Kharazmi University

Journal of Engineering Geology

Journal home page https://jeg.khu.ac.ir

OPEN ACCESS

Online ISSN 2981-1600

Determining land subsidence rate and its relationship with groundwater level decline using satellite data in the Damghan aquifer

Akramalsadat Ghadami[1], Houshang Khairy[2]✉, Ebrahim Rahimi[3,4]

1,4. School of Earth Sciences, Damghan University, Damghan, Iran.

2. School of Earth Sciences, Damghan University, Damghan, Iran. E-mail: h.khairy@du.ac.ir

3. Department of Earth Sciences, College of science, Shiraz university, Shiraz, Iran.

Article Info

Article type:
Research Article

Article history:
Received 27 October 2025
Accepted 1 February 2026

Keywords:
Damghan aquifer, groundwater depletion, land subsidence, SNAP, Sentinel-1A.

ABSTRACT

Land subsidence is one of the major geomorphological hazards in arid and semi-arid regions. It is primarily caused by excessive groundwater extraction. In such areas, a decline in groundwater levels can lead to the irreversible compaction of fine-grained layers, a reduction in storage capacity, and damage to critical infrastructure. This study aims to monitor the rate of land subsidence in the Damghan aquifer and analyse its relationship with groundwater decline, using satellite data, piezometric information and field evidence. The study area covers part of the Damghan aquifer in Semnan Province, spanning approximately 1,522 km². It contains an unconfined aquifer within heterogeneous alluvial deposits. The dataset includes Sentinel-1A images from 2017 to 2021, records from 38 observation wells from 2017 to 2022, and drilling logs from 13 exploitation boreholes. The results indicated that the decline in groundwater levels in the central and south-eastern parts of the aquifer reached 5 metres, with an average annual rate of approximately 0.33 metres. Radar interferometry maps confirmed an average Analysis of soil texture and saturated thickness revealed that zones with higher percentages of clay and silt are more sensitive to groundwater decline. Even small drawdowns in boreholes containing fine-grained sediments resulted in noticeable subsidence, whereas boreholes containing coarse-grained sediments showed limited deformation. Field evidence, including casing protrusion in piezometer wells of up to 27 cm, the formation of initial sinkholes and changes in natural drainage patterns, highlights the practical implications of this phenomenon. The findings of this study demonstrate that, in interaction with geological characteristics and soil texture, groundwater decline is the main driver of subsidence in the Damghan aquifer. Therefore, continuous groundwater monitoring and targeted management of exploitation are essential to mitigate risks and ensure the region's environmental and economic sustainability.

Introduction

Land subsidence is a significant geohazard in arid and semi-arid regions, primarily caused by the extraction of excessive amounts of groundwater and the compaction of fine-grained sediments. In the Damghan Plain, for example, agricultural expansion and land conversion have put increased pressure on aquifers, resulting in a significant decline in groundwater levels and irreversible land deformation. This threatens vital infrastructure and reduces aquifer storage capacity. The Damghan aquifer, which is located within a tectonic basin containing heterogeneous alluvial deposits, plays a crucial role in the regional water supply. However, its lithological composition makes it highly susceptible to subsidence.

Materials and Methods

Data Sources and Processing Framework

This study integrates satellite radar interferometry (Sentinel-1A), groundwater monitoring data, and borehole logs to analyze subsidence patterns and their correlation with groundwater decline. Eight SLC radar images (2017–2021) were processed using MT-InSAR techniques in SNAP, with topographic corrections applied via SRTM DEM. Groundwater level data from 38 observation wells (2012–2019) were analyzed in ArcGIS, and subsurface profiles from 13 boreholes were interpreted using GMS software.

Subsidence Mapping and Validation

Eight interferograms were generated to produce semi-annual subsidence rate maps. Validation was performed using precise leveling data from station 1069BABI, confirming InSAR-derived rates of up to 5 cm/year compared to 1.1 cm/year from leveling.

Cite this article: Ghadami, A., Khairy, H., Rahimi, E. (2026). Determining land subsidence rate and its relationship with groundwater level decline using satellite data in the Damghan aquifer. Journal of Engineering Geology, 20 (1), 1-14. https//doi.org/10.22034/JEG.2026.20.1.1020151

© The Author(s).

Publisher: Kharazmi University.

DOI: https//doi.org/10.22034/JEG.2026.20.1.1020151

[Downloaded from ndea10.khu.ac.ir on 2026-11-01]

[DOI: 10.22034/JEG.2026.20.1.1020151]

Sensitivity Index and Zoning

A sensitivity index (Sc/Δh) was calculated for nine boreholes to assess soil response to groundwater decline. Zoning analysis using ArcMap's Reclassify tool identified high-risk subsidence zones.

Results and Discussion

The maximum subsidence rate was 32 cm and was concentrated in the central and southwestern parts of the plain. Over seven years, groundwater levels showed a cumulative decline of 3.26 metres, with the steepest drops (>7 metres) in the southeastern zones. Boreholes containing fine-grained sediments and experiencing moderate water decline exhibited higher subsidence sensitivity ($Sc/\Delta h > 0.30$). Zoning analysis revealed that 44% of the plain is affected by subsidence, with 8% experiencing critical deformation. There was no significant spatial correlation found between fault lines and subsidence zones, indicating that groundwater depletion and sediment compressibility are the dominant drivers.

Field surveys documented surface cracks along roads and railways, sinkholes near pumping wells, casing failures and structural damage to buildings and bridges. These manifestations highlight the practical consequences of subsidence hazards and the urgent need for mitigation measures.

Conclusions

An integrated spatiotemporal analysis has confirmed that land subsidence in the Damghan Plain is primarily caused by a decline in groundwater levels and the geotechnical properties of fine-grained sediments. These findings highlight the importance of continuous monitoring, sustainable groundwater management and development control in high-risk areas. This study provides a robust methodological framework for assessing subsidence and offers actionable insights into how to make infrastructure more resilient and aquifers more sustainable in vulnerable regions.

[Downloaded from ndea10.khu.ac.ir on 2026-11-01]

[DOI: 10.22034/JEG.2026.20.1.1020151]

نشریه زمین شناسی مهندسی
Journal home page https://jeg.khu.ac.ir
دانشگاه خوارزمی
دسترسی آزاد
شاپا الکترونیکی ۲۹۸۱-۱۶۰۰

تعیین نرخ فرونشست زمین و ارتباط آن با افت سطح آب زیرزمینی با استفاده از داده‌های ماهواره‌ای در آبخوان دامغان

اکرم‌السادات قدمی [۱]، هوشنگ خیری [۲]✉، ابراهیم رحیمی [۳،۴]

۱، ۴. دانشکده علوم زمین، دانشگاه دامغان، دامغان، ایران.
۲. دانشکده علوم زمین، دانشگاه دامغان، دامغان، ایران. رایانامه: h.khairy@du.ac.ir
۳. دانشکده علوم، دانشگاه شیراز، شیراز، ایران.

اطلاعات مقاله

نوع مقاله: مقاله پژوهشی

تاریخ دریافت: ۱۴۰۴/۰۸/۰۵
تاریخ پذیرش: ۱۴۰۴/۱۱/۱۲

کلیدواژه‌ها:
آبخوان دامغان، افت آب زیرمینی، فرونشست، SNAP، Sentinel-1A .

چکیده

فرونشست زمین یکی از مخاطرات ژئومورفولوژیکی مهم در مناطق خشک و نیمه‌خشک محسوب می‌شود که عمدتاً ناشی از برداشت بی‌رویه از منابع آب زیرزمینی است. در چنین مناطقی، افت سطح آب موجب فشردگی غیرقابل برگشت لایه‌های ریزدانه، کاهش ظرفیت ذخیره‌سازی آب و آسیب به زیرساخت‌های حیاتی می‌گردد. هدف این پژوهش، پایش نرخ فرونشست زمین در آبخوان دامغان و تحلیل ارتباط آن با افت سطح آب زیرزمینی با استفاده از داده‌های ماهواره‌ای، اطلاعات پیزومتری و شواهد میدانی است. منطقه مورد مطالعه بخشی از آبخوان دامغان در استان سمنان با وسعتی حدود ۱۵۲۲ کیلومتر مربع است که میزبان یک آبخوان آزاد در میان نهشته‌های آبرفتی ناهمگن می‌باشد. داده‌های مورد استفاده شامل تصاویر Sentinel-1A در بازه ۲۰۱۷ تا ۲۰۲۱، اطلاعات ۳۸ چاه مشاهده‌ای طی سال‌های ۱۳۹۶ تا ۱۴۰۲، و لاگ‌های حفاری ۱۳ گمانه بهره‌برداری بوده است. نتایج نشان داد که افت سطح آب زیرزمینی در بخش‌های مرکزی و جنوب‌شرقی آبخوان تا ۵ متر و با نرخ متوسط سالانه حدود ۰/۳۳ متر رخ داده است. نقشه‌های تداخل‌سنجی راداری نرخ متوسط فرونشست را حدود ۰/۳۲ متر در همین نواحی تأیید کردند. تحلیل بافت خاک و ضخامت لایه‌های اشباع نشان داد که مناطق با درصد بالای رس و سیلت حساسیت بیشتری به افت آب دارند و در گمانه‌هایی با ریزدانه بالا حتی افت‌های کوچک نیز منجر به نشست محسوس شده است، در حالی‌که در گمانه‌های با ریزدانه ناچیز نشست محدود بوده است. شواهد میدانی شامل بیرون‌زدگی لوله‌های جدار چاه‌های پیزومتری تا حدود ۲۷ سانتی‌متر، فروچاله‌های اولیه و تغییر در الگوی زهکشی طبیعی، ابعاد عملی این پدیده را برجسته می‌سازد. یافته‌های این پژوهش نشان می‌دهد که افت سطح آب زیرزمینی در تعامل با ویژگی‌های زمین‌شناسی و بافت خاک عامل اصلی بروز فرونشست در آبخوان دامغان است و پایش مستمر منابع آب زیرزمینی و مدیریت هدفمند بهره‌برداری برای کاهش مخاطرات و حفظ پایداری زیست‌محیطی منطقه ضروری است.

مقدمه

فرونشست زمین یکی از مخاطرات ژئومورفولوژیکی مهم در مناطق خشک و نیمه‌خشک محسوب می‌شود که عمدتاً ناشی از برداشت بی‌رویه از منابع آب زیرزمینی است (Bianchini et al., 2019) . در چنین مناطقی، کمبود منابع آبی، به‌ویژه برای مصارف کشاورزی، عامل محدودکننده توسعه محسوب می‌شود. تبدیل اراضی بیابانی به زمین‌های کشاورزی طی دهه‌های اخیر فشار مضاعفی بر سفره‌های زیرزمینی وارد کرده و به‌تدریج افت سطح آب و فرونشست زمین را به‌دنبال داشته است. این فرایند می‌تواند به فشردگی دائمی آبرفت‌ها منجر شود که علاوه‌بر کاهش ظرفیت ذخیره‌سازی آب، زیرساخت‌های حیاتی و سکونتگاه‌های انسانی را نیز در معرض آسیب قرار می‌دهد (Chaussard et al., 2013). مکانیسم فیزیکی فرونشست بر پایه‌ی فشردگی لایه‌های ریزدانه و کاهش تخلخل در نتیجه افت سطح آب زیرزمینی استوار است (Ferretti et al., 2001). با کاهش سطح آب، تنش مؤثر بر ذرات خاک افزایش یافته و در نتیجه، خلل و فرج بسته می‌شوند و فشردگی اتفاق می‌افتد. پارامترهایی مانند ضریب ذخیره الاستیک

استناد: قدمی، ا.، خیری، ه.، رحیمی، ا. (۱۴۰۵). تعیین نرخ فرونشست زمین و ارتباط آن با افت سطح آب زیرزمینی با استفاده از داده‌های ماهواره‌ای در آبخوان دامغان.
مجله زمین شناسی مهندسی، ۲۰ (۱)، ۱۴-۱. https://doi.org/10.22034/JEG.2026.20.1.1020151

ناشر: دانشگاه خوارزمی.
© نویسندگان.
CC BY NC

[Downloaded from ndea10.khu.ac.ir on 2026-11-01]
[DOI: 10.22034/JEG.2026.20.1.1020151]

و غیرالاستیک، هدایت هیدرولیکی عمودی و نوع رسوبات، در شدت و نرخ این پدیده نقش کلیدی دارند. با افزایش عمق، این ویژگی‌ها معمولاً کاهش می‌یابند، چرا که بارگذاری طبیعی رسوبات باعث کاهش تخلخل و نفوذپذیری می‌شود. برای پایش و تحلیل فرونشست، تکنولوژی‌های سنجش از دور مانند MT-InSAR به‌عنوان ابزاری دقیق و مؤثر توسعه یافته‌اند که قادرند جابجایی‌های سطح زمین را با دقت میلی‌متری اندازه‌گیری کرده و الگوهای فضایی فرونشست را نسبت به افت سطح آب زیرزمینی آشکار سازند (Ferretti et al., 2001).

مطالعات متعددی در سطح جهانی، نقش افت سطح آب زیرزمینی را به‌عنوان عامل اصلی فرونشست زمین تأیید کرده‌اند. باقری‌گاوکش و همکاران (Bagheri-Gavkosh et al., 2021) با بررسی ۲۹۰ مطالعه موردی از ۴۱ کشور، گزارش دادند که ۷۷٪ موارد فرونشست منشأ انسانی دارند و ۵۹٪ آن‌ها مستقیماً به برداشت آب زیرزمینی مرتبط هستند. قربانی و همکاران (Ghorbani et al., 2022) در دشت اردبیل با استفاده از داده‌های InSAR نشان دادند که برداشت بی‌رویه آب زیرزمینی عامل اصلی فرونشست در این منطقه است. مطق و همکاران (Motagh et al., 2008) در آبخوان تهران با استفاده از داده‌های InSAR ، نرخ بالای فرونشست را مستند کرده و ارتباط مستقیم آن با افت سطح آب و فشردگی لایه‌های ریزدانه را نشان دادند. همچنین صادقی و همکاران (Sadeghi et al., 2023) با بهره‌گیری از چارچوب FUCOM-GIS آسیب‌پذیری ایران در برابر خطر فرونشست را ارزیابی کرده و ارتباط مستقیم بین افت سطح آب و نرخ فرونشست را تأیید کردند. پنگ و همکاران (Peng et al., 2022) در آبخوان ویلکاکس آریزونا نیز نشان دادند که مناطق با لیتولوژی ریزدانه و برداشت بالا بیشترین نرخ فرونشست را دارند. عبیدین و همکاران (Abidin et al., 2011) در جاکارتا، نرخ فرونشست را بین ۱ تا ۲۸ سانتی‌متر در سال گزارش کردند که مستقیماً با برداشت بی‌رویه مرتبط بود. فاونت و همکاران (Faunt et al., 2024) در دره مرکزی کالیفرنیا، با استفاده از مدل CVHM2، تخمین زدند که حدود ۱۵٪ از ذخایر آب زیرزمینی به‌صورت دائمی و ناشی از فرونشست غیرقابل برگشت از دست رفته است. کین و همکاران (Qin et al., 2025) نیز رابطه‌ای تحلیلی بین میزان فرونشست و فاصله از چاه‌های پمپاژ ارائه دادند که بر اساس اصول تنش مؤثر و ساختار آبخوان توسعه یافته است.

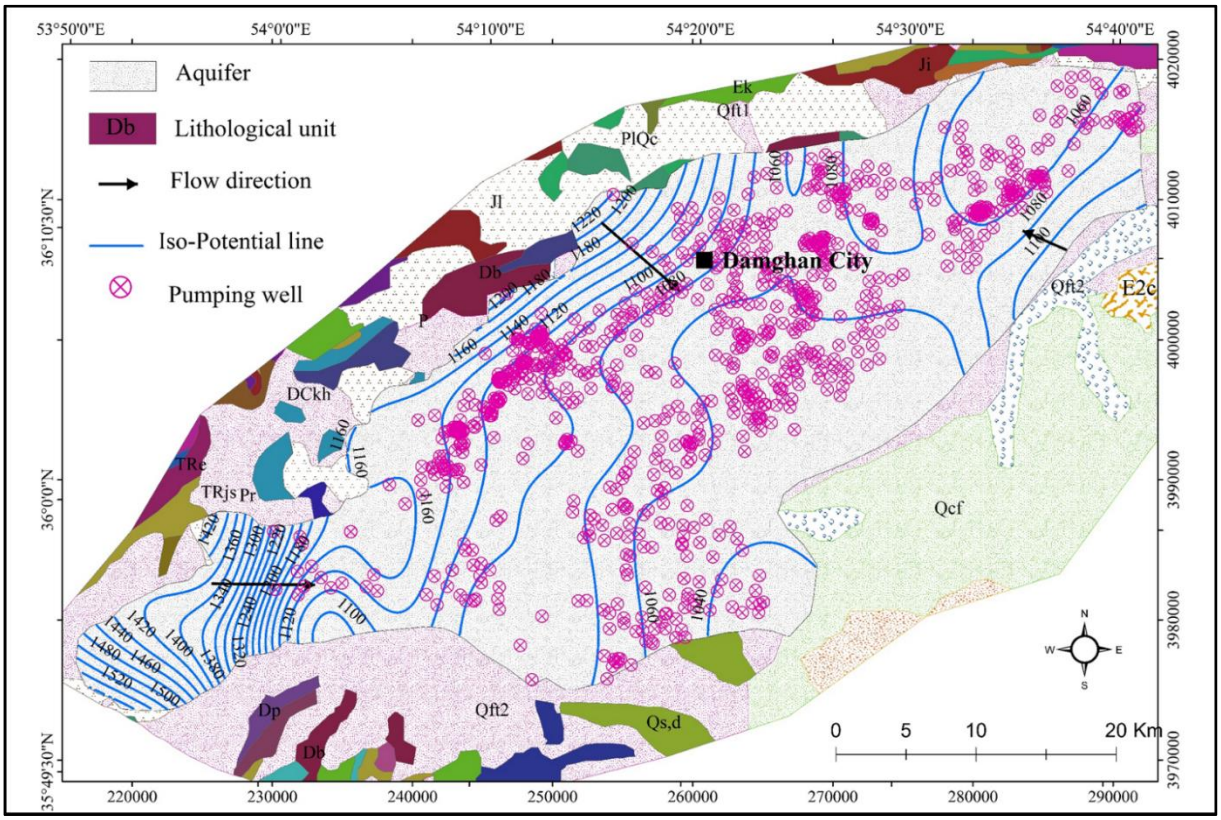
منطقه مورد مطالعه در این تحقیق، بخشی از آبخوان دامغان در استان سمنان است که در پهنه‌ای آبرفتی و مستعد فرونشست قرار دارد و وابستگی بالایی به منابع آب زیرزمینی دارد. با توجه به وابستگی شدید فعالیت‌های کشاورزی، دام‌پروری و صنعتی منطقه به آبخوان آبخوان دامغان، افت سطح آب زیرزمینی در سال‌های اخیر موجب بروز نشانه‌های فرونشست و تهدید زیرساخت‌های حیاتی شده است. این پدیده با ایجاد انحنا در خطوط انتقال آب، فاضلاب، نفت و گاز و تأثیر بر پایداری دکل‌های برق فشارقوی، یک خطر بالقوه برای زیرساخت‌های حیاتی و بهره‌برداری پایدار از منابع آب محسوب می‌شود. تداوم این روند، نیازمند توجه جدی و برنامه‌ریزی ملی برای پایش و مدیریت منابع آب زیرزمینی است. هدف این مطالعه، تعیین نرخ فرونشست زمین در آبخوان دامغان و تحلیل ارتباط آن با افت سطح آب زیرزمینی با استفاده از داده‌های ماهواره‌ای است تا زمینه‌ای برای مدیریت بهینه منابع آب و کاهش مخاطرات زیرساختی فراهم گردد.

منطقه مورد مطالعه

دشت دامغان با وسعتی حدود ۱۵۲۲ کیلومتر مربع در بخش مرکزی استان سمنان واقع شده و میزبان یک آبخوان آزاد و گسترده در میان نهشته‌های آبرفتی است (شکل ۱). این آبخوان نقش هیدرولوژیکی مهمی در منطقه ایفا می‌کند و تأمین‌کننده اصلی آب برای شهر دامغان با جمعیتی نزدیک به ۹۴ هزار نفر است. تغذیه آبخوان عمدتاً از ارتفاعات آهکی شمالی با ارتفاعی تا ۲۸۱۳ متر صورت می‌گیرد و جریان آب زیرزمینی را از شمال‌غرب به سمت حاشیه‌های جنوب‌شرقی کویری هدایت می‌کند (Ashuri et al., 2023). شیب هیدرولیکی با توپوگرافی منطقه هم‌راستا بوده و موجب هم‌جهتی زهکشی سطحی و زیرسطحی می‌شود. اقلیم منطقه خشک بوده و با تابستان‌های گرم و زمستان‌های سرد مشخص می‌شود؛ میانگین بارندگی سالانه حدود ۱۲۴ میلی‌متر و میانگین دمای سالانه در حدود ۱۶٫۵ درجه سانتی‌گراد است. تبخیر و تعرق شدید، بادهای فصلی و نوسانات دمایی قابل‌توجه، پویایی تغذیه و پایداری منابع آب زیرزمینی را پیچیده‌تر می‌سازند. آبخوان

[Downloaded from ndea10.khu.ac.ir on 2026-11-01]
[DOI: 10.22034/JEG.2026.20.1.1020151]

دامغان در درون نهشته‌های آبرفتی گسترده‌ای جای گرفته که عمدتاً از تناوب لایه‌های ریزدانه مانند سیلت و رس، همراه با لایه‌های ماسه‌ای و گراولی تشکیل شده‌اند. حضور گسترده‌ی رسوبات ریزدانه با تراکم‌پذیری بالا، به‌ویژه در بخش‌های مرکزی و جنوبی آبخوان، شرایط زمین‌شناسی را برای بروز فرونشست بسیار مستعد کرده است (Bianchini et al., 2023). این لایه‌ها در اثر افت سطح آب زیرزمینی دچار فشردگی غیرقابل برگشت می‌شوند و کاهش تخلخل و نشست تدریجی زمین را به‌دنبال دارند. مطالعات پیشین نیز نشان داده‌اند که در چنین محیط‌های آبرفتی با ساختار لایه‌ای و ناهمگن، افت سطح آب می‌تواند منجر به نشست‌های موضعی و ناپیوسته شود که شناسایی و پایش آن‌ها برای مدیریت مخاطرات زیرساختی ضروری است.



شکل ۱. واحدهای زمین‌شناسی، خطوط هم‌پتانسیل آب زیرزمینی و موقعیت آبخوان دامغان. فلش‌های قرمز رنگ جهت جریان آب زیرزمینی را نشان می‌دهند.

Fig. 1. Geological units, groundwater equipotential lines, and the location of the Damghan aquifer. Red arrows indicate the direction of groundwater flow.

مواد و روش‌ها

داده‌های مورد استفاده و محدوده زمانی مطالعه

در این پژوهش، به‌منظور بررسی نرخ فرونشست زمین و ارتباط آن با افت سطح آب زیرزمینی در آبخوان دامغان، از داده‌های ماهواره‌ای و اطلاعات زمینی بهره گرفته شده است. تصاویر ماهواره‌ای Sentinel-1A در بازه‌ی زمانی ۲۰۱۷ تا ۲۰۲۱ برای تحلیل تغییرات سطح زمین به‌کار گرفته شدند. همچنین داده‌های مربوط به ۳۸ چاه مشاهده‌ای در بازه‌ی زمانی ۱۳۹۶ تا ۱۴۰۲ جهت بررسی افت سطح آب زیرزمینی استفاده گردید. علاوه بر این، اطلاعات لاگ ۱۳ چاه پیزومتری و بهره‌برداری شامل مختصات جغرافیایی، بافت خاک، ضخامت لایه‌ها و تراز آب در محیط GMS سازماندهی و تحلیل شد.

نرم‌افزارهای مورد استفاده در پردازش و تحلیل

برای پردازش داده‌های راداری، از نرم‌افزار SNAP استفاده شد که توسط آژانس فضایی اروپا توسعه یافته و قابلیت پردازش تصاویر سری Sentinel را داراست. این نرم‌افزار امکان پیش‌پردازش،

[Downloaded from ndea10.khu.ac.ir on 2026-11-01]
[DOI: 10.22034/JEG.2026.20.1.1020151]

تشکیل اینترفروگرام، بازیابی فاز و زمین‌مرجع‌سازی را فراهم می‌کند. تحلیل سری زمانی افت سطح آب زیرزمینی با استفاده از نرم‌افزار ArcGIS انجام شد. همچنین برای بررسی ویژگی‌های زیرسطحی و تحلیل لاگ چاه‌ها، از نرم‌افزار GMS بهره گرفته شد که امکان ترسیم پروفیل‌های زیرسطحی و تحلیل بافت خاک را فراهم می‌سازد.

مراحل پردازش تداخل‌سنجی راداری

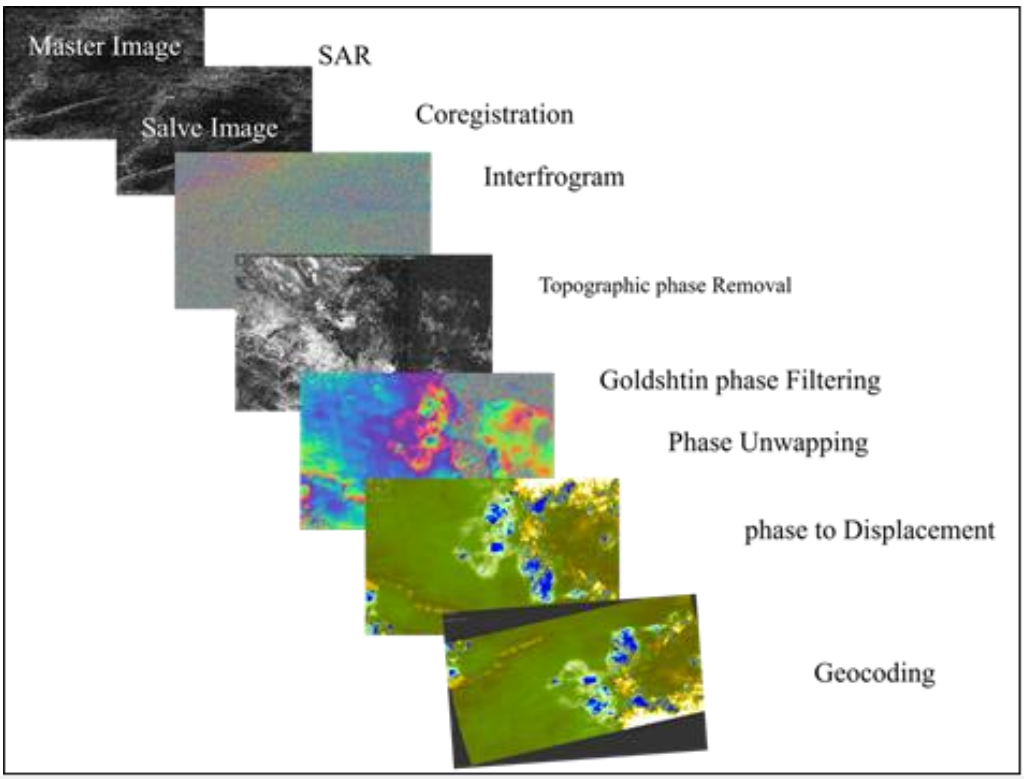
پردازش داده‌های راداری با انتخاب تصاویر SLC آغاز شد. سپس مراحل پیش‌پردازش شامل اصلاح خطاهای تصویری، ثبت هندسی تصاویر، بازنمونه‌برداری و اعمال فیلتر اولیه انجام شد. در ادامه، تداخل‌نما تشکیل گردید و اثر انحنای زمین و فاز توپوگرافی با استفاده از مدل ارتفاعی رقومی SRTM حذف شد. برای کاهش نویز، از فیلتر تطبیقی گلداشتاین استفاده شد. پس از بازیابی فاز، عملیات تبدیل فاز به فاصله و زمین‌مرجع‌سازی داده‌ها انجام شد تا نقشه‌ی جابجایی سطح زمین تولید گردد. در شکل ۲ فلوچارت روش تولید نقشه جابه‌جایی زمین ارائه شده است.

تحلیل افت سطح آب زیرزمینی و ارتباط با فرونشست

به‌منظور بررسی تغییرات تراز آب زیرزمینی، داده‌های چاه‌های مشاهده‌ای در محیط ArcGIS تحلیل شد. این داده‌ها شامل نوسانات سطح آب در طی ۷ سال بوده و برای بررسی روند افت و ارتباط آن با فرونشست زمین به‌کار گرفته شدند. اطلاعات لاگ چاه‌ها نیز در محیط GMS تحلیل گردید تا ویژگی‌های زیرسطحی از جمله ضخامت لایه‌ها و نوع بافت خاک مشخص شود.

چارچوب تلفیقی تحلیل مکانی و زمانی

در این پژوهش، با تلفیق داده‌های راداری و زمینی در محیط‌های SNAP، ArcGIS و GMS، چارچوبی ترکیبی برای تحلیل مکانی و زمانی پدیده‌ی فرونشست ارائه شد. این رویکرد چندمنظوره امکان بررسی همبستگی بین نرخ فرونشست و تغییرات سطح آب زیرزمینی را فراهم ساخت. استفاده از ابزارهای پردازش تصویری، مدل‌سازی زیرسطحی و تحلیل آماری، بستری مناسب برای شناخت دقیق‌تر رفتار زمین در مواجهه با افت منابع آب زیرزمینی فراهم نمود.



شکل ۲. فلوچارت روش تولید نقشه جابه‌جایی زمین

Fig. 2. Flowchart of the methodology for generating land displacement maps.

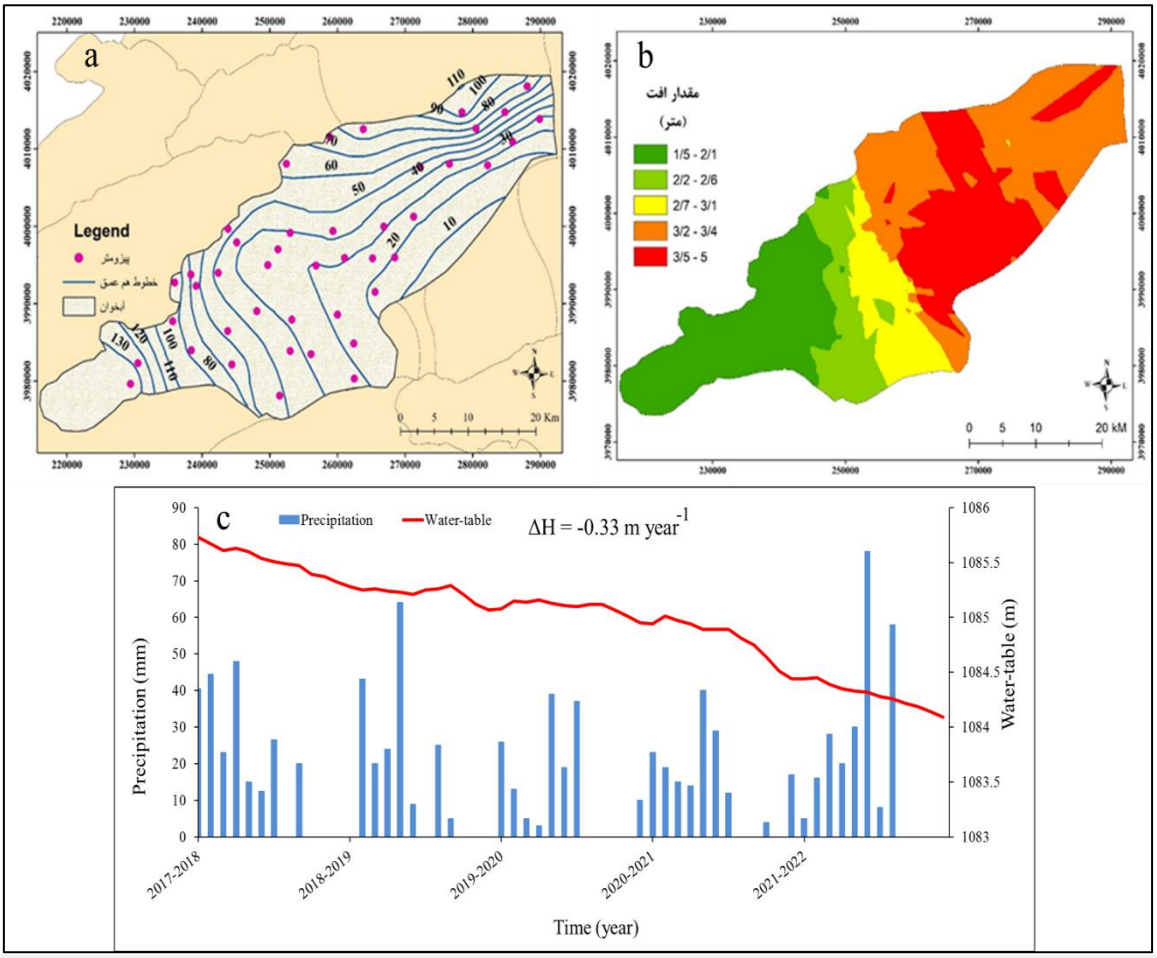
[Downloaded from ndea10.khu.ac.ir on 2026-11-01]

[DOI: 10.22034/JEG.2026.20.1.1020151]

نتایج و بحث

ویژگی‌های هیدروژئولوژیکی آبخوان دامغان

آبخوان دامغان در یک چاله تکتونیکی واقع شده و عمدتاً از رسوبات آبرفتی مخروط‌افکنه‌ها و دشت‌های سیلابی تشکیل شده است. این رسوبات از شمال به جنوب با کاهش اندازه دانه‌ها همراه هستند، اما به‌دلیل عملکرد گسل‌ها، الگوی دانه‌بندی یکنواختی مشاهده نمی‌شود. بررسی لاگ‌های حفاری و مطالعات ژئوفیزیکی نشان می‌دهد که شرایط رسوب‌گذاری و ساختارهای زمین‌شناسی نقش مهمی در تعیین نوع و توان آبدهی آبخوان دارند. شبکه پیزومتری شامل ۳۸ چاه مشاهده‌ای در بازه زمانی ۱۳۹۶ تا ۱۴۰۲ پایش شده است. نقشه هم‌عمق سطح ایستابی نشان می‌دهد که عمق آب زیرزمینی از ۱۰ تا ۱۳۰ متر متغیر است و بیشترین عمق در غرب و جنوب غربی آبخوان مشاهده می‌شود (شکل ۳- a). تحلیل داده‌ها نشان داد که سطح ایستابی در تمامی چاه‌ها روند نزولی داشته، اما شدت افت در نقاط مختلف متفاوت بوده است. بیشترین افت سطح آب مربوط به نیمه مرکزی آبخوان با افت ۳/۵ تا ۵ متر بوده است (شکل ۳- b). هیدروگراف واحد آبخوان نیز نشان‌دهنده افت تجمعی ۱/۶۴ متر در طول ۵ سال و متوسط افت سالانه ۰/۳۳ متر است (شکل ۳- c).



شکل ۳- a) تغییرات عمق آب زیرزمینی در آبخوان دامغان؛ b) مقادیر افت آب زیرزمینی در آبخوان دامغان؛ c) هیدرورگراف معرف آبخوان دامغان.
Fig. 3. a) Groundwater depth variations; b) Decline values; c) Representative hydrograph of the Damghan aquifer.

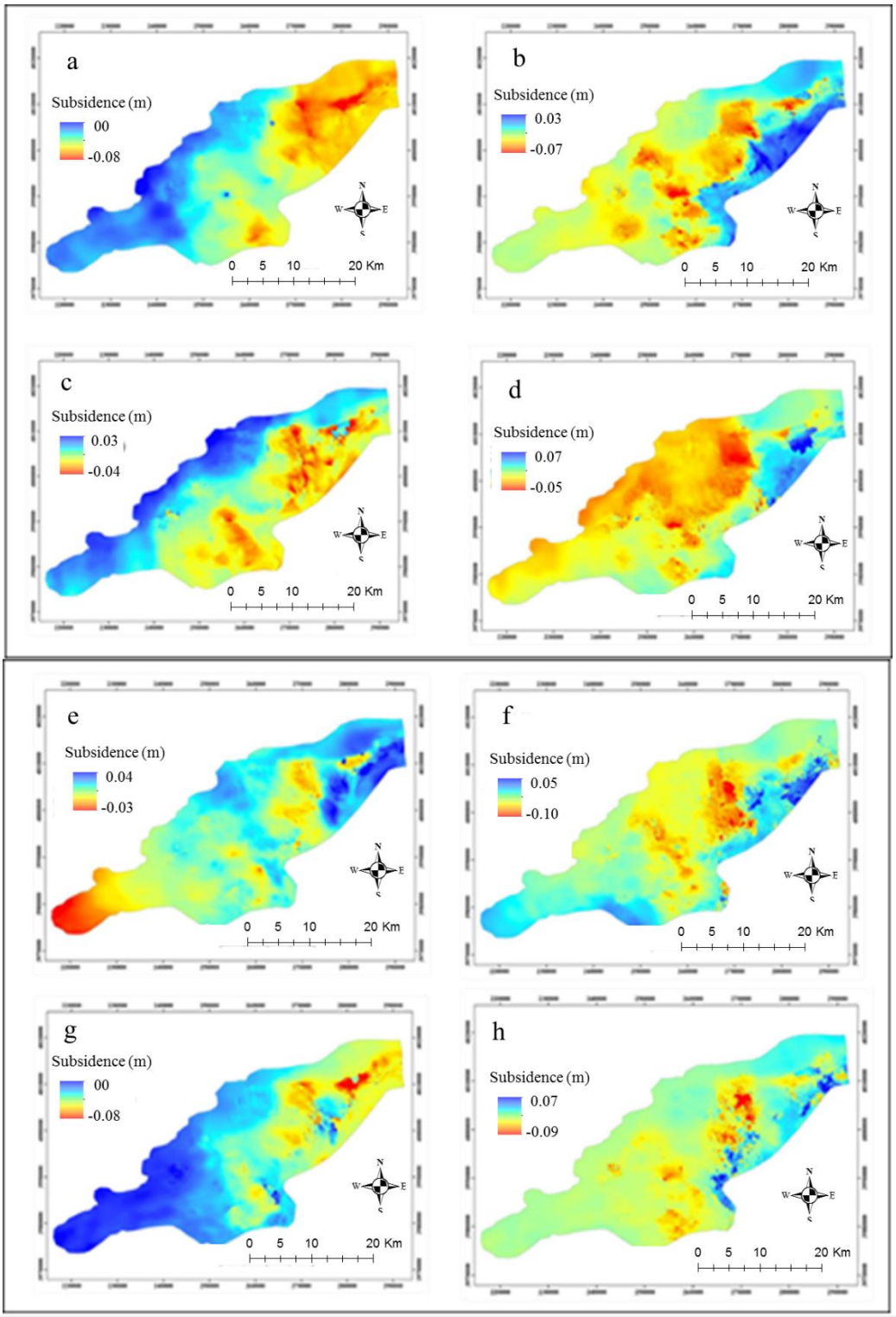
[Downloaded from ndea10.khu.ac.ir on 2026-11-01]
[DOI: 10.22034/JEG.2026.20.1.1020151]

پایش و تحلیل فرونشست با داده‌های ماهواره‌ای و ترازیابی

جهت پایش فرونشست زمین، از تصاویر Sentinel-1A در بازه زمانی مارس ۲۰۱۷ تا مارس ۲۰۲۱ استفاده شد. ۸ تصویر SLC با قدرت تفکیک مکانی ۳۰ متر و خط مبنای مکانی کمتر از ۱۲۵ متر انتخاب و پردازش شدند. داده‌های توپوگرافی از مدل ارتفاعی SRTM با قدرت تفکیک ۹۰ متر برای حذف اثر توپوگرافی به‌کار گرفته شد. در مجموع ۸ تداخل‌نگاشت تهیه گردید و نقشه‌های نرخ فرونشست شش‌ماهه تولید شد (شکل ۴: a تا h). نقشه پهنه‌بندی نهایی نشان داد که بیشترین نرخ فرونشست در این بازه حدود ۳۲ سانتی‌متر بوده و در بخش‌های مرکزی و جنوب غربی آبخوان متمرکز است (شکل ۵-a). برای اعتبارسنجی نتایج حاصل از تداخل‌سنجی راداری، داده‌های ترازیابی دقیق مسیر درجه‌یک BABIدر سال‌های ۱۳۶۶ و ۱۳۸۱ مورد استفاده قرار گرفت. مقایسه نتایج نشان داد که بیشترین نرخ فرونشست سالانه در ایستگاه BABI ۱۰۶۹ حدود ۵ سانتی‌متر (InSAR) و ۱/۱ سانتی‌متر (ترازیابی) بوده است (شکل ۵-b). اختلاف بین دو روش به تفاوت در دقت مکانی، میانگین‌گیری سطحی در InSAR و نقطه‌ای بودن ترازیابی نسبت داده می‌شود.

[Downloaded from ndea10.khu.ac.ir on 2026-11-01]

[DOI: 10.22034/JEG.2026.20.1.1020151]

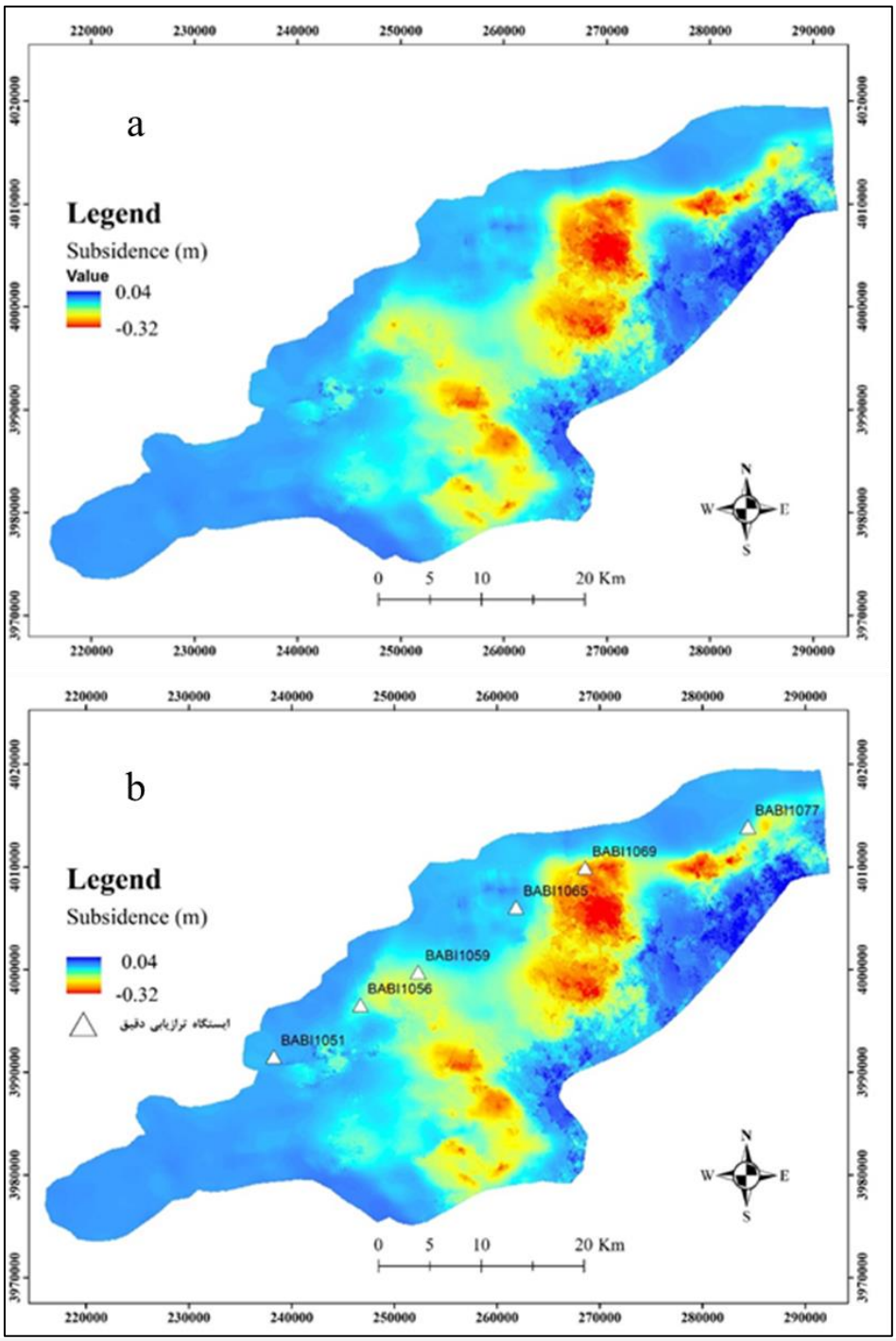


شکل ۴. نقشه‌های نرخ فرونشست شش‌ماهه در آبخوان دامغان حاصل از پردازش تصاویر Sentinel-1A در بازه زمانی مارس ۲۰۱۷ تا مارس ۲۰۲۱ (a تا h).

Fig. 4. Semi-annual land subsidence rate maps of the Damghan plain derived from Sentinel-1A imagery between March 2017 and March 2021 (a to h).

[Downloaded from ndea10.khu.ac.ir on 2026-11-01]

[DOI: 10.22034/JEG.2026.20.1.1020151]



شکل ۵. a) نقشه پهنه‌بندی نهایی فرونشست زمین در آبخوان دامغان با بیشینه نرخ حدود ۳۲ سانتی‌متر ;b) مقایسه نرخ فرونشست سالانه در ایستگاه BABI ۱۰۶۹ بین داده‌های InSAR و ترازیابی دقیق

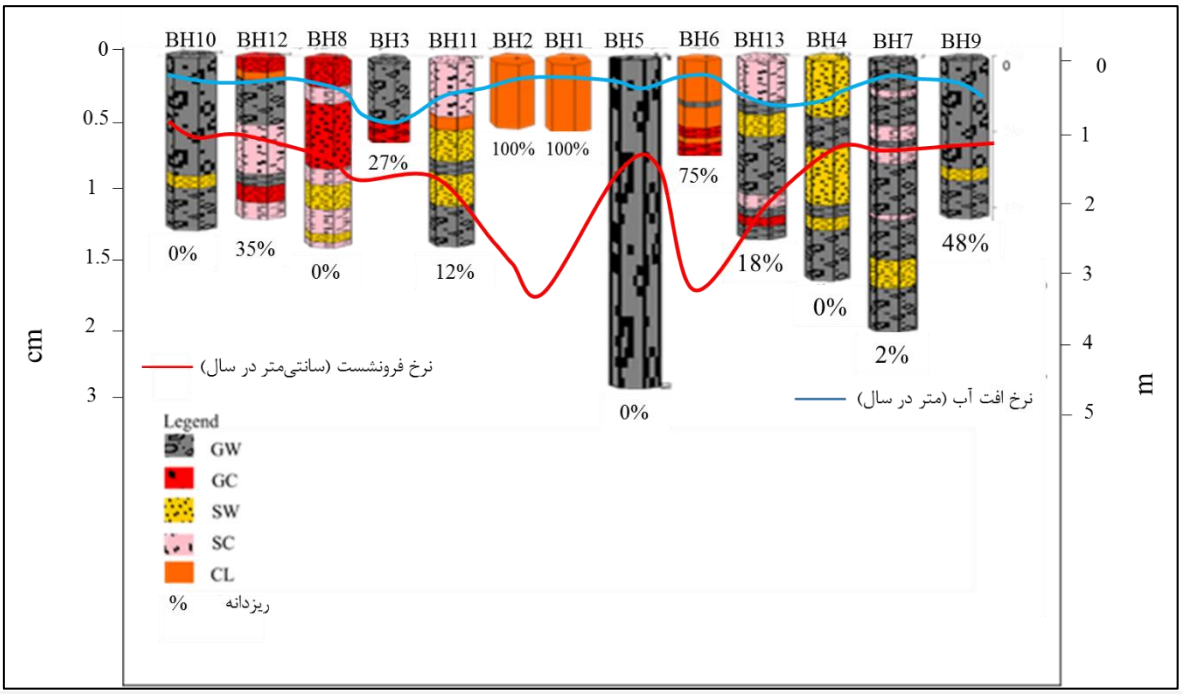
Fig. 5. a) Final land subsidence zoning map of the Damghan plain with a maximum rate of approximately 32 cm; b) Comparison of annual subsidence rates at station 1069BABI based on InSAR and precise leveling data.

[Downloaded from ndea10.khu.ac.ir on 2026-11-01]

[DOI: 10.22034/JEG.2026.20.1.1020151]

ارتباط افت آب، بافت خاک و نرخ فرونشست

بررسی گمانه‌های آبخوان دامغان نشان می‌دهد که رابطه‌ای روشن میان افت سطح آب زیرزمینی، ترکیب خاک و میزان فرونشست وجود دارد. در گمانه‌های BH1 و BH2 که درصد رسوبات ریزدانه بسیار بالاست (حدود ۱۰۰٪)، حتی افت‌های نسبتاً کوچک آب (حدود ۰/۳ متر در سال) منجر به فرونشست محسوس زمین شده است. این رفتار ناشی از تراکم‌پذیری بالای رس و سیلت در اثر کاهش فشار منفذی است. در مقابل، گمانه‌هایی مانند BH4 با درصد ریزدانه ناچیز، با وجود افت آب قابل توجه، نشست محدودی نشان داده‌اند. این تفاوت بیانگر نقش ترکیب رسوبی و ضخامت لایه‌های اشباع در کنترل کرنش است. نمونه میانه را می‌توان در BH6 مشاهده کرد؛ جایی که درصد ریزدانه حدود ۷۵٪ است و افت آب نزدیک به ۰/۴ متر در سال، منجر به فرونشست نسبتاً بالاتر از سایر نقاط شده است. همچنین در گمانه‌ی BH13 با درصد متوسط ریزدانه حدود ۱۸ درصد، توانسته نشست قابل توجهی ایجاد کند. این نشان می‌دهد که افت‌های آب، حتی در عدم حضور لایه‌های ریزدانه، می‌توانند به تغییر شکل سطح زمین منجر شوند. در مجموع، داده‌ها نشان می‌دهند که شدت فرونشست تابعی از سه عامل است :افت سطح آب، درصد ریزدانه‌ها، و ضخامت بخش اشباع. مناطق با رسوبات ریزدانه و ضخامت کم بیشترین حساسیت را دارند، در حالی‌که مناطق با رسوبات درشت‌دانه و ضخامت زیاد بیشتر در معرض کاهش ذخیره آبخوان‌اند تا نشست شدید. این نتایج اهمیت پایش افت آب و شناخت ویژگی‌های ژئوتکنیکی خاک را در مدیریت پایدار منابع آب زیرزمینی دامغان برجسته می‌کند.



شکل ۶. مقطع بافت خاک به همراه نرخ سالانه فرونشست، افت تراز آب زیرزمینی و ضخامت آبرفت

Fig. 6. Soil texture profile showing annual land subsidence rate, groundwater level decline, and alluvial thickness.

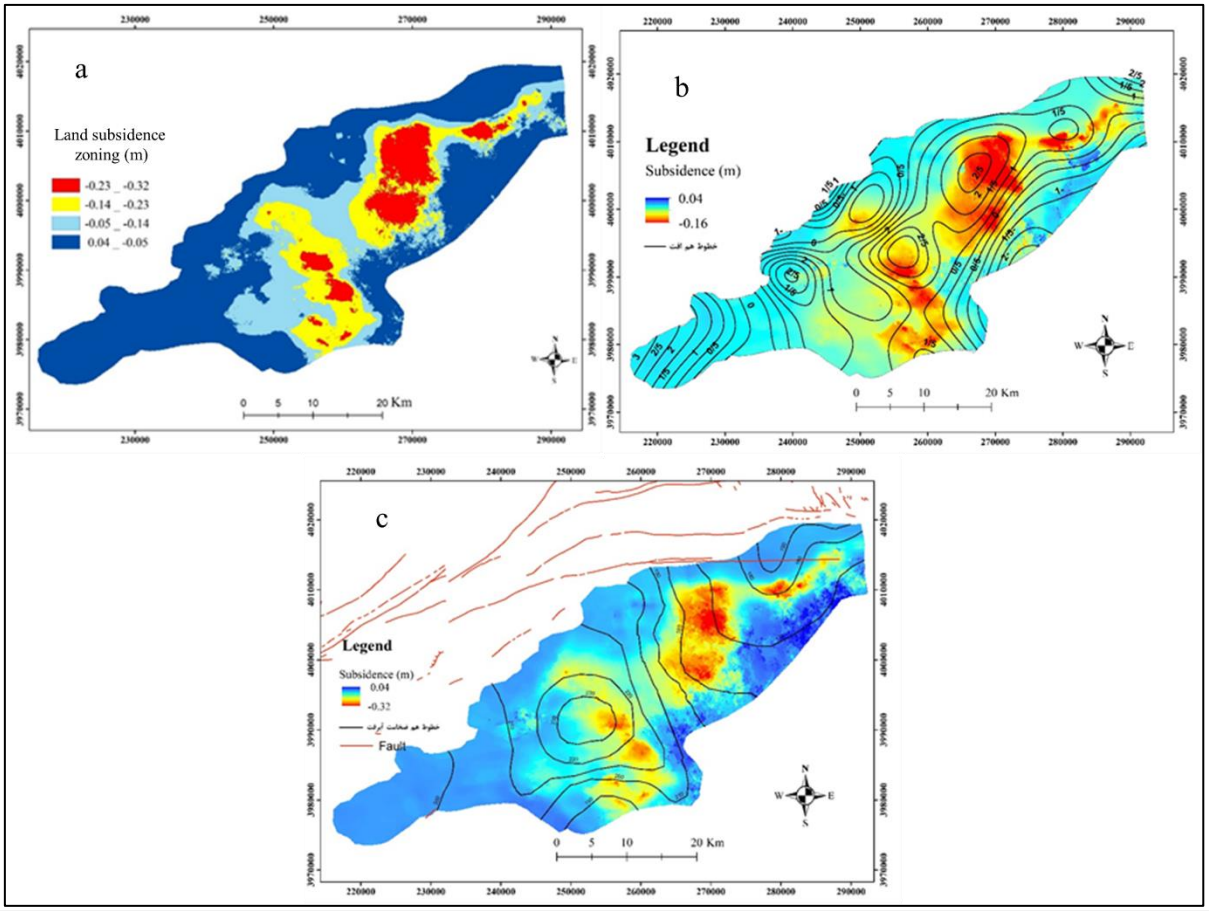
زون‌بندی فرونشست و تحلیل زمین‌شناسی

برای تحلیل دقیق‌تر رفتار فرونشست، نقشه نرخ متوسط فرونشست در بازه ۲۰۱۷–۲۰۱۹ با استفاده از ابزار Reclassify در ArcMap زون‌بندی شد. نتایج نشان داد که ۴۴٪ از مساحت آبخوان دامغان دچار فرونشست شده است که ۸٪ آن بیشترین نرخ فرونشست را دارد (شکل ۷-a). بررسی میزان افت آب زیرزمینی و موقعیت گسل‌ها نشان داد که بیشترین میزان افت آب زیرزمینی در محدوده مرکزی آبخوان دامغان قرار دارد و با مناطق دارای نرخ بالای فرونشست هم‌پوشانی دارد (شکل ۷-b). با این حال، تحلیل ساختارهای زمین‌شناسی و موقعیت گسل‌ها نشان داد که ارتباط معناداری میان گسل‌های منطقه و محدوده فرونشست وجود ندارد

[Downloaded from ndea10.khu.ac.ir on 2026-11-01]

[DOI: 10.22034/JEG.2026.20.1.1020151]

(شکل ۷-c). این نتایج نشان می‌دهد که افت آب نقش مهم‌تری نسبت به ساختارهای زمین‌شناسی در تعیین نرخ فرونشست دارد.



شکل ۷- a) زون‌بندی نرخ متوسط فرونشست زمین در آبخوان دامغان طی سال‌های ۲۰۱۷ تا ۲۰۱۹؛ b) هم‌پوشانی افت سطح آب زیرزمینی با نواحی دارای نرخ بالای فرونشست؛ c) عدم ارتباط معنادار میان موقعیت گسل‌ها و محدوده فرونشست.

Fig. 7. a) Zoning of average land subsidence rate in the Damghan plain during 2017–2019; b) Overlap of groundwater level decline with high-subsidence zones; c) Lack of significant correlation between fault locations and subsidence areas.

شواهد میدانی و عوارض سطحی ناشی از فرونشست

بازدیدهای میدانی از آبخوان دامغان نشان میدهد فرونشست زمین موجب بروز عوارض سطحی متعددی شده است که زیرساخت‌ها، منابع آب و بهره‌برداری کشاورزی را با تهدید جدی مواجه کرده‌اند. در سطح دشت، شکاف‌های کششی و فروچاله‌های اولیه مشاهده شده‌اند که بیانگر آغاز فرآیند نشست در لایه‌های ریزدانه هستند. مهم‌ترین شواهد میدانی مربوط به تخریب چاه‌های بهره‌برداری و پیزومتری است؛ بیرون‌زدگی لوله‌های جدار، ریزش و کج‌شدگی در برخی نقاط به‌وضوح ثبت شده و در مواردی بیرون‌زدگی تا حدود ۲۷ سانتی‌متر گزارش گردیده است. این بیرون‌زدگی‌ها نشان‌دهنده نشست نسبی خاک اطراف و تثبیت نسبی لوله‌های جدار در عمق بوده و به‌عنوان شاخصی قابل اعتماد برای پایش فرونشست در دشت دامغان محسوب می‌شوند. علاوه بر این، ترک‌های سطحی در سازه‌ها و تغییر در الگوی زهکشی طبیعی، کاهش ظرفیت ذخیره آبخوان و آسیب به زمین‌های کشاورزی نیز از دیگر پیامدهای این پدیده هستند. در شکل ۸ نمونه‌هایی از بیرون‌زدگی لوله‌های جدار چاه‌های پیزومتری به‌وضوح قابل مشاهده است.

[Downloaded from ndea10.khu.ac.ir on 2026-11-01]
[DOI: 10.22034/JEG.2026.20.1.1020151]



شکل ۸. تصاویری از عوارض میدانی فرونشست در سطح آبخوان دامغان

Fig. 8. Field images of land subsidence features across the Damghan aquifer.

نتیجه‌گیری

نتایج این پژوهش نشان داد که آبخوان دامغان با توجه به ویژگی‌های زمین‌شناسی و شرایط هیدروژئولوژیکی، به‌شدت مستعد فرونشست زمین است. تحلیل داده‌های پیزومتری طی سال‌های ۱۳۹۶ تا ۱۴۰۲ افت متوسط سالانه حدود ۰/۳۳ متر و افت تجمعی ۱/۶۴ متر را نشان داد که در کنار حضور رسوبات ریزدانه با تراکم‌پذیری بالا، نشست‌های غیرقابل برگشت ایجاد کرده است. پایش با تداخل‌سنجی راداری نرخ فرونشست تا ۳۲ سانتی‌متر را در بازه ۲۰۱۷ تا ۲۰۲۱ تأیید کرد. بررسی گمانه‌ها نشان داد که شدت نشست تابعی از افت سطح آب، درصد ریزدانه‌ها و ضخامت بخش اشباع است؛ به‌گونه‌ای که در گمانه‌های با ریزدانه بالا مانند BH1 و BH2 حتی افت‌های کوچک آب منجر به نشست محسوس شده، در حالی‌که در گمانه‌های با ریزدانه ناچیز مانند BH4 نشست محدود بوده است. شواهد میدانی شامل بیرون‌زدگی لوله‌های جدار چاه‌های پیزومتری تا حدود ۲۷ سانتی‌متر، تغییر در الگوی زهکشی و آسیب به زمین‌های کشاورزی نیز این نتایج را تأیید می‌کند. این یافته‌ها نشان می‌دهند که افت سطح آب زیرزمینی، در تعامل با ویژگی‌های زمین‌شناسی و بافت خاک، عامل اصلی بروز فرونشست در آبخوان دامغان است. بنابراین، پایش مستمر سطح آب، مدیریت

[Downloaded from ndea10.khu.ac.ir on 2026-11-01]

[DOI: 10.22034/JEG.2026.20.1.1020151]

برداشت منابع زیرزمینی و کنترل توسعه در مناطق پرخطر، از الزامات اساسی برای کاهش مخاطرات ناشی از فرونشست و حفظ پایداری زیست‌محیطی و اقتصادی منطقه به‌شمار می‌رود.

References

Abidin, H. Z., Andreas, H., Gumilar, I., Fukuda, Y., Pohan, Y. E., & Deguchi, T. (2011). Land subsidence of Jakarta (Indonesia) and its relation with urban development. Natural Hazards, 59(3), 1753–1771. https://doi.org/10.1007/s11069-011-9866-9

Ashuri, R., Emamgholizadeh, S., Haji Kandy, H., Mehdizadeh, S. S., & Jamali, S. (2023). Estimation of land subsidence using coupled particle swarm optimization and genetic algorithm: The case of Damghan aquifer. Water Supply, 24(2), 416–435. https://doi.org/10.2166/ws.2024.002

Bagheri-Gavkosh, M., Hosseini, S. M., Ataie-Ashtiani, B., Sohani, Y., Ebrahimian, H., & Morovat, F. (2021). Land subsidence: A global challenge. Science of the Total Environment, 786, 146193. https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2021.146193

Bianchini, S., Ashuri, R., Emamgholizadeh, S., & Jamali, S. (2023). Study of the spatial changes of subsidence in Damghan plain and its prediction using artificial neural network model. Arid and Tropical Water and Environment, 13(1), 1–18. https://doi.org/10.22126/atwe.2023.9801.1065

Bianchini, S., Ciampalini, A., Raspini, F., & Moretti, S. (2019). Ground Subsidence Susceptibility (GSS) Mapping in Grosseto Plain Using Remote Sensing and GIS Techniques. Remote Sensing, 11(3), 1–18.

Chaussard, E., Amelung, F., Abidin, H., & Hong, S. H. (2013). Sinking cities in Indonesia: ALOS-based InSAR analysis of urban subsidence. Remote Sensing of Environment, 128, 150–161.

Faunt, C. C., Traum, J. A., Boyce, S. E., Seymour, W. A., Jachens, E. R., Brandt, J. T., Sneed, M., Bond, S., & Marcelli, M. F. (2024). Groundwater sustainability and land subsidence in California's Central Valley. Water, 16(8), 1189. https://doi.org/10.3390/w16081189

Ferretti, A., Prati, C., & Rocca, F. (2001). Permanent scatterers in SAR interferometry. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 39(1), 8–20.

Ghorbani, Z., Khosravi, A., Maghsoudi, Y., Mojtahedi, F. F., Javadnia, E., & Nazari, A. (2022). Use of InSAR data for measuring land subsidence induced by groundwater withdrawal and climate change in Ardabil Plain, Iran. Scientific Reports, 12(1), 13998.

Motagh, M., Walter, T. R., Sharifi, M. A., Fielding, E. J., Schurr, B., & Nahavandchi, H. (2008). Land subsidence in Iran caused by widespread water reservoir overexploitation revealed by satellite radar interferometry. Geophysical Research Letters, 35(16), L16403. https://doi.org/10.1029/2008GL033814

Peng, M., Lu, Z., Zhao, C., Motagh, M., Bai, L., & Conway, B. D. (2022). Mapping land subsidence and aquifer system properties of the Willcox Basin, Arizona from InSAR observations and independent component analysis. Remote Sensing of Environment, 280, 113179. https://doi.org/10.1016/j.rse.2022.113179

Qin, M., Yang, J., Bai, Y., & Bai, Y. (2025). The subsidence–distance relationship for land subsidence induced by groundwater abstraction. Hydrogeology Journal, 33, 205–217. https://doi.org/10.1007/s10040-024-02847-2.

Sadeghi, H., Darzi, A. G., Voosoghi, B., Garakani, A. A., Ghorbani, Z., & Mojtahedi, S. F. F. (2023). Assessing the vulnerability of Iran to subsidence hazard using a hierarchical FUCOM-GIS framework, Remote Sens. Appl.: Soc. Environ., 31, 100989.

[Downloaded from ndea10.khu.ac.ir on 2026-11-01]

[DOI: 10.22034/JEG.2026.20.1.1020151]