

A field-based investigation of land subsidence indicators in Alborz province

Ali Ghanbari^{1✉}, Mohammad Nakhaei², Saeid Kalani³, Hamidreza Azizi⁴

1. Department of Civil Engineering, Faculty of Engineering, Kharazmi University, Tehran, Iran. E-mail: Ghanbari@khu.ac.ir

2. Department of Applied Geology, Faculty of Earth Sciences, Kharazmi University, Tehran, Iran.

3. Technical and Executive System, Management and Planning Organization of Alborz Province, Alborz, Iran.

4. Technical and Executive System, Management and Planning Organization of Alborz Province, Alborz, Iran.

Article Info

Article type:

Research Article

Article history:

Received 16 August 2025

Accepted 22 February 2025

Keywords:

Land subsidence, Alborz Province, field-based evidence, Hashtgerd plain, Eshtehard plain, Karaj.

ABSTRACT

Land subsidence is a complex geotechnical hazard with profound impacts on environmental stability, infrastructure resilience, and socio-economic security. This research presents a systematic field-based assessment of subsidence manifestations across the Hashtgerd, Eshtehard, and Karaj plains in Alborz Province, based on extensive surveys conducted in spring and summer of 2025. Diagnostic indicators, including extensional and compressional ground fissures, localized structural deformations, wellhead displacements, large-scale surface cracks, and variations in groundwater levels, were systematically documented. The Hashtgerd plain, particularly the Saeidabad, Sepehr, and Najmabad areas, exhibited the highest density of subsidence evidence, including progressive surface settlement, widespread fissuring, and instability of near-surface strata. In the Eshtehard plain, structural cracking in school buildings, ground ruptures adjacent to transmission towers, and retaining wall failures were frequently observed. Deep surface fissures were also identified in the Fathabad region, which is located between Eshtehard and Buin Zahra. In contrast, despite significant groundwater withdrawal, field surveys in parts of the Karaj plain revealed no pronounced subsidence indicators. The findings highlight a strong spatial correlation between the severity of subsidence and geological heterogeneity and unregulated groundwater exploitation. The absence of smart metering systems in wells also contributed to this issue. This study underscores the urgent need for integrated monitoring frameworks, adaptive management strategies, and the application of advanced remote sensing technologies to mitigate and control the expansion of land subsidence in Alborz Province.

Introduction

Land subsidence is a complex geotechnical hazard with profound impacts on environmental stability, infrastructure resilience and socio-economic security. This study takes a comprehensive approach, integrating field evidence from direct observations and data collection with consultations with local residents, and correlating this with analytical data. The aim is to provide a precise and well-documented picture of the land subsidence situation in Alborz Province. Furthermore, the study emphasizes the critical importance of integrated, interdisciplinary monitoring programmes, highlighting the role of field evidence in validating and refining numerical models for subsidence analysis. Ultimately, this research aims to provide tangible evidence of subsidence occurrence, thereby laying the groundwork for the design of management strategies, early warning systems, and risk mitigation measures in Alborz Province.

Results and Discussion

This research presents a systematic field-based assessment of subsidence manifestations across the Hashtgerd, Eshtehard, and Karaj plains in Alborz Province. This assessment is based on extensive surveys conducted during spring and summer 2025. Diagnostic indicators, including extensional and compressional ground fissures, localised structural deformations, wellhead displacements, large-scale surface cracks and variations in groundwater levels, were systematically documented. The Hashtgerd plain, particularly the Saeidabad, Sepehr and Najmabad areas, exhibited the highest density of subsidence evidence, including progressive surface settlement, widespread fissuring and instability of near-surface strata. In the Eshtehard plain, structural cracking in school buildings, ground ruptures adjacent to transmission towers and retaining wall failures were frequently observed. Deep surface fissures were also identified in the Fathabad region, which is located between Eshtehard and Buin Zahra. In contrast, despite significant groundwater withdrawal, field surveys in parts of the Karaj plain revealed no pronounced subsidence indicators. The findings

Cite this article: Ghanbari, A., Nakhaei, M., Kalani, S., Azizi, H. R. (2026). A Field-Based Investigation of Land Subsidence Indicators in Alborz Province. *Journal of Engineering Geology*, 20 (1), 48-67. <https://doi.org/10.22034/JEG.2026.20.1.10396>

highlight a strong spatial correlation between the severity of subsidence, geological heterogeneity and unregulated groundwater exploitation. The absence of smart metering systems in wells also contributes to this correlation. This study emphasizes the urgent need for integrated monitoring frameworks, adaptive management strategies and advanced remote sensing technologies to mitigate and control the expansion of land subsidence in Alborz Province.

Conclusions

The significant decline in groundwater levels in Alborz Province is a critical environmental issue requiring urgent attention. If the current rate of extraction from groundwater aquifers continues, these reserves risk becoming irreversibly depleted, which would drastically diminish their storage potential and potentially cause damage to surface structures. While this study has focused on documenting field evidence, subsequent research will involve a comprehensive analysis of groundwater conditions, soil layer properties and localized subsidence magnitudes, utilising laboratory data, numerical modelling and radar interferometry (InSAR) results. The key conclusions derived from this initial stage of the investigation are as follows:

1. Field investigations confirm that there are numerous manifestations of active land subsidence across Alborz Province. Evidence such as cracks in older buildings, casing uplift and extensive ground fissures all point to a high rate of land subsidence in the area.
2. Cumulative subsidence for the period 2023–2024 was quantified using radar interferometry, and a corresponding map was generated for the province. This map shows a clear link between areas with high subsidence rates and locations where field evidence has been observed.

Specifically, Sepehr Industrial Town and Tankaman Village, where field surveys identified the most frequent sand boils, were also found to have the highest subsidence values by InSAR. Similarly, the Mehrshahr area, which is known for its building cracks, exhibits a high subsidence rate. These correlations suggest that subsidence is the primary mechanism behind these surface features.

3. Although cracks are evident in older, non-engineered buildings, significant cracking or differential settlement in modern, engineered structures is rare. Furthermore, critical infrastructure networks in the province have not sustained any significant damage and appear to have been largely unaffected by subsidence thus far.

4. The development of deep ground fissures in the Fathabad area (between Eshtehard and Buin Zahra) may be attributed to subsidence, loss of soil moisture, or a combination of various geotechnical mechanisms potentially involving dispersive and erodible soils.

5. Several sinkholes and ground fissures have occurred in close proximity to concrete electricity pylons in the Eshtehard region, posing a serious potential hazard to this infrastructure.

Future work should include extended InSAR monitoring to measure subsidence rates across different parts of Alborz Province over a longer temporal scale. A detailed investigation into the geotechnical properties of subsurface layers, based on borehole data collected throughout the province, is also recommended. Finally, the hydrodynamic characteristics of the aquifer should be thoroughly evaluated using data from water wells and pumping tests.

مطالعه میدانی شواهد فرونشست در استان البرز

علی قنبری^۱✉، محمد نخعی^۲، سعید کلانی^۳، حمیدرضا عزیزی^۴

۱. گروه مهندسی عمران، دانشکده فنی مهندسی، دانشگاه خوارزمی، تهران، ایران. رایانامه: Ghanbari@khu.ac.ir

۲. گروه زمین شناسی کاربردی، دانشکده علوم زمین، دانشگاه خوارزمی، تهران، ایران.

۳. سازمان مدیریت و برنامه ریزی استان البرز، البرز، ایران.

۴. سازمان مدیریت و برنامه ریزی استان البرز، البرز، ایران.

اطلاعات مقاله	چکیده
نوع مقاله: مقاله پژوهشی	فرونشست زمین به عنوان یکی از مخاطرات پیچیده ژئوتکنیکی، تهدیدی جدی برای امنیت طبیعی، اجتماعی و اقتصادی استان البرز محسوب می شود. در این مقاله، با استناد به شواهد میدانی گردآوری شده در دشت های هشتگرد، اشتهارد و کرج طی فصول بهار و تابستان سال ۱۴۰۴، علائم صحرایی فرونشست مورد ارزیابی و اندازه گیری قرار گرفته است. علائمی نظیر ترک های کششی و فشاری در سطح زمین، نشست موضعی در سازه ها، لوله زایی در سرچاه ها، شکاف های سطحی عمیق و تغییر در سطح آب های زیرزمینی به عنوان نشانه های کلیدی فرونشست بررسی شده اند. نتایج حاصل نشان می دهد که دشت هشتگرد، به ویژه در مناطق سعیدآباد، سپهر و نجم آباد، دارای بیشترین شواهد صحرایی از جمله نشست های پیوسته، شکاف های سطحی و تغییر شکل در سطح زمین است. در شهرک صنعتی سپهر لوله زایی به میزان ۱۲۰ سانتی متر در طی شش سال اندازه گیری شده است. در دشت اشتهارد نیز شواهد متعددی از ترک خوردگی در ساختمان مدارس، شکاف در سطح زمین و در اطراف دکل های برق و دیواره های سازه ای مشاهده شده است. بازشدگی برخی ترک ها در این منطقه حدود ۲۰ میلی متر است. همچنین شکاف های عمیقی در منطقه فتح آباد (حدفاصل اشتهارد و بوئین زهرا) به وقوع پیوست است. عمق حداکثر شکاف ها حدود ۶ متر برآورد شده است. با این حال، در بخش هایی از دشت کرج، علی رغم برداشت قابل توجه از منابع آب زیرزمینی، علائم صحرایی مشهودی از فرونشست دیده نشده است. مطالعه دورسجی به روش تداخل سنجی راداری نیز نشان می دهد که فرونشست در هشتگرد حدود ۲۰ سانتی متر در کرج حدود ۱۴ سانتی متر و در اشتهارد حدود ۶ سانتی متر در سال است.
تاریخ دریافت: ۱۴۰۴/۰۵/۲۵	
تاریخ پذیرش: ۱۴۰۴/۱۲/۰۳	
کلیدواژه ها: فرونشست، استان البرز، شواهد صحرایی، دشت اشتهارد، دشت هشتگرد، کرج.	

مقدمه

مخاطره در بخش هایی از آن به روشنی قابل مشاهده است (Kalantarian et al., 2024; Nakhaei et al., 2023).

بررسی های میدانی انجام شده طی سال ۱۴۰۴ در قالب بازدیدهای صحرایی از روستاها، مزارع، شهرک های صنعتی و سازه های عمومی، شواهد عینی و مستقیمی از وقوع فرونشست در برخی نواحی استان ثبت کرده است. در شکل (۱) موقعیت نقاط بازدید شده در این مطالعات نمایش داده شده است. همچنین در جدول (۱) مختصات برخی نقاط شاخص در مطالعه حاضر ارائه شده است. توزیع مکانی نقاط یاد شده به نحوی است که هر سه دشت کرج، هشتگرد و اشتهارد را پوشش می دهد، ضمن آن که هم نقاط دارای فرونشست و هم نقاط بدون فرونشست بررسی شده است. در نهایت در مواردی

فرونشست زمین، یکی از مهم ترین و پیچیده ترین مخاطرات ژئوتکنیکی در مناطق خشک و نیمه خشک جهان به شمار می رود که طی دهه های اخیر، اثرات گسترده ای بر محیط زیست، زیرساخت های عمرانی و امنیت منابع آبی در بسیاری از کشورها، از جمله ایران، برجای گذاشته است. برخی محققان و از جمله بوربی (Burbey, 2001) و همچنین فیگورا-میراندا و همکاران (Figueroa-Miranda et al., 2025) این موضوع را مورد تاکید قرار داده اند. استان البرز با دارا بودن سه دشت اصلی شامل هشتگرد، اشتهارد و کرج، از جمله مناطقی است که در سال های اخیر به طور محسوسی با پدیده فرونشست مواجه بوده و علائم صحرایی این

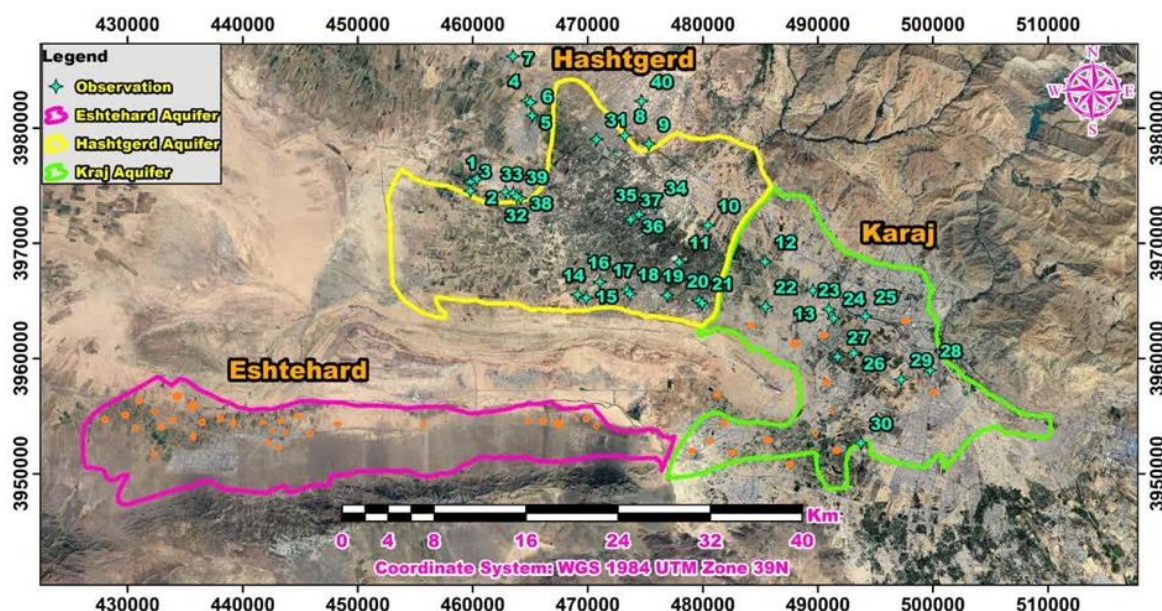
استناد: قنبری، ع.، نخعی، م.، کلانی، س.، عزیزی، ح. ر. (۱۴۰۵). مطالعه میدانی شواهد فرونشست در استان البرز. ۲۰ (۱)، ۶۷-۴۸.

<https://doi.org/10.22034/JEG.2026.20.1.10396>

انحراف تیرهای برق و شکاف‌های سطحی عمیق هستند. انتخاب این موارد بدان دلیل بوده است که این مشخصه‌ها از نظر مهندسی قابل توجه هستند و می‌توانند برای سازه‌ها خسارت ایجاد کنند. هدف نهایی این پژوهش، ارائه شواهد ملموس از وقوع فرونشست و زمینه‌سازی برای طراحی راهکارهای مدیریتی، هشداردهی و کاهش خطرات ناشی از آن در استان البرز است.

که شواهد صحرایی بیشتری رؤیت شده است، تراکم نقاط به طور موضعی کاهش یافته است. شهرک صنعتی نظرآباد و همچنین منطقه سعیدآباد از این قبیل هستند که فاصله نقاط در آنها کمتر از سایر مناطق است.

شواهد بررسی شده شامل ترک‌های کششی و فشاری در سازه‌ها، نشست‌های موضعی زمین، جابه‌جایی و لوله‌زایی در دهانه چاه‌ها،



شکل ۱. موقعیت نقاط بازدید شده بر روی تصویر ماهواره‌ای

Fig. 1. Location of visited points on the satellite image

جدول ۱. موقعیت جغرافیایی برخی از نقاط بازدید شده

Table 1. Geographical location of some of the visited locations

NO.	UTM_X	UTM_Y	Lat	Lon	نام محل
1	459797	3975314	35/92132866	50/55437469	هادی نجم‌آبادی
2	460358	3975600	35/92392785	50/56057768	اطراف شهرک صنعتی سپهر
3	459797	3974542	35/9143632	50/55441376	اطراف وایبک
4	464710	3982363	35/98506647	50/60852249	اطراف شهرک فرهنگیان
5	465028	3982215	35/98374207	50/61205107	جاده ازبکی نظرآباد
6	465176	3981051	35/97325149	50/61374581	نظرآباد بلوار آیت الله خامنه‌ای
7	463504	3986214	36/01974146	50/5949662	کارخانه سیمان آبیک
8	473251	3979335	35/9580386	50/70336619	میدان صنعت هشتگرد
9	475315	3978621	35/95165223	50/72627415	اطراف شهرک ارغوان
10	480469	3971569	35/8881957	50/78359866	اطراف شهرک سهیلیه
11	477968	3968355	35/85915875	50/75598487	لشکرآباد
12	485430	3968394	35/85965599	50/83862256	چهارباغ
13	489597	3965894	35/83716587	50/88481002	بلوار پیام

14	469118	3965537	35/8335142	50/65807162	اراضی اطراف زکی آباد
15	469872	3965259	35/83103289	50/66643107	اراضی اطراف زکی آباد
16	471063	3966648	35/84359263	50/6795629	جاده زکی آباد
17	473444	3965974	35/83757701	50/70595393	اراضی اطراف اوغلان تپه
18	473682	3965616	35/83436299	50/70860237	اراضی اطراف اوغلان تپه
19	476937	3965497	35/83337148	50/74463881	اراضی قاسم آباد گرجی
20	479675	3965021	35/82913813	50/77497108	اراضی اطراف رامجین
21	479966	3964799	35/82714028	50/77819892	اراضی اطراف رامجین
22	485469	3964492	35/82446767	50/8391332	اراضی چهارباغ
23	490985	3964260	35/82244654	50/90020143	کوی فرهنگ مهرشهر
24	491382	3963499	35/81559167	50/90460329	احدآباد مهرشهر
25	494160	3963665	35/81710311	50/93535503	گلشهر کرج
26	493135	3960457	35/78817168	50/92403306	بلوار چمن مهرشهر
27	491746	3960159	35/78547724	50/90866494	قره آغاج مهرشهر
28	499796	3958982	35/77489615	50/997742	زندان کجویی
29	497256	3958188	35/76773565	50/96964205	جاده مشکین دشت
30	493763	3952685	35/71809976	50/93104717	شهرک زیبادشت شمالی
31	470751	3979017	35/95510379	50/67565374	شهرک راه آهن هشتگرد
32	462853	3974455	35/91369691	50/58828718	شهرک صنعتی سپهر
33	463522	3974320	35/91250554	50/59571232	شهرک صنعتی سپهر
34	475876	3973162	35/90245159	50/73266426	تهران دشت
35	474417	3972485	35/89631069	50/71651795	روستای سعید آباد
36	473903	3972167	35/89343003	50/71083287	روستای سعید آباد
37	473729	3972044	35/8923164	50/70890895	روستای سعید آباد
38	464202	3973916	35/90889189	50/60326451	اطراف روستای تنکمان
39	463795	3974042	35/9100129	50/59874824	کارخانه قارچ تنکمان

مروری بر مطالعات محققان پیشین

در برخی موارد، نمی توان به طور قطع ترک ها را به فرونشست نسبت داد؛ زیرا عوامل سازه ای و ژئوتکنیکی دیگر نیز می توانند در آن دخیل باشند.

نتایج مطالعات راداری و تحلیلی که توسط کلانتریان و همکاران (Kalantarian et al., 2024) گزارش شده است، بر ارتباط مستقیم بین افت سطح ایستابی و افزایش نرخ نشست زمین تأکید دارد. در این پژوهش ها، گسترش شکاف های سطحی، تراکم لایه های رسی و فشرده شونده و برداشت بی رویه از منابع آب زیرزمینی به عنوان عوامل اصلی بروز فرونشست معرفی شده اند. نواحی غربی دشت اشتهارد، با بیشترین میزان افت ایستابی و تنش فشاری، دارای بالاترین نرخ فرونشست ارزیابی شده اند. رضایی (Rezaei, 2021)

در دهه های اخیر، مطالعات متعددی در زمینه شناسایی، تحلیل و مدلسازی فرونشست زمین در استان البرز صورت گرفته است که هر یک با رویکرد خاص، به بررسی ابعاد ژئوتکنیکی، هیدروژئولوژیکی و ژئومورفولوژیکی این پدیده پرداخته اند. در این بخش، مروری نظام مند بر مهم ترین تحقیقات صورت گرفته توسط نهادهای علمی، پژوهشگران دانشگاهی و سازمان های تخصصی ارائه می شود. در مطالعات جهاد دانشگاهی البرز که توسط حسن زاده (Hassanzadeh, 2024) گزارش شده است، شواهدی از ترک در دیوارها، لوله زایی در برخی چاه ها و شکاف سطحی در حوالی کارخانه فولاد اشتهارد گزارش شد. با این حال، محققان تأکید کرده اند که

نتایج این مطالعات حاکی از ضرورت تلفیق داده‌های میدانی با تحلیل‌های عددی و تصویربرداری راداری جهت ارائه مدلی جامع از روند فرونشست در مناطق آسیب‌پذیر استان البرز می‌باشد.

روش تحقیق

در گام نخست، شواهد صحرایی فرونشست شامل پدیده لوله‌زایی در چاه‌ها، ترک‌خوردگی در سازه‌ها، نشست‌های موضعی و شکاف‌های سطحی در سه دشت هشتگرد، اشتهارد و کرج به‌صورت مستقیم مورد بررسی قرار گرفت. برای این منظور، از افراد مطلع محلی و ساکنان بومی هر منطقه اطلاعات اولیه گردآوری شد و تمامی موارد گزارش‌شده، توسط تیم‌های میدانی به‌صورت حضوری بازبینی و مستندسازی گردید. اندازه‌گیری میزان لوله‌زایی با استفاده از ابزارهای اندازه‌گیری معمول (نظیر خط‌کش فلزی و کولیس دستی) و با دقت میلی‌متری انجام شد. همچنین ترک‌خوردگی در سازه‌ها در سطح گسترده‌ای از محلات شهری استان البرز، توسط چندین اکیپ صحرایی و با بازرسی مستقیم نما و دیوارهای جانبی ساختمان‌ها و عکسبرداری مستند ارزیابی شد. اندازه‌گیری ابعاد ترک‌ها بر اساس تصاویر برداشت‌شده و مقیاس استاندارد ثبت‌شده در محل صورت پذیرفت.

در ادامه، برای پایش نرخ فرونشست در مقیاس منطقه‌ای از تصاویر ماهواره Sentinel-1 استفاده شد. داده‌ها در بازه‌های ۱۲ روزه طی سال‌های ۲۰۱۵ تا ۲۰۲۵ به‌کمک نرم‌افزار SNAP پردازش و نقشه‌های نرخ فرونشست تهیه شد. مقادیر به‌دست‌آمده با شواهد میدانی تطبیق داده شد. در مناطقی که نرخ فرونشست قابل توجه بود، بازدید تکمیلی میدانی از تأسیسات حساس نظیر خطوط انتقال نیرو، خطوط لوله آب، سازه‌های عمومی و شریان‌های حیاتی انجام شد. در مرحله نهایی، داده‌های تراز آب زیرزمینی چاه‌های مشاهده‌ای استان گردآوری و روند کاهش سطح ایستابی محاسبه شد. سپس ارتباط میان افت سطح آب زیرزمینی و نرخ فرونشست با روش تحلیل همبستگی و مقایسه مکانی-زمانی مورد بررسی قرار گرفت. یافته‌ها نشان‌دهنده تأثیر مستقیم افت سطح آب زیرزمینی بر تشدید فرونشست در بخش‌های مشخصی از دشت‌های مورد مطالعه است.

با محوریت بررسی خصوصیات ژئوشیمیایی، فیزیکی و کانی‌شناسی نمونه خاک‌های دشت اشتهارد، نقش ترکیب خاک در شدت فرونشست را مورد تحلیل قرار داده است. یافته‌های ایشان نشان داد که حضور کانی‌هایی نظیر مونتموریلونیت، با توان جذب رطوبت بالا و انقباض/انبساط شدید، نقش مهمی در کاهش پایداری مکانیکی خاک و تسریع فرایند فرونشست دارند. نخعی و همکاران (Nakhaei et al., 2023) با بهره‌گیری از داده‌های ماهواره‌ای و استفاده از الگوریتم‌های یادگیری ماشین (نظیر GB، CART، RF و SVM) به تحلیل مکانی-زمانی بارش در دشت هشتگرد پرداخته است. تمرکز این مطالعه بر ارزیابی دقت محصولات بارشی با تفکیک‌پذیری بالا (نظیر CHIRPS) و تلفیق آن‌ها با داده‌های سنجنش از دور بوده است. نتایج نشان داد که مدل‌های پیشرفته، از جمله GB و CART، قابلیت خوبی در پیش‌بینی پراکندگی بارش در نواحی با عرض جغرافیایی متفاوت دارند.

نوروزی و همکاران (Norouzi et al., 2025)، به بررسی مکانیسم‌های فرونشست در دشت اشتهارد با استفاده از تکنیک تداخل‌سنجی راداری (D-InSAR) و تحلیل آماری همبستگی بین افت سطح ایستابی و نرخ فرونشست پرداخته است. نتایج همچنین بر تأثیر ساختار زمین‌شناسی، ضخامت رسوبات و بهره‌برداری غیرمجاز از منابع آب به‌عنوان عوامل اصلی تشدید فرونشست تأکید دارد. همچنین سازمان نقشه‌برداری کشور مجموعه‌ای از مطالعات ژئودتیکی و راداری را به‌منظور ارزیابی وضعیت فرونشست زمین در ایران، به‌ویژه در استان البرز، منتشر کرد. در این پژوهش‌ها که با همکاری آمیغ‌پی و عربی (Amighpey and Arabi, 2023) انجام شده‌اند، از تکنیک‌های سنجنش از دور نظیر تداخل‌سنجی راداری (InSAR)، ترازبایی دقیق و داده‌های GNSS برای پایش پویا و مکانی-زمانی روند فرونشست استفاده شده است. هدف اصلی این پروژه، تهیه نقشه ملی فرونشست ایران بر پایه داده‌های ژئودتیکی بوده است.

در مجموع مطالعات پیشین انجام‌شده در استان البرز، مجموعه‌ای چندرشته‌ای از تحلیل‌های میدانی، ژئوشیمیایی، هیدروژئولوژیکی و سنجنش از دور را در بر می‌گیرند. اشتراک کلیدی میان این پژوهش‌ها، نقش بحرانی افت سطح ایستابی و ویژگی‌های خاک در بروز فرونشست و گسترش علائم صحرایی آن است. در عین حال،

شواهد صحرایی در دشت هشتگرد

دشت هشتگرد، یکی از مهم‌ترین و پرریسک‌ترین مناطق استان البرز از نظر بروز پدیده فرونشست به شمار می‌رود. این دشت با دارا بودن ترکیب پیچیده‌ای از لایه‌های رسی، سیلتی و شنی ناپایدار در عمق کم، به‌ویژه در مناطق تحت کشت و شهرک‌های صنعتی، شرایط مستعدی برای نشست زمین فراهم کرده است. مشاهدات صحرایی صورت‌گرفته در این ناحیه طی بهار و تابستان ۱۴۰۴، مجموعه‌ای از شواهد عینی و تجربی را از وقوع فرونشست ثبت کرده است. بازدیدهای میدانی در دشت هشتگرد شامل نقاطی در روستای سعیدآباد، روستای تنکمان، اراضی اطراف شهرک صنعتی سپهر، کارخانه قارچ، اراضی نجم‌آباد، محدوده جنوبی نظرآباد و شهر جدید مهستان بوده است.

در محدوده سعیدآباد و اطراف شهرک صنعتی سپهر، ترک‌های طولی ممتد و عرضی بر روی زمین، به‌ویژه در اراضی شنی ناپایدار و نزدیک به چاه‌های عمیق، مشاهده شده است. برخی از این ترک‌ها دارای عمق بیش از چند ده سانتی‌متر بوده‌اند و الگوی بازشدگی آن‌ها، بیانگر نشست تفاضلی زمین است. در برخی از چاه‌های قدیمی واقع در روستای تنکمان (شکل ۲) و حوالی نجم‌آباد، پدیده لوله‌زایی به‌وضوح قابل مشاهده است. این پدیده، نشانه‌ای مهم از نشست زمین در اطراف چاه و جابه‌جایی نسبی سطح زمین نسبت به لوله می‌باشد. در مجاورت دیوار مدارس و خانه‌های روستایی، به‌ویژه در

مناطق جنوب نظرآباد، ترک‌هایی قطری و قائم در برخی دیوارها و اعوجاج درب‌ها گزارش شده که بیانگر نشست نامتقارن فونداسیون‌هاست (شکل ۳). در برخی موارد، شواهد انحراف تیرهای برق و خم‌شدگی لوله‌های سطحی نیز مشاهده شد.

الگوی کلی شواهد صحرایی در دشت هشتگرد نشان می‌دهد که منطقه سعیدآباد، شهرک صنعتی سپهر و نجم‌آباد دارای بیشترین علائم فرونشست هستند. بهره‌برداری بیش از حد از چاه‌های کشاورزی فاقد مجوز و عدم پایش مستمر سطح ایستابی، به‌عنوان عوامل اصلی بروز این علائم شناخته شده‌اند. در عین حال، مناطقی نیز وجود داشته‌اند که علی‌رغم قرارگیری در شرایط مشابه، فاقد نشانه‌های ظاهری فرونشست بوده‌اند که این موضوع ضرورت تحلیل دقیق‌تر لایه‌های زیرسطحی و مکانیزم‌های فرونشست در آن نواحی را نشان می‌دهد.

به‌رغم فرونشست قابل توجه در دشت هشتگرد، مطالعه صحرایی نشان داد که میزان ترک‌خوردگی ساختمان‌ها و بناهای مهندسی در روستاهای سعیدآباد، تنکمان و شهرک صنعتی سپهر بسیار محدود بوده و چندان قابل توجه نیست. همچنین در شهر جدید هشتگرد (مهستان) نیز نشانه‌های قابل توجهی از ترک‌خوردگی در سازه‌ها دیده نمی‌شود. با این حال در بخش‌هایی از مهرشهر نمای برخی ساختمان‌های قدیمی دچار ترک‌خوردگی شده‌اند.



شکل ۲. پدیده لوله‌زایی ناشی از فرونشست یکنواخت در دشت هشتگرد

Fig. 2. The wellhead displacement due to uniform subsidence in the Hashtgerd Plain



شکل ۳. ترک خوردگی در دیوار بنای جدید ساز و دیوار و پی بنای قدیمی در اثر برداشت آب (دشت هشتگرد)

Fig. 3. Cracks in the wall of the newly built building and the wall and foundation of the old building due to water withdrawal (Hashtgerd Plain)

در شهر اشتهارد، به‌ویژه در محله طالقانی، ترک‌هایی در دیوارهای مدارس گزارش شده که عمدتاً دارای الگوی قطری و قائم هستند. این ترک‌ها عمدتاً در ساختمان‌های قدیمی و فاقد پی عمیق مشاهده شده و حاکی از نشست موضعی نامتقارن هستند. در محدوده مرزی بین اشتهارد و بوبین‌زهر، شکاف‌هایی با عمق بیش از ۶ متر مشاهده شده که به‌صورت خطی و در امتداد مشخصی توسعه یافته‌اند. این شکاف‌ها که در زمین‌های رسی و خشک ظاهر شده‌اند، از شواهد بارز وقوع فرونشست و ناپایداری خاک در ناحیه می‌باشند. یکی از نمونه‌های شاخص، شکاف در منطقه‌ای موسوم به «فتح‌آباد» است که به‌عنوان پدیده‌ای ژئومورفولوژیک مستند شده است.

در ناحیه حفاصل اشتهارد تا بوبین‌زهر، تیرهای برق بتنی و دکل‌ها دچار انحراف قائم و نشست موضعی شده‌اند (شکل ۷). این تغییرات مکانیکی، علاوه بر نشان دادن جابه‌جایی تدریجی در زیرساخت‌ها، بیانگر فشار ناپایدار در لایه‌های زیرسطحی منطقه است. در چندین نقطه، چاه‌های دارای لوله فلزی شاهد بیرون‌زدگی لوله نسبت به

شواهد صحرایی در دشت اشتهارد

دشت اشتهارد، واقع در جنوب‌غربی استان البرز، یکی از پهنه‌های پرریسک از نظر وقوع فرونشست زمین به‌شمار می‌رود. این منطقه به‌واسطه توسعه شهرک‌های صنعتی، برداشت فزاینده از منابع آب زیرزمینی و توپوگرافی نسبتاً مسطح، در دهه‌های اخیر در معرض فشارهای شدید هیدروژئولوژیکی قرار گرفته است. مطالعات میدانی صورت‌گرفته در این دشت در تابستان ۱۴۰۴، مجموعه‌ای از شواهد صحرایی قابل توجهی را از وقوع فرونشست آشکار نموده است. بازدیدهای صحرایی در این دشت شامل نقاطی در شهر اشتهارد، روستای مراد تپه، محدوده بین اشتهارد و بوبین‌زهر، اراضی ماهدشت، عباس‌آباد و محمدشهر بوده است. در هر یک از این نقاط، شواهد زمین‌شناختی، ژئوتکنیکی و سازه‌ای مرتبط با پدیده فرونشست با دقت ثبت و مستندسازی شده است (شکل‌های ۴ تا ۷).

در مجموع دشت اشتهارد به‌عنوان یکی از نقاط بحرانی استان البرز، مجموعه‌ای از شواهد صحرایی بارز از پدیده فرونشست را در خود جای داده است. این شواهد، علاوه بر هشدار نسبت به تشدید روند فرونشست، ضرورت استفاده از سامانه‌های پایش مداوم، تحلیل‌های عددی پیش‌بینی‌کننده و مداخلات مدیریتی در بهره‌برداری از منابع آب زیرزمینی را به‌وضوح نشان می‌دهد.



سطح زمین بوده‌اند که پدیده «لوله‌زایی» را نشان می‌دهد. این علامت مهم فرونشست، ناشی از نشست تدریجی خاک اطراف لوله است در حالی که موقعیت نسبی لوله در عمق باقی مانده است. همچنین در اطراف برخی چاه‌ها، پوشش‌های سیمانی، اتافک‌ها، سیستم برق‌رسانی و دیواره‌های محافظ دچار ترک و انحراف شده‌اند که این موارد نیز نشان‌دهنده نشست‌های موضعی ناهمگن است.



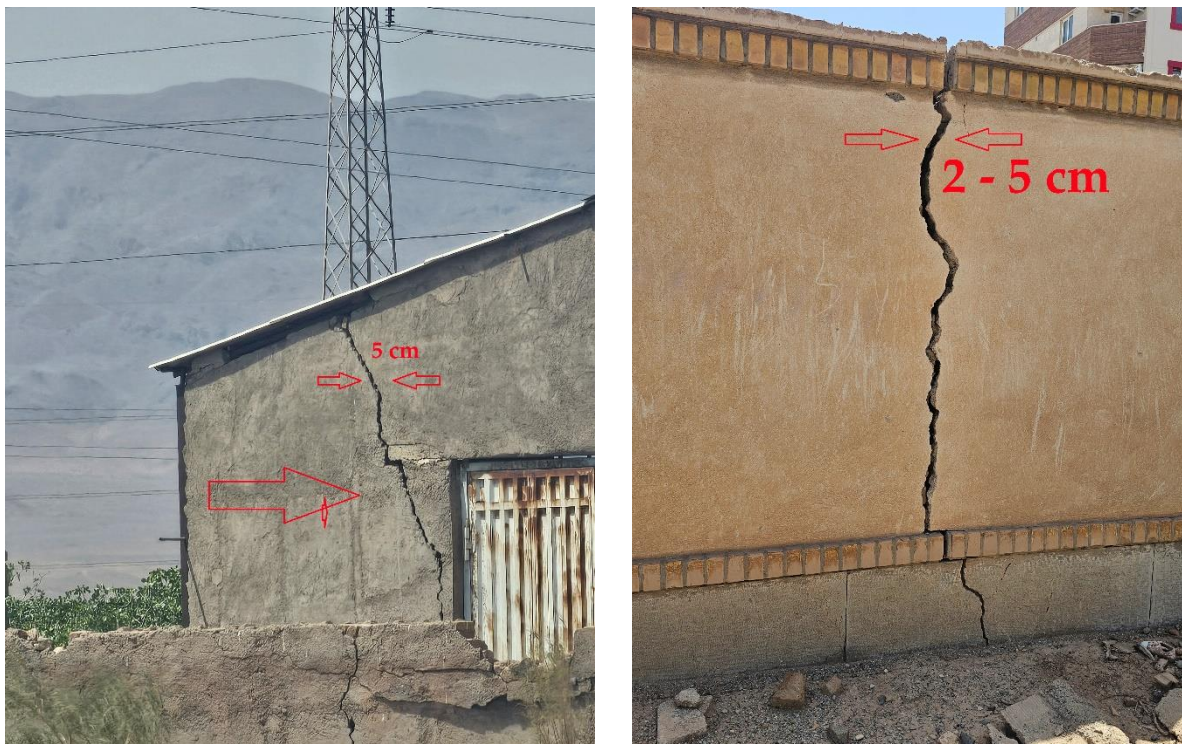
شکل ۴. ترک‌های طولی و عمیق در دشت اشتهارد (منطقه فتح‌آباد)

Fig. 4. Longitudinal and deep cracks in the Eshtehard plain (Fathabad region)



شکل ۵. فروچاله‌های پراکنده در دشت اشتهارد در اثر افت سطح آب زیرزمینی

Fig. 5. Scattered sinkholes in the Eshtehard Plain due to the drop in groundwater levels



شکل ۶. ترک خوردگی در ساختمان‌های آموزشی و صنعتی در اثر فرونشست زمین (منطقه اشتهارد)
Fig. 6. Cracking in educational and industrial buildings due to land subsidence



شکل ۷. انحراف در امتداد قائم در تیرهای بتنی خط انتقال برق (حدود ۷ درجه)
Fig. 7. Vertical deflection in concrete power transmission line beams (about 7 degrees)

شواهد صحرایی در دشت کرج

دشت کرج که در مرکز استان البرز قرار دارد، به‌رغم قرارگیری در محدوده‌ای با توسعه شهری و صنعتی گسترده، نسبت به دشت‌های هشتگرد و آشتیارد، شواهد صحرایی کمتری از پدیده فرونشست از خود نشان داده است. با این حال، مطالعات میدانی صورت‌گرفته در تابستان ۱۴۰۴ در بخش‌های شمالی و جنوبی این دشت، نشانه‌هایی هرچند پراکنده از فرونشست و ناپایداری خاک را ثبت نموده‌اند که از نظر ژئوتکنیکی و برنامه‌ریزی شهری قابل توجه است. مشاهدات صحرایی در دشت کرج عمدتاً در حاشیه‌های بزرگراه قزوین-کرج (شمال و جنوب)، احدآباد، حصار قزل‌حصار، شهرک کامرانیه، چهارباغ، مهرشهر، کمالشهر و حصارک انجام شده است. این مناطق با توجه به وجود سازه‌های مسکونی، شبکه‌های تأسیساتی و سابقه بهره‌برداری از چاه‌های آب، مورد بررسی دقیق میدانی قرار گرفتند. در محدوده‌هایی از مهرشهر، کمالشهر و حصارک، ترک‌هایی جزئی در دیوار نمای ساختمان‌های قدیمی مشاهده شد. این ترک‌ها بیشتر در نماهای آجری، اتصالات پنجره‌ها و دیوارهای پیرامونی دیده شدند. با این حال، به دلیل نبود شواهد عمیق‌تر، نمی‌توان به‌طور قطعی آن‌ها را ناشی از فرونشست دانست؛ اگرچه در برخی موارد، پدیده نشست نامتقارن نیز محتمل به نظر می‌رسد. در برخی بخش‌ها، مانند احدآباد و قزل‌حصار، تغییرات جزئی در تراز سطوح پیاده‌روها و فرورفتگی‌های خفیف مشاهده شد. همچنین برخی از دیوارهای جانبی ناپایدار، دچار ترک‌های قائم یا مایل محدود شده‌اند.

بخش شمالی دشت کرج، از جمله عظیمیه و جهانشهر، علی‌رغم توسعه شهری گسترده، فاقد علائم صحرایی مشخص از فرونشست است. در بازدید از محله‌های شمالی کرج و اطراف بزرگراه کرج-قزوین، شکاف، نشست یا لوله‌زایی مشاهده نگردید. این امر می‌تواند ناشی از تفاوت در جنس خاک، شرایط هیدروژئولوژیکی و میزان بهره‌برداری از منابع آب زیرزمینی باشد. تنها منطقه‌ای از شمال بزرگراه که شواهد فرونشست در آن دیده می‌شود، محله حصارک است. بررسی‌های صحرایی نشان می‌دهد که ترک‌خوردگی در برخی ساختمان‌ها در اطراف میدان حصارک، به احتمال زیاد متأثر از تغییر سطح آب در لایه‌های موضعی آب‌دار، گودبرداری و تغییر در زهکشی منطقه و حفاری‌های مترو است. در واقع با مراجعه مستقیم نگارندگان به کوچه‌های محله حصارک میزان خرابی در ساختمان‌های موجود بررسی شده است. این خرابی‌ها متمرکز بر محدوده خاصی از این محله هستند که در مجاورت حفاری‌های مترو قرار دارد. از سوی دیگر روند شروع این ترک‌خوردگی‌ها از لحاظ زمانی منطبق بر زمان حفاری مترو است. در مقایسه با دشت هشتگرد، که شواهد میدانی آن حاکی از یک وضعیت بحرانی و گسترده است، دشت کرج بیشتر دارای نشانه‌های موضعی، پراکنده و خفیف از فرونشست است. با این حال، پایش منظم و دقیق بخش‌هایی از این دشت به‌ویژه در نواحی جنوبی توصیه می‌شود؛ چرا که علائم ابتدایی می‌توانند در آینده به نشست‌های جدی‌تر منجر شوند.



شکل ۸. شواهدی از ترک خوردگی در محله حصارک کرج ناشی از فرونشست موضعی
Fig. 8. Evidence of cracking in the Hesarak neighborhood of Karaj caused by local subsidence

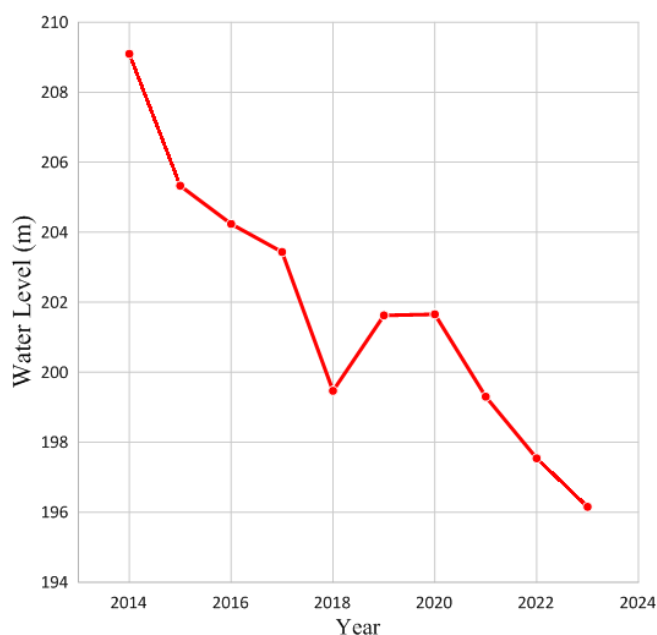


شکل ۹. ترک خوردگی در کوله پل (کرج- جاده قزل حصار)

Fig. 9. Crack in the bridge abutment (Karaj - Qezel Hesar road)

سطح آب زیرزمینی منطقه افت داشته است. این افت سطح آب منجر به فرونشست در سطح زمین شده است. از طرف دیگر لایه‌های خاک به علت فرونشست متراکم‌تر شده و قابلیت ذخیره آب در آنها کاهش یافته است. این دو عامل بیش از خسارت‌های سازه‌ای ناشی از فرونشست اهمیت داشته و قابل توجه هستند.

در مجموع آنچه که بیش از هر چیز نگران‌کننده است و جای برنامه ریزی دقیق دارد این است که میزان آب زیرزمینی ذخیره شده در آبخوان‌های منطقه به شدت رو به کاهش است. در شکل (۱۰) روند کاهش سطح آب در منطقه حصارک کرج در سال‌های ۲۰۱۴ تا ۲۰۲۳ نمایش داده شده است. بر این اساس سالانه حدود یک متر



شکل ۱۰. روند کاهش سطح آب زیرزمینی در منطقه حصارک کرج

Fig. 10. The trend of groundwater level decline in the Hesarak area of Karaj

تحلیل و تفسیر داده‌ها

داده‌های میدانی گردآوری شده در دشت‌های هشتگرد، اشتهارد و کرج استان البرز نشان‌دهنده تنوع و تفاوت آشکار در الگوی وقوع فرونشست، شدت علائم سطحی و ارتباط آن با پارامترهای ژئوتکنیکی، هیدروژئولوژیکی و بهره‌برداری انسانی است. در این بخش، تلاش می‌شود با تفسیر هم‌زمان داده‌های صحرایی، گزارش‌های محلی و شواهد ساختاری، الگوی کلی پدیده فرونشست در این استان تحلیل و تعمیم داده شود.

در دشت هشتگرد، که شواهد صحرایی فراوان‌تری از جمله شکاف‌های سطحی، لوله‌زایی و نشست موضعی مشاهده شده، ویژگی‌های زمین‌شناختی مانند وجود لایه‌های رس نرم، آبرفت‌های ریزدانه و خاک‌های کم‌عمق ناپایدار نقش مهمی در تشدید پدیده فرونشست داشته‌اند. کاهش سطح ایستابی و حضور چاه‌های کشاورزی فاقد مجوز و کنتور هوشمند، از جمله عوامل انسانی مؤثر در افزایش نرخ نشست زمین در این دشت بوده‌اند. در مقابل، دشت کرج که از توسعه عمرانی و پوشش شهری گسترده‌تری برخوردار است، شواهد صحرایی فرونشست به‌صورت پراکنده و با شدت کم گزارش شده‌اند. این تفاوت را می‌توان ناشی از تراکم بالاتر خاک سطحی، عمق بیشتر سفره آب زیرزمینی و ساماندهی بهتر سیستم بهره‌برداری از منابع آبی در مناطق شمالی این دشت دانست. دشت اشتهارد نیز با دارا بودن الگوی پیچیده‌ای از شکاف‌های عمیق، لوله‌زایی و نشست‌های موضعی در زیرساخت‌ها، نمونه‌ای از هم‌زمانی تنش‌های ژئوتکنیکی و فشار انسانی بر محیط است. به‌ویژه در نواحی مرزی بین اشتهارد و بوبین‌زهر، پدیده‌هایی مانند شکاف فتح‌آبادی، انحراف تیرهای برق و ترک‌های شدید در دیوار مدارس، از شدت خطر فرونشست حکایت دارد.

شواهد صحرایی حاکی از آن است که به طور کلی بخش جنوبی استان البرز (جنوب بزرگراه کرج به قزوین) به طور جدی در معرض فرونشست زمین قرار گرفته است. بررسی‌های اولیه نشان می‌دهد که مهم‌ترین عامل فرونشست در این منطقه برداشت بی‌رویه آب از منابع زیرسطحی است. در محدوده دشت هشتگرد، هر چند فرونشست خسارت قابل توجهی به سازه‌ها وارد نکرده است، ولی در تعداد زیادی چاه آب باعث لوله‌زایی شده است. بر اساس بررسی‌های

صحرایی انجام شده توسط نگارندگان که نمونه‌ای از آن در شکل (۲) نشان داده شده است، مقدار لوله‌زایی در این منطقه بین ۵ تا ۲۰ سانتی‌متر در سال است. این پدیده حاکی از تراکم شدن لایه‌های زیرسطحی زمین و به تبع آن کاهش حجم حفرات خاک است. به عبارت دیگر حجم قابل ذخیره آب در این منطقه به شدت کاهش یافت است. سطح آب هم‌اکنون در اعماق بیش از ۱۰۰ متر و حتی ۱۵۰ متری است و چاه‌ها آب با اعماق ۲۰۰ تا ۲۵۰ متر در دست حفاری هستند. ناحیه صنعتی سپهر و شهرک صنعتی نظرآباد و روستان تنکمان در این دشت بیشترین علائم میدانی فرونشست را نشان داده است.

در محدوده دشت کرج لوله‌زایی کمتر از هشتگرد است، ولی در محله احداث‌آباد از توابع مهرشهر علائم ترک‌خوردگی در ساختمان‌های قدیمی دیده می‌شود. همچنین در محله حصارک (به خصوص حوالی میدان حصارک) تعداد زیادی از واحدهای مسکونی و تجاری دچار ترک‌خوردگی شده‌اند. این ترک‌خوردگی ممکن است با حفاری‌های مترو در این ناحیه هم مرتبط باشد. در هر صورت از آنجایی که دشت کرج بیشتر مسکونی شده است و کمتر زمین‌های زراعی در آن دیده می‌شود، علائم فرونشست از قبیل شکاف در زمین نیز هویدا نیست. ولی با توجه به وجود خاک‌های رسی در لایه‌های زیر این دشت و افت شدید سطح آب زیرزمینی در ده سال اخیر، پیش‌بینی می‌شود که دشت کرج با فرونشست یکنواخت همراه بوده و از این جهت علائم سطحی روی سازه‌ها ظاهر نشده است. قابل ذکر است که فرونشست در صورتی ترک‌های مهمی در سطح زمین ایجاد می‌کند که به صورت غیریکنواخت و تفاضلی ظاهر شود.

در محدوده دشت اشتهارد علائم فراوانی در ایجاد شکاف در زمین وجود دارد. به‌خصوص در منطقه صنعتی بین شهرک صنعتی اشتهارد و بوبین‌زهر (حوالی کارخانه فولاد آریان) شکاف‌های عمیقی و بسیار خطرناکی در سطح زمین ایجاد شده است. این شکاف‌ها در پهنه گسترده‌ای با ابعاد چند کیلومتری دیده می‌شوند و باعث اختلال در کاربری اراضی منطقه شده است. در برخی موارد سوله‌های صنعتی با اسکلت مهندسی دچار ترک‌خوردگی شده تخلیه شده‌اند.

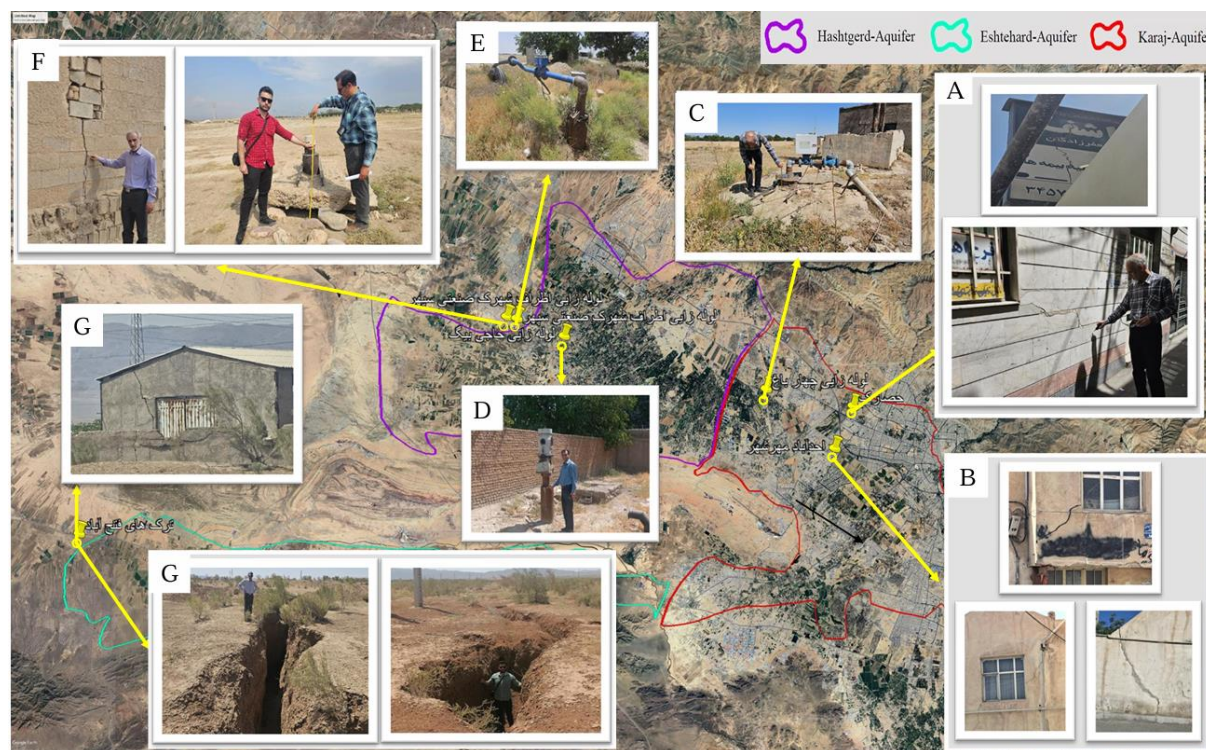
اشتهارد در مجاورت شکاف‌های زمین واقع شده و در معرض خطر است.

در پاسخ به این سؤال که کدام منطقه از استان بیشترین علائم میدانی را دارد باید اذعان نمود که بیشترین شکاف و ترک‌خوردگی در منطقه فتح‌آباد اشتهارد (بین اشتهارد و بوبین‌زهره) و بیشترین لوله‌زایی در هشتگرد اتفاق افتاده است. این‌که چرا زمین در این دو ناحیه با علائم میدانی مختلفی ظهور داشته است، به اختلاف جنس لایه‌های خاک در این دو منطقه مرتبط است. احتمالاً جنس لایه‌های خاک و وجود لایه‌های سیلتی در اشتهارد شرایط را برای ایجاد شکاف‌های عمیق ایجاد کرده است.

از سوی دیگر جمع‌بندی تحقیق حاضر آن است که ترک‌خوردگی در محله حصارک کرج ناشی از فرونشست سراسری منطقه نیست، بلکه تحت تاثیر حفاری مترو و تغییر سطح آب در میان‌لایه‌های آب‌دار است. همچنین ترک‌خوردگی در محله احدآباد مهرشهر تحت تاثیر کاهش شدید سطح آب در چاه‌های منطقه است و بر همین اساس در اطراف چاه‌ها فراوانی ترک‌خوردگی بیشتر است. در شهرک طالقانی اشتهارد ترک‌خوردگی‌ها می‌تواند در اثر ترکیبی از ساختار ضعیف خاک منطقه و فرونشست ناشی از برداشت بی‌رویه از آب‌های زیرزمینی باشد. در شکل (۱۱) موقعیت برخی شواهد ترک‌خوردگی، شکاف در زمین و لوله‌زایی بر روی نقشه ماهواره‌ای نمایش داده شده است.

همچنین در شهر اشتهارد تعدادی از مدارس و ساختمان‌های مسکونی قدیمی با ترک‌خوردگی مواجه شده‌اند. با این حال در این شهر ساختمان‌های مهندسی‌ساز و جدیدالاحداث فاقد ترک‌خوردگی هستند. در محدوده دشت اشتهارد مورد قابل توجهی از لوله‌زایی مشاهده نگردید، ولی افت شدید سطح آب در چاه‌ها بسیار نگران‌کننده است و ممکن است در چند سال آتی به یک معضل جدی برای واحدهای کشاورزی و صنعتی منطقه تبدیل شود. در مورد علت شکاف‌های عمیق در اراضی فتح‌آباد در بین اشتهارد و بوبین‌زهره سه احتمال وجود دارد. احتمال اول وقوع شکاف در اثر از دست رفتن رطوبت لایه سطحی خاک است. طبق این نظریه ترک اولیه به علت واگرا بودن خاک ایجاد شده و در سال‌های بعدی عرض و عمق شکاف‌ها گسترش یافته است. احتمال دوم آن است که این شکاف‌ها در اثر فرونشست و برداشت بی‌رویه آب از آبخوان منطقه اتفاق افتاده باشد. احتمال سوم هم ترکیبی از فرونشست و ضعف ساختار خاک (واگرایی و سایر عوامل مرتبط با خاک) را عامل ایجاد شکاف‌های زمین در منطقه می‌داند.

از طرف دیگر خوشبختانه شریان‌های حیاتی منطقه (لوله‌های آب، گاز و خطوط نفت و همچنین راه‌های منطقه و پل‌های بزرگ) چندان متاثر از فرونشست نیستند و خسارت قابل توجهی ندیده‌اند. با این حال در برخی موارد شریان‌های حیاتی در مجاورت مناطق با نرخ بالای فرونشست قرار دارند. به عنوان نمونه خط انتقال نیرو در



شکل ۱۱. نمایش موقعیت برخی شواهد ترک خوردگی، شکاف در زمین و لوله‌زایی بر روی نقشه ماهواره‌ای

Fig. 11. The location of some evidence of cracking, fissures in the ground, and wellhead displacement on a satellite map.

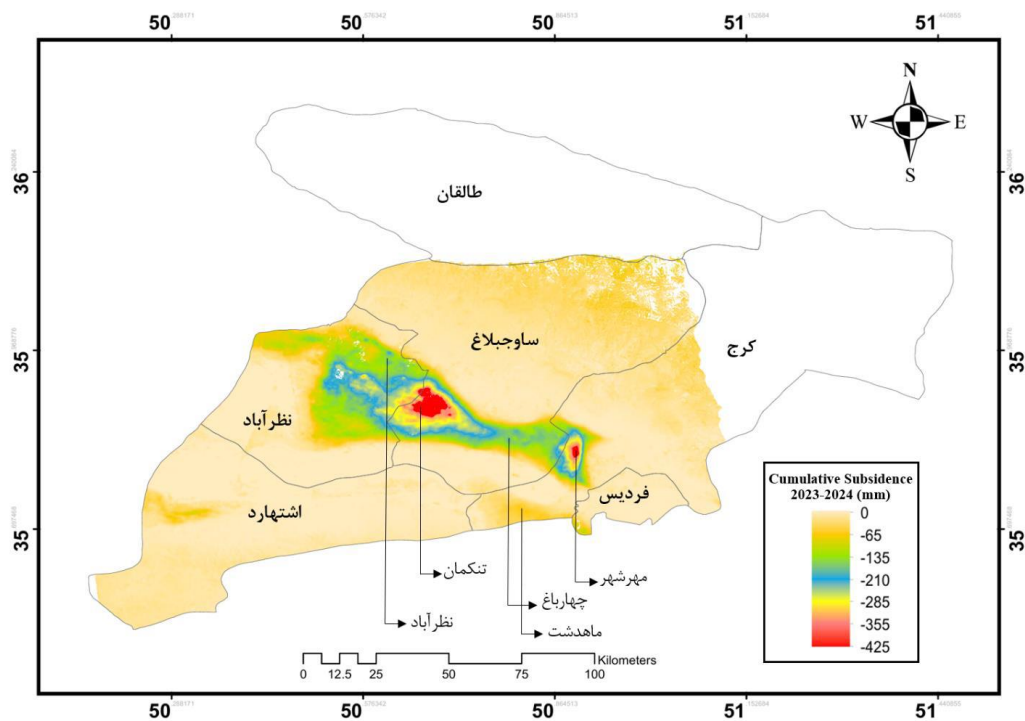
دارد. تحلیل علت این اختلاف نیازمند تحقیق دیگری است که در چارچوب تحقیق حاضر که فقط به شواهد میدانی پرداخته است، نیست.

در شکل (۱۳) نقشه فرونشست تجمعی که بر اساس روش تداخل سنجی راداری توسط نگارندگان برای دشت‌های استان البرز تهیه شده، ارائه شده است. همانگونه که دیده می‌شود نمی‌توان به طور قطعی ابراز داشت که فاصله از گسل در افزایش میزان فرونشست موثر بوده است. از سوی دیگر پهنه‌بندی خطر فرونشست توسط برخی از محققان از جمله نا و همکاران (Na et al., 2021) و همچنین کوهبنانی و همکاران (Kohbanani et al., 2019) مورد توجه قرار گرفته است. در این تحقیق نیز در شکل (۱۴) پهنه‌بندی خطر فرونشست بر اساس داده‌های سال ۲۰۲۴ برای دشت‌های استان البرز ارائه شده است. بر این اساس بخش‌هایی از دشت هشتگرد و کرج در منطقه با خطر بسیار زیاد قرار دارند و در برخی مناطق خطر زیاد و متوسط هم وجود دارد. ارائه این نقشه، امکان ارزیابی دقیق‌تر مناطق مستعد تغییر شکل‌های غیریکنواخت زمین و اثرات آن بر پایداری سازه‌ها را فراهم می‌کند. تاکید می‌گردد که هر

قابل ذکر است که یکی از روش‌های محاسبه میزان فرونشست زمین استفاده از داده‌های ماهواره‌ای و تکنیک تداخل سنجی راداری است. به منظور بررسی میزان هماهنگی داده‌های ماهواره‌ای با شواهد میدانی ناشی از فرونشست، اطلاعات تصاویر ماهواره‌ای برای استان البرز جمع‌آوری گردید. همچنین بر اساس تحلیل‌های روش تداخل-سنجی راداری که در قالب این تحقیق انجام شده، میزان فرونشست در استان البرز برای سال‌های ۲۰۲۳ و ۲۰۲۴ محاسبه شده و در شکل (۱۲) نمایش داده شده است. اطلاعات حاصله از این تحلیل نشان می‌دهد که منطقه تنکمان در هشتگرد بیشترین میزان فرونشست استان را دارد. شواهد صحرایی نیز بیشترین لوله‌زایی را در این منطقه ثبت کرده است. علاوه بر این مطابق شکل (۱۲) منطقه مهرشهر کرج هم با مقدار بالای فرونشست تجمعی مواجه است. شواهد صحرایی هم حاکی از ترک‌خوردگی در برخی ساختمان‌های محله احداث‌شده در مهرشهر است. با این حال منطقه اشتهارد که در شواهد میدانی شاهد شکاف‌های عمیق و طولانی بوده است، به نسبت سایر مناطق استان میزان فرونشست کمتری

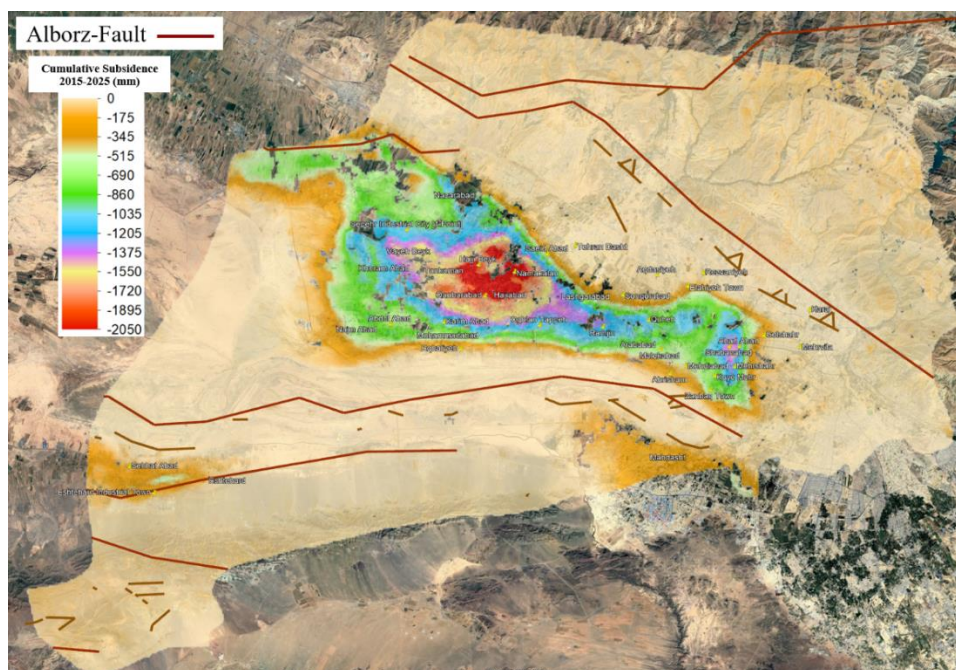
داده‌ها قرار داده و یک چارچوب استاندارد برای استخراج نرخ و الگوی فرونشست به دست می‌دهد. این دستورالعمل برای پردازش داده‌ها یک روند گام‌به‌گام را پیشنهاد می‌کند که شامل پیش‌پردازش تصاویر، تولید اینترفروگرام‌ها، حذف اثر توپوگرافی با استفاده از DEM، تصحیح اثرات جوی، بازیچی فاز (Phase Unwrapping) و استخراج نرخ و الگوی مکانی فرونشست است. در نهایت خروجی‌های کلیدی دستورالعمل نیز شامل نقشه نرخ فرونشست، نقشه تغییرمکان تجمعی و شناسایی پهنه‌های فعال فرونشستی است.

چند برخی از مناطق استان البرز در محدوده فرونشست بسیار زیاد قرار دارند، ولی نگارندگان در جریان بازدیدهای صحرایی خود مورد مهمی از خرابی سازه‌ای در اثر این میزان فرونشست پیدا نکردند. برای تهیه پهنه‌بندی ارائه شده در شکل (۱۴) نگارندگان تحقیق حاضر از معیارهای مورد توصیه توسط مراجع بین‌المللی و از جمله سی‌جی‌اس (CGS, 2014) استفاده کرده‌اند. دستورالعمل یادشده یکی از مراجع فنی معتبر در زمینه پایش و پهنه‌بندی فرونشست زمین مبتنی بر تداخل‌سنجی راداری (InSAR) محسوب می‌شود. این دستورالعمل تمرکز اصلی خود را بر مشخصات فنی پردازش

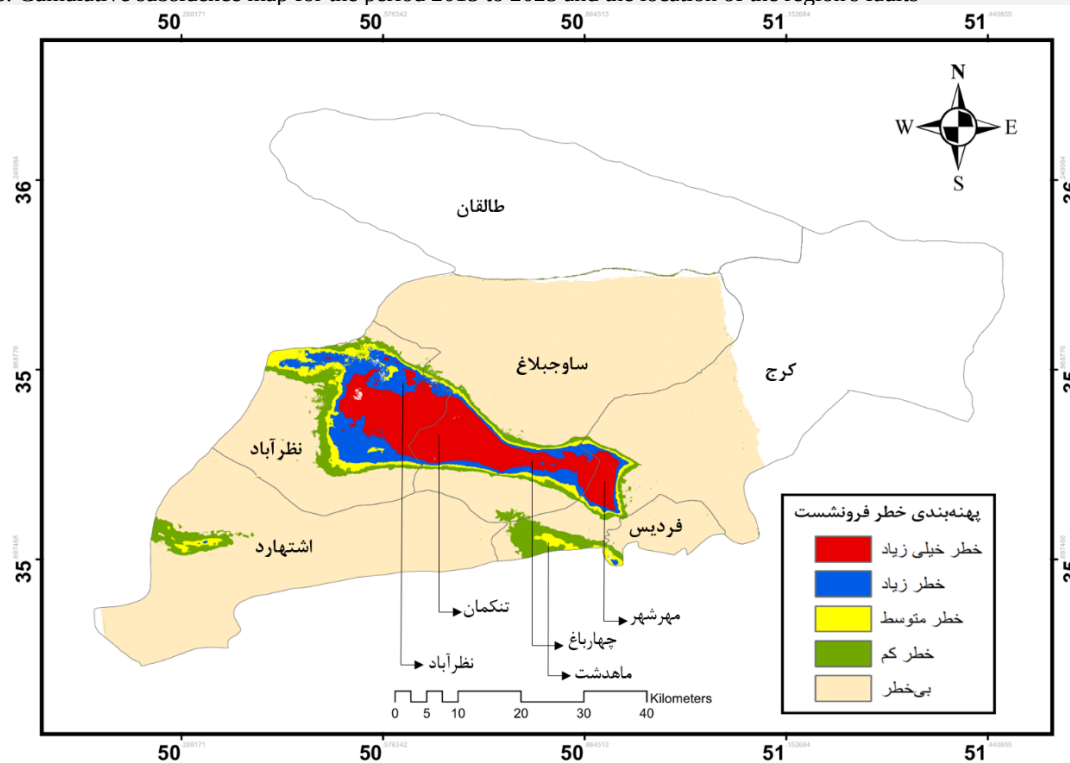


شکل ۱۲. نقشه فرونشست تجمعی برای دو سال ۲۰۲۳ و ۲۰۲۴

Fig. 12. Cumulative subsidence map for the years 2023 and 2024



شکل ۱۳. نقشه فرونشست تجمعی برای محدوده زمانی ۲۰۱۵ تا ۲۰۲۵ و موقعیت گسل‌های منطقه
Fig. 13. Cumulative subsidence map for the period 2015 to 2025 and the location of the region's faults



شکل ۱۴. پهنه‌بندی خطر فرونشست زمین استان البرز بر اساس فرونشست سال ۲۰۲۴
Fig. 14. Land subsidence risk zoning of Alborz Province based on subsidence in 2024

نتیجه‌گیری

افت شدید سطح آب زیرزمینی در استان البرز یک مسئله اساسی و مهم است و نباید مورد غفلت واقع شود. بررسی‌های انجام شده در تحقیق حاضر حاکی از آن است که در سال‌های اخیر در برخی مناطق استان به طور متوسط سالانه یک متر سطح آب زیرزمینی افت کرده‌است. در صورتی که با همین روند برداشت آب از سفره‌های زیرزمینی ادامه یابد ممکن است این مخازن به نقطه بدون بازگشت برسند و قابلیت ذخیره آب در آنها به شدت کاهش یابد و موجب ایجاد خسارت در سازه‌ها نیز بشود. تحقیق حاضر بر ارائه شواهد میدانی تمرکز داشته است. نویسندگان همچنین به طور مختصر وضعیت آب زیرزمینی، مشخصات لایه‌های خاک و میزان فرونشست در دشت‌های استان البرز را بر اساس داده‌های آزمایشگاهی، عددی و همچنین نتایج تداخل سنجی راداری ارائه نمودند. در این مقطع از تحقیق جمع‌بندی زیر حاصل شده است:

۱- مطالعات میدانی حاکی از آن است شواهد صحرایی متعددی بر وجود خطر فرونشست در استان البرز وجود دارد. ترک‌خوردگی در برخی ساختمان‌های قدیمی و لوله‌زایی و همچنین بروز شکاف‌های عمیق در زمین از جمله نشانه‌های روزمینی است که حاکی از نرخ بالای فرونشست در استان البرز دارد. با این حال تاکید می‌گردد که سازه‌های ترک خورده اغلب الزامات مهندسی را رعایت نکرده‌اند.

۲- بر اساس روش تداخل سنجی راداری فرونشست تجمعی برای سال‌های ۲۰۲۳ و ۲۰۲۴ محاسبه گردید و نقشه فرونشست بر اساس داده‌های یادشده برای استان البرز تهیه گردید. بر این اساس حداکثر فرونشست در دشت هشتگرد بیش از ۲۰ سانتی‌متر و در دشت کرج حدود ۱۵ سانتی‌متر است. همچنین در دشت اشتهارد

مقدار بیشینه فرونشست بین ۶ تا ۷ سانتی‌متر در سال است. این نقشه نشان می‌دهد که هماهنگی زیادی بین مناطق با نرخ بالای فرونشست و موقعیت علائم صحرایی فرونشست وجود دارد. به عبارت دیگر، شهرک صنعتی سپهر و روستای تنکمان که مطابق شواهد صحرایی بیشترین لوله‌زایی در آن گزارش شده است، مطابق نتایج تداخل سنجی ماهواره‌ای هم بیشترین فرونشست را داشته است. همچنین منطقه مهرشهر که با ترک‌خوردگی ساختمان‌های قدیمی مواجه است، از نرخ بالای فرونشست برخوردار است. بر این اساس می‌توان نتیجه گرفت که فرونشست عامل اصلی بروز این علائم صحرایی است.

۳- نقشه خطر فرونشست استان البرز بر اساس مقدار فرونشست در سال ۲۰۲۴ ارائه گردید. بر این اساس بسیاری از مناطق دشت‌های استان البرز در محدود خطر فرونشست بسیار زیاد هستند. با این حال و با وجود ترک‌خوردگی در بناهای قدیمی، ترک‌خوردگی و یا نشست نامتقارن در سازه‌های مهندسی‌ساز به ندرت دیده می‌شود و قابل توجه نیست. همچنین شریان‌های حیاتی در استان البرز خسارت خاصی ندیده‌اند و متاثر از فرونشست نیستند.

۴- وقوع شکاف‌های عمیق در زمین‌های محدوده فتح‌آباد (حد فاصل اشتهارد تا بوبین‌زهره) می‌تواند ناشی از فرونشست و یا از دست‌رفتن رطوبت خاک و یا ترکیبی از مکانیزم‌های مختلف ژئوتکنیکی مرتبط با خاک‌های واگرا و فرسایش‌پذیر باشد.

۵- برخی فروچاله‌ها و شکاف‌های زمین در منطقه اشتهارد در مجاورت تیرهای بتنی برق اتفاق افتاده است و می‌تواند یک مخاطره جدی برای این تاسیسات باشد.

References

- Amighpey, M., & Arabi, S. (2023). Report on land subsidence in Alborz province based on radar image processing and validation with geodetic data, National Mapping Organization, Iran-Tehran, July 2023. (in Persian).
- Burbey, T. J. (2001). Land subsidence and aquifer-system compaction near Las Vegas, Nevada, 1993-99. USGS Water-Resources Investigations Report 01-4031.
- CGS. (2014). China Geological Survey. Technical specification for data processing of ground subsidence interferometry radar. DD2014-11[S]. Beijing: China Geological Survey.

- Figuroa-Miranda, S., Villaseñor-Reyes, C. I., Tuxpan-Vargas, J., & Hernández-Madrigal, V. M. (2025). Integrated assessment of flood and subsidence hazards: A strategic approach for risk mitigation and water sustainability. *International Journal of Disaster Risk Reduction*, 121, 105429.
- Hassanzadeh, R. (2024). Evaluating the extent of land subsidence and the settlement rate in Alborz Province. Report submitted to the Academic Jihad of Alborz Province. 136. (in Persian)
- Kalantarian, F., Navaar Noveiri, M., & Sheikh, M. (2024). Geological and hydrogeological analysis of Eshtehard Aquifer subsidence and factors affecting

- the expansion of fissure. *Quaternary Journal of Iran*, 10(1, 2), 21-36.
- Kohbanani, H., Yazdani, M. R., & Hosseini, S. K. (2019). Mapping Land Subsidence Hazard through InSAR (Case study: Kashmar and Khalil Abad plain). *Desert Management*, 7(13), 65-76.
- Na, T., Kawamura, Y., Kang, S. S, & Utsuki, S. (2021). Hazard mapping of ground subsidence in east area of Sapporo using frequency ratio model and GIS. *Geomatics, Natural Hazards and Risk*, 12(1), 347-362.
- Nakhaei, M., Mohebbi Tafreshi, A., & Saadi, T. (2023). An evaluation of satellite precipitation downscaling models using machine learning algorithms in Hashtgerd Plain, Iran. *Modeling Earth Systems and Environment*, 9(2), 2829-2843.
- Norouzi, R., Eftekhari, S. M., Ahmadabadi, A. & Ali Nouri, K. (2025). Subsidence of Critical Forbidden Plains (Study Area: Eshtehard Plain). *Journal of Applied Research in Geographical Sciences*, Kharazmi University. 25(78), 66 to 89.
- Rezaei, K. (2021). Soil erosion and land subsidence effects in the vicinity of power transport lines in Eshtehard Plain using sedimentology and geoelectric studies. *Applied Sedimentology*, 8 (16), 28-44. (in Persian).