



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

Amirhossein Khaksar¹, Gholamreza Shoaee^{2✉}, and Asghar Ghaedi Vanani³

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: Shoaee@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 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., Shoaee, 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.

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

Publisher: Natural Disasters Research Institute (NDRI).

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

امیرحسین خاکسار^۱، غلامرضا شعاعی^۲، و علی اصغر قاندي و انانی^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. فارغ التحصیل دکتری، گروه زمین شناسی مهندسی، دانشکده علوم پایه، دانشگاه تربیت مدرس، تهران، ایران. رایانامه: ghaedi2012@gmail.com

چکیده

اطلاعات مقاله

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

نوع مقاله:

مقاله پژوهشی

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 تراکم پذیر و افت سطح ایستابی استفاده شد. با استفاده از این مدل، مقادیر نشست در محل چاههای پیرومتری در بازه زمانی ۴۰ ساله از سال ۱۳۶۳ تا ۱۴۰۳ محاسبه شد و سپس توزیع فضایی فرونشست در سطح دشت با به کارگیری روشهای درون یابی در سامانه اطلاعات جغرافیایی (GIS) تهیه گردید.

تاریخچه مقاله:

تاریخ دریافت: ۱۴۰۴/۰۱/۱۵

تاریخ بازنگری: ۱۴۰۴/۰۲/۱۷

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۴/۰۳/۳۱

تاریخ انتشار: ۱۴۰۴/۰۴/۰۸

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 سانتی متر برآورد شد. پهنه بندی مکانی نشست، انطباق واضحی را بین مناطق با بیشترین ضخامت لایههای رسی، بیشترین افت سطح آب و بالاترین نرخ فرونشست نشان داد. صحت سنجی نتایج با مشاهدات میدانی انجام شد که قابلیت اطمینان مدل به کار گرفته شده را تأیید کرد.

کلیدواژه‌ها:

فرونشست زمین،

دشت سفیددشت،

مدل تحکیم تک بعدی،

افت سطح آب زیرزمینی.

نتیجه گیری: یافته‌های این مطالعه می‌تواند به عنوان ابزاری کارآمد در مدیریت پایدار منابع آب زیرزمینی، پیش بینی مناطق پرخطر و تدوین راهبردهای کاهش خطر فرونشست در منطقه مورد مطالعه مورد استفاده قرار گیرد. همچنین، این پژوهش نمونه‌ای از کاربرد مدل‌های تحکیم و سامانه اطلاعات جغرافیایی در تحلیل مشکلات زمین شناسی و مدیریت منابع طبیعی در مناطق خشک و نیمه خشک ایران ارائه می‌دهد.

استناد: خاکسار، امیرحسین؛ شعاعی، غلامرضا؛ قاندي و انانی، علی اصغر. (۱۴۰۵). ارزیابی مکانی فرونشست زمین در دشت سفیددشت با به کارگیری مدل تحکیم تک بعدی و داده‌های هیدروژئولوژیکی. *تاب آوری در برابر حوادث و سوانح*، ۲ (۱)، ۴۲-۵۴. <https://doi.org/10.22034/1.2.43>



© نویسندگان.

ناشر: پژوهشکده سوانح طبیعی.

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 درحال توسعه 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 معق و همکاران (۲۰۰۸) با به‌کارگیری GPS و InSAR، 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^۱ 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 اژیبه (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

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 پیرومتری و مدل‌سازی عددی است که امکان پایش دقیق و گسترده نشست را فراهم کرده است. با این حال، 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 به وسیله 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^۲ (۱۹۴۳) مطرح شد. بر اساس این نظریه، میزان نشست متناسب با ضریب تراکم‌پذیری حجمی خاک، تغییر فشار مؤثر و ضخامت لایه فشرده‌شونده است:

$$S = m_v \cdot \Delta \sigma \cdot H \quad (1)$$

ایده محوری در این رابطه آن است که کاهش فشار منفذی ناشی از افت سطح آب زیرزمینی، منجر به افزایش فشار مؤثر و در نتیجه کاهش حجم اسکلت خاک می‌شود. این بنیان، بعدها در هیدروژئولوژی برای توصیف تراکم آبخوان‌ها تعمیم یافت. فریز و چری^۳ (۱۹۷۹) این رابطه را در چهارچوب هیدروژئولوژیک بازنویسی کرده و از مفهوم «ضریب ذخیره ویژه» استفاده کردند:

$$\Delta b = \Delta p \cdot (S_s / \gamma_w) \cdot b \quad (2)$$

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

منطقه مورد مطالعه

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. در نتیجه 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 کیلومتر مربع 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

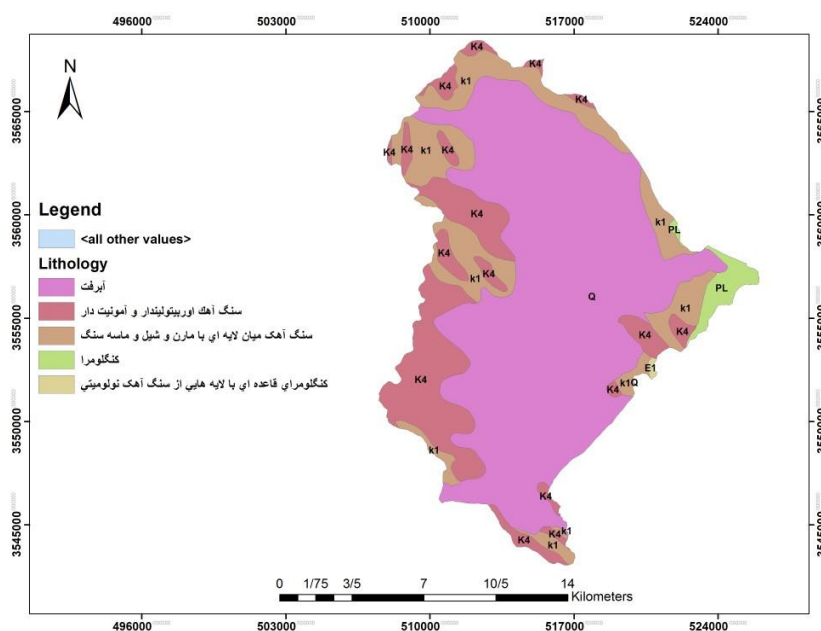
3. Freeze & Cherry

ناحیه موردبررسی از لحاظ ساختاری در پهنه سنج-سیرجان قرار گرفته است. این پهنه در اصل جزئی از ایران مرکزی است؛ ولی با شاخصه‌های ویژه‌ای مشخص می‌شود و به صورت یک نوار از ارومیه و سنج در شمال غرب ایران تا سیرجان و اسفندقه در جنوب شرق ایران گسترش دارد و به موازات رواندگی زاگرس قرار گرفته است که توسط گسل اصلی زاگرس، از زاگرس مرتفع جدا می‌شود. واحدهای چین‌شده‌ی واقع در محدوده عبارت‌اند از (شکل ۱):

مزوزوئیک: قدیمی‌ترین شواهد زمین‌شناسی قابل مشاهده در این محدوده، مربوط به کرتاسه پایینی و دوره ژوراسیک است که شامل آهک‌های متورق با لایه‌بندی نازک به همراه شیل، مارن و ماسه سنگ 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 رخمون دارد و به طور دگر شیب روی تشکیلات کرتاسه میانی قرار گرفته و توسط کنگلومرا نتوژن محاصره شده است.

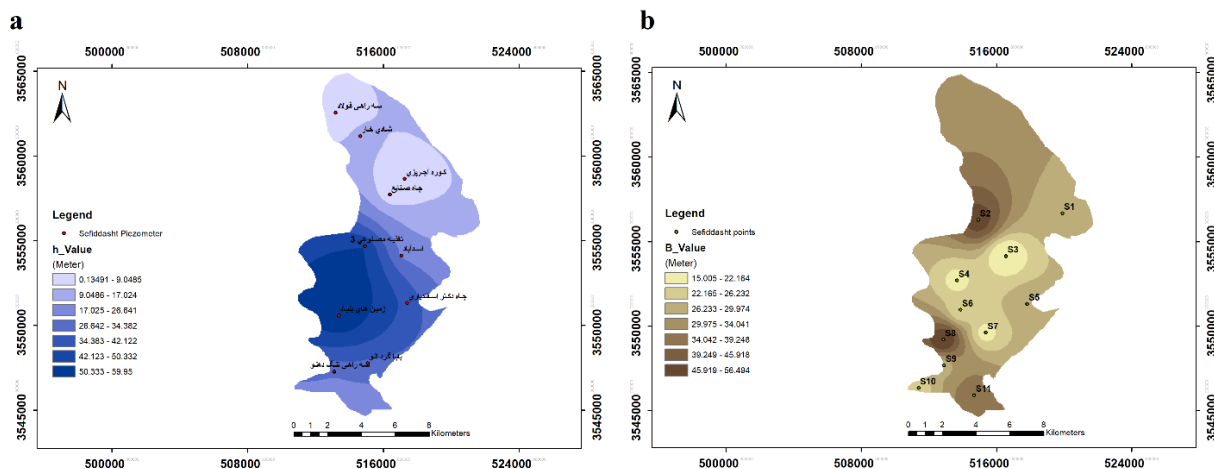
کواترنری: رسوبات مربوط به دوران چهارم شامل آبرفت‌های جوان است که در نواحی مرکزی دشت به خصوص حاشیه مخروط‌افکنه‌ها سطح وسیعی را پوشانده است (Ghaedi Vanani et al., 2023).



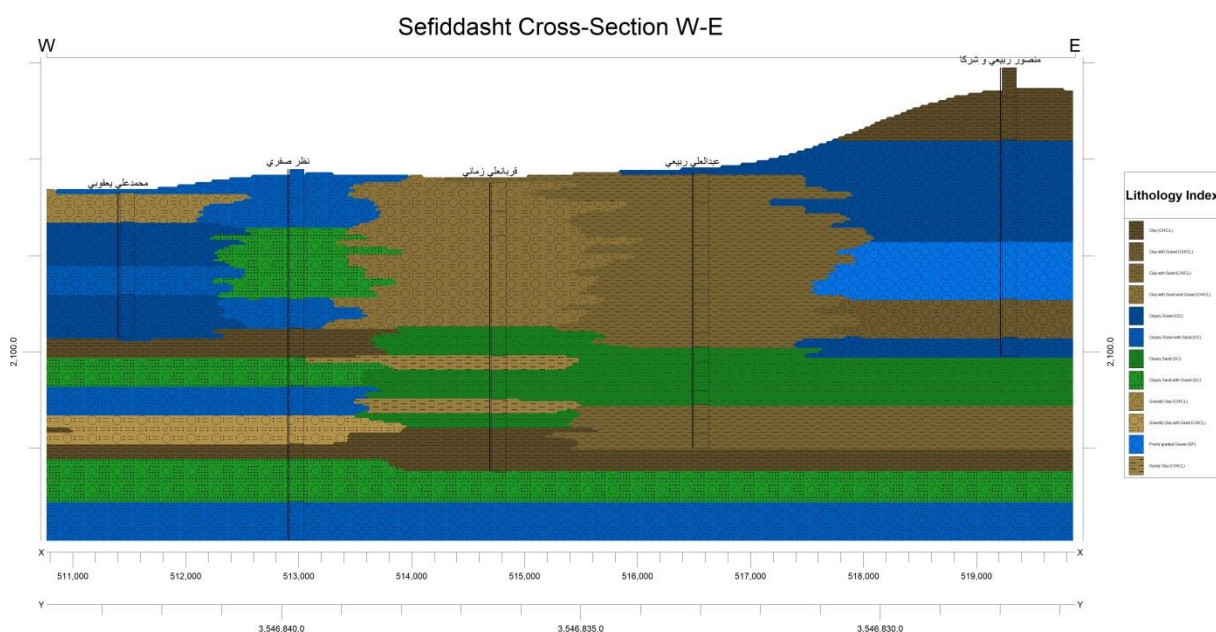
شکل ۱. نقشه سنگ‌شناسی محدوده مطالعاتی سفیددشت

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، بایگرددالو 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.



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 به کارگیری 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 ($S_y = 0.003$ ، $S_y = 0.002$ ، $S_y = 0.001$) محاسبه شد. محدوده انتخاب‌شده برای ضریب ذخیره (0.001 تا 0.003) در این مطالعه، بر اساس مبانی هیدروژئولوژیک و مطالعات پیشین در مورد خواص تراکم‌پذیری لایه‌های رسی است. به عنوان مثال، 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 مورد استفاده ما تعمیم می‌یابد. به طور مشابه، مطالعه میدانی رایلی^۴ (۱۹۶۹) بر روی فرونشست دره سانتا کلارا نیز مقادیر کمی مشابهی را برای تراکم لایه‌های ریزدانه گزارش کرده است. علاوه بر این، دومینیکو و میفلین^۵ (۱۹۶۵) نیز به طور خاص بر پایین بودن قابلیت انتقال آب و ذخیره در رسوبات ریزدانه تأکید دارد. بنابراین، اگرچه فقدان

4. Riley

5. Domenico & Mifflin

داده‌های آزمایشگاهی محلی یک محدودیت محسوب می‌شود، اما انتخاب این محدوده بر پایه شواهد معتبر علمی صورت گرفته 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- Σ سال (m)	نرخ سالانه افت سطح ایستابی h(m/y)
سهرای فولاد	P1	۵۱۳۲۰۲	۳۵۶۲۵۴۳	۰/۰۱۲۵
شادی خار	P2	۵۱۴۶۵۷	۳۵۶۱۱۶۶	۰/۳۰۶۲۵
کوره اجرپی	P3	۵۱۷۲۶۸	۳۵۵۸۶۴۲	۰/۱۷۰۲۵
چاه صنایع	P4	۵۱۶۴۰۳	۳۵۵۷۷۱۱	۰/۰۶۶۲۵
تغذیه مصنوعی ۳	P5	۵۱۴۹۲۷	۳۵۵۴۶۷۸	۱/۲۵
اسدآباد	P6	۵۱۷۰۷۱	۳۵۵۴۱۱۱	۰/۶۴۶۷۵
چاه دکتر اسفندیاری	P7	۵۱۷۴۰۷	۳۵۵۱۳۱۳	۰/۹۹۵
زمین‌های بنیاد	P8	۵۱۳۳۸۸	۳۵۵۰۵۷۰	۱/۵
بابا گرد الو	P9	۵۱۵۰۸۸	۳۵۴۷۷۶۱	۰/۸۱۷۲۵
سهرای تنگ دهنو	P10	۵۱۳۱۲۰	۳۵۴۷۲۶۹	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 (S_y) که خود تابعی از تراکم‌پذیری اسکلت خاک (α)، تراکم‌پذیری آب (β) و n تخلخل است، در آکیفرهای دانه‌ریز، سهم عمده تراکم از مؤلفه $n\beta$ 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 ۵a)) و لوله‌زایی چاه در منطقه سهرای تنگ دهنو (شکل ۵b))، 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 قابل اندازه‌گیری 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^۶ 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. باین‌حال، مطالعاتی مانند رجبی (۲۰۱۸) در دشت علی‌آباد قم و هولزر و جانسون^۷ (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. به‌عبارت دیگر، حتی در مناطقی که افت سطح آب کمتر بوده، اما ضخامت لایه‌های رسی بیشتر است (مانند بخش‌های جنوبی دشت)، نرخ فرونشست قابل توجه است. این یافته به‌خوبی تأییدکننده دیدگاه کلاسیک پولند و دیویس^۸ (۱۹۶۹) و هلم^۹ (۱۹۷۵) است که بر وابستگی شدید نشست به ضخامت لایه فشرده‌شونده (b) و ویژگی‌های تراکم‌پذیری ($n\beta$) تأکید دارند.

6. Pre-consolidation Pressure

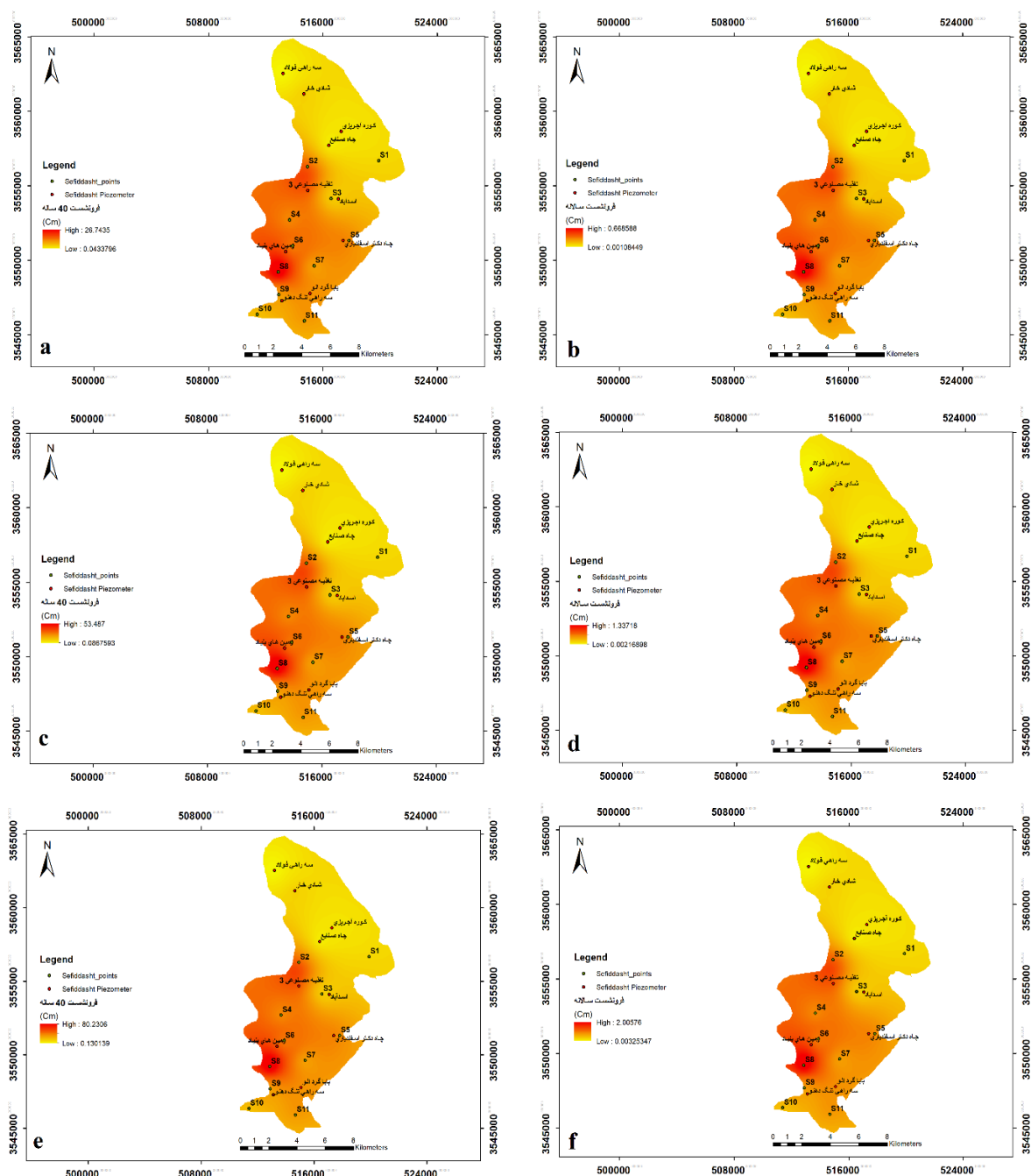
7. Holzer & Johnson

8. Poland & Davis

مقایسه نرخ فرونشست برآوردشده در دشت سفیددشت (۰/۶۶ تا ۲ سانتی متر در سال) با دیگر دشت‌های ایران، جایگاه این دشت را از نظر شدت بحران روشن می‌سازد. این نرخ اگرچه به مقادیر گزارش شده در کانون‌های بحرانی مانند رفسنجان تا ۳۴ سانتی متر در سال (Tzampoglou et al., 2023) یا جنوب تهران ۲۱/۷ سانتی متر 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 شناسایی شده در سفیددشت کاملاً با الگوی گزارش شده در بسیاری از آبخوان‌های دشت‌های ابرفتی در سراسر جهان از جمله 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 کاربرپذیری 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). با این حال، تداوم روند فعلی برداشت، نه تنها باعث تشدید فرونشست خواهد شد، بلکه با توجه به 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 مورد مطالعه مورد استفاده قرار گیرد.



شکل ۴. توزیع مکانی فرونشست زمین در سفیددشت؛ (a-b) فرونشست تجمعی ۴+ سال و نرخ فرونشست سالانه، (c-d) $Sy=0.0001$ ؛ (e-f) فرونشست تجمعی ۴+ سال و نرخ فرونشست سالانه، $Sy=0.0002$ ؛ (g-h) فرونشست تجمعی ۴+ 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 ۰/۰۰۱ تا ۰/۰۰۳) انجام شود، که اگرچه امکان تحلیل حساسیت را فراهم کرد، اما دقت

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. با این حال، رویکرد تحلیلی حاضر و تحلیل حساسیت انجام‌شده، یک چهارچوب شفاف و کمی 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 نه تنها یک ارزیابی کمی از وضعیت فعلی ارائه

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 از طریق فرونشست روبه‌رو کرده است.

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>

- 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 Ezhiieh, 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>