



University of Tehran Press

Environmental

Hazards

Management



Iranian Hazardology Association
Online ISSN: 2383-0530

Home Page: <https://jhsci.ut.ac.ir>

A Development-Oriented Paradigmatic Model for Land Subsidence Risk in Water Resources Management

Zahra Abdollahi¹ | Nafiseh Salahi Moghadam^{2*}

1. Soil Conservation and Watershed Management Research Department, Zanjan Agricultural and Natural Resources Research and Education Center, AREEO, Zanjan, Iran. Email: z.abdollahi@areeo.ac.ir

2. Corresponding Author, Socio-Economic and Extension Research Department, Zanjan Agricultural and Natural Resources Research and Education Center, AREEO, Zanjan, Iran. Email: n.salahi@areeo.ac.ir

ARTICLE INFO

Article type:
Research Article

Article History:

Received: 08 July 2025

Revised: 09 September 2025

Accepted: 16 September 2025

Published: 22 September 2025

Keywords:

Grounded Theory,
Groundwater,
Land Subsidence,
Qualitative Analysis,
Water Governance.

ABSTRACT

In recent decades, land subsidence has emerged as a critical environmental and management challenge in Iran's arid and semi-arid regions. Primarily caused by excessive groundwater extraction, subsidence poses risks far beyond agriculture, threatening water security, infrastructure stability, ecological balance, and community resilience. This study aims to develop a paradigmatic model of the factors influencing land subsidence in Zanjan Province, emphasizing managerial, natural, and human dimensions with special attention to the role of weak water governance. Using a qualitative approach and grounded theory methodology, data were collected through semi-structured interviews with 18 experts in the field. The data were analyzed using MAXQDA software based on a paradigmatic framework comprising causal, intervening, and contextual conditions. The findings reveal that land subsidence results from the complex interplay of multiple drivers. Causal factors include unsustainable groundwater withdrawal, lack of integrated water planning, and weak law enforcement. Intervening factors such as variable climate conditions, geological features, and socio-economic pressures like rural unemployment and low groundwater costs further intensify the problem. Contextual conditions including unstable governance structures, poor inter-agency coordination, low community participation, and insufficient infrastructure accelerate the spread of this hazard. Addressing land subsidence requires a comprehensive strategy rooted in sustainable water resource management. Key recommendations include implementing effective groundwater monitoring, promoting water-efficient irrigation, strengthening institutional capacities, enforcing relevant regulations, and enhancing community awareness and involvement. These insights provide a valuable foundation for developing policies and practical measures to mitigate land subsidence and protect groundwater resources nationwide.

Cite this article: Abdollahi, Z. & Salahi Moghadam, N. (2025). A Development-Oriented Paradigmatic Model for Land Subsidence Risk in Water Resources Management. *Environmental Hazards Management*, 12 (2), 153-165.

DOI: <http://doi.org/10.22059/jhsci.2025.398222.887>

© The Author(s).

Publisher: University of Tehran Press.

DOI: <http://doi.org/10.22059/jhsci.2025.398222.887>



Introduction

Land subsidence is a major geo-environmental issue in arid and semi-arid regions, affecting structures, infrastructure, agriculture, and groundwater. Excessive groundwater extraction, climate variability, and poor management are key accelerating factors. Despite many quantitative studies, comprehensive qualitative analyses of land subsidence remain limited. This study uses grounded theory to identify and categorize causal, contextual, and intervening factors, as well as consequences and response strategies, providing a scientific basis for effective groundwater management policies at national and regional levels.

Methodology

This exploratory qualitative study employed grounded theory with a systematic approach. Data were collected through 18 structured interviews with experts in geology, groundwater resources, water management, and urban planning. The data were analyzed using open, axial, and selective coding, and the core categories were examined within a paradigmatic model. Validity of the findings was confirmed using member checks and peer debriefing. In addition, relevant document analysis and statistical data related to groundwater table changes and subsidence rates were used to triangulate the qualitative results with quantitative evidence. This combined approach enabled deeper understanding of causal, contextual, and intervening relationships influencing subsidence.

Results

Analysis revealed four main causal categories: excessive groundwater withdrawal, geological structure, land-use changes, and weak water management. Contextual factors include inadequate monitoring infrastructure, lack of deterrent regulations, and insufficient awareness among water users, all intensifying the phenomenon. Intervening factors such as macroeconomic policies, water governance structure, and institutional support play a decisive role in weakening or strengthening causal impacts. Consequences were analyzed from physical, economic, social, and environmental perspectives. Damage to infrastructure, reduced agricultural productivity, social tensions, and ecosystem degradation were key impacts. Response strategies such as integrated water management, advanced monitoring technologies, revising governance frameworks, and community engagement were extracted. The findings highlight that the interplay of multiple factors necessitates adoption of proactive, monitoring-based policies.

Conclusion

The results indicate that tackling land subsidence requires a comprehensive, interdisciplinary, participatory approach. Emphasis on reforming agricultural water consumption, strengthening local and regional governance, enhancing monitoring systems, and expanding smart observation networks are key strategies. Moreover, given the importance of the social dimension and weaknesses in water governance, future studies should examine socio-economic aspects of land subsidence with focus on stakeholder analysis, community capacity-building, and participatory governance models. Such approaches foster acceptance of aquifer protection policies and reduce unsustainable withdrawals. Ultimately, policymakers should develop clear, actionable plans that involve stakeholders and raise public awareness to ensure sustainable groundwater use and protection.

Ethical Considerations

The authors avoided data fabrication, falsification, plagiarism, and misconduct.

Funding

This work was supported by the Iran National Science Foundation (INSF).

Conflict of Interest

The authors declare that they have no conflicts of interest related to this study.

References

- Guo, H., Hao, A., Li, W., Zang, X., Wang, Y., Zhu, J., Wang, L., & Chen, Y. (2022). *Frontiers in Environmental Science*, 10, 1053362.
- Motagh, M., Djamour, Y., Walter, T., Wetzels, H., Zschau, J., & Arabi, S. (2007). Land subsidence in Mashhad Valley, Northeast Iran: Results from InSAR, levelling and GPS. *Geophysical Journal International*, 168(2), 518–526.
- Braun, V., & Clarke, V. (2021). *Thematic analysis: A practical guide*. SAGE Publications.
- Charmaz, K. (2014). *Constructing grounded theory*. SAGE Publications.



الگوی پارادایمی ریسک فرونشست زمین با رویکرد توسعه محور در مدیریت منابع آب

زهرا عبداللہی^۱ | نفیسه صلاحی مقدم^{۲*}

۱. استادیار پژوهشی، بخش تحقیقات حفاظت خاک و آبخیزداری، مرکز تحقیقات و آموزش کشاورزی و منابع طبیعی استان زنجان، سازمان تحقیقات، آموزش و ترویج کشاورزی، زنجان، ایران. رایانامه: z.abdollahi@areeo.ac.ir
۲. نویسنده مسئول، محقق بخش تحقیقات اقتصادی - اجتماعی و ترویجی، مرکز تحقیقات و آموزش کشاورزی و منابع طبیعی زنجان، سازمان تحقیقات، آموزش و ترویج کشاورزی، زنجان، ایران. رایانامه: n.salahi@areeo.ac.ir

اطلاعات مقاله	چکیده
نوع مقاله: مقاله پژوهشی تاریخ های مقاله: تاریخ دریافت: ۱۴۰۴/۰۴/۱۷ تاریخ بازنگری: ۱۴۰۴/۰۶/۱۸ تاریخ پذیرش: ۱۴۰۴/۰۶/۲۵ تاریخ انتشار: ۱۴۰۴/۰۶/۳۱ کلیدواژه: آب های زیرزمینی، تحلیل کیفی، حکمرانی آب، فرونشست زمین، نظریه داده بنیاد.	هدف: فرونشست زمین در مناطق خشک ایران، ناشی از برداشت بی رویه آب زیرزمینی، تغییرات کاربری اراضی، ضعف حکمرانی آب و تغییرات اقلیمی، امنیت منابع آب و زیرساخت ها را تهدید می کند. این پژوهش با رویکرد داده بنیاد، اولین مدل پارادایمی کیفی فرونشست در زنجان را با تأکید بر ضعف حکمرانی آب و رویکرد توسعه محور ارائه می دهد. این مدل، با ادغام ابعاد مدیریتی و انسانی و پیشنهاد راهبردهای عملی مبتنی بر مشارکت محلی، پایداری منابع آب را تقویت می کند. روش پژوهش: این پژوهش با رویکرد کیفی و مبتنی بر روش نظریه داده بنیاد انجام گرفت. جامعه آماری شامل خبرگان و متخصصان حوزه فرونشست و مدیریت منابع آب در استان زنجان بود که از میان آنها ۱۸ نفر به صورت هدفمند انتخاب شدند. داده ها از طریق مصاحبه های نیمه ساختارمند گردآوری شد و تحلیل کیفی با استفاده از نرم افزار MAXQDA نسخه ۱۸ و براساس مدل پارادایمی شامل شرایط علی، مداخله گر و زمینه ای صورت گرفت. یافته ها: نتایج تحقیق نشان داد که فرونشست زمین ناشی از برهم کنش پیچیده مجموعه ای از عوامل است. عوامل علی شامل برداشت بی رویه از منابع آب زیرزمینی، نبود برنامه ریزی تلفیقی در مدیریت آب و ضعف در اجرای قوانین است. عوامل مداخله گر شامل شرایط اقلیمی متغیر، ویژگی های زمین شناسی و فشارهای اقتصادی - اجتماعی مانند بیکاری در مناطق روستایی و قیمت کم آب زیرزمینی است. عوامل زمینه ای مانند ساختار حکمرانی ناپایدار، ناهماهنگی دستگاه ها، مشارکت کم جوامع محلی و زیرساخت های ناکافی نیز زمینه ساز تسریع و گسترش این پدیده شده اند. نتیجه گیری: یافته ها نشان می دهد که مدیریت فرونشست تنها با رویکردی جامع و هماهنگ در چارچوب مدیریت پایدار منابع آب امکان پذیر است. نوآوری این پژوهش در معرفی نخستین مدل پارادایمی کیفی فرونشست در زنجان با تمرکز بر حکمرانی آب و رویکرد توسعه محور است که با ادغام ابعاد انسانی و مدیریتی در کنار عوامل طبیعی، راهبردهای عملی مبتنی بر مشارکت محلی را پیشنهاد می کند. این دستاورد می تواند مبنایی برای طراحی سیاست ها و اقدامات پیشگیرانه در سطح ملی و منطقه ای باشد.

استناد: عبداللہی، زهرا و صلاحی مقدم، نفیسه (۱۴۰۴). الگوی پارادایمی ریسک فرونشست زمین با رویکرد توسعه محور در مدیریت منابع آب. مدیریت مخاطرات محیطی، ۱۲ (۲)، ۱۵۳-۱۶۵.

DOI: <http://doi.org/10.22059/jhsci.2025.398222.887>

© نویسندگان ناشر: مؤسسه انتشارات دانشگاه تهران.

DOI: <http://doi.org/10.22059/jhsci.2025.398222.887>



مقدمه

افزایش جمعیت و توسعه روزافزون مصرف آب از یک سو و کاهش بارندگی و خشکسالی‌های مکرر از دیگر سو، فشار فزاینده‌ای بر منابع آبی به‌ویژه منابع آب زیرزمینی، وارد کرده است (Yi et al., 2025). این روند در بسیاری از مناطق به افت شدید سطح آب‌های زیرزمینی و در پی آن بروز پدیده فرونشست زمین منجر شده است (نژادحسینی و همکاران، ۱۴۰۳). پژوهش‌های جهانی نیز تأیید می‌کنند که برداشت بی‌رویه از منابع آب زیرزمینی ممکن است به تهی‌شدگی کامل آبخوان‌ها، کاهش ظرفیت ذخیره‌سازی، آلودگی آرسنیک، نفوذ آب شور و آسیب‌های جبران‌ناپذیر به زیرساخت‌های شهری و روستایی بینجامد (Guo et al., 2022).

امروزه فرونشست زمین به یکی از مهم‌ترین مخاطرات زیست‌محیطی در مقیاس ملی و جهانی بدل شده است و بسیاری از دشت‌های ایران و کشورهای دیگر را تهدید می‌کند (USGS, 2024؛ رنجرباروق و فتح‌زاده، ۱۴۰۲). هرچند برخلاف زلزله یا سیل، پدیده فرونشست به‌طور ناگهانی روی نمی‌دهد، اما آثار آن در بسیاری از مناطق برگشت‌ناپذیر است. تبعات این مخاطره شامل کاهش ظرفیت ذخیره‌سازی آبخوان‌ها، ایجاد شکاف‌های سطحی، تخریب سازه‌ها، آسیب به شبکه‌های حمل‌ونقل و افزایش احتمال سیلاب‌های ناگهانی بوده که از جنبه‌های زیست‌محیطی، اقتصادی و اجتماعی تأثیرات گسترده‌ای دارد (اکبریان و قهرودی‌تالی، ۱۴۰۳).

استان زنجان یکی از مناطق مواجه با بحران منابع آب زیرزمینی است که شرایط بحرانی در زمینه فرونشست زمین را تجربه می‌کند. دشت‌های اصلی این استان شامل زنجان، ابهر و خرمدره با کاهش چشمگیر سطح آب زیرزمینی مواجه‌اند و نشانه‌های بارز فرونشست در برخی نقاط مشاهده شده است (عبداللهی، ۱۴۰۴). وضعیت این استان که اقتصاد آن اغلب متکی بر کشاورزی و دامداری است، لزوم شناخت عمیق عوامل مؤثر بر فرونشست و ارائه راهکارهای مدیریتی مناسب را دوچندان کرده است.

پژوهش‌های نظری فراوانی به بررسی رابطه میان برداشت بی‌رویه از منابع آب زیرزمینی، فشردگی خاک و بروز پدیده فرونشست زمین پرداخته‌اند. نظریه‌های پایه‌ای در این زمینه شامل اصول مکانیک خاک، هیدرولوژی آب زیرزمینی و تحلیل سیستمی است (Ray-Biswas et al., 2023). مبانی نظری فرونشست ناشی از برداشت آب زیرزمینی را مطرح کرد و نشان داد که این پدیده اغلب در اثر کاهش تدریجی فشار آب منفذی در رسوبات ریزدانه و در نتیجه کاهش حجم آنها رخ می‌دهد. این نظریه همچنان پایه‌ای برای درک سازوکار فرونشست به شمار می‌رود. گالووی و باربی (۲۰۱۱) نیز با ارائه چارچوبی جامع، فرونشست را فرایندی پیچیده ناشی از تعامل عوامل هیدرولوژیکی، ژئوتکنیکی و زمین‌شناسی معرفی کردند. آنها بر اهمیت فشار آب زیرزمینی و ویژگی‌های رسوبات ریزدانه در وقوع این پدیده تأکید داشتند. شیرزایی و همکاران (۲۰۲۱) نیز رویکردی میان‌رشته‌ای برای اندازه‌گیری، مدل‌سازی و پیش‌بینی فرونشست ساحلی پیشنهاد کردند و نشان دادند که این مخاطره، پدیده‌ای چندمقیاسی است. همچنین، هرا- گارسیا و همکاران (۲۰۲۱) چارچوبی نظری برای نقشه‌برداری جهانی تهدیدهای ناشی از فرونشست ارائه کردند که تلفیق دانش ژئولوژی، هیدرولوژی، مکانیک خاک و علوم اجتماعی را ضروری می‌داند. از نظر مفهومی نیز نظریه‌های توسعه پایدار منابع آب، حکمرانی مشارکتی و تحلیل سیستمی، چارچوب‌هایی مناسب برای تبیین تعامل میان مؤلفه‌های انسانی و طبیعی در بروز مخاطره فرونشست فراهم می‌کنند. ری- بیسواس و همکاران (۲۰۲۳) بر اهمیت رویکردهای حکمرانی مشارکتی در مدیریت منابع آب تأکید کرده و ضرورت همکاری، هماهنگی و مشارکت ذی‌نفعان را به‌عنوان عناصر حیاتی مدل‌های حکمرانی آب برای مواجهه با چالش‌های پایداری جهانی مطرح کرده‌اند.

تحقیقات بین‌المللی نیز برداشت بی‌رویه آب زیرزمینی را عامل اصلی فرونشست ذکر کرده‌اند. چن و همکاران (۲۰۱۶) در پکن نشان دادند که برداشت بی‌رویه آب زیرزمینی عامل اصلی فرونشست است. آنها بر لزوم مدیریت پایدار تأکید کردند. لئو و همکاران (۲۰۱۶) بیان کردند که برداشت بیش از حد آب زیرزمینی می‌تواند سبب نفوذ آب شور، فرونشست زمین، کاهش جریان رودخانه‌ها و خشک شدن چاه‌ها شود. ژو و همکاران (۲۰۱۷) در دشت شرقی پکن نشان دادند که مناطق کشاورزی و صنعتی بیشترین نرخ فرونشست را دارند. آنها بیان کردند که تغییر کاربری زمین می‌تواند الگوی فرونشست را تحت تأثیر قرار دهد. باقری و همکاران (۲۰۲۱)، فرونشست زمین را چالشی جهانی معرفی کردند و نشان دادند که این پدیده در بیش از ۲۰۰ منطقه در

سراسر جهان مشاهده شده است و تأثیرات مخربی بر زیرساخت‌ها و اقتصاد دارد. هررا-گاریا و همکاران (۲۰۲۱) تخمین زدند که دست‌کم ۲۰ درصد از مناطق شهری جهان در حال فرونشست هستند که اغلب به دلیل استخراج آب زیرزمینی است و بیش از ۳۴ میلیون نفر را تحت تأثیر قرار می‌دهد. مطلق و همکاران (۲۰۲۱) با تأکید بر تهی‌شدگی آبخوان‌ها، فرونشست زمین را خطری انسان‌ساخت برای زیرساخت‌ها و جمعیت ساکن دشت‌های آسیب‌پذیر عنوان کردند. تحقیق آنها نشان داد که حدود ۵۶ هزار کیلومتر مربع (۳/۵ درصد) از مساحت ایران دچار فرونشست است. سازمان زمین‌شناسی آمریکا (۲۰۲۴) در گزارش جامع خود نشان داد که فرونشست زمین زمانی رخ می‌دهد که مقادیر زیادی آب زیرزمینی از انواع خاصی از سنگ‌ها مانند رسوبات ریزدانه برداشت شود. سازمان زمین‌شناسی آمریکا تأکید کرد که این پدیده در بسیاری از ایالت‌های آمریکا مشاهده شده و خسارات اقتصادی زیادی داشته است.

تحقیقات تجربی متعددی در ایران نیز عوامل مختلف مؤثر بر فرونشست زمین را بررسی کرده‌اند. تورانی و همکاران (۱۳۹۷) در پژوهش خود در گرگان، کاهش بارندگی و تراز آب زیرزمینی را عوامل اصلی فرونشست معرفی کردند. تحقیق آنها اهمیت تغییرات اقلیمی و کاهش بارندگی را در تشدید پدیده فرونشست نشان داد. قهرودی تالی و همکاران (۱۴۰۰) در دشت سبزوار نشان دادند که وجود گسل‌ها می‌تواند الگوی فرونشست را تحت تأثیر قرار دهد و بر مناطق مختلف به شکل ناهمگون اثر بگذارد. خواجه و همکاران (۱۴۰۳) عواملی مانند عمق سنگ کف، افت سطح آب، کاربری اراضی و ویژگی‌های زمین‌شناسی را مؤلفه‌های اساسی فرونشست معرفی کردند.

مرور جامع پیشینه پژوهش نشان می‌دهد که با وجود پیشرفت‌های علمی چشمگیر در شناسایی عوامل مؤثر بر فرونشست، تحقیقات موجود اغلب بر ابعاد محدودی از این پدیده متمرکز بوده‌اند. خلأ پژوهشی در معرفی مدل‌های جامع و پارادایمی که تعاملات پیچیده بین عوامل علی، مداخله‌گر و زمینه‌ای را به صورت یکپارچه تحلیل کند، به وضوح مشاهده می‌شود. همچنین به تأثیر حکمرانی و ابعاد مدیریتی در شکل‌گیری بحران فرونشست کمتر توجه شده است. این تحقیق با هدف رفع این خلأ علمی و ارائه الگوی پارادایمی جامع، سعی دارد با بهره‌گیری از رویکرد نظریه داده‌بنیاد، درک عمیق‌تری از تعاملات چندبعدی عوامل مؤثر بر فرونشست ارائه دهد و راهکارهای مدیریتی مبتنی بر شواهد میدانی پیشنهاد کند.

روش پژوهش

این پژوهش از نوع اکتشافی و مبتنی بر رویکرد کیفی است که با استفاده از روش تحلیل مضمونی و نظریه مبنایی^۱ انجام گرفته است (افسری و همکاران، ۱۳۹۶). از تحلیل مضمونی به عنوان روشی برای شناسایی، سازماندهی و تحلیل الگوهای موجود در داده‌های کیفی استفاده شده است. این روش به ویژه در مواردی مناسب است که اطلاعات موجود درباره پدیده تحت بررسی محدود باشد یا چارچوب نظری جامعی برای تبیین پدیده وجود نداشته باشد (Braun & Clarke, 2021). نظریه مبنایی، رویکردی نظام‌مند برای تولید نظریه‌ای استقرایی است که از داده‌های جمع‌آوری شده به صورت تدریجی و نظام‌مند استخراج می‌شود (Charmaz, 2014). این روش با هدف تبیین فرایندها، کنش‌ها یا تعاملات مرتبط با یک پدیده خاص، چارچوبی مفهومی ارائه می‌دهد که از داده‌های واقعی پژوهش نشأت گرفته است. در این پژوهش، از رهیافت نظام‌مند نظریه مبنایی، براساس مدل پارادایمی کوربین و اشتراوس (۲۰۱۴) استفاده شده است. این رهیافت شامل سه مرحله کدگذاری است. مرحله کدگذاری باز شامل شناسایی مفاهیم اولیه از داده‌ها و استخراج مقوله‌های اصلی، مرحله کدگذاری محوری شامل سازماندهی مقوله‌ها و ایجاد ارتباط بین آنها و زیرمقوله‌ها با تمرکز بر یک مقوله محوری و در نهایت مرحله کدگذاری انتخابی شامل یکپارچه‌سازی و پالایش مقوله‌ها برای ارائه چارچوب نظری نهایی است. اجزای مدل پارادایمی شامل شرایط علی (عوامل ایجادکننده پدیده)، پدیده اصلی (موضوع محوری)، شرایط زمینه‌ای (زمینه‌های تأثیرگذار)، شرایط مداخله‌گر (عوامل تعدیل‌کننده)، کنش‌ها/تعاملات (رفتارها و پاسخ‌ها) و پیامدها (نتایج پدیده) است. در مجموع، ۱۸ مصاحبه عمیق نیمه ساختارمند با میانگین مدت زمان ۶۰ دقیقه انجام گرفت. مشارکت‌کنندگان با نمونه‌گیری هدفمند

انتخاب شدند (رهبرقاضی و طالعی‌حور، ۱۴۰۳). نمونه‌گیری هدفمند روشی برای انتخاب افرادی است که اطلاعات غنی و مرتبط با سؤال پژوهش ارائه می‌دهند (Patton, 2014). معیارهای ورود شامل تخصص در زمین‌شناسی، هیدرولوژی، مدیریت آب یا کشاورزی، وابستگی به سازمان‌های مرتبط (دانشگاه زنجان، مرکز تحقیقات کشاورزی و منابع طبیعی استان زنجان، شرکت آب منطقه‌ای و سازمان جهاد کشاورزی استان زنجان)، دانش محلی دربارهٔ فرونشست، تنوع سوابق کاری و آمادگی برای مصاحبه بود. نمونه‌گیری تا اشباع نظری، یعنی زمانی که داده‌های جدید اطلاعات تازه‌ای به پژوهش اضافه نکردند ادامه یافت. اعتبار نمونه با بازبینی مشارکتی و ارزیابی گروه پژوهش تأیید شد. سؤالات مصاحبه با هدف شناسایی عوامل مؤثر بر پدیدهٔ فرونشست، بررسی وضعیت کنونی، عوامل تأثیرگذار و راهکارهای پیشنهادی طراحی شدند. تحلیل داده‌ها همزمان با جمع‌آوری آنها و با استفاده از رویکرد تحلیل محتوای کیفی انجام گرفت. نرم‌افزار MAXQDA 2018 برای مدیریت و تحلیل داده‌ها به کار گرفته شد (علی بابایی، ۱۳۹۷). این نرم‌افزار با افزایش دقت و سرعت در کدگذاری و سازماندهی مفاهیم و مقوله‌ها، به استخراج الگوهای معنادار کمک کرد (Kuckartz & Rädiker, 2019).

برای اطمینان از اعتبار داده‌های حاصل از مصاحبه و دقیق بودن یافته‌ها، اعتبار^۱ یا مقبولیت داده‌ها، تأییدپذیری^۲ و انتقال‌پذیری^۳ داده‌ها بررسی شد. اعتمادپذیری^۴ داده‌ها با جمع‌آوری مقایسه‌ای مستمر همزمان داده‌ها انجام گرفت که خود نوعی روش اعتماد و اعتبار داده‌هاست، چراکه مقایسه‌های بین‌گروهی و میان‌گروهی از داده‌ها موجب تقویت سطح دقت و تنوع می‌شود. برای معیار مقبولیت در این پژوهش، محقق طوری ایفای نقش کرد که مطالعه را مخدوش نکند. این امر شامل جلب اعتماد مشارکت‌کنندگان، گوش دادن دقیق و غرق شدن در داده‌ها، ایجاد تنوع در مشارکت‌کنندگان تحقیق از نظر سوابق کاری و رده‌های مختلف کاری و مصاحبه در مکان‌های انتخاب‌شده توسط مشارکت‌کنندگان بود. برای تأیید اعتبار محتوای دست‌نوشته‌های پیاده‌شده از نوار و عبارات استخراج‌شده، کدها توسط مشارکت‌کنندگان و گروه پژوهش بازخوانی شد و در یک جلسهٔ مشترک نظرات مختلف جمع‌آوری شد. برای تأمین قابلیت تعمیم یافته‌ها، از روش‌های چندگانه شامل بازبینی مشارکتی ذی‌نفعان، ارزیابی‌های مکرر توسط پژوهشگر و گروه تحقیق و اعتبارسنجی چرخشی داده‌ها استفاده شد. شایان‌ذکر است که در MAXQDA، به‌طور معمول مقولات و مفاهیم به‌عنوان واحدهای اصلی تحلیل داده‌ها استفاده می‌شوند. در فرایند تحلیل، نرم‌افزار به‌طور خودکار تعداد تکرار هر مفهوم یا مقوله را محاسبه می‌کند. هرچه یک مقوله یا مفهوم بیشتر در داده‌ها تکرار شود، رتبه بالاتری کسب می‌کند. این فرایند می‌تواند به محققان کمک کند که مشخص کنند کدام مقولات یا مفاهیم برای موضوع تحقیق برجسته‌تر و معنادارترند. برای مثال، اگر یافتن یک مفهوم به‌طور مکرر در مصاحبه‌ها یا متن‌های کیفی، می‌تواند نشان‌دهنده اهمیت آن مفهوم در زمینه تحقیق باشد. در نهایت، این رتبه‌بندی به محققان کمک می‌کند تا تمرکز بیشتری بر مفاهیم اساسی داشته باشند و نتایج خود را به‌شکل مؤثرتری تجزیه و تحلیل کنند.

یافته‌های پژوهش

طی فرایند تحلیل داده‌ها در مرحلهٔ کدگذاری باز و با بهره‌گیری از نرم‌افزار MAXQDA، واحدهای معنایی مرتبط با عوامل مؤثر بر پدیدهٔ فرونشست زمین، به‌صورت جملات یا مفاهیمی برگرفته از اظهارات مصاحبه‌شوندگان شناسایی شد. در ادامه، با کدگذاری محوری، مفاهیم اولیهٔ استخراج‌شده بازتنظیم و دسته‌بندی مجدد شدند؛ به‌عبارت دیگر، کدهای مشابه و دارای موضوع مشترک در قالب مفاهیم و مقولات جدید گروه‌بندی گردیدند. شایان ذکر است که اولویت‌بندی مفاهیم در این جدول براساس فراوانی، غنای مفهومی (عمق و کیفیت اطلاعات ارائه‌شده توسط مشارکت‌کنندگان)، موقعیت مفاهیم در ساختار نظری (نقش آنها در تبیین پدیدهٔ فرونشست) و روابط بین کدها (ارتباطات علی، زمینه‌ای و مداخله‌گر) صورت گرفته است. جدول ۱ نمایانگر مقولات عمده و مفاهیم اساسی حاصل از کدگذاری محوری در حوزه عوامل علی فرونشست زمین است که برپایهٔ تحلیل محتوای داده‌های کیفی

1. Credibility
2. Confirmability
3. Transferability
4. Dependability

تدوین شده است. یافته‌های جدول ۱ نشان می‌دهد که مفاهیم به‌صورت تجمیع‌شده در دو طبقه اصلی «عوامل طبیعی و زمین‌شناختی» و «عوامل انسان‌ساخت» ارائه شده‌اند. در میان عوامل طبیعی، ساختار زمین‌شناسی منطقه و وجود لایه‌های رسوبی تراکم‌پذیر بیشترین فراوانی را داشتند. در بخش عوامل انسان‌ساخت نیز برداشت بی‌رویه از منابع آب زیرزمینی و حفر چاه‌های غیرمجاز اصلی‌ترین مؤلفه‌های فشارزا شناسایی شدند.

جدول ۱. مقولات عمده و مفاهیم اساسی استخراج‌شده از مصاحبه‌های تخصصی در ارتباط با کدگذاری محوری عوامل علی پدیده فرونشست

رتبه	مفاهیم اساسی	مقوله‌های عمده
۵	لایه‌های رسوبی تراکم‌پذیر، تبخیری و حساس به فشار (مانند رس، گچ، نمک، آهک) در اثر کاهش آب منفذی دچار نشست می‌شوند.	ساختار زمین‌شناسی منطقه و وجود لایه‌های رسوبی تراکم‌پذیر
۲	رسوبات دانه‌ریز و خاک‌های با خاصیت فشردگی زیاد (رس و سیلت) در شرایط کاهش فشار منفذی متراکم می‌شوند.	غلبه رسوبات دانه‌ریز و رس‌های تراکم‌پذیر
۳	وجود گسل‌های فعال یا پنهان و ساختارهای تکتونیکی ناپایدار سبب گسست و نشست لایه‌های سطحی زمین می‌شوند.	گسل‌های فعال و ساختارهای تکتونیکی منطقه
۱۴	کاهش سطح ایستایی سبب تراکم بازگشت‌ناپذیر لایه‌های آبدار می‌شود.	برداشت بی‌رویه از منابع آب زیرزمینی
۴	موجب تخلیه بیش‌ازحد آبخوان‌ها و کاهش پایداری خاک می‌شود.	حفر چاه‌های غیرمجاز و عمیق
۲	بار اضافی به زمین تحمیل می‌کند و ناپایداری خاک را افزایش می‌دهد.	توسعه شهری و صنعتی بدون بررسی‌های ژئوتکنیکی کافی
۱	افزایش بار سطحی روی خاک‌های ضعیف سبب فرونشست موضعی می‌شود.	افزایش بار سطحی ناشی از ساخت‌وسازهای سنگین
۳	موجب تشدید تبخیر و کاهش نفوذپذیری خاک می‌شود.	تغییر کاربری اراضی و تخریب پوشش گیاهی و افزایش آبیاری
۱	تخریب ساختار خاک را تسهیل می‌کند و احتمال فرونشست را افزایش می‌دهد.	نبود تعادل بین دام و مرتع و چرای بی‌رویه در چراگاه‌ها

مقولات و مفاهیم اساسی استخراج‌شده از کدگذاری محوری عوامل بستر ساز در پدیده فرونشست زمین در جدول ۲ به‌صورت خلاصه ارائه شده است. در تحلیل عوامل بستر ساز، بیشترین تأکید بر ضعف در اجرای قوانین و نارسایی سیاست‌های مدیریت آب بوده است. همچنین افزایش جمعیت و فشار تقاضا مؤلفه ساختاری مهمی است که با الگوهای توسعه ناپایدار تلاقی دارد. این موضوع می‌تواند نشانه‌ای از آگاهی عمومی و تخصصی درباره اهمیت ساختارهای تصمیم‌گیری و سیاست‌گذاری در تشدید بحران فرونشست باشد. به عبارت دیگر، این عوامل الزاماً قوی‌ترین محرک‌های فنی فرونشست نیستند، اما بیشترین بازتاب ذهنی را در میان صاحب‌نظران و مطلعان محلی داشته‌اند. همچنین، اشاره‌های مکرر به تخریب منابع طبیعی و توسعه بی‌ضابطه سامانه‌های آبیاری بیانگر آن است که تغییرات کاربری زمین، تخریب پوشش گیاهی و بهره‌برداری ناپایدار از منابع خاک و آب، بخشی از زنجیره بستر ساز مورد ادراک مشارکت‌کنندگان است. این موارد با روندهایی چون کاهش نفوذپذیری خاک، افت سطح ایستایی و در نهایت فرونشست زمین ارتباط دارند. در مراتب بعد، مفاهیمی همچون ناآگاهی عمومی، ضعف زیرساخت‌های نظارتی و فنی و فشارهای اقتصادی و معیشتی نیز اگرچه با فراوانی کمتری بیان شده‌اند، همچنان از منظر مشارکت‌کنندگان زمینه‌ساز فرونشست هستند. این عوامل اغلب از نوع زمینه‌ای‌اند و در نبود سیاست‌های پیشگیرانه می‌توانند مخاطرات ناشی از بهره‌برداری ناپایدار را افزایش دهند.

در جدول ۳، عوامل مداخله‌گر مؤثر در پدیده فرونشست در پنج مقوله اصلی دسته‌بندی شده‌اند. یافته‌های جدول ۳، تأثیر زیاد عوامل انسانی را در ترکیب با متغیرهای هیدروژئولوژیکی و اقلیمی تأیید می‌کند. برداشت‌های غیراصولی و بی‌رویه از منابع آب زیرزمینی و تراکم‌پذیری لایه‌های رسوبی شواهدی از تعامل طبیعت و فعالیت انسانی هستند.

جدول ۲. مقولات و مفاهیم اساسی استخراج شده از کدگذاری محوری عوامل بستر ساز در پدیده فرونشست زمین

رتبه	مفاهیم اساسی	مقوله های عمده
۱	ضعف در اجرای قوانین حفاظت از منابع آب و نبود هماهنگی بین سازمان های متولی نبود مدیریت یکپارچه منابع آب و سیاست گذاری های متناقض سیاست های ناکارآمد در بخش کشاورزی مانند کشت محصولات آب بر و افزایش سطح زیر کشت بدون توجه به محدودیت های آبی بی توجهی به آمایش سرزمین و توسعه ناپایدار	عوامل مدیریتی و سیاستی
۱	افزایش جمعیت و تقاضای روزافزون برای آب شرب، کشاورزی و صنعت مسبب برداشت بیش از ظرفیت از منابع زیرزمینی	افزایش جمعیت و نیاز روزافزون
۲	توسعه نامتوازن و بی توجهی به آمایش سرزمین در استقرار پروژه ها نبود برنامه جامع برای مدیریت خشکسالی کمبود پژوهش های پایه و آینده نگری در حوزه منابع آب	عوامل برنامه ریزی
۲	توسعه سیستم های آبیاری بدون در نظر گرفتن ظرفیت منابع آب زیرزمینی اثرهای زیست محیطی منفی سامانه های آبیاری مانند افزایش شوری خاک و افت سطح ایستابی	توسعه سامانه های آبیاری
۵	کمبود آگاهی عمومی درباره پیامدهای فرونشست مقاومت در برابر اصلاح الگوهای مصرف ضعف مشارکت ذی نفعان در مدیریت منابع آب	عوامل اجتماعی
۵	کمبود شبکه های پایش منابع آب و فرونشست فرسودگی و ناکارآمدی زیرساخت های آبیاری ضعف در اجرای پروژه های تغذیه مصنوعی آبخوان ها	عوامل زیرساختی
۶	فشار اقتصادی برای برداشت بیشتر از منابع آب زیرزمینی نبود توان مالی برای به روز رسانی سامانه های آبیاری یارانه انرژی و قیمت کم آب وابستگی معیشتی به کشاورزی آب بر	عوامل اقتصادی
۴	افزایش دام و فشار مضاعف بر مراتع در نتیجه کاهش پوشش گیاهی و نفوذ پذیری زمین تخریب پوشش گیاهی و مراتع کاهش نفوذ آب و تغذیه طبیعی سفره های زیرزمینی در پی نابودی اکوسیستم ها	تخریب منابع طبیعی

جدول ۳. مقولات و مفاهیم اساسی استخراج شده از کدگذاری محوری عوامل مداخله گر در پدیده فرونشست زمین

رتبه	مفاهیم اساسی	مقوله های عمده
۵	افت سطح آب زیرزمینی، برداشت بیش از حد از آبخوان ها، کاهش تغذیه طبیعی، ضریب ذخیره و هدایت هیدرولیکی، ضخامت لایه آبدار	عوامل هیدروژئولوژیکی
۲	تراکم پذیری لایه های رسی، درصد و ضخامت رس، تخلخل اولیه، تنش مؤثر و مقاومت برشی، وجود رس های حساس مانند مونت موریلونیت	عوامل ژئوتکنیکی
۵	خشکسالی های بی درپی، کاهش نزولات جوی، افزایش دما و تبخیر، تغییر در الگوی بارش	عوامل اقلیمی
۲	ساختار لایه بندی خاک، شرایط زمین شناسی منطقه، عمق سنگ بستر	عوامل زمین شناسی
۸	برداشت بی رویه، توسعه شهری و صنعتی، تغییر کاربری اراضی، چاه های غیرمجاز، آبیاری غرقابی، سیاست های ناکارآمد، نا آگاهی عمومی، نبود تغذیه مصنوعی و احیای مراتع	عوامل انسانی
۳-۱	نبود اشتغال جایگزین برای کشاورزان، قیمت کم آب زیرزمینی نسبت به ارزش واقعی آن	عوامل اقتصادی-اجتماعی

نبود سیاست های کنترلی مؤثر، نا آگاهی بهره برداران و کم بودن هزینه دسترسی به آب، سبب اعمال فشار بیش از ظرفیت بر آبخوان ها شده اند. به ویژه زمانی که این فشارها در مناطق پرتراکم سکونتگاهی مانند روستاهای متمرکز بر یک دشت اعمال می شود شرایط را برای بروز و تشدید فرونشست فراهم می سازد.

مقولات و مفاهیم اساسی استخراج شده از کدگذاری محوری پیامدهای پدیده فرونشست زمین در جدول ۴ ارائه شده است. این پیامدها در پنج بُعد زمین شناسی، اقتصادی، زیست محیطی، اجتماعی و آب شناسی تفکیک شده اند. ترک خوردگی سازه ها، کاهش ظرفیت آبخوان ها و بیابان زایی از نتایج غالب فرونشست است.

جدول ۴. مقولات و مفاهیم اساسی استخراج شده از کدگذاری محوری پیامدهای پدیده فرونشست زمین

رتبه	مفاهیم اساسی	مقوله‌های عمده
۲	فشردگی لایه‌های زیرسطحی نشست کرده در اثر استخراج مداوم آب‌های زیرزمینی و کاهش فشار هیدرواستاتیک در لایه‌های خاک و سنگ	اثرهای زمین‌شناختی
۱	نیاز به ترمیم سطح زمین برای مطابقت با شرایط محلی	
۶	ایجاد ترک‌ها یا گسیختگی‌های سطح زمین و به تبع آن نابودی باغ‌ها و مزارع	
۳	ترک خوردگی یا خم شدن لوله‌های چاه در اثر ایجاد فشار و تنش	اثرهای اقتصادی
۲	آسیب به سازه‌های زهکشی، فرسودگی یا تغییر شیب لوله‌های زهکشی و انسداد و کاهش کارایی آنها	
۱	تخریب زیرساخت‌های تاریخی و فرهنگی با توجه به حساسیت آنها به تغییرات زیرسطحی	
۵	آسیب به زیرساخت‌های سطحی و زیرزمینی و افزایش هزینه‌های تعمیرات	
۳	تخریب یا شکست خطوط لوله	
۶	تخریب و آسیب به سازه‌های عمرانی (ساختمان‌ها، جاده‌ها، پل‌ها و راه‌آهن‌ها) و افزایش خطر برای ساکنان مناطق درگیر	
۱	کاهش ارزش اراضی مجاور	اثرهای زیست‌محیطی
۳	تغییر در ویژگی‌های اختلاط هیدرولوژیکی (مانند تداخل آب شور با شیرین)	
۲	تغییر در تعامل شیمیایی آب-سنگ در سفره‌های آب یا آبخوان‌های مجاور، ورود آلاینده‌های مختلف از طریق شکاف‌های ایجاد شده و به تبع آن تغییر در شرایط فیزیکی و شیمیایی لایه‌های زیرسطحی	
۱	افزایش پتانسیل سیلابی با کاهش ظرفیت نفوذ زمین	
۲	آب‌گرفتگی اراضی کشاورزی با کاهش ظرفیت ذخیره آب و تغییر مسیر جریان در اثر ایجاد ناهمواری‌های سطحی	
۲	کاهش کیفیت خاک کشاورزی به دلیل تغییر در ساختار فیزیکی و شیمیایی خاک	
۴	بیابان‌زایی، کاهش اراضی کشاورزی و خارج شدن اراضی از چرخه تولید	کاهش کیفیت و فرسایش خاک
۵	کاهش تنوع زیستی و تخریب زیستگاه‌ها، از بین رفتن برخی اکوسیستم‌های کشاورزی و کاهش تنوع گیاهان بومی در مناطق خشک و نیمه‌خشک	
۲	تغییر در تخلخل و هدایت هیدرولیکی	اثرهای آب‌شناختی
۱	تغییر در میدان تنش در خاک و سنگ‌های زیرسطحی و به تبع آن تغییرات فیزیکی و مکانیکی در مواد زمین‌شناسی	
۱	تغییر در میدان نشست آب	
۲	تغییر در رفتار و ویژگی‌های رطوبتی خاک و سنگ‌ها در منطقه اشباع نشده	
۶	کاهش ظرفیت ذخیره‌سازی آبخوان‌ها	اثرهای اجتماعی
۳	افزایش مهاجرت و به تبع آن افزایش حاشیه‌نشینی و ناهنجاری‌های اجتماعی	
۴	به خطر افتادن امنیت غذایی و وابستگی به کشورهای دیگر	
۱	به خطر افتادن امنیت شغلی افراد و کاهش درآمد	
۲	کاهش کیفیت زندگی روستائیان با کاهش منابع آب و زمین‌های زراعی	

راهبردهای اساسی برای پیشگیری و کنترل پدیده فرونشست زمین در جدول ۵ به صورت خلاصه ارائه شده است. این راهبردها در شش مقوله اصلی شامل مدیریت منابع آب، کشاورزی پایدار، قوانین و نظارت، اقدامات فرهنگی و اجتماعی، ملاحظات اقتصادی و مطالعات پژوهشی طبقه‌بندی شده‌اند. نتایج نشان می‌دهد که برای مقابله با بحران فرونشست، هیچ راهکار تک‌بعدی کافی نیست و ترکیب راهبردهای مدیریت منابع آب، اصلاح قوانین و کشاورزی پایدار همراه با آموزش و پژوهش، رویکرد چندبعدی لازم را ترسیم می‌کند.

جدول ۵. مقولات و مفاهیم اساسی استخراج شده از کدگذاری محوری راهبردهای اساسی برای پیشگیری و کنترل پدیده فرونشست زمین

رتبه	مفاهیم اساسی (راهبردهای کلیدی)	مقوله‌های عمده
۱۰	تغذیه مصنوعی آبخوان‌ها، بازنگری مجوزها، نصب کنتور هوشمند، آبیاری نوین، بازچرخانی پساب، احیای قنوت	مدیریت منابع آب
۸	تغییر الگوی کشت، کشاورزی دقیق، توسعه گلخانه، آموزش کشاورزان، کشت مقاوم به خشکی	کشاورزی پایدار
۱۱	قوانین سختگیرانه برداشت، تشویق صرفه‌جویی، کنترل چاه‌های غیرمجاز، اصلاح تعرفه، مشارکت ذی‌نفعان	قانونی و نظارتی
۶	ارتقای آگاهی عمومی، مشارکت محلی، تشکلهای آبرابران، آموزش صرفه‌جویی، ترویج فرهنگ مصرف بهینه، توانمندسازی جوامع محلی	اجتماعی و فرهنگی
۴	مشوق‌های مالی، حمایت از فناوری کم‌مصرف، اعتبارات نوسازی آبیاری، قیمتگذاری واقعی آب، حمایت از صنایع کم‌آبر	اقتصادی
۱۲	مطالعات هیدروژئولوژی، پایش مستمر آبخوان، تحقیق در روش‌های نوین، ارزیابی اقدامات، بومی‌سازی تجارب جهانی، مدل‌سازی و شبیه‌سازی	پژوهشی و مطالعاتی

بحث

براساس مدل پارادایمی حاصل از کدگذاری محوری مشخص شد که پدیده فرونشست زمین، نتیجه برهم‌کنش پیچیده سه سطح علی، مداخله‌گر و زمینه‌ای است. این نتایج حاکی از آن است که ویژگی‌های زمین‌شناسی، ساختار لایه‌های رسوبی و شرایط اقلیمی منطقه اثر مهمی در پتانسیل فرونشست دارند، اما فشار عوامل انسانی و مدیریتی، به‌ویژه برداشت بی‌رویه و ناکارآمدی سیاست‌های حفاظت از منابع آب، اثر تقویت‌کننده و تسریع‌کننده دارند. عوامل مداخله‌گر، از جمله خشکسالی‌های پیاپی و تغییرات اقلیمی، روند افت سطح ایستابی و کاهش تغذیه آبخوان‌ها را تشدید کرده‌اند و در نتیجه، وابستگی به منابع زیرزمینی به‌عنوان تنها منبع در دسترس افزایش یافته است. در این میان، توسعه شهری نامتوازن و بدون ارزیابی ظرفیت‌های بوم‌شناختی، با تخریب پوشش گیاهی، نفوذناپذیری خاک و افزایش بارگذاری جمعیتی، اثر تشدید بر این فرایند دارد. در سطح ژئوتکنیکی، خاک‌های ریزدانه و ضخامت آبرفت‌ها شدت فرونشست را افزایش می‌دهند. این یافته‌ها نشان می‌دهد که پدیده فرونشست، محصول برهم‌کنش پیچیده نیروهای انسانی، اقلیمی، زمین‌شناسی و مدیریتی است. فشارهای انسانی، به‌ویژه بهره‌برداری بی‌رویه، در نبود حکمرانی پایدار و آگاهی‌بخشی کافی، مناطق دارای پتانسیل زمین‌شناختی را مستعد بروز بحران کرده‌اند.

روابط علی میان عوامل علی (برداشت بی‌رویه آب زیرزمینی، تغییرات کاربری اراضی)، زمینه‌ای (ضعف حکمرانی آب، نبود هماهنگی نهادی) و مداخله‌گر (تغییرات اقلیمی، فشارهای اقتصادی-اجتماعی) در مدل پارادایمی کوربین و اشتراوس (۲۰۱۴) تحلیل شد. برای مثال، ضعف اجرای قوانین (زمینه‌ای) برداشت غیرمجاز (علی) را تسهیل کرده و خشکسالی‌های مکرر (مداخله‌گر) آن را تشدید می‌کند. ارائه اولین مدل پارادایمی کیفی فرونشست در زنجان با تمرکز بر حکمرانی آب و رویکرد توسعه‌محور، ادغام ابعاد مدیریتی و انسانی در چارچوبی توسعه‌محور، پیشنهاد راهبردهای عملی مبتنی بر مشارکت محلی که فراتر از تحلیل‌های فنی است، از نوآوری‌های این پژوهش نسبت به پژوهش‌های پیشین (رنجرباروق و فتح‌زاده، ۱۴۰۲) است. مقایسه با پژوهش‌های پیشین (مانند مطلق و همکاران، ۲۰۰۷؛ باقری و همکاران، ۲۰۲۱؛ گو و همکاران، ۲۰۲۲) نشان می‌دهد که ویژگی‌های زمین‌شناسی و فشارهای انسانی (مانند برداشت بی‌رویه) به‌صورت توأم فرونشست را تسریع می‌کنند. در سطح حکمرانی، ضعف در سیاستگذاری یکپارچه و نبود پایش و کنترل کافی، از عوامل مهم شناسایی شد که با یافته‌های افسری و همکاران (۲۰۱۸) و رهبرقاضی و طالعی حور (۲۰۲۴) همخوانی دارد. این پژوهش‌ها نشان می‌دهند که ناهماهنگی نهادی، تضاد سیاست‌های آب و کشاورزی و غفلت از ظرفیت بوم‌شناختی، زمینه‌ساز تشدید بحران است. در سطح مداخله‌گر نیز چن و همکاران (۲۰۱۶) و شیرزایی و همکاران (۲۰۲۱) تأیید می‌کنند که تغییرات اقلیمی و الگوی بارش، با کاهش تغذیه طبیعی آبخوان‌ها، سرعت و گستره فرونشست را افزایش می‌دهد. از منظر پیامدها، این پژوهش ابعاد زمین‌شناختی، اقتصادی، اجتماعی و زیست‌محیطی فرونشست را برجسته می‌کند (Zhou et al., 2017). این پیامدها تأکید می‌کند که فرونشست تنها مسئله‌ای ژئوتکنیکی نیست، بلکه بر زیرساخت‌ها، معیشت روستایی، امنیت غذایی و حتی تاب‌آوری شهری تأثیر عمیق دارد (سازمان زمین‌شناسی آمریکا، ۲۰۲۳). در سطح سیاستگذاری، نتایج بر چند نکته اساسی تأکید دارند: ۱. مدیریت منابع آب باید تلفیقی از داده‌های هیدروژئولوژیکی، تحلیل‌های زمین‌شناسی و اطلاعات اجتماعی باشد. گالووی و باربی (۲۰۱۱) نیز در پژوهش خود این یافته را تأیید می‌کنند؛ ۲. اصلاح سیاست‌های ناکارآمد کشاورزی، به‌ویژه تغییر الگوی کشت و استفاده از روش‌های نوین آبیاری، همراه با مشوق‌های اقتصادی و نظارت سختگیرانه ضروری است؛ ۳. توسعه

زیرساخت‌های پایش، از نصب کنتور هوشمند تا شبکه‌های آنلاین سطح ایستابی، باید با هدف پایش لحظه‌ای وضعیت منابع آب انجام گیرد. این رویکرد در پژوهش‌های پولند (۱۹۸۴) و هررا-گارسیا و همکاران (۲۰۲۱) نیز موفقیت‌آمیز ارزیابی شده است؛ ۴. ارتقای آگاهی بهره‌برداران محلی و مشارکت جوامع ذی‌نفع، پیش‌شرط موفقیت هر برنامه پیشگیرانه خواهد بود؛ موضوعی که افسری و همکاران (۲۰۱۸) در مدل حکمرانی مشارکتی خود بر آن تأکید کرده‌اند. پژوهش‌های پیشین نیز نشان داده‌اند که سیاست‌های بخشی و کوتاه‌مدت، بدون رویکرد نظام‌مند و سازگار با تغییرات اقلیمی و اجتماعی، نه تنها کارآمد نیستند، بلکه بحران را تشدید خواهند کرد (Motagh et al., 2007؛ تورانی و همکاران، ۱۳۹۷). بنابراین، راهبرد مؤثر برای مهار فرونشست، مدل پارادایمی توسعه‌محور فرونشست زمین است که به صورت یکپارچه و چندسطحی مدیریت منابع آب، اصلاح ساختار حکمرانی، افزایش شفافیت داده‌ها، مشارکت اجتماعی و اقدامات سازگار با اقلیم را در بر گیرد.

نتیجه‌گیری

مدل مفهومی نشان می‌دهد که فرونشست زمین در ایران ناشی از تعامل پیچیده عوامل طبیعی، انسانی و مدیریتی است. برداشت بی‌رویه و غیرمجاز آب‌های زیرزمینی، افزایش جمعیت، توسعه کشاورزی سنتی و نبود الگوی صحیح مصرف، فشار بی‌سابقه‌ای بر سفره‌های آب وارد کرده است. یافته‌ها حاکی است که فرونشست زمین در زنگان نتیجه همین تعامل‌هاست و ضرورت سیاست‌گذاری یکپارچه و مشارکتی برای حفاظت از منابع آب و کاهش پیامدهای اقتصادی، اجتماعی و زیست‌محیطی را برجسته می‌کند. تغییر کاربری اراضی و ضعف حکمرانی نیز این بحران را تشدید کرده و همراه با خشکسالی و تغییر اقلیم، سرعت فرونشست را افزایش داده‌اند.

این پژوهش با معرفی مدل پارادایمی توسعه‌محور نشان می‌دهد که تعامل برداشت بی‌رویه آب، ضعف حکمرانی و تغییرات اقلیمی، ضرورت مدیریت یکپارچه منابع آب و کاهش فرونشست در زنگان را تأیید می‌کند. مدیریت پایدار منابع آب، به‌ویژه کنترل برداشت از سفره‌های زیرزمینی، باید در اولویت سیاست‌گذاری باشد. بازنگری در سیاست‌های بهره‌برداری، اصلاح الگوی کشت به سمت محصولات کم‌آبر و توسعه زیرساخت‌های پایش از اقدامات مهم برای کنترل روند فرونشست به شمار می‌روند. ارتقای آگاهی ذی‌نفعان به‌ویژه کشاورزان، اثر مهمی در تغییر رفتار مصرفی و افزایش تاب‌آوری مناطق دارد. در این زمینه، پرهیز از اقدامات مقطعی و حرکت به سوی سیاست‌های جامع و هماهنگ ضروری است. اصلاح تعرفه‌های آب، بازتعریف حقوق بهره‌برداری و تدوین قوانین بازدارنده برداشت غیرمجاز باید به‌طور جدی پیگیری شود. تقویت شبکه‌های پایش و استفاده از داده‌های مکانی دقیق، زیرساخت لازم برای مدیریت جامع حوضه‌های آبخیز را فراهم می‌کند. مشارکت فعال همه ذی‌نفعان، از کشاورزان تا تشکلهای مردمی، در قالب حکمرانی چندسطحی می‌تواند به تحقق مدیریت پایدار منابع طبیعی کمک کند. نظر به اهمیت بعد اجتماعی و ضعف ساختار حکمرانی آب، توصیه می‌شود که در پژوهش‌های آینده، ابعاد اجتماعی و اقتصادی فرونشست با تأکید بر تحلیل ذی‌نفعان و ظرفیت‌سازی جوامع محلی بررسی شود. این رویکرد می‌تواند به پذیرش بیشتر سیاست‌های حفاظت از آبخوان‌ها و کاهش برداشت‌های بی‌رویه کمک کند. در نهایت، تنها با اتخاذ رویکرد جامع و مبتنی بر شواهد علمی می‌توان روند رو به گسترش فرونشست را کنترل کرد و تاب‌آوری مناطق آسیب‌پذیر را افزایش داد. چنین رویکردی باید مبنای سیاست‌گذاری آینده‌نگر در مدیریت منابع طبیعی کشور قرار گیرد.

ملاحظات اخلاقی

پیروی از اصول اخلاق پژوهش

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

حامی مالی

این مقاله برگرفته از نتایج یک طرح پژوهشی است که با حمایت مالی بنیاد ملی علم ایران انجام گرفته است.

تعارض منافع

نویسندگان این مقاله تعارض منافع ندارند.

منابع

- [۱] افسری، عبدالحمید؛ حاجی ناصری، سعید؛ فاضلی، محمد؛ و فیرجی، داود (۱۳۹۶). مدل داده بنیاد بررسی جامعه شناختی حکمرانی آب در بحران دریاچه ی ارومیه. *مطالعات راهبردی سیاستگذاری عمومی*، ۷(۲۵)، ۵۳-۷۲.
- [۲] اکبریان، مرتضی؛ و قهرودی تالی، منیژه (۱۴۰۳). تحلیل محیطی فرونشست زمین در دشت اسدآباد همدان و مخاطرات آن. *مدیریت مخاطرات محیطی*، ۱۱(۱)، ۵۷-۷۲.
- [۳] تورانی، مرجان؛ آق اتابای، مریم؛ و روستایی، مه آسا (۱۳۹۷). مطالعه فرونشست در شهر گرگان با استفاده از روش تداخل سنجی راداری. *آمایش جغرافیایی فضا*، ۱(۲۷)، ۱۱۷-۱۲۸.
- [۴] خواجه، محمد؛ چوقی، بایرام کمکی؛ رضایی، محسن؛ بردی شیخ، واحد؛ و عبادی، لادن (۱۴۰۳). ارزیابی و مدل سازی مکانی خطر فرونشست زمین با استفاده از مدل LiCSBAS و الگوریتم جنگل تصادفی (مطالعه موردی: دشت مرودشت-خرامه). *علوم آب و خاک*، ۲۸(۲)، ۹۷-۱۲۰.
- [۵] رنجبرباروق، زهرا؛ و فتح اله زاده، محمد (۱۴۰۲). بررسی ارتباط فرونشست زمین و تغییرات تراز آب زیرزمینی با استفاده از تداخل سنجی راداری (مطالعه موردی: شهر مشهد). *پژوهش های ژئومورفولوژی کمی*، ۱۲(۲)، ۲۱۴-۲۲۹.
- [۶] عبداللهی، زهرا (۱۴۰۴). *ارزیابی فرونشست زمین در دشت زنجان و ابهر با تأکید بر خصوصیات هیدروژئولوژی آبخوان (بررسی آسیب ها و ارائه راهکارها)*. طرح تحقیقاتی، مرکز تحقیقات، آموزش و ترویج کشاورزی و منابع طبیعی زنجان.
- [۷] علی بابایی، یحیی (۱۳۹۷). *مکس کیودا ۱۱ (هنر تحلیل متن)*، تهران: علمی و فرهنگی کاتب.
- [۸] قاضی، محمودرضا؛ و طالعی حور، رهبر (۱۴۰۳). دلایل و پیامدهای بحران آب در ایران: ارائه یک روش نظریه پردازی داده بنیاد. *راهبرد*، ۳۳(۳)، ۱-۱۲.
- [۹] قهرودی تالی، منیژه؛ علی نوری، خدیجه؛ و ریوندی، هما (۱۴۰۰). تحلیل عوامل مؤثر بر فرونشست در دشت سبزوآر. *اطلاعات جغرافیایی سپهر*، ۳۰(۱۱۷)، ۱۶۵-۱۸۰.
- [۱۰] نژادحسینی، رقیه؛ مقیمی، ابراهیم؛ گورابی، ابوالقاسم؛ حسینی، موسی؛ و جعفریگللو، منصور (۱۴۰۳). ارزیابی فرونشست زمین در منطقه تخت جمشید و مخاطرات آن. *مدیریت مخاطرات محیطی*، ۱۱(۳)، ۲۲۵-۲۴۲.
- [11] Bagheri-Gavkosh, M., Hosseini, S., Ataie-Ashtiani, B., Sohani, Y., Ebrahimian, H., Morovat, F., & Ashrafi, S. (2021). Land subsidence: A global challenge. *Science of the Total Environment*, 778, 146193.
- [12] Braun, V., & Clarke, V. (2021). *Thematic analysis: A practical guide*, SAGE Publications.
- [13] Charmaz, K. (2014). *Constructing grounded theory*, SAGE Publications.
- [14] Chen, M., Tomás, R., Li, Z., Motagh, M., Li, T., Hu, L., Gong, H., Li, X., Yu, J., & Gong, X. (2016). Imaging land subsidence induced by groundwater extraction in Beijing (China) using satellite radar interferometry. *Remote Sensing*, 8(6), 468.
- [15] Corbin, J., & Strauss, A. (2014). *Basics of qualitative research: Techniques and procedures for developing grounded theory*, SAGE Publications.
- [16] Galloway, D., & Burbey, T. (2011). Review: Regional land subsidence accompanying groundwater extraction. *Hydrogeology Journal*, 19(8), 1459-1486.
- [17] Guo, H., Hao, A., Li, W., Zang, X., Wang, Y., Zhu, J., Wang, L., & Chen, Y. (2022). *Frontiers in Environmental Science*, 10, 1053362.
- [18] Herrera-García, G., Ezquerro, P., Tomás, R., Béjar-Pizarro, M., López-Vinielles, J., Rossi, M., Mateos, Rosa M.; & others (2021). Mapping the global threat of land subsidence. *Science*, 371(6524), 34-36. Kuckartz, U., & Rädiker, S. (2019). *Analyzing qualitative data with MAXQDA*, Springer.
- [19] Liu, Y., Huang, H., Liu, Y., & Bi, H. (2016). Linking land subsidence over the Yellow River Delta, China, to hydrocarbon exploitation using multi-temporal InSAR. *Natural Hazards*, 84(1), 271-291.
- [20] Motagh, M., Djamour, Y., Walter, T., Wetzel, H., Zschau, J., & Arabi, S. (2007). Land subsidence in Mashhad Valley, Northeast Iran: Results from InSAR, levelling and GPS. *Geophysical Journal International*, 168(2), 518-526.
- [21] Patton, M.Q. (2014). *Qualitative research & evaluation methods: Integrating theory and practice*, SAGE Publications.
- [22] Poland, J. (1984). *Guidebook to studies of land subsidence due to ground-water withdrawal*. UNESCO.
- [23] Ray Biswas, R., Raj, S., Yeboah, G., & Rahman, A. (2023). Urban water security: Water supply and demand management strategies in the face of climate change. *Urban Water Journal*, 20(6), 723-737.

- [24] Shirzaei, M., Freymueller, J., Törnqvist, T., Galloway, D., Dura, T., & Minderhoud, P. (2021). Measuring, modelling and projecting coastal land subsidence. *Nature Reviews Earth & Environment*, 2(1), 40–58.
- [25] United States Geological Survey (2024). *Land subsidence in the United States: Geological Survey*, Circular 1182. U.S. Geological Survey, Reston, VA.
- [26] Yi, X., Wang, L., Ci, H, Wang, R., Yang, H., & Yan, Z. (2025). Monitoring of land subsidence and analysis of impact factors in the Tianshan North Slope urban agglomeration. *Land*, 14(1), 202.
- [27] Zhou, C., Gong, H., Chen, B., Li, J., Gao, M., Zhu, F., Chen, W., & Liang, Y. (2017). InSAR time-series analysis of land subsidence under different land use types in the Eastern Beijing Plain, China. *Remote Sensing*, 9(4), 380.