جابه‌جایی حاصل از روش CPT، a: موقعیت نقطه آزمون شده b: نمودار سری زمانی حاصل از روش GPS و CPT (منبع نگارندگان، ۱۴۰۱)

Figure (5) The displacement map validation obtained by the CPT method, a: Position of the tested point b: Time series diagram obtained by the GPS and CPT methods

تغییرات سطح آب‌های زیرزمینی

به‌منظور شناخت وضعیت آبخوان دشت جیرفت از داده‌های هیدرولوژی ۴۰ چاه بهره‌برداری در طول یک دوره آماری ده‌ساله استفاده شد. موقعیت چاه‌های مورد مطالعه در شکل (۱) مشاهده می‌شود. میزان افت سطح آب در بخش‌هایی از محدوده مورد مطالعه به‌طور متوسط به ۲ متر در سال نیز می‌رسد. بر این اساس، نقشه تغییرات سطح آب زیرزمینی دشت جیرفت در طول سال‌های ۱۳۹۰ تا ۱۳۹۹ ترسیم شد (شکل ۶)؛ همان‌طور که در شکل (۶) مشاهده می‌شود، بیشترین افت آب در بخش‌های جنوبی و غربی دشت رخ داده است. در بخش‌های جنوبی دشت به دلیل برداشت زیاد و تغذیه کم نسبت به قسمت‌های شمالی و شرقی افت بیشتری داشته است. البته در بخش‌های کوچکی از دشت سطح آب‌های زیرزمینی بالا آمده که این موضوع به دلیل قرارگیری این مناطق در ورودی تغذیه (رشته‌کوه‌های شمالی و شرقی دشت) است.



شکل (۶) نقشه تغییرات سطح آب‌های زیرزمینی منطقه مورد مطالعه (منبع نگارندگان، ۱۴۰۱)

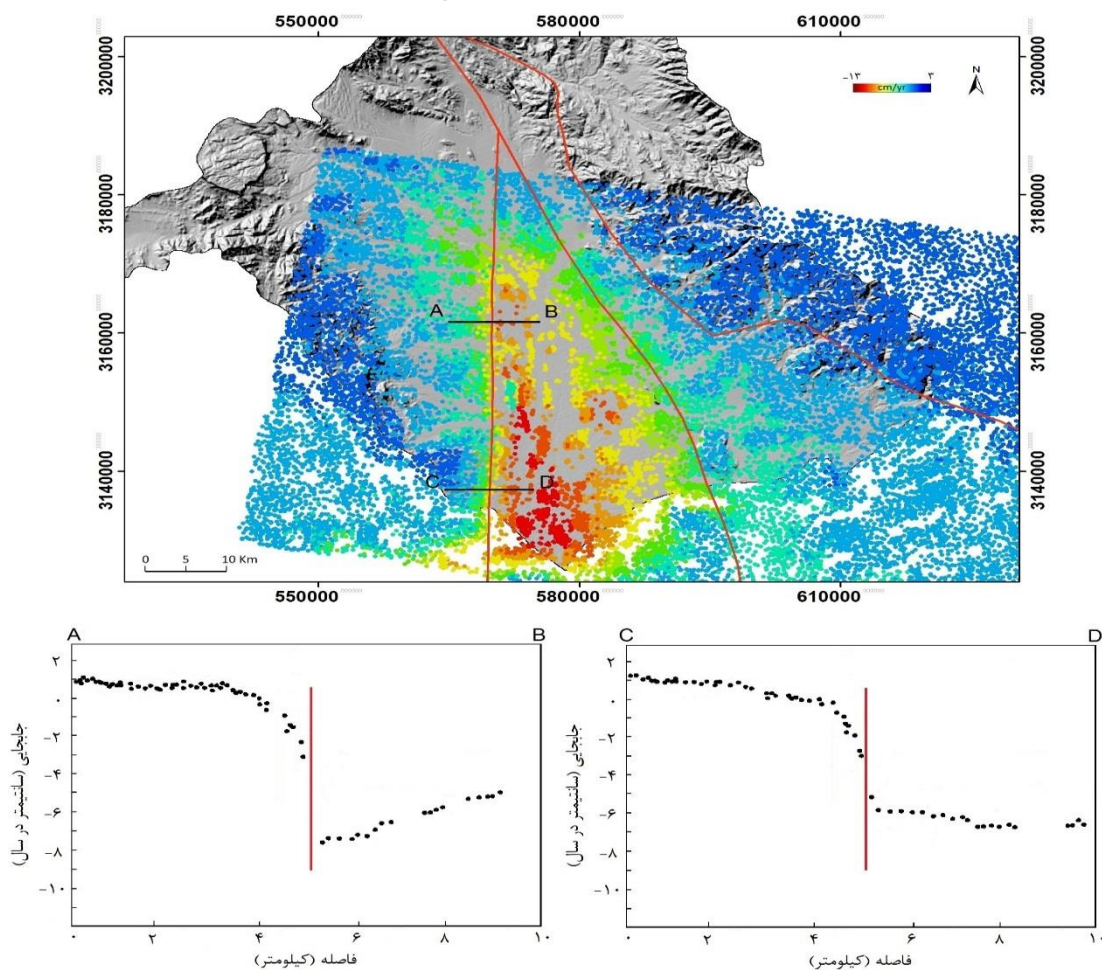
Figure (6) The map of groundwater level changes in the study area

ارتباط بین گسل‌ها و فرونشست

به منظور تعیین ارتباط بین گسل‌ها و جابه‌جایی‌های رخ داده در منطقه مورد مطالعه، در محیط GIS نقشه موقعیت گسل‌ها بر روی نقشه جابه‌جایی روی هم اندازی (Overlay) شد (شکل ۷)؛ همان‌طور که در شکل (۷) مشاهده می‌شود، محدوده فرونشست توسط گسل‌های دلفارد و سبزواران محصور شده است. نقشه تغییر شکل CPT نشان‌دهنده همبستگی فضایی با گسل‌های مذکور است که مؤید فعال بودن این گسل‌هاست؛ همچنین نشان‌دهنده کنترل فضایی فرونشست زمین است.

برای بررسی بیشتر این ارتباط، اقدام به تهیه نیمرخ جابه‌جایی، در راستای عمود بر گسل سبزواران شد؛ بنابراین نیمرخ نقاط جابه‌جایی در راستای دو پاره خط AB و CD ترسیم شد (شکل ۷). نتایج به دست آمده نشان‌دهنده تأثیر گسل سبزواران در فرونشست است؛ همان‌طور که در شکل (۷) دیده می‌شود، در امتداد و راستای گسل تغییر ناگهانی

در نرخ تغییر شکل نقاط رخ داده است، نقاط قرمز رنگ بیشترین نرخ جابه‌جایی و نقاط سبز رنگ به‌طور تقریبی پایدار است. این تغییر در سرعت تغییر شکل در هر دو طرف گسل بسیار واضح است.



شکل (۷) نیم‌رخ جابجایی‌های رخ داده در راستای عمود بر گسل سبزوآران (منبع نگارندگان، ۱۴۰۱)

Figure 7- Profile of displacements that occur perpendicular to the Sabzevaran fault

ارتباط بین ضخامت خاک و فرونشست

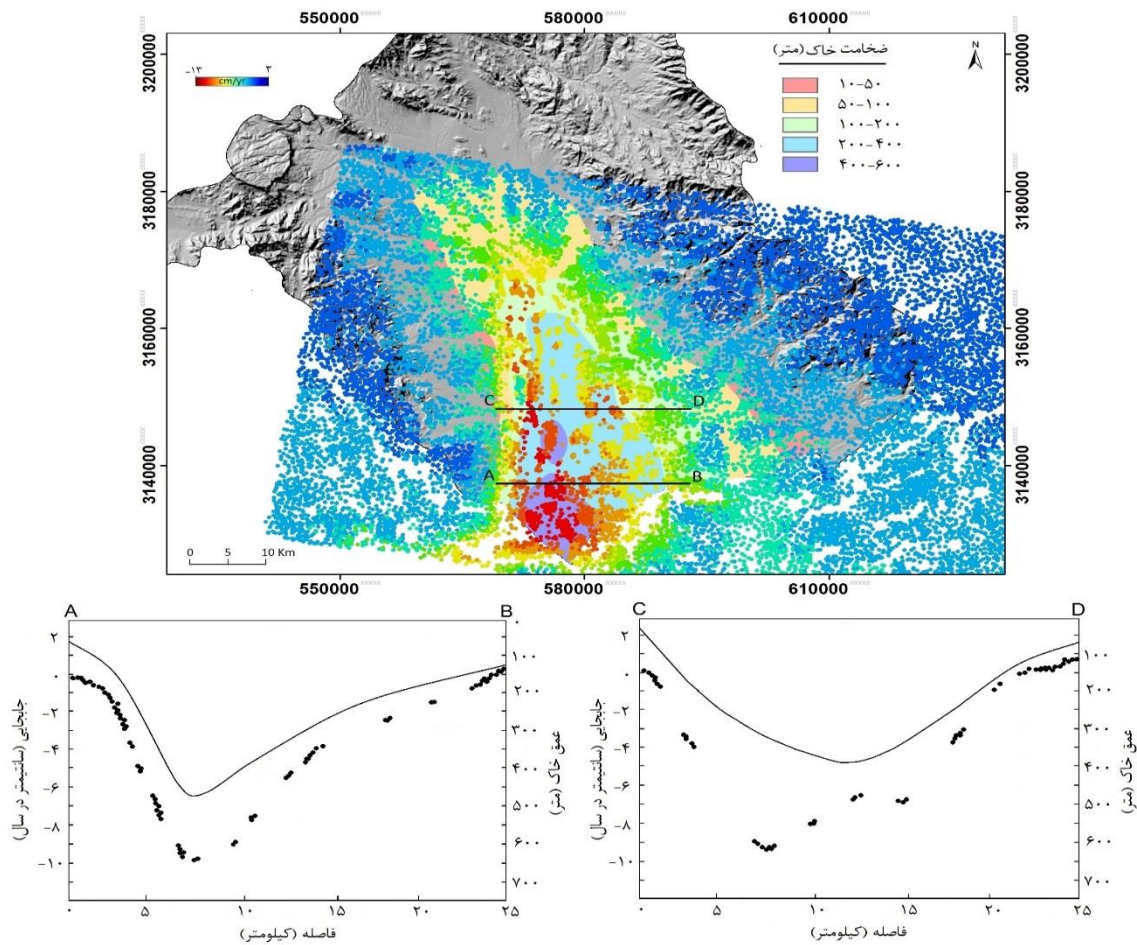
پاسخ مکانیکی سیستم آبخوان به افزایش تنش مؤثر و توزیع و ضخامت خاک‌های تحکیم‌نشده نقش کلیدی در بزرگی نشست توسعه‌یافته دارد (Navarro-Hernández et al., 2020). سیستم آبخوان دشت جیرفت روی یک لایه ضخیم از رسوبات آبرفتی با ضخامت انباشته تا ۶۰۰ متر توسعه یافته است (شرکت سهامی آب و منطقه‌ای شهرستان جیرفت، ۱۴۰۰). برای توضیح وابستگی فرونشست به ضخامت رسوب و پاسخ مکانیکی خاک (یعنی تغییر شکل پذیری آن)، از معادله زیر استفاده می‌شود (Tomas et al., 2010, p. 105):

$$\Delta D = \Delta h * D * S_{sk} = \Delta h * S_k \quad \text{رابطه (۲)}$$

به‌طوری که ΔD نشست لایه تغییر شکل‌پذیر، D ضخامت به متر، Δh کاهش سطح استاتیک آب زیرزمینی

برحسب متر، و Ssk ضریب ذخیره مخصوص است ($m-1$) که نشان‌دهنده تغییر شکل‌پذیری سیستم آبخوان است و Sk ضریب ذخیره‌سازی محسوب می‌شود. براساس رابطه (۲)، اگر سطح استاتیکی آب زیرزمینی کاهش یابد، تنش افزایش می‌یابد (یعنی Δh افزایش می‌یابد) که باعث نشست دائمی در خاک می‌شود. این نشست‌ها در مناطقی با ضخامت خاک انباشته‌شده (یعنی با مقادیر D بالاتر) بیشتر خواهد بود. علاوه بر این، بزرگی تغییر شکل بستگی به میزان تغییر شکل یک لایه سنگ‌شناسی دارد (یعنی به ضریب ذخیره‌سازی، Sk) بستگی دارد.

شکل (۸) نشان‌دهنده نقشه توزیع ضخامت خاک است؛ همان‌طور که مشاهده می‌شود، ضخامت خاک در بخش‌های جنوبی دشت بیشتر است و رسوبات انباشته‌شده به بیشترین ضخامت خود می‌رسند. مرزهای شرقی و غربی حوضه توسط کوه‌هایی محدود می‌شود که از سنگ‌های آتشفشانی و رسوبی تشکیل شده‌اند. این سنگ‌ها نسبت به رسوبات ضعیف و آبرفتی پوشاننده دشت، توانمندتر و کمتر تغییر شکل‌پذیر هستند. هنگام مقایسه مشخص است که تغییر شکل‌پذیرترین خاک‌ها با مناطق فرونشست منطبق هستند. به‌منظور بررسی بیشتر ارتباط بین فرونشست و میزان ضخامت خاک، اقدام به ترسیم نیمرخ جابه‌جایی و عمق خاک شد؛ همان‌طور که در شکل (۸) مشاهده می‌شود، در راستای دو مقطع AB و CD نیمرخ روند تغییرات جابه‌جایی سطح زمین و ضخامت خاک ترسیم شد. نتایج نشان‌دهنده این است که هم‌زمان هرچه ضخامت خاک مناطق افزایش یابد، نرخ جابه‌جایی در آن مناطق نیز افزایش می‌یابد و بالعکس؛ بنابراین همبستگی بین ضخامت خاک نرم و فرونشست زمین در دشت جیرفت تأیید می‌شود.

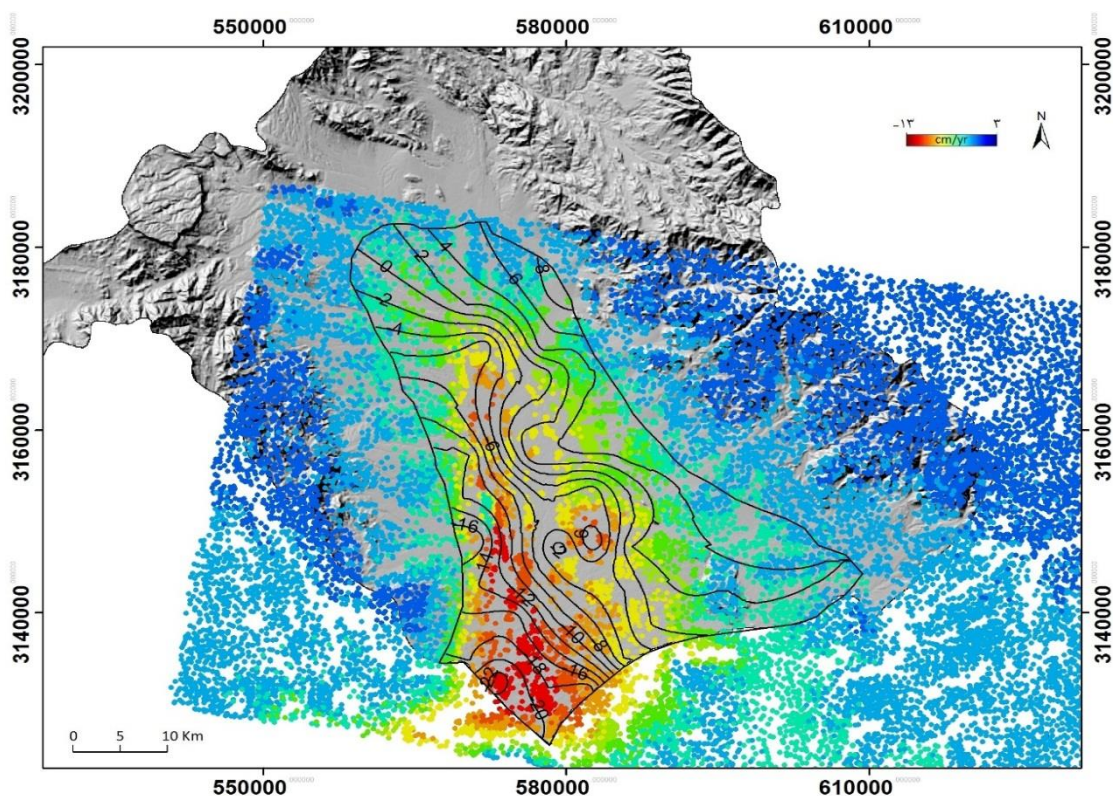


شکل (۸) تعیین ارتباط بین ضخامت خاک با نرخ جابه‌جایی سطح زمین در طول پروفیل‌های AB و CD (منبع نگارندگان، ۱۴۰۱)

Figure (8) The relationship between soil thickness and ground displacement rate along AB and CD profiles

ارتباط بین میزان افت سطح آب زیرزمینی و فرونشست

به‌منظور تعیین ارتباط بین میزان افت سطح آب‌های زیرزمینی و جابه‌جایی‌های رخ داده در منطقه مورد مطالعه، در محیط GIS نقشه تغییرات سطح آب زیرزمینی به صورت خطوط هم‌تراز افت (شکل ۶) با نقشه جابه‌جایی روی هم اندازی (Overlay) شد (شکل ۹)؛ همان‌طور که در شکل (۹) مشاهده می‌شود، محدوده‌های با نرخ فرونشست زیاد منطبق بر مناطقی است که دارای میزان افت سطح آب بیشتری است و از طرفی، در محدوده‌هایی که میزان افت آب صفر یا سطح آب زیرزمینی افزایش یافته (مناطق حاشیه شمالی و غربی دشت جیرفت)، سطح زمین پایدار بوده یا حتی دچار بالاآمدگی جزئی شده است که این شواهد مؤید ارتباط مستقیم فرونشست زمین با برداشت بی‌رویه منابع آب زیرزمینی دشت است؛ بنابراین این گونه بیان می‌شود که استخراج بی‌رویه آب‌های زیرزمینی یکی از مهم‌ترین عوامل محرک فرونشست زمین در این منطقه است؛ زیرا تغییرات تنش خاک که باعث نشست می‌شود، با تغییرات سطح آب‌های زیرزمینی مطابق با رابطه (۲) مرتبط است؛ در نتیجه این پژوهش رابطه تنگاتنگ تغییرات سطح آب‌های زیرزمینی را با فرونشست زمین و همچنین با ضخامت خاک تأیید می‌کند.



شکل (۹) ارتباط بین تغییرات سطح آب‌های زیرزمینی و فرونشست زمین (منبع نگارندگان، ۱۴۰۱)
 Figure (9) The relationship between groundwater level changes and land subsidence

نتایج به دست آمده از تحلیل عوامل مختلف اثرگذار در فرونشست دشت جیرفت، نشان‌دهنده تأثیرپذیری بخش‌های جنوبی و شرقی دشت به طور هم‌زمان از برداشت بی‌رویه و فعالیت گسل‌هاست. به طوری که مقایسه اشکال (۹) و (۷) به خوبی نشان‌دهنده این مطلب است. وجود ارتباط بین فرونشست با برداشت بی‌رویه منابع آب زیرزمینی از یک طرف و گسل‌های فعال از طرف دیگر، خطر تحریک هر یک از این عوامل را توسط عامل دیگر افزایش می‌دهد. به طوری که افزایش برداشت از منابع آبی دشت باعث فرونشست بیشتر و فرونشست بیشتر خود باعث تحریک بیشتر گسل‌های فعال منطقه می‌شود و خطر لرزه‌خیزی منطقه افزایش می‌یابد یا از طرف دیگر، فعالیت تکتونیکی گسل باعث فرونشست و فرونشست دشت نیز موجب فشردگی و تخریب آبخوان می‌شود. نکته جالب توجه دیگری که از بررسی نتایج به دست می‌آید، روند گسترش محدوده‌های فرونشستی در سطح دشت جیرفت با گذشت زمان است. به طوری که مساحت محدوده‌های فرونشستی از ۵۳۰ کیلومترمربع در سال ۲۰۱۴ به ۵۸۰ کیلومترمربع در سال ۲۰۲۲ افزایش یافته است، بررسی جهات رو به گسترش نشان‌دهنده آن است که راستای آن با مناطق با افت آب زیرزمینی بیشتر منطبق است؛ بنابراین کنترل برداشت از منابع آب زیرزمینی مانع از فرونشست مناطق بیشتر دشت می‌شود.

همان‌طور که در شکل (۸) مشاهده می‌شود، میزان فرونشست دشت جیرفت با ضخامت خاک موجود رابطه مستقیم دارد. به طوری که در مناطق مرکزی و جنوبی دشت که ضخامت خاک افزایش می‌یابد، نرخ فرونشست نیز

بیشتر می‌شود و بلعکس. البته رابطه به‌دست‌آمده بین ضخامت خاک و فرونشست با نتایج حاصل از تحقیقات متئوس و همکاران و ناوارو هرناندز و همکاران همخوانی دارد و نتایج مذکور را تأیید می‌کند (Navarro-Hernández et al., 2020; Mateos et al., 2017). علاوه بر این، نتایج به‌دست‌آمده از این پژوهش در رابطه با وجود ارتباط بین گسل‌های منطقه و پدیده فرونشست، از سوی محققان دیگری همچون هو و همکاران و معصومی و همکاران نیز ارائه شده است. مطالعات انجام‌گرفته در زمینه فرونشست در اغلب دشت‌های کشور بر نقش برداشت بی‌رویه از مخازن آب‌های زیرزمینی تأکید دارد و کمتر به بررسی عوامل احتمالی دیگر توجه می‌کند؛ در حالی که نتایج حاصل از این پژوهش علاوه بر برداشت بی‌رویه به نقش گسل‌ها و ضخامت خاک نیز در پدیده فرونشست دشت اشاره می‌کند (Hu et al., 2019; Masoumi et al., 2022)؛ بنابراین هرچه عامل مؤثر در امر فرونشست بهتر شناخته شود، مدیریت و برنامه‌ریزی برای کنترل آن بهتر انجام می‌شود.

نتیجه‌گیری

در این پژوهش، پدیده فرونشست دشت جیرفت بررسی و ارتباط آن با عوامل مختلف تحلیل شد. جابه‌جایی‌های رخ داده و به‌دست‌آمده از تکنیک CPT نشان‌دهنده این است که منطقه مورد مطالعه دچار فرونشست پیش‌رونده‌ای شده است. نرخ فرونشست در بخش‌های جنوب و جنوب شرقی دشت از ۱۱ سانتی‌متر در سال به ۱۳ سانتی‌متر در سال طی یک دوره هشت ساله رسیده است. علاوه بر این، طی این مدت وسعت مناطق درگیر با این پدیده از ۵۳۰ کیلومتر مربع به ۵۸۰ کیلومتر مربع رسیده است و به مرور زمان به سمت قسمت‌های شمالی‌تر دشت کشیده می‌شود. ادامه این روند محدوده‌های فرونشستی را علاوه بر دشت به نواحی مسکونی و شهر جیرفت نیز تسری می‌دهد. بررسی تغییرات سطح آب‌های زیرزمینی دشت جیرفت و مطابقت آن با محدوده‌های فرونشستی نشان‌دهنده آن بود که برداشت بی‌رویه از آبخوان از عوامل مهم و کلیدی در ایجاد این پدیده بوده است؛ بنابراین کنترل و مدیریت برداشت از منابع آب‌های زیرزمینی از روند رو به گسترش فرونشست و درگیرکردن مناطق جدید جلوگیری می‌کند. علاوه بر این، شایان ذکر است، مناطقی که بیشترین نرخ فرونشست را دارند، با مناطقی دارای ضخامت بیشتر خاک مطابقت دارند؛ همچنین در این پژوهش با توجه به محصوربودن دشت جیرفت با گسل‌ها، به بررسی تأثیر آنها بر فرونشست توجه شد. نتایج حاصل از این بررسی نشان‌دهنده آن بود که گسل سبزواران کنترل‌کننده فرونشست بوده و این پدیده را تحت تأثیر قرار داده است. به طوری که نرخ جابه‌جایی در دو سمت گسل بسیار متفاوت است و این اختلاف در جابه‌جایی به ۸ سانتی‌متر در سال نیز می‌رسد. در نهایت فرونشست دشت جیرفت در نتیجه دو عامل است: یکی، برداشت بی‌رویه آب‌های زیرزمینی و دیگری، فعالیت گسل‌ها که نتیجه اثر هرکدام بر عامل دیگر تأثیر می‌گذارد و این مسئله باعث تشدیدشدن پدیده فرونشست می‌شود؛ بنابراین با توجه به رابطه قوی بین گسل و استخراج آب‌های زیرزمینی با فرونشست زمین در دشت جیرفت، ادامه برداشت بی‌رویه از آبخوان باعث تشدید خطر فرونشست و این نیز به تحریک بیشتر گسل‌های منطقه و در نتیجه پیامدهای مخرب ناشی از آن می‌شود.

منابع

- بهنیافار، ابوالفضل، قنبرزاده، هادی، و اشراقی، علی (۱۳۸۹). بررسی عوامل مؤثر در فرونشست‌های دشت مشهد و پیامدهای ژئومورفیک آن. *فصلنامه جغرافیایی چشم‌انداز زاگرس*، ۲(۵)، ۱۳۱-۱۴۶. <https://www.sid.ir/paper/175753/fa>
- رشیدی، احمد، خطیب، محمد مهدی، موسوی، سید مرتضی، و جمور، یحیی (۱۳۹۶). برآورد جنبایی گسل‌های فعال در جنوب و باختر بلوک لوت بر پایه گشتاورهای زمین‌شناختی، لرزه‌ای و ژئودیتیک. *فصلنامه علوم زمین*، ۲۶(۱۰۴)، ۲۱۱-۲۲۲. <https://www.sid.ir/paper/32674/fa>
- رضایی، طاهر، بنفشه، علی، جلالی، محمد، عنصری، مهدی، ضرغامی، محمود، واصغری مقدم، احمد (۱۳۹۴). بررسی تأثیر اقلیم بر تراز آب زیرزمینی حوزه آبریز تسوج به روش ریزمقیاس نمایی آماری. *تحقیقات منابع آب ایران*، ۱۱(۲)، ۹۷-۱۰۶. https://www.iwrr.ir/article_13792.html
- رکنی، جعفر، حسین زاده، رضا، لشکری پور، غلامرضا، و ولایتی، سعیدالله (۱۳۹۵). بررسی فرونشست زمین، چشم‌اندازها و تحولات ژئومورفولوژی ناشی از آن در دشتهای تراکمی مطالعه موردی: دشت نیشابور. *فصلنامه مطالعات جغرافیایی مناطق خشک*، ۷(۲۴)، ۳۸-۲۱. https://jargs.hsu.ac.ir/article_161414.html
- رنجبر، محسن، و جعفری، نسرين (۱۳۸۸). بررسی عوامل مؤثر در فرونشست زمین دشت اشتهارد. *جغرافیا (انجمن جغرافیایی ایران)*، ۶(۱۹)، ۱۵۵-۱۶۶. https://mag.iga.ir/article_253531.html
- شادفر، صادق، نصیری، امیر، چیتگر، سعید، و احمدی، علی (۱۳۹۴). پهنه‌بندی خطر فرونشست زمین با استفاده از روش تحلیل سلسله‌مراتبی، ناحیه مورد مطالعه (شهر بوئینزهره). *جغرافیایی سرزمین*، ۱۲(۴۸)، ۱۱۶-۱۰۱. <https://www.sid.ir/paper/116305/fa>
- شرکت سهامی آب و منطقه ای شهرستان جیرفت (۱۴۰۰). *فهرست دشت‌های ممنوعه*. <https://www.krrw.ir>
- شریفی کیا، محمد (۱۳۹۱). تعیین میزان و دامنه فرونشست زمین به کمک روش تداخل سنجی راداری در دشت نوق- بهرمان. *مجله مدرس علوم انسانی- برنامه‌ریزی و آمایش فضا*، ۱۶(۳)، ۳۴-۴۲. <https://www.sid.ir/paper/171911/fa>
- شفیعی، نجمه، گلی مختاری، لیلا، امیراحمدی، ابوالقاسم، و زندی، رحمان (۱۴۰۰). تحلیل فضایی فرونشست زمین و افت آب زیرزمینی با استفاده از مدل GWR (مطالعه موردی: آبخوان نورآباد ممسنی). *نشریه علمی جغرافیا و برنامه‌ریزی*، ۲۵(۷۶)، ۱۷۱-۱۵۹. <https://doi.org/10.22034/gp.2021.11306>
- صالحی، رضا، غفوری، محمد، لشکری پور، غلامرضا، و دهقانی، مهدی (۱۳۹۲). بررسی فرونشست دشت مهبیار جنوبی با استفاده از روش تداخل سنجی راداری. *فصلنامه علمی پژوهشی مهندسی آبیاری و آب*، ۳(۳)، ۵۶-۴۷. https://www.waterjournal.ir/article_70699.html
- محمدخان، شیرین، گنجایان، حمید، گروسی، لیلا، و زنگنه تبار، زهرا (۱۳۹۸). ارزیابی تأثیر افت آب‌های زیرزمینی بر میزان فرونشست با استفاده از تصاویر راداری سنتینل- ۱؛ محدوده مورد مطالعه: دشت قروه. *سپهر*، ۲۸(۱۱۲)، ۲۲۹-۲۰۹. <https://doi.org/10.22131/sepehr.2020.38617>
- ندیری، عطالله، واحدی، فاطمه، و اصغری مقدم، اصغر (۱۳۹۵). پیش‌بینی سطح آب زیرزمینی با استفاده از مدل منطق فازی مرکب نظارت‌شده (مطالعه موردی: دشت مشگین شهر). *هیدروژئومورفولوژی*، ۳(۶)، ۱۱۵-۱۳۴. https://hyd.tabrizu.ac.ir/article_4947.html
- نظم‌فر، حسین، و شیرزادگرجان، منیر (۱۴۰۱). پایش فرونشست سطح زمین با تکنیک تداخل سنجی راداری (محدوده مورد مطالعه: دشت مشگین). *مخاطرات محیط طبیعی*، ۱۱(۳۱)، ۴۸-۲۵. <https://doi.org/10.22111/jneh.2022.35138.1687>
- یاراحمدی، جمشید (۱۳۹۵). *بررسی پدیده فرونشست زمین در دشت‌های بحرانی استان آذربایجان شرقی به روش اینترفرومتری راداری*. اولین همایش بین‌المللی مخاطرات طبیعی و بحران‌های زیست‌محیطی ایران، راهکارها و چالش‌ها، اردیبهشت. <https://civilica.com/doc/548978>

References

- Aggarwal, A., Srivastava, P. K., Gupta, D. K., & Chatterjee, R. S. (2022). Estimating regional land subsidence in Mehsana urban block, Gujarat: Effect of groundwater induced aquifer compaction. *Materials Today: Proceedings*, 48, 1217-1223. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2021.08.254>
- Blanco-Sánchez, P., Mallorquí, J. J., Duque, S., & Monells, D. (2008). The Coherent Pixels Technique (CPT): An Advanced DInSAR Technique for Nonlinear Deformation Monitoring. *Pure and Applied Geophysics*, 6(165), 1167-1193. https://link.springer.com/chapter/10.1007/978-3-7643-8907-9_10
- Behneyafar, A., Gh anbarzadi, H., & Eshrafi, A. (2010). A Study On Effestive Parameters In Subsidence Of Mashhad Weald And Its Geomorphic Issues. *Geographical Journal Of Chashmandaz-E-Zagros*, 2(5), 131-146. <https://sid.ir/paper/175753/en> [In Persian].
- Castellazzi, P., Arroyo-Domínguez, N., Martel, R., Calderhead, A. I., Normand, J. C., Gárfias, J., & Rivera, A.

- (2016). Land subsidence in major cities of Central Mexico: Interpreting InSAR-derived land subsidence mapping with hydrogeological data. *International journal of applied earth observation and geoinformation*, 47, 102-111. <https://doi.org/10.1016/j.jag.2015.12.002>
- Cian, F., Blasco, J. M. D., & Carrera, L. (2019). Sentinel-1 for monitoring land subsidence of coastal cities in Africa using PSInSAR: A methodology based on the integration of SNAP and staMPS. *Geosciences*, 9(3), 124-135. <https://doi.org/10.3390/geosciences9030124>
- Duque, S., Mallorqui, J. J., Blanco, P., & Monells, D. (2007, April). Application of the coherent pixels technique (CPT) to urban monitoring. In *2007 Urban Remote Sensing Joint Event* (pp. 1-7). IEEE. <https://doi.org/10.1109/URS.2007.371880>
- El Kamali, M., Papoutsis, I., Loupasakis, C., Abuelgasim, A., Omari, K., & Kontoes, C. (2021). Monitoring of land surface subsidence using persistent scatterer interferometry techniques and ground truth data in arid and semi-arid regions, the case of Remah, UAE. *Science of the Total Environment*, 776, 145946. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2021.145946>
- Fiaschi, S., Holohan, E. P., Sheehy, M., & Floris, M. (2019). PS-InSAR analysis of Sentinel-1 data for detecting ground motion in temperate oceanic climate zones: a case study in the Republic of Ireland. *Remote Sensing*, 11(3), 348-356. <https://doi.org/10.3390/rs11030348>
- Ghazifard, A., Akbari, E., Shirani, K., & Safaei, H. (2017). Evaluating land subsidence by field survey and D-InSAR technique in Damaneh City, Iran. *Journal of Arid Land*, 9(5), 778-789. <https://link.springer.com/article/10.1007/s40333-017-0104-5>
- Hu, L., Dai, K., Xing, C., Li, Z., Tomás, R., Clark, B., ... & Lu, Y. (2019). Land subsidence in Beijing and its relationship with geological faults revealed by Sentinel-1 InSAR observations. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, 82, 101886. <https://doi.org/10.1016/j.jag.2019.05.019>
- Jafari, F., Javadi, S., Golmohammadi, G., Karimi, N., & Mohammadi, K. (2016). Numerical simulation of groundwater flow and aquifer-system compaction using simulation and InSAR technique: Saveh basin, Iran. *Environmental Earth Sciences*, 75, 1-10. <https://link.springer.com/article/10.1007/s12665-016-5654-x>
- Jeanne, P., Farr, T. G., Rutqvist, J., & Vasco, D. W. (2019). Role of agricultural activity on land subsidence in the San Joaquin Valley, California. *Journal of hydrology*, 569, 462-469. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2018.11.077>
- Liu, X., Wang, Y., & Yan, S. (2017). Ground deformation associated with exploitation of deep groundwater in Cangzhou City measured by multi-sensor synthetic aperture radar images. *Environmental Earth Sciences*, 76(6), 45-61. <https://link.springer.com/article/10.1007/s12665-016-6311-0>
- Liu, Z., Mei, G., Sun, Y., & Xu, N. (2021). Investigating mining-induced surface subsidence and potential damages based on SBAS-InSAR monitoring and GIS techniques: A case study. *Environmental Earth Sciences*, 80(24), 817. <https://link.springer.com/article/10.1007/s12665-021-09726-z>
- Mohammakhhan, S., Ganjaeian, H., Garosi, L., & Zanganetabar, Z. (2020). Assessing the impact of groundwater drop on the subsidence rate using the Sentinel-1 Radar images - Case study: Qorveh Plain. *Scientific-Research Quarterly of Geographical Data (SEPEHR)*, 28(112), 219-229. <https://doi.org/10.22131/sepehr.2020.38617> [In Persian].
- Maghsoudi, Y., van der Meer, F., Hecker, C., Perissin, D., & Saepuloh, A. (2018). Using PS-InSAR to detect surface deformation in geothermal areas of West Java in Indonesia. *International journal of applied earth observation and geoinformation*, 64, 386-396. <https://doi.org/10.1016/j.jag.2017.04.001>
- Masoumi, Z., Mousavi, Z., & Hajeb, Z. (2022). Long-term investigation of subsidence rate and its environmental effects using the InSAR technique and geospatial analyses. *Geocarto International*, 37(24), 7161-7185. <https://doi.org/10.1080/10106049.2021.1964616>
- Mateos, R. M., Ezquerro, P., Luque-Espinar, J. A., Béjar-Pizarro, M., Notti, D., Azañón, J. M., ... & Jiménez, J. (2017). Multiband PSInSAR and long-period monitoring of land subsidence in a strategic detrital aquifer (Vega de Granada, SE Spain): An approach to support management decisions. *Journal of hydrology*, 553, 71-87. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2017.07.056>
- Nadiri, A. A., Vahedi, F., & Asghari Moghaddam, A. (2016). Groundwater Level Prediction Using Supervised Committee Fuzzy Logic (Case Study: Meshginshahr Plain). *Hydrogeomorphology*, 3(6), 115-134. https://hyd.tabrizu.ac.ir/article_4947.html?lang=en [In Persian].
- Nazmfar, H., & Shirzad Khrijan, M. (2022). Surface subsidence monitoring with radar interference technique (study area: Meshgin plain). *Journal of Natural Environmental Hazards*, 11(31), 25-48. <https://doi.org/10.22111/jneh.2022.35138.1687> [In Persian].
- Navarro-Hernández, M. I., Tomás, R., Lopez-Sanchez, J. M., Cárdenas-Tristán, A., & Mallorquí, J. J. (2020). Spatial analysis of land subsidence in the San Luis potosi valley induced by aquifer overexploitation

- using the coherent pixels technique (CPT) and sentinel-1 insar observation. *Remote Sensing*, 12(22), 3822. <https://doi.org/10.3390/rs12223822>
- Pawluszek-Filipiak, K., & Borkowski, A. (2021). Monitoring mining-induced subsidence by integrating differential radar interferometry and persistent scatterer techniques. *European Journal of Remote Sensing*, 54(22), 18-30. <https://doi.org/10.1080/22797254.2020.1759455>
- Rashidi, A., Khatib, M. M., Mosavi, S. M., & Jamor, Y. (2017). Estimation of the active faults, based on Seismic, geologic and geodetic moment rates in the South and West of Lut block. *Scientific Quarterly Journal of Geosciences*, 26(104), 211-222. <https://www.sid.ir/paper/32674/en> [In Persian].
- Razaie Banafsheh, M., Jalali Ansaroodi, T., Zarghami, M., & Asghari Moghaddam, A. (2015). Investigate of Climate Change Impacts on Groundwater Level in Tasuj Basin by Statistical Downscaling Method. *Iran-Water Resources Research*, 11(2), 97-105. https://www.iwrr.ir/article_13792.html?lang=en [In Persian].
- Rokni, J., Hossinzadeh, R., Lashkaripour, G. R., & Velayati, S. A. (2016). Survey of Land Subsidence, Perspective and Geomorphology Developments in the Denser Plains, Case study: Neyshabour Plain. *Journal of Arid Regions Geographic Studies*, 7(24), 21-38. https://jargs.hsu.ac.ir/article_161414.html?lang=en [In Persian].
- Ranjbar, M., & Jaafari, N. (2009). Investigating the effective factors in the subsidence of the Eshtehard plain. *Geography*, 6(19), 155-166. https://mag.iga.ir/article_253531.html?lang=en [In Persian].
- Shadfar, S., Nasiri, E., Chitgar, S., & Ahmadi, A. (2016). Hazard zonation of Land subsidence using Analytical Hierarchy Process (AHP) case study (city of Buin Zahra). *Territory*, 12 (48), 101-116. <https://www.sid.ir/paper/116305/en> [In Persian].
- Sharifikia, M. (2012). Land Subsidence Rate and Area Assessment In Nogh-Bahramanplain Based On D-Insar Technique. *Journal of Spatial Planning*, 16(3), 34-42. <https://www.sid.ir/paper/171911/en> [In Persian].
- Shafiei, N., Golimkotari, L., Amir Ahmadi, A., & Zandi, R. (2021). Spatial analysis of land subsidence and groundwater loss using the GWR model (Case study: Noorabad Mamasani aquifer,). *Journal of Geography and Planning*, 25(76), 159-171. <https://doi.org/10.22034/gp.2021.11306> [In Persian].
- Salehi, R., Ghafoori, M., Lashkaripour, G. R., & Dehghani, M. (2013). Evaluation of land Subsidence in Southern Mahyar Plain Using Radar Interferometry. *Irrigation and Water Engineering*, 3(3), 47-57. https://www.waterjournal.ir/article_70699.html?lang=en [In Persian].
- Tomas, R., Herrera, G., Lopez-Sanchez, J. M., Vicente, F., Cuenca, A., & Mallorquí, J. J. (2010). Study of the land subsidence in Orihuela City (SE Spain) using PSI data: Distribution, evolution and correlation with conditioning and triggering factors. *Engineering Geology*, 115(1-2), 105-121. <https://doi.org/10.1016/j.enggeo.2010.06.004>
- Wang, H., Feng, G., Xu, B., Yu, Y., Li, Z., Du, Y., & Zhu, J. (2017). Deriving spatio-temporal development of ground subsidence due to subway construction and operation in delta regions with PS-InSAR data: A case study in Guangzhou, China. *Remote Sensing*, 9(10), 1004. <https://doi.org/10.3390/rs9101004>
- Yarahamdi, J. (2016). *Investigating the phenomenon of land subsidence in the critical plains of East Azarbaijan province using radar interferometry*. The first international conference on Iran's natural hazards and environmental crises, solutions and challenges, Ardabil. <https://civilica.com/doc/548978/> [In Persian].