Integrated Watershed Management, Autumn, 2026, 6(3), 1-17 **Article Type: Research**

doi: 10.22034/iwm.2025.2061973.1230 **Online ISSN: 2783-4581**

An investigation of the relationship between land subsidence and groundwater levels using radar interferometry (Case study: Marvdasht aquifer, Fars Province)

Mohammad Jafar Zare[1], Ali Salajegheh[*1], Sousan Salajegheh[2], Mohsen Kazemi[1]

1. Restoration Group of Arid and Mountainous Areas, Faculty of Natural Resources, University of Tehran, Karaj, Iran.
2. Environmental Group, Faculty of Environment, University of Tehran, Tehran, Iran.
***Corresponding author:** salajegh@ut.ac.ir

(Received: 28 May 2025 Revised: 07 June 2025 Accepted: 07 July 2025)

Extended Abstract

Introduction: Land subsidence is one of the most destructive yet hidden environmental hazards caused by various factors. In recent years, this phenomenon has become increasingly noticeable across the country. Land subsidence can result from natural processes such as tectonic and volcanic activities. However, human activities—particularly excessive groundwater extraction and the imposition of heavy loads on the earth's surface—have recently been identified as its primary causes Moreover, climate change, reduced precipitation, and rising temperatures have decreased renewable water resources, thereby increasing reliance on groundwater and exacerbating land subsidence.

Materials and Methods: This study investigate and analyzes ground surface changes within the Marvdasht aquifer using advanced radar interferometry techniques. Initially, the Differential Interferometric Synthetic Aperture Radar (DInSAR) methodology, utilizing Sentinel-1A satellite imagery, was employed to extract the land subsidence rate from 2015–2022. Subsequently, cumulative subsidence across the entire aquifer was calculated for the study period. Additionally, average groundwater level changes during the overlapping period with interferometric data were computed to analyze the correlation between groundwater decline and land subsidence.

Results and Discussion: The results from the Marvdasht aquifer between 2015 and 2022 revealed an alarming trend of land subsidence. The highest annual subsidence rate was recorded between 2015 and 2016, reaching 24.1 cm per year, indicating the severity of the phenomenon during that period. The overall trend of subsidence over the seven years shows that, except for 2019–2020 (which experienced sharp increases in subsidence rates), the remaining years exhibited a decreasing trend. The lowest annual subsidence rate was observed in 2018–2019 at 16.3 cm.A comparison of groundwater level changes with subsidence rates during 2016–2017 and 2019–2020 indicates a significant and direct relationship. Specifically, noticeable drops in groundwater levels coincided with substantial rises in subsidence rates. The coefficient of determination between groundwater level changes and land subsidence was 0.26 across the entire aquifer and 0.50 in subsiding areas, indicating a relatively strong and statistically significant correlation between the two variables. This suggests a meaningful relationship between land subsidence and groundwater fluctuations in the Marvdasht aquifer. Additionally, This finding confirms the detrimental impact of excessive groundwater extraction on the intensification of land subsidence. Spatial analysis shows that the highest rates of subsidence occurs in the central and southern parts of the aquifer, areas known for a high density of groundwater extraction wells. Conversely, in urban areas of Marvdasht, where construction restrictions and extraction regulations limit the number of wells, subsidence is negligible. This findings highlight the critical importance of proper water resource management and strict monitoring of extraction activities in controlling and preventing land subsidence.

Conclusion: Land subsidence, as one of the serious environmental hazards in the Marvdasht aquifer, was investigated over the period from 2015 to 2022. The results indicate a significant relationship between groundwater level decline and the rate of land subsidence. The highest annual subsidence rate occurred during 2015–2016, reaching approximately 24.1 cm, while the lowest was recorded in 2018–2019 at 16/3 cm per year. In subsiding areas, the relationship between groundwater level changes and vertical ground displacement—considering a time lag of about two years—yielded a coefficient of determination (R^2) of 0.50, statistically significant at the 5% level. Spatial analysis further revealed that the highest subsidence occurred in regions with a high density of groundwater extraction wells (central and southern parts of the aquifer), while minimal subsidence was observed in areas with low well density (northeastern and southeastern regions). This underscores the substantial role of excessive groundwater withdrawal in driving land subsidence in the region. Ultimately, this study emphasizes the urgent need for sustainable groundwater management. Recommended strategies include controlling over-extraction through the installation of smart water meters, implementing artificial recharge programs, improving irrigation efficiency, developing land subsidence risk zoning plans, and enhancing public awareness and education for groundwater users. These measures can significantly contribute to reducing subsidence rates and mitigating associated risks.

Keywords: Marvdasht aquifer, interferometry, Sentinel-1A imagery, land subsidence

Citation: Zare, M., Salajegheh, A., Salajegheh, S. & Kazemi, M. (2026). An investigation of the relationship between land subsidence and groundwater levels using radar interferometry (Case study: Marvdasht aquifer, Fars Province). *Integrated Watershed Management*, 6(3), 1-17. https://doi.org/10.22034/iwm.2025.2061973.1230

Copyrights:
Copyright for this article is retained by the author(s), with publication rights granted to Integrated Watershed Management. This is an open-access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution License (http://creativecommons.org/licenses/ by/4.0).

مدیریت جامع حوزه‌های آبخیز، سال ششم، شماره سوم، پاییز ۱۴۰۵، صفحات (۱۷-۱) نوع مقاله: پژوهشی

شاپا الکترونیکی: ۴۵۸۱-۲۷۸۳ doi: 10.22034/iwm.2025.2061973.1230

بررسی ارتباط بین فرونشست زمین و سطح آب زیرزمینی با روش تداخل‌سنجی راداری (مطالعه موردی: آبخوان مرودشت، استان فارس)

محمدجعفر زارع[۱]، علی سلاجقه[۱*]، سوسن سلاجقه[۲]، محسن کاظمی[۱]

۱- گروه احیاء مناطق خشک و کوهستانی، دانشکده منابع طبیعی، دانشگاه تهران، کرج، ایران.

۲- گروه محیط زیست، دانشکده محیط زیست، دانشگاه تهران، تهران، ایران.

*نویسنده مسئول: salajegh@ut.ac.ir

(تاریخ دریافت: ۱۴۰۴/۰۳/۰۷ تاریخ بازنگری: ۱۴۰۴/۰۳/۱۷ تاریخ پذیرش: ۱۴۰۴/۰۴/۱۶)

چکیده مبسوط

مقدمه: پدیده فرونشست زمین از مخربترین مخاطرات پنهان محیطی است که در اثر عوامل مختلف ایجاد می‌شود. این پدیده در سال‌های اخیر به صورت چشمگیری در کشور در حال رخ دادن است. فرونشست زمین ممکن است در اثر فرآیندهای طبیعی مانند فعالیت‌های تکتونیکی و آتشفشانی رخ دهد. با این حال، در سال‌های اخیر، فعالیت‌های انسانی به‌ویژه برداشت بی‌رویه از منابع آب زیرزمینی و وارد آوردن بارهای سنگین بر سطح زمین، به‌عنوان عوامل اصلی این پدیده شناخته می‌شوند. افزون بر این، تغییرات اقلیمی، کاهش میزان بارندگی و افزایش دمای هوا باعث کاهش منابع آب تجدیدپذیر شده‌اند که در نتیجه، وابستگی به آب‌های زیرزمینی افزایش یافته و این مسئله سبب تشدید پدیده فرونشست شده است.

مواد و روش‌ها: در این پژوهش، تلاش شده است تا با بهره‌گیری از تکنیک‌های پیشرفته تداخل‌سنجی راداری، تغییرات سطح زمین در محدوده آبخوان مرودشت مورد بررسی و تحلیل قرار گیرد. برای این منظور، در گام نخست با استفاده از روش تداخل‌سنجی تفاضلی راداری (DInSAR) و به‌کارگیری تصاویر ماهواره‌ای سنتینل-A۱، نرخ فرونشست زمین در بازه زمانی ۲۰۲۲-۲۰۱۵ استخراج شد. سپس تغییرات تجمعی فرونشست در سطح آبخوان در کل بازه مورد مطالعه محاسبه شد. در ادامه، تغییرات میانگین سطح آب زیرزمینی طی دوره‌ای که با داده‌های تداخل‌سنجی هم‌پوشانی دارد، محاسبه گردید تا ارتباط و همبستگی میان افت آب زیرزمینی و میزان فرونشست زمین تحلیل شود.

نتایج و بحث: نتایج حاصل از این پژوهش در آبخوان مرودشت، طی دوره زمانی ۲۰۱۵ تا ۲۰۲۲، نشان‌دهنده روندی نگران‌کننده از فرونشست زمین در این منطقه است. بیشینه نرخ فرونشست سالانه در سال ۲۰۱۵ تا ۲۰۱۶ به ثبت رسیده که برابر با ۲۴/۱سانتی‌متر در سال بوده و نشان‌دهنده شدت بالای این پدیده در آن بازه زمانی است. بررسی روند کلی فرونشست طی این هفت‌سال، حاکی از آن است که به‌جز سال ۲۰۲۰-۲۰۱۹ که با افزایش چشمگیر نرخ فرونشست همراه بوده، در سایر سال‌ها نرخ فرونشست با شیبی کاهشی مواجه بوده است. کمترین نرخ سالانه فرونشست در سال ۲۰۱۹–۲۰۱۸ و به میزان ۱۶/۳ سانتی‌متر ثبت شده است. مقایسه روند تغییرات سطح آب زیرزمینی با نرخ فرونشست زمین در سال‌های ۲۰۱۷-۲۰۱۶ و ۲۰۲۰-۲۰۱۹ بیانگر وجود یک رابطه مستقیم و معنادار میان افت سطح آب زیرزمینی و افزایش نرخ فرونشست است؛ به‌طوری‌که کاهش محسوس تراز آب زیرزمینی در این سال‌ها، با افزایش محسوس نرخ فرونشست همراه بوده است. از سوی دیگر ضریب تعیین بین تغییرات سطح آب زیرزمینی و فرونشست زمین درکل آبخوان و در مناطق دارای فرونشست برابر با ۰/۲۶ و ۰/۵۰ بوده که دارای همبستگی بالا و معنی‌داری بین این دو متغیر در آبخوان مرودشت است. همچنین این یافته به‌روشنی نقش مخرب برداشت بی‌رویه از منابع آب زیرزمینی را در تشدید پدیده فرونشست تأیید می‌کند. افزون بر این، تحلیل‌های فضایی نشان می‌دهد که بیشترین میزان فرونشست در نواحی مرکزی و جنوبی آبخوان رخ داده است؛ مناطقی که با تراکم بالای چاه‌های بهره‌برداری از منابع آب زیرزمینی شناخته می‌شوند. در مقابل، در محدوده‌های شهری مرودشت، که به‌سبب محدودیت‌های ساخت‌وساز و مقررات بهره‌برداری، تعداد چاه‌ها کمتر بوده، نشانه چشمگیری از فرونشست مشاهده نشده است. این موضوع اهمیت مدیریت اصولی منابع آب و نظارت دقیق بر فعالیت‌های بهره‌برداری را در کنترل و پیشگیری از فرونشست زمین به‌خوبی نمایان می‌سازد.

نتیجه‌گیری: فرونشست زمین به‌عنوان یکی از مخاطرات جدی در آبخوان مرودشت، در بازه زمانی ۲۰۱۵ تا ۲۰۲۲ مورد بررسی قرار گرفت. نتایج این پژوهش نشان داد که رابطه معناداری بین افت سطح آب زیرزمینی و نرخ فرونشست زمین وجود دارد. بیشترین نرخ فرونشست سالانه مربوط به سال ۲۰۱۶–۲۰۱۵ با حدود ۲۴/۱ سانتی‌متر و کمترین آن در سال ۲۰۱۹–۲۰۱۸ با ۱۶/۳ سانتی‌متر در سال بوده است. ارتباط بین تغییرات سطح آب زیرزمینی و تغییرات ارتفاعی سطح زمین در مناطق دارای فرونشست، با لحاظ تأخیر زمانی حدود دو ساله، ضریب تعیین ۰/۵۰ به‌دست آمده که در سطح ۵ درصد از نظر آماری معنادار است. بررسی مکانی نیز نشان داد که بیشترین فرونشست در نواحی با تراکم بالای چاه‌های بهره‌برداری (مرکز و جنوب آبخوان) و کمترین آن در مناطق با تراکم کم چاه‌ها (شمال و جنوب‌شرق آبخوان) رخ داده است. این موضوع بیانگر نقش پررنگ برداشت بی‌رویه از منابع آب زیرزمینی در فرونشست منطقه است. در نهایت، این تحقیق بر لزوم مدیریت پایدار منابع آب زیرزمینی تأکید دارد. پیشنهادهایی نظیر کنترل برداشت با کنتورهای هوشمند، تغذیه مصنوعی، ارتقاء بهره‌وری آبیاری، تهیه پهنه‌بندی خطر فرونشست و آموزش بهره‌برداران به‌عنوان راهکارهای کاربردی جهت کاهش نرخ فرونشست و کاهش مخاطرات ناشی از آن مطرح می‌شود.

کلمات کلیدی: آبخوان مرودشت، تداخل‌نما، تصاویر Sentinel-1A، فرونشست زمین

استناد: زارع، م.ج.، سلاجقه، ع.، سلاجقه، س.، و کاظمی، م. (۱۴۰۵). بررسی ارتباط بین فرونشست زمین و سطح آب زیرزمینی با روش تداخل‌سنجی راداری (مطالعه موردی: آبخوان مرودشت، استان فارس). *مدیریت جامع حوزه‌های آبخیز*، ۶(۳)، ۱۷-۱. https://doi.org/10.22034/iwm.2025.2061973.1230

حق چاپ:

حق چاپ برای نویسنده (گان) این مقاله محفوظ است. بر اساس قوانین انتشارات با دسترسی آزاد، تمام مطالعات چاپ شده در این نشریه به‌صورت آزاد در وب‌سایت نشریه برای عموم بدون پرداخت هزینه قابل‌دسترس است.

مقدمه

فرونشست زمین[1] یکی از مهم‌ترین مخاطرات ژئومورفولوژیکی در سطح جهان می‌باشد که به فروریزش یا نشست سطح زمین در مقیاس گسترده اطلاق می‌گردد (Shemshaki *et al.*, 2005). این پدیده می‌تواند ناشی از فرآیندهای طبیعی مانند تغییرات تکتونیکی و آتشفشانی باشد اما در دهه‌های اخیر عوامل انسانی بویژه برداشت بی‌رویه آب‌های زیرزمینی و تحمیل بارهای سنگین به‌عنوان عوامل اصلی فرونشست شناخته شده‌اند (Abedini, 2017). تشدید تغییرات اقلیمی، کاهش بارندگی و افزایش دما نیز منجر به کاهش منابع آب تجدیدپذیر و در نتیجه افزایش وابستگی به آب‌های زیرزمینی شده است، که این امر بر شدت فرونشست افزوده است (Taylor *et al.*, 2013; Wang *et al.*, 2022). براساس نتایج پژوهش‌ها، حدود ۱۹ درصد جمعیت جهان در معرض خطر بالای فرونشست قرار دارند (Herrera-Garcia *et al.*, 2021). در ایران نیز، بویژه در دشت‌های مرکزی و نیمه‌خشک، برداشت بی‌رویه از آب‌های زیرزمینی که با خشکسالی‌ها و توسعه صنایع و کشاورزی (سیستم‌های آبیاری سنتی) تشدید شده است، مهم‌ترین عامل فرونشست می‌باشد (Abedini, 2013) که این پدیده خسارات جبران‌ناپذیری به زیرساخت‌ها، شبکه‌های حمل‌ونقل، ساختمان‌ها و منابع طبیعی وارد کرده و زمینه‌ساز بحران‌های اجتماعی و اقتصادی متعددی شده است. نرخ و الگوهای فرونشست زمین در طول زمان و مکان دچار تغییر هستند، از این رو نیاز به اندازه‌گیری دقیق و استفاده از ابزارهای پیش‌بینی برای پایش آن ضروری است. یکی از ابزارهای نوین در این زمینه، تکنیک تداخل‌سنجی راداری[2] است که به‌ویژه در مناطقی که فاقد نقاط ترازیابی هستند، کارآمد و کم‌هزینه به شمار می‌آید(Amighpey *et al.*, 2023). در حال حاضر، روش‌های پایش فرونشست زمین به دو دسته کلی اندازه‌گیری‌های سطح زمین و اندازه‌گیری‌های زیرزمینی تقسیم می‌شوند. روش‌های پایش سطح زمین شامل ترازیابی دقیق، تداخل‌سنجی راداری و سامانه ناوبری جهانی[3] (GNSS) هستند(Abidin *et al.*, 2001; Burbey, 2003; Figueroa-Miranda *et al.*, 2018). روش تداخل‌سنجی راداری در زمینه اندازه‌گیری تغییرات سطحی پوسته زمین کارایی بالایی دارد. اولین بار Gabriel و همکاران (۱۹۸۹) روش تداخل‌سنجی تفاضلی راداری را ارائه کردند. این اصطلاح به روش اندازه‌گیری تعدادی از پارامترها از قبیل توپوگرافی، تغییرات و جابه‌جایی سطحی زمین از طریق تداخل فاز دو یا چند تصویر راداری با روزنه مجازی[4] اخذ شده از منطقه مشابه اطلاق شده است. در این روش با استفاده از حداقل سه (دو تصویر+ DEM) یا تعداد بیشتری از تصاویر راداری، تغییرات سطحی رخ داده در زمین را در بازه‌های متفاوت با دقت بسیار بالا (برای مثال، میلی‌متر) آشکارسازی نمود. در عین حال، دقت تصویر تابعی از طول موج داده مورد استفاده خواهد بود (Shafiai *et al.*, 2021). پژوهش‌های زیادی در ایران و سایر کشورها در زمینه فرونشست انجام شده است به طوری که اولین گزارش از نشست زمین ناشی از افت سطح آب زیرزمینی در سال ۱۳۴۶، در دشت رفسنجان ثبت شده است (Abbasnejad, 1998). در پژوهشی Tourani و همکاران (۲۰۱۸) با استفاده از تکنیک تداخل‌سنجی راداری در غرب استان گلستان، نشان دادند که محدوده فرونشست

[1]. Land subsidence
[2]. Radar interferometry
[3]. Global Navigation Satellite System
[4]. Synthetic Aperture Radar

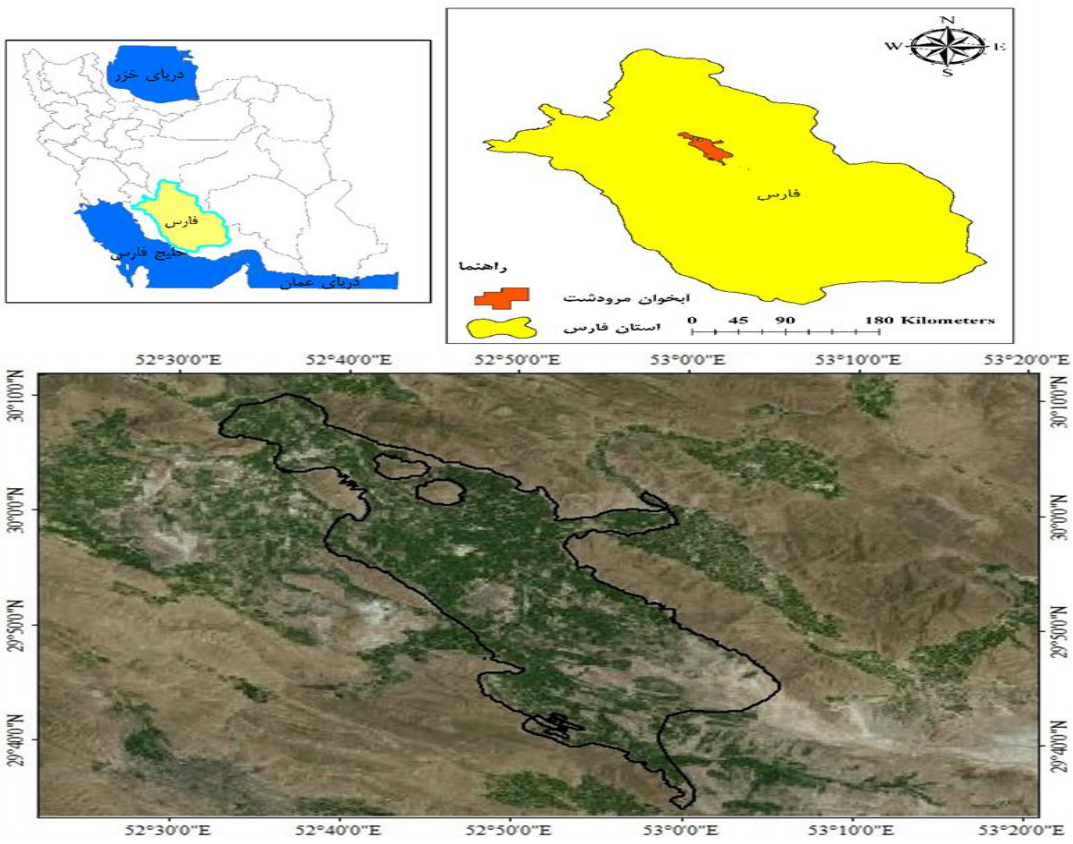
دارای روندی شرقی-غربی است که با ساختارهایی نظیر گسل خزر همخوانی دارد. در تحقیقی دیگر، بررسی میزان فرونشست در دشت اراک ناشی از برداشت بیش از حد آب زیرزمینی نشان داد که نواحی مرزی و حاشیه‌ای دشت با افت بیشتری در سطح آب مواجه‌اند و تمرکز رسوبات ریزدانه رسی در غرب، احتمال فرونشست را افزایش می‌دهد(Shahkarami *et al.*, 2020). پژوهشی در دشت ایوانکی در استان سمنان نشان داد که میزان فرونشست در این منطقه در دوره زمانی ۲۰۱۶ تا ۲۰۱۸ بین ۸/۳- تا ۳۳/۲- سانتی‌متر بوده و بیشترین آن در مرکز دشت، نزدیک روستای چشمه نادی رخ داده است (Asadi *et al.*, 2021). همچنین در بررسی ارتباط بین فرونشست و تغییرات تراز آب‌های زیرزمینی در دشت کرج، در بازه زمانی ۸ سال، نشان داد که فرونشست بین ۱۰۰ تا ۱۴۵ میلی‌متر در سال بوده که به دلیل برداشت بیش از حد آب‌های زیرزمینی رخ داده است(Ranjbar Baruq *et al.*, 2022). پژوهش‌های Motedayen و همکاران (۲۰۲۳) در دشت گرگان نشان داد که بیشترین فرونشست در مناطقی با تقاضای آب بالا برای کشاورزی و تراکم چاه‌ها اتفاق می‌افتد. از سوی دیگر، نتایج تحقیق Kazemi و همکاران (۲۰۲۴) در آبخوان کرمانشاه نشان داد که حداکثر نرخ فرونشست بین سال‌های ۲۰۱۵ تا ۲۰۲۲، برای هر سال ۶/۳- تا ۳/۴- سانتی‌متر بوده که بیشتر در قسمت شمالی و غربی آبخوان گسترش داشته است. علاوه بر این در آبخوان کرمانشاه بین تغییرات سطح آب زیرزمینی و مقادیر فرونشت همبستگی معنی‌داری وجود نداشته است. Aghayari و همکاران (۲۰۲۲) نیز در دشت اردبیل، طی سال‌های ۲۰۱۶ تا ۲۰۲۰ نشان دادند که میانگین سالانه فرونشست حدود ۴/۴ میلی‌متر بوده است. در کراچی پاکستان، میزان فرونشست سالانه بین ۶۷/۶۶ تا ۷۴/۶۸ میلی‌متر گزارش شده که ناشی از استخراج آب‌های زیرزمینی برای مقاصد تجاری و خانگی است(Hussain *et al.*, 2022). همچنین Liu و همکاران (۲۰۲۳) در دلتای رودخانه مروارید غربی چین با استفاده از روش INSAR و تصاویر Sentinel-1، نشان دادند که فرونشست در مناطق با کاربری آبزی‌پروری، شهری و کشاورزی رخ می‌دهد. در پژوهشی Hung و همکاران (۲۰۲۴) فرونشست زمین در مخروط‌افکنه رودخانه چوشویی تایوان مورد بررسی قرار دادند که با تحلیل داده‌های آب زیرزمینی و GNSS، ارتباط افت سطح آب با فرونشست زمین نشان داده شد. نتایج بیانگر افت شدید آب زیرزمینی (تا ۵۴ سانتی‌متر در سال) و نرخ بالای فرونشست (۴/۲ تا ۵/۲ سانتی‌متر در سال) در برخی مناطق می‌باشد که یافته‌های تحقیق بر لزوم مدیریت پایدار منابع آب تأکید دارد(Hung *et al.*, 2024). Qasemi و همکاران (۲۰۲۳) در دشت کبودرآهنگ، فرونشست تجمعی به میزان ۱۲۴/۷ میلی‌متر و متوسط فرونشست هر شش‌ماه حدود ۱۳ میلی‌متر را گزارش کردند. همچنین در دشت قائنات استان خراسان جنوبی، نرخ فرونشست از ۲/۶ سانتی‌متر در سال ۲۰۱۷ به ۷/۸ سانتی‌متر در سال ۲۰۲۰ افزایش یافته است (Hosseinzadeh *et al.*, 2023). نتایج پژوهش Guo و همکاران (۲۰۲۴) نشان داد که با بهره‌گیری از مدل‌های DEM و PS-InSAR، نرخ سالانه فرونشست زمین در منطقه وان‌آن (Wan'an) طی سال‌های ۲۰۱۶ تا ۲۰۲۴ در بازه‌ای بین ۶ تا ۱۰ میلی‌متر بود. همچنین، Yeh و همکاران (۲۰۲۵) طی پژوهشی فرونشست زمین در غرب تایوان را با استفاده از داده‌های GNSS و InSAR مورد بررسی قرار دادند. نتایج پژوهش نشان داد که طی سال‌های ۲۰۱۸ تا ۲۰۲۱ نرخ فرونشست ۹ سانتی‌متر در چانگ‌هوا و ۱۹ سانتی‌متر در یونلین بود. با توجه به اینکه شهرستان مرودشت به‌عنوان یکی از قطب‌های اصلی کشاورزی در استان فارس و حتی در سطح کشور شناخته می‌شود. در این منطقه، به دلیل حاصلخیزی بالای خاک، کشت‌های متوالی و مستمر (تا سه کشت در سال) در سطح وسیعی از اراضی زراعی رایج

است. این الگوی زراعی فشرده منجر به مصرف بالای منابع آب زیرزمینی شده و فشار مضاعفی بر آبخوان وارد می‌سازد. بر این اساس، هدف این پژوهش پایش دقیق نرخ فرونشست زمین در دشت مرودشت، شناسایی نوع کاربری‌های زمین با بیشترین میزان فرونشست، و تحلیل رابطه آن با تغییرات سطح آب زیرزمینی است. در این راستا، از تکنیک تداخل‌سنجی راداری و تحلیل‌های آماری استفاده می‌شود. نتایج این مطالعه می‌تواند ضمن ارائه بینش علمی برای تصمیم‌گیری‌های مدیریتی، به کاهش آسیب‌پذیری زیرساخت‌ها، حفاظت از محیط‌زیست و ارتقای امنیت اجتماعی در راستای توسعه پایدار منطقه کمک شایانی نماید.

مواد و روش‌ها

منطقه مورد مطالعه

شهرستان مرودشت، واقع در استان فارس، بین طول‌های جغرافیایی ´۴۴ °۵۱ تا ´۳۰ °۵۳ شرقی و عرض‌های جغرافیایی ´۱۵ °۲۹ تا ´۵۹ °۳۰ شمالی واقع شده است. ارتفاع متوسط این شهرستان از سطح دریا به ۱۶۲۰ متر می‌رسد و در ۴۵ کیلومتری شمال‌شرقی شیراز، روی دشت وسیع و حاصلخیز مرودشت با مساحت ۴۶۴۹ کیلومترمربع قرار دارد که تقریباً ۳ درصد از مساحت کل استان فارس را در بر می‌گیرد. از منظر زمین‌شناسی، مرودشت در کمربند چین‌خورده زاگرس واقع شده و روند عمومی چین‌خوردگی‌ها در این منطقه، با امتداد شمال‌غربی – جنوب‌شرقی مشخص می‌شود. مهم‌ترین جریان‌های سطحی در شهرستان مرودشت شامل رودخانه‌های کر و سیوند است. میانگین بارش سالانه در این شهرستان حدود ۵۰۰ میلی‌متر است که عمدتاً در فصل سرد و با نفوذ جبهه‌های آب و هوایی غربی اتفاق می‌افتد. تابستان‌های مرودشت گرم و خشک بوده و میانگین دمای سالانه آن بین ۱۱ تا ۲۳ درجه سانتی‌گراد متغیر است. بر اساس ضریب خشکی دمارتن، این شهرستان در زمره مناطق نیمه‌خشک ایران طبقه‌بندی می‌شود. شهرستان مرودشت به پنج بخش سعادت‌آباد، سیدان، مرکزی، کامفیروز و درودزن تقسیم شده است (شکل ۱)، (Khosh Akhlaq *et al.* 2010; Nasiri *et al.* 2012). این ویژگی‌ها، مرودشت را به منطقه‌ای با پتانسیل‌های طبیعی و اقتصادی قابل توجه تبدیل کرده است.



شکل ۱ – موقعیت منطقه مورد مطالعه

Figure 1 – Location of the Study Area

روش تحقیق

در این تحقیق ابتدا به منظور پایش نرخ فرونشست زمین در آبخوان مرودشت از تکنیک تداخل‌سنجی راداری استفاده شد. در این روش، فاز حاصل از دو تصویر گرفته شده از یک منطقه معین جهت تولید تداخل‌نگار تطبیق داده می‌شود. در راستای بررسی ارتباط بین تغییرات سطح آب زیرزمینی و پدیده فرونشست زمین، تعداد ۵۱ چاه مشاهده‌ای با داده‌های کامل و پراکندگی یکسان در سطح آبخوان انتخاب شدند. سپس میانگین تغییرات سالانه سطح آب محاسبه گردید. برای تعیین همبستگی بین تغییرات تراز آب زیرزمینی در سطح آبخوان و در مناطق دارای فرونشست، نقشه فرونشست زمین تهیه و میانگین مقادیر فرونشست محاسبه شد. این همپوشانی با هدف شناسایی الگوهای همبستگی فضایی و تعیین میزان تأثیر متقابل بین افت سطح آب زیرزمینی و فرونشست زمین با استفاده از روش تحلیل رگرسیون خطی و با استفاده از نرم افزار SPSS انجام شد. از طریق این فرآیند، امکان بررسی دقیق‌تر روابط پیچیده میان تغییرات سطح آب زیرزمینی و فرونشست فراهم می‌شود و الگوهای مکانی و زمانی این تغییرات به‌طور جامع‌تری تحلیل می‌گردند. مراحل تفصیلی انجام این پژوهش در شکل ۲ ارائه شده است.

تداخل سنجی راداری

داده‌های مورد استفاده

در این پژوهش از داده‌های راداری، شامل ۷ سری تصاویر سنتینل A-1 جهت محاسبه نرخ فرونشست طی بازه زمانی ۲۰۲۲- ۲۰۱۵ استفاده شده است. داده‌های مورد استفاده مربوط به سازمان فضایی اروپا با فرمت SLC با

پلاریزاسیون VV طی ۶ سال است. تحلیل تصاویر در محیط سیستم عامل ویندوز و با نرم‌افزار SNAP انجام گرفت (جدول ۱). انتخاب مناسب و بهینه زوج تصاویر راداری جهت تداخل‌سنجی یکی از مهم‌ترین مراحل موجود در عملیات تداخل‌سنجی است. از مهم‌ترین عوامل پایه در انتخاب زوج تصاویر می‌توان به فرکانس سنجنده مورد استفاده، خط مبنای عمود مکانی، هم‌پوشانی مکانی و همچنین هم‌پوشانی طیفی در راستای پرواز اشاره کرد. سپس با در نظر داشتن موارد فوق مبادرت به تهیه تصاویر مورد استفاده در این پژوهش از سایت asf.alaska.edu گردید.



شکل ۲ – مراحل انجام پژوهش
Figure 2 – Research Methodology Steps

هم مرجع‌سازی

پس از افزودن زوج تصاویر به نرم‌افزار SNAP، مبادرت به انجام مرحله هم‌مرجع‌سازی تصاویر به همراه مدل رقومی ارتفاعی منطقه و استفاده از نقاط پراکنش‌گر گردید. بدین منظور ابتدا محدوده مورد نظر از تصاویر اصلی به‌خاطر سرعت در پردازش تصاویر جدا شد. سپس به منظور تصحیح مداری تصویر، فرایند Apply- orbit- file روی آنها انجام گردید. در مرحله بعد با عملگر Back Geocoding، دو تصاویر جدا شده از منطقه در دو بازه زمانی مختلف با زیر نوار یکسان را با استفاده از بردارهایی

از دو فرآورده و یک مدل رقومی ارتفاعی ثبت نموده و در ادامه به‌منظور استفاده از یک آزیموت و برد ثابت برای کل تصاویر از عملگر Enhanced Spectral Diversity استفاده شد.(Foumelis *et al*., 2018)

جدول ۱-مشخصات تصاویر راداری مورد استفاده

Table 1 – Specification of the Radar Images

سال	نوع ماهواره	تاریخ تصاویر	نوع پردازش تصاویر	نوع گذر تصاویر	کانال	قطبش	جهت مدار
2015	Sentinel-1A	2015/09/04	IW.SLC	Master	C	VV-VH	Dessending
	Sentinel-1A	2016/09/22	IW.SLC	Slave	C	VV-VH	Dessending
2016	Sentinel-1A	2016/09/22	IW.SLC	Master	C	VV-VH	Dessending
	Sentinel-1A	2017/09/29	IW.SLC	Slave	C	VV-VH	Dessending
2017	Sentinel-1A	2017/09/29	IW.SLC	Master	C	VV-VH	Dessending
	Sentinel-1A	2018/09/24	IW.SLC	Slave	C	VV-VH	Dessending
2018	Sentinel-1A	2018/09/24	IW.SLC	Master	C	VV-VH	Dessending
	Sentinel-1A	2019/09/19	IW.SLC	Slave	C	VV-VH	Dessending
2019	Sentinel-1A	2019/09/19	IW.SLC	Master	C	VV-VH	Dessending
	Sentinel-1A	2020/09/13	IW.SLC	Slave	C	VV-VH	Dessending
2020	Sentinel-1A	2020/09/13	IW.SLC	Slave	C	VV-VH	Dessending
	Sentinel-1A	2021/09/08	IW.SLC	Master	C	VV-VH	Dessending
2021	Sentinel-1A	2021/09/08	IW.SLC	Master	C	VV-VH	Dessending
	Sentinel-1A	2022/09/03	IW.SLC	Slave	C	VV-VH	Dessending

اینترفروگرام

پس از اتمام هم‌مرجع‌سازی بین دو تصویر ماهواره‌ای سنتینل۱-A در نرم‌افزار SNAP[5]، مراحل تولید اینترفروگرام به شرح زیر انجام شد: نخست، اختلاف فاز بین دو تصویر با استفاده از عملگر تداخل‌سنجی راداری محاسبه گردید. در روش تداخل‌سنجی راداری[6]، تصویری به نام تداخل‌نما[7] تولید می‌شود که حاوی اختلاف فاز بین دو تصویر راداری ثبت‌شده از یک منطقه در دو زمان مختلف است. این اختلاف فاز، بیانگر تغییر فاصله بین سطح زمین و ماهواره در بازه زمانی تصویربرداری بوده و امکان بررسی تغییرات سطح زمین مانند نشست یا بالا آمدگی را فراهم می‌سازد. تداخل‌نما از حاصل‌ضرب تصویر راداری اول در مزدوج مختلط تصویر دوم به دست می‌آید که در آن فاز، نشان‌دهنده اختلاف فاز بین دو موج و دامنه، حاصل‌ضرب دامنه‌های دو تصویر است. در این فرآیند، تصویر اول به عنوان تصویر مرجع[8] و تصویر دوم که با آن هم‌تراز شده است، تصویر پیرو[9] نامیده می‌شود. هر زوج تصویر راداری قابلیت تولید یک تداخل‌نما را دارد و در صورت وجود N تصویر از یک منطقه، می‌توان تعداد N(n-1)/2 تداخل‌نما تولید کرد (Ferretti, 2002). تداخل‌سنجی بر اساس اندازه‌گیری فاز امواج الکترومغناطیسی عمل می‌کند. انتخاب بهترین اینترفروگرام با ارزیابی پارامتر همدوستی انجام می‌شود که نمایانگر کیفیت فرآیند تداخل‌سنجی است. پس از تشکیل اینترفروگرام اولیه، اثر فاز توپوگرافی با استفاده از DEM SRTM حذف شد. به‌منظور حذف مؤلفه توپوگرافی از فاز کل، از مدل ارتفاعی SRTM با دقت ۳۰

5. Sentinel Application Platform
6. InSAR
7. Interferogram
8. Master
9. Slave

متر استفاده شد. در SNAP، این مرحله به طور خودکار در فرآیند Interferogram Formation در زبانه‌های مربوطه با انجام می‌شود. همچنین جهت کاهش نویزها از فیلتر گلدشتاین[۱۰] استفاده شد. فیلتر گلدشتاین یکی از فیلترهای پرکاربرد در پردازش اینترفروگرام‌هاست که در شرایط با نسبت سیگنال به نویز[۱۱] بالا عملکرد مؤثری دارد. این فیلتر با کاهش نویز، به آشکارسازی بهتر نوارها[۱۲] و کاهش لبه‌های ناخواسته کمک می‌کند. پارامتر آلفا، که نشان‌دهنده قدرت فیلتر است، به‌صورت تطبیقی بر اساس همدوسی[۱۳] محلی تنظیم می‌شود تا مناطق ناهمدوس بیشتر فیلتر شوند.

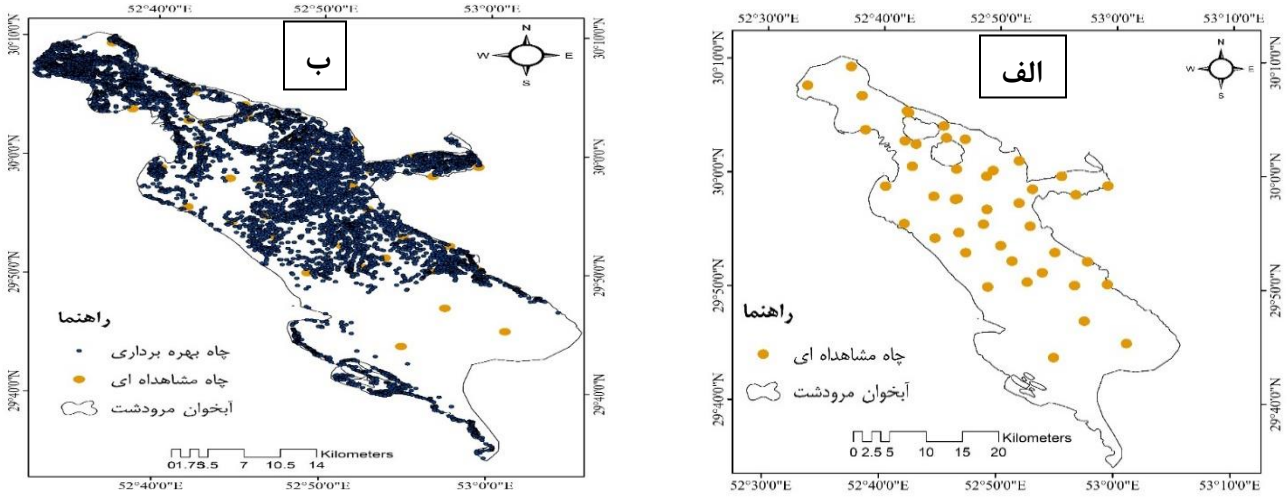
ساخت فاز جابجایی

پس از انجام مراحل تداخل‌سنجی راداری و تهیه اینترفروگرام، با استفاده از عملگر Export Snaphu، یک فایل Unphase به دست آمد. در مرحله بعد، فایل اختلاف فازها، به جابجایی عمودی تبدیل می‌شوند. سپس با استفاده از روش شرط نرم‌کنندگی در حل کمترین مربعات[۱۴]، مقدار فرونشست را به صورت میانگین محاسبه کرده و اعوجاجات هندسه تصویربرداری راداری را تصحیح و به مختصات جغرافیایی تبدیل می‌شوند. در نهایت، نرخ فرونشست در بازه‌های زمانی مورد مطالعه استخراج گردید. به منظور افزایش دقت و اطمینان از صحت داده‌های حاصل از پردازش تصاویر راداری، مقادیر فرونشست استخراج‌شده با استفاده از داده‌های ایستگاه دائمی[۱۵] موجود در منطقه مورد مطالعه واسنجی گردید. این ایستگاه‌ها به عنوان مرجع زمینی دقیق، امکان تصحیح خطاهای احتمالی در داده‌های سنجش از دور را فراهم کرده‌اند.

تغییرات سطح آب زیرزمینی

در این بخش، به منظور بررسی میزان کاهش سطح آب زیرزمینی در آبخوان مرودشت، داده‌های مربوط به ۵۱ حلقه چاه پیزومتری در فاصله زمانی ۲۰۱۲ تا ۲۰۲۲ مورد تحلیل قرار گرفت. اطلاعات جغرافیایی و میانگین سطح ایستابی این چاه‌ها به نرم‌افزار ArcGIS منتقل شد. تحلیل‌ها بر اساس تراکم چاه‌های بهره‌برداری و نوع کاربری زمین و رابطه همبستگی بین تغییرات سطح آب زیرزمینی و مقادیر فرونشست بررسی شد. موقعیت چاه‌های بهره‌برداری در آبخوان مرودشت به همراه چاه‌های مشاهده‌ای در شکل۳-الف نشان داده شده است. همانطور که مشاهده می‌شود بالاترین تراکم چاه‌ها در نواحی شمالی و مرکزی آبخوان، عمدتاً به فعالیت‌های کشاورزی اختصاص دارد. در مقابل، نواحی جنوبی و انتهایی آبخوان کمترین تراکم چاه‌های بهره‌برداری را دارند (شکل۳-ب).

[10].Goldstein
[11]. SNR
[12] . French
[13] . Coherence
[14] . Regularized least squares
[15]. GNSS



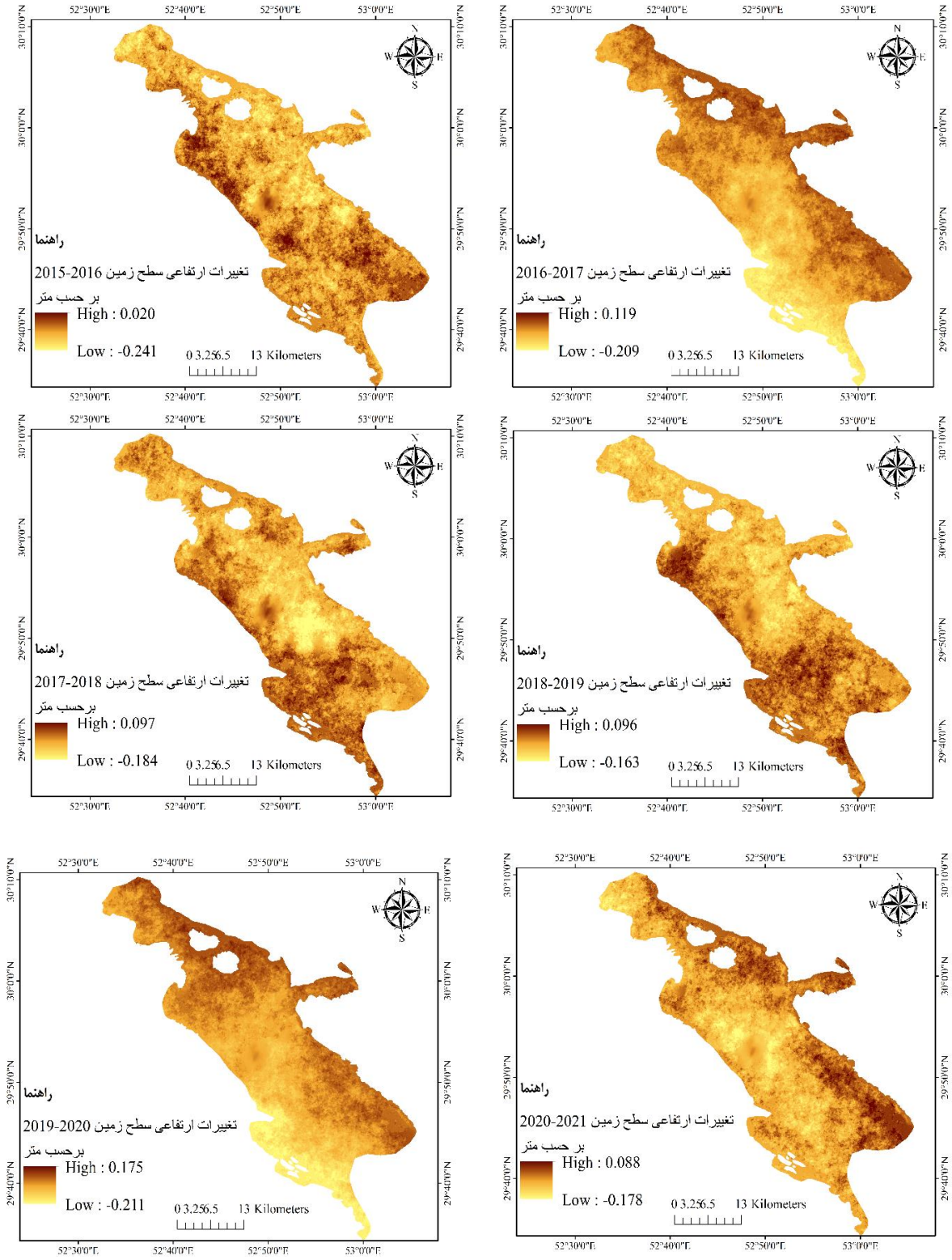
شکل ۳ الف – موقعیت چاه‌های پیزومتری، ب – موقعیت چاه‌های بهره‌برداری

Figure 3a – Location of piezometric wells, b – Location of water exploitation wells

نتایج

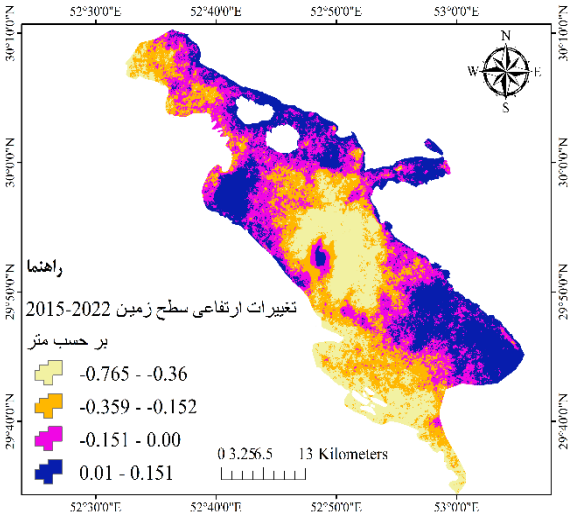
تغییرات جابه‌جایی سالانه سطح زمین

بررسی تغییرات زمانی و مکانی فرونشست زمین در آبخوان مرودشت بین سال‌های ۲۰۱۵ تا ۲۰۲۲ با استفاده از داده‌های راداری نشان‌دهنده تشدید قابل توجه این پدیده است. نتایج تحلیل داده‌های مربوط به فرونشست زمین در بازه زمانی هفت‌ساله نشان داد که نرخ فرونشست در این مدت دارای تغییرات متناوب بوده است. در دوره زمانی ۲۰۱۵ تا ۲۰۱۶، حداکثر نرخ فرونشست زمین ۲۴/۱ سانتی‌متر در سال در بخش مرکزی آبخوان بوده است. الگوی تغییرات حداکثر نرخ فرونشست در سال‌های ۲۰۱۶ تا ۲۰۱۷ برابر با ۲۰/۹ سانتی‌متر در سال، دوره زمانی ۲۰۱۷ تا ۲۰۱۸ حداکثر ۱۸/۴ سانتی‌متر در سال و در دوره زمانی ۲۰۱۸ تا ۲۰۱۹ برابر با ۱۶/۳ سانتی‌متر در سال بوده است که روند کاهشی داشته است؛ اما دوره زمانی ۲۰۱۹ تا ۲۰۲۰ حداکثر نرخ فرونشست ۲۱/۱ سانتی‌متر در سال که نسبت به سال‌های قبل افزایش یافته است، در سال‌های ۲۰۲۰ تا ۲۰۲۱ و ۲۰۲۱ تا ۲۰۲۲ نرخ حداکثر فرونشست ۱۷/۸ سانتی‌متر در سال رسیده است. الگوی مکانی حداکثر نرخ فرونشست نشان داد که بالاترین نرخ فرونشست در بخش‌های مرکزی و در مناطق کشاورزی رخ داده است (شکل ۴).



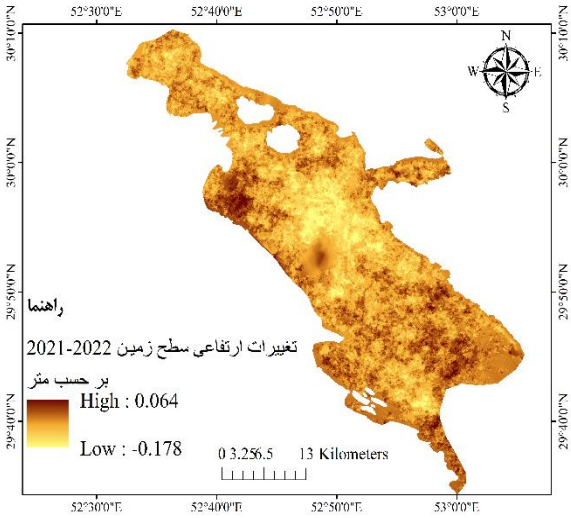
شکل۴- نرخ فرونشست سالانه

Figure 4 – Annual subsidence rate



شکل ۵- تغییرات نرخ فرونشست تجمعی

Figure 5-Cumulative subsidence rate variat



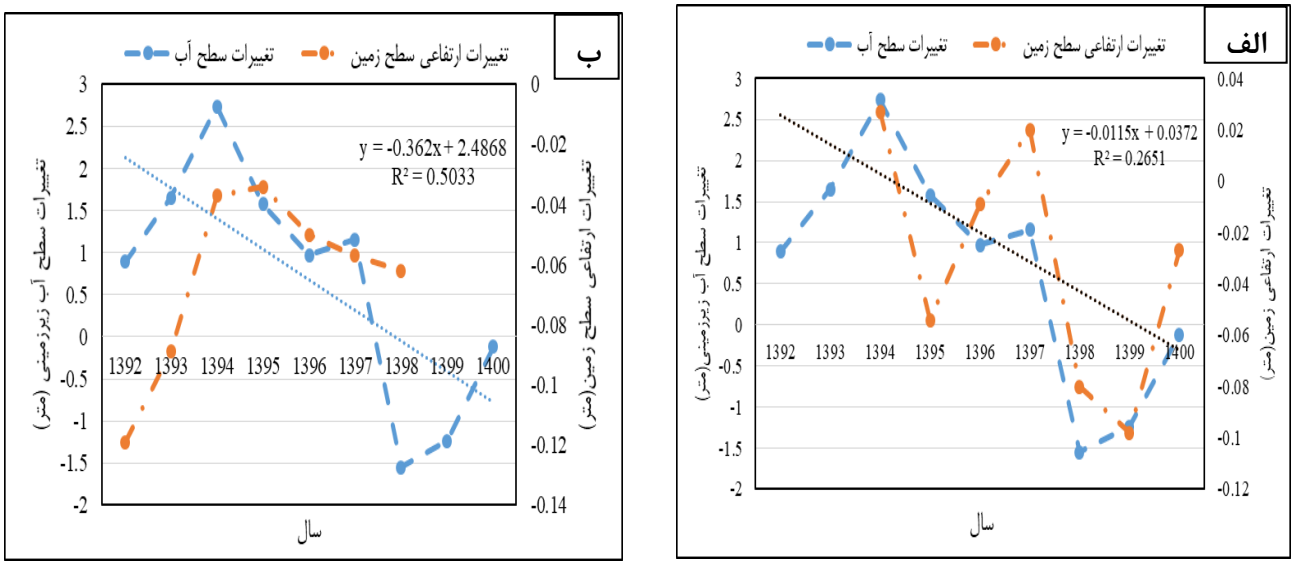
ادامه شکل ۴-نرخ فرونشست سالانه

Continuation of Figure 4 – Annual subsidence rate

تغییرات نرخ فرونشست و سطح آب زیرزمینی

میانگین نرخ فرونشست بین سال ۲۰۲۲-۲۰۱۵ در شکل۵ آمده است. نتایج نشان می‌دهد که حداکثر نرخ فرونشست در قسمت‌های مرکزی و جنوبی آبخوان مرودشت از ۷۰/۵ - تا ۳۶ - سانتی‌متر در بازه ۷ سال متغیر است. در قسمت جنوب‌شرقی و بخشی از شمال آبخوان نرخ فرونشست برابر با صفر بوده است. سپس در اطراف این بخش مقادیر فرونشست دارای کمترین میزان در طی بازه ۷ ساله بوده که دارای نرخی کمتر از ۱۵ سانتی‌متر هستند. شهر مرودشت نیز در مرکز آبخوان قرار دارد که با توجه به شکل۵ در محدوده فرونشست قرار نداشته است. شکل۶- الف نمودار میانگین روند تغییرات سطح آب زیرزمینی و نرخ فرونشست در کل آبخوان بین سال‌های ۲۰۲۲-۲۰۱۲ را نشان می‌دهد. از سال ۲۰۱۳ تغییرات سطح آب زیرزمینی تا سال ۲۰۱۵ روند افزایشی داشته است. در سال ۲۰۱۷-۲۰۱۵ سطح آب زیرزمینی کاهش یافته و تغییرات ارتفاعی سطح زمین نیز کاهش یافته که نشان‌دهنده افزایش نرخ فرونشست است. از سال ۲۰۱۸-۲۰۱۷ با افزایش سطح آب زیرزمینی، مقادیر فرونشست کاهش یافته است. سپس در سال ۲۰۱۹-۲۰۱۸ با کاهش بسیار زیاد سطح آب زیرزمینی، روند تغییرات سطح زمین نیز کاهش یافته به صورتی که بیشترین مقادیر رخداد فرونشست را نشان می‌دهد. تغییرات سطح آب زیرزمینی از سال ۲۰۲۱-۲۰۱۹ روند افزایشی داشته و روند تغییرات ارتفاعی زمین نیز افزایش یافته که نشان‌دهنده کاهش مقادیر فرونشست در آبخوان مرودشت است. از سوی دیگر ضریب تعیین(تشخیص) بین میانگین نرخ فرونشست و میانگین تغییرات سطح آب زیرزمینی در کل آبخوان مرودشت برابر با $R^2 = 0.26$ است که نشان از همبستگی ضعیف بین میانگین تغییرات نرخ فرونشست و تغییرات سطح آب زیرزمینی در آبخوان مرودشت است. شکل ۶-ب میانگین روند تغییرات سطح آب زیرزمینی و نرخ فرونشست زمین را در مناطق دارای فرونشست نشان می‌دهد. نتایج حاکی از آن است که با یک تأخیر زمانی حدود دو ساله، بیشترین همبستگی بین

تغییرات سطح آب زیرزمینی و نرخ فرونشست مشاهده شده است. به‌گونه‌ای که از سال ۲۰۱۳ با افزایش سطح آب زیرزمینی، نرخ فرونشست روند کاهشی داشته و در مقابل، از سال ۲۰۱۵ با کاهش سطح آب زیرزمینی، نرخ فرونشست افزایش یافته است. ضریب تعیین بین میانگین نرخ فرونشست و میانگین تغییرات سطح آب زیرزمینی در این مناطق برابر با $R^2 = 0.50$ به‌دست آمده است که نشان‌دهنده همبستگی نسبتاً بالا و معنی‌دار آماری در سطح ۵ درصد بین این دو متغیر می‌باشد. این یافته بیانگر تأثیر مستقیم و قابل توجه افت سطح آب زیرزمینی بر شدت فرونشست زمین در مناطق دارای جابه‌جایی است.



شکل ۶ الف-روند تغییرات سطح آب زیرزمینی و نرخ فرونشست در کل آبخوان، ب- روند تغییرات سطح آب زیرزمینی و نرخ فرونشست در مناطق دارای فرونشست

Figure 6a- Trends in groundwater level changes and land subsidence rate across the entire aquifer, b-Trends of groundwater level changes and subsidence rates in subsiding area

بحث و نتیجه‌گیری

فرونشست یکی از مهم‌ترین پدیده‌های مخاطره‌آمیزی است که خسارت‌های زیادی را به بار می‌آورد. شناخت علل اصلی وقوع آن می‌تواند به جلوگیری از گسترش شدت آن کمک کند. نتایج حاصل از این پژوهش در آبخوان مرودشت از سال ۲۰۲۲-۲۰۱۵ نشان داد که حداکثر نرخ فرونشست سالانه در سال ۲۰۱۶-۲۰۱۵ با ۲۴/۱ سانتی‌متر در سال رخ داده است. همچنین روند نرخ فرونشست از سال ۲۰۱۵ تا ۲۰۲۲ بجز سال ۲۰۲۰-۲۰۱۹ کاهشی بوده، به طوری که کمترین نرخ فرونشست در سال۲۰۱۹-۲۰۱۸ برابر با ۱۶/۳ سانتی‌متر در سال بوده است. روند تغییرات میانگین سالانه نرخ فرونشست در آبخوان مرودشت در طی سال‌های ۲۰۱۷-۲۰۱۶ و ۲۰۲۰-۲۰۱۹ با تغییرات تراز آب زیرزمینی در این دو بازه زمانی همخوانی دارد به صورتی که با کاهش تراز آب زیرزمینی، مقادیر فرونشست در این دو بازه افزایش یافته است و این امر بیانگر آن است که بین نرخ فرونشست و تغییرات تراز آب زیرزمینی رابطه معنی‌داری وجود دارد.

اما نتایج همبستگی بین میانگین تغییرات سالانه تراز آب زیرزمینی با تغییرات ارتفاعی در کل این آبخوان نشان از همبستگی پایین بین آن‌ها است. می‌توان دلیل آن را درنظر گرفتن میانگین تغییرات تراز آب زیرزمینی و تغییرات ارتفاعی سطح زمین در کل سطح آبخوان نه در مناطق دارای فرونشست دانست. از طرفی، بررسی ارتباط بین روند تغییرات سطح آب زیرزمینی و نرخ فرونشست در مناطق دارای فرونشست نشان داد که رابطه معنی‌دار بین تغییرات سطح آب زیرزمینی و نرخ فرونشست زمین وجود دارد. نتایج بیانگر آن است که با یک تأخیر زمانی حدود دو ساله، الگوی تغییرات نرخ فرونشست از تغییرات سطح آب زیرزمینی پیروی می‌کند. افزایش سطح آب زیرزمینی از سال ۲۰۱۳ با کاهش نرخ فرونشست همراه بوده است، در حالی که افت محسوس سطح آب زیرزمینی از سال ۲۰۱۵ به بعد با افزایش نرخ فرونشست هم‌زمان شده است. این روند در داده‌های آماری نیز منعکس شده، به‌طوری‌که ضریب تعیین بین میانگین تغییرات سطح آب زیرزمینی و نرخ فرونشست برابر با ۰/۵ به‌دست آمده است. این مقدار بیانگر همبستگی نسبتاً قوی و از لحاظ آماری معنی‌دار در سطح ۵ درصد می‌باشد. بنابراین، می‌توان نتیجه گرفت که افت سطح آب زیرزمینی یکی از عوامل کلیدی و مستقیم در افزایش نرخ فرونشست زمین در این مناطق است. این یافته اهمیت مدیریت منابع آب زیرزمینی را در کاهش و کنترل پدیده فرونشست به‌خوبی نشان می‌دهد. از سوی دیگر مجموع نرخ فرونشست بین سال‌های ۲۰۱۵ تا ۲۰۲۲ نشان داد که حداکثر نرخ فرونشست در بخش مرکزی و جنوبی آبخوان در مناطقی که حداکثر تراکم چاه‌های بهره‌برداری بوده در حدود ۳۰ تا ۷۰ سانتی‌متر است این در صورتی که بخش جنوب شرقی و شمال آبخوان که دارای کمترین تراکم چاه بهره‌برداری است، مقادیر فرونشست آن برابر با صفر بوده به صورتی که شهر مرودشت نیز در این محدوده قرار دارد. این موضوع نشان‌دهنده نقش تراکم چاه‌های بهره‌برداری و برداشت بی‌رویه از آب‌های زیرزمینی در تغییرات ارتفاعی سطح زمین در آبخوان مرودشت است. نتایج این پژوهش با تحقیقات Shahkarami و همکاران (۲۰۲۰)، Ranjbar Baruq و همکاران (۲۰۲۲)، Motedayen و همکاران (۲۰۲۳)، Hussain و همکاران (۲۰۲۲) و Liu و همکاران (۲۰۲۳)، که تقریباً برداشت مازاد از سفره‌های آب زیرزمینی را علت پدیده فرونشست بیان نموده‌اند، مطابقت دارد. بنابراین از آنجایی که بیشترین نرخ فرونشست در آبخوان مرودشت در مناطق کشاورزی و کمترین آن در بخش انتهایی آبخوان یعنی اراضی بایر و شهری رخ داده است نشان‌دهنده رابطه معنی‌دار بین تعداد چاه‌های بهره‌برداری و به‌تبع آن نقش بهره‌برداری از آب‌های زیرزمینی و نرخ فرونشست در آبخوان مرودشت است. یافته‌های این پژوهش نشان می‌دهد که مدیریت پایدار منابع آب نقش کلیدی در کاهش نرخ فرونشست زمین دارد. بر این اساس، راهکارهایی نظیر کنترل برداشت‌های بی‌رویه از طریق نصب کنتورهای هوشمند، توسعه تغذیه مصنوعی آبخوان‌ها با استفاده از منابع آب سطحی و پساب تصفیه‌شده، ارتقاء بهره‌وری مصرف آب در کشاورزی با بهره‌گیری از روش‌های نوین آبیاری، و تدوین طرح‌های پهنه‌بندی خطر فرونشست با هدف هدایت توسعه شهری پیشنهاد می‌شود. همچنین، آموزش و آگاه‌سازی بهره‌برداران در خصوص پیامدهای فرونشست می‌تواند نقش مؤثری در کاهش آسیب‌ها و ارتقاء مشارکت مردمی ایفا کند. تحقق این اقدامات در چارچوب سیاست‌های یکپارچه مدیریت منابع آب، می‌تواند به کاهش مخاطرات ناشی از فرونشست و پایداری توسعه در مناطق آسیب‌پذیر منجر شود.

References

Aghayari, L., Abedini, M., & Asghari Saraskanroud, S. (2022). Estimation of land subsidence using radar interferometry technique and groundwater and land use parameters (Case study: Ardabil Plain). *Quantitative Geomorphological Research*, 11(1), 117-132.

Asadi, M., Ganjavian, H., Javdani, M., & Ghaderi Hesab, M. (2021). Assessment of the relationship between natural factors and the rate of land subsidence in the Eyvanekey plain using radar imagery. *Hydrogeology*, 6(1), 13–22. https://doi.org/10.22034/hydro.2021.13016.

Amighpey, M., Arabi, S., Gharaeian, F., & Molaei, A. (2023). Investigation of land subsidence around lake Urmia using geodetic observations. *Iranian Water Resources Research*, 19(2), 196–206.

Abedini, M. (2017). *Fundamentals of land subsidence* (*Hydrogeomorphological Hazards and Environmental Management*). Ardabil University Press, First Edition, pp. 1–230.

Abedini, M. (2013). Investigation of the causes of land subsidence in Ardabil plain and its effects within the city limits. *Scientific-Research Quarterly, Physical Geography*, 6 (19), 71–84.

Abbasnejad, A. (1998). Investigation of geological conditions and environmental issues of Rafsanjan plain. *Proceedings of the Second Conference of the Geological Society of Iran (Abstracts)*.

Abidin, H. Z., Djaja, R., Darmawan, D., Akbar, A., Rajiyowiryono, H., Sudibyo, Y., & et al. (2001). Land subsidence and its geodetic system in Jakarta, Indonesia. *Natural Hazards* 23, 365–387. https://doi.org/10.1023/A:1011144602064

Burbey, T. J. (2003). Use of time–subsidence data during pumping to characterize specific storage and hydraulic conductivity of semi-confining units. *Journal of Hydrology*, 281 (1-2), 3–22. https://doi.org/10.1016/S0022-1694(03)00197-5

Figueroa-Miranda, S., Tuxpan-Vargas, J., Ramos-Leal, J. A., Hernández-Madrigal, V. M., & Villaseñor-Reyes, C. I. (2018). Land subsidence by groundwater overexploitation from aquifers in tectonic valleys of Central Mexico: a review. *Engineering Geology*. 246, 91–106. https://doi.org/10.1016/j.enggeo.2018.09.023

Ferretti, A., Prati, C. & Rocca, F., (2002). Permanent scatterers in SAR interferometry. *IEEE Transactions on geoscience and remote sensing*, 39(1), 8-20. https://doi.org/10.1109/36.898661

Foumelis, M., Blasco, J. M. D., Desnos, Y. L., Engdahl, M., Fernández, D., Veci, L., & Wong, C. (2018). ESA SNAP-StaMPS integrated processing for Sentinel-1 persistent scatterer interferometry. In *IGARSS 2018-2018 IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium* (pp. 1364-1367). IEEE. https://doi.org/10.1109/IGARSS.2018.8519545

Gabriel, AK., Goldestein, R.M., & H.A. Zebker. (1989). Mapping small elevation changes over large areas – Differential radar interferometry. *Journal of Geophysical Research*, 94(B7): 9183-9191. https://doi.org/10.1029/JB094iB07p09183

Guo, H., Martínez-Graña, A. M., & González-Delgado, J. A. (2024). Monitoring the subsidence in Wan'an Town of Deyang based on PS-InSAR technology (Sichuan, China). *Sustainability*, 16(16), 10010. https://doi.org/10.3390/su162210010

Hussain, M.A., Chen, Z., Shoaib, M., Ullah Shah, S., Khan, J., & Ying, Z., (2022). Sentinel1A for monitoring land subsidence of coastal city of Pakistan using persistent Scatterers In-SAR technique., *Sci Rep* 12 ,5294. https://doi.org/10.1038/s41598-022-09359-7

Hosseinzadeh, S. R., Akbari, E., Javanshiri, M., & Mohammadpour, Z. (2023). Spatial analysis of ground subsidence using radar interferometry (Case study: Central plain of Ghaen city). *Journal of Geography and Environmental Hazards*, 11(4): 99- 125.

https://doi.org/10.22067/geoeh.2022.75138.1169 (In Persian)

Hung, W. C., Hwang, C., Lin, S.H., Wang, C. S., Chen, Y.A., Tsai, P. C., & Lin, K. C. (2024). Exploring groundwater depletion and land subsidence dynamics in Taiwan's Choushui river alluvial fan: insights from integrated GNSS and hydrogeological data analysis. *Frontiers in Earth Science*, 12:1370626. https://doi.org/10.3389/feart.2024.1370626

Herrera-Garcia, G., Ezquerro, P., Tomás, R., Béjar-Pizarro, M., López-Vinielles, J., Rossi, M., & et al. (2021). Mapping the global threat of land subsidence. *Science*, 371, 34–36. https://doi.org/10.1126/science.abb8549

Kazemi, M., Khosravi, H., Salajegheh, A., Khalighi Sigaroudi, Sh., & Mohammadkhan, Sh. (2024). Monitoring land subsidence based on differential radar interferometry and groundwater level changes (Case study: Kermanshah Aquifer). *Iranian Journal of Watershed Science and Engineering*, 18(67), 31–43. https://doi.org/10.22034/18.67.3

Khosh Akhlagh, F., Ranjbar, F., Toulabi, S., & Masoompour Samakoosh, J. (2010). Investigation of the drought in the water year 2007-2008 and its effects on water resources and agriculture (Case study: Marvdasht county). *Geography (Iranian Geographical Association)*, 8(24), 119–148.

Liu, z., Ng, A. H. M., Wang, H., Chen, J., Du, Z., & Ge, L. (2023). Land subsidence modeling and assessment in the West Pearl River Delta from combined InSAR time series, land use and geological data. *International journal of applied earth observation and geoinformation*, 118, 103228. https://doi.org/10.1016/j.jag.2023.103228

Motedayen, M. H., Esfandiari, M., Moeini, A., Mohammadi Torkashvand, A. (2023). Evaluation of land subsidence in the Gorgan plain. *Hydrogeomorphology*, 10(35): 102-119. https://doi.org/10.22034/HYD.2023.55996.1688

Nasiri, Alavi Panah, Matinfar, Azizi, & Hamzeh (2012). Implementation of an ecological agricultural model using PROMETHEE II and Fuzzy AHP approaches in a GIS environment (Case study: Marvdasht County). *Environmental Studies*, 38(3), 109–122.

Qasemi, A., Bahmani, O., Akhavan, S., & Por Qasemi, H. R. (2023). Investigating the subsidence of kobodar Ahang plain based on radar interferometric technique and changes in underground water level. *Journal of Water and soil science*, 33(2): 201-183. https://doi.org/10.22034/ws.2021.48295.2442 (In Persian)

Ranjbar Baruq, Z., & Fathollazadeh, M. (2022). Investigation of land subsidence using radar image time series and its relationship with groundwater level changes (Case study: Karaj Metropolis). *Quantitative Geomorphological Research*, 10(4), 138–155. https://doi.org/10.22034/gmpj.2022.313426.1313.

Shafiai, N., Goli Mokhtari, L., Amir Ahmadi, A., & Zandi, R. (2021). Spatial analasis of ground subsidence and groundwater loss using GWR model (Case staudy: Noorabad Mamasani aquifer). *Scientific Journal of Geography and Planning*, 25(76): 159-171. https://doi.org/10.22034/gp.2021.11306 (In Persian)

Shemshaki, A., Bloorchi, M., & Ansari, F. (2005). Investigation of land subsidence in the Tehran–Shahriar plain. research project, *Geological Survey and Mineral Exploration of Iran*, Report No. 20/06-84 Engeo, pp. 1–84.

Shahkarami, N., & Ghasemi, S. (2020). Subsidence Areas Due to excessive groundwater extraction in the Arak plain. *The Fourth Technology Development Congress and International Conference on New Findings in Civil Engineering, Architecture, and Building Industry of Iran*, pp. 1–13.

Taylor, R. G., Scanlon, B., Döll, P., Rodell, M., Van Beek, R., Wada, Y., et al. (2013). Ground water and climate change. *Nature Climate Change* 3 (4), 322–329. https://doi.org/10.1038/nclimate1744

Tourani, M., Agh Atabay, M., & Roostaei, M. A. (2018). Study of land subsidence in Gorgan city using radar interferometry method. *Spatial Planning Journal*, 8(27), 117–128.

Wang, S. J., Nguyen, Q. C., Lu, Y. C., Doyoro, Y. G., & Tran, D. H. (2022). Evaluation of geological model uncertainty caused by data sufficiency using groundwater flow and land subsidence modeling as example. *Bulletin of Engineering Geology and the Environment*. 81 (8), 331. https://doi.org/10.1007/s10064-022-02832-7

Yeh, T.-K., Lee, T.-Y., Lee, I.-H., & Ni, C.-F. (2025). Combination on GNSS precise point positioning and InSAR data fusion to monitor the land subsidence in Taiwan. *Geomatics, Natural Hazards and Risk*, 16(1). https://doi.org/10.1080/19475705.2024.2445632