Incidents and Disasters Resilience
Online ISSN: 3134-0881
Homepage: https://disaster.ndri.ac.ir/

Investigation and analysis of land subsidence along the Tehran–Qom–Isfahan high-speed railway corridor

Jafar Hassanpour[1]✉, **Massoud Morsali**[2], and **Maedeh Roshan Liaryajdemeh**[3]

1. Corresponding Author, Professor, Department of Engineering Geology and Tectonics, School of Geology, College of Science, University of Tehran, Tehran, Iran. Email: hassanpour@ut.ac.ir
2. Assistant Professor, Department of Geology, University of Isfahan, Isfahan, Iran. Email: m.morsali@sci.ui.ac.ir
3. Ph.D. Student, Department of Engineering Geology and Tectonics, School of Geology, College of Science, University of Tehran, Tehran, Iran. Email: maedeh.roshan.li@ut.ac.ir

Article Info

Article type:
Research Article

Article history:
Received 1 December 2025
Received in revised form 13 March 2026
Accepted 18 March 2026
Available online 29 March 2026

Keywords:
Subsidence Rate,
Tehran–Qom–Isfahan High-Speed Railway,
Groundwater,
Radar Interferometry.

ABSTRACT

Objective: In recent years, population growth, agricultural development, climate change, and declining surface-water resources have substantially increased the demand for groundwater in Iran. Combined with inadequate aquifer management, this has caused widespread land subsidence in most of the country's alluvial aquifers. In addition to adversely affecting aquifer yield and groundwater storage, subsidence can severely damage existing structures and those under construction in areas with high subsidence rates. Long linear structures, including roads, highways, railway lines, and pipelines, are particularly vulnerable because of their sensitivity to differential settlement between adjacent locations. Given the widespread occurrence of subsidence-prone areas in Iran and the ongoing expansion of rail transport, crossing these areas has become unavoidable. The Tehran–Qom–Isfahan High-Speed Railway is one project expected to face considerable challenges in this regard, as it passes through two major active subsidence zones: one south and southwest of the city of Tehran and the other north of the city of Isfahan. Predicting the magnitude of subsidence in these areas is therefore crucial to the design and successful operation of the project.

Method: This study examines the history of land subsidence along the entire 410-km railway corridor. It then assesses the identified subsidence zones in greater detail, focusing on groundwater resources, groundwater-level fluctuations, and the prediction of subsidence rates in the coming years.

Conclusions: The findings indicate that, during its operation, the railway will face subsidence-related challenges in the two zones south and southwest of the city of Tehran and north of the city of Isfahan. Appropriate measures and mitigation strategies are therefore needed to reduce land-subsidence risks.

Cite this article: Hassanpour., J, Morsali., M, & Liaryajdemeh., M. (2026). Investigation and analysis of land subsidence along the Tehran–Qom–Isfahan high-speed railway corridor. ***Incidents and Disasters Resilience***, *2*(5), 3-18.

© Author(s) retain the copyright.

Publisher: Natural Disasters Research Institute (NDRI).

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

تاب‌آوری در برابر حوادث و سوانح
شاپا الکترونیکی: ۰۸۸۱-۳۱۳۴
Homepage: https://disaster.ndri.ac.ir

بررسی و تحلیل فرونشست زمین در مسیر راه‌آهن سریع‌السیر تهران – قم – اصفهان

جعفر حسن‌پور[۱]✉، مسعود مرسلی[۲]، مائده روشن لیارجدمه[۳]

۱. نویسنده مسئول، استاد، گروه زمین‌شناسی مهندسی و تکتونیک، دانشکده زمین‌شناسی، دانشکدگان علوم، دانشگاه تهران، تهران، ایران. رایانامه: hassanpour@ut.ac.ir
۲. استادیار، گروه زمین‌شناسی، دانشگاه اصفهان، اصفهان، ایران. رایانامه: m.morsali@sci.ui.ac.ir
۳. دانشجوی دکتری، گروه زمین‌شناسی مهندسی و تکتونیک، دانشکده زمین‌شناسی، دانشکدگان علوم، دانشگاه تهران، تهران، ایران. رایانامه: maedeh.roshan.li@ut.ac.ir

اطلاعات مقاله

نوع مقاله:
مقاله پژوهشی

تاریخچه مقاله:
تاریخ دریافت: ۱۴۰۴/۰۹/۱۰
تاریخ بازنگری: ۱۴۰۴/۱۲/۲۲
تاریخ پذیرش: ۱۴۰۴/۱۲/۲۷
تاریخ انتشار: ۱۴۰۵/۰۱/۰۹

کلیدواژه‌ها:
نرخ فرونشست،
راه‌آهن سریع‌السیر تهران–قم–اصفهان،
آب زیرزمینی،
تداخل‌سنجی راداری.

چکیده

هدف: در سال‌های اخیر به دلیل افزایش جمعیت کشور و توسعه کشاورزی و همچنین تغییرات اقلیمی و کاهش منابع آب سطحی، نیاز به منابع آب زیرزمینی افزایش قابل‌توجهی داشته است. این موضوع همراه با عدم مدیریت صحیح آبخوان‌ها باعث شده است پدیده فرونشست زمین به‌طور گسترده‌ای در اغلب آبخوان‌های آبرفتی ایران به وقوع بپیوندد. نتیجه این پدیده علاوه بر آثار منفی بر آبخوان‌ها ازنظر آبدهی و ذخیره آب زیرزمینی، آثار مخربی است که بر سازه‌های ساخته‌شده و یا در حال ساخت در مناطق با نرخ فرونشست بالا ایجاد می‌شود. در این میان سازه‌های طویل خطی مانند جاده‌ها و بزرگراه‌ها، خطوط ریلی و خطوط لوله، به دلیل حساسیت بیشتر به اختلاف نشست میان نقاط مجاور هم، دچار آسیب‌های بیشتری می‌گردند. باتوجه‌به گستردگی زیاد پهنه‌های فرونشستی ایران از یک‌سو و توسعه حمل‌ونقل ریلی از سوی دیگر، عبور از این پهنه‌ها اجتناب‌ناپذیر شده است. یکی از پروژه‌هایی که از این نظر دارای مشکلات فراوانی خواهد بود، پروژه راه‌آهن سریع‌السیر تهران–قم–اصفهان است که از میان دو پهنه فرونشستی مهم و فعال ایران، واقع در جنوب و جنوب غرب شهر تهران و شمال شهر اصفهان می‌گذرد. پیش‌بینی میزان فرونشست این مناطق در طراحی این پروژه و بهره‌برداری موفق از آن نقش کلیدی دارد.

روش پژوهش: در این مطالعه ضمن بررسی تاریخچه فرونشست در کل مسیر ۴۱۰ کیلومتری پروژه، با تمرکز بر پهنه‌های فرونشستی شناسایی‌شده به مطالعه دقیق‌تر آن‌ها از دیدگاه منابع آب زیرزمینی، نوسانات سطح آب زیرزمینی و پیش‌بینی نرخ فرونشست برای سال‌های آینده پرداخته شده است.

نتیجه‌گیری: نتایج نشان می‌دهد که این پروژه در طول دوره بهره‌برداری در دو پهنه فرونشستی واقع در جنوب و جنوب غرب شهر تهران و شمال شهر اصفهان با چالش‌هایی روبه‌رو خواهد بود و لازم است تمهیدات و راهکارهای لازم برای کاهش ریسک فرونشست به کار گرفته شوند.

استناد: حسن‌پور؛ جعفر، مرسلی؛ مسعود، روشن لیارجدمه؛ مائده. (۱۴۰۵). بررسی و تحلیل فرونشست زمین در مسیر راه‌آهن سریع‌السیر تهران – قم – اصفهان. *تاب‌آوری در برابر حوادث و سوانح*، ۲ (۵)، ۳–۱۸.

CC BY NC

ناشر: مؤسسه پژوهشی سوانح طبیعی.
© نویسندگان.

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

مقدمه

فرونشست زمین، نشست ناگهانی یا تدریجی سطح زمین است که براثر تغییر در رژیم تنش در لایه‌های زیرسطحی ایجاد می‌شود. این پدیده یک فرایند ژئومکانیکی مهم است که توسعه پایدار جوامع بشری، به‌ویژه مناطق بزرگ شهری، زمین‌های کشاورزی و مناطق ساحلی را تهدید می‌کند. اصلی‌ترین عامل فرونشست زمین، استخراج بیش‌ازحد آب‌های زیرزمینی از آبخوان‌های آبرفتی است. پیش‌بینی می‌شود که استفاده از منابع آب در چند دهه آینده، به‌ویژه در کشورهای درحال‌توسعه و مناطق خشک دنیا که استفاده از آب‌های زیرزمینی برای توسعه کشاورزی ضرورت دارد (ازجمله ایران)، افزایش یابد.

در طول دهه‌های گذشته، وقوع این پدیده در بسیاری از نقاط جهان و بیش از ۱۵۰ شهر مانند جاکارتا و سامارانگ در اندونزی (Chaussard et al., 2013)، ونیز در ایتالیا (Teatini et al., 2012)، مکزیکوسیتی در مکزیک (Osmanoğlu et al., 2011; Chaussard et al., 2014)، شانگهای (Hu, 2006)، پکن (Ng et al., 2011) و تیانجین در چین (Yi et al., 2011)، دره آنتلوپ در کالیفرنیا (Galloway et al., 1998)، هوستون–گالوستون در تگزاس (Gabrysch, 1984)، دره سن‌خواکین در کالیفرنیا (Ireland et al., 1984)، دره سانتا کلارا در کالیفرنیا (Poland & Ireland, 1988)، بانکوک در تایلند (Phien-wej et al., 2006)، دره کویته در پاکستان (Khan et al., 2013) گزارش شده است. در ایران نیز در شهرهایی مثل رفسنجان (Mousavi et al., 2001; Rahnama & Moafi, 2009)، مشهد (Motagh et al., 2007) و تهران (Motagh et al., 2017)، مهیار، نیشابور و کاشمر گزارش شده است.

از سوی دیگر، آثار تغییرات اقلیمی (ازجمله تغییر در توزیع و زمان بارش‌ها، رواناب و تغذیه سفره‌های آب) و افزایش تمرکز جمعیت در کلان‌شهرها و مناطقی مانند دشت‌های آبرفتی و سواحل دریا باعث تشدید آثار این پدیده خواهد شد. نیاز روزافزون به منابع آب شیرین در مناطق پرجمعیت و در معرض خطر، ناگزیر مناطق تحت تأثیر فرونشست زمین و تعداد افراد درگیر در این فاجعه را افزایش می‌دهد. این پدیده می‌تواند منجر به ایجاد مسائل و مشکلاتی مانند کاهش کیفیت آبخوان ازنظر ذخیره آب و آبدهی، کاهش ارتفاع سطح زمین و نشست نامتقارن، ایجاد شکاف‌های بزرگ در زمین، فعال شدن گسل‌های کم‌عمق و یا ایجاد شکست در سطح زمین و القا یا ایجاد رویدادهای لرزه‌ای و ریزلرزه‌ای به دلیل تغییرات در رژیم تنش طبیعی گردد که همه این موارد می‌توانند ازنظر اقتصادی و اجتماعی برای یک جامعه درحال‌توسعه فاجعه‌بار باشند.

فرونشست ناشی از استخراج آب‌های زیرزمینی معمولاً زمانی رخ می‌دهد که آبخوان از عدسی‌ها یا لایه‌هایی از رسوبات ریزدانه قابل تراکم تشکیل شده باشد و کاهش فشار آب منفذی باعث فشرده شدن آن‌ها شود. این کاهش حجم منجر به افت تراز سطح زمین می‌شود. تزریق آب به سیستم‌های آبخوان گاهی اوقات این فرونشست ناشی از فعالیت انسانی را کاهش داده است. بااین‌حال، فشرده شدن رسوبات ریزدانه در بیشتر موارد به‌طور کامل برگشت‌پذیر نیست. این پدیده بسته به شرایط زمین‌شناسی، هیدروژئولوژیکی و ژئوتکنیکی آبخوان و میزان برداشت آب می‌تواند با نرخ‌های مختلف (از چند میلی‌متر تا بیشتر از ۳۰ سانتیمتر در سال) سطح دشت را درمجموع تا بیشتر از ۱۰ متر نیز به‌صورت قائم جابه‌جا نماید.

روشن است که قبل از احداث سازه‌های جدید خطی و طویل مانند راه‌آهن لازم است پهنه‌های فرونشستی مسیر شناسایی و تا حد امکان از آن‌ها اجتناب گردد. در مواردی که اجتناب از آن‌ها ممکن نیست لازم است پیش‌بینی‌های لازم برای به کار گرفتن راهکارهایی جهت کاهش آثار فرونشست اندیشیده شود.

این مقاله با هدف بررسی احتمال وقوع این پدیده در مسیر راه‌آهن سریع‌السیر تهران–قم–اصفهان و تعیین نرخ رخداد این پدیده در گذشته و همچنین تحلیل موضوع از دیدگاه زمین‌شناسی و هیدروژئولوژی به‌منظور پیش‌بینی رخداد این پدیده تهیه شده است. این پروژه طویل با گذر از میان ۱۱ دشت که در مناطق خشک و نیمه‌خشک ایران قرار گرفته‌اند، یکی از پرریسک‌ترین پروژه‌های حال حاضر ایران از دیدگاه فرونشست محسوب می‌شود.

در این مطالعه ضمن بررسی وضعیت زمین‌شناسی و هیدروژئولوژیکی دشت‌ها (محدوده‌های مطالعاتی) در مسیر پروژه، با

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

استفاده از تصاویر ماهواره‌ای راداری و با کمک روش تداخل‌سنجی، نرخ فرونشست در گذشته برای کل مسیر تعیین شده است. بعد از مقایسه نرخ‌های به‌دست‌آمده با نوسانات سطح آب زیرزمینی و صحت سنجی آن‌ها با استفاده از اندازه‌گیری‌های انجام‌شده توسط سازمان نقشه‌برداری کشور ازطریق روش ترازیابی، مشخص شد که پدیده فرونشست در دو دشت تهران و اصفهان در سال‌های گذشته در حالت کاملاً بحرانی قرار داشته است و باتوجه‌به شرایط موجود ازنظر سیاست‌های کشاورزی و مدیریت آبخوان همچنان کانون بحران خواهند بود. کنترل فرونشست و کاهش نرخ آن در این دو پهنه فقط ازطریق مدیریت مصرف و تغییر الگوی کشت و همچنین طرح‌های تغذیه مصنوعی میسر خواهد بود. در غیر این صورت، پروژه راه‌آهن سریع‌السیر و سایر پروژه‌های مشابه در این پهنه‌ها (به‌ویژه در مرکز آن‌ها) در طول دوره بهره‌برداری با چالش‌های عمده مواجه خواهند بود.

پروژه راه‌آهن سریع‌السیر تهران-قم-اصفهان

پروژه راه‌آهن سریع‌السیر تهران–قم–اصفهان با طول تقریبی ۴۱۰ کیلومتر و جهت کلی شمالی–جنوبی، در مسیر خود از تهران به اصفهان، از چهار استان مرکزی ایران شامل استان‌های تهران، قم، مرکزی و اصفهان عبور می‌کند. با احداث این پروژه که از شهرهای تهران، قم، دلیجان، میمه، مورچه‌خورت و اصفهان عبور می‌کند، زمان سفر در مسیر اصفهان تا تهران به دو ساعت کاهش پیدا می‌کند. همچنین این پروژه شهرهای اصفهان و قم را به فرودگاه بین‌المللی امام خمینی، مهم‌ترین فرودگاه بین‌المللی ایران، متصل می‌کند و ترابری هوایی بین‌المللی را برای مسافران قم و اصفهان آسان‌تر می‌کند. شکل ۱–الف مسیر پروژه و شهرهای مجاور خط پروژه را نشان می‌دهد. این پروژه طولانی و مهم علاوه بر زیرسازی مسیر اصلی و ابنیه فراوان مثل زیرگذرها و کانال‌ها، شامل ۵ تونل بلند و ۳۶ پل بزرگ نیز هست که در مراحل مختلف اجرا قرار دارند.

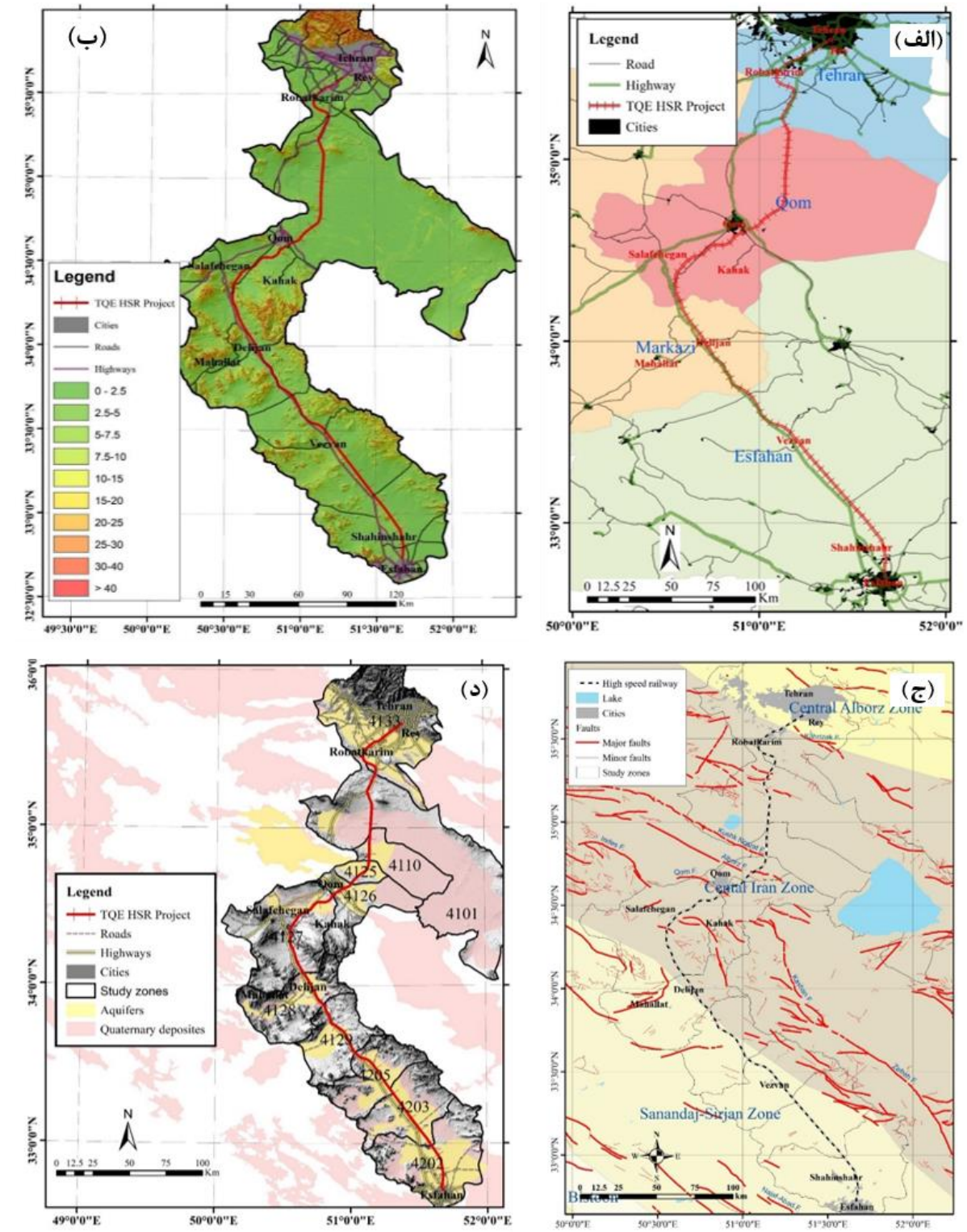
از دیدگاه زمین‌ریخت‌شناسی، همان‌طور که در شکل ۱–ب نیز مشاهده می‌شود، بیشتر طول مسیر این پروژه از میان دشت‌های مسطح با شیب کم عبور می‌کند و فقط بخش‌های میانی این پروژه از نواحی کوهستانی می‌گذرد. این پروژه، طبق تقسیم‌بندی حوضه‌های آبریز ایران، در حوضه فلات مرکزی واقع شده و از دو زیرحوضه درجه دو، یعنی گاوخونی و دریاچه نمک، عبور می‌کند. علاوه بر این، مسیر پروژه از ۱۱ محدوده مطالعاتی آب‌های زیرزمینی عبور می‌کند. موقعیت این محدوده‌های مطالعاتی نیز در شکل ۱–د نشان داده شده است.

زمین‌شناسی مسیر پروژه

از دیدگاه زمین‌شناسی و بر اساس تقسیمات ساختاری ایران، پروژه موردمطالعه که از تهران آغاز و در اصفهان به پایان می‌رسد، عمدتاً از دو پهنه ایران مرکزی و سنندج–سیرجان عبور می‌کند (شکل ۱–ج). همچنین مطابق شکل ۱–د مشخص است که بیشتر مسیر پروژه از میان نهشته‌های کواترنری با ضخامت‌های مختلف عبور می‌کند. نهشته‌های اصلی کواترنری در امتداد پروژه عبارت‌اند از:

- دشت‌های آبرفتی در جنوب شهر تهران؛
- پهنه‌های رسی و نمکی در شمال شهر قم؛
- دشت‌های آبرفتی در شرق و جنوب شهر قم؛
- مخروط‌افکنه‌ها و تراس‌های آبرفتی بین شهرهای دلیجان و مورچه‌خورت؛
- آبرفت‌ها و تراس‌های جدید و قدیمی در شمال شهر اصفهان

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



شکل ۱. الف) نمایش مسیر پروژه راه‌آهن سریع‌السیر تهران-قم-اصفهان و عبور از چهار استان تهران، قم، مرکزی و اصفهان؛ ب) نقشه شیب مسیر که بیانگر شیب کم در بیشتر طول مسیر است؛ ج) موقعیت پروژه نسبت به زون‌های زمین‌شناسی ایران و د) پراکندگی رسوبات کواترنر و آبخوان‌های آبرفتی در مسیر پروژه همراه با نمایش ۱۱ محدوده مطالعاتی آب زیرزمینی در مسیر پروژه

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

علاوه بر نهشته‌های کواترنری که در شیب‌های ملایم گسترش یافته‌اند، ارتفاعات و تپه‌های اطراف مسیر پروژه از واحدهای سنگی با سنگ‌شناسی و سن‌های مختلف تشکیل شده‌اند. طبق بررسی‌های انجام‌شده، قدیمی‌ترین واحدها مربوط به پرمین هستند که پراکندگی زیادی در منطقه ندارند. سنگ‌های مربوط به دوران مزوزوئیک (تریاس تا کرتاسه) در مناطق جنوبی که زون‌های مطالعاتی در زون سنندج-سیرجان قرار گرفته‌اند، گسترش بیشتری دارند. سنگ‌های رسوبی ضعیف تا نسبتاً مستحکم از جنس شیل، ماسه‌سنگ، کنگلومرا و سنگ آهک (متعلق به سازندهایی مانند شمشک و نایبند) و سنگ‌های آتش‌فشانی پراکنده، سنگ‌های اصلی محدوده‌های مطالعاتی ۴۲۰۲، ۴۲۰۳، ۴۲۰۵، ۴۱۲۹ و ۴۱۲۸ را تشکیل می‌دهند. به سمت شمال، سازندهای جوان‌تر مربوط به دوران سنوزوئیک گسترش بیشتری دارند. سازندهای کرج، قرمز پایینی، قم، قرمز بالایی، کهریزک و هزاردره ازجمله سازندهای سنوزوئیک هستند که در زون ایران مرکزی گسترش بیشتری دارند. در میان این سازندها، سازند قم (با سنگ‌هایی از جنس مارن، سنگ آهک و ماسه‌سنگ‌های ضعیف)، بیشترین گسترش را در منطقه دارد و رخنمون‌های آن تقریباً در تمام محدوده‌های مطالعاتی قابل‌مشاهده است. سازندهای نئوژن کهریزک و هزاردره که عمدتاً کنگلومرا و ماسه‌سنگ هستند، در محدوده‌های ۴۱۲۶، ۴۱۲۵، ۴۱۱۰، ۴۱۰۱ و ۴۱۳۳ از شمال قم تا تهران گسترش نسبتاً وسیعی دارند. رسوبات قرمز سازند قرمز بالایی که از مارن‌های قرمز با میان‌لایه‌هایی از ماسه‌سنگ و سیلتستون ضعیف تشکیل شده‌اند، در زون ایران مرکزی و در محدوده‌های مطالعاتی ۴۱۲۷، ۴۱۲۶، ۴۱۲۵، ۴۱۱۰، ۴۱۰۱ و ۴۱۳۳ گسترده هستند. در این محدوده‌ها، رخنمون‌های زیادی از سنگ‌های نفوذی گرانیت و گرانودیوریت نیز مشاهده می‌شود.

بررسی تاریخچه فرونشست در مسیر پروژه

اندازه‌گیری نرخ فرونشست با تکنیک تداخل‌سنجی راداری

بررسی تاریخچه فرونشست، یکی از نخستین و مهم‌ترین گام‌های مطالعه پدیده فرونشست در مسیر پروژه‌های طویل است. با انجام این مطالعه مناطق پرریسک در مسیر پروژه مشخص شده و درنتیجه می‌توان بررسی‌های دقیق‌تر را به این مناطق معطوف نمود. برای انجام این بررسی‌ها می‌توان از روش‌های مختلف پایش تراز سطح زمین مثل برداشت‌های دوره‌ای نقشه‌برداری زمینی و سامانه مکان‌یابی جهانی (GPS)[1] و روش تداخل‌سنجی راداری[2] یا InSAR استفاده کرد. باتوجه‌به وقت‌گیر بودن و هزینه بالای روش‌های نقشه‌برداری زمینی و GPS، استفاده از روش InSAR که یکی از جدیدترین فناوری‌ها در زمینه پایش و اندازه‌گیری جابه‌جایی‌های سطح زمین است، بسیار پرکاربرد و محبوب شده است. ازاین‌رو، با برخورداری از پوشش وسیع، مکرر و پیوسته و همچنین وضوح زمانی و مکانی بالا، به یکی از فناوری‌های مهم و قابل‌توجه در پایش جابه‌جایی تبدیل شده است. علاوه بر این، یکی از مزایای این فناوری در مقایسه با روش‌های کلاسیک نقشه‌برداری، وجود تصاویر راداری از تاریخ ارسال ماهواره‌ها به مدارها، در پایگاه‌های داده راداری است. با دسترسی به تصاویر فوق، می‌توان تاریخچه جابه‌جایی‌های منطقه موردمطالعه را رصد کرد و سطح زمین یا حتی یک سازه مشخص را به‌صورت دینامیکی تحلیل و ارزیابی کرد.

با توسعه الگوریتم‌هایی که از سری زمانی تصاویر رادار استفاده می‌کنند، این فناوری کارایی بالایی در پایش و اندازه‌گیری دقیق جابه‌جایی‌ها، در مقیاس‌های بزرگ (مانند جابه‌جایی‌های ناشی از حرکات تکتونیکی و زلزله)، در مقیاس‌های متوسط (مانند جابه‌جایی‌های ناشی از فرونشست زمین ناشی از استخراج آب‌های زیرزمینی) و همچنین در مقیاس‌های بسیار کوچک (مانند جابه‌جایی‌های محلی روی سازه‌های عمرانی) دارد.

تکنیک‌های مبتنی بر SAR از اختلاف فاز سیگنال‌های رادار بین تعدادی (حداقل دو) از داده‌های ماهواره‌ای در یک منطقه استفاده می‌کنند. اختلاف فاز کاملاً مربوط به جابه‌جایی سطح زمین است که بین داده‌های دریافتی پس از حذف سهم توپوگرافی سطح و کاهش اختلالات جوی رخ می‌دهد. روش‌های مبتنی بر SAR امکان تشخیص و اندازه‌گیری حرکات زمین در مقیاس زیر سانتی‌متر را با جزئیات مکانی بالا و وضوح اندازه‌گیری بالا فراهم می‌کنند.

1. Global Positioning System
2. Interferometry Synthetic Aperture Radar (InSAR)

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

اولین قدم برای استفاده از روش تداخل‌سنجی راداری، انتخاب تصاویر مناسب و دانلود فایل‌های موردنیاز از ارائه‌دهندگان تصویر است. داده‌های راداری مختلف توسط ماهواره‌های مختلف ثبت و توسط سازمان‌های فضایی کشورهای مختلف ارائه می‌شوند. چندین ماهواره SAR از سال ۱۹۹۱ تا به امروز در حال فعالیت بوده‌اند (ALOS; JERS 1; ENVISAT; ERS 1/2 ;Cosmo SkyMed; TerraSAR X). ماهواره سنتینل ۱[3] نیز از اواسط سال ۲۰۱۴ در حال فعالیت بوده است. بنابراین آرشیو بزرگی از تصاویر راداری در بسیاری از مناطق دنیا وجود دارد.

در این مطالعه، از داده‌های ماهواره‌ای راداری سنتینل ۱ به دلیل کیفیت خوب و دسترسی آسان استفاده شده است. سنتینل ۱ یک مأموریت راداری تصویربرداری است که تصاویر مداوم در تمام شرایط آب و هوایی، روز و شب را در باند C ارائه می‌دهد. تصاویر سنتیل ۱ قابلیت اطمینان بالا، زمان بازدید مجدد بهبودیافته، پوشش جغرافیایی و انتشار سریع داده‌ها را برای پشتیبانی از برنامه‌های عملیاتی در حوزه‌های اولویت‌دار نظارت دریایی، نظارت زمینی و خدمات اضطراری فراهم می‌کند. حالت عملیاتی اصلی دارای یک نوار پهن (۲۵۰ کیلومتر) با وضوح هندسی بالا و وضوح رادیومتری است که برای اکثر کاربردها مناسب است. برخی پلتفرم‌ها وجود دارند که می‌توان داده‌های سنتینل ۱ را از آن‌ها دانلود کرد. وب‌سایت کوپرنیکوس[4] و خدمات فضایی آلاسکا[5] (توسعه‌یافته توسط دانشگاه آلاسکا) دو مورد از معروف‌ترین آن‌ها هستند. هر دو وب‌سایت دسترسی کامل و رایگان به داده‌های سنتینل ۱ را فراهم می‌کنند.

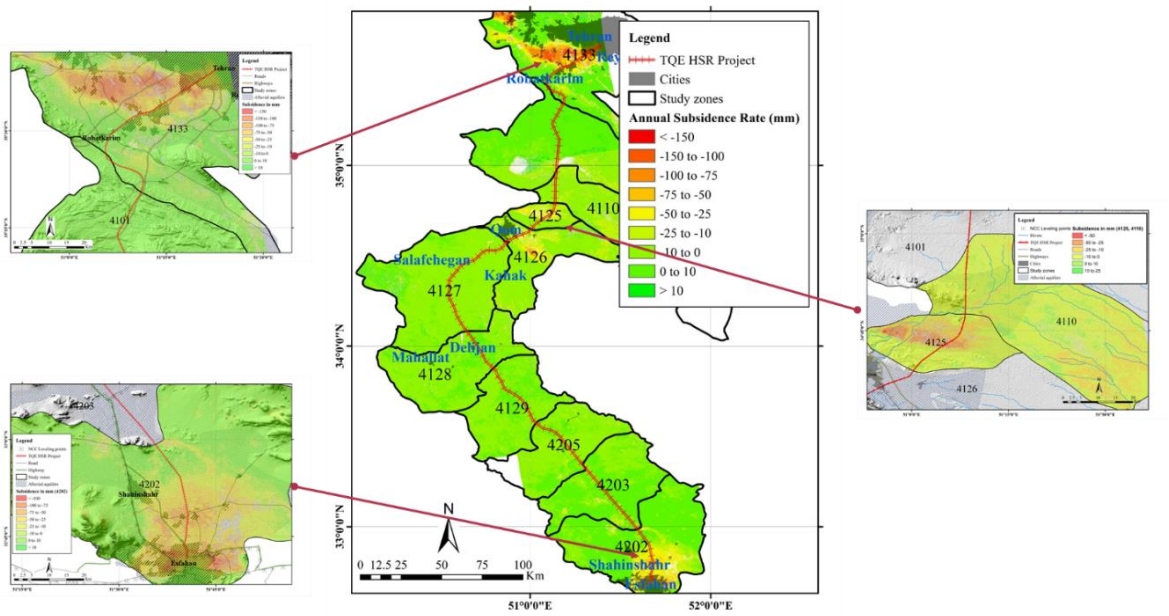
در این مطالعه، بعد از دانلود تصاویر راداری از پلتفرم کوپرنیکوس برای فاصله‌های زمانی ۲۴ روزه و تحلیل آن‌ها در نرم‌افزارهای مرتبط، نقشه نرخ تغییر شکل حاصل از بررسی ۹۲ تداخل‌نگار، در بازه زمانی بین ۱۲ می ۲۰۱۷ تا ۵ می ۲۰۲۳، برای کل مسیر راه‌آهن تهیه شد. همچنین پروفیل نرخ فرونشست در مسیر پروژه بر اساس نتایج این تحلیل‌ها ترسیم شد. در شکل‌های ۲ و ۳ به ترتیب نقشه و پروفیل نرخ فرونشست نشان داده شده است. در جدول ۱ نیز حداکثر نرخ‌های سالانه فرونشست در هر محدوده درج شده است.

همان‌طور که در این شکل‌ها مشاهده می‌شود، در کل مسیر، آبخوان‌های آبرفتی تهران و اصفهان، واقع در دو محدوده مطالعاتی تهران–کرج (۴۱۳۳) و اصفهان–برخوار (۴۲۰۲) در گذشته بیشترین نرخ جابه‌جایی قائم یا فرونشست سالانه را داشته‌اند. در آبخوان‌های شرق و شمال شرق شهر قم (محدوده‌های مطالعاتی ۴۱۲۵ و ۴۱۲۶) نیز پهنه‌های فرونشستی شناسایی شده‌اند، اما به دلیل عبور مسیر پروژه از حاشیه این پهنه‌ها در این مطالعه موردبررسی قرار نگرفته‌اند.

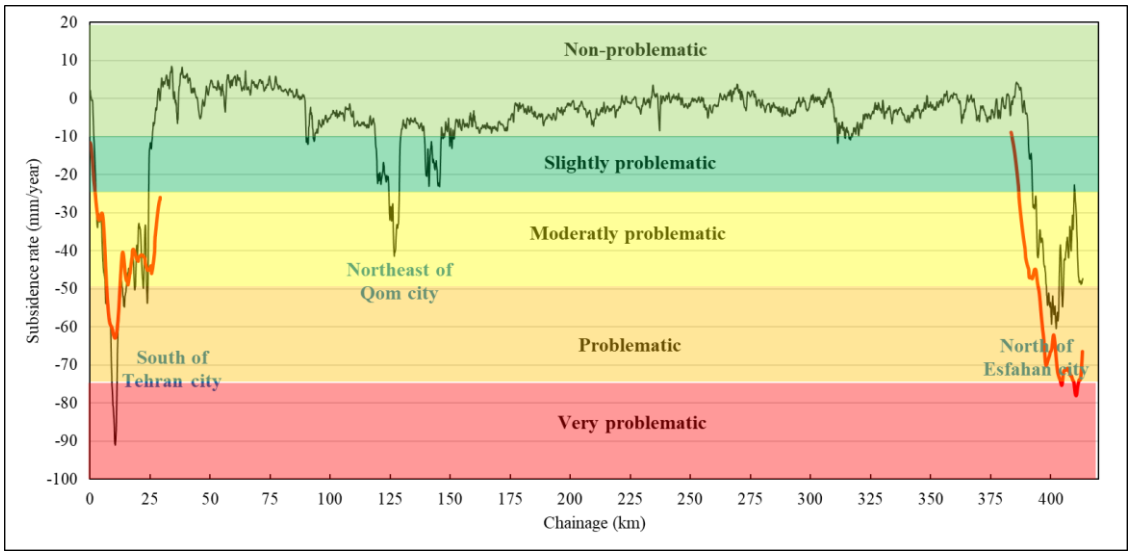
در پروفیل فرونشست مسیر، نرخ سالانه فرونشست زمین در مسیر پروژه به ۵ رده از «غیر مشکل‌ساز[6]» تا «بسیار مشکل‌ساز[7]» تقسیم شده است. همان‌طور که مشاهده می‌شود، بیشتر طول مسیر، به‌جز سه منطقه ذکرشده در بالا، در دو رده «غیر مشکل‌ساز» و «کمی مشکل‌ساز[8]» قرار می‌گیرد. مطابق با این پروفیل، اغلب طول مسیر از آبرفت‌هایی با پتانسیل فرونشست کم عبور می‌کند، جایی که فرونشست سالانه کمتر از ۱۰ میلی‌متر است. لازم به توضیح است که هیچ رده‌بندی پذیرفته‌شده‌ای برای خطر فرونشست در سطح جهانی وجود ندارد و رده‌بندی مورداستفاده در این پژوهش بر اساس تجارب حاصل از مطالعه پروژه‌های مختلف پیشنهاد شده است.

3. SENTINEL-1
4. Copernicus
5. Alaska Space Facility
6. Non-problematic
7. Very problematic
8. Slightly problematic

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



شکل ۲. نتایج اندازه‌گیری نرخ سالانه فرونشست در مسیر پروژه با استفاده از تکنیک تداخل‌سنجی راداری (CREG 2025)



شکل ۳. پروفیل نرخ فرونشست در مسیر پروژه حاصل از روش InSAR (منحنی مشکی) و مقایسه آن با نتایج روش تحلیلی (منحنی قرمز) (CREG 2025)

شواهد فرونشست در مسیر پروژه

در این مطالعه، علاوه بر بررسی تاریخچه فرونشست توسط روش InSAR، شواهد محلی طی بازدیدهای میدانی نیز موردبررسی قرار گرفته‌اند. در این بازدیدها سعی شده است شواهد ذیل با پرس‌وجو از مردم محلی و یا جست‌وجوی مستقیم شناسایی و مستند گردند:

- ترک‌های ایجادشده در ساختمان‌ها؛
- ترک‌های ایجادشده در مسیر راه‌ها؛
- کج‌شدگی یا تخریب یا بیرون‌زدگی پایه‌های دکل‌های خطوط انتقال نیرو؛
- شکاف‌های زمین در دشت‌های آبرفتی؛
- رشد چاه، لوله‌زایی یا بیرون‌زدگی پوشش چاه‌ها.

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

جدول ۱. حداکثر نرخ سالانه فرونشست در محدوده‌های مطالعاتی یازده‌گانه و در مسیر پروژه

ردیف	محدوده مطالعاتی		حداکثر نرخ فرونشست (mm/y)	
			محدوده	مسیر
۱	اصفهان-برخوار	۴۲۰۲	-۱۱۱/۱۰۳	-۶۲/۱۲۰
۲	مورچه‌خورت	۴۲۰۳	-۲۱/۵۸۲	-۶/۵۲۸
۳	میمه	۴۲۰۵	-۱۳/۵۱۲	-۱۱/۶۷۳
۴	موته	۴۱۲۹	-۵۰/۹۸۳	-۵/۰۲۷
۵	محلات-دلیجان	۴۱۲۸	-۱۸/۷۴۷	-۸/۳۲۹
۶	نیزار-سلفچگان	۴۱۲۷	-۱۱/۶۴۲	-۹/۰۳
۷	قم-کهک	۴۱۲۶	-۹۴/۲۱۱	-۲۳/۰۶۳
۸	شریف‌آباد	۴۱۲۵	-۸۳/۶۵۰	-۴۱/۳۹۳
۹	مسیله	۴۱۱۰	-۲۰/۹۷۹	-۷/۵۹۳
۱۰	دریاچه نمک	۴۱۰۱	-۱۶/۵۵۴	-۱۱/۹۳۵
۱۱	تهران-کرج	۴۱۳۳	-۱۱۶/۱۲۴	-۹۱/۰۷۴

در چند مرحله بازدید از مسیر پروژه مشخص گردید که درمجموع شواهد محلی از وقوع فرونشست در مسیر پروژه چندان زیاد نیست و فقط منحصر به برخی نقاط محدود می‌شود (شکل ۴) که دلایل آن به شرح ذیل است:

- اگرچه در بسیاری از موارد میزان نشست تجمعی زمین زیاد بوده است، اما به دلیل یکنواختی نسبی نشست در مقیاس سازه‌های کوچک، ساختمان‌ها دچار آسیب جدی نشده‌اند.
- به دلیل عمق کمتر اغلب چاه‌های بهره‌برداری از عمق نهایی فرونشست دشت، پدیده لوله‌زایی به‌ندرت در چاه‌های حفرشده در دشت‌ها قابل‌مشاهده است.
- به دلیل فعالیت‌های کشاورزی در منطقه، سطح زمین به‌سرعت دچار تغییر می‌شود و اثر شکاف‌های کوچک احتمالی محو می‌گردد.
- در مواردی هم وقوع شکاف زمین در مناطقی (مثل مناطق نظامی و یا اطراف فرودگاه‌ها) گزارش شده است که قابل‌دسترس نبوده و بازدید از آن‌ها امکان‌پذیر نبوده است.

باتوجه‌به موارد فوق‌الذکر، با بازدید از کل مسیر پروژه، نقاط ذیل که تا حدودی شواهد واضح فرونشست زمین را نشان می‌دهند و در نزدیکی مسیر پروژه قرار دارند، با دقت بیشتری مورد بازدید قرار گرفتند:

- شمال میدان حج در شهر اصفهان (ساختمان‌های آسیب‌دیده براثر ایجاد ترک‌های با بازشدگی زیاد) (شکل ۴ الف و ب)؛
- شمال فرودگاه اصفهان (ترک‌های ایجادشده در سطح زمین)
- دشت قنوات در شرق قم (آسیب‌های جزئی به برخی چاه‌های بهره‌برداری و ساختمان‌های روستایی) (شکل ۴ ج و د)؛
- منطقه احمدآباد مستوفی در استان تهران (ساختمان‌های آسیب‌دیده براثر ایجاد ترک‌های با بازشدگی نسبتاً زیاد).

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



شکل ٤. برخی از شواهد فرونشست در مسیر پروژه شامل ترک خوردن ساختمان‌ها و پایین رفتن زمین اطراف چاه‌های عمیق

آب زیرزمینی

همان‌طور که اشاره شد، عامل اصلی فرونشست زمین در آبخوان‌های آبرفتی ایران، کاهش تراز آب زیرزمینی براثر برداشت بی‌رویه است. بنابراین برای بررسی دقیق پدیده فرونشست لازم است ضمن شناسایی منابع آب مورداستفاده در هر محدوده مطالعاتی، وضعیت استخراج آب زیرزمینی و نحوه واکنش آبخوان به استخراج آب زیرزمینی در آن محدوده به‌دقت موردمطالعه قرار گیرد.

منابع آب

باتوجه‌به شرایط اقلیمی در ۱۱ محدوده مطالعاتی موجود در مسیر پروژه که اقلیمی سرد و خشک محسوب می‌شود و نبود منابع پایدار آب‌های سطحی (رودخانه‌های دائمی و فصلی) و همچنین باتوجه‌به گسترش شهرها و سکونتگاه‌ها و توسعه فعالیت‌های کشاورزی و صنعتی در سال‌های گذشته، به‌ناچار بارگذاری زیادی بر روی آب‌های زیرزمینی در همه ۱۱ محدوده صورت گرفته است.

چاه‌های بهره‌برداری، چشمه‌ها و قنوات سه منبع تأمین آب زیرزمینی در ۱۱ محدوده مطالعاتی مسیر پروژه محسوب می‌شوند. از میان این منابع سهم چاه‌های بهره‌برداری بسیار بیشتر است و سالانه حجم عظیمی آب که خیلی بیشتر از ظرفیت تغذیه سفره است، ازطریق آن‌ها استخراج و صرف کشاورزی، شرب و صنعت می‌گردد. بیشترین استفاده از منابع آب زیرزمینی برای مصارف کشاورزی است و عمدتاً ازطریق چاه‌های بهره‌برداری که بسیاری از آن‌ها غیرمجاز هستند، تأمین می‌شود. در جدول ۲ تعداد چاه‌ها، چشمه‌ها و قنات‌های هر محدوده ارائه شده است.

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

جدول ۲. تعداد چاه‌ها، چشمه‌ها و قنات‌های محدوده‌های مطالعاتی یازده‌گانه مسیر پروژه

ردیف	محدوده مطالعاتی		مساحت (km^2)	تعداد چاه‌های بهره‌برداری	تعداد چشمه‌ها	تعداد قنات‌ها	کل حجم استخراج آب از آبخوان (میلیون مترمکعب)
۱	اصفهان–برخوار	۴۲۰۲	۳۰۷۸	۵۵۱۳	۵	۹	۴۴۹
۲	مورچه‌خورت	۴۲۰۳	۲۱۹۵	۴۷۶	۳۷	۶۷	۸۲
۳	میمه	۴۲۰۵	۱۹۸۱	۱۷۴	۱۴۹	۸۴	۳۰
۴	موته	۴۱۲۹	۱۹۷۸	۱۲۱	۱۰۴	۹۸	۱۴
۵	محلات–دلیجان	۴۱۲۸	۲۳۰۰	۶۸۵	۱۲۸	۲۳۱	۳۰
۶	نیزار–سلفچگان	۴۱۲۷	۳۶۷۰	۲۱۰۹	۴۷۵	۳۲۵	۴۲
۷	قم–کهک	۴۱۲۶	۱۵۹۸	۱۹۰۷	۲۶۹	۲۰۳	۲۹۲
۸	شریف‌آباد	۴۱۲۵	۶۰۵	۲۰۱	۰	۱	۱۳۵
۹	مسیله	۴۱۱۰	۱۴۶۴	۷۸	۰	۰	۱۹
۱۰	دریاچه نمک	۴۱۰۱	۸۰۰۰	۱۳۷	۵۶	۲۰	۹
۱۱	تهران–کرج	۴۱۳۳	۵۱۳۵	۳۳۰۲۳	۱۳۳۶	۴۲۹	۱۶۵۰

علاوه بر چاه‌های بهره‌برداری در تمامی محدوده‌های مطالعاتی تعداد قابل‌توجهی چشمه و قنات نیز وجود دارند که در تخلیه آبخوان‌های منطقه نقش دارند. درمجموع نقش چشمه‌ها و قنوات در تخلیه آبخوان‌ها در مقایسه با چاه‌های بهره‌برداری عمیق و نیمه‌عمیق بسیار اندک و قابل‌چشم‌پوشی است. بسیاری از چشمه‌ها و قنات‌ها به دلیل افت سطح آب زیرزمینی با کاهش آبدهی قابل‌توجهی روبه‌رو شده‌اند و برخی حتی کاملاً خشک شده‌اند و دیگر قابل‌استفاده برای مصارف کشاورزی و شرب نیستند.

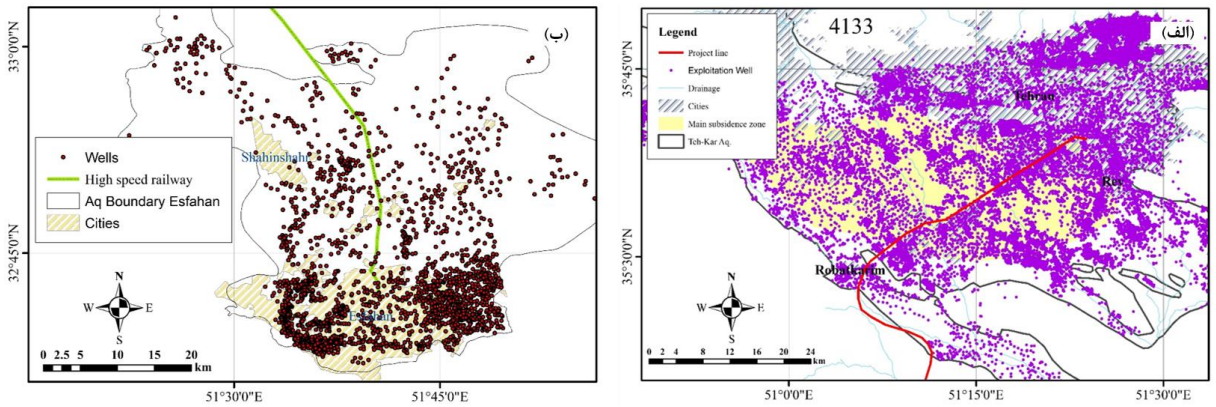
همان‌طور که مشاهده می‌شود، در میان محدوده‌های مطالعاتی، دو محدوده مطالعاتی ۴۱۳۳ (تهران–کرج) و ۴۲۰۲ (اصفهان–برخوار) ازنظر تعداد چاه‌های بهره‌برداری حفرشده و میزان آب برداشتی به ترتیب اول و دوم هستند و حجم تخلیه سالانه در آن‌ها با سایر محدوده‌ها تفاوت بسیار زیادی دارد.

نوسانات سطح آب زیرزمینی

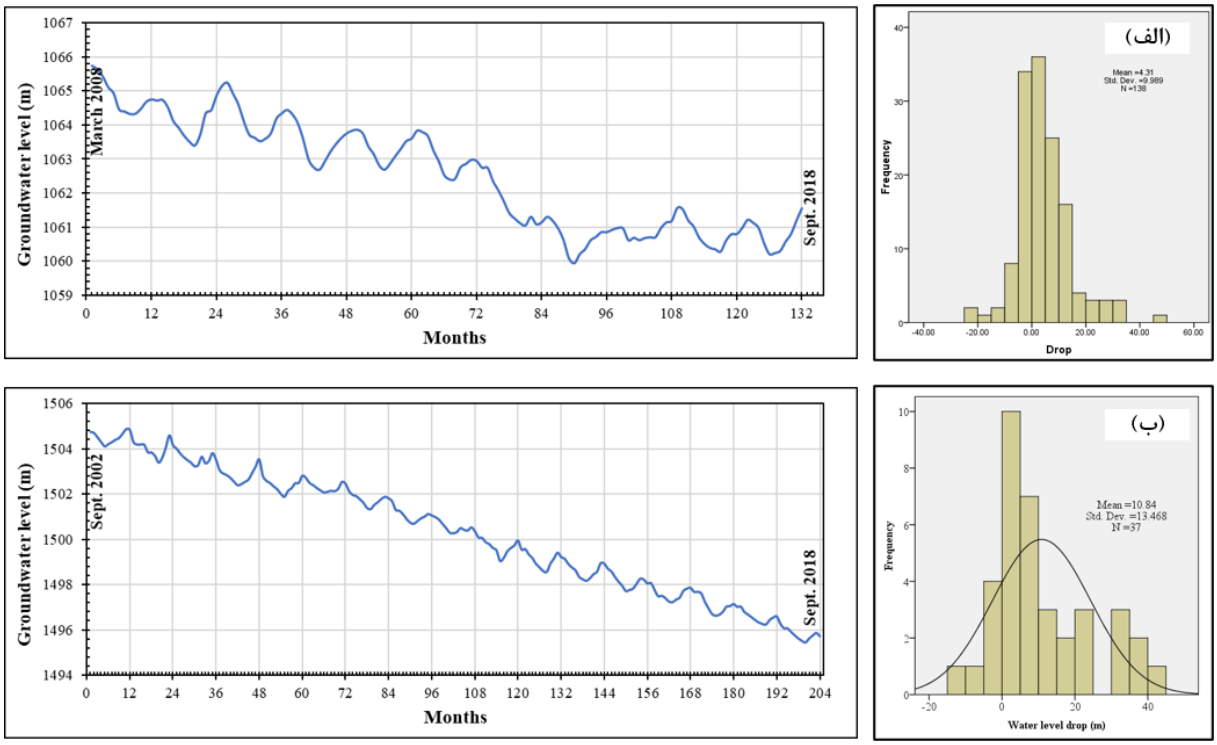
در هریک از محدوده‌های مطالعاتی یازده‌گانه مسیر پروژه تعداد متفاوتی چاه مشاهده‌ای یا پیزومتر نیز برای اندازه‌گیری‌های دوره‌ای نوسانات سطح آب زیرزمینی نصب شده است. در این مطالعه، با استفاده از اطلاعات ثبت‌شده در این پیزومترها و ترسیم هیدروگراف برای هر یک از آن‌ها تغییرات سطح آب در محل نصب پیزومترها، موردبررسی قرار گرفته است. همچنین هیدروگراف واحد دشت برای تمامی ۱۱ زون مطالعاتی ترسیم شده است. بررسی این هیدروگراف‌ها نشان می‌دهد که در تمامی محدوده‌های مطالعاتی سطح آب زیرزمینی، صرف‌نظر از نوسانات فصلی، در بلندمدت روند کاهشی داشته است. در تعداد معدودی از محدوده‌ها در بخش کوچکی از آبخوان به‌صورت موضعی بالا آمدن سطح آب مشاهده می‌شود که دلیل آن می‌تواند فعالیت‌هایی مانند تغذیه مصنوعی یا تغییر در الگوی مصرف آب در آن بخش از دشت باشد.

مقایسه هیدروگراف‌های آبخوان‌های مختلف در مسیر پروژه با نرخ فرونشست سالانه، نشان می‌دهد که ارتباط نزدیکی بین افت تراز آب آبخوان‌ها با نرخ فرونشست وجود دارد. به‌ویژه در دو آبخوان تهران و اصفهان که تعداد چاه‌های بهره‌برداری (جدول ۱ و شکل ۵) و حجم برداشت سالانه بسیار زیاد است کاهش قابل‌توجه سطح آب‌های زیرزمینی و نرخ فرونشست بالا ثبت شده است. در شکل‌های ۵ و ۶ پراکنش چاه‌های بهره‌برداری، هیستوگرام افت سطح آب چاه‌ها و هیدروگراف‌های واحد برای دو آبخوان تهران و اصفهان نشان داده شده است.

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



شکل ۵. پراکنش چاه‌های بهره‌برداری در دو آبخوان تهران (الف) و اصفهان (ب)



شکل ٦. هیستوگرام افت سطح آب چاه‌ها و هیدروگراف واحد در دو محدوده مطالعاتی: الف) تهران-کرج و ب) اصفهان-برخوار

محاسبه فرونشست با استفاده از روش تحلیلی

در این مطالعه در ابتدا تلاش شد تا با استفاده از اطلاعات موجود و با بهره‌گیری از قابلیت‌های نرم‌افزار GMS، جریان آب زیرزمینی و فرونشست زمین در دشت‌های تهران و اصفهان مدل‌سازی شود. متأسفانه علی‌رغم تلاش‌های فراوان و صرف زمان زیاد، به دلیل وسعت زیاد سفره‌های آب زیرزمینی و عدم وجود اطلاعات کافی، نتایج مدل‌سازی جریان آب زیرزمینی و فرونشست زمین با رفتار واقعی سفره‌های آب زیرزمینی در سال‌های گذشته مطابقت کافی نداشت و نتایج مناسبی حاصل نشد.

باتوجه‌به عدم دقت و صحت نتایج مدل‌سازی، برای پیش‌بینی نرخ فرونشست در مسیر پروژه، تغییر شکل سطح زمین (ناشی از افت سطح آب زیرزمینی) در برخی نقاط انتخابی که داده‌های کافی در آن‌ها وجود داشت، با استفاده از روش تحلیلی محاسبه شد. این نقاط انتخابی همان چاه‌های اکتشافی هستند که در آن‌ها علاوه بر سطح آب، مشخصات ژئوتکنیکی مصالح حفاری‌شده نیز ثبت و مستندسازی شده و داده‌های موجود از کیفیت مناسبی برخوردار هستند. فهرستی از برخی از این نقاط در جدول ۳ ارائه شده است. در شکل ۷، موقعیت این نقاط در امتداد بخشی از مسیر پروژه که فرونشست در آن بحرانی است (مناطق اصفهان و

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

تهران) نشان داده شده است.

روش محاسبه فرونشست برای شرایط مختلف (آبخوان‌های آزاد و آبخوان‌های محصور) توسط گامبولاتی و تیتینی[9] (۲۰۲۶) شرح داده شده است. نتایج محاسبه میانگین فرونشست سالانه برای هر یک از نقاط انتخابی در ده سال آینده در جدول ۳ و شکل ۷ نشان داده شده است. در این مطالعه فرض بر این است که میزان برداشت آب از چاه‌ها در طول ۱۰ سال آینده تغییر نخواهد کرد و افت سطح آب در ۱۰ سال آینده برابر با مقدار فعلی خواهد بود. همان‌طور که مشاهده می‌شود، نتایج این مطالعه تا حد زیادی مشابه نتایج روش InSAR (شکل ۲) است و می‌توان آن را با اطمینان بالایی پذیرفت. در شکل ۲، منحنی قرمزرنگ حاصل از روش تحلیلی است که برای مقایسه در کنار منحنی مشکی (روش InSAR) ترسیم شده است.

جدول ۳. محاسبه فرونشست برای تعدادی از چاه‌های اکتشافی در دو آبخوان تهران و اصفهان

آبخوان	چاه	عمق چاه (m)	عمق آب در چاه (m)	متوسط سالانه افت آب (m)	عمق سنگ بستر (m)	ضخامت کل لایه‌های ریزدانه (m)	ضخامت بخش اشباع لایه‌های ریزدانه (m)	ضخامت اشباع آبخوان (m)	کل فرونشست آبخوان در ۱۰ سال آینده (mm)	نرخ فرونشست آبخوان در ۱۰ سال آینده (mm/y)	نرخ فرونشست آبخوان بر اساس روش InSAR (mm/y)
اصفهان	LW8	۱۵۰	۸۰	۱	۹۰	۶۰	۱۳	۱۳	< ۵۰	−۵	−۲/۶۷
	LW10	۱۶۵	۸۰	۱	۷۰	ناچیز	۰	۰	< ۵۰	−۵	−۹/۵۲
	LB33	۱۰۲	۷۸	۱	۹۰	۷۹	۶	۶	< ۵۰	−۵	−۱/۵۶
	LB24	۲۲۰	۹۱	۰/۳	۲۰۴	۴۶	۴۶	۱۱۳	۵۰۰–۶۰۰	−۵۰	−۳۹/۴۳
	LW87	۱۲۰	۶۵	۰/۵	۷۰	۷۰	۵	۵	۵۰۰–۶۰۰	−۵۰	−۳۷/۷۲
	LW84	۲۶۰	۸۵	۰/۵	۲۵۹	۶۹	۵۰	۱۷۴	۵۰–۱۰۰	−۱۰	−۴۵/۷۴
	LW86	۱۷۰	۹۰	۰/۵	۱۰۸	۱۰۵	۱۵	۱۸	۶۰۰–۷۰۰	−۶۵	−۵۶/۲۵
	LB19	۱۰۰	۶۵	۰/۷	> ۱۰۰	۱۱	۱۱	> ۳۵	۷۰۰–۸۰۰	−۷۵	−۴۹/۰۲
	LW77	۲۵۲	۵۴	۰/۷	> ۲۵۲	۲۵۲	۱۹۸	۱۹۸	۸۰۰–۹۰۰	−۸۵	−۴۵/۹۷
	LW75	۳۵۰	۶۵	۰/۷	> ۳۵۰	۱۵۰	۸۵	۲۸۵	۶۰۰–۷۰۰	−۶۰	−۴۵/۳۵
	LB15	۹۵	۲۸	۰/۷	۶۷	۴۰	۴۰	۴۰			−۴۲/۹۰
	LW85	۱۲۰	۴۳	۰/۶	> ۱۲۰	۵۰	۳۵	۷۷	۸۰۰–۹۰۰	−۸۵	−۳۴/۰۲
	LW78	۶۵	۴۳	۰/۷	> ۶۵	۴۴	۲۲	۲۲			−۴۵/۶۶
	LW76	۱۲۰	۴۳	۰/۷	۱۱۰	۱۰۰	۵۷	۶۷	۸۰۰–۸۵۰	−۸۰	−۵۹/۳۷
تهران	BH1	۷۷	۴۰	۰/۷	> ۱۵۰	> ۱۰۰	> ۵۰	> ۱۰۰	۹۰۰–۱۰۰۰	−۹۰	−۸۹/۸۱
	BH2	۱۰۰	۴۰	۰/۵	> ۱۵۰	> ۱۰۰	> ۵۰	> ۱۰۰	> ۱۰۰۰	−۱۰۰	−۹۹/۰۱
	BH3	۱۰۰	۳۰	۰/۳	> ۱۵۰	> ۱۰۰	> ۵۰	> ۱۰۰	۲۰۰–۳۰۰	−۲۵	−۲۶/۵۱
	BH4	۱۰۰	۸۰	۰/۳	> ۱۵۰	> ۱۰۰	> ۵۰	> ۱۰۰	۲۰۰–۳۰۰	−۲۵	−۳۰/۹۹
	BH5	۱۰۰	۵۰	۰/۷	> ۱۵۰	> ۱۰۰	> ۵۰	> ۱۰۰	> ۱۰۰۰	−۱۱۰	−۱۳۸/۸۵
	BH6	۶۰	> ۶۰	۰/۲	> ۱۵۰	> ۱۰۰	> ۵۰	> ۱۰۰	۱۰۰–۲۰۰	−۱۵	−۶/۳۶
	BH7	۴۲	۴۰	۰/۵	> ۱۵۰	> ۱۰۰	> ۵۰	> ۱۰۰	> ۱۰۰۰	−۱۰۰	−۱۱۱/۸۱

اختلاف نشست در طول پروژه

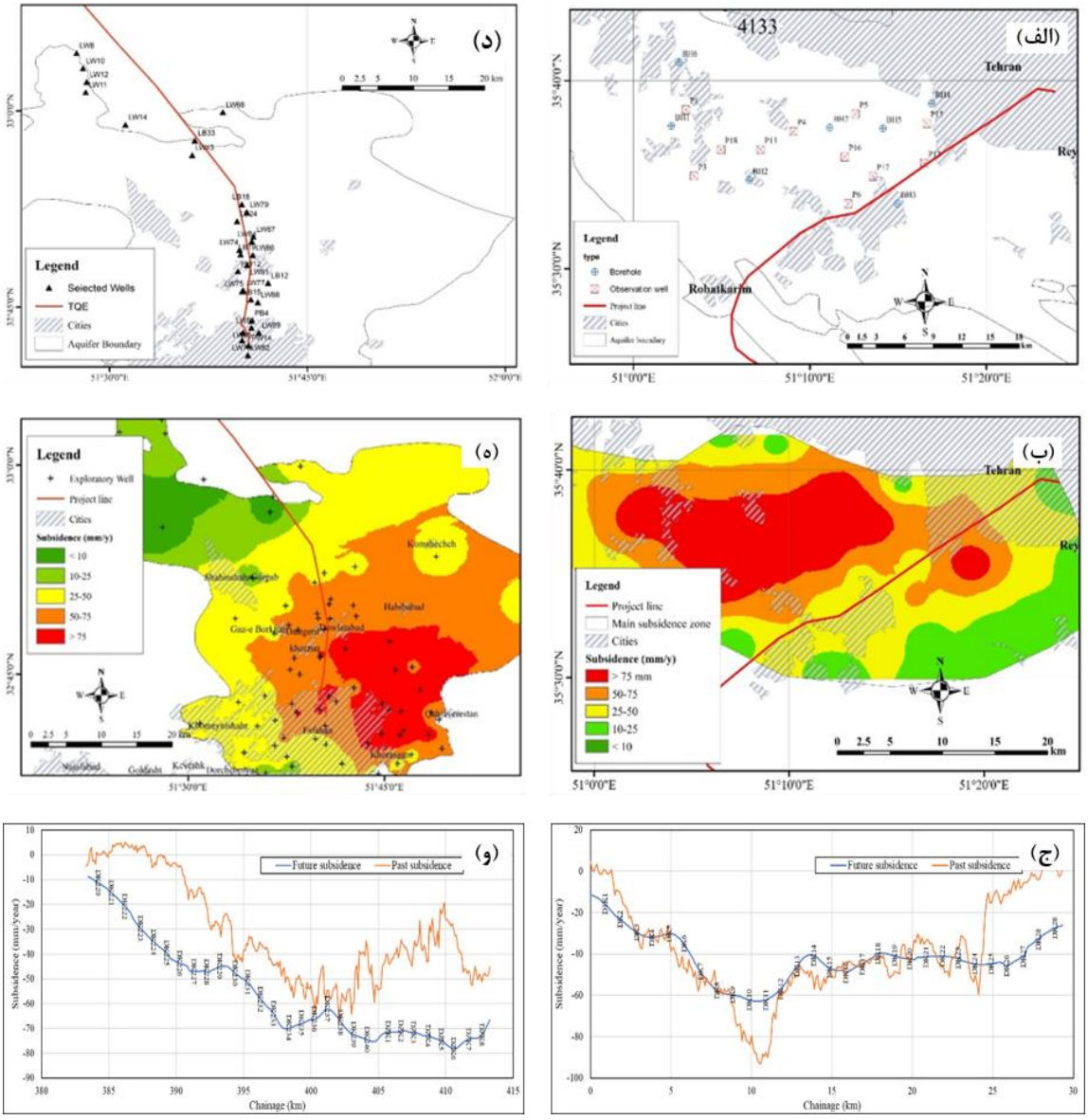
مطابق با استاندارد وزارت حمل‌ونقل و ارتباطات تایوان[10]، اختلاف نشست قابل‌قبول برای بهره‌برداری ایمن از راه‌آهن سریع‌السیر نباید بیشتر از ۰/۰۵درصد (معادل ۵۰ میلی‌متر در هر ۱۰۰ متر) باشد (Lu et al., 2025). در این مطالعه، از این معیار برای کنترل

9. Gambolati and Teatini
10. Ministry of Transportation and Communications, Taiwan, Railway Act: https://law.moj.gov.tw/LawClass/LawAll.aspx?pcode=K0030001

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

مقادیر اختلاف نشست استفاده شده است. به این منظور، اختلاف نشست بین دو نقطه در طول ۱۰۰ متر در فواصل زمانی ۲۵ و ۵۰ سال محاسبه و در شکل ۸ نشان داده شده است.

در این محاسبات فرض شده است که نرخ فرونشست گذشته و حال حاضر، که بر اساس روش InSAR به دست آمده است، ثابت خواهد ماند. همان‌طور که مشاهده می‌شود، در ۲۵ سال آینده، اختلاف فرونشست بین نقاط مجاور از مقدار بحرانی فاصله خواهد داشت، اما پس از گذشت۵۰ سال، اختلافات فرونشست در مناطق خاصی (شمال اصفهان و جنوب تهران) ممکن است به‌تدریج به مقادیر بحرانی نزدیک شود. این یافته‌ها با مطالعات قبلی همسو است.

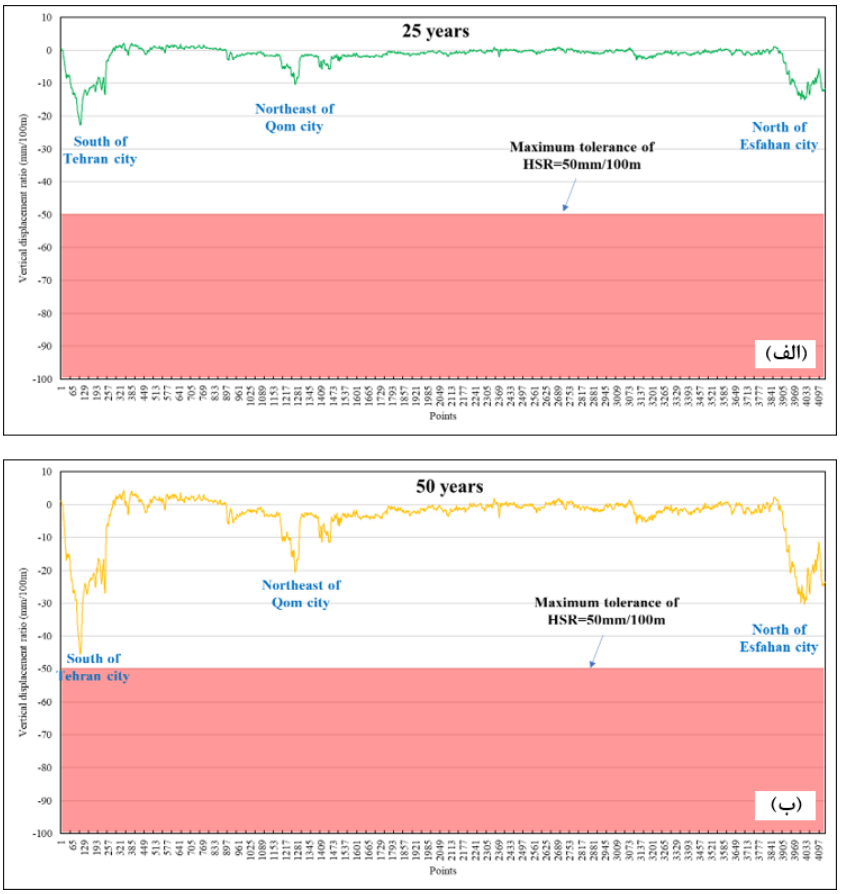


شکل ۷. موقعیت چاه‌های مشاهده‌ای و نقشه و پروفیل نرخ فرونشست در مسیر پروژه در محدوده‌های تهران (الف، ب و ج) و اصفهان (د، ه و و) حاصل از روش تحلیلی

راهکارهای کاهش مخاطره

مهم‌ترین راهکار برای کاهش نرخ فرونشست در یک منطقه، مدیریت و کاهش مصرف آب است. این راهکار باید به‌عنوان راهکار اصلی کنترل فرونشست، در دستور کار مدیران پروژه‌هایی که از مناطق با نرخ فرونشست بالا عبور می‌کنند، قرار گیرد. برای کاهش مصرف آب زیرزمینی و کنترل افت سطح آب، باید اقدامات زیر انجام شود:

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



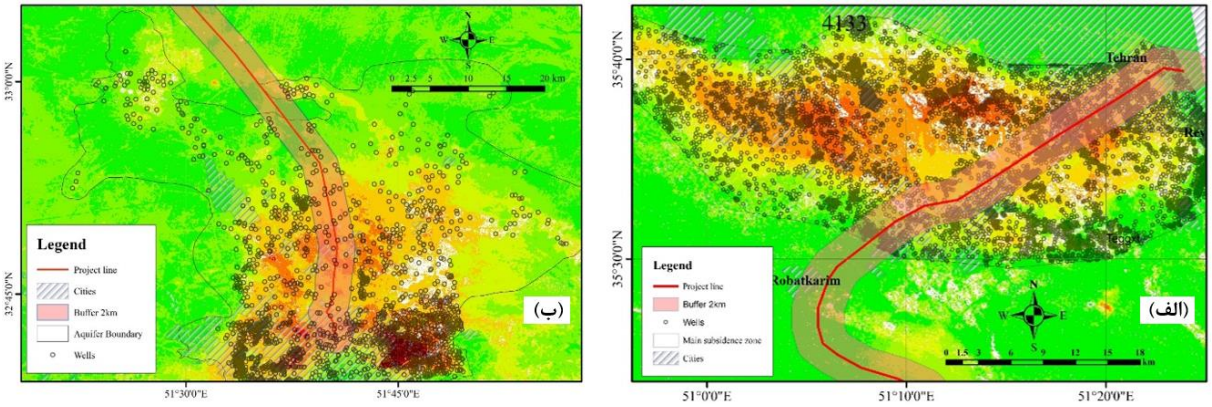
شکل ۸. نتایج محاسبه اختلاف نشست بین دو نقطه با فاصله ۱۰۰ متر در فواصل زمانی: الف) ۲۵ سال و ب) ۵۰ سال برای کل مسیر پروژه

– یکی از مشکلات اصلی در مدیریت مصرف آب برای آبیاری، وجود چاه‌های غیرمجاز است. متأسفانه تعداد این چاه‌ها بسیار زیاد است و اطلاعات دقیقی در مورد آن‌ها وجود ندارد. اکیداً توصیه می‌شود تمام این چاه‌ها در فاصله ۲ کیلومتری از راه‌آهن شناسایی و مسدود شوند.

– همچنین مصرف سالانه چاه‌های مجاز باید حداقل در یک منطقه حائل ۲ کیلومتری کاهش یابد. موقعیت این چاه‌ها در شکل ۹–الف و ب به ترتیب برای آبخوان‌های تهران–کرج و اصفهان–برخوار نشان داده شده است. با تغییر الگوی آبیاری و نوع محصولات کشاورزی و همچنین تغییر یا جابه‌جایی صنایع پرمصرف آب، می‌توان تا حدودی مصرف را کاهش داد و افت سطح آب را کنترل کرد.

– تغذیه مصنوعی آبخوان ازطریق جمع‌آوری و تزریق سیلاب‌های فصلی به آبخوان می‌تواند به جلوگیری از افت سطح آب کمک کند. با احداث حوضچه‌های مخصوص و هدایت سیلاب‌های رودخانه‌های فصلی (که در ماه‌های پرباران مهر تا فروردین رخ می‌دهد) به داخل این حوضچه‌ها، تغذیه مصنوعی آبخوان امکان‌پذیر خواهد بود.

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



شکل ۹. نقشه پراکندگی چاه‌های بهره‌برداری در پهنه‌های فرونشستی و محدوده پیشنهادی برای اعمال محدودیت‌های برداشت آب در دو آبخوان تهران (الف) و اصفهان (ب)

نتیجه‌گیری

خطوط ریلی، به دلیل حساسیت بالا نسبت به جابه‌جایی‌های افقی و قائم، از پرچالش‌ترین سازه‌هایی هستند که از میان پهنه‌های فرونشستی می‌گذرند. بنابراین، شناخت دقیق این پدیده در مسیر این پروژه‌ها و به‌کارگیری راهکارهای مناسب برای کاهش ریسک در مرحله امکان‌سنجی و طراحی آن‌ها بسیار ضروری است. اجتناب از این پهنه‌ها محافظه‌کارانه‌ترین راه‌حل ممکن است، اما در صورت ضرورت عبور از این پهنه‌ها، بعد از شناخت دقیق و مشخص کردن نرخ تغییر شکل‌ها در دوره اجرا و بهره‌برداری، لازم است هم‌زمان هم در جهت کاهش نرخ فرونشست ازطریق حذف عوامل مسبب فرونشست (مدیریت بهره‌برداری از منابع آب) و هم در جهت بالا بردن ضریب ایمنی پروژه (ازطریق طراحی پی مناسب یا بهره‌گیری از سازه‌های جایگزین مانند پل‌های بلند) اقدامات لازم را انجام داد.

پروژه راه‌آهن سریع‌السیر تهران–قم–اصفهان نیز از این موضوع مستثنا نیست و باتوجه‌به عبور از دو پهنه فرونشستی شناخته‌شده و مهم در ایران از این نظر چالش‌هایی را به‌ویژه در دوره بهره‌برداری تجربه خواهد نمود. پیش‌بینی‌ها نشان می‌دهد در بلندمدت، در هر دو بخش شمالی (آبخوان تهران) و جنوبی (آبخوان اصفهان) پروژه، حداکثر نرخ فرونشست ۵۰–۷۵ میلی‌متر در سال تجربه خواهد شد که در طولی درمجموع کمتر از ۲۰ کیلومتر از مسیر پروژه رخ خواهد داد که باتوجه‌به اینکه اختلاف نشست نیز در این بخش‌ها بیشینه است، می‌تواند برای پروژه مشکل‌آفرین باشد. نرخ فرونشست در سایر بخش‌های پهنه‌های فرونشستی تهران و اصفهان (مجموعاً در طولی برابر با ۳۰ کیلومتر) کمتر از ۵۰ میلی‌متر در سال است و باتوجه‌به کاهش اختلاف نشست در این بخش‌ها، چالش‌های حین بهره‌برداری بسیار کمتر خواهد بود. بدیهی است در خارج از پهنه‌های فرونشستی فوق‌الذکر شرایط ازنظر میزان فرونشست در حد مطلوب است و هیچ‌گونه چالشی از این نظر پروژه را تهدید نمی‌کند.

ملاحظات اخلاقی

پیروی از اصول اخلاق پژوهش

نویسندگان اصول اخلاقی را در انجام و انتشار این پژوهش علمی رعایت نموده‌اند و این موضوع مورد تأیید همه آنهاست.

مشارکت نویسندگان

تمامی نویسندگان به‌طور مساوی در مفهوم‌پردازی مقاله و نگارش نسخه اولیه و نسخه‌های بعدی مقاله مشارکت داشته‌اند.

تعارض منافع

بنا بر اظهار نویسندگان این مقاله تعارض منافع ندارد.

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

References

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. doi:10.1016/j.rse.2013.08.038.

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

CREG. (2025). Special Evaluation Report of Land Subsidence Along the T-Q-E High Speed Railway (TQE HSR) Project. Unpublished.

Gabrysch, R.K. (1984). Ground-water withdrawals and land-surface subsidence in the Houston-Galveston region, Texas, 1906-80, U.S. Geological Survey, Report 287, 64P.

Galloway, D. L., Hudnut, K. W., Ingebritsen, S. E., Phillips, S. P., Peltzer, G., Rogez, F., & Rosen, P. A. (1998). Detection of Aquifer System Compaction and Land Subsidence Using Interferometric Synthetic Aperture Radar, Antelope Valley, Mojave Desert, California. *Water Resour. Res*. 34, 2573-2585.

Gambolati, G., & Teatini, P. (2026). *Land Subsidence and its Mitigation*. Guelph, Ontario, Canada, P92.

Hu, R.L. (2006). Urban land subsidence in China, Pro. of 10th IAEG Congress, Nottingham, UK., Paper No.786, 8P.

Ireland, R.L., Poland, J.F., Riley, F.S. (1984). Land subsidence in the San Joaquin Valley, California, as of 1980, Washington, D.C., U.S. Geological Survey professional paper 437-I, 93P.

Khan, A.S., Khan, S.D., Kakar, D.M. (2013). Land subsidence and declining water resources in Quetta Valley, Pakistan. *Environmental Earth Science* 70, 2719-2727. doi:10.1007/s12665-013-2328-9.

Lu C.H., Chuang R.C., Chiang P.C., Yen J.Y., Ching K.E., Chen Y.G. (2025). Detecting infrastructure hazard potential change by SAR techniques on postseismic surface deformation: A case study of 2016 Meinong earthquake in southwestern Taiwan. Engineering Geology, 344 (2025) 107827.

Mousavi, S.M., Shamsai, A., Naggar, M.H.Z., Khamehchian, M. (2001). A Gps-based monitoring program of land subsidence due to groundwater withdrawal in Iran, *Canadian Journal Civil Engineering*, 28(3), 452-464. doi:10.1139/l01-013.

Motagh, M., Djamour, Y., Walter, T.R., Wetzel, H.-U., Zschau, J., Arabi, S. (2007). Land subsidence in Mashhad Valley, northeast Iran: results from InSAR, levelling and GPS. *Geophys. J. Int*. 168 (2), 518–526.

Motagh, M., Shamshiri, R., Haghshenas Haghighi, M., Wetzel, H.-U., Akbari, B., Nahavandchi, H., Roessner, S., Arabi, S. (2017). Quantifying groundwater exploitation induced subsidence in the Rafsanjan plain, southeastern Iran, using InSAR time-series and in situ measurements. *Eng. Geol*. 218, 134–151.

Ng, Hay-Man, Ge, L., Li, X., Zhang, K. (2011). Monitoring ground deformation in Beijing, China, with persistent scatterer SAR interferometry. *Journal of Geodesy* 86, 375-392. doi:10.1007/s00190-011-0525-4.

Osmanoğlu, B., Dixon, T.H., Wdowinski, S., Cabral-Cano, E., Jiang, Y. (2011). Mexico City subsidence observed with persistent scatterer InSAR. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation* 13, 1-12. doi:10.1016/j.jag.2010.05.009.

Phien-wej, N., Giao, P. H., & Nutalaya, P. (2006). Land subsidence in Bangkok, Thailand. *Eng. Geol*. 82 (4), 187-201.

Poland, J.F., Ireland, R.L. (1988). Land subsidence in the Santa Clara Valley, California, as of 1982: Reston, Virginia, U.S. Geological Survey Professional Paper 497-F, 61P.

Rahnama, M.B., Moafi, H. (2009). Investigation of land subsidence due to groundwater withdraw in Rafsanjan plain using GIS software, *Arabian Journal of Geosciences* 2:241-246. doi:10.1007/s12517-009-0034-4.

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* 40-41, 72-79. doi:10.1016/j.pce.2010.01.002.

Yi, L., Zhang, F., Xu, H., Chen, S., Wang, W., Yu, Q. (2011). Land subsidence in Tianjin, China. *Journal of Environmental Earth Science*, 62, 1151-1161. doi:10.1007/s12665-010-0604-5.

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