Incidents and Disasters Resilience

Homepage: https://disaster.ndri.ac.ir/

Spatial assessment of land subsidence in the Sefid Dasht plain using a one dimensional consolidation model and hydrogeological data

Amirhossein Khaksar[1], **Gholamreza Shoaei**[2]✉, and **Asghar Ghaedi Vanani**[3]

1. M.Sc. Student, Department of Engineering Geology, Faculty of Basic Sciences, Tarbiat Modares University, Tehran, Iran. Email: Khaksar.a@modares.ac.ir
2. Corresponding author, Assistant Professor, Department of Engineering Geology, Faculty of Basic Sciences, Tarbiat Modares University, Tehran, Iran. Email: Shoaei@modares.ac.ir
3. Ph.D. Graduate, Department of Engineering Geology, Faculty of Basic Sciences, Tarbiat Modares University, Tehran, Iran. Email: ghaedi2012@gmail.com

Article Info

Article type:
Research Article

Article history:
Received 4 March 2025
Received in revised form 7 May 2025
Accepted 21 June March 2025
Available online 29 June 2025

Keywords:
Land subsidence,
Sefid Dasht Plain,
One-dimensional consolidation model,
Groundwater level decline.

ABSTRACT

Objective: Land subsidence, as a significant environmental and geotechnical challenge, has affected many plains in Iran, including the Sefid Dasht Plain in Chaharmahal and Bakhtiari Province, causing damage to urban and agricultural structures and threatening environmental sustainability. This study aimed to estimate the spatial extent of land subsidence in the Sefid Dasht Plain resulting from excessive groundwater extraction.

Method: To achieve this objective, a one-dimensional consolidation model based on Terzaghi's theory was applied, using hydrogeological data including borehole logs, compressible clay layer thickness, and groundwater table drawdown. Using this model, subsidence at piezometer locations was calculated over a 40-year period from 1984 to 2024. Subsequently, the spatial distribution of subsidence across the plain was generated using interpolation techniques within a Geographic Information System (GIS).

Results: The results indicated that the highest groundwater table decline (42–50 m) occurred in the southwestern and southern parts of the plain. Accordingly, the annual subsidence rate in the plain, considering different storage coefficients, was estimated between 0.66 and 2 cm. Spatial zoning of subsidence showed a clear correlation between areas with the thickest compressible clay layers, the greatest groundwater decline, and the highest subsidence rates. Validation of the results with field observations confirmed the reliability of the applied model.

Conclusions: These findings can serve as an effective tool for sustainable groundwater management, predicting high-risk areas, and developing strategies to mitigate subsidence hazards in the study area. Moreover, this study provides an example of the application of consolidation models and GIS in analyzing geological problems and managing natural resources in Iran's arid and semi-arid regions.

Cite this article: Khaksar, A., Shoaei, Gh., & Ghaedi Vanani, A. (2025). Spatial assessment of land subsidence in the Sefid Dasht plain using a one-dimensional consolidation model and hydrogeological data. ***Incidents and Disasters Resilience***, *2*(1), 43-54. https://doi.org/10.22034/1.2.43

© Author(s) retain the copyright.
Publisher: Natural Disasters Research Institute (NDRI).
DOI: https://doi.org/10.22034/1.2.43

[Downloaded from www.disaster.ndri.ac.ir on 2026-11-18]

[DOI: https://doi.org/10.22034/1.2.43]

تاب‌آوری در برابر حوادث و سوانح

Homepage: https://disaster.ndri.ac.ir

ارزیابی مکانی فرونشست زمین در دشت سفیددشت با به‌کارگیری مدل تحکیم تک بعدی و داده‌های هیدروژئولوژیکی

امیرحسین خاکسار[۱]، غلامرضا شعاعی[۲]✉، و علی اصغر قائدی وانانی[۳]

۱. دانشجوی کارشناسی ارشد، گروه زمین شناسی مهندسی، دانشکده علوم پایه، دانشگاه تربیت مدرس، تهران، ایران. رایانامه: Khaksar.a@modares.ac.ir

۲. نویسنده مسئول، استادیار، گروه زمین شناسی مهندسی، دانشکده علوم پایه، دانشگاه تربیت مدرس، تهران، ایران. رایانامه: Shoaei@modares.ac.ir

۳. فارغ‌التحصیل دکتری، گروه زمین شناسی مهندسی، دانشکده علوم پایه، دانشگاه تربیت مدرس، تهران، ایران. رایانامه: ghaedi2012@gmail.com

اطلاعات مقاله

نوع مقاله:
مقاله پژوهشی

تاریخچه مقاله:
تاریخ دریافت: ۱۴۰۴/۰۱/۱۵
تاریخ بازنگری: ۱۴۰۴/۰۲/۱۷
تاریخ پذیرش: ۱۴۰۴/۰۳/۳۱
تاریخ انتشار: ۱۴۰۴/۰۴/۰۸

کلیدواژه‌ها:
فرونشست زمین،
دشت سفیددشت،
مدل تحکیم تک بعدی،
افت سطح آب زیرزمینی.

چکیده

هدف: پدیده فرونشست زمین به‌عنوان یک چالش جدی زیست‌محیطی و ژئوتکنیکی، دشت‌های بسیاری از مناطق ایران ازجمله دشت سفیددشت استان چهارمحال و بختیاری را تحت تأثیر قرار داده و موجب آسیب به سازه‌های شهری و کشاورزی و تهدید پایداری محیط‌زیست شده است. این پژوهش با هدف تخمین مکانی میزان فرونشست زمین در دشت سفیددشت ناشی از برداشت بی‌رویه آب‌های زیرزمینی انجام شد.

روش پژوهش: برای دستیابی به این هدف، از مدل تحکیم تک بعدی مبتنی بر نظریه ترزاقی و داده‌های هیدروژئولوژیکی شامل لاگ‌های حفاری، ضخامت لایه‌های رسی تراکم‌پذیر و افت سطح ایستابی استفاده شد. با استفاده از این مدل، مقادیر نشست در محل چاه‌های پیزومتری در بازه زمانی ۴۰ ساله از سال ۱۳۶۳ تا ۱۴۰۳ محاسبه شد و سپس توزیع فضایی فرونشست در سطح دشت با به‌کارگیری روش‌های درون‌یابی در سامانه اطلاعات جغرافیایی (GIS) تهیه گردید.

یافته‌ها: نتایج نشان داد که بیشترین میزان افت سطح ایستابی (۵۰ تا ۴۲ متر) در بخش‌های جنوب غربی و جنوب دشت رخ داده است. بر این اساس، نرخ فرونشست سالانه در دشت با در نظرگیری ضرایب ذخیره مختلف در محدوده ۰/۶۶ تا ۲ سانتی‌متر برآورد شد. پهنه‌بندی مکانی نشست، انطباق واضحی را بین مناطق با بیشترین ضخامت لایه‌های رسی، بیشترین افت سطح آب و بالاترین نرخ فرونشست نشان داد. صحت‌سنجی نتایج با مشاهدات میدانی انجام شد که قابلیت اطمینان مدل به‌کارگرفته‌شده را تأیید کرد.

نتیجه‌گیری: یافته‌های این مطالعه می‌تواند به‌عنوان ابزاری کارآمد در مدیریت پایدار منابع آب زیرزمینی، پیش‌بینی مناطق پرخطر و تدوین راهبردهای کاهش خطر فرونشست در منطقه موردمطالعه مورداستفاده قرار گیرد. همچنین، این پژوهش نمونه‌ای از کاربرد مدل‌های تحکیم و سامانه اطلاعات جغرافیایی در تحلیل مشکلات زمین‌شناسی و مدیریت منابع طبیعی در مناطق خشک و نیمه‌خشک ایران ارائه می‌دهد.

استناد: خاکسار، امیرحسین؛ شعاعی، غلامرضا؛ قائدی وانایی، علی اصغر. (۱۴۰۵). ارزیابی مکانی فرونشست زمین در دشت سفیددشت با به‌کارگیری مدل تحکیم تک بعدی و داده‌های هیدروژئولوژیکی. *تاب‌آوری در برابر حوادث و سوانح*، ۲ (۱)، ۴۲-۵۴. https://doi.org/10.22034/1.2.43

ناشر: پژوهشکده سوانح طبیعی.

© نویسندگان.

[Downloaded from www.disaster.ndri.ac.ir on 2026-11-18]

[DOI: https://doi.org/10.22034/1.2.43]

مقدمه

فرونشست زمین یکی از نگرانی‌های جهانی برای زمین‌شناسان، مهندسان ژئوتکنیک، نقشه‌برداران، مهندسان، برنامه‌ریزان شهری و عموم مردم است. این رخداد ناشی از برداشت ناپایدار آب‌های زیرزمینی یکی از مشکلات روبه‌رشد در کشورهای درحال‌توسعه است، زیرا نیاز شهرها به استفاده از منابع آب زیرزمینی با افزایش جمعیت، بدون اجرای مقررات و نظارت کافی فزونی یافته است. بررسی مخاطرات جهانی مرتبط با فرونشست ناشی از برداشت آب‌های زیرزمینی نشان می‌دهد که در اکثر موارد رسوبات در سن میوسن یا کمتر به دلیل تخلیه سیال (آب) دچار تراکم شده‌اند. این شامل آکویتاردهای ریزدانه رسی و سیلتی است که با سفره‌های شنی و ماسه‌ای احاطه شده‌اند. با کاهش فشار آب منفذی، بار روباره از آب به کنتاکت دانه‌به‌دانه منتقل شده و در نتیجه، فرونشست زمین بر اثر بازآرایی و تراکم دانه‌ها رخ می‌دهد (Fatolahzadeh et al., 2022).

فرونشست معمولاً هم‌زمان با خروج آب زیرزمینی رخ نمی‌دهد، اما نهایتاً در مدت‌زمان طولانی‌تری آثار جبران‌ناپذیر آن پدیدار می‌شود (Scott, 1979). فرونشست زمین از ۱ تا ۵۰ سانتی‌متر به ازای ۱۰ متر افت سطح ایستابی متغیر است و دامنه آن به ضخامت و تراکم لایه‌ها، زمان بارگذاری و تنش‌های منطقه بستگی دارد (Lofgren, 1969). در سطح جهان، بالاترین خطر فرونشست ناشی از کاهش سطح آب از سال ۱۹۵۰، مدت زمان اندکی پس از گسترش شهرنشینی و رشد صنعتی آغاز شد و پیامدهای شدید محیط زیستی و اقتصادی خود را نشان داد (Hu et al., 2004). در این راستا آثار مخرب ناشی از فرونشست که حاصل از بهره‌برداری بیش‌ازحد از آب‌های زیرزمینی است در هیوستون گالوستون، تگزاس، ایالات‌متحده آمریکا (Gabrysch, 1984)، بانکوک، تایلند (Phien-Wej et al., 2006)، ونیز، ایتالیا (Teatini et al., 2012)، Quetta Valley، پاکستان (Khan et al., 2013)، جاکارتا، و اندونزی (Chaussard et al., 2013) گزارش شده است.

پیشینه پژوهش

نشست زمین ناشی از افت سطح ایستابی در ایران طی دو دهه اخیر به یکی از مهم‌ترین چالش‌های زیست‌محیطی و ژئوتکنیکی کشور تبدیل شده است. مطالعات متعددی رابطه مستقیم بین برداشت بی‌رویه آب‌های زیرزمینی و پدیده فرونشست زمین در سراسر ایران شناسایی کرده‌اند. مطالعات اولیه توسط معتق و همکاران (۲۰۰۸) با به‌کارگیری InSAR وGPS، نرخ‌های نشست تا ۲۵ سانتی‌متر در سال را در دشت‌هایی مانند ورامین و رفسنجان آشکار ساخت. این یافته‌ها در دشت ورامین توسط مصطفوی و همکاران (۲۰۱۶) با استفاده از DInSAR و داده‌های پیزومتری تأیید شد و نشان داد که افت متوسط سالانه ۰/۸ متری سطح آب به نشست سالانه بیش از ۱۸ سانتی‌متر منجر می‌شود. رجبی (۲۰۱۸) با مدل‌سازی عددی در دشت علی‌آباد قم نشان داد که افت ۲۶/۳۵ متری سطح آب در یک بازه ۱۲ ساله می‌تواند باعث نشست تا ۷۶ سانتی‌متر شود. در مشهد، خرمی و همکاران (۲۰۲۰) با تلفیق PS-InSAR، GPS و پیزومتری، نرخ حداکثری نشست ۱۹/۱ سانتی‌متر در سال را گزارش کردند. مطالعات بعدی در اصفهان (Fatolahzadeh et al., 2022) و تهران (Moradi et al., 2023) به ترتیب پهنه‌های آسیب‌پذیر شهری و نرخ حداکثری ۲۱۷ میلی‌متر در سال در جنوب غرب پایتخت را شناسایی کردند. همچنین برخی از پژوهش‌ها بر عوامل تعدیل‌کننده تمرکز داشتند؛ شریفی و همکاران (۲۰۲۴) نقش جریان زاینده‌رود در کاهش نرخ نشست را نشان دادند، عثمان[1] و همکاران (۲۰۲۵) همبستگی ۷۲ درصدی بین افت آب و نشست در دشت داراب را گزارش کردند، شهنازی و همکاران (۲۰۲۵) ارتباط معناداری بین خشکسالی آب زیرزمینی و تغییر شکل ۶۵ سانتی‌متری در مرند یافتند، و شفیعی دارافشانی و شمسی اژیه (۲۰۲۵) آسیب‌پذیری زیرساخت‌های شهری اصفهان در برابر این پدیده را تحلیل نمودند. این مجموعه پژوهش‌ها به‌طور جامع، الگوی گسترده، مکانیسم‌ها و پیامدهای جدی فرونشست در ایران را مستندسازی کرده‌اند.

مرور مطالعات نشان می‌دهد که رابطه‌ای مستقیم و قوی میان افت سطح ایستابی و نرخ نشست زمین در اغلب دشت‌های ایران وجود دارد. در بیشتر موارد، افت‌های سالانه ۰/۵ تا ۱ متر سطح آب زیرزمینی منجر به نشست‌های ۱۰ تا ۲۵ سانتی‌متر در

1. Othman

[Downloaded from www.disaster.ndri.ac.ir on 2026-11-18]

[DOI: https://doi.org/10.22034/1.2.43]

سال شده‌اند. این رابطه در ابتدا خطی است، اما در مراحل پیشرفته به دلیل فعال شدن تحکیم ثانویه و ناهمگنی رسوبات، رفتار غیرخطی مشاهده می‌شود. نقطه قوت پژوهش‌های اخیر استفاده از داده‌های InSAR (Sentinel-1) در کنار داده‌های پیزومتری و مدل‌سازی عددی است که امکان پایش دقیق و گسترده نشست را فراهم کرده است. بااین‌حال، کمبود داده‌های ژئوتکنیکی و پراکندگی مکانی مطالعات از نقاط ضعف محسوب می‌شوند. این شکاف‌ها نشان می‌دهد که برای مدیریت پایدار منابع آب و کاهش خطر نشست، نیاز به پژوهش‌های جامع‌تر، بین‌رشته‌ای و سیاست‌محور وجود دارد.

هدف اصلی مطالعه حاضر بررسی توزیع فضایی فرونشست زمین در دشت سفیددشت استان چهارمحال و بختیاری، با استفاده از روش عددی–تحلیلی تحکیم تک بعدی (Terzaghi, 1943; Freeze & Cherry, 1979) و زمین‌آمار توسط نرم‌افزار GIS است. به همین منظور یک مدل زیرسطحی از لایه‌های رسی تراکم‌پذیر به‌وسیله لاگ‌های حفاری در سراسر سفیددشت، شبیه‌سازی شد و با استفاده از داده‌های افت سطح ایستابی، ضخامت و خواص لایه‌های تراکم‌پذیر، توزیع فرونشست سفیددشت به دست آمد و با مشاهده‌های میدانی صحت سنجی گردید.

روش‌شناسی پژوهش

نشست زمین یکی از مهم‌ترین پیامدهای افت سطح آب زیرزمینی و تغییرات تنش مؤثر در لایه‌های آبرفتی فشرده‌پذیر است. مدل‌سازی این پدیده نخستین بار به‌طور نظام‌مند در قالب تئوری تحکیم تک بعدی توسط ترزاقی[2] (۱۹۴۳) مطرح شد. بر اساس این نظریه، میزان نشست متناسب با ضریب تراکم‌پذیری حجمی خاک، تغییر فشار مؤثر و ضخامت لایه فشرده‌شونده است:

$$S = m_v.\Delta\sigma.H \qquad (۱)$$

ایده محوری در این رابطه آن است که کاهش فشار منفذی ناشی از افت سطح آب زیرزمینی، منجر به افزایش فشار مؤثر و درنتیجه کاهش حجم اسکلت خاک می‌شود. این بنیان، بعدها در هیدروژئولوژی برای توصیف تراکم آبخوان‌ها تعمیم یافت. فریز و چری[3] (۱۹۷۹) این رابطه را در چهارچوب هیدروژئولوژیک بازنویسی کرده و از مفهوم «ضریب ذخیره ویژه» استفاده کردند:

$$\Delta b = \Delta p.(S_S / \gamma_w).b \qquad (۲)$$

که در آن S_S ضریب ذخیره ویژه آبخوان در نظر گرفته می‌شود که بیانگر تراکم‌پذیری اسکلت خاک (α)، تراکم‌پذیری آب (β) وn تخلخل است. در آکیفرهای دانه‌ریز، سهم عمده تراکم از مؤلفه $n\beta$ ناشی می‌شود و معمولاً α ناچیز در نظر گرفته می‌شود.

منطقه موردمطالعه

استان چهارمحال بختیاری با وجود ۷ درصد از آب کل کشور دارای آب‌وهوای سرد و نیمه‌خشک است. از سویی قرارگیری دشت‌های استان بر روی ارتفاعات زاگرس موجب عدم نفوذ کافی آب ناشی از بارندگی در آبخوان‌ها شده است و از سوی دیگر تغییرات اقلیمی موجب تغییر الگوی بارش از برف به باران، افزایش دما و افزایش تبخیر شده است که باعث تشدید کاهش سطح ایستابی، همراه با برداشت بی‌رویه آب جهت مصارف کشاورزی و شرب گردیده است. درنتیجه چهار دشت این استان شامل دشت شهرکرد، خان میرزا، سفیددشت و بروجن با پدیده فرونشست متوسط تا شدید زمین، همراه با لوله‌زایی، کج شدن خطوط انتقال برق و ایجاد ترک‌های کششی مواجه شده‌اند. سفیددشت از محدوده‌های مطالعاتی حوزه آبریز کارون بزرگ هستند. وسعت محدوده مطالعاتی سفیددشت، حدود ۲۷۰ کیلومترمربع است که، ۲۲۹ کیلومتر از آن را دشت و مابقی را ارتفاعات تشکیل می‌دهد. ارتفاع متوسط محدوده مطالعاتی در حدود ۲۱۵۰ متر از سطح دریا است. افت شدید سطح آب زیرزمینی در سال‌های گذشته سبب شده تا محدوده مذکور جزء محدوده‌های ممنوعه استان از سال ۱۳۹۵ قرار گیرد که با مشاهده فرونشست، دشت به منطقه بحرانی تبدیل شد (شکل ۱).

2. Terzaghi
3. Freeze & Cherry

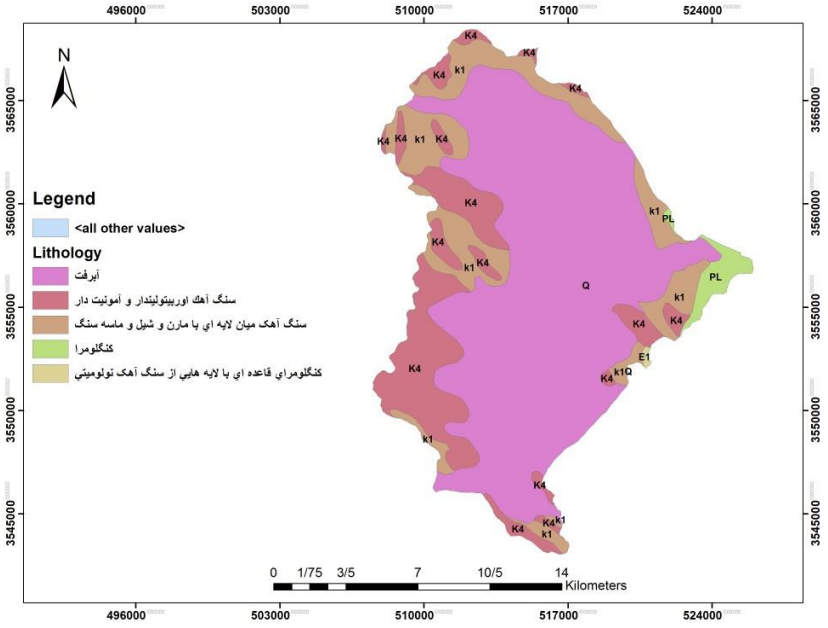
[Downloaded from www.disaster.ndri.ac.ir on 2026-11-18]
[DOI: https://doi.org/10.22034/1.2.43]

ناحیه موردبررسی ازلحاظ ساختاری در پهنه سنندج–سیرجان قرار گرفته است. این پهنه در اصل جزئی از ایران مرکزی است؛ ولی با شاخصه‌های ویژه‌ای مشخص می‌شود و به‌صورت یک نوار از ارومیه و سنندج در شمال غرب ایران تا سیرجان و اسفندقه در جنوب شرق ایران گسترش دارد و به‌موازات روراندگی زاگرس قرار گرفته است که توسط گسل اصلی زاگرس، از زاگرس مرتفع جدا می‌شود. واحدهای چینه‌شناسی واقع در محدوده عبارت‌اند از (شکل ۱):

مزوزوئیک: قدیمی‌ترین شواهد زمین‌شناسی قابل‌مشاهده در این محدوده، مربوط به کرتاسه پایینی و دوره ژوراسیک است که شامل آهک‌های متورق با لایه‌بندی نازک به همراه شیل، مارن و ماسه‌سنگ است. بر روی این تشکیلات آهک‌های کارستیک کرتاسه میانی قرار گرفته که رنگ خاکستری و فسیل‌های اربیتولین شواهد آن هستند.

سنوزوئیک: تشکیلات ائوسن با ساختار متناوب از کنگلومرا و آهک‌های نومولیتیک در شمال منطقه رخنمون دارد و به‌طور دگر شیب روی تشکیلات کرتاسه میانی قرار گرفته و توسط کنگلومرا نئوژن محاصره شده است.

کواترنری: رسوبات مربوط به دوران چهارم شامل آبرفت‌های جوان است که در نواحی مرکزی دشت به‌خصوص حاشیه مخروط‌افکنه‌ها سطح وسیعی را پوشانده است (Ghaedi Vanani et al., 2023).



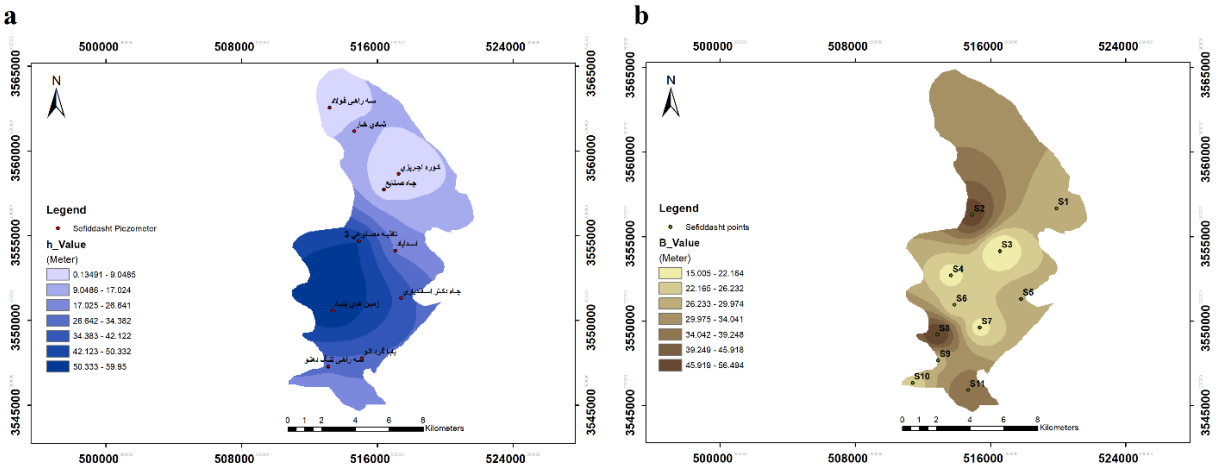
شکل ۱. نقشه سنگ‌شناسی محدوده مطالعاتی سفیددشت

یافته‌های پژوهش

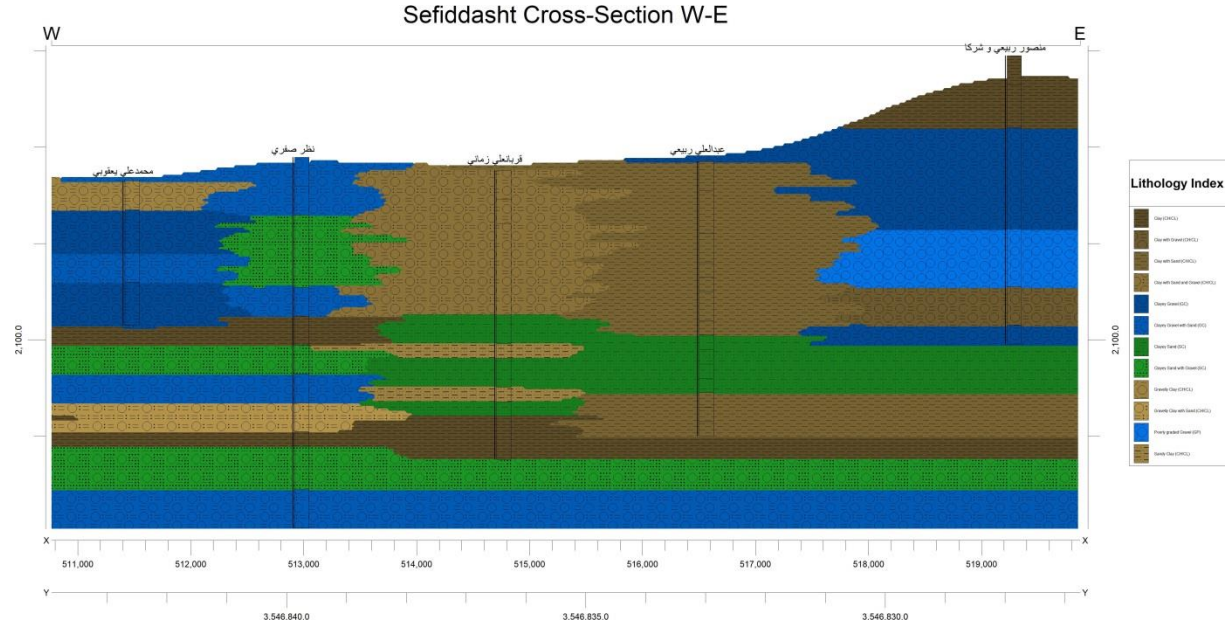
بر اساس داده‌های گردآوری‌شده از شبکه پیزومتری در دشت سفیددشت، تحلیل در مورد رابطه بین افت سطح ایستابی و فرونشست زمین انجام شد. جدول ۱ و شکل ۲ (a) نشان‌دهنده توزیع چاه‌های پیزومتری و افت سطح ایستابی در دشت سفیددشت هستند. نقشه‌های توزیع فضایی نشان داد که بیشترین میزان افت سطح ایستابی در بازه زمانی ۴۰ ساله مربوط به بخش‌های جنوب غرب و جنوب دشت (خروجی آبخوان) است. در محل پیزومترهای تغذیه مصنوعی ۳، زمین‌های بنیاد، باباگردآلو و سه‌راهی تنگ دهنو، افت‌هایی در محدوده ۵۰ تا ۴۲ متر ثبت شده است (شکل ۲ (a)). این الگوی افت کاملاً با مدل هیدروژئولوژیکی آبخوان و جهت جریان زیرزمینی مطابقت دارد. از سوی دیگر، مدل‌سازی زیرسطحی مبتنی بر لاگ‌های حفاری نشان داد که بیشترین ضخامت لایه‌های تراکم‌پذیر رسی (۳۹ تا ۵۶ متر) نیز در همین مناطق تمرکز یافته است (شکل ۲ (b) و شکل ۳). این هم‌پوشانی فضایی بین بیشینه افت سطح آب و بیشینه ضخامت لایه‌های رسی، شرایط ایدئالی برای رخداد فرونشست شدید فراهم کرده است.

[Downloaded from www.disaster.ndri.ac.ir on 2026-11-18]

[DOI: https://doi.org/10.22034/1.2.43]



شکل ۲. افت تجمعی سطح ایستابی از ۱۳۶۳ تا ۱۴۰۳؛ b) ضخامت لایه تراکم‌پذیر رسی در دشت سفیددشت



شکل ۳. مدل زیرسطحی بر اساس لاگ‌های حفاری (شرقی-غربی)

با به‌کارگیری مدل تحکیم تک بعدی مبتنی بر نظریه ترزاقی (۱۹۴۳) و فرمول‌بندی هیدروژئولوژیکی فریز و چری (۱۹۷۹)، مقادیر نشست تجمعی در بازه ۴۰ ساله برای سه سناریوی مختلف ضریب ذخیره (Sy=۰/۰۰۰۱ ، Sy=۰/۰۰۰۲ ، Sy=۰/۰۰۰۳) محاسبه شد. محدوده انتخاب‌شده برای ضریب ذخیره (۰/۰۰۰۱ تا ۰/۰۰۰۳) در این مطالعه، بر اساس مبانی هیدروژئولوژیک و مطالعات پیشین در مورد خواص تراکم‌پذیری لایه‌های رسی است. به‌عنوان‌مثال، فریز و چری (۱۹۷۹) مقادیر ذخیره ویژه (S_s) برای رس‌های اشباع را در محدوده 10^{-3} تا 10^{-5} m^{-1} ذکر کرده است که با در نظر گرفتن ضخامت لایه‌های رسی در دشت سفیددشت، به ضرایب ذخیره در محدوده مورداستفاده ما تعمیم می‌یابد. به‌طور مشابه، مطالعه میدانی رایلی[4] (۱۹۶۹) بر روی فرونشست دره سانتا کلارا نیز مقادیر کمّی مشابهی را برای تراکم لایه‌های ریزدانه گزارش کرده است. علاوه بر این، دومنیکو و میفلین[5] (۱۹۶۵) نیز به‌طور خاص بر پایین بودن قابلیت انتقال آب و ذخیره در رسوبات ریزدانه تأکید دارد. بنابراین، اگرچه فقدان

4. Riley
5. Domenico & Mifflin

[Downloaded from www.disaster.ndri.ac.ir on 2026-11-18]
[DOI: https://doi.org/10.22034/1.2.43]

داده‌های آزمایشگاهی محلی یک محدودیت محسوب می‌شود، اما انتخاب این محدوده بر پایه شواهد معتبر علمی صورت‌گرفته و تحلیل حساسیت انجام‌شده نیز قابلیت اطمینان نتایج را در این بازه تضمین می‌نماید.

جدول ۱. چاه‌های مشاهده‌ای دشت سفیددشت، افت تجمعی و نرخ سالانه افت سطح ایستابی

سفیددشت		UTM-X	UTM-Y	افت تجمعی سطح ایستابی-۴۰ سال (m)	نرخ سالانه افت سطح ایستابی h(m/y)
سه‌راهی فولاد	P1	۵۱۳۲۰۲	۳۵۶۲۵۴۳	۰/۵	۰/۰۱۲۵
شادی خار	P2	۵۱۴۶۵۷	۳۵۶۱۱۶۶	۱۲/۲۵	۰/۳۰۶۲۵
کوره آجرپزی	P3	۵۱۷۲۶۸	۳۵۵۸۶۴۲	۶/۸۱	۰/۱۷۰۲۵
چاه صنایع	P4	۵۱۶۴۰۳	۳۵۵۷۷۱۱	۲/۶۵	۰/۰۶۶۲۵
تغذیه مصنوعی ۳	P5	۵۱۴۹۲۷	۳۵۵۴۶۷۸	۵۰	۱/۲۵
اسدآباد	P6	۵۱۷۰۷۱	۳۵۵۴۱۱۱	۲۵/۸۷	۰/۶۴۶۷۵
چاه دکتر اسفندیاری	P7	۵۱۷۴۰۷	۳۵۵۱۳۱۳	۳۹/۸	۰/۹۹۵
زمین‌های بنیاد	P8	۵۱۳۳۸۸	۳۵۵۰۵۷۰	۶۰	۱/۵
بابا گرد الو	P9	۵۱۵۰۸۸	۳۵۴۷۷۶۱	۳۲/۶۹	۰/۸۱۷۲۵
سه‌راهی تنگ دهنو	P10	۵۱۳۱۲۰	۳۵۴۷۲۶۹	۲۸/۲۹	۰/۷۰۷۲۵

یافته‌ها نشان دادند که میزان نشست تجمعی به ترتیب برابر با ۲۶، ۵۳ و ۸۰ سانتی‌متر و نرخ فرونشست سالانه معادل ۰/۶۶، ۱/۳ و ۲ سانتی‌متر در سال است (شکل ۴). این گستره از مقادیر، حساسیت بالای مدل را به پارامتر هیدروژئوتکنیکی ضریب ذخیره ویژه (Sy) که خود تابعی از تراکم‌پذیری اسکلت خاک (α)، تراکم‌پذیری آب (β) و n تخلخل است. در آکیفرهای دانه‌ریز، سهم عمده تراکم از مؤلفه nβ ناشی می‌شود و معمولاً α ناچیز در نظر گرفته می‌شود (Poland & Davis, 1969).

اعتبارسنجی نتایج مدل با مشاهدات میدانی شامل وجود ترک‌های کششی در سطح زمین و همچنین کج‌شدگی خطوط انتقال برق در منطقه جنوب غرب دشت، زمین‌های بنیاد (شکل ۵(a)) و لوله‌زایی چاه در منطقه سه‌راهی تنگ دهنو (شکل ۵(b))، دقت و قابلیت اطمینان برآوردهای انجام‌شده را تأیید کرد. این مشاهدات میدانی، به‌وضوح در مناطقی که مدل، پیش‌بینی بالاترین نرخ فرونشست را داشت، ملموس و قابل‌اندازه‌گیری بودند.

تفسیر این یافته‌ها در چهارچوب مطالعات پیشین نشان می‌دهد که رابطه بین افت سطح آب و فرونشست در دشت سفیددشت از الگوی خطی تبعیت می‌کند. این مسئله را می‌توان به قرارگیری لایه‌های رسی در محدوده تنش‌های اولیه کمتر از فشار پیش‌تحکیمی[6] نسبت داد، به‌طوری‌که با افزایش تنش مؤثر ناشی از افت سطح آب، خاک وارد محدوده رفتار خطی خود در منحنی منحنی تراکم می‌شود. این یافته با نتایج مصطفوی و همکاران (۲۰۱۶) در دشت ورامین و خرمی و همکاران (۲۰۲۰) در مشهد که در مراحل اولیه توسعه فرونشست، رفتار خطی مشابهی را گزارش کرده‌اند، همخوانی دارد. بااین‌حال، مطالعاتی مانند رجبی (۲۰۱۸) در دشت علی‌آباد قم و هولزر و جانسون[7] (۱۹۸۵) در دره سانتا کلارا نشان داده‌اند که با تداوم برداشت و گذر از آستانه تحکیم اولیه، رفتار غیرخطی و فعال شدن پدیده تحکیم ثانویه (خزش) می‌تواند غالب شود.

تحلیل‌های مکانی همچنین نشان داد که توزیع فرونشست صرفاً تابعی از میزان افت سطح آب نیست، بلکه شدیداً تحت تأثیر تغییرپذیری فضایی ضخامت و ترکیب لیتولوژیکی لایه‌های آبخوان است. به‌عبارت‌دیگر، حتی در مناطقی که افت سطح آب کمتر بوده، اما ضخامت لایه‌های رسی بیشتر است (مانند بخش‌های جنوبی دشت)، نرخ فرونشست قابل‌توجه است. این یافته به‌خوبی تأییدکننده دیدگاه کلاسیک پولند و دیویس[8] (۱۹۶۹) و هلم[9] (۱۹۷۵) است که بر وابستگی شدید نشست به ضخامت لایه فشرده‌شونده (b) و ویژگی‌های تراکم‌پذیری (nβ) تأکید دارند.

6. Pre-consolidation Pressure
7. Holzer & Johnson
8. Poland & Davis

[Downloaded from www.disaster.ndri.ac.ir on 2026-11-18]
[DOI: https://doi.org/10.22034/1.2.43]

مقایسه نرخ فرونشست برآوردشده در دشت سفیددشت (۰/۶۶ تا ۲ سانتی‌متر در سال) با دیگر دشت‌های ایران، جایگاه این دشت را ازنظر شدت بحران روشن می‌سازد. این نرخ اگرچه به مقادیر گزارش‌شده در کانون‌های بحرانی مانند رفسنجان تا ۳۴ سانتی‌متر در سال (Tzampoglou et al., 2023) یا جنوب تهران ۲۱/۷ سانتی‌متر در سال (Moradi et al., 2023) نمی‌رسد، اما در رده دشت‌های با خطر فرونشست متوسط تا شدید نظیر داراب (Othman et al., 2025) و مرند (Shahnazi et al., 2025) قرار می‌گیرد و غفلت از آن می‌تواند در آینده‌ای نزدیک پیامدهای جبران‌ناپذیر مهندسی و زیست‌محیطی به همراه داشته باشد.

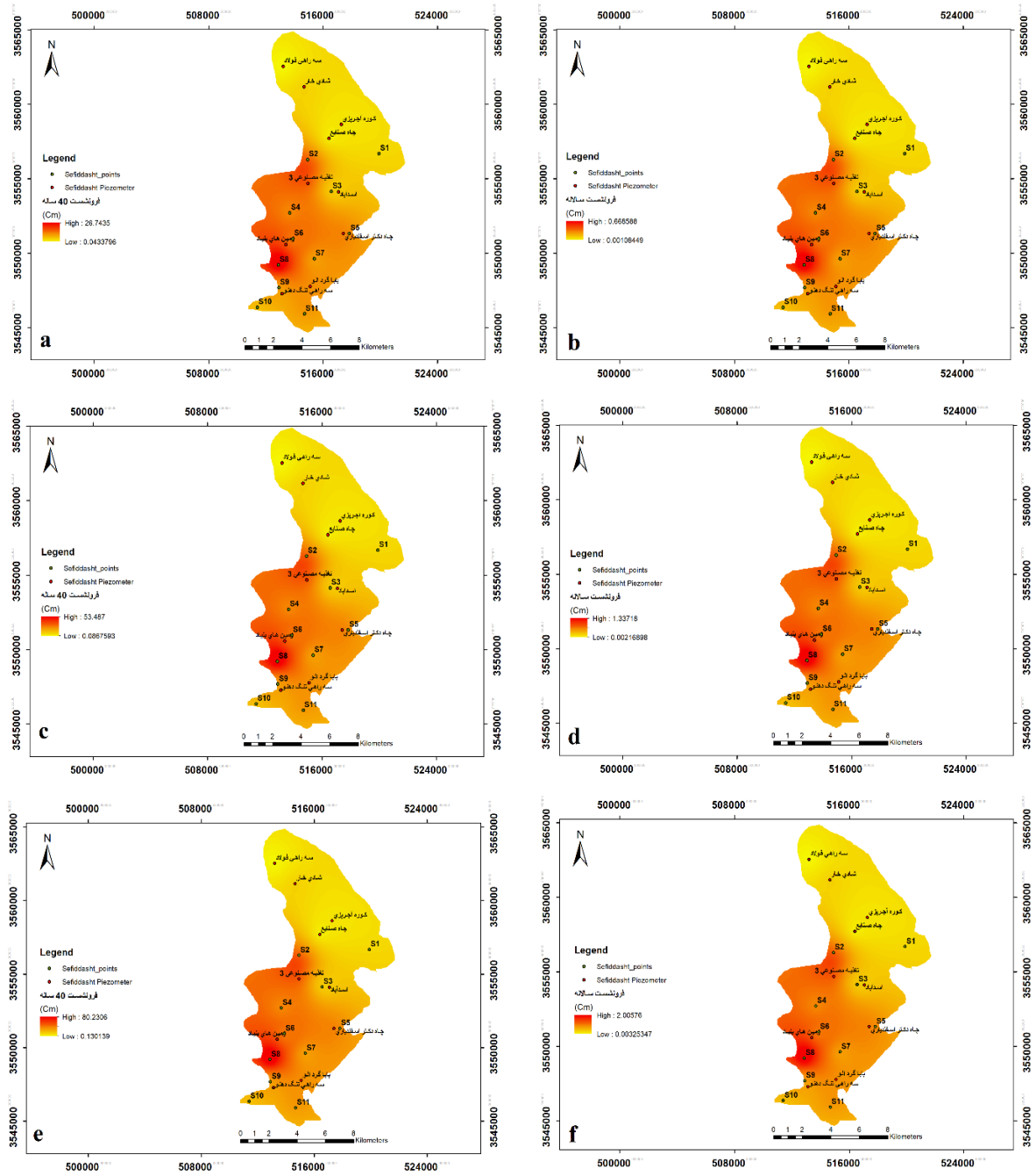
در مقیاس جهانی، مکانیسم شناسایی‌شده در سفیددشت کاملاً با الگوی گزارش‌شده در بسیاری از آبخوان‌های دشت‌های آبرفتی در سراسر جهان ازجمله مکزیکوسیتی (Chaussard et al., 2013; Chaussard et al., 2014)، دشت شمال چین (Ye et al., 2016; Nafouanti et al., 2025) و حوضه پو در ایتالیا (Gambini et al., 2019) همخوانی دارد. در تمامی این موارد، همانند دشت سفیددشت، ترکیب سه عامل اصلی «افت شدید سطح آب»، «وجود لایه‌های ضخیم ریزدانه» و «قرارگیری رسوبات در حالت Normally Consolidated یا کمی Pre-consolidated» منجر به بروز پدیده فرونشست شده است. این همخوانی، جهان‌شمول بودن اصول پایه مدل ترزاقی (۱۹۴۳) و کاربردپذیری آن در محیط‌های هیدروژئولوژیکی مختلف را یک بار دیگر به اثبات می‌رساند.

درنهایت، نتایج این پژوهش به‌وضوح نشان می‌دهد که مدیریت برداشت از آب‌های زیرزمینی و کنترل نرخ افت سطح ایستابی، مؤثرترین راهکار برای کاهش نرخ فرونشست در دشت سفیددشت است (Todd & Mays, 2005; Holzer & Johnson, 1985). بااین‌حال، تداوم روند فعلی برداشت، نه‌تنها باعث تشدید فرونشست خواهد شد، بلکه باتوجه‌به ماهیت زمان‌بر و غیرفوری بودن تحکیم ثانویه (Helm, 1975; Gambini et al., 2019)، حتی در صورت توقف کامل برداشت، نشست زمین برای سال‌ها ادامه خواهد یافت. بنابراین، نتایج این مطالعه می‌تواند به‌عنوان پایه‌ای علمی برای تدوین راهبردهای فوری حفاظت از آبخوان و برنامه‌ریزی برای کاهش خطرات ناشی از فرونشست در منطقه موردمطالعه مورداستفاده قرار گیرد.

9. Helm

[Downloaded from www.disaster.ndri.ac.ir on 2026-11-18]

[DOI: https://doi.org/10.22034/1.2.43]



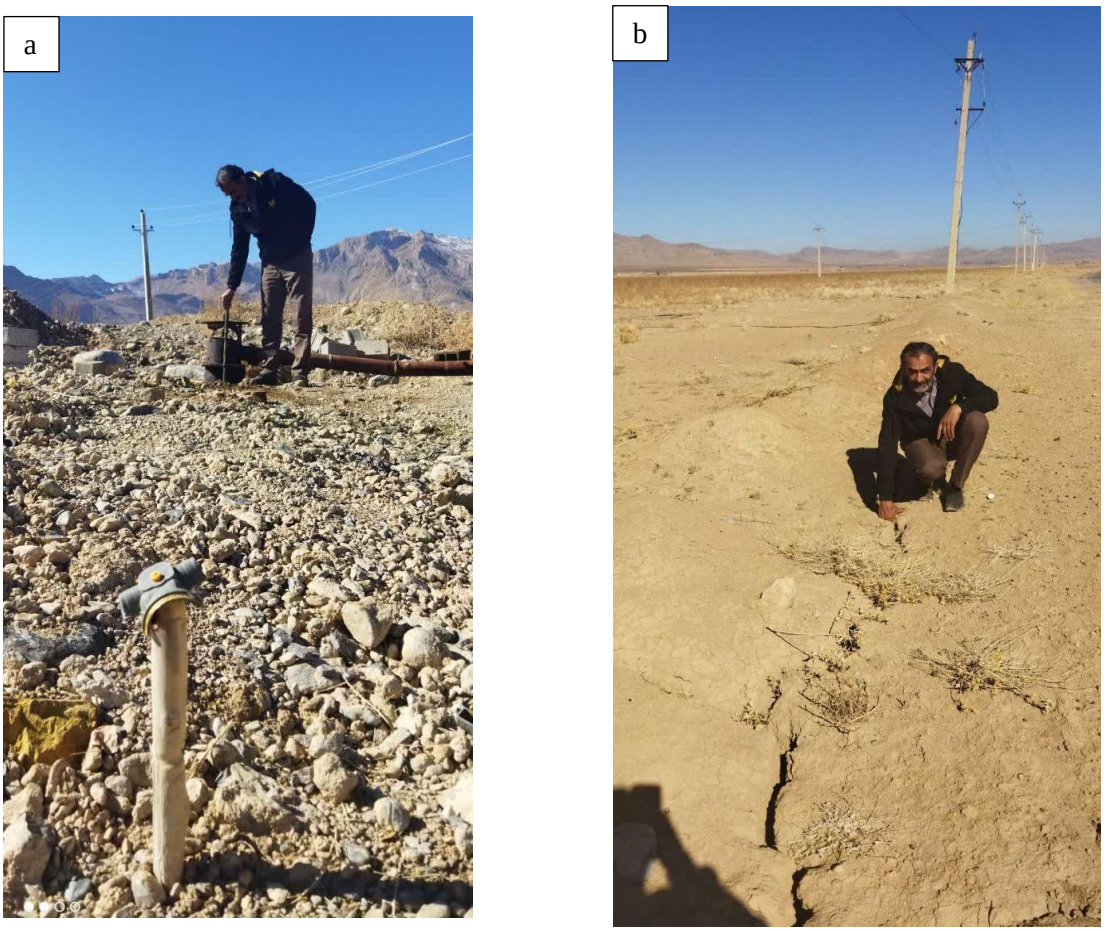
شکل ٤. توزیع مکانی فرونشست زمین در سفیددشت؛ a-b) فرونشست تجمعی ٤٠ سال و نرخ فرونشست سالانه، Sy=0.0001؛ c-d) فرونشست تجمعی ٤٠ سال و نرخ فرونشست سالانه، Sy=0.0002؛ و e-f) فرونشست تجمعی ٤٠ سال و نرخ فرونشست سالانه، Sy=0.0003.

محدودیت‌ها و عدم قطعیت

در تفسیر نتایج این پژوهش، لازم است محدودیت‌های ذاتی مدل و داده‌ها و تأثیر آن‌ها بر برآوردهای نهایی به‌دقت موردتوجه قرار گیرند. اصلی‌ترین منبع عدم قطعیت در این مطالعه، نداشتن داده‌های آزمایشگاهی مستقیم از پارامترهای تراکم‌پذیری (مانند ضریب تراکم حجمی mv و ضریب ذخیره ویژه Sy) لایه‌های رسی بود. این کمبود باعث شد تا تحلیل با استفاده از یک بازه احتمالی برای ضریب ذخیره (بین ۰/۰۰۰۱ تا ۰/۰۰۰۳) انجام شود، که اگرچه امکان تحلیل حساسیت را فراهم کرد، اما دقت

[Downloaded from www.disaster.ndri.ac.ir on 2026-11-18]
[DOI: https://doi.org/10.22034/1.2.43]

برآورد نرخ نهایی فرونشست را تحت تأثیر قرار داده است. علاوه بر این، ساده‌سازی ذاتی مدل تحکیم تک بعدی ترزاقی که از پیچیدگی‌های رفتار واقعی خاک مانند آثار خزش بلندمدت (تحکیم ثانویه)، رفتار غیرالاستیک و ناهمگونی مکانی رسوبات صرف‌نظر می‌کند، به‌عنوان یک منبع عدم قطعیت سیستماتیک در نظر گرفته شود. بااین‌حال، رویکرد تحلیلی حاضر و تحلیل حساسیت انجام‌شده، یک چهارچوب شفاف و کمّی از میزان این عدم قطعیت‌ها ارائه می‌دهد و آن را به یک ابزار قدرتمند برای ارزیابی اولیه و مدیریت ریسک تبدیل می‌کند. برای کاهش این عدم قطعیت‌ها در مطالعات آتی، انجام آزمایش‌های آزمایشگاهی بر روی نمونه‌های دست‌نخورده و توسعه مدل‌های عددی پیشرفته‌تر که قادر به شبیه‌سازی رفتار زمانی–مکانی کامل سیستم باشند، ضروری است.



شکل ۵. ترک‌های کششی زمین و کج شدن تیر چراغ‌برق‌ها در منطقه جنوب غربی سفیددشت، زمین‌های بنیاد؛ b) لوله زایی در منطقه جنوبی دشت، سه‌راهی دهنو

نتیجه‌گیری

این پژوهش به‌طور جامع به بررسی پدیده فرونشست زمین در دشت سفیددشت پرداخت و توانست با تلفیق مدل تحکیم تک بعدی ترزاقی (۱۹۴۳) با داده‌های هیدروژئولوژیکی و سامانه اطلاعات جغرافیایی، تصویر دقیقی از توزیع فضایی و میزان این مخاطره طبیعی را برای اولین بار در سفیددشت ارائه دهد. یافته‌های نهایی به‌وضوح نشان می‌دهند که برداشت بی‌رویه از منابع آب زیرزمینی به‌عنوان عامل اصلی و توزیع فضایی ضخامت لایه‌های رسی تراکم‌پذیر به‌عنوان عامل کنترل‌کننده، در کنار هم موجب شکل‌گیری الگوی مکانی فرونشست در این دشت شده‌اند. برآورد نرخ فرونشست بین ۰/۶۶ تا ۲ سانتی‌متر در سال، اگرچه در مقایسه با برخی کانون‌های بحرانی ایران عدد کمتری به نظر می‌رسد، اما برای دشتی با شرایط هیدروژئولوژیکی و اقلیمی حساس مانند سفیددشت، یک زنگ خطر جدی محسوب می‌شود. نتایج این مطالعه نه‌تنها یک ارزیابی کمی از وضعیت فعلی ارائه

[Downloaded from www.disaster.ndri.ac.ir on 2026-11-18]
[DOI: https://doi.org/10.22034/1.2.43]

می‌کند، بلکه با شناسایی کانون‌های بحرانی، پایه‌ای علمی برای برنامه‌ریزی و مدیریت پایدار منابع آب و زمین در منطقه فراهم می‌سازد. تداوم روند فعلی برداشت از آبخوان، دشت سفیددشت را با تهدیدی دوگانه، از یک سو، اتمام ذخایر آبی و از سوی دیگر، تخریب غیرقابل‌جبران ظرفیت ذخیره‌سازی آبخوان ازطریق فرونشست روبه‌رو کرده است.

[Downloaded from www.disaster.ndri.ac.ir on 2026-11-18]

[DOI: https://doi.org/10.22034/1.2.43]

References

Chaussard, E., Amelung, F., Abidin, H., & Mattioli, G. (2013). Sinking cities in Indonesia: ALOS PALSAR detects rapid subsidence due to groundwater and gas extraction. *Remote Sensing of Environment*, 128, 150-161. https://doi.org/10.1016/j.rse.2012.10.015

Chaussard, E., Wdowinski, S., Cabral-Cano, E., & Amelung, F. (2014). Land subsidence in central Mexico detected by ALOS InSAR time-series. *Remote Sensing of Environment*, 140, 94–106. https://doi.org/10.1016/j.rse.2013.08.038

Domenico, P. A., & Mifflin, M. D. (1965). Water from low-permeability sediments and land subsidence. *Water Resources Research*, 1(4), 563-576. https://doi.org/10.1029/WR001i004p00563

Fatolahzadeh, S., Nadi, B., & Ajalloeian, R. (2022). Land subsidence susceptibility zonation of Isfahan Plain based on geological bedrock layer. *Geotechnical and Geological Engineering*, 40, 1989–1996. https://doi.org/10.1007/s10706-021-02004-6

Freeze, R. A., & Cherry, J. A. (1979). Groundwater. Prentice Hall. https://doi.org/10.1007/s10706-021-02004-6

Gabrysch, R. K. (1984). *Ground-water Withdrawals and Land-surface Subsidence in the Houston-Galveston Region*, Texas, 1906-80. Texas Department of Water Resources. (No DOI Available)

Gambini, M., Teatini, P., & Ferronato, M. (2019). Groundwater depletion and land subsidence in the Po River Basin, Italy. *Water Resources Research*, 55(6), 4514–4531. https://doi.org/10.1029/2018WR024427

Ghaedi Vanani, A., Alipour, N., & Fatemi, S. (2023). *Supplementary report on the quantitative and qualitative status of the Borujen Plain aquifer*. Shahrekord: Chaharmahal and Bakhtiari Regional Water Company, Office of Basic Water Resources Studies. (in Persian)

Helm, D. C. (1975). One-dimensional simulation of aquifer-system compaction. *Water Resources Research*, 11(3), 465–478. https://doi.org/10.1029/WR011i003p00465

Holzer, T. L., & Johnson, A. I. (1985). Land subsidence caused by ground-water withdrawal in the Santa Clara Valley, California. *USGS Professional Paper*, 497-H. https://doi.org/10.3133/pp497H

Hu, R., Li, X., Ye, S., & Zhang, J. (2004). Review on current status and challenging issues of land subsidence in China. *Engineering Geology*, 76(1-2), 65-77. https://doi.org/10.1016/j.enggeo.2004.06.006

Khan, A. S., Khan, S. D., & Kakar, D. M. (2013). Land subsidence and declining water resources in Quetta Valley, Pakistan. *Environmental Earth Sciences*, 70. https://doi.org/10.1007/s12665-013-2374-3

Khorrami, M., Abrishami, S., Maghsoudi, Y., Alizadeh, B., & Perissin, D. (2020). Extreme subsidence in a populated city (Mashhad) detected by PSInSAR considering groundwater withdrawal and geotechnical properties. *Scientific Reports*, 10, 11538. https://doi.org/10.1038/s41598-020-67989-1

Lofgren, B. E. (1969). Field measurement of aquifer-system compaction, San Joaquin Valley, California, USA. *In Land subsidence: Proceedings of the Tokyo Symposium* (pp. 272-284). (No DOI Available)

Scott, R. F. (1979). Subsidence evaluation and prediction of subsidence. In S. K. Saxena (Ed.), *Proceedings of the Conference ASCE* (pp. 1–25). Gainsville. (No DOI Available)

Phien-Wej, N., Giao, P., & Nutalaya, P. (2006). Land subsidence in Bangkok, Thailand. *Engineering Geology*, 82(4), 187-201. https://doi.org/10.1016/j.enggeo.2005.10.003

Moradi, A., Emadodin, S., Beitollahi, A., Abdolazimi, H., & Ghods, B. (2023). Assessments of land subsidence in Tehran metropolitan using Sentinel 1A InSAR. *Environmental Earth Sciences*, 82, 569. https://doi.org/10.1007/s12665-023-11225-2

Motagh, M., Baes, M., Arefi, H., Bürgmann, R., & d'Oreye, N. (2008). Land subsidence in Iran caused by widespread water withdrawal: Results from InSAR and GPS observations. *Remote Sensing of Environment*, 112(4), 1646–1658. https://doi.org/10.1016/j.rse.2007.08.004

Mostafavi, M., Aghajani, H., & Nouri, H. (2016). Assessment of land subsidence due to groundwater depletion using InSAR technique: Case study of Varamin Plain, Iran. *Environmental Earth Sciences*, 75(15), 1129. https://doi.org/10.1007/s12665-016-5927-0

[Downloaded from www.disaster.ndri.ac.ir on 2026-11-18]

[DOI: https://doi.org/10.22034/1.2.43]

Nafouanti, M. B., Li, J., Chakira, H., Nyakilla, E. E., Fabiani, D. C., Gondwe, J. F., & Sallah, I. (2025). Prediction of groundwater level and its correlation with land subsidence in Cangzhou, North China Plain. *Natural Resources Research*, 34, 1645–1666. https://doi.org/10.1007/s11053-025-10123-7

Othman, L. S., Majidi, J., & Amini, A. (2025). Land Subsidence Assessment in the Darab Plain, Fars Province, Iran: Integrating Sentinel 1 InSAR and Groundwater Level Data. *Advances in Civil Engineering and Environmental Science*, 2(1), 57–61. https://doi.org/10.22034/acees.2025.506285.1019

Poland, J. F., & Davis, G. H. (1969). Land subsidence due to withdrawal of fluids. *Reviews in Engineering Geology*, 2, 187–269. https://doi.org/10.1130/REG2-p187

Rajabi, A. M. (2018). A numerical study on land subsidence due to extensive overexploitation of groundwater in Aliabad plain, Qom Iran. *Natural Hazards*, 94(3), 1239–1261. https://doi.org/10.1007/s11069-018-3448-z

Riley, F. S. (1969). Analysis of crustal strain and land subsidence in the Santa Clara Valley, California. USGS Professional Paper 497-E.

Shahnazi, S., Roushangar, K., Khodaei, B., & Hashemi, H. (2025). Analysis of land subsidence in Marand plain using InSAR and groundwater drought index. https://doi.org/10.3390/rs17071173

Sharifi, A., Khodaei, B., Ahrari, A., Hashemi, H., & Torabi Haghighi, A. (2024). Can river flow prevent land subsidence in urban areas? *Science of the Total Environment*, 908, 168647. https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2023.168647

Shafiei Darafshani, A., & Shamsi Ezhieh, A. (2025). Study on urban infrastructure vulnerability to subsidence caused by groundwater decline in Isfahan. (In Persian) (DOI Not Yet Available)

Teatini, P., Tosi, L., Strozzi, T., Carbognin, L., Cecconi, G., Rosselli, R., & Libardo, S. (2012). Resolving land subsidence within the Venice Lagoon by persistent scatterer SAR interferometry. Physics and Chemistry of the Earth, Parts A/B/C, 40-41, 72-79. https://doi.org/10.1016/j.pce.2010.07.002

Terzaghi, K. (1943). Theoretical Soil Mechanics. John Wiley & Sons. (No DOI Available)

Todd, D. K., & Mays, L. W. (2005). Groundwater Hydrology (3rd ed.). John Wiley & Sons. (No DOI Available)

Tzampoglou, P., Ilia, I., Karalis, K., Tsangaratos, P., Zhao, X., & Chen, W. (2023). Selected worldwide cases of land subsidence due to groundwater withdrawal. *Water*, 15(6), 1094. https://doi.org/10.3390/w15061094

Ye, S., Xue, Y., Wu, J., Yan, X., Yu, J., Wei, Z., & Li, Q. (2016). Land subsidence and its relation with groundwater aquifers in Beijing Plain, China. *Engineering Geology*, 193, 1–15. https://doi.org/10.1016/j.enggeo.2015.04.020

DOI: https://doi.org/10.22034/1.2.43

[Downloaded from www.disaster.ndri.ac.ir on 2026-11-18]

[DOI: https://doi.org/10.22034/1.2.43]