



University of Tehran

Environmental

Hazards

Management



Home Page: <https://jhsci.ut.ac.ir>

Online ISSN: 2383-0530

Effects of groundwater decrease on the of land subsidence in Dehgolan plain, Kurdistan province

Manijeh Ghahroudi Tali^{1*} | Farhad Khodamoradi² | Khadijah Ali Nouri³

1. Corresponding Author, Department of Physical Geography, Faculty of Earth Science, Shahid Beheshti University, Tehran, Iran. Email: m-ghahroudi@sbu.ac.ir
2. Master of Geomorphology, Shahid Beheshti University, Tehran. Iran. Email: fkhodamoradi24@gmail.com
3. Postdoctoral Student, Faculty of Earth Science, Shahid Beheshti University, Tehran, Iran. Email: khadijehalinoori@gmail.com

ARTICLE INFO

Article type:
Research Article

Article History:
Received 14 May 2023
Revised 14 June 2023
Accepted 19 June 2023
Published 21 June 2023

Keywords:
Dehgolan plain,
Hazards,
Land subsidence,
Sentinel-1 images,
Underground water.

ABSTRACT

The studied area is located as a part of the Caspian Sea catchment with an area of about 50083 hectares in the east of Kurdistan province, northwest of Iran. In this research, the data of 34 observation wells were used to investigate the condition of the underground water level and its depth fluctuations, and also to investigate the phenomenon of subsidence in region 8, the Sentinel-1 satellite image was used in the period (2014-2021). The research method includes statistical analysis of changes in the underground water level and interferometry of radar image. The results of the research showed that in the years 2014 to 2021, Dehgolan plain has subsided by -12 to -32 cm. In this way, an average of 6 centimeters of subsidence has occurred annually in these areas. The complete subsidence pattern of Dehgolan plain and the analysis of profiles and water level maps showed the center-west and southwest trends and the maximum subsidence is related to the central and western parts. Therefore, the conformity of the subsidence areas and the curves of the water table level drop, the use of underground water resources indicates that the withdrawal of more than the amount of aquifer nutrition has caused an increase in the effective stress in the sediments because the subsidence areas coincide with the areas of the groundwater level drop, or are located near them. In other words, this location adaptation in the high plains of Dehgolan shows that the cause of the subsidence of the high plains is the drop in the groundwater level, and as a result, the high plains are more vulnerable to the risk of subsidence.

Cite this article: Ghahroudi Tali, M., Khodamoradi, F., Ali Nouri, Kh. (2023). Effects of groundwater decrease on the of land subsidence in Dehgolan plain, Kurdistan province. *Environmental Hazards Management*, 10 (1), 57-70.
DOI: <http://doi.org/10.22059/jhsci.2023.359130.777>



© Manijeh Ghahroudi Tali, Farhad Khodamoradi, Khadijah Ali Nouri **Publisher:** University of Tehran Press.
DOI: <http://doi.org/10.22059/jhsci.2023.359130.777>

Introduction

Land subsidence is one of the issues that our country has faced in recent decades. So that today many urban areas and plains of Iran are facing this phenomenon. The studied area is a large part of Dehgolan plain in the eastern part of Kurdistan province. which has been facing the phenomenon of subsidence for many years. Dehgolan plain is also a forbidden plain in terms of drilling wells and extracting underground water, which is still going on. Excessive use of underground water by farmers and digging very deep wells has created large sinkholes with a depth of four meters in this plain. Therefore, this research has been done in order to find the amount of subsidence and its trend and its relationship with the drop of underground water.

Materials and Methods

In order to prepare the groundwater level map, the groundwater depth data of 34 sample wells in the time period of 1370-1400 and to monitor the subsidence and perform radar interferometry of Sentinel-1 images, 8 images of the region in the period of 2014-2021 were used. The research method includes the statistical analysis of groundwater level, and in the subsidence part, the analysis and processing of Sentinel-1 images in 7 steps by transferring the data to the software and changing them to single-view mixed data (SLC), geometrical data registration, preparation of interferometer, removal of topography effect and placement of filter, phase estimation and reference ground have been done.

Discussion and Results

The analysis of the relationship between subsidence and the underground water level of Dehgolan Plain showed that in 2014 and 2015, the amount of subsidence was 13 cm, in 2016 and 2017, the highest amount of subsidence was equal to the above amount. The highest amount of subsidence based on the pair of images of 2018 and 2019 is equal to 14 cm, while the highest amount of subsidence occurred in 2020 and 2021 equal to 32 cm. The distribution of subsidence is concentrated in the western and southwestern parts and decreased towards the east and southeast. The highest amount of subsidence of Dehgolan Plain is located in the western, southwestern and central parts of Dehgolan Plain, and the lowest amount is located in the northeast, east and southeast, and in general, in the years 2014 to 2021, Dehgolan Plain has decreased by -12 It has subsided up to -32 cm. As a result, an average of 6 centimeters of subsidence has occurred annually in these areas.

Conclusion

According to the results of the piezometric data, the significant decrease in the underground water level has increased significantly during the three decades, so that in some wells in these areas, the depth of some of them is 10 meters in 1370 to 90 meters in 2019. In such a way that the maximum depth of wells is located in irrigated agricultural lands. The above factors along with the decrease in rainfall during the last few years in eastern Kurdistan (Dehgolan) have intensified the process of decreasing the depth of these waters and increasing the risk of subsidence of the plain. Correspondence of the subsidence areas and the curves of the water table level drop, the use of underground water resources indicates that the withdrawal of more than the amount of aquifer feeding has caused an increase in the effective stress in the sediments because the subsidence areas coincide with the areas of the groundwater level drop, or in They are located close to each other, in other words, this location adaptation in the high plains of Dehgolan indicates that the reason for the subsidence of the high plains is the drop in the groundwater level, and as a result, the high plains are more vulnerable to the risk of subsidence.

References

- Nazmfar, Shirzadgarjan, & Munir. (2022). Earth surface subsidence monitoring with radar interferometric fan (study area: Mashgin plain). *Natural environment hazards*, 31(11) 25-48.(In Persian).
- Zare, M., & Moghimi, E. (2023). Hazards typology in hazards science (Does hazards science have special types?). *Environmental Management Hazards*, 9(4),383-390. doi: 10.22059/jhsci.2023.356665.770.(In Persian).
- Zhou, G.Y., & Esaki, T.J.,(2003), GIS based spatial and predication system development for regional land subsidence hazard mitigation. *Environmental Geology*, 44:665-678



تأثیر افت آب‌های زیرزمینی بر مخاطرات فرورنشست زمین در دشت دهگلان، استان کردستان

منیژه قهرودی تالی^{۱*} | فرهاد خدامرادی^۲ | خدیجه علی نوری^۳

۱. نویسنده مسئول، گروه ژئومورفولوژی، دانشکده علوم زمین، دانشگاه شهید بهشتی تهران، تهران، ایران. رایانامه: M-ghahroudi@gmail.com

۲. دانشکده علوم زمین، دانشگاه شهید بهشتی تهران، تهران، ایران. رایانامه: fkhodamoradi24@gmail.com

۳. دانشکده علوم زمین، دانشگاه شهید بهشتی تهران، تهران، ایران. رایانامه: khadijehalinoori@gmail.com

چکیده

اطلاعات مقاله

در دهه‌های اخیر رشد سریع جمعیت، افزایش سطح زیر کشت آبی و تعداد چاه‌ها و به دنبال آن افزایش نیاز آبی موجب شده که استحصال بی‌رویه از منابع آب زیرزمینی افزایش یافته و در نتیجه ژرفای دستیابی به سطح آب شدت یابد. منطقه پژوهش بخشی از حوضه آبریز دریای خزر به مساحت تقریبی ۵۰۰۸۳ هکتار در شرق استان کردستان در شمال غربی ایران است. در این پژوهش برای بررسی وضعیت سطح آب زیرزمینی و نوسان‌های عمق آن از داده‌های ۳۴ حلقه چاه مشاهده‌ای و همچنین برای بررسی پدیده فرورنشست در منطقه ۸ از تصویر ماهواره سنتینل-۱ در بازه زمانی ۲۰۲۱-۲۰۱۴ استفاده شد. روش تحقیق شامل تحلیل آماری تغییرات سطح آب‌های زیرزمینی و تداخل سنجی تصاویر راداری بوده است. نتایج تحقیق نشان داد که در سال‌های ۲۰۱۴ تا ۲۰۲۱، دشت دهگلان به میزان ۱۲- تا ۳۲- سانتی‌متر دچار فرورنشست شده است. بدین صورت سالانه در این مناطق به طور متوسط ۶ سانتی‌متر فرورنشست رخ داده است. الگوی کامل فرورنشست دشت دهگلان و بررسی پروفیل‌ها و نقشه‌های تراز آب، روند مرکز- غرب و جنوب غربی دارد و حداکثر فرورنشست مربوط به بخش‌های مرکز و غرب است. بنابراین انطباق مناطق دچار فرورنشست و منحنی‌های افت تراز سطح ایستابی آب بهره‌برداری از منابع آبی زیرزمینی بیانگر برداشت بیش از مقدار تغذیه آبخوان بوده که سبب افزایش تنش مؤثر در رسوبات شده است، زیرا پهنه‌های فرورنشست بر مناطق افت سطح آب‌های زیرزمینی منطبق‌اند یا در نزدیکی آنها قرار دارند. به بیان دیگر این انطباق مکانی در دشت مرتفع دهگلان بیانگر این است که علت فرورنشست دشت‌های مرتفع، افت سطح آب‌های زیرزمینی است و در نتیجه دشت‌های مرتفع در مقابل مخاطره فرورنشست آسیب‌پذیرترند.

نوع مقاله:

یادداشت پژوهشی

تاریخ‌های مقاله:

تاریخ دریافت: ۱۴۰۲/۰۲/۲۱

تاریخ بازنگری: ۱۴۰۲/۰۳/۱۴

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۲/۰۳/۲۹

تاریخ انتشار: ۱۴۰۲/۰۳/۳۱

کلیدواژه:

آب‌های زیرزمینی،
تصاویر سنتینل ۱،
دشت دهگلان،
فرورنشست زمین،
مخاطرات.

استناد: قهرودی تالی، منیژه؛ خدامرادی، فرهاد؛ علی‌نوری، خدیجه (۱۴۰۲). تأثیر افت آب‌های زیرزمینی بر مخاطرات فرورنشست زمین در دشت دهگلان، استان کردستان. مدیریت

مخاطرات محیطی، ۱۰ (۱)، ۵۷-۷۰. DOI: <http://doi.org/10.22059/jhsci.2023.359130.777>

ناشر: مؤسسه انتشارات دانشگاه تهران.

© منیژه قهرودی تالی، فرهاد خدامرادی، خدیجه علی‌نوری.

DOI: <http://doi.org/10.22059/jhsci.2023.359130.777>



مقدمه

پدیده فرونشست زمین از مسائلی است که کشور ما در دهه‌های اخیر با آن مواجه شده است. امروزه بسیاری از مناطق شهری و دشت‌های ایران با این پدیده روبه‌رو هستند. سازمان ملل به‌عنوان بخشی از اقدامات توسعه‌ای اولیه چارچوب سندای، ۷۴ نوع مخاطره را شناسایی و معرفی کرده است که فرونشست نیز گونه‌ای خاص از مخاطره در سطح جهانی است [۱۲]. در مقیاس جهانی خطر فرونشست زمین بر اثر افت سطح آب در بین سال‌های ۱۹۷۰-۱۹۵۰ همزمان با صنعتی شدن و رشد شهرنشینی به اوج خود رسید [۳۰]. مهم‌ترین عامل فرونشست اغلب دشت‌های ایران، برداشت بی‌رویه از منابع آب‌های زیرزمینی در چند دهه اخیر، توسعه بخش صنعت و کشت‌های با نیاز آبی بیشتر به همراه غالب بودن سیستم آبیاری سنتی است [۱۵]. پذیرش رابطه خشکسالی و کاهش بارندگی و رخداد مخاطره فرونشست یا فعالیت‌های تکنیکی سبب ایجاد نوعی نگرش جبری این مخاطره شده است که در نتیجه گسترش این مخاطره را در کشور در پی داشته است [۵]. این پدیده در دشت‌ها از خطرهای طبیعی تشدیدشونده است که امروزه به دلیل سرعت و تراکم شکل‌گیری مورد توجه قرار گرفته است؛ اما به‌طور معمول خسارت‌های ناشی از فرونشست و شکاف‌های زمین همچون تخریب سیستم‌های آبیاری و خاک‌های حاصلخیز کشاورزی، رشد چاه‌ها، آسیب به سازه‌ها و ایجاد اختلال در شبکه آبرسانی، فاضلاب و به‌ویژه خطوط انتقال نیرو، ترمیم‌ناپذیر و پرهزینه و مخرب‌اند. تأثیر مخاطرات جوی در آسیب‌پذیری زیرساخت‌های شهری و ساختار شبکه‌ها از جمله شبکه انتقال برق تا حدودی مشخص شده است [۸، ۹]. اما مخاطره فرونشست بیش از بقیه مخاطرات سازه‌های شبکه‌ای را تحت تأثیر خود قرار می‌دهد. فرونشست مانند سایر پدیده‌های مخاطره‌آمیز، تصادفی تلقی می‌شود. شدت وقوع و الگوی تکرار آن با روش‌ها و تکنیک‌های زمانی محاسبه می‌شود [۱۴] که جدیدترین و مؤثرترین روش تداخل‌سنجی تصاویر راداری است. این روش ابزاری قوی برای اندازه‌گیری حرکات عمودی پوسته زمین و تغییرات آن در طول زمان است. تحلیل تغییرات ساختاری سازه‌ها به دلیل رخداد فرونشست از جمله قابلیت‌های این روش است. نتایج پژوهشی با تداخل‌سنجی در سد لار نشان داد که بیشترین نشست در این محدوده، ۲۰ میلی‌متر در مدت پنج سال گذشته بوده و از سال ۲۰۱۸ نرخ تغییر شکل قائم به‌صورت ناگهانی افزایش یافته است. در بخش میانی سد، تغییر شکل‌ها نوسانی بوده و از سال ۲۰۱۸ بالاآمدگی به میزان ۷ میلی‌متر رخ داده است [۱۶].

منطقه پژوهش یکی از بزرگ‌ترین دشت‌های استان کردستان است. بحث چاه‌های عمیق و نیمه‌عمیق در دشت دهگلان حکایتی مرگبار و فاجعه‌ای در زمینه آب‌های زیرزمینی و به‌تبع آن آبادانی روستاهاست. آبخوان دشت قروه و دهگلان اصلی‌ترین و بزرگ‌ترین منبع آبی زیرزمینی استان است که به دلیل کاهش شایان توجه سطح سفره، از سال ۱۳۸۶ به بعد، به فهرست دشت‌های ممنوع اضافه شد، به‌گونه‌ای که سه دشت از نه دشت ممنوع استان کردستان در دو شهرستان قروه و دهگلان قرار دارد. براساس اندازه‌گیری‌ها از ۵۲ حلقه چاه مشاهده‌ای محدوده دشت دهگلان، سطح آب زیرزمینی در مهرماه ۱۳۸۱ (۸۲-۱۳۸۱) نسبت به ماه مشابه سال پایه مطالعات (۶۷-۱۳۶۶) ۸/۸۵- متر، نسبت به مهرماه سال آبی گذشته (۸۱-۱۳۸۰) ۲/۴۰- متر و نسبت به مهرماه سال شروع خشکسالی (۷۸-۱۳۷۷) ۷/۹۲- متر کاهش داشته است [۱۳]. وجود شواهد پدیده فرونشست و افت بسیار زیاد سطح آب‌های زیرزمینی و همچنین قرارگیری این دشت در منطقه حساس استان با کمترین برخورداری از نزولات جوی سالانه به نسبت دیگر بخش‌های استان، بررسی پدیده فرونشست و تعیین رابطه آن با تخریب سفره‌های آب‌های زیرزمینی را ضرورت می‌بخشد. با توجه به نکات بالا، شناسایی و تعیین نقاط حساس و مستعد فرونشست، کنترل و مدیریت این مناطق الزامی است. مهم‌ترین اهداف این پژوهش تهیه نقشه تغییرات زمانی پهنه‌بندی فرونشست، بررسی رابطه زمانی و مکانی فرونشست و سطح آب‌های زیرزمینی و شناسایی مناطق بحرانی است که امکان تغذیه آب‌های زیرزمینی وجود ندارد. اندازه‌گیری نرخ دامنه فضایی پدیده فرونشست از طریق اطلاعات ماهواره‌ای روش نوین در پایش این پدیده به شمار می‌رود. در این روش با به‌کارگیری داده‌ای ماهواره‌ای راداری و به کمک روش SAR قابلیت اندازه‌گیری نرخ و همچنین عرصه و دامنه این پدیده در بازه زمانی هشت‌ساله فراهم شده است.

پیشینه پژوهش

پژوهش‌هایی در خصوص رخداد فرونشست و ارتباط آن با کاهش سطح آب‌های زیرزمینی در دشت‌های ایران و جهان انجام گرفته است که به مواردی اشاره می‌شود. به‌منظور شناسایی و اندازه‌گیری فرونشست و بررسی رابطه آن با افت آب‌های زیرزمینی در دشت اردبیل از تصاویر سنتینل ۱ در سال‌های ۲۰۱۶ و ۲۰۲۰ و داده‌های چاه‌های پیزومتری در بازه ۱۳۶۶ تا ۱۳۹۹ و کاربری زمین استفاده شد و نتایج نشان داد که بیشترین فرونشست در مراتع و زمین‌های کشاورزی رخ داده و میانگین سالانه فرونشست ۴/۴ میلی‌متر و ۲۲ میلی‌متر طی بازه پنج‌ساله بوده است [۱]. پدیده فرونشست و ارتباط آن با آب‌های زیرزمینی در جنوب شرقی دشت تهران به کمک مدل‌سازی عددی بررسی شد. نتایج نشان داد که میزان تغییرات سطح آب و عمق حفاری گمانه‌ها بر میزان فرونشست زمین مؤثر بود و با کاهش برگشت آب به سفره آب زیرزمینی، فرونشست تا ۵۵ درصد افزایش یافت و همچنین با افزایش درصد تغییرات برداشت آب، فرونشست نیز در حدود ۴۰ درصد بیشتر شد [۴]. در پژوهش دیگری ارتباط بین تغییرات سطح آب‌های زیرزمینی و فرونشست زمین در غرب استان تهران طی بازه ۲۰۱۰-۲۰۰۳ بررسی شد و میانگین نرخ ۱۰ و حداکثر ۲۷ سانتی‌متر با افت ۰/۵ تا ۱/۵ متری آبخوان دشت تهران همراه بود [۱۸]. افت سطح آب در مناطق شرقی دشت قروه طی سال‌های ۲۰۱۷-۲۰۱۶ سبب فرونشست زمین به میزان ۲۱/۶ سانتی‌متر شد [۱۷]. ارتباط آماری میان تغییرات سطح آب زیرزمینی و میزان حرکت عمودی سطح زمین با استفاده از مدل‌های رگرسیون خطی درجه ۳ و تداخل‌سنجی راداری در دشت ورامین بین سال‌های ۲۰۱۴ تا ۲۰۱۹ بود. در نتیجه با مقایسه مدل‌های آماری به‌دست‌آمده از نوسان سطح آبخوان و سطح زمین، مشخص شد که میان تغییرات سطح زمین در اثر فرونشست و آب زیرزمینی ارتباط تنگاتنگی وجود دارد [۳]. بررسی ارتباط فرونشست با تغییرات تراز آب‌های زیرزمینی در دشت کرج در بازه زمانی هشت سال، نشان‌دهنده ۱۰۰ تا ۱۴۵ میلی‌متر فرونشست به‌علت برداشت بیش از حد آب‌های زیرزمینی است [۱۰]. میزان فرونشست در دشت ایوانکی در طی دوره زمانی سه‌ساله بین ۸/۳- تا ۳۳/۲- سانتی‌متر بوده و بیشترین فرونشست در مرکز دشت ایوانکی در نزدیکی روستای چشمه نادی بوده است [۲]. در بررسی نرخ جابه‌جایی سالانه زمین از سال ۲۰۱۶ تا ۲۰۲۰ مشخص شد که میزان فرونشست بین ۷/۹ تا ۵۴/۸ و علت آن افت آب‌های زیرزمینی بوده است [۱۱]. نتایج حاصل از تداخل‌سنجی راداری با تصاویر سنتینل-۱ در دشت مشگین بیانگر ۹/۳۵ سانتی‌متر فرونشست در مدت ۱۶ ماه است. با توجه به اطلاعات پیزومتری موجود در این دشت، متوسط افت سطح ایستایی طی دوره چهارده‌ساله ۲۳/۷۵ است که پیامدهای آن در دشت سبب فرونشست و ایجاد ترک و شکاف شده است [۱۹]. دشت مرکزی شهرستان قاین با افزایش فرونشست روبه‌رو بوده و فرونشست زمین از سال ۲۰۱۷ تا سال ۲۰۲۰ افزایش داشته و از ۲/۲ سانتی‌متر در سال ۲۰۱۴ به ۷/۸ سانتی‌متر در سال ۲۰۲۰ رسیده است. هیدروگراف معرف آب زیرزمینی در دشت مرکزی قاین نیز افت محسوسی داشته است. در این دشت، افت تراز آب در سطح دشت حدود ۱/۳۰ متر در طول ۱ سال بوده است؛ یعنی سطح آب‌های زیرزمینی سالانه حدود ۲۶ سانتی‌متر افت داشته است. در نتیجه تداخل‌سنجی راداری روشی مناسب برای بررسی میزان جابه‌جایی سطح زمین بوده و امکان پایش آن را برای تمام نقاط برای دوره‌های زمانی مختلف فراهم کرده است [۶]. در تحقیقی مبنی بر مدل‌سازی توسعه فرونشینی در زمینه برداشت آب‌های زیرزمینی جباری و همکاران (۱۴۰۱) به این نتیجه رسیدند که در صورت افزایش ۱۰ درصدی بهره‌برداری از آبخوان افت تراز سطح آب زیرزمینی در طی دوره پیش‌بینی (بیست‌ساله) در حدود ۲۷ متر خواهد بود که افتی ۱/۴ متری در سال را نشان می‌دهد. در تحقیقی دیگر درباره افت تراز آب زیرزمینی دشت مرودشت نتیجه گرفته شد که فرونشست زمین در این دشت رابطه مستقیمی با افت آب‌های زیرزمینی دارد [۷].

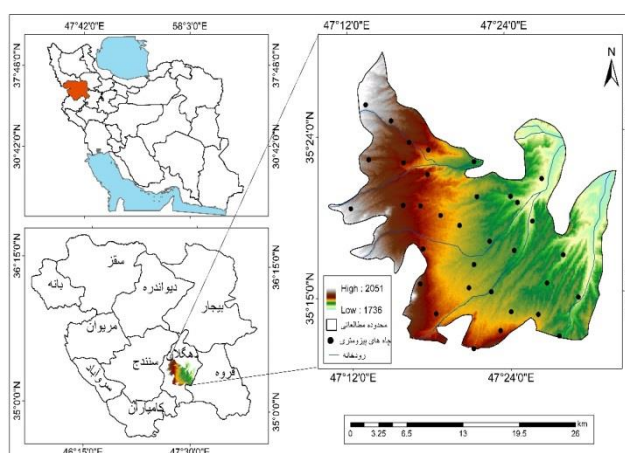
از میان پژوهش‌های خارجی در زمینه فرونشست و تغییرات تراز آب زیرزمینی می‌توان به نتایج در شهر لس‌بانوس-کلمن در دره سن ژواکوین در کالیفرنیا آمریکا اشاره کرد که نشست زمین در این منطقه مهم کشاورزی، خسارت زیادی را به بار آورد. افت ۸/۸ متری تا سال ۱۹۶۹ موجب شد آب سطحی از حوضه‌های مجاور انتقال داده شود تا تقاضا برای آب زیرزمینی کاهش یابد که این کار سبب شد حدود ۵۰ تا ۷۰ درصد از فرونشست زمین کاسته شود. اما در خشکسالی‌های سال‌ها ۱۹۷۷-۱۹۷۶ و ۱۹۹۴-۱۹۹۰ به دلیل برداشت دوباره از آب‌های زیرزمینی، نشست افزایش یافت، چنانکه با افت ۵۰ متری سطح آب، فرونشستی ۱۰ متری رخ داد [۲۳]. بررسی اثرهای زیست‌محیطی فرونشست در مناطق شهری اندونزی با تکنیک رادار و GPS نشان داد که

فرونشست دارای تغییرات فضایی و زمانی است و مقدار آن بین ۵ تا ۱۰ سانتی متر در سال تغییر می کند که علت آن استفاده بیش از حد از آب های زیرزمینی، بار سازه ها و فعالیت های زمین شناسی در منطقه است. همچنین فرونشست می تواند اثرهای محیطی، زیرساختی، اقتصادی و اجتماعی ایجاد کند [۲۰]. گزارش های متعددی از فرونشست زمین به ویژه از نقاط خشک و کم باران در سراسر جهان ارائه شده است [۲۹، ۲۱، ۲۲، ۲۶]. این پدیده در گذشته در بسیاری از نقاط جهان مانند مکزیکوسیتی، تایلند، ژاپن، بانوک و آمریکا [۳۱] شانگهای [۲۷] و نقاط دیگر در چین رخ داده است. فرونشست زمین برای هر ۱۰ متر افت سطحی آب زیرزمینی به طور معمول بین ۱ تا ۵۰ سانتی متر متغیر است. دامنه این تغییرات به ضخامت و تراکم پذیری لایه ها، طول زمان بارگذاری، درجه و نوع تنش وارد شده بستگی دارد [۲۴]. از سال ۱۹۲۱ فرونشست در شانگهای چین گزارش شده است. در ادامه با افزایش استفاده از آب های زیرزمینی در سال ۱۹۹۰ در این شهر فرونشست به تهدیدی برای زیرساخت هایی همچون پایه ساختمان های بلند و تونل های مترو شهری بدل شده است [۲۵]. همچنین پدیده فرونشست در دلتای شمال یونان با استفاده از مدل سازی ژئوتکنیک و تداخل سنجی داده های راداری (SAR) آژانس هوایی اروپایی در سال های ۲۰۰۵-۱۹۹۵ به روش PSI بررسی شد و الگوهای مکانی و زمانی تغییر شکل زمین در شمال یونان در محل دلتای دشت سالونیکا در اثر فشردگی سیستم آبخوان به دست آمد [۲۸].

روش شناسی پژوهش

منطقه پژوهش

منطقه پژوهش در استان کردستان در شرق شهرستان سنندج بین طول های جغرافیای ۴۷° ۴' تا ۴۷° ۹' شرقی و ۳۵° ۷' تا ۳۵° عرض شمالی در مرکز شهرستان دهگلان قرار دارد. شکل ۱ به لحاظ وضعیت توپوگرافی دشت دهگلان دارای توپوگرافی ملایم است، به طوری که طبقات شیب ۲-۰ درصد و ۵-۲ درصد بیشتر از ۸۵ درصد سطح دشت را پوشش می دهد که سبب شده این دشت برای تغذیه آب زیرزمینی مناسب باشد. دامنه تغییرات ارتفاع در این دشت ۳۱۹ متر، حداقل ارتفاع ۱۷۳۱ متر و حداکثر ارتفاع ۲۰۵۰ متر است.



شکل ۱. موقعیت دشت دهگلان در استان کردستان و ایران

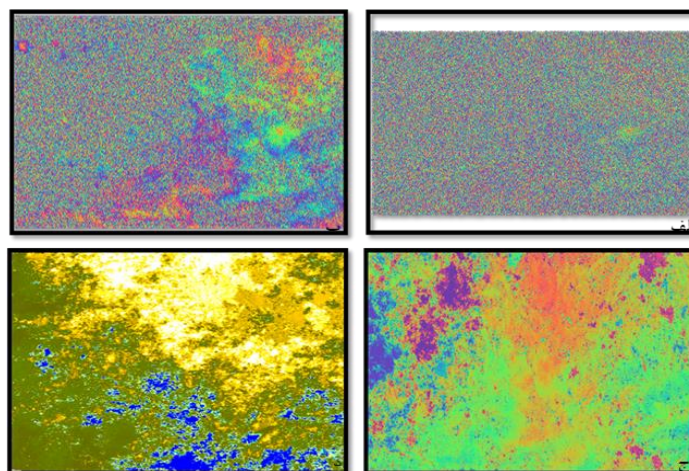
روش تحقیق

به منظور تهیه نقشه سطح آب های زیرزمینی، داده های عمق آب زیرزمینی ۳۴ حلقه چاه نمونه در دوره زمانی ۱۴۰۰-۱۳۷۰ از سازمان امور آب منطقه استان کردستان دریافت و به تفکیک دقیق (روز، ماه، سال) در سه دهه ۷۰، ۸۰ و ۹۰ بررسی شد. برای پایش فرونشست و انجام تداخل سنجی راداری تصاویر سنتینل ۱-، هشت تصویر منطقه در بازه زمانی هشت سال ۲۰۲۱-۲۰۱۴ از درگاه اینترنتی <https://earthexplorer.usgs.gov> برداشت شد. قطبش همه تصاویر VV است که به صورت نزولی انتخاب شده اند. میزان کوه رسی زوج تصاویر بیشتر از ۰/۶۲ و در برخی موارد ۱ است. تاریخ تصاویرها در جدول ۱ نشان داده شده است

تحلیل و پردازش تصاویر سنتینل-۱ در هفت گام با انتقال داده‌ها به نرم‌افزار و تغییر آنها به داده‌های مختلط منفرد نگر (SLC) ثبت هندسی داده‌ها، تهیه تداخل نگار، حذف اثر توپوگرافی، قرار دادن فیلتر، برآورد فاز و زمین مرجع کردن تصویر نهایی فرونشست انجام گرفت (شکل ۲).

جدول ۱. تاریخ تصاویر سنتینل-۱

16/10/2020	15/08/2017	30/10/2014
11/10/2021	24/05/2018	26/08/2015
	19/05/2019	20/08/2016

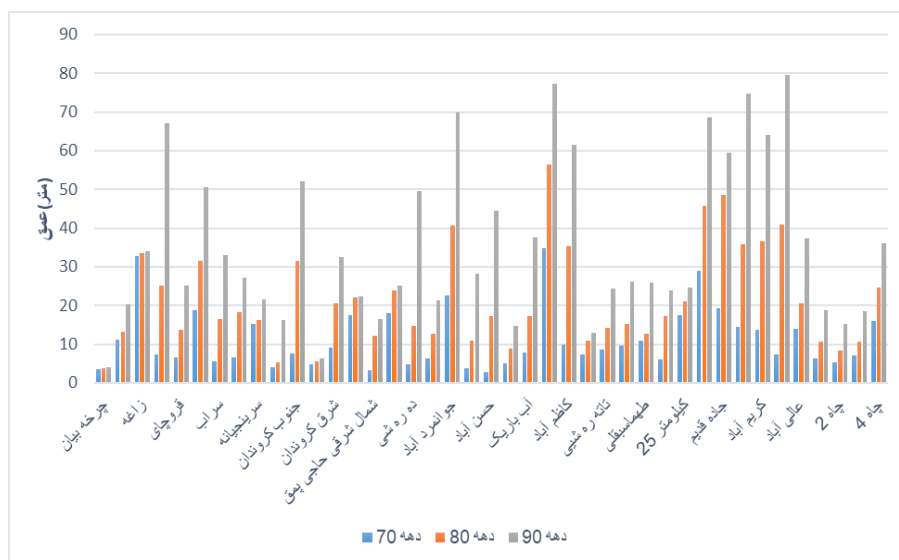


شکل ۲. الف) تصویر تداخل نگار؛ ب) تصویر تداخل نگار deburst شده با حذف اثر توپوگرافی؛ ج) تصویر با فیلتر گلدشتاین؛ د) تصویر فرونشست و زمین مرجع شده

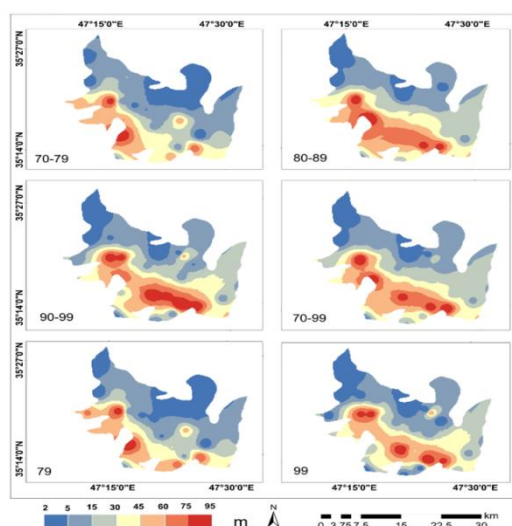
در مورد تعیین ارتباط بین فرونشست زمین و افت سطح آب زیرزمینی، داده‌های جمع‌آوری شده از سازمان آب منطقه‌ای استان کردستان شامل تراز سطح آب چاه‌ها با توجه به بازه زمانی اینترفروگرام و تشخیص بهتر داده‌های چاه‌ها در سال اول آماربرداری (۱۳۷۰) تا سال آخر آماربرداری (۱۴۰۰) دسته‌بندی شد. داده‌های حاصل از تداخل‌سنجی تصاویر سنتینل-۱ و چاه‌های پیژومتری تلفیق شدند.

یافته‌های پژوهش

نقشه پیژومتری دشت دهگلان برای سال‌های ۱۳۷۰ و ۱۳۹۹ به تفکیک ماه و روز (۱۵ شهریور) به سه دهه (۷۹ - ۷۰، ۸۹ - ۸۰، ۹۹ - ۹۰) پهنه‌بندی تهیه شد. همچنین برای مقایسه بهتر نقشه تراز آب سی‌ساله با تراز آب سال پایه و سال آخر مقایسه شد. نتایج نشان داد که بیشترین افزایش عمق سطح آب در محل ایستگاه مجیدآباد به میزان ۸۵/۸ متر و کمترین آن در محل ایستگاه زاغه به میزان ۰/۰۲ متر رخ داده است. بیشترین افزایش عمق سطح آب نمایانگر افت شدید سطح آب زیرزمینی دشت در هر دهه است، به طوری که با فاصله گرفتن از دهه ۷۰ به ۹۰ روند افزایش افت بیشتر می‌شود. برای مثال چاه مجیدآباد در سال ۷۰ از عمق ۸/۷ متر به ۹۳ متر افزایش یافت. به بیانی دیگر این چاه در طول دوره پژوهش ۸۵/۸ متر افزایش عمق داشته است. همچنین بیشترین کاهش عمق سطح آب در محل کیلومتر ۲۵ به میزان ۰/۳۰ متر دیده می‌شود. تنها دو ایستگاه سرینجیانه و کیلومتر ۲۵ به صورت بسیار اندکی نزولی‌اند. در بقیه ایستگاه‌ها عمق دستیابی به سطح آب زیرزمینی سیر صعودی دارد. بر همین اساس افزایش عمق چاه‌ها در دشت دهگلان بیشتر مربوط به جنوب و جنوب غربی، غرب و مرکز است. شکل ۳ نمودار میزان سطح آب زیرزمینی طی یک دوره سی‌ساله و شکل ۴ نقشه وضعیت سطح آب زیرزمینی دشت دهگلان را نشان می‌دهد.

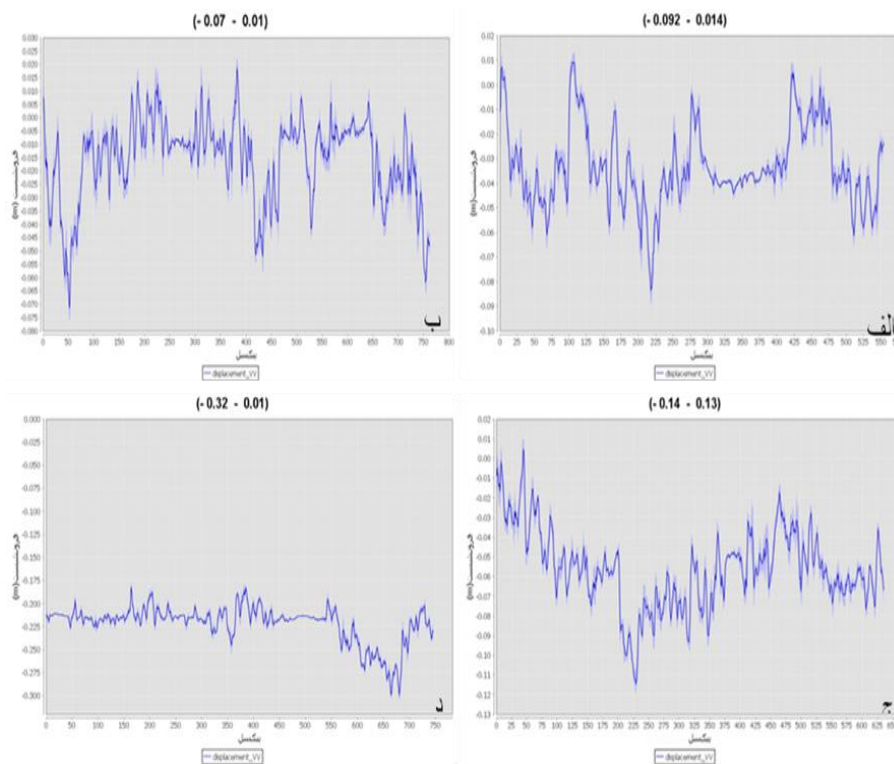


شکل ۳. نمودار مقایسه وضعیت تراز آب زیرزمینی دشت دهگلان در طول دوره پژوهش

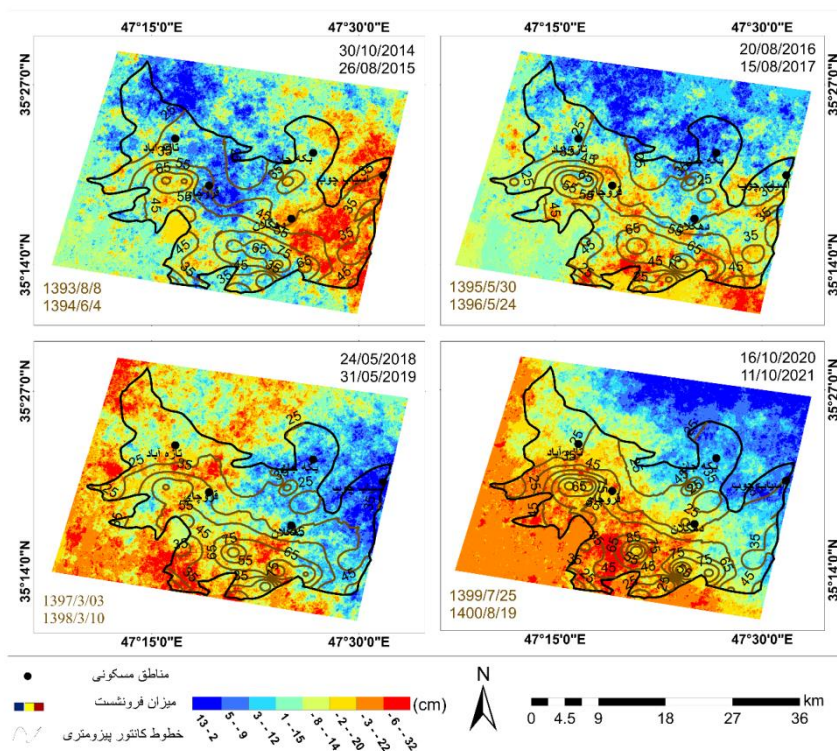


شکل ۴. نقشه وضعیت سطح آب زیرزمینی دشت دهگلان

از تصاویر سنتینل ۱- به صورت زوج تصاویر چهار نقشه فرونشست تهیه و برای تحلیل رابطه فرونشست و وضعیت سطح آب زیرزمینی دشت همپوشانی و تطابق داده شد. شکل ۵ پروفیل مکانی چهار زوج تصویر فرونشست و شکل ۶ نقشه همپوشانی شده فرونشست و وضعیت تراز آب زیرزمینی دشت دهگلان طی دوره هشت ساله را نشان می‌دهد. نتایج بررسی نقشه اخیر، ۱۳ سانتی‌متر فرونشست در زوج تصاویر سال‌های ۲۰۱۴ و ۲۰۱۵ و سال‌های ۲۰۱۶ و ۲۰۱۷ را نشان می‌دهد. بیشترین فرونشست براساس زوج تصاویر سال ۲۰۱۸ و ۲۰۱۹، معادل ۱۴ سانتی‌متر است، در حالی که بیشترین فرونشست در ۲۰۲۰ و ۲۰۲۱ معادل ۳۲ سانتی‌متر است. پراکنش فرونشست در قسمت‌های غرب و جنوب غربی متمرکز شده و به سمت شرق و جنوب شرق کاهش یافته است. در نتیجه زمین‌های مناطق تازه‌آباد، فروچای، سراپ، سراپ حاجی پمق، کروندان، کریم‌آباد، سیس، مبارک‌آباد و چراغ‌آباد دارای فرونشست ۳۲ تا ۲۱ سانتی‌متر هستند و فرونشست در عباس‌چوب، حسن‌آباد، آب باریک، طهماسب بقلی، تازه‌آباد آرزن، حسینی و زمین‌های منطقه ناصرآباد حدود ۱۱ سانتی‌متر است. به این ترتیب بیشترین فرونشست دشت دهگلان بیشتر در قسمت‌های غرب، جنوب غربی و مرکز دشت دهگلان و کمترین فرونشست در شمال شرقی، شرق و جنوب شرقی است. در کل دشت، بیشترین مقدار فرونشست با ۳۲ سانتی‌متر در مناطق شمال غربی، غرب، جنوب غربی، جنوب و کمترین آن با ۱۰ سانتی‌متر در شمال، شرق و جنوب شرقی است.



شکل ۵. پروفیل مکانی فرونشست زوج تصاویر الف) نمودار ۲۰۱۴-۲۰۱۵؛ ب) نمودار ۲۰۱۶-۲۰۱۷؛ ج) نمودار ۲۰۱۸-۲۰۱۹؛ د) نمودار ۲۰۲۰-۲۰۲۱



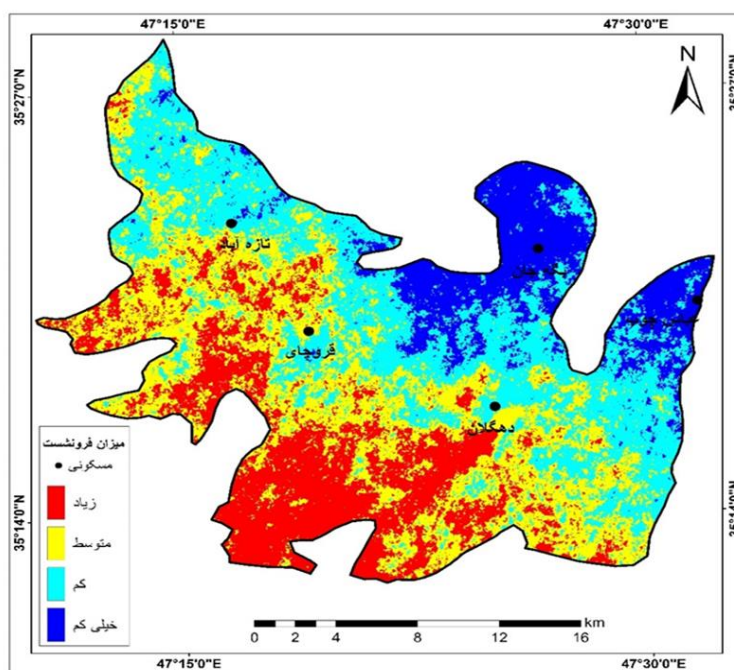
شکل ۶. نقشه همپوشانی شده فرونشست و وضعیت تراز آب زیرزمینی دشت دهگلان طی دوره هشت‌ساله

بحث

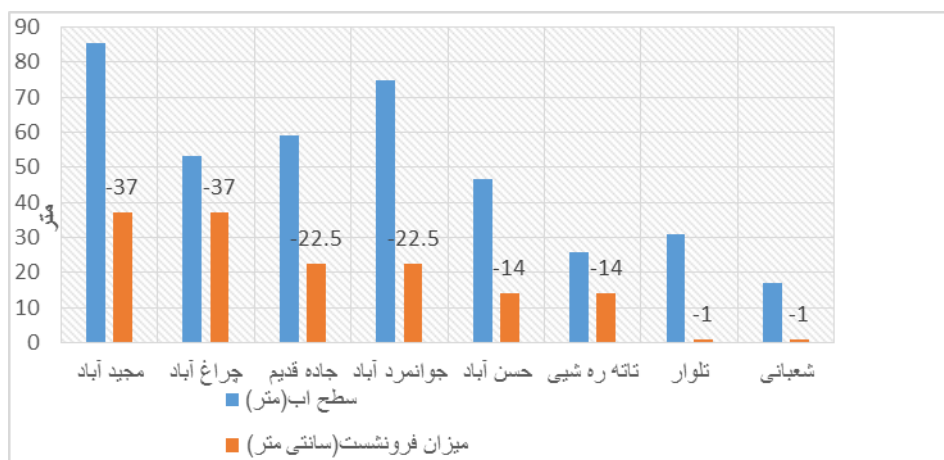
برای تحلیل دقیق‌تر فرونشست دشت دهگلان به چهار ناحیه تقسیم شده است. طبقه فرونشست زیاد با ۲۷ تا ۴۷ سانتی‌متر، ۱۰۹۰۶/۴ هکتار از اراضی دشت دهگلان بیشتر غرب، جنوب غربی و جنوب دشت را در بر گرفته و کمترین فرونشست هم با

دامنه‌ای کمتر از ۲ سانتی‌متر، ۶۹۶۱/۵۱ هکتار از اراضی دشت دهگلان را شامل شده است که بیشتر به‌صورت پراکنده در شرق و جنوب شرق است. طبقه فرونشست متوسط بین ۱۸ تا ۲۷ سانتی‌متر شامل ۱۶۲۹۵/۴۷ هکتار بیشتر در قسمت‌های مرکز، شمال غربی، غرب و جنوب دشت دهگلان قرار دارد و طبقه فرونشست کم نیز با ۱۰ تا ۱۸ سانتی‌متر، شامل ۱۵۹۲۰ هکتار به‌صورت نواری از شمال غربی به مرکز و جنوب شرقی دشت است. در نتیجه میانگین بیشترین فرونشست ۳۷ سانتی‌متر و کمترین نشست ۱ سانتی‌متر است و طبقات متوسط و کم به ترتیب ۲۲ و ۱۴ سانتی‌متر فرونشست داشته‌اند.

بررسی همبستگی میزان فرونشست با تغییرات سطح آب چاه‌های پیژومتری نشان داد که چاه‌های مشاهده‌ای مربوط به طبقه زیاد دارای بیشترین عمق به نسبت دیگر چاه‌هاست. میانگین سطح آب دو چاه پیژومتری مربوط به پهنه فرونشست زیاد، در مجیدآباد دارای عمق ۸۵/۲۴ و چراغ‌آباد ۵۳/۱۸ متر است. میانگین هشت‌ساله سطح آب پیژومتری ناحیه ۲، ۵۹ و ۷۴ متر در پهنه فرونشست ۱۸ تا ۲۷ سانتی‌متری با میانگین ۱۴ سانتی‌متر است و چاه‌های پیژومتری حسین‌آباد و تاته رهشی با عمق ۴۶ و ۲۵ متری آب در پهنه کم و چاه‌های تلوار و شعبانی با کمترین عمق آب و کمترین فرونشست قرار گرفته است.



شکل ۷. نقشه پهنه‌بندی فرونشست دشت دهگلان



شکل ۸. نمودار رابطه مجموع فرونشست (cm) و میانگین سطح آب پیژومتری (m) دشت طی دوره هشت‌ساله ۲۰۲۱ - ۲۰۱۴

جدول ۲. مشخصات میزان فرورانش و سطح آب پیزومتری چاه‌های مربوط به هر طبقه

ناحیه فرورانش	چاه پیزومتر	میانگین سطح آب (هشت‌ساله)	مجموع فرورانش هشت سال (cm)	میانگین (m)
۱	مجیدآباد	۸۵/۲۴	(-۲۷ - -۴۸)	-۳۷
	چراغ‌آباد	۵۳/۱۸		
۲	جاده قدیم	۵۹/۲۲	(-۱۸ - -۲۷)	-۲۲
	جوانمردآباد	۷۴/۷۳		
۳	حسن‌آباد	۴۶/۷۳	(-۱ - -۱۸)	-۱۴
	تاته ره شی	۲۵/۶۳		
۴	تلوار	۳۰/۹۶	(۹ - -۱۰)	-۱
	شعبانی	۱۸/۱۸		

جدول ۳. درصد مساحت طبقات فرورانش دشت

شماره	فرورانش	مساحت (هکتار)	درصد
۱	زیاد	۱۰۹۰۶	۲۱/۸
۲	متوسط	۱۶۲۹۶	۳۲-۵۶
۳	کم	۱۵۹۲۰	۳۱/۸
۴	خیلی کم	۶۹۶۱	۱۳/۹

بررسی نتایج مشاهدات میدانی و شواهد موجود در منطقه شامل بیرون زدگی لوله جدار چاه‌های مشاهده‌ای، گسیختگی لوله جدار چاه‌های بهره‌برداری، ترک خوردگی ساختمان و انحراف تیرهای چراغ‌برق و فروچاله نتایج یادشده را تأیید کرد. شکل ۸ تصاویر فرورانش دشت دهگلان را نشان می‌دهد.



شکل ۹ الف) کج شدن تیر برق در روستای تازه‌آباد چراغ‌آباد؛ ب) تغییر محل شیب زمین و شکاف ایجادشده در زمین کشاورزی؛ ج) فرورانش در روستای شه‌بیه (امور آب استان؛ د) گسیختگی در جداره چاه روستای سراب

نتیجه‌گیری

در طول سه دهه گذشته افزایش استفاده از آب‌های زیرزمینی در دشت دهگلان سبب افت زیاد سطح آب‌های زیرزمینی شده که این کاهش، موجب پدیدار شدن علائم فرورانش در منطقه شده است. این پژوهش به بررسی ارزیابی اثر تغییرات سطح آب‌های

زیرزمینی بر تشدید فرونشست زمین در منطقه برمبنای استفاده از تصاویر راداری سنتینل ۱- انجام گرفت. نتایج نشان داد که ۲۱/۸ درصد منطقه دارای ریسک فرونشست زیاد، ۳۲/۵ درصد دارای ریسک متوسط، ۳۱/۸ درصد دارای ریسک کم و ۱۳/۹ درصد دارای ریسک کم یا بسیار کم است. همچنین ریسک زیاد فرونشست زمین بیشتر در مناطق غرب، جنوب، جنوب غربی و مرکز منطقه وجود دارد و حدود ۵۴/۳ درصد مناطق در بخش ریسک‌های زیاد و متوسط فرونشست زمین قرار گرفته است که دلیل آن استفاده بیش از حد از آب‌های زیرزمینی است. با توجه به نقشه پهنه‌بندی، توزیع ریسک زیاد فرونشست زمین در مناطق جنوبی و جنوب غربی، غرب و به‌صورت پراکنده در مرکز دشت و توزیع ریسک کم مربوط به حاشیه‌های شرق، شمال شرقی و جنوب شرقی دشت است. با توجه به تحقیقات میدانی در این مناطق برای مصارف کشاورزی بیشتر از آب‌های زیرزمینی استفاده می‌شود. وجود چاه‌های عمیق زیاد در دشت دهگلان و استحصال آب آن سبب ادامه این روند شده است. به این ترتیب مجموع فرونشست دشت دهگلان در بازه ۲۰۲۱-۲۰۱۴، معادل ۴۸ سانتی‌متر و میانگین آن ۱۲ سانتی‌متر در سال است. با توجه به نتایج داده‌های پیرومتری کاهش چشمگیر سطح آب زیرزمینی در طول سه دهه به‌صورت چشمگیری افزایش یافته، به‌طوری که در برخی از چاه‌های این مناطق عمق برخی از ۱۰ متر در سال ۱۳۷۰ به ۹۰ متر در سال ۱۳۹۹ رسیده است. بیشترین عمق چاه‌ها در اراضی کشاورزی آبی قرار گرفته و استفاده از استخرهای بزرگ در کنار چاه‌ها برای استحصال بیشتر آب (به‌دلیل کاهش دبی چاه‌ها و افزایش عمق تا ۲۵۰ متری) در حال افزایش است. مقایسه یافته‌های این تحقیق با نتایج تحقیقات رنجبر و همکاران (۲۰۲۲)، اطهری و همکاران (۲۰۲۱)، حیدری و جباری (۲۰۲۲)، آقایاری و همکاران (۲۰۲۲) و نظم‌فر و همکاران (۲۰۱۲) از نظر وجود رابطه معنادار بین میزان فرونشست و کاهش سطح آب‌های زیرزمینی تطابق دارد [۱، ۳، ۷، ۱۰]. از نظر رابطه مکانی بین دو پدیده فوق در دشت‌های مرتفع، تحقیقی انجام نگرفته است و با توجه به محصولات پرآب همچون سبب‌زمینی و یونجه کشت‌شده در این مناطق احتمال افزایش ریسک فرونشست وجود دارد.

انطباق مناطق دچار فرونشست بر منحنی‌های افت تراز سطح ایستابی آب بهره‌برداری از منابع آبی زیرزمینی بیانگر برداشت بیش از حد تغذیه آبخوان سبب افزایش تنش مؤثر در رسوبات شده است، زیرا پهنه‌های فرونشست بر مناطق افت سطح آب‌های زیرزمینی منطبق‌اند یا در نزدیکی آنها قرار دارند. به بیان دیگر این انطباق مکانی در دشت مرتفع دهگلان بیانگر این است که علت فرونشست دشت‌های مرتفع، افت سطح آب‌های زیرزمینی است و در نتیجه دشت‌های مرتفع در مقابل مخاطره فرونشست آسیب‌پذیرترند.

پیشنهادها

نتایج این پژوهش بیانگر ارتباط مکانی کاهش سطح آب‌های زیرزمینی و رخداد مخاطره فرونشست است. از نظر پژوهشی بررسی با سونداژهای الکتریکی و بررسی ضخامت رسوبات سطحی توصیه می‌شود. در خصوص اقدامات اجرایی، جلوگیری از حفر مجدد چاه‌های عمیق و صرفه‌جویی در بهره‌برداری از منابع آب با اقداماتی چون نصب و استفاده از کنتورهای هوشمند، اصلاح الگوی کشت منطقه و نظارت و مراقبت توسط سازمان جهاد کشاورزی، اجرای طرح‌های تغذیه مصنوعی در سفره‌های آب زیرزمینی، برخورد با متخلفان چه در حفر چاه‌های غیرمجاز و چه در افزایش سطح زیر کشت و مقابله با اضافه برداشت در چاه‌های دارای پروانه بهره‌برداری (مجاز)، اصلاح پروانه‌های بهره‌برداری براساس الگوی کشت بهینه و متناسب با شرایط اقلیمی استان کردستان و همچنین ایجاد توازن در برداشت از آبخوان با نفوذ و ذخیره آب پیشنهاد می‌شود.

تقدیر و تشکر

از دانشکده علوم زمین دانشگاه شهید بهشتی بابت حمایت معنوی در اجرای این پژوهش تشکر و قدردانی می‌شود

منابع

- آقایاری، لیلا؛ عابدینی، موسی؛ و اصغری سراسکانرود، صیاد (۲۰۲۲). برآورد میزان فرونشست با استفاده از تکنیک تداخل‌سنجی راداری و پارامترهای آب‌های زیرزمینی و کاربری اراضی (مطالعه موردی: دشت اردبیل). *پژوهش‌های ژئومورفولوژی کمی*، ۱۱(۱)، ۱۱۷-۱۳۲.
- اسدی، معصومه؛ گنجائیان، حمید؛ جاودانی، مهناز؛ و قادری‌حسب، مهدیه (۱۴۰۰). ارزیابی ارتباط بین عوامل طبیعی و میزان فرونشست در دشت ایوانکی با استفاده از تصاویر رادار. *هیدروژئولوژی*، ۱۶(۱)، ۱۳-۲۲. doi: 10.22034/hydro.2021.13016
- اطهری، محمدعلی؛ عزیزی، حمیدرضا؛ هاشمی، سید شهاب؛ و هنری، حمیدرضا (۱۴۰۱). بررسی رابطه بین میزان تغییرات سطح زمین در اثر فرونشست و آب زیرزمینی با استفاده از تصاویر ماهواره‌ای Sentinel-1 و مدل‌های آماری (منطقه مورد مطالعه: دشت ورامین). *علوم و مهندسی آب و فاضلاب*، ۷(۱)، ۳۴-۴۳. doi: 10.22112/jwwse.2021.261650.1232
- توسلی، امید؛ کاربین، حسن؛ ترابی، مینا؛ و عساکره، عادل (۲۰۱۹). بررسی عوامل مؤثر بر فرونشست دشت جنوب شرقی تهران بر اثر برداشت بی‌رویه آب‌های زیرزمینی. *علوم و مهندسی آب و فاضلاب*، ۴(۲)، ۵۸-۷۲.
- جهانی، مجید؛ حسینی بهشتی، سیدمحمدرضا؛ طالب‌زاده، سیدحمید؛ و قوام صفری، مهدی (۲۰۱۵). تحلیل اسطوره‌ای مخاطرات. *مدیریت مخاطرات محیطی*، ۲(۲)، ۱۹۱-۲۰۶.
- حسین‌زاده، اکبری؛ ابراهیم، جوانشیری، محمدپورسنگانی، زینت (۲۰۲۳). تحلیل فضایی فرونشست سطح زمین با استفاده از تداخل‌سنجی راداری (مورد مطالعه: دشت مرکزی شهرستان قاین). *جغرافیا و مخاطرات محیطی*، ۱۱(۴)، ۹۹-۱۲۶.
- حیدری، جباری (۲۰۲۲). مدل‌سازی توسعه فرونشست دشت مرودشت در رابطه با برداشت آب‌های زیرزمینی. *مخاطرات محیط طبیعی*، ۱۱(۳۴)، ۱۷-۳۴.
- خانمحمدی، مجید؛ و محمدی، حسین (۱۳۹۸). واکاوای آسیب‌پذیری و امنیت خطوط انتقال برق در استان زنجان. *مدیریت مخاطرات محیطی*، ۱(۱)، ۶۷-۸۱. SID. <https://sid.ir/paper/398427/fa>
- رحیمی، آرش؛ برنا، رضا؛ مرشدی، جعفر؛ و قربانیان، جبرائیل (۱۳۹۸). آسیب‌پذیری زیرساخت‌های نواحی جنوبی استان خوزستان در شرایط تغییر اقلیم. *مدیریت مخاطرات محیطی*، ۶(۴)، ۳۶۱-۳۷۶. doi: 10.22059/jhsci.2020.292322.516
- رنجبر باروق، زهرا؛ و فتح‌اله‌زاده، محمد (۱۴۰۱). بررسی فرونشست زمین با استفاده از سری زمانی تصاویر راداری و ارتباط آن با تغییرات تراز آب‌های زیرزمینی (مطالعه موردی: کلان‌شهر کرج). *پژوهش‌های ژئومورفولوژی کمی*، ۱۰(۴)، ۱۳۸-۱۵۵. doi: 10.22034/gmpj.2022.313426.1313
- روستائی، شهرام؛ رضائی مقدم، محمدحسین؛ یاراحمدی، جمشید؛ و نجف‌وند، سمیرا (۱۴۰۱). آشکارسازی فرونشست جهت پایداری زمین با استفاده از روش تداخل‌سنجی راداری با پراکنش‌گرهای دائمی (مطالعه موردی: دشت شبستر- صوفیان). *جغرافیا و پایداری محیط*، ۱۲(۳)، ۵۷-۷۴. doi: 10.22126/ges.2022.7538.2508
- زارع، مهدی؛ و مقیمی، ابراهیم (۲۰۲۳). گونه‌شناسی مخاطرات در علم مخاطره‌شناسی (آیا علم مخاطره‌شناسی گونه‌های خاصی دارد؟). *مدیریت مخاطرات محیطی*، ۹(۴)، ۳۸۳-۳۹۰.
- سازمان امور آب استان کردستان (گزارشات امور آب استان ۱۳۸۸).
- دلسوز، سوسن؛ محمودی، طیبه؛ رامشت، محمدحسین؛ و انتظاری، مژگان (۱۳۹۳). مفهوم زمان و تکنیک‌های پیش‌بینی مخاطرات طبیعی، *مدیریت مخاطرات محیطی*، ۱(۱)، ۹۷-۱۰۹. magiran.com/p2119212
- عابدینی، موسی (۱۳۹۲). بررسی علل فرونشست دشت اردبیل و اثرات آن در محدوده شهر، *جغرافیای طبیعی*، ۶(۱۹)، ۷۱-۸۴.
- قدیمی مهرنوش (۱۳۹۹). تحلیل تغییرات رفتاری بدنه سد لار و مخاطرات آن با استفاده از روش تداخل‌سنجی راداری و بررسی‌های میدانی. *مدیریت مخاطرات محیطی*، ۷(۴)، ۳۵۳-۳۶۶. doi: 10.22059/jhsci.2021.314812.615
- محمدخان، شیرین؛ گنجائیان، حمید؛ گروسی، لیلا؛ و زنگنه‌تبار، زهرا (۲۰۱۹). ارزیابی تأثیر افت آب‌های زیرزمینی بر میزان فرونشست با استفاده از تصاویر راداری سنتینل-۱؛ محدوده مورد مطالعه: دشت قروه. *اطلاعات جغرافیایی (سپهر)*، ۱۱۲(۲۸)، ۲۱۹-۲۳۰.
- مقصودی، یاسر؛ امانی، رضا؛ و احمدی، حسن (۱۳۹۸). بررسی رفتار فرونشست زمین در منطقه غربی تهران با استفاده از تصاویر سنتینل-۱ و تکنیک تداخل‌سنجی راداری مبتنی بر پراکنش‌گرهای دائمی. *تحقیقات منابع آب ایران*، ۱۵(۱)، ۲۹۹-۳۱۳.
- نظم‌فر، حسین؛ و شیرزادگرگان، منیر (۲۰۲۲). پایش فرونشست سطح زمین با فن تداخل‌سنجی راداری (محدوده مورد مطالعه: دشت مشگین). *مخاطرات محیط طبیعی*، ۳۱(۱۱)، ۲۵-۴۸.

- Abidin, H.Z., Andreas, H., Gumilar, I., Sidiq, T.P., Gamal, M. (2015), Environmental Impact of Land Subsidence in Urban Areas of Indonesia (7568) From the Wisdom of the AGges to the Challenges of the Modern World Sofia, Bulgaria, 17-21.
- Carminati, E., & Martinelli, G. (2002), Subsidence rates in the Po Plain, northern Italy: the relative impact of natural and anthropogenic causation. *Engineering Geology*, 66, 241-255.
- Hu, R.L., Wang, S.J., Lee, C.F., & Li, M.L. (2002), Characteristics and trends of land subsidence in Tanggu, Tianjin, China. *Bulletin of Engineering Geology and the Environment*, 61, 213-225.
- Larson, K.J., Basaglu, H., Marino, M.A. (2001), Prediction of optimal safe ground water yield and Land subsidence in Los Banos Kettleman city area, using a calibrated numerical simulation model, *Journal Hydrology*, 242, 79-102.
- Lofgren, B.E. (1969), Field Measurement of aquifer system compaction, Sanjoaquin Valley, California, U.S.A. proc, *Tokyo Symp. On Land Subsidence*, IASHUNSCO, 272-284.
- Lyu, H.M., Shen, S.L., Zhou, A., Yang, J. (2019). Risk assessment of mega-city infrastructures related to land subsidence using improved trapezoidal FAHP, *Science of the Total Environment*.
- Pacheco, J., Arzate, J., Rojas, E., Arroyo, M., Yutis, V., & Ochoa, G. (2006). Delimitation of ground failure zones due to land subsidence using gravity data and finite element modeling in the Queretaro valley, Mexico. *Engineering Geology*, 84, 143-160.
- Quanlong, W. (2006), *Land subsidence and water management in Shanghai*, Master thesis, Delft University, Netherlands.
- Raspina, f., Loupasakis, C., Rozos, D., Adamc, N., & Moretti, S. (2014). Ground subsidence phenomena in the Delta municipality region (Northern Greece), Geotechnical modeling and validation with Persistent Scatterer Interferometry, *ELSEVIER International Journal*, 28, 78-89.
- Stiros, S.C. (2001). Subsidence of the Thessaloniki (northern Greece) coastal plain 1960-1999. *Engineering Geology*, 61, 243-256
- Waltham, A.C. (1989). *Ground subsidence*. Blackie & Son Limited
- Zhou, G.Y., & Esaki, T.J. (2003). GIS based spatial and prediction system development for regional land subsidence hazard mitigation. *Environmental Geology*, 44, 665-678