



Sustainability of Isfahan's Historical and Tourism Attractions Under the Threat of Land Subsidence: An Analysis of Geospatial Driving Factors

Shohreh Omid ¹, Hojat Sadeghi ²*, Rahman Zandi ³, Faryad Parhiz ⁴

1. Master's student in Remote Sensing and GIS, Faculty of Geographical Sciences and Planning, University of Isfahan, Isfahan, Iran

2. Assistant Professor, Department of Physical Geography, Faculty of Geographical Sciences and Planning, University of Isfahan, Isfahan, Iran

3. Associate Professor, Department of Physical Geography, Faculty of Geographical Sciences and Planning, University of Isfahan, Isfahan, Iran

4. PhD in Geography and Urban Planning, Faculty of Geographical Sciences and Planning, University of Isfahan, Isfahan, Iran.

*Corresponding author, Email: H.Sadeghi@geo.ui.ac.ir

Keywords:

Geographical Factors, Land Subsidence, Stability, Historical and Touristic Heritage and Attractions.

Introduction

Tourism is considered one of the most significant economic resources in many regions, and attention to its various associated dimensions is essential. In this regard, the study of land subsidence and the geographical factors influencing it particularly in terms of its impact on historical monuments and tourist attractions requires a comprehensive approach. The urgency of this research is further underscored by recent reports of damage to numerous historical structures across different regions of the country caused by subsidence. In some cases, the appearance of wall cracks, subsiding foundations, and tilting buildings without any apparent external cause suggests the presence of a phenomenon unfolding within the deeper layers of the earth. If these changes are left unaddressed by scientific and managerial action, a significant portion of the nation's cultural heritage could be lost in the not-so-distant future. In this context, the present study aims to analyze the geographical factors contributing to land subsidence and its effects on the stability of historical and touristic structures, focusing on the city of Isfahan. As one of Iran's cultural and civilizational hubs, Isfahan hosts hundreds of historical buildings from various periods, particularly the Safavid era. The location of these monuments in plains that are highly vulnerable to subsidence highlights the importance of identifying the underlying causes and the resulting consequences. Although Isfahan has long been a central destination in Iran's tourism sector and has received considerable attention from planners, it appears that the management of geomorphological hazards such as land subsidence remains underdeveloped. Therefore, this study seeks to scientifically examine the role of geographical factors in the formation of land subsidence and to analyze its impact on the historical and touristic heritage of the city.

Methodology

The research method is descriptive-analytical in nature and applied in terms of its objective. It examines the relationship between land subsidence and the influence of geographical factors on its development in historical and touristic structures of Isfahan city. The data used in this study are spatial in nature. Initially, in order to identify the geographical factors, a review of library sources was conducted. Then, in the second stage, the data and information layers for each factor were prepared. The geographical data and factors examined include elevation, slope, precipitation, temperature, traffic, population, distance from metro lines, distance from the river, and groundwater levels. This study is designed in a five-step process, with each step carefully executed for a specific purpose. In the first step, the researcher extracted the variables and factors influencing land subsidence. Then, in the second step, the conditions of Isfahan city and parameters such as rainfall, population, and land use were considered. In the third stage, the required data were collected from relevant websites and official organizations. In the fourth

Received:

26/Jul/2025

Revised:

18/Sep/2025

Accepted:

21/Oct/2025



stage, the amount and condition of subsidence in Isfahan city especially in historical and touristic areas were estimated using SNAP software and satellite data from the Alaska website. Finally, in the fifth stage, the relationship between geographical factors and the extent of land subsidence was analyzed using multiple linear regression.

Findings

The analysis of multiple linear regression data over the period 2016 to 2024 reveals that land subsidence in the historical and touristic zones of Isfahan has been influenced by various geographical factors, with the nature and intensity of these effects changing over the years. Broadly speaking, three major categories of influencing factors have played a key role in the occurrence and intensification of subsidence: human factors (population and traffic), topographic characteristics (land slope), and the status of groundwater resources. During this nine-year period, population growth and urban traffic representing physical and anthropogenic pressures on the land have consistently shown a positive and statistically significant correlation with subsidence. This underscores the impact of urban development activities and increasing population density on ground instability, especially in historical areas, where outdated and fragile urban infrastructure is common. The pressure from heavy vehicle movement and vibrations caused by traffic can exacerbate subsidence and damage historical structures. On the other hand, the topographic features of the terrain, particularly slope, have emerged as a critical natural factor that has maintained a significant direct relationship with subsidence in most years. Steeper slopes, due to their geotechnical sensitivity and greater susceptibility to soil displacement, have been more vulnerable to subsidence. This highlights the need for particular attention to the location and preservation of historical structures in geologically sensitive areas.

Moreover, the role of groundwater resources especially the decline in groundwater levels—has repeatedly appeared in the data as a decisive factor in subsidence intensification. Groundwater depletion, which may result from over-extraction, reduced precipitation, or climate change, leads to a reduction in pore water pressure and an increase in soil compaction, thereby accelerating land subsidence—posing a serious risk to historical sites. Other factors, such as proximity to rivers and metro stations, have shown a statistically significant correlation with subsidence in some years, indicating the role of spatial location and urban infrastructure in this phenomenon. Specifically, proximity to metro lines has, in certain cases, been associated with increased subsidence, likely due to the instability caused by excavation and construction activities—an issue that has been rarely addressed in previous studies and thus represents an innovative aspect of this research. In contrast, factors such as elevation, precipitation, and temperature have generally not shown a consistent or significant correlation with subsidence over the years. This may be due to their indirect influence, the variability of climatic conditions, or the scale of analysis used. The main limitations of this study include the temporal constraint of data availability, which covers only the 2016–2024 period; the exclusion of detailed local geological factors and structural specifics; and the lack of high-resolution data on groundwater and precipitation at a micro scale. Furthermore, the long-term effects of climate change were not comprehensively examined. Hence, the results should be interpreted with caution and future studies are recommended to utilize broader datasets and more integrated modeling approaches.

Discussion and Conclusion

Overall, the findings indicate that land subsidence in the historical and touristic areas of Isfahan is a complex, multi-factorial phenomenon influenced by human pressures, natural conditions, and water resource management. This insight, especially when compared to previous studies that primarily focused on isolated factors such as groundwater extraction or geological characteristics, presents a significant innovation by offering a multidimensional and integrated perspective on the issue. Accordingly, to ensure the effective preservation of this valuable heritage, it is essential to develop comprehensive and integrated management plans. These should include continuous geological monitoring, regulation of human activities—particularly in areas of heavy traffic and population density optimal management of groundwater resources, and special attention to the topographical features of sensitive zones.

How to cite this article:

Omidi, S., Sadeghi, H., Zandi, R., & Parhiz, F. (2026) Analysis of Geographical Factors Influencing Land Subsidence in Relation to the Stability of Historical and Tourism heritage in Isfahan City. *Green Development Management Studies*, 5(2), 131-152. <https://doi.org/10.22077/jgdms.2025.9812.1330>





پایداری جاذبه‌های تاریخی و گردشگری اصفهان در سایه تهدید فرونشست زمین: واکاوی عوامل جغرافیایی اثر گذار

شهره امیدی^۱، حجت صادقی^{۲*}، رحمان زندی^۳، فریاد پرهیز^۴

^۱ دانشجوی کارشناسی ارشد سنجش از دور و GIS، دانشکده علوم جغرافیایی و برنامه‌ریزی، دانشگاه اصفهان، اصفهان، ایران

^۲ استادیار، گروه جغرافیای طبیعی، دانشکده علوم جغرافیایی و برنامه‌ریزی، دانشگاه اصفهان، اصفهان، ایران

^۳ دانشیار، گروه جغرافیای طبیعی، دانشکده علوم جغرافیایی و برنامه‌ریزی، دانشگاه اصفهان، اصفهان، ایران

^۴ دکتری جغرافیا و برنامه‌ریزی شهری، دانشکده علوم جغرافیایی و برنامه‌ریزی، دانشگاه اصفهان، اصفهان، ایران

* ایمیل نویسنده مسئول: H.sadeghi@geo.ui.ac.ir

چکیده

واژگان کلیدی:

فرونشست زمین یکی از مخاطرات مهمی است که می‌تواند به تخریب سازه‌های تاریخی و کاهش جذابیت گردشگری شهرهای باارزش فرهنگی مانند اصفهان منجر شود. پایداری آثار تاریخی و جاذبه‌های گردشگری اصفهان در معرض تهدید جدی ناشی از فرونشست زمین قرار دارد که شناخت عوامل مؤثر بر این پدیده برای حفاظت و مدیریت بهتر ضروری است. هدف این پژوهش، بررسی میزان فرونشست، تحلیل دقیق عوامل جغرافیایی مؤثر بر فرونشست زمین و بررسی تأثیر آنها بر آسیب‌پذیری میراث فرهنگی و گردشگری شهر اصفهان است. روش پژوهش توصیفی-تحلیلی و کاربردی بوده و با بهره‌گیری از داده‌های مکانی شامل ارتفاع، شیب، بارش، دما، ترافیک، جمعیت، فاصله از مترو، فاصله از رودخانه و آب‌های زیرزمینی انجام شده است. داده‌ها از منابع مختلف جمع‌آوری و در پنج مرحله استخراج متغیرها، بررسی وضعیت شهر، گردآوری داده‌ها، برآورد فرونشست با نرم‌افزار SNAP و تحلیل رگرسیون خطی چندگانه در محیط R مورد تحلیل قرار گرفتند. نتایج تحلیل‌های نه‌ساله (۲۰۱۶-۲۰۲۴) نشان داد که آثار تاریخی اصفهان با شدت‌های متفاوتی از فرونشست مواجه‌اند؛ به‌طوری که حمام رهنان با فرونشست تجمعی ۲۴/۷۱ سانتی‌متر بیشترین آسیب را دارد. مناطق ۹، ۱۱ و ۱۵ شهر به‌عنوان کانون‌های اصلی فرونشست شناسایی شدند. مجموع نتیجه رگرسیون نشان داد که عوامل جمعیت، شیب، ترافیک و افت سطح آب‌های زیرزمینی تأثیر معناداری بر افزایش فرونشست داشته‌اند. این عوامل، به‌ویژه در نواحی تاریخی و گردشگری، تهدیدی جدی برای پایداری سازه‌ها محسوب می‌شوند. نتیجه‌گیری کلی بر لزوم تدوین برنامه‌ریزی جامع و مدیریت پایدار منابع آب و عوامل انسانی تأکید دارد تا از تسریع فرایند فرونشست جلوگیری و حفاظت از میراث فرهنگی و گردشگری اصفهان تضمین شود.

عوامل جغرافیایی، فرونشست زمین، پایداری، آثار و جاذبه‌های تاریخی و گردشگری.

تاریخ دریافت:

۰۴ مرداد ۱۴۰۴

تاریخ بازنگری:

۲۷ شهریور ۱۴۰۴

تاریخ پذیرش:

۲۹ مهر ۱۴۰۴



مقدمه

مخاطرات همواره از موضوعات مهم توسعه و برنامه‌ریزی محیط است؛ به‌گونه‌ای امروزه جوامع بشری، مخاطرات و چالش‌های متنوعی را تجربه می‌نماید (جمینی و همکاران، ۱۴۰۲، ۱۰۷). فرونشست زمین به‌عنوان یکی از بحران‌های خاموش قرن بیست‌ویکم در حال گسترش در بسیاری از مناطق شهری و روستایی جهان، به‌ویژه در کشورهای در حال توسعه است (هانینگ^۱ و همکاران، ۲۰۲۴، ۵). این پدیده که به‌صورت تدریجی اما با پیامدهایی شدید در محیط فیزیکی و انسانی ظاهر می‌شود، تحت تأثیر مجموعه‌ای از عوامل طبیعی و انسانی به وقوع می‌پیوندد و به دلیل روند کند (آبیدین^۲ و همکاران، ۲۰۱۵، ۱۱۹) و پنهانی، اغلب تا مرحله بروز خسارات جدی مورد غفلت قرار می‌گیرد. فرونشست زمین زمانی رخ می‌دهد که لایه‌های زیرزمینی، به‌ویژه در خاک‌های ریزدانه و آبرفتی، به دلیل کاهش فشار آب منفذی و از دست دادن تکیه‌گاه‌های طبیعی، دچار تراکم و فشردگی شوند (آلی و همکاران، ۲۰۰۹، ۴۰). کاهش شدید سطح آب‌های زیرزمینی، برداشت بی‌رویه منابع آبی، تغییرات اقلیمی، و الگوهای ناپایدار توسعه شهری، مهم‌ترین عوامل تشدیدکننده این پدیده محسوب می‌شوند (آو^۳ و همکاران، ۲۰۲۴، ۳۰۳). در بسیاری از مناطق خشک و نیمه‌خشک، فرونشست به‌سرعت به یکی از تهدیدات اصلی زیربنایی و اقتصادی تبدیل شده است. برخلاف زلزله یا سیل که آثار آنی دارند، فرونشست زمین اثری تدریجی ولی پایدار و بلندمدت دارد (لین^۴ و همکاران، ۲۰۲۴، ۱۶۹) که ممکن است تا دهه‌ها پیامدهای آن باقی بماند. شکاف‌های سطحی، ترک‌های ساختمانی، اختلال در عملکرد زیرساخت‌ها (نظیر خطوط لوله، راه‌ها و شبکه‌های برق)، از جمله آثار ملموس این پدیده‌اند (آو^۵ و همکاران، ۲۰۲۴، ۳۰۴). با این حال، آنچه کمتر مورد توجه قرار می‌گیرد، تهدید مستقیم فرونشست بر منابع تاریخی و جاذبه‌های فرهنگی-گردشگری است. هنگامی که پدیده‌ای با ماهیت زمین‌ساختی در دل شهرهایی با بافت تاریخی شکل می‌گیرد (اونهین^۶ و همکاران، ۲۰۲۵، ۳)، نه تنها میراث فیزیکی، بلکه هویت فرهنگی، اقتصادی و اجتماعی آن مناطق نیز در معرض تهدید قرار می‌گیرد.

گردشگری صنعتی چندوجهی و پیچیده (صادقی و صیدایی، ۲۰۲۵) و وابسته به مقولات و عواملی متنوعی است. در این میان، آثار تاریخی و جاذبه‌های گردشگری به‌ویژه آن‌هایی که در مناطق آبرفتی و دشت‌های پست قرار گرفته‌اند، در برابر پدیده فرونشست آسیب‌پذیرترند (مارچی^۷ و همکاران، ۲۰۲۲، ۵). این آسیب‌پذیری از دو جهت قابل تأمل است: نخست از منظر فنی و سازه‌ای، زیرا بیشتر بناهای تاریخی با مصالح سنتی و روش‌های معماری متناسب با دوره ساخت خود احداث شده‌اند و فاقد زیرسازی مدرن برای مقابله با ناپایداری زمین هستند. دوم از منظر کارکردی، زیرا تخریب تدریجی یا ترک‌خوردگی این آثار، ضمن افزایش خطرپذیری سازه‌ای، به کاهش ایمنی بازدیدکنندگان و افت کیفیت تجربه گردشگری منجر می‌شود (برتولینی^۸ و همکاران، ۲۰۲۳، ۲۱). در نتیجه، پدیده‌ای نظیر فرونشست که در ابتدا صرفاً یک بحران زمین‌شناختی تلقی می‌شود، می‌تواند به بحرانی در عرصه گردشگری و حتی اقتصاد محلی منجر شود (چن^۹ و همکاران، ۲۰۲۵، ۶). از سوی دیگر، پیوند گردشگری با میراث فرهنگی، نه تنها از بُعد اقتصادی بلکه از بُعد هویتی نیز حائز اهمیت است. شهرها و مناطقی که در آن‌ها آثار تاریخی برجای مانده از دوران‌های مختلف تمدنی حفظ شده و به مقصدی برای گردشگران داخلی و خارجی تبدیل شده‌اند، نقش کلیدی در بازنمایی فرهنگ، تاریخ و سبک زندگی جوامع ایفا می‌کنند (بونینی^{۱۰} و همکاران، ۲۰۲۳، ۵۲). اما آسیب‌پذیری این آثار در برابر

1. Huning

2. Abidin

3. Aly

4. Ao

5. Lin

6. Ohenhen

7. Marchi

8. Bertolini

9. Chen

10. Bonini



مخاطرات طبیعی، از جمله فرونشست زمین، نیازمند سیاست‌گذاری‌ها و مطالعات علمی دقیق در حوزه حفاظت، پایش و مدیریت ریسک است (برتولین و سسانا^۱، ۲۰۲۳، ۵۲). اگرچه تهدیداتی مانند زلزله و آتش‌سوزی توجه بیشتری جلب کرده‌اند، اما فرونشست به دلیل ماهیت تدریجی خود و بی‌توجهی دستگاه‌های اجرایی، می‌تواند در سکوت، موجب فروپاشی زیرساخت‌های تاریخی و زوال تدریجی جایگاه گردشگری یک منطقه شود (چودوری^۲ و همکاران، ۲۰۲۲، ۴۵).

توجه به اهمیت موقعیت جغرافیایی آثار تاریخی نیز در این زمینه ضروری است. بسیاری از شهرهای تاریخی در ایران و سایر کشورها در پهنه‌هایی از دشت‌ها و جلگه‌ها شکل گرفته‌اند که از نظر زمین‌شناسی دارای خاک‌های رسی، ماری و آبرفتی هستند. این نوع خاک‌ها، در صورت کاهش رطوبت یا فشار آب منفذی، به‌ویژه در اثر افت سطح آب‌های زیرزمینی، مستعد تراکم و فشردگی هستند (تای^۳ و همکاران، ۲۰۲۲، ۵۳). در چنین شرایطی، بستر بناهای تاریخی که ممکن است صدها سال بدون تغییر باقی‌مانده باشد، به طور ناگهانی دچار تغییر شکل می‌شود (آو^۴ و همکاران، ۲۰۲۴، ۳۰۵). این تغییرات به دلیل ناهمگونی در ساختار زمین می‌تواند موجب نشست‌های غیریکپارچه و ترک‌های سازه‌ای شود که نه تنها ساختار بنا را تهدید می‌کند، بلکه زیبایی‌شناسی و هویت تاریخی آن را نیز مخدوش می‌سازد (فرناندز تورس^۵ و همکاران، ۲۰۲۲، ۴۱). از منظر جغرافیایی، عوامل مختلفی در بروز و شدت فرونشست زمین نقش دارند که به دو دسته عوامل طبیعی و انسانی تقسیم می‌شوند. عوامل طبیعی شامل جنس خاک و سنگ، شیب زمین، ساختارهای زمین‌شناسی، اقلیم و مقدار بارندگی هستند (یانگ^۶ و همکاران، ۲۰۲۱، ۴). مناطق خشک و نیمه‌خشک که از تغذیه طبیعی منابع آب زیرزمینی بی‌بهره‌اند، بیشتر مستعد پدیده فرونشست‌اند. عوامل انسانی شامل برداشت بی‌رویه آب برای کشاورزی و صنعت، توسعه شهری بدون مطالعات زمین‌شناسی، مدیریت ناکارآمد منابع آب، و تخریب پوشش گیاهی است (روسلی^۷ و همکاران، ۲۰۲۲، ۵). نقش ترکیبی این عوامل در بسیاری از مناطق باعث شده است تا سرعت فرونشست در برخی نقاط از ۵ تا ۳۰ سانتی‌متر در سال گزارش شود (کاوو^۸ و همکاران، ۲۰۲۴، ۹)؛ نرخه‌ای که می‌تواند در یک دهه، ساختار بسیاری از بناهای تاریخی و گردشگری را با تهدید جدی روبرو سازد.

گردشگری یکی از مهم‌ترین منابع اقتصادی در بسیاری از مناطق محسوب می‌شود (صادقی و جوان، ۱۴۰۴، ۱۶۵) و توجه به ابعاد مختلف و مرتبط با آن ضروری است. گردشگری در سراسر جهان به دلایل متعددی از جمله احیای اقتصاد، تنوع بخشی به فعالیت‌ها، اشتغال‌زایی و... مقبولیت اساسی یافته است (جمینی و همکاران، ۱۴۰۳: ۲۱۵). در همین راستا، مطالعه پدیده فرونشست و عوامل جغرافیایی مؤثر بر آن از منظر تأثیرگذاری بر آثار تاریخی و جاذبه‌های گردشگری، رویکردی جامع را طلب می‌کند (دینار^۹ و همکاران، ۲۰۲۱، ۷) که ترکیبی از زمین‌شناسی، جغرافیای طبیعی، برنامه‌ریزی شهری، حفاظت میراث فرهنگی و مدیریت گردشگری است. استفاده از فناوری‌های نوین نظیر سنجش‌ازدور و ساج، می‌تواند ابزاری قدرتمند برای پایش مستمر پدیده فرونشست و تحلیل فضایی آن نسبت به موقعیت بناهای تاریخی فراهم آورد. این تحلیل‌ها، امکان شناخت پهنه‌های پرخطر و اولویت‌بندی اقدامات حفاظتی را فراهم کرده و از وارد آمدن خسارات بیشتر جلوگیری می‌کند (کوک و کاستا^{۱۰}، ۲۰۲۱، ۳۶). در قرن اخیر به دلیل گسترش فعالیت‌های گردشگری به‌عنوان یک صنعت موردتوجه قرار گرفته است (صادقی و صیدایی، ۲۰۲۵، ۱۴۰). ضرورت این پژوهش از آن جهت مضاعف می‌شود که در سال‌های اخیر، نشانه‌هایی از آسیب‌های ناشی از فرونشست بر پیکره بسیاری از آثار تاریخی در مناطق مختلف کشور گزارش شده است. در برخی موارد، ترک‌خوردگی دیوارها، فرورفتگی

1. Bertolin

2. Chowdhuri

3. Tay

4. Ao

5. Fernández-Torres

6. Yang

7. Rosly

8. Cao

9. Dinar

10. Kok & Costa



پایه‌های بنا، و کج‌شدن سازه‌ها بدون هیچ‌گونه عامل بیرونی، نشانگر آن است که پدیده‌ای در لایه‌های پنهان زمین در حال وقوع است. در صورتی که این تحولات بدون توجه علمی و مدیریتی رها شود، در آینده‌ای نه‌چندان دور، ممکن است بخشی از میراث فرهنگی کشور به طور کامل از بین برود. از همین رو، تأکید بر تحلیل‌های دقیق، بر پایه داده‌های مکانی و زمین‌شناختی، و ارتباط آن با پایداری آثار تاریخی و گردشگری، یکی از ضرورت‌های حیاتی پژوهش‌های جغرافیایی روز به شمار می‌رود. در همین چارچوب، پژوهش حاضر با هدف تحلیل عوامل جغرافیایی مؤثر بر فرونشست زمین و اثرات آن بر پایداری آثار تاریخی و گردشگری، به بررسی این پدیده در شهر اصفهان می‌پردازد؛ شهری که به‌عنوان یکی از کانون‌های تمدنی و میراث فرهنگی ایران، میزبان صدها بنای تاریخی از دوره‌های مختلف تمدنی به‌ویژه صفویه است. قرارگیری این آثار در پهنه‌هایی از دشت که به‌شدت مستعد فرونشست هستند، اهمیت شناخت عوامل زمینه‌ساز و پیامدهای ناشی از آن را دوچندان می‌سازد. اصفهان با سابقه طولانی در حوزه گردشگری، اگرچه همواره موردتوجه برنامه‌ریزان بوده است، اما به‌نظر می‌رسد در زمینه مدیریت مخاطرات ژئومورفولوژیکی از جمله فرونشست، هنوز جای کار بسیاری باقی‌مانده است. از این رو، مطالعه حاضر می‌کوشد تا با رویکردی علمی، نقش عوامل جغرافیایی را در شکل‌گیری فرونشست زمین بررسی کرده و اثرات آن را بر آثار تاریخی و گردشگری این شهر تحلیل نماید.

در قرن اخیر گردشگری آنچنان توسعه پیدا کرده که در سراسر جهان به‌عنوان یک صنعت موردتوجه قرار گرفته است (صادقی و صیدایی، ۲۰۲۵، ۴) و لذا بایستی جنبه‌های مختلف این حوزه اقتصادی از جمله مخاطرات نیز مطالعه و بررسی شود. در واقع گردشگری مزایای اقتصادی، اجتماعی و زیست محیطی مختلفی برای جوامع میزبان دارد، اما توسعه گردشگری با چالش‌های متعددی (از جمله مخاطرات) مواجه است (جمینی و همکاران، ۱۴۰۴، ۶). در مجموع گردشگری به‌عنوان یک بخش مهم اقتصادی شناخته می‌شود (صادقی، ۱۴۰۲، ۱) و ارتباط آن با مخاطرات غیر قابل انکار است. در چارچوب نظری این پژوهش می‌توان تحقیقاتی را اشاره نمود که بحث مخاطرات را در زمینه گردشگری و میراث تاریخی به‌خوبی تبیین می‌نمایند که البته مخاطره فرونشست در ارتباط با جاذبه‌های گردشگری و تاریخی کمتر مورد مطالعه قرار گرفته و این پژوهش می‌تواند گپ مطالعاتی موجود را تکمیل و به ادامه تحقیقات در آینده در این حوزه کمک نماید. چن^۱ و همکاران (۲۰۲۰)، نتیجه گرفتند که میزان فرونشست در پکن از ۱۴۱ میلی متر به ۱۳۵ میلیمتر کاهش یافت. همچنین یافته‌های این تحقیق نشان داد که میان سفره‌های آب زیرزمینی و فرونشست زمین همبستگی بالایی وجود دارد. از کوئرو^۲ و همکاران (۲۰۲۰) ارزیابی آسیب پذیری ساختمان‌ها در اثر فرونشست زمین در شهر تاریخی پیستویا ایتالیا نشان دادند که فرونشست از دهه ۱۹۹۰، در بخش جنوب شرقی شهر پیستویا آغاز شد. همچنین در مرکز شهر یک نوع فرونشست در حال رخ دادن می‌باشد. موهتائز^۳ و همکاران (۲۰۲۱) نشان دادند که به دلایل مختلف مانند برداشت بی رویه از آب‌ها، افزایش جمعیت و... فرونشست زمین تشدید یافته است. بخاری^۴ و همکاران (۲۰۲۳) به این نتیجه رسیدند که میزان فرونشست زمین در شهر گوادر روبه‌افزایش بوده و عوامل شیب، خاک و تغییرات انسانی نقش مهمی در این مخاطره دارند. وانگ^۵ و همکارانش (۲۰۲۴) نتیجه گرفتند که فرونشست با عوامل مختلفی مانند برداشت آب زیرزمینی و وزن ساختمان‌ها مرتبط است.

شیرانی و همکاران (۱۴۰۰) نشان دادند میزان نرخ متوسط فرونشست در منطقه رو به افزایش است. آزر م و همکاران (۱۴۰۱) همبستگی بین فرونشست و تغییرات سطح آب زیرزمینی را تایید نموده است. نتیجه تحقیق حسین زاده و همکاران (۱۴۰۱) در در زمینه فرونشست زمین در دشت قاین نشان داد که میزان فرونشست از سال ۲۰۱۷ تا سال ۲۰۲۰ رو به افزایش بوده است. اکبری و قهرودی (۱۴۰۲) نتیجه گرفتند میان افت سطح آب‌های زیرزمینی و میزان فرونشست زمین رابطه مستقیم

1. Chen

2. Ezquerro

3. Muhetaer

4. Bokhari

5. Wang



و معناداری وجود دارد. همچنین به این نتیجه رسیدند که در نتیجه رشد جمعیت و در ادامه آن برداشت بی رویه از آب‌های زیر زمینی، میزان فرونشست در این منطقه رو به افزایش است. طالبی نیا و همکاران (۱۴۰۲) نشان دادند تغییرات سطح ایستابی آب یکی از عوامل مؤثر بر فرونشست بوده و همچنین به این نتیجه رسیدند که مناطق دارای افت آب‌های زیرزمینی با کاربری شهری، راه و جاده سازی و اراضی کشور دارای فرونشستی قابل توجه ای می‌باشند. عابدینی و همکاران (۱۴۰۲) نتیجه گرفتند که فرونشست زمین بر محوطه‌های تاریخی تأثیرگذار بوده و این تأثیرگذاری برای جاذبه‌ها، متفاوت است. نظری و صدیق (۱۴۰۴) ارزیابی اثر فرونشست زمین بر جاذبه‌های ژئوتوریستی شهر طرکبه نشان دادند که شهر طرکبه در طول زمانی ۲۰۱۷ تا ۲۰۲۰ حدود ۱۰ سانتی متر فرونشست داشته است. عابدینی و نظری گزیک (۱۴۰۳) در بررسی میزان فرونشست زمین و اثرات آن بر ژئومورفوسایت‌های گردشگری نتیجه گرفتند که در طول دوره آماری در منطقه، ۲۲ سانتی‌متر فرونشست اتفاق افتاده و ژئوسایت‌های (قنات کاریزنو، برج تاریخی شاندیز، پدیده شاندیز، باغ کلبه دنج، فنجان نما، پارک کوهستانی و ...) منطقه را به خطر می‌اندازد و این امر می‌تواند روی گردشگری منطقه تأثیر منفی بگذارد.

پژوهش‌های گذشته نشان داده‌اند که فرونشست زمین پدیده‌ای گسترده و تأثیرگذار بر محیط‌های شهری و تاریخی است و عوامل متعددی از جمله برداشت بی‌رویه آب‌های زیرزمینی، تغییرات کاربری زمین، افزایش جمعیت، شیب و نوع خاک در شدت آن نقش دارند. مطالعات داخلی و خارجی همچنین حاکی از ارتباط مستقیم فرونشست با پایداری سازه‌ها و ژئوسایت‌های تاریخی و گردشگری بوده‌اند، اما تحلیل جامع عوامل جغرافیایی مؤثر بر فرونشست و ارتباط آن با آثار تاریخی و گردشگری به طور محدود بررسی شده است. پژوهش حاضر با تمرکز بر شهر اصفهان، نوآوری خود را در تحلیل عوامل جغرافیایی مؤثر بر فرونشست زمین و شناسایی مناطق آسیب‌پذیر شهری و تاریخی با استفاده از GIS و داده‌های محیطی نشان می‌دهد و به ارائه راهکارهایی برای حفاظت از آثار تاریخی و گردشگری و مدیریت پایدار شهری می‌پردازد.

مواد و روش‌ها

روش تحقیق بر اساس ماهیت توصیفی-تحلیلی و بر مبنای هدف، کاربردی است که به بررسی ارتباط فرونشست و تأثیر عوامل جغرافیایی بر روند آن در آثار تاریخی و گردشگری شهر اصفهان می‌پردازد. داده‌های مورد استفاده از نوع داده‌های مکانی بوده است. به گونه‌ای که در ابتدا برای مشخص کردن‌های عوامل جغرافیایی، مطالعات کتابخانه‌ای انجام شد. سپس در مرحله دوم، داده‌ها و لایه‌های اطلاعاتی هر کدام از عوامل تهیه گردید. داده‌ها و عوامل جغرافیایی مورد بررسی شامل ارتفاع، شیب، بارش، دما، ترافیک، جمعیت، فاصله از مترو، فاصله از رودخانه و آب‌های زیرزمینی هستند. این تحقیق در یک مسیر پنج‌گانه طراحی شده که هر مرحله آن به دقت و با هدف خاصی پیش می‌رود. در گام نخست، پژوهشگر به استخراج متغیرها و عوامل مؤثر بر فرونشست پرداخته است. سپس در گام دوم، وضعیت شهر اصفهان و پارامترهایی مانند بارش، جمعیت و کاربری اراضی در این مرحله مورد توجه قرار گرفت. در مرحله سوم، داده‌های مورد نیاز از سایت‌ها و سازمان‌های مربوطه جمع‌آوری می‌شود. در گام چهارم، میزان و وضعیت فرونشست در شهر اصفهان، به‌ویژه در مناطق تاریخی و گردشگری، با استفاده از نرم‌افزار SNAP و داده‌های موجود در سایت آلاسکا برآورد شد. پس از آن، در مرحله پنجم، با استفاده از رگرسیون خطی چندگانه، رابطه میان عوامل جغرافیایی و میزان فرونشست مورد بررسی قرار گرفت.

جدول ۱- لایه‌های مورد استفاده پژوهش

ردیف	نوع داده	روش استخراج
۱	لایه ارتفاعی	مدل‌های رقومی
۲	لایه شیب	مدل‌های رقومی
۳	بارش سالانه	ایستگاه‌های هواشناسی
۴	دما سالانه	ایستگاه‌های هواشناسی
۵	هیدروگراف آب‌های زیرزمینی	شرکت آب منطقه
۶	تراکم چاه‌های پیزومتری	شرکت آب منطقه
۷	تراکم جمعیتی	شهرداری
۸	فاصله از رودخانه	شهرداری
۹	مسیرهای مترو	شهرداری
۱۰	نقاط پرتراکم شهر	شهرداری

یکی از روش‌های بررسی همبستگی میان عوامل جغرافیایی و فرونشست، استفاده از رگرسیون خطی چندگانه^۱ است. رگرسیون خطی چندگانه یک روش آماری است که برای مدل‌سازی رابطه بین یک متغیر وابسته و دو یا چند متغیر مستقل به کار می‌رود. این روش به پژوهشگران این امکان را می‌دهد که تأثیر هر یک از متغیرهای مستقل را بر روی متغیر وابسته بررسی کرده و پیش‌بینی‌های دقیق‌تری انجام دهند. براین‌اساس، در محیط R، با استفاده از کدهای دستوری می‌توان این همبستگی را به دست آورد. به این منظور، ابتدا در محیط ArcMap، پس از ادغام کردن جدول توصیفی متغیر مستقل (عوامل جغرافیایی) و وابسته (فرونشست)، با استفاده از دستور Convert، این جدول به فرمت اکسل تبدیل شد. سپس در محیط R، با فراخوانی و ایجاد کدهای مربوط به رگرسیون خطی چندگانه، این عملیات انجام گرفت. فرمت کلی ایجاد این کدها به ترتیب در شکل زیر آمده است.

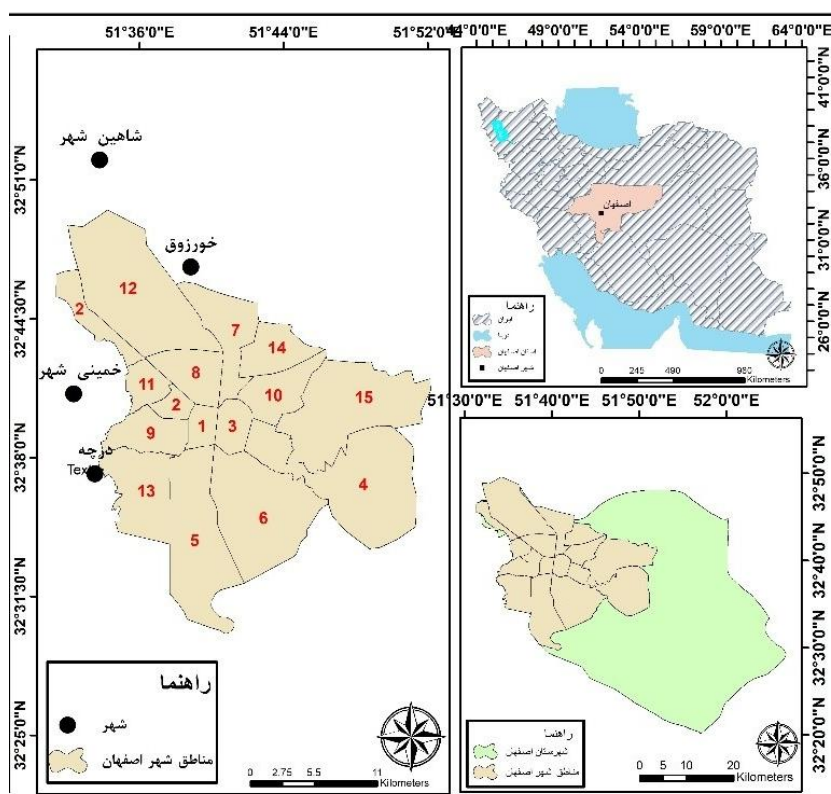


شکل ۱- روش رگرسیون خطی چندگانه در محیط R

^۱ . Multiple Linear Regression



شهر اصفهان، به عنوان یکی از باستانی‌ترین و زیباترین شهرهای ایران، در مرکزیت استان اصفهان واقع شده و به شکل یک چندضلعی نامنظم با مساحتی حدود ۵۵۰ کیلومتر مربع طراحی شده است. ارتفاع این شهر از سطح دریا ۱۶۰۷ متر تعیین شده است؛ به طوری که بخش شرقی شهر دارای کمترین ارتفاع حدود ۱۵۴۶ متر و مرتفع‌ترین نقطه آن، قله کوه صفه در غرب شهر با ارتفاع ۲۲۱۶ متر می‌باشد. این شهر به ۱۵ منطقه شهری تقسیم شده است که به دلیل وجود رودخانه زاینده‌رود، به دو بخش شمالی و جنوبی تقسیم می‌گردد. در بخش جنوبی، سه منطقه ۵، ۶ و ۱۳ واقع شده‌اند، در حالی که سایر مناطق در بخش شمالی استقرار یافته‌اند (محمدخانی، ۱۴۰۰، ۴۳). تعداد محلات موجود در این شهر به حدود ۱۹۳ محله می‌رسد (صالحی و گندمکار، ۱۴۰۲: ۵۱؛ ترابی، ۱۴۰۳، ۳۷). این تنوع در محلات و مناطق شهری، نشان‌دهنده غنای فرهنگی و اجتماعی اصفهان است و بر جذابیت این شهر به عنوان یک مرکز تاریخی و فرهنگی می‌افزاید.



شکل ۲- موقعیت شهر اصفهان

یافته‌های تحقیق

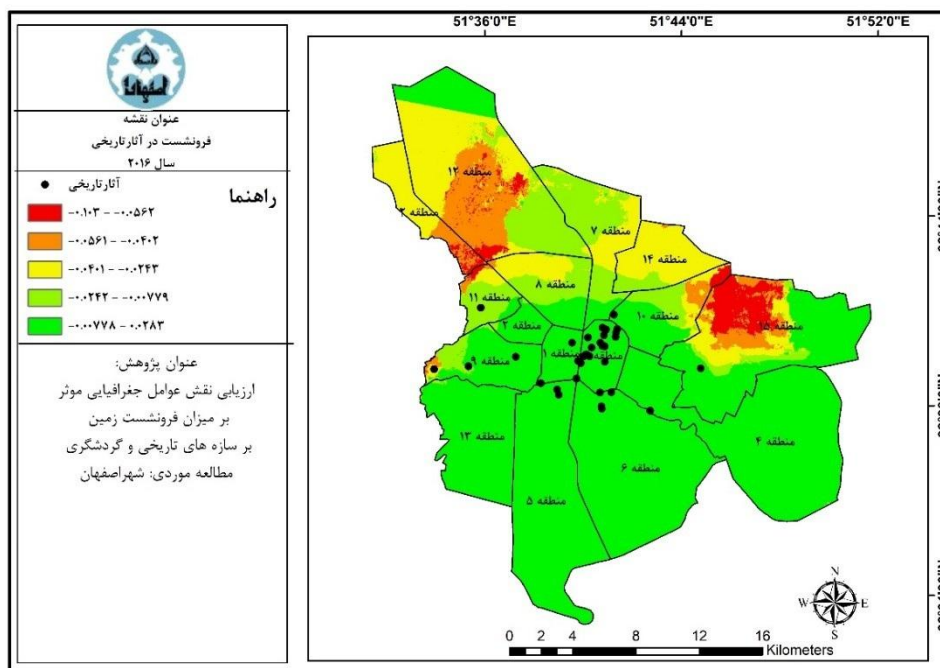
محاسبه وضعیت و روند فرونشست در ارتباط با آثار تاریخی و گردشگری

در شکل (۳) توزیع مکانی میزان فرونشست زمین در پیرامون آثار تاریخی و گردشگری شهر اصفهان در سال ۲۰۱۶ به تصویر کشیده شده است. بر اساس تحلیل نقشه مذکور، حمام تاریخی رهنان واقع در منطقه ۱۱ شهرداری اصفهان، با نرخ فرونشستی نزدیک به یک سانتی‌متر در سال، بیشترین میزان جابه‌جایی سطح زمین را در میان سازه‌های تاریخی تجربه کرده است. سایر آثار تاریخی شهر نیز عمدتاً فرونشستی ناچیز و در حدود یک سانتی‌متر یا کمتر را نشان می‌دهند که بیانگر پایداری نسبی بستر زمین در اطراف این بناها طی سال مذکور است.

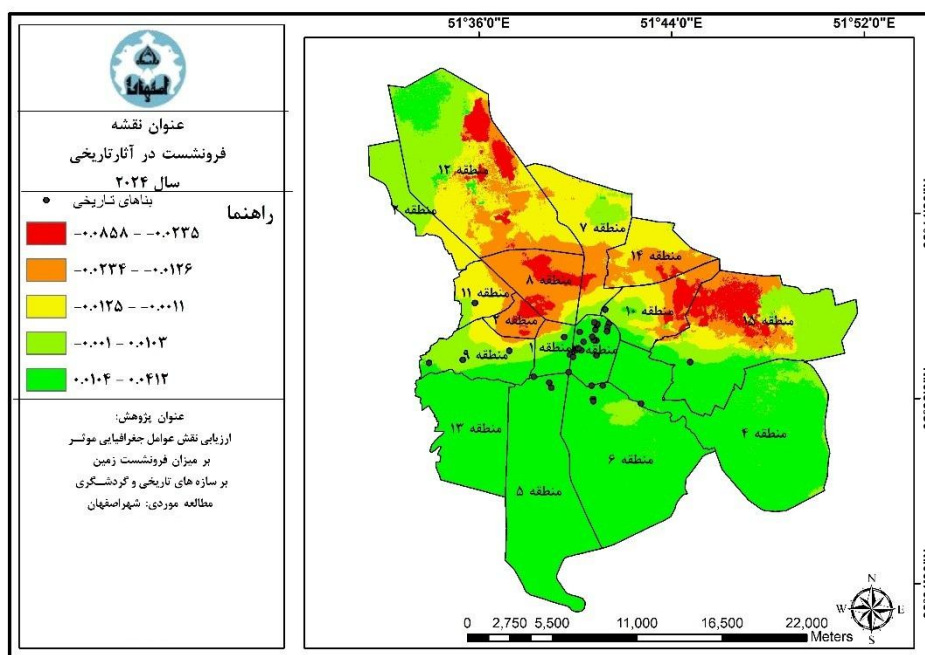
در مقابل، نقشه فرونشست سال ۲۰۲۴ که در شکل (۴) ارائه شده، استمرار وضعیت بحرانی در منطقه ۱۱ و به‌ویژه حمام رهنان را تأیید می‌کند. این اثر تاریخی همچنان با نرخ فرونشست سالانه حدود یک سانتی‌متر، بیشترین آسیب‌پذیری را در میان



بناهای مورد بررسی دارد. در عین حال، جاذبه‌های گردشگری واقع در منطقه ۹ تنها فرونشست‌های بسیار جزئی در حد میلی‌متر را تجربه کرده‌اند. در مناطق ۳ و ۵ نیز هیچ‌گونه فرونشستی در سال ۲۰۲۴ ثبت نشده است که می‌توان آن را به عنوان نشانه‌ای از ثبات ژئوتکنیکی و هیدروژئولوژیکی این نواحی در نظر گرفت. در مجموع، تحلیل‌های مکانی و زمانی نشان می‌دهد که تمرکز فرونشست در غرب شهر اصفهان به‌ویژه مناطق دارای آبخوان‌های آسیب‌پذیر و برداشت‌های بی‌رویه آب زیرزمینی بوده است، و این پدیده می‌تواند در بلندمدت تهدیدی جدی برای پایداری سازه‌های میراثی و جذب گردشگر به شمار رود.



شکل ۳- میزان فرونشست در ارتباط با بناهای تاریخی-گردشگری، سال ۲۰۱۶

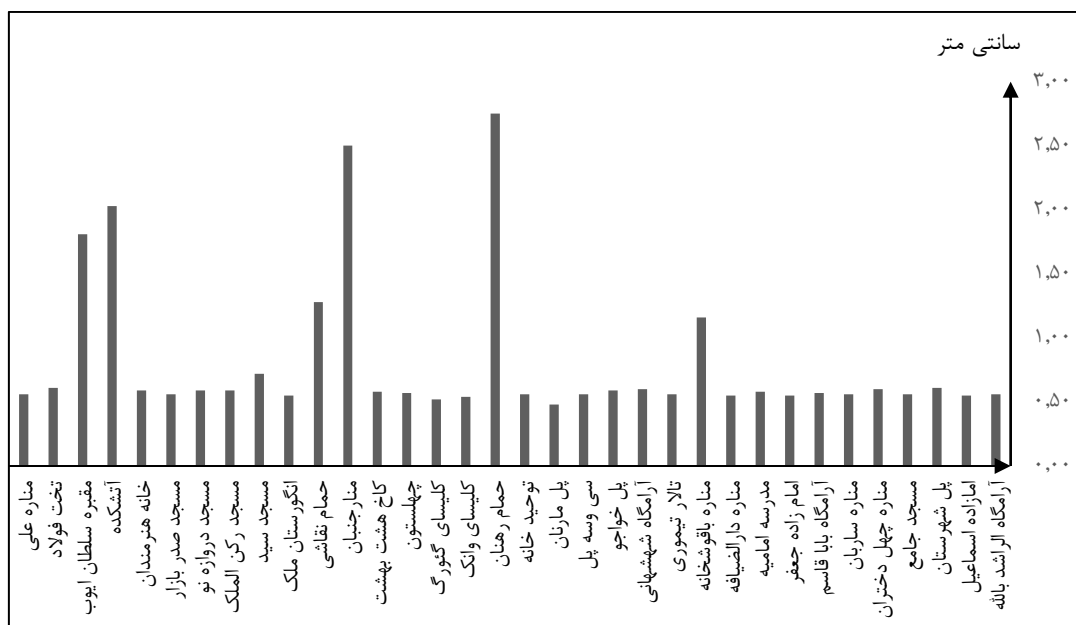


شکل ۴- میزان فرونشست در ارتباط با بناهای تاریخی-گردشگری، سال ۲۰۲۴



در بازه‌ی زمانی ۹ ساله، از سال ۲۰۱۶ تا ۲۰۲۴، آثار تاریخی و گردشگری شهر اصفهان با درجات مختلفی از پدیده فرونشست زمین مواجه بوده‌اند. تحلیل داده‌های ارائه‌شده در شکل (۵) نشان می‌دهد که الگوی زمانی و مکانی فرونشست در این دوره از توزیع یکنواختی برخوردار نبوده و شاهد تفاوت‌های قابل‌توجهی از نظر شدت و پراکنش مکانی هستیم. در میان آثار تاریخی بررسی‌شده، حمام رهنان با میزان تجمعی فرونشست ۷۱/۲۴ سانتی‌متر و میانگین سالانه ۷۵/۲ سانتی‌متر، بیشترین نرخ فرونشست را ثبت کرده است. پس از آن، منارجنبان با ۴۸/۲۲ سانتی‌متر (میانگین سالانه ۵۰/۲ سانتی‌متر) و حمام نقاشی با ۴۹/۱۱ سانتی‌متر (میانگین ۲۸/۱ سانتی‌متر) در رده‌های بعدی قرار دارند. این داده‌ها مؤید آن است که برخی بناهای تاریخی اصفهان در وضعیت ژئومورفولوژیکی بحرانی قرار دارند و نیازمند اقدامات فوری و تخصصی در زمینه حفاظت سازه‌ای هستند. نکته قابل‌توجه آن است که این آثار آسیب‌پذیر عمدتاً در مناطق شهری ۹، ۱۱ و ۱۵ قرار گرفته‌اند؛ مناطقی که به نظر می‌رسد ترکیبی از عوامل مانند ناپایداری ژئوتکنیکی بستر خاک، افت شدید سطح آب‌های زیرزمینی و ضعف عملکرد سامانه‌های زهکشی و مدیریت رواناب شهری، در تشدید فرایند فرونشست در آن‌ها نقش کلیدی ایفا کرده‌اند.

به‌طور کلی، تحلیل روند فرونشست در این دوره‌ی نه‌ساله بیانگر آن است که صرفاً نوع سازه یا قدمت تاریخی آن عامل تعیین‌کننده در شدت آسیب‌پذیری نیست، بلکه عواملی همچون موقعیت جغرافیایی بنا، ویژگی‌های ژئوتکنیکی خاک، شیب، میزان بهره‌برداری از منابع زیرزمینی، اقدامات انسانی و تحولات کاربری اراضی پیرامونی به‌صورت ترکیبی در تعیین نرخ فرونشست مؤثرند. از این‌رو، حفاظت پایدار از میراث تاریخی و گردشگری شهر اصفهان مستلزم تدوین و اجرای یک برنامه جامع و میان‌رشته‌ای است که بر پایش پیوسته داده‌های مکانی، مدل‌سازی خطر ژئومورفیک، مدیریت منابع آبی و سیاست‌گذاری پیشگیرانه مبتنی باشد. تنها از طریق چنین رویکرد یکپارچه‌ای می‌توان مانع از تسریع روند فرونشست و تخریب میراث گران‌بهای تاریخی این شهر شد.



شکل ۵- نمودار میانگین فرونشست آثار تاریخی - گردشگری شهر اصفهان (سانتی‌متر)، سال ۲۰۱۶-۲۰۲۴

مدلسازی رابطه فرونشست زمین و عوامل جغرافیایی (۲۰۱۶-۲۰۲۴) در محیط R با تأکید بر آثار تاریخی و گردشگری پس از مدل‌سازی رگرسیون خطی چندگانه به منظور بررسی رابطه و نوع آن میان عوامل جغرافیایی منتخب و فرونشست در سال ۲۰۱۶ در شهر اصفهان، دو پارامتر کلیدی با عناوین PR و ضریب رگرسیون مورد تحلیل قرار گرفتند. پارامتر PR به معنای وجود یا عدم وجود رابطه معنادار است و ضریب رگرسیون نوع رابطه را، یعنی مستقیم یا معکوس بودن آن را مشخص



می‌کند. به‌طوری‌که هرچه مقدار PR از ۰/۱ بیشتر باشد، نشان‌دهنده عدم وجود رابطه است و بالعکس، مقادیر کمتر از این مقدار نشان‌دهنده معنادار بودن رابطه میان متغیر مستقل و متغیر وابسته است. علاوه بر این، اگر ضریب رگرسیون منفی باشد، این امر نشان‌دهنده وجود رابطه معکوس میان دو متغیر است؛ به عبارت دیگر، با افزایش یک متغیر، متغیر دیگر کاهش می‌یابد. همچنین ضریب مثبت به معنای رابطه مستقیم است.

یافته‌های حاصل از تحلیل رگرسیون خطی چندگانه در سال ۲۰۱۶ (جدول ۲) نشان می‌دهد که از میان ۹ عامل جغرافیایی بررسی شده، تنها سه عامل «جمعیت»، «شیب زمین» و «ترافیک» با میزان فرونشست در محدوده آثار تاریخی و گردشگری شهر اصفهان دارای رابطه‌ای معنادار و مستقیم بوده‌اند. به طور مشخص، افزایش تراکم جمعیت (ضریب ۲/۰۰۸)، شیب زمین (۶/۷۷۴) و حجم ترافیک (۱/۶۷۱) منجر به افزایش نرخ فرونشست شده‌اند که این امر تأکیدی بر نقش عوامل انسانی و فیزیکی در تشدید این پدیده است. در مقابل، سایر متغیرها نظیر ارتفاع، فاصله از رودخانه یا مترو، بارش، دما و سطح آب زیرزمینی فاقد رابطه معنادار با فرونشست بوده‌اند که بیانگر تأثیر محدود یا غیرمستقیم آن‌ها بر پایداری زمین در مناطق تاریخی است. این نتایج بر ضرورت توجه به فشارهای انسانی و ملاحظات مکانی در تدوین راهبردهای حفاظتی برای میراث تاریخی شهر تأکید دارد.

جدول ۲- همبستگی عوامل جغرافیایی و فرونشست سال ۲۰۱۶ شهر اصفهان (رگرسیون خطی چندگانه)

عنوان عامل	Pr	رابطه	ضریب	نوع رابطه	توضیح
ارتفاع	۰/۱۲	عدم رابطه	-۶/۸۹	-	-
فاصله از مترو	۰/۴۴	عدم رابطه	-۷/۸۲	-	-
جمعیت	۰/۰۰	معنادار	۲/۰۰۸	مستقیم	افزایش جمعیت = افزایش فرونشست
فاصله از رودخانه	۰/۲۳	عدم رابطه	۱/۷۲۲	-	-
شیب	۰/۰۰	معنادار	۶/۷۷۴	مستقیم	افزایش شیب = افزایش فرونشست
ترافیک	۰/۰۲	معنادار	۱/۶۷۱	مستقیم	افزایش ترافیک = افزایش فرونشست
بارش	۰/۹۴۴	عدم رابطه	-۸/۳۲۰	-	-
دما	۰/۹۱۹	عدم رابطه	۱/۲۴	-	-
آب زیرزمینی	۰/۴	عدم رابطه	-۳/۸۰۴	-	-

بر اساس نتایج به‌دست‌آمده از جدول، می‌توان نتیجه‌گیری کرد که میان نه عامل جغرافیایی و فرونشست در سال ۲۰۱۷ همبستگی‌های متنوعی وجود دارد. به طور خاص، از میان این نه عامل، عواملی نظیر جمعیت، فاصله از رودخانه، شیب و ترافیک دارای رابطه معنادار و مستقیمی با میزان فرونشست در شهر اصفهان در سال ۲۰۱۷ در ارتباط با سازه‌های تاریخی و گردشگری بوده‌اند. همچنین عامل سطح آب‌های زیرزمینی دارای یک رابطه معکوس بوده است. لذا با کاهش سطح آب زیرزمینی باتوجه به شرایطی مانند کاهش بارندگی یا برداشت بی‌رویه از آن، فرونشست را در سال ۲۰۱۷ رو به افزایش گذاشته است و این عامل نقش مهمی در تشدید مخاطره فرونشست در ارتباط با آثار گردشگری و تاریخی دارد.

بر اساس نتایج حاصل از تحلیل رگرسیون خطی چندگانه در سال ۲۰۱۷ (جدول ۳)، می‌توان دریافت که میان نه عامل جغرافیایی و میزان فرونشست زمین در محدوده آثار تاریخی و گردشگری شهر اصفهان، همبستگی‌های متنوعی وجود داشته است. در این میان، پنج عامل شامل جمعیت (ضریب ۴/۶۶)، فاصله از رودخانه (۴/۰۵)، شیب زمین (۶/۳۸) و ترافیک شهری (۱/۳۳) با رابطه‌ای مثبت و معنادار بر میزان فرونشست تأثیرگذار بوده‌اند؛ به‌طوری‌که افزایش هر یک از این متغیرها با افزایش نرخ فرونشست همراه بوده است. افزون بر این، سطح آب زیرزمینی نیز رابطه‌ای معکوس و معنادار با فرونشست نشان داده (ضریب منفی ۵/۵۰) به‌گونه‌ای که کاهش سطح آب‌های زیرزمینی به‌واسطه کاهش بارش یا برداشت بی‌رویه نقش مهمی در تشدید پدیده فرونشست ایفا کرده است. در مقابل، متغیرهایی همچون ارتفاع، فاصله از مترو، بارش و دما فاقد رابطه معنادار با



فرونشست بوده‌اند. این یافته‌ها بر ضرورت توجه به فشارهای انسانی، موقعیت مکانی و منابع آب زیرزمینی در تدوین سیاست‌های حفاظت از میراث فرهنگی در مناطق مستعد فرونشست تأکید دارند.

جدول ۳- همبستگی عوامل جغرافیایی و فرونشست سال ۲۰۱۷ شهر اصفهان (رگرسیون خطی چندگانه)

عنوان عامل	Pr	رابطه	ضریب	نوع رابطه	توضیح
ارتفاع	۰/۴۷	عدم رابطه	-۳/۲۷	-	-
فاصله از مترو	۰/۴۷	عدم رابطه	۸/۹۲	-	-
جمعیت	۰/۰۰	معنادار	۴/۶۶	مستقیم	افزایش جمعیت = افزایش فرونشست
فاصله از رودخانه	۰/۰۰	معنادار	۴/۰۵	مستقیم	افزایش فاصله از رودخانه = افزایش فرونشست
شیب	۰/۰۰	معنادار	۶/۳۸	مستقیم	افزایش شیب = افزایش فرونشست
ترافیک	۰/۰۰	معنادار	۱/۳۳	مستقیم	افزایش ترافیک = افزایش فرونشست
بارش	۰/۸۷	عدم رابطه	-۶/۳۸	-	-
دما	۰/۸۸	عدم رابطه	۵/۵۳	-	-
آب زیرزمینی	۰/۰۴	معنادار	-۵/۵۰	معکوس	کاهش سطح آب زیرزمینی = افزایش فرونشست

بر اساس نتایج حاصل از مدل‌سازی رگرسیون خطی چندگانه در محیط R (جدول ۴)، مشخص گردید که در سال ۲۰۱۸، بین پدیده فرونشست زمین و برخی از عوامل جغرافیایی در شهر اصفهان روابط معنادار و قابل‌توجهی برقرار بوده است. چهار عامل شامل شیب زمین (ضریب ۱/۴۹)، فاصله از رودخانه (۳/۹۳)، جمعیت (۲/۹۳) و ترافیک (۱/۰۳) با فرونشست رابطه‌ای مستقیم و معنادار داشته‌اند؛ به‌نحوی که با افزایش هر یک از این متغیرها، میزان فرونشست نیز افزایش یافته است. افزون بر آن، کاهش سطح آب‌های زیرزمینی نیز با ضریب منفی ۷/۰۰۴ تأثیری معکوس و معنادار بر این پدیده داشته است، به‌گونه‌ای که افت منابع آب زیرزمینی که می‌تواند ناشی از برداشت بی‌رویه یا کاهش تغذیه سفره‌های آب زیرزمینی باشد، نقش مهمی در تشدید نرخ فرونشست ایفا کرده است. در مقابل، متغیرهایی نظیر ارتفاع، فاصله از ایستگاه مترو، بارش و دما فاقد رابطه آماری معنادار با فرونشست بوده‌اند. مجموعه این یافته‌ها مؤید آن است که تأثیرات متقابل عوامل انسانی و طبیعی در بروز فرونشست باید به طور هم‌زمان موردتوجه قرار گیرد، به‌ویژه آنکه مدیریت منابع آب زیرزمینی و کنترل فشارهای شهری می‌تواند نقش کلیدی در کاهش مخاطرات ژئومورفولوژیکی در مناطق تاریخی و گردشگری ایفا کند.

جدول ۴- همبستگی عوامل جغرافیایی و فرونشست سال ۲۰۱۸ شهر اصفهان (رگرسیون خطی چندگانه)

عنوان عامل	Pr	رابطه	ضریب	نوع رابطه	توضیح
ارتفاع	۰/۷۲۲	عدم رابطه	-۹/۷۶	-	-
فاصله از مترو	۰/۸۰	عدم رابطه	-۱/۴۲	-	-
جمعیت	۰/۰۰	معنادار	۲/۹۳	مستقیم	افزایش جمعیت = افزایش فرونشست
فاصله از رودخانه	۰/۰۰	معنادار	۳/۹۳	مستقیم	افزایش فاصله از رودخانه = افزایش فرونشست
شیب	۰/۰۰	معنادار	۱/۴۹	مستقیم	افزایش شیب = افزایش فرونشست
ترافیک	۰/۰۰	معنادار	۱/۰۳	مستقیم	افزایش ترافیک = افزایش فرونشست
بارش	۰/۲۴	عدم رابطه	-۴/۵۵	-	-
دما	۰/۲۴	عدم رابطه	۴/۶۵۴	-	-
آب زیرزمینی	۰/۳۹۸	معنادار	-۷/۰۰۴	معکوس	کاهش سطح آب زیرزمینی = افزایش فرونشست

در سال ۲۰۱۹ (جدول ۵) نشان می‌دهد که میان نه عامل جغرافیایی و میزان فرونشست زمین در شهر اصفهان، همبستگی‌هایی متنوع و قابل‌توجه وجود داشته است. از میان این عوامل، چهار متغیر جمعیت (ضریب ۱/۷۱۳)، فاصله از رودخانه



(۶/۴۲)، شیب زمین (۱/۵۳) و ترافیک شهری (۱/۲۰) با رابطه‌ای معنادار و مستقیم بر میزان فرونشست تأثیرگذار بوده‌اند؛ به‌گونه‌ای که افزایش هر یک از این عوامل با افزایش میزان فرونشست همراه بوده است. همچنین، هرچند عامل سطح آب زیرزمینی در این سال رابطه‌ای معنادار آماری نداشته (pr برابر با ۰/۱۹)، اما جهت ضریب آن منفی (۲/۹۶-) بوده که همچنان نشان‌دهنده گرایش معکوس میان کاهش سطح آب زیرزمینی و افزایش فرونشست است. این موضوع می‌تواند بیانگر تأثیر غیرمستقیم و پیچیده این متغیر در کنار سایر عوامل محیطی باشد. سایر متغیرها مانند ارتفاع، فاصله از مترو، بارش و دما نیز فاقد رابطه معنادار آماری با پدیده فرونشست بوده‌اند. در مجموع، نتایج این سال نیز همچون سال‌های پیشین بر نقش غالب عوامل انسانی و ویژگی‌های فیزیکی زمین در تشدید فرونشست و لزوم مدیریت تلفیقی منابع و برنامه‌ریزی شهری در مناطق تاریخی تأکید دارد.

جدول ۵- همبستگی عوامل جغرافیایی و فرونشست سال ۲۰۱۹ شهر اصفهان (رگرسیون خطی چندگانه)

عنوان عامل	Pr	رابطه	ضریب	نوع رابطه	توضیح
ارتفاع	۰/۱۰۲	عدم رابطه	-۵/۲۰۲	-	-
فاصله از مترو	۰/۰۹۶	عدم رابطه	-۱/۸۳	-	-
جمعیت	۰/۰۶	معنادار	۱/۷۱۳	مستقیم	افزایش جمعیت = افزایش فرونشست
فاصله از رودخانه	۰/۰۰	معنادار	۶/۴۲	مستقیم	افزایش فاصله از رودخانه = افزایش فرونشست
شیب	۰/۰۰	معنادار	۱/۵۳	مستقیم	افزایش شیب = افزایش فرونشست
ترافیک	۰/۰۰	معنادار	۱/۲۰	مستقیم	افزایش ترافیک = افزایش فرونشست
بارش	۰/۴۰	عدم رابطه	-۲/۲۱۳	-	-
دما	۰/۲۹	عدم رابطه	۲/۶۲	-	-
آب زیرزمینی	۰/۱۹	عدم رابطه	-۲/۹۶	-	-

بر اساس نتایج به‌دست‌آمده در سال ۲۰۲۰ تنها دو عامل «شیب زمین» و «ترافیک شهری» با فرونشست زمین در شهر اصفهان رابطه‌ای معنادار و مستقیم داشته‌اند. به عبارتی، افزایش شیب (با ضریب ۱/۵۵) و افزایش ترافیک (با ضریب ۱/۲۶) موجب افزایش میزان فرونشست در نواحی مورد مطالعه شده‌اند. این رابطه بیانگر آن است که فشار ناشی از حرکت وسایل نقلیه و ویژگی‌های فیزیکی زمین در نواحی با شیب بالاتر، دو عامل کلیدی در تشدید جابه‌جایی‌های سطحی زمین در محدوده آثار تاریخی و گردشگری بوده‌اند. سایر عوامل از جمله ارتفاع، فاصله از مترو، جمعیت، فاصله از رودخانه، بارش، دما و سطح آب زیرزمینی فاقد رابطه آماری معنادار با پدیده فرونشست در این سال بوده‌اند. این یافته‌ها حاکی از آن است که در سال ۲۰۲۰، برخلاف سال‌های پیشین، تنها متغیرهای موضعی و فیزیکی مرتبط با زمین و فعالیت‌های سطحی نقش مؤثری در بروز فرونشست ایفا کرده‌اند که بر لزوم توجه بیشتر به طراحی شهری، مدیریت ترافیک و استقرار سازه‌ها در نواحی شیب‌دار تأکید می‌کند.



جدول ۶- همبستگی عوامل جغرافیایی و فرونشست سال ۲۰۲۰ شهر اصفهان (رگرسیون خطی چندگانه)

عنوان عامل	Pr	رابطه	ضریب	نوع رابطه	توضیح
ارتفاع	۰/۷۸۲	عدم رابطه	-۱/۰۰۳	-	-
فاصله از مترو	۰/۷۷۱	عدم رابطه	-۲/۴۰۴	-	-
جمعیت	۰/۶۸۹	عدم رابطه	-۴/۳۵۰	-	-
فاصله از رودخانه	۰/۱۳۲	عدم رابطه	-۱/۱۷۳	-	-
شیب	۰/۰۱	معنادار	۱/۵۵۰	مستقیم	افزایش شیب = افزایش فرونشست
ترافیک	۰/۰۱	معنادار	۱/۲۶۳	مستقیم	افزایش ترافیک = افزایش فرونشست
بارش	۰/۸۹۲	عدم رابطه	-۶/۵۸	-	-
دما	۰/۸۱۹	عدم رابطه	۱/۱۰۶	-	-
آب زیرزمینی	۰/۵۸۹	عدم رابطه	۸/۸۲۶	-	-

نتایج حاصل از مدل رگرسیون خطی چندگانه در سال ۲۰۲۱ (جدول ۷) نشان داد از میان ۹ عامل جغرافیایی بررسی شده، چهار عامل شامل جمعیت (ضریب ۲/۲۵)، فاصله از رودخانه (۴/۵۰)، شیب زمین (۲/۵۶) و ترافیک شهری (۴/۹۳)، پدیده فرونشست در شهر اصفهان رابطه‌ای معنادار و مستقیم داشته‌اند. به بیان دیگر، افزایش هر یک از این متغیرها به طور معناداری با افزایش میزان فرونشست زمین در نواحی تاریخی و گردشگری همراه بوده است. این نتایج نشان‌دهنده آن است که تراکم جمعیتی، گسترش ترافیک، ویژگی‌های توپوگرافی و فاصله از منابع آبی سطحی از مهم‌ترین عوامل تشدیدکننده فرونشست در این سال بوده‌اند. در مقابل، متغیرهایی نظیر ارتفاع، فاصله از مترو، بارش، دما و سطح آب زیرزمینی فاقد رابطه آماری معنادار با فرونشست بوده‌اند. این یافته‌ها بر لزوم تمرکز بر مدیریت جمعیتی، کنترل ترافیک و برنامه‌ریزی مکانی در مناطق با شیب زیاد یا دور از رودخانه‌ها برای کاهش آسیب‌پذیری میراث تاریخی و گردشگری در برابر فرونشست زمین تأکید دارند.

جدول ۷- همبستگی عوامل جغرافیایی و فرونشست سال ۲۰۲۱ شهر اصفهان (رگرسیون خطی چندگانه)

عنوان عامل	Pr	رابطه	ضریب	نوع رابطه	توضیح
ارتفاع	۰/۱۹۰	عدم رابطه	-۴/۵۴	-	-
فاصله از مترو	۰/۹۵	عدم رابطه	-۴/۸۱	-	-
جمعیت	۰/۰۰	معنادار	۲/۲۵	مستقیم	افزایش جمعیت = افزایش فرونشست
فاصله از رودخانه	۰/۰۱	معنادار	۴/۵۰	مستقیم	افزایش فرونشست = افزایش شیب
شیب	۰/۰۱۶	معنادار	۲/۵۶	مستقیم	افزایش شیب = افزایش فرونشست
ترافیک	۰/۰۱۶	معنادار	۴/۹۳	مستقیم	افزایش ترافیک = افزایش فرونشست
بارش	۰/۷۲	عدم رابطه	-۳/۰۷۰	-	-
دما	۰/۶۹	عدم رابطه	۳/۴۰	-	-
آب زیرزمینی	۰/۴۴	عدم رابطه	-۲/۲۵	-	-

در سال ۲۰۲۲ سه عامل جمعیت، شیب و ترافیک تأثیر معنادار و مستقیمی بر پدیده فرونشست در شهر اصفهان داشته است؛ به گونه‌ای که با افزایش این متغیرها، میزان فرونشست نیز افزایش یافته است. در کنار این عوامل، دو متغیر دیگر یعنی فاصله از مترو و سطح آب‌های زیرزمینی نیز با فرونشست رابطه‌ای معنادار اما معکوس داشته‌اند؛ بدین معنا که با افزایش فاصله از ایستگاه‌های مترو یا کاهش سطح آب‌های زیرزمینی، میزان فرونشست افزایش یافته است. این یافته نشان می‌دهد که هم عوامل انسانی مانند تراکم جمعیت و ترافیک و هم عوامل محیطی مانند شیب زمین و افت سطح آب زیرزمینی در تشدید



فرونشست نقش مؤثری دارند، و نیز زیرساخت‌هایی مانند مترو ممکن است در ناپایداری زمین مؤثر باشند. سایر متغیرها از جمله ارتفاع، بارش، دما و فاصله از رودخانه، در این سال رابطه معناداری با فرونشست نشان نداده‌اند.

جدول ۸- همبستگی عوامل جغرافیایی و فرونشست سال ۲۰۲۲ شهر اصفهان (رگرسیون خطی چندگانه)

عنوان عامل	Pr	رابطه	ضریب	نوع رابطه	توضیح
ارتفاع	۰/۸۱	عدم رابطه	۱/۰۲۰	-	-
فاصله از مترو	۰/۰۰۳	معنادار	-۳/۲۹	معکوس	افزایش فاصله از مترو = کاهش فرونشست
جمعیت	۰/۰۰۰۳	معنادار	۵/۲۰	مستقیم	افزایش جمعیت = افزایش فرونشست
فاصله از رودخانه	۰/۹۲۲	عدم رابطه	-۱/۰۸	-	-
شیب	۰/۰۱	معنادار	۷/۳۳	مستقیم	افزایش شیب = افزایش فرونشست
ترافیک	۰/۰۳	معنادار	۲/۶۲	مستقیم	افزایش ترافیک = افزایش فرونشست
بارش	۰/۱۱	عدم رابطه	-۶/۸۲	-	-
دما	۰/۰۵	معنادار	۸/۰۷	-	-
آب زیرزمینی	۰/۰۰۸	معنادار	-۷/۸۳	معکوس	کاهش سطح آب زیرزمینی = افزایش فرونشست

بر اساس نتایج مدل رگرسیون خطی چندگانه در سال ۲۰۲۳ (جدول ۹)، شش عامل شامل جمعیت، ارتفاع، فاصله از رودخانه، ترافیک، شیب زمین و دما رابطه‌ای معنادار و مستقیم با پدیده فرونشست در شهر اصفهان داشته‌اند، به این معنا که افزایش هر یک از این متغیرها به طور قابل توجهی موجب افزایش میزان فرونشست شده است. در مقابل، سه عامل فاصله از مترو، بارش و سطح آب‌های زیرزمینی نیز با فرونشست رابطه‌ای معنادار و معکوس نشان داده‌اند؛ یعنی با افزایش فاصله از خطوط مترو، افزایش بارش و بالا بودن سطح آب زیرزمینی، میزان فرونشست کاهش یافته است. این نتایج بیانگر نقش ترکیبی عوامل انسانی، توپوگرافی و شرایط اقلیمی در تشدید یا کاهش فرونشست است و بر ضرورت مدیریت جامع منابع آب، کنترل فشارهای جمعیتی و ترافیکی و توجه به ویژگی‌های زمین‌شناسی و اقلیمی برای حفاظت از میراث تاریخی شهر اصفهان تأکید دارد.

جدول ۹- همبستگی عوامل جغرافیایی و فرونشست سال ۲۰۲۳ شهر اصفهان (رگرسیون خطی چندگانه)

عنوان عامل	Pr	رابطه	ضریب	نوع رابطه	توضیح
ارتفاع	۰/۰۴	معنادار	۱/۱۷	مستقیم	افزایش ارتفاع = افزایش فرونشست
فاصله از مترو	۰/۰۰۲	معنادار	-۴/۴۸	معکوس	افزایش فاصله از مترو = کاهش فرونشست
جمعیت	۰/۰۰۰۱	معنادار	۸/۰۹	مستقیم	افزایش جمعیت = افزایش فرونشست
فاصله از رودخانه	۰/۰۲	معنادار	-۳/۲۶	مستقیم	افزایش فاصله از رودخانه = افزایش فرونشست
شیب	۰/۰۱	معنادار	۵/۶۱	مستقیم	افزایش شیب = افزایش فرونشست
ترافیک	۰/۰۱	معنادار	۷/۱۴	مستقیم	افزایش ترافیک = افزایش فرونشست
بارش	۰/۰۰	معنادار	-۱/۵۵	معکوس	کاهش بارش = افزایش فرونشست
دما	۰/۰۰	معنادار	۱/۷۶	مستقیم	افزایش دما = افزایش فرونشست
آب زیرزمینی	۰/۰۰۲	معنادار	-۱/۳۳	معکوس	کاهش سطح آب زیرزمینی = افزایش فرونشست

بر اساس نتایج به دست آمده از مدل رگرسیون خطی چندگانه در تحلیل همبستگی میان عوامل جغرافیایی منتخب و پدیده فرونشست در شهر اصفهان در سال ۲۰۲۴، یافته‌ها حاکی از آن است که عواملی نظیر جمعیت، ترافیک، شیب دارای رابطه‌ای معنادار و مستقیم با فرونشست هستند. به عبارتی، افزایش هر یک از این متغیرها به طور مستقیم منجر به افزایش میزان



فرونشست می‌شود. این ارتباط نشان‌دهنده تأثیرات عمیق و گسترده‌ای است که این عوامل بر پدیده فرونشست دارند و ضرورت توجه به آن‌ها را در برنامه‌ریزی‌های شهری و مدیریت منابع آب نمایان می‌سازد. بر اساس نتایج مدل رگرسیون خطی چندگانه برای سال ۲۰۲۴ (جدول ۱۰) سه عامل جمعیت (ضریب ۳/۹۴)، شیب زمین (۷/۰۶) و ترافیک شهری (۵/۱۹) رابطه‌ای معنادار و مستقیم با پدیده فرونشست در شهر اصفهان داشته‌اند، به این معنا که افزایش این متغیرها موجب افزایش نرخ فرونشست شده است. همچنین، کاهش سطح آب‌های زیرزمینی با ضریب منفی ۱/۱۷ رابطه‌ای معنادار و معکوس با فرونشست داشته است، به گونه‌ای که افت منابع آب زیرزمینی باعث تشدید فرونشست شده است. سایر عوامل شامل ارتفاع، فاصله از مترو، فاصله از رودخانه، بارش و دما در این سال رابطه معناداری با فرونشست نشان ندادند. این نتایج مجدداً بر اهمیت نقش عوامل انسانی، ویژگی‌های توپوگرافی و مدیریت منابع آب زیرزمینی در کنترل و کاهش مخاطرات فرونشست در ارتباط با آثار تاریخی و گردشگری تأکید می‌کنند.

جدول ۱۰- همبستگی عوامل جغرافیایی و فرونشست سال ۲۰۲۴ شهر اصفهان (رگرسیون خطی چندگانه)

عنوان عامل	Pr	رابطه	ضریب	نوع رابطه	توضیح
ارتفاع	۰/۵۵	عدم رابطه	-۲/۸۴	-	-
فاصله از مترو	۰/۸۴	عدم رابطه	-۲/۱۴	-	-
جمعیت	۰/۰۳	معنادار	۳/۹۴	مستقیم	افزایش جمعیت = افزایش فرونشست
فاصله از رودخانه	۰/۲۷	عدم رابطه	۱/۵۵	-	-
شیب	۰/۰۱۶	معنادار	۷/۰۶	مستقیم	افزایش شیب = افزایش فرونشست
ترافیک	۰/۰۱	معنادار	۵/۱۹	مستقیم	افزایش ترافیک = افزایش فرونشست
بارش	۰/۳۲	عدم رابطه	-۱/۴۶	-	-
دما	۰/۳۷	عدم رابطه	۱/۳۱	-	-
آب زیرزمینی	۰/۰۰۱	معنادار	-۱/۱۷	معکوس	کاهش سطح آب زیرزمینی = افزایش فرونشست

بحث و نتیجه‌گیری

شهر اصفهان با آثار تاریخی و جاذبه‌های گردشگری ارزشمند، در معرض خطر فرونشست زمین قرار دارد که تهدیدی جدی برای پایداری این میراث فرهنگی است. فرونشست تحت تأثیر عوامل طبیعی و انسانی رخ می‌دهد و شناخت این عوامل برای حفاظت مؤثر ضروری است. هدف این مطالعه، تحلیل تأثیر عوامل جغرافیایی بر فرونشست زمین در محدوده آثار تاریخی و گردشگری اصفهان طی سال‌های ۲۰۱۶ تا ۲۰۲۴ و ارائه راهکارهایی برای حفظ پایداری این سازه‌ها می‌باشد. تحلیل داده‌های رگرسیون خطی چندگانه در بازه زمانی ۲۰۱۶ تا ۲۰۲۴ نشان می‌دهد که پدیده فرونشست زمین در محدوده آثار تاریخی و گردشگری شهر اصفهان تحت تأثیر عوامل جغرافیایی متعددی قرار دارد که این تأثیرات در طول سال‌ها تغییراتی را نیز تجربه کرده است. این یافته‌ها در راستای نتایج پژوهش چن و همکاران (۲۰۲۰) است که ارتباط معناداری میان سفره‌های آب زیرزمینی و فرونشست زمین در پکن مشاهده کردند و کاهش فرونشست طی دوره‌ای را گزارش نمودند. همچنین، پژوهش موهتار و همکاران (۲۰۲۱) نیز تأکید کرده‌اند که برداشت بی‌رویه آب و افزایش جمعیت از عوامل اصلی تشدید فرونشست است. این همخوانی نشان می‌دهد که عوامل انسانی و طبیعی ترکیبی از دلایل اصلی فرونشست هستند. به‌طور کلی، سه گروه اصلی از عوامل شامل عوامل انسانی (جمعیت و ترافیک)، ویژگی‌های توپوگرافی (شیب زمین) و شرایط منابع آب زیرزمینی نقش کلیدی در بروز و تشدید فرونشست داشته‌اند. این یافته‌ها مشابه نتایج بخاری و همکاران (۲۰۲۳) است که نقش شیب زمین، خاک و تغییرات انسانی را در افزایش فرونشست در شهر گوادیر برجسته کرده‌اند. همچنین، وانگ و همکاران (۲۰۲۴) ارتباط بین برداشت آب زیرزمینی و وزن ساختمان‌ها را به‌عنوان عوامل مؤثر بر فرونشست مطرح کرده‌اند که با نتایج بررسی شما درباره تأثیر منابع آب و فشارهای کالبدی شهری همخوانی دارد.

در طول این دوره نه‌ساله، جمعیت و ترافیک شهری به‌عنوان شاخص‌های فشارهای انسانی و کالبدی بر زمین، همواره رابطه‌ای مثبت و معنادار با میزان فرونشست نشان داده‌اند. این امر تأکیدی است بر تأثیر فعالیت‌های توسعه شهری و افزایش تراکم جمعیتی بر ناپایداری‌های زمین، به‌ویژه در نواحی تاریخی که اغلب زیرساخت‌های شهری قدیمی و حساس دارند. فشار ناشی از حرکت وسایل نقلیه سنگین و ارتعاشات ناشی از ترافیک می‌تواند موجب تشدید فرونشست و تخریب سازه‌های تاریخی شود. یافته‌های شیرانی و همکاران (۱۴۰۰) که افزایش نرخ متوسط فرونشست در مناطق مختلف را نشان داده‌اند، با این نتایج همسو است. از سوی دیگر، ویژگی توپوگرافی زمین، به‌ویژه شیب، یکی از عوامل طبیعی مهم است که در اکثر سال‌ها با فرونشست رابطه مستقیم و معنادار داشته است. مناطق با شیب بیشتر به دلیل حساسیت‌های ژئوتکنیکی و قابلیت لغزش بیشتر خاک، بیشتر در معرض فرونشست قرار گرفته‌اند. این موضوع لزوم توجه ویژه به نحوه استقرار و حفاظت از بناهای تاریخی در نواحی با شرایط زمین‌شناسی ویژه را نمایان می‌سازد؛ موضوعی که در مطالعه بخاری و همکاران (۲۰۲۳) نیز مورد تأکید قرار گرفته است.

همچنین، نقش منابع آب زیرزمینی به‌ویژه کاهش سطح آنها، به‌عنوان عاملی حیاتی در تشدید فرونشست، بارها در داده‌ها تکرار شده است. کاهش سطح آب‌های زیرزمینی که ممکن است ناشی از برداشت بی‌رویه، کاهش بارش یا تغییرات اقلیمی باشد، موجب کاهش فشار آب در خاک و افزایش نشست زمین می‌شود که به‌ویژه در محدوده آثار تاریخی بسیار خطرناک است. این یافته‌ها با نتایج مطالعات آزمون و همکاران (۱۴۰۱)، اکبریان و قهرودی (۱۴۰۲) و طالبی‌نیا و همکاران (۱۴۰۲) که رابطه مستقیم و معناداری میان افت سطح آب زیرزمینی و فرونشست زمین یافته‌اند، همخوانی دارد. همچنین، عابدینی و همکاران (۱۴۰۲) تأثیر فرونشست بر محوطه‌های تاریخی را اثبات کرده‌اند که بر اهمیت حفاظت از منابع آبی تأکید می‌ورزد.

عوامل دیگری همچون فاصله از رودخانه و فاصله از ایستگاه‌های مترو نیز در برخی سال‌ها رابطه معناداری با فرونشست داشته‌اند که نشان‌دهنده تأثیر موقعیت مکانی و زیرساخت‌های شهری بر پدیده فرونشست است. به طور خاص، نزدیکی به خطوط مترو در برخی موارد با افزایش فرونشست مرتبط بوده که احتمالاً ناشی از ناپایداری‌های ناشی از حفاری و ساخت این زیرساخت‌ها است؛ موضوعی که کمتر در پیشینه مورد بررسی قرار گرفته و نوآوری این پژوهش محسوب می‌شود. در مقابل، عواملی مانند ارتفاع، بارش و دما در اکثر سال‌ها رابطه‌ای معنادار و مستمر با فرونشست نشان نداده‌اند که می‌تواند به دلیل تأثیرات غیرمستقیم، متغیر بودن شرایط اقلیمی یا مقیاس تحلیل باشد. این نتیجه تا حدی با یافته‌های چن و همکاران (۲۰۲۰) و چاو (۲۰۲۱) مطابقت دارد که اثرات اقلیمی را غیرمستقیم یا کم‌اهمیت‌تر دانسته‌اند.

محدودیت‌های اصلی این پژوهش عبارت‌اند از محدودیت زمانی داده‌ها که تنها بازه ۲۰۱۶ تا ۲۰۲۴ را پوشش می‌دهد، عدم در نظر گرفتن عوامل زمین‌شناسی موضعی و جزئیات سازه‌ها، و کمبود داده‌های دقیق مربوط به منابع آب زیرزمینی و بارش در مقیاس کوچک. همچنین تأثیرات بلندمدت تغییرات اقلیمی به طور کامل بررسی نشده است؛ بنابراین، نتایج باید با احتیاط تفسیر شده و مطالعات آینده با داده‌های گسترده‌تر و مدل‌های جامع‌تر تکمیل گردد.

در مجموع، نتایج حاصل از این تحلیل نه‌ساله نشان می‌دهد که فرونشست زمین در محدوده آثار تاریخی و گردشگری اصفهان پدیده‌ای چندعوامله ترکیبی است که تحت تأثیر فشارهای انسانی، شرایط طبیعی و مدیریت منابع آب قرار دارد. این یافته، به‌ویژه در مقایسه با پیشینه پژوهش‌ها که بیشتر به عوامل منفردی چون برداشت آب زیرزمینی یا ویژگی‌های زمین‌شناختی پرداخته‌اند، نوآوری مهمی در جهت نگاه ترکیبی و چندبعدی به موضوع ارائه می‌دهد. بنابراین، برای حفاظت مؤثر از این میراث ارزشمند، نیازمند تدوین برنامه‌های مدیریت جامع و یکپارچه هستیم که شامل پایش مستمر زمین‌شناسی، کنترل فعالیت‌های انسانی به‌ویژه در حوزه ترافیک و جمعیت، مدیریت بهینه منابع آب زیرزمینی و توجه ویژه به خصوصیات توپوگرافی مناطق حساس باشد. بدون شک، این رویکرد چندوجهی می‌تواند ضمن کاهش مخاطرات فرونشست، به حفظ و ارتقاء پایداری و سلامت سازه‌های تاریخی و جاذبه‌های گردشگری شهر اصفهان کمک شایانی نماید.



باتوجه به نتایج پژوهش حاضر، مطالعات آینده می‌توانند با گسترش بازه زمانی و مقیاس مکانی داده‌ها، در نظر گرفتن عوامل زمین‌شناسی موضعی، پایش دقیق منابع آب زیرزمینی و بررسی اثرات زیرساخت‌ها و فعالیت‌های انسانی، تحلیل جامع‌تری از فرونشست زمین ارائه دهند. همچنین شبیه‌سازی و مدل‌سازی پیش‌بینی، ترکیب داده‌های اقلیمی و هیدرولوژیکی و ارزیابی اثرات اقتصادی و گردشگری فرونشست می‌تواند مدیریت پایدار آثار تاریخی و جاذبه‌های گردشگری را تقویت کند.

منابع

- آزم، زهرا، مهرابی، حمید، و نادیف سعید. (۱۴۰۱). بررسی میزان همبستگی بین فرونشست و تغییرات سطح آب زیرزمینی با استفاده از آنالیز سری زمانی تداخل‌سنجی راداری (منطقه مطالعاتی: اصفهان). *جغرافیا و مخاطرات محیطی*، ۱۱(۴)، ۱۷۳-۱۹۲.
<https://doi.org/10.22067/geoech.2022.75774.1199>
- اکبریان، مرتضی، و قهرودی تالی، منیژه. (۱۴۰۲). ارزیابی فرونشست زمین در دشت اسدآباد همدان و مخاطرات آن. *مدیریت مخاطرات محیطی*، ۱۰(۴)، ۲۷۷-۲۹۰.
<https://doi.org/10.22059/jhsci.2024.370217.807>
- جمینی، داود، جوان، فرهاد، و آتش‌بهار، رامین. (۱۴۰۴). کاربرد هوش مصنوعی در مکان‌یابی اکوکمپ گردشگری. *مطالعات مدیریت گردشگری*، ۲۰(۷۱)، ۱-۳۳.
<https://doi.org/10.22054/tms.2025.85190.3055>
- جمینی، داود، جوان، فرهاد، و حیدریان، بیتا. (۱۴۰۳). شناسایی چالش‌ها و راهکارهای توسعه ژئوتوریسم در سکونتگاه‌های روستایی منتخب در استان‌های کردستان، کرمانشاه و همدان. *برنامه‌ریزی و توسعه گردشگری*، ۱۳(۵۱)، ۲۱۵-۲۳۷.
<https://doi.org/10.22080/jtpd.2024.28159.3943>
- جمینی، داود، شهبابی، هیمین، نظری، حمید، و آتش‌بهار، رامین. (۱۴۰۲). شناسایی سکونتگاه‌های روستایی در معرض خطر وقوع زمین‌لغزش در زیست‌بوم‌های عشایری (مطالعه موردی: شهرستان پاوه). *مطالعات برنامه‌ریزی قلمرو کوچ‌نشینان*، ۳(۱)، ۱۰۷-۱۲۲.
<https://doi.org/10.22034/jsnap.2023.410697.1066>
- حسین‌زاده، سیدرضا، اکبری، ابراهیم، جوانشیری، مهدی، و محمدپور سنگانی، زینت. (۱۴۰۱). تحلیل فضایی فرونشست سطح زمین با استفاده از تداخل‌سنجی راداری (مورد مطالعه: دشت مرکزی شهرستان قاین). *جغرافیا و مخاطرات محیطی*، ۱۱(۴)، ۹۹-۱۲۶.
<https://doi.org/10.22067/geoech.2022.75138.116>
- شیرانی، کورش، پسندی، مهرداد، و ابراهیمی، بابک. (۱۴۰۰). بررسی فرونشست زمین در دشت نجف‌آباد اصفهان با استفاده از تکنیک تداخل‌سنجی تفاضلی راداری. *علوم آب و خاک*، ۲۵(۱)، ۱۰۵-۱۲۷.
<https://doi.org/10.47176/jwss.25.1.147214>
- صادقی، حجت، و جوان، فرهاد. (۱۴۰۴). آسیب‌پذیری روستاهای گردشگری ایران از لحاظ مخاطره زمین‌لغزش با استفاده از GIS. *مجله جغرافیا* (نشریه انجمن جغرافیایی ایران)، ۲۳(۸۴)، ۱۵۳-۱۷۰.
<https://doi.org/10.22034/jiga.2025.2055364.1385>
- صادقی، حجت‌الله. (۱۴۰۲). ارزیابی تطبیقی مدل‌های هم‌پوشانی فازی جهت تعیین پهنه‌های مستعد ایجاد اماکن اقامتی-گردشگری در منطقه دزپارت با مدل‌های Gamma. *برنامه‌ریزی فضایی*، ۱۳(۴)، ۱-۲۲.
<https://doi.org/10.22108/sppl.2023.138669.1759>
- طالبی‌نیا، مرجان، خسروی، حسن، زهتابیان، غلامرضا، ملکیان، آرش، و کشتکار، حمیدرضا. (۱۴۰۲). بررسی روند فرونشست دشت اصفهان با استفاده از تکنیک تداخل‌سنجی تفریقی راداری. *سنجش‌ازدور و سامانه اطلاعات جغرافیایی در منابع طبیعی*، ۱۴(۳)، ۹-۱۲.
<https://journals.iau.ir/article690220.html>
- عابدینی، موسی، متکلم، لیلا، و سیفی، هوشنگ. (۱۴۰۲). بررسی مخاطرات ناشی از فرونشست زمین و تأثیر آن بر محوطه‌های تاریخی با استفاده از تکنیک تداخل‌سنجی تفاضلی راداری: مطالعه موردی دشت اردبیل. *پژوهش‌های ژئومورفولوژی کمی*، ۱۳(۳)، ۱۵۸-۱۴۱.
<https://doi.org/10.22034/gmpj.2024.477322.1521>
- عابدینی، موسی، و نظری گزیک، زهرا. (۱۴۰۳). تجزیه و تحلیل میزان فرونشست زمین و اثرات آن بر ژئومورفوسایت‌های گردشگری شهر توریستی شاندیز خراسان رضوی. *پژوهش‌های ژئومورفولوژی کمی*، ۱۲(۴)، ۱۷۱-۱۹۲.
<https://doi.org/10.22034/gmpj.2024.423463.1462>



- نظری گزیک، زهرا، و صدیق، مهناز. (۱۴۰۴). ارزیابی اثر فرونشست زمین بر جاذبه‌های ژئوتوریستی شهر طرqbه. *جغرافیا و روابط انسانی*، ۸(۳)، ۴۰۵-۳۹۱. <https://doi.org/10.22034/gahr.2024.464114.2177>
- Abedini, M., & Nazari, Z. (2024). Analyzing the amount of land subsidence and its effects on tourism geomorphosites in Shandiz tourist city, Razavi Khorasan. *Quantitative Geomorphological Research*, 12(4), 171–192. <https://doi.org/10.22034/gmpj.2024.423463.1462> [In Persian]
- Abedini, M., Motekallem, L., & Seifi, H. (2024). Investigating the hazards caused by land subsidence and its effect on historical sites using differential radar interferometric technique: Case study of Ardabil Plain. *Quantitative Geomorphological Research*, 13(3), 141–158. <https://doi.org/10.22034/gmpj.2024.477322.1521> [In Persian]
- Abidin, H. Z., Andreas, H., Gumilar, I., & Brinkman, J. J. (2015). Study on the risk and impacts of land subsidence in Jakarta. *Proceedings of the International Association of Hydrological Sciences*, 372, 115–120. <https://doi.org/10.5194/piahs-372-115-2015>
- Akbarian, M., & Ghahroudi Tali, M. (2024). Assessment of land subsidence in Asadabad Plain of Hamadan and its hazards. *Environmental Management Hazards*, 10(4), 277–290. <https://doi.org/10.22059/jhsci.2024.370217.807> [In Persian]
- Aly, M. H., Zebker, H. A., Giardino, J. R., & Klein, A. G. (2009). Permanent scatterer investigation of land subsidence in Greater Cairo, Egypt. *Geophysical Journal International*, 178(3), 1238–1245. <https://doi.org/10.1111/j.1365-246X.2009.04250.x>
- Ao, Z., Hu, X., Tao, S., Hu, X., Wang, G., Li, M., et al. (2024). A national-scale assessment of land subsidence in China's major cities. *Science*, 384(6693), 301–306. <https://doi.org/10.1126/science.adl4366>
- Azarm, Z., Mehrabi, H., & Nadi, S. (2023). Investigating the relationship between subsidence and groundwater level changes using InSAR time series analysis (Isfahan study area). *Journal of Geography and Environmental Hazards*, 11(4), 173–192. <https://doi.org/10.22067/geoh.2022.75774.1199> [In Persian]
- Bertolin, C., & Sesana, E. (2023). Natural hazards affecting cultural heritage: Assessment of flood and landslide risk for the 28 existing Norwegian stave churches. *International Journal of Building Pathology and Adaptation*, 42(1), 48–91. <https://doi.org/10.1108/IJBPA-03-2022-0042>
- Bertolini, I., Gottardi, G., Marchi, M., & Ugolini, A. (2023, April). Cultural heritage and subsidence: The emblematic case study of Santa Croce in Ravenna (Italy). In *Proceedings of the Tenth International Symposium on Land Subsidence (TISOLS 2023)* (pp. 17–21). <https://www.researchgate.net/profile/Ilaria-Bertolini/publication/366589736>
- Bokhari, R., Shu, H., Tariq, A., Al-Ansari, N., Guluzade, R., Chen, T., & Aslam, M. (2023). Land subsidence analysis using synthetic aperture radar data. *Heliyon*, 9(3), Article e14690. <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2023.e14690>
- Bonini, J. E., Vieira, B. C., Corrêa, A. C. D. B., & Soldati, M. (2023). Landslides and cultural heritage—A review. *Heritage*, 6(10), 6648–6668. <https://doi.org/10.3390/heritage6100348>
- Cao, Q., Zhang, Y., Yang, L., Chen, J., & Hou, C. (2024). Unveiling the driving factors of urban land subsidence in Beijing, China. *Science of the Total Environment*, 916, 170134. <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0048969724002687>
- Chen, B., Gong, H., Chen, Y., Li, X., Zhou, C., Lei, K., & Zhao, X. (2020). Land subsidence and its relation with groundwater aquifers in Beijing Plain of China. *Science of the Total Environment*, 735, 139111. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.139111>
- Chen, M., Li, Z., Tomás, R., Herrera, G., Gong, H., Li, X., & Hu, L. (2025). Land subsidence-induced damage assessment along Beijing–Tianjin high-speed railway from space using high-resolution TerraSAR-X data. *Structural Health Monitoring*, 12(3), 1–18. <https://doi.org/10.1177/14759217251334328>



- Chowdhuri, I., Pal, S. C., Saha, A., Roy, P., Chakraborty, R., & Shit, M. (2022). Application of novel framework approach for assessing rainfall-induced future landslide hazard to world heritage sites in the Indo-Nepal-Bhutan Himalayan region. *Geocarto International*, 37(27), 17742–17776. <https://doi.org/10.1080/10106049.2022.2134464>
- Dinar, A., Esteban, E., Calvo, E., Herrera, G., Teatini, P., Tomás, R., & Albiac, J. (2021). We lose ground: Global assessment of land subsidence impact extent. *Science of the Total Environment*, 786, 147415. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2021.147415>
- Ezquerro, P., Del Soldato, M., Solari, L., Tomás, R., Raspini, F., Ceccatelli, M., & Herrera, G. (2020). Vulnerability assessment of buildings due to land subsidence using InSAR data in the ancient historical city of Pistoia (Italy). *Sensors*, 20(10), 2749. <https://doi.org/10.3390/s20102749>
- Fernández-Torres, E. A., Cabral-Cano, E., Novelo-Casanova, D. A., Solano-Rojas, D., Havazli, E., & Salazar-Tlaczani, L. (2022). Risk assessment of land subsidence and associated faulting in Mexico City using InSAR. *Natural Hazards*, 112(1), 37–55. <https://doi.org/10.1007/s11069-021-05171-0>
- Hosseinzadeh, S. R., Akbari, E., Javanshiri, M., & Mohammadpour, Z. (2023). Spatial analysis of ground subsidence using radar interferometry (Case study: Central Plain of Ghaen City). *Journal of Geography and Environmental Hazards*, 11(4), 99–126. <https://doi.org/10.22067/geoh.2022.75138.1169> [In Persian]
- Huning, L. S., Love, C. A., Anjileli, H., Vahedifard, F., Zhao, Y., Chaffe, P. L., & AghaKouchak, A. (2024). Global land subsidence: Impact of climate extremes and human activities. *Reviews of Geophysics*, 62(4), 1–20. <https://doi.org/10.1029/2023RG000817>
- Jamini, D., Javan, F., & Atashbahar, R. (2025). Application of artificial intelligence in locating eco-camps. *Tourism Management Studies*, 20(71), 1–33. <https://doi.org/10.22054/tms.2025.85190.3055> [In Persian]
- Jamini, D., Javan, F., & Heydarian, B. (2025). Identifying challenges and solutions for developing geotourism in selected rural settlements in Kurdistan, Kermanshah, and Hamadan provinces. *Tourism Planning and Development*, 13(51), 215–237. <https://doi.org/10.22080/jtpd.2024.28159.3943> [In Persian]
- Jamini, D., Shahabi, H., Nazari, H., & Atashbahar, R. (2023). Identifying rural settlements at risk of landslides in nomadic ecosystems (Case study: Paveh County). *Nomadic Territory Planning Studies*, 3(1), 107–122. <https://doi.org/10.22034/jsnap.2023.410697.1066> [In Persian]
- Kok, S., & Costa, A. L. (2021). Framework for economic cost assessment of land subsidence. *Natural Hazards*, 106(3), 1931–1949. <https://doi.org/10.1007/s11069-021-04520-3>
- Lin, Z., Gong, H., Li, X., Zhou, C., Ye, M., Wang, H., & Han, M. (2024). Research progress and prospect of land subsidence. *Hydrogeology & Engineering Geology*, 51(4), 167–177. <https://doi.org/10.16030/j.cnki.issn.1000-3665.202212043>
- Marchi, M., Bertolini, I., & Gottardi, G. (2022). Impact of cumulated land subsidence on the preservation of the Santa Croce historic site in Ravenna, Italy. In *Restauro, conservazione, valorizzazione, digitalizzazione e scienza del patrimonio: Convegno di studi, Campus di Ravenna, 6 Ottobre 2022* (pp. 1–2). <https://cris.unibo.it/handle/11585/916935>
- Muhetaer, N., Yu, J., Wang, Y., & Yue, J. (2021, February). Temporal and spatial evolution characteristics analysis of Beijing land subsidence based on InSAR. In *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science* (Vol. 658, No. 1, Article 012050). IOP Publishing. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/658/1/012050>
- Nazari Gazik, Z., & Sedigh, M. (2025). Evaluation of the impact of land subsidence on geotourism attractions in Torghabeh city. *Geography and Human Relationships*, 8(3), 391–405. <https://doi.org/10.22034/gahr.2024.464114.2177> [In Persian]
- Ohenhen, L. O., Zhai, G., Lucy, J., Werth, S., Carlson, G., Khorrami, M., & Shirzaei, M. (2025). Land subsidence risk to infrastructure in US metropolises. *Nature Cities*, 1–12. <https://www.nature.com/articles/s44284-025-00240-y>



- Rosly, M. H., Mohamad, H. M., Bolong, N., & Harith, N. S. H. (2022). An overview: Relationship of geological condition and rainfall with landslide events at East Malaysia. *Trends in Sciences*, 19(8), 1–19. <https://tis.wu.ac.th/index.php/tis/article/view/3464>
- Sadeghi, H. (2024). Comparative evaluation of fuzzy overlay models for identifying potential sites for tourist accommodation in Dezpart region using gamma and sum models. *Spatial Planning*, 13(4), 1–22. <https://doi.org/10.22108/sppl.2023.138669.1759> [In Persian]
- Sadeghi, H. O., & Seidaei, S. (2025). Tourism and rural development. In *Rural areas—Development and transformations* (pp. 137–161). IntechOpen. <https://doi.org/10.5772/intechopen.111400>
- Sadeghi, H., & Javan, F. (2025). Vulnerability of Iranian tourism villages in terms of landslide hazard using GIS. *Geography*, 23(84), 153–170. <https://doi.org/10.22034/jiga.2025.2055364.1385> [In Persian]
- Sadeghi, H., & Seidaei, S. E. (2025). Exploring the role of tourism on land use value in rural areas: A case study. *International Journal of Rural Management*, 21(2), 203–223. <https://doi.org/10.1177/09730052251336523>
- Shirani, K., Pasandi, M., & Ebrahimi, B. (2021). Assessment of land subsidence in the Najafabad Plain using the differential synthetic aperture radar interferometry (DInSAR) technique. *JWSS*, 25(1), 105–127. <http://jstnar.iut.ac.ir/article-1-4023-fa.html> [In Persian]
- Talebini, M., Khosravi, J., Zehabian, G. R., Malekian, A., & Keshtkar, H. R. (2013). Studying the subsidence process of Isfahan Plain using differential radar interferometry technique. *Journal of Remote Sensing and Geographic Information Systems in Natural Resources*, 14(3), 9–12. <https://journals.iau.ir/article690220.html> [In Persian]
- Tay, C., Lindsey, E. O., Chin, S. T., McCaughey, J. W., Bekaert, D., Nguyen, M., & Hill, E. M. (2022). Sea-level rise from land subsidence in major coastal cities. *Nature Sustainability*, 5(12), 1049–1057. <https://www.nature.com/articles/s41893-022-00947-z>
- Wang, S. J., Nguyen, Q. C., Lu, Y. C., Doyoro, Y. G., & Tran, D. H. (2022). Evaluation of geological model uncertainty caused by data sufficiency using groundwater flow and land subsidence modeling as an example. *Bulletin of Engineering Geology and the Environment*, 81(8), 1–19. <https://doi.org/10.1007/s10064-022-02832-7>
- Yang, R., Ren, F., Ma, X., Zhang, H., Xu, W., & Jia, P. (2021). Explaining the longevity characteristics in China from a geographical perspective: A multi-scale geographically weighted regression analysis. *Geospatial Health*, 16(2), 1–19. <https://www.geospatialhealth.net/gh/article/view/1024>