



Research Paper

Assessment of Land Subsidence Trend in Isfahan's Historical and Tourism Sites Using Sentinel-1 Imagery (2016–2024) and the amount of subsidence according to historical dynasties

Shohreh Omidi¹ Hojat Sadeghi*² Rahman Zandi²

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

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

Keywords

Hazards Land Subsidence
Historical and Tourism
Sites Isfahan City.



ABSTRACT

Isfahan city, one of Iran's most important cultural, architectural, historical, and tourism centers, faces a serious threat to the stability of its historical and tourist structures due to land subsidence. This study aims to analyze the trend of land subsidence in Isfahan from 2016 to 2024 and to assess the magnitude of subsidence according to the tourist sites associated with different historical dynasties. The research is applied and employs a descriptive-analytical approach, using remote sensing imagery and spatial data of historical and tourist sites. The dataset includes Sentinel-1 satellite images, downloaded from the Alaska website, with two images selected per year (beginning and end of each year). Subsidence analysis was conducted using SNAP software to accurately identify land changes and subsidence patterns over the 2016–2024 period. The results indicate that subsidence has been fluctuating, with the highest intensities observed in 2018 and 2021 at 14.2 cm and 13.6 cm, respectively, while the lowest values were recorded in 2022 and 2023 at 7.6 cm and 8.5 cm, respectively. Districts 9, 11, and 15 experienced the most pronounced effects, linked to groundwater depletion and urban pressures. The highest subsidence among individual sites occurred at Rahnan Bath (2.75 cm), Monar Jonban (2.50 cm), and the Fire Temple (2.03 cm), while the average subsidence for other sites ranged between 0.5 and 1 cm. Furthermore, the greatest subsidence by historical period was observed in Safavid-era monuments, totaling 25.49 cm with an average of 4.47 cm, whereas Qajar-era sites experienced the least damage, with an average of 3.59 cm. Overall, subsidence in Isfahan is a continuous process that threatens both the city's infrastructure and its cultural heritage. Targeted management and continuous monitoring through interdisciplinary collaboration are essential to mitigate risks to historical and tourist sites.

*Corresponding Author.

Email Adresses: h.sadeghi@geo.ui.ac.ir.

Omidi,S., Sadeghi,H. and Zandi,R. (2026). Assessment of Land Subsidence Trend in Isfahan's Historical and Tourism Sites Using Sentinel-1 Imagery (2016–2024) and the amount of subsidence according to historical dynasties. *Human Ecology*, 4(13), 1679-1696.



Doi: <https://doi.org/10.22034/he.2025.551150.1149>



بررسی روند فرونشست جاذبه های تاریخی و گردشگری شهر اصفهان با تصاویر سنتیل-سری ۱ (سال ۲۰۱۶ تا ۲۰۲۴) و میزان آن به تفکیک آثار سلسله های تاریخی

شهره امیدی^۱ حجت صادقی*^۲ رحمان زندی^۲

۱ دانشجوی کارشناسی ارشد سنجش از دور و GIS، دانشکده علوم جغرافیایی و برنامه ریزی، دانشگاه اصفهان، اصفهان، ایران.

۲ گروه جغرافیای طبیعی، دانشکده علوم جغرافیایی و برنامه ریزی، دانشگاه اصفهان، اصفهان، ایران.

واژگان کلیدی

مخاطرات، فرونشست زمین، جاذبه های تاریخی و گردشگری، شهر اصفهان.



چکیده

شهر اصفهان، یکی از مهم ترین مراکز فرهنگی، معماری، تاریخی و گردشگری ایران است که پدیده فرونشست زمین تهدیدی جدی برای پایداری بناهای تاریخی و گردشگری آن محسوب می شود. هدف این پژوهش، تحلیل روند فرونشست زمین در شهر اصفهان طی سال های ۲۰۱۶ تا ۲۰۲۴ و بررسی میزان فرونشست به تفکیک آثار گردشگری مربوط به سلسله های مختلف تاریخی است. پژوهش کاربردی و از نوع توصیفی-تحلیلی با استفاده از تصاویر سنجش از دور و داده های مکانی آثار تاریخی و گردشگری است. داده ها شامل تصاویر ماهواره ای سنتیل-۱ بوده که از وبسایت آلاسکا داندو و برای هر سال دو تصویر (ابتدای سال و انتهای سال) انتخاب شد. تحلیل فرونشست با استفاده از نرم افزار SNAP انجام شد تا تغییرات زمین و الگوهای فرونشست در بازه زمانی ۲۰۱۶ تا ۲۰۲۴، به دقت شناسایی شود. نتایج نشان می دهند که میزان فرونشست نوسانی بوده و بیشترین شدت آن در سال های ۲۰۱۸ و ۲۰۲۱ به ترتیب با ۱۴/۲ و ۱۳/۶ سانتی متر مشاهده شده است، در حالی که کمترین مقادیر در سال های ۲۰۲۲ و ۲۰۲۳ به ترتیب با ۷/۶ و ۸/۵ سانتی متر ثبت شده است. مناطق ۹، ۱۱ و ۱۵ بیشترین تأثیر را از فرونشست تجربه کرده اند که با کاهش سطح آب های زیرزمینی و فشارهای شهری مرتبط است. بیشترین میزان فرونشست مربوط به حمام رهنان با ۲/۷۵، منارجنبان با ۲/۵۰ و آتشکده با ۲/۰۳ سانتی متر بوده است و میانگین فرونشست سایر آثار بین ۰/۵ تا ۱ سانتی متر قرار داشته است. همچنین بیشترین میزان فرونشست مربوط به آثار دوره صفویه با مجموع ۲۵/۴۹ سانتی متر و میانگین ۴/۴۷ سانتی متر بوده و آثار قاجاریه کمترین آسیب را با میانگین ۳/۵۹ سانتی متر تجربه کرده اند. نتیجه آنکه، فرونشست در اصفهان روندی مستمر است که زیرساخت ها و میراث فرهنگی شهر را تهدید می کند. مدیریت هدفمند و پایش مستمر با همکاری بین رشته ای متخصصان برای کاهش خطرات بناهای تاریخی و گردشگری ضروری است.

ارجاع به این مقاله: امیدی، شهره، صادقی، حجت و زندی، رحمان. (۱۴۰۴). بررسی روند فرونشست جاذبه های تاریخی و گردشگری شهر اصفهان با تصاویر سنتیل-سری ۱ (سال ۲۰۱۶ تا ۲۰۲۴) و میزان آن به تفکیک آثار سلسله های تاریخی. اکولوژی انسانی، ۴(۱۳)، ۱۶۷۹-۱۶۹۶.

۱. مقدمه

روند شتابان توسعه انسانی در دهه های اخیر، علاوه بر دستاوردهای اقتصادی، اجتماعی و فرهنگی، با بروز و تشدید مخاطرات متعدد طبیعی و انسان ساخت همراه بوده است (Padi et al, 2018). افزایش جمعیت، تمرکز شدید بر شهرنشینی، بهره برداری بیش از حد از منابع آب و خاک، تغییر کاربری اراضی، توسعه زیرساخت های ناپایدار و تغییرات اقلیمی، بستری فراهم کرده اند که بسیاری از مخاطرات پیشین نه تنها با شدت بیشتری رخ دهند، بلکه آثارشان ابعاد گسترده تری پیدا کند (Oli et al, 2025). در چنین شرایطی، مخاطراتی همچون زلزله، سیل، خشکسالی و فرونشست زمین از یک سو به تهدیدی جدی برای امنیت انسانی و توسعه پایدار بدل شده اند و از سوی دیگر، اثرات آن ها بر ابعاد مختلف حیات انسانی و محیط زیست به شکل روزافزون آشکار می شود (Cvetković et al, 2024). به بیان دیگر، رابطه ای دوسویه میان توسعه و مخاطرات وجود دارد؛ توسعه غیرپایدار و ناهماهنگ می تواند زمینه ساز وقوع یا تشدید بسیاری از مخاطرات شود و به همان اندازه، وقوع مخاطرات می تواند برنامه های توسعه را متوقف کرده یا به مسیرهای پرهزینه و آسیب زا سوق دهد (Keating et al, 2017). این تعامل پیچیده سبب شده است که مطالعات معاصر در حوزه مدیریت شهری، منابع طبیعی و حتی گردشگری، توجه ویژه ای به نقش مخاطرات در فرآیند توسعه داشته باشند. بر نتیجه مخاطرات و مسایل مربوط به آنها همواره تهدیدی برای مراکز انسانی است (Sadeghi & Javan, 2024) و می تواند توسعه از جمله توسعه گردشگری را تحت تاثیر قرار دهد.

صنعت گردشگری در جهان امروز به عنوان یکی از موتورهای اصلی محرک توسعه پایدار در حوزه های اقتصادی، اجتماعی، فرهنگی و حتی زیست محیطی شناخته می شود و به عنوان یکی از مقوله های کلیدی در جهان مقبولیت ویژه ای یافته است (Jamini et al, 2024). در واقع گردشگری یکی از مهمترین منابع اقتصادی در بسیاری از مناطق محسوب می شود (Sadeghi & Javan, 2025). این صنعت ظرفیت بالایی در ایجاد اشتغال، درآمدزایی، تعاملات بین المللی و تبادل فرهنگی دارد (Li et al, 2025). گردشگری مزایای اقتصادی، اجتماعی و زیست محیطی مختلفی برای جوامع میزبان دارد، اما توسعه گردشگری با چالش های متعددی (از جمله مخاطرات) مواجه است (Jamini et al). در واقع گردشگری به شدت در معرض تهدید مخاطرات طبیعی و انسان ساخت قرار دارد و تداوم آن منوط به پایداری محیطی و حفاظت از جاذبه های میراثی است (Fiorentino & Vandini, 2024). جاذبه های تاریخی و فرهنگی که مهم ترین سرمایه های گردشگری به شمار می روند، اغلب بناهایی هستند که در طول قرن ها شکل گرفته اند و از نظر کالبدی شکننده اند. بنابراین، مخاطراتی زمین لغزش، ماندن فرونشست زمین، زلزله یا تغییرات اقلیمی می توانند آسیب های جبران ناپذیری بر آن ها وارد کنند (Allam et al, 2025). تخریب پی ریزی سازه ها، ترک خوردگی بناها، تغییر بستر کالبدی شهرها و ناامن شدن زیرساخت ها تنها بخشی از پیامدهای مخاطراتی مانند فرونشست هستند (Haghighi & Motagh, 2024). از همین رو، بررسی ارتباط میان گردشگری و مخاطرات نه تنها یک ضرورت علمی، بلکه یک الزام عملی در حوزه سیاست گذاری و مدیریت شهری و گردشگری است (Danzi et al, 2024). مخاطرات می توانند گردشگران را برای سفر به مقصد منع نمایند یا او را به تجدیدنظر در انگیزه سفر و دارند (Seidai et al, 2023). مطالعه این پیوندها می تواند در جهت طراحی راهبردهایی برای حفاظت از میراث فرهنگی، افزایش تاب آوری گردشگری و ارتقای امنیت جاذبه های تاریخی نقش مهمی ایفا کند. در میان انواع مخاطرات، فرونشست زمین به عنوان یکی از چالش های جدی و نسبتاً خاموش قرن بیست و یکم شناخته می شود (Dinar et al, 2021). این پدیده که در اصل می تواند منشأ طبیعی داشته باشد، در بسیاری از نقاط جهان به ویژه در مناطق خشک و نیمه خشک به طور عمده ناشی از مداخلات انسانی مانند برداشت بی رویه از منابع آب زیرزمینی، احداث چاه های عمیق، توسعه نامتوازن شهری و فقدان مدیریت پایدار منابع آب است (Huning et al, 2024). فرونشست زمین برخلاف مخاطرات ناگهانی همچون زلزله یا سیل، به تدریج و در بازه های زمانی چندساله اثرات خود را آشکار می کند، اما پیامدهای آن به مراتب می تواند خطرناک تر و غیرقابل جبران باشد (Ohenhen et al, 2024). این مخاطره هنگامی که با حوزه گردشگری و میراث فرهنگی پیوند می خورد، ابعاد مهم تری می یابد (Zaccariello et al, 2024)؛ چرا که گردشگری به عنوان یکی از ارکان اصلی توسعه پایدار اقتصادی و فرهنگی در سطح جهانی، نیازمند محیطی با ثبات، امن و قابل اعتماد است. آسیب پذیری جاذبه های تاریخی در برابر فرونشست می تواند نه تنها منجر به تخریب کالبدی آثار شود، بلکه سرمایه گذاری های کلان در صنعت گردشگری را نیز با بحران مواجه کند و اعتماد و تمایل گردشگران داخلی و بین المللی را کاهش دهد (Torok & Gabris, 2022). از این رو، فرونشست به درستی یک تهدید چندوجهی برای توسعه گردشگری و پایداری میراث فرهنگی قلمداد می شود. در قرن اخیر گردشگری آنچنان توسعه پیدا کرده که در سراسر جهان به عنوان یک صنعت مورد توجه قرار گرفته است (Sadeghi & Seidaiy, 2023). لذا بایستی جنبه های مختلف این حوزه اقتصادی از جمله مخاطرات نیز مطالعه و بررسی شود. در چارچوب نظری این پژوهش می توان تحقیقاتی را اشاره نمود که بحث مخاطرات را در زمینه گردشگری و میراث تاریخی بخوبی تبیین می نمایند که البته مخاطره فرونشست در ارتباط با جاذبه های گردشگری و تاریخی کمتر مورد مطالعه قرار گرفته و این پژوهش می تواند گپ مطالعاتی موجود را تکمیل و به ادامه تحقیقات در آینده

در این حوزه کمک نماید. چن^۱ و همکاران (۲۰۲۰) رابطه بالایی بین سفره های آب زیرزمینی و فرونشست زمین در پکن گزارش کردند. از کوئرو^۲ و همکاران (۲۰۲۰) فرونشست را در شهر تاریخی پیستویا ایتالیا از دهه ۱۹۹۰ تا مرکز شهر مشاهده کردند. مطالعات موهتائ^۳ و همکاران (۲۰۲۱)، بخاری^۴ و همکاران (۲۰۲۳) و وانگ^۵ و همکارانش (۲۰۲۴) نشان داد که برداشت بی رویه آب، رشد جمعیت، شیب، نوع خاک و وزن ساختمان ها عوامل مؤثر بر تشدید فرونشست هستند. در ایران، شیرانی و همکاران (۱۴۰۰)، آزر و همکاران (۱۴۰۱)، حسین زاده و همکاران (۱۴۰۱) و اکبریان و قهرودی (۱۴۰۲) همبستگی میان افت سطح آب زیرزمینی و افزایش فرونشست را گزارش کرده اند. مطالعات طالبی نیا و همکاران (۱۴۰۲) مناطق شهری و راه سازی را مستعد فرونشست دانستند. همچنین، عابدینی و همکاران (۱۴۰۲) و عابدینی و نظری گزیک (۱۴۰۳) نشان دادند فرونشست زمین بر محوطه ها و ژئوسایت های گردشگری، از جمله قنات ها و بناهای تاریخی، اثر منفی داشته و تهدیدی برای گردشگری منطقه ایجاد کرده است.

شهر اصفهان به عنوان یکی از کانون های اصلی گردشگری ایران و جهان، با برخورداری از مجموعه ای کم نظیر از آثار تاریخی متعلق به سلسله های مختلف از جمله سلجوقی، صفوی و قاجار، جایگاهی ممتاز در نقشه گردشگری جهانی دارد. میدان نقش جهان، مسجد جامع عتیق، پل های تاریخی زاینده رود و صدها اثر دیگر گواهی بر این شکوه تاریخی هستند. با این حال، در دهه های اخیر پدیده فرونشست زمین به تهدیدی جدی برای پایداری این میراث فرهنگی بدل شده است (Zaccarielli et al, 2024). کاهش مداوم سطح آب های زیرزمینی در دشت اصفهان، خشک شدن زاینده رود، بهره برداری بی رویه از منابع آب و توسعه بی برنامه شهری از جمله عواملی هستند که نرخ فرونشست در این منطقه را به یکی از بالاترین مقادیر در جهان رسانده اند. مسأله اساسی که این پژوهش به آن می پردازد، بررسی روند فرونشست زمین طی سال های ۲۰۱۶ تا ۲۰۲۴ با استفاده از تصاویر ماهواره ای سنتینل-۱ و تحلیل تأثیر آن بر جاذبه های تاریخی اصفهان به تفکیک سلسله های تاریخی است. ضرورت این پژوهش در اهمیت حفاظت از سرمایه های فرهنگی و گردشگری اصفهان نهفته است؛ چرا که تداوم فرونشست، تهدیدی مستقیم برای آینده گردشگری، اقتصاد شهری و حتی هویت فرهنگی ایران محسوب می شود. به بیان دیگر، پرسش محوری این است که فرونشست زمین در بازه زمانی مورد مطالعه چه روندی داشته و آثار تاریخی متعلق به هر سلسله تاریخی تا چه میزان از این پدیده متأثر شده اند؟ پاسخ به این پرسش نه تنها شناخت علمی بهتری از فرونشست در اصفهان فراهم می آورد، بلکه می تواند مبنایی برای سیاست گذاری های حفاظتی و توسعه گردشگری پایدار در سطح ملی و بین المللی باشد.

۲. مبانی نظری و پیشینه پژوهش

توسعه همواره با بحران ها و چالش های طبیعی و انسانی مواجهه است و نمی توان بدون توجه به موانع و چالش ها به توسعه دست یافت. یکی از چالش های موجود در مسیر توسعه سکونتگاه ها و پدیده های مختلف، مخاطرات به ویژه مخاطرات طبیعی است. مخاطرات همواره از موضوعات مهم توسعه و برنامه ریزی محیط است؛ بگونه ای امروزه جوامع بشری، مخاطرات و چالش های متنوعی را تجربه می نمایند (Jamini et al, 2023). در سال های اخیر یکی از مخاطرات طبیعی که در بیشتر شهرها به خصوص کلانشهرها در حال گسترش است، مخاطره فرونشست می باشد. مخاطره فرونشست زمین یک پدیده درون زا که در اثر جابجایی های عمودی متفاوت سطح زمین در اثر عوامل طبیعی یا انسانی ایجاد می شود (Tzampoglou, 2023). این پدیده به دلیل کاهش آب های زیرزمینی، یک فرآیند آهسته و تدریجی است که در مقیاس های بزرگ زمانی (ماه ها و سال ها) توسعه یافته و به تدریج باعث کاهش ارتفاع سطح زمین می شود (Herrera-García, 2023). بنابراین پدیده فرونشست به دلیل کاهش ظرفیت آب های زیرزمینی، باعث ایجاد شکاف های زمینی، آسیب به ساختمان ها و زیر ساخت های عمرانی می شود (Herrera-García, 2023) که در ادامه آن، خسارات جانی و مالی را در پی دارد (Tzampoglou, 2023)؛ اثرات فرونشست زمین ابعاد و جنبه های مختلف فیزیکی، اقتصادی و زیست محیطی را به دنبال دارد که معمولاً این اثرات، مدت زمانی قابل توجهی نیاز دارد (Cao et al, 2021). علاوه بر این فرونشست مانع توسعه پایدار اجتماعی و اقتصادی در مناطق آسیب دیده می شود (Bagheri et al, 2021). لذا برای جلوگیری از خسارات مالی و تلفات جانی ناشی از پدیده فرونشست زمین نیاز به شناخت و چگونگی به وجود آمدن این پدیده است.

مخاطره فرونشست نیز مانند سایر مخاطرات طبیعی دارای علل گوناگونی می باشد. در طول دهه های اخیر به دلیل افزایش جمعیت جهانی و رشد اقتصادی، تقاضای آب های زیر زمینی رو به افزایش بوده است. افزایش تقاضا و بهره برداری بیش از حد آب های زیرزمینی، باعث کاهش سطح آب های زیرزمینی شده (Tzampoglou, 2023: 2) که در پی آن شدت و سرعت پدیده فرونشست زمین به مرور زمان، رو به

1 . Chen
2 . Ezquerro
3 . Muhetaer
4 . Bokhari
5 . Wang

افزایش بوده است. از دلایل دیگری که باعث ایجاد این پدیده می شود می توان به بهره برداری بیش از حد منابع گاز و نفت اشاره نمود (Chatterjee et al, 2023). همچنین اکسیداسیون خاک های آلی از دیگر عوامل ایجاد فرونشست در سطح زمین است (Tzampoglou, 2023). البته پدیده فرونشست می تواند در نتیجه حوادث طبیعی مانند زمین لرزه، فرسایش و تشکیل گودال نیز ایجاد شود (Li et al, 2021). بنابراین می توان بیان نمود که مجموعه از این عوامل میزان فرونشست را در یک منطقه افزایش می دهد و در نتیجه آن به پی ساختمان ها، باند فرودگاه ها، پل ها، تونل ها، خیابان ها، خطوط حمل و نقل ریلی و جاده ای، تاسیسات کشاورزی، تغییر در مسیر و جهت حرکت رودخانه و کانال ها و حاصلخیزی زمین های کشاورزی، آسیب هایی وارد می شود (Ghahroudi et al, 2021)؛ که برای جلوگیری از این آسیب ها، شناخت فرونشست و عوامل مداخله در این پدیده ضرورت پیدا می کند.

گردشگری به عنوان یک بخش مهم اقتصادی شناخته می شود (Sadeghi, 2023) و ارتباط آن با مخاطرات غیرقابل انکار است. فرونشست زمین، به عنوان یک فرآیند ژئومورفولوژیکی و مخاطره محیطی، می تواند مستقیماً بر زیرساخت ها و جاذبه های گردشگری تأثیر بگذارد (Abidin et al, 2015). تغییرات سطح زمین، ایجاد ترک ها و نشست های ناگهانی در محوطه های تاریخی، بناهای قدیمی، قنات ها و سایر ژئوسایت ها، نه تنها ایمنی بازدیدکنندگان را به مخاطره می اندازد، بلکه کیفیت تجربه گردشگری و جذابیت محیطی این مناطق را نیز کاهش می دهد (Gutierrez & Cooper, 2002). از منظر نظری، گردشگری پایدار نیازمند محیطی ایمن و با ثبات است که فرونشست، به ویژه در مناطق دارای بافت تاریخی و جاذبه های طبیعی، این ثبات را مختل می کند (Streimikiene et al, 2021). علاوه بر تأثیرات مستقیم بر ساختارهای فیزیکی، فرونشست می تواند هزینه های نگهداری و مرمت بناها و زیرساخت های گردشگری را افزایش دهد و در بلندمدت توسعه گردشگری را محدود سازد (Qiu et al, 2025). بنابراین، شناخت و مدیریت فرونشست زمین، به ویژه در مناطق گردشگری، از جنبه نظری و عملی، یک ضرورت برای حفظ سرمایه های فرهنگی و طبیعی و تداوم بهره برداری گردشگری محسوب می شود.

پژوهش حاضر از حیث رویکرد و هدف دارای نوآوری علمی و کاربردی است. مطالعات پیشین عمدتاً به تحلیل فیزیکی یا زمین شناسی فرونشست پرداخته و کمتر به ارتباط آن با میراث فرهنگی و گردشگری توجه داشته اند. در حالی که این پژوهش با بهره گیری از داده های سنتینل-۱، روند زمانی فرونشست را طی هشت سال بررسی کرده و آثار تاریخی اصفهان را بر اساس دوره های سلجوقی، صفوی و قاجار از نظر میزان آسیب پذیری تفکیک می کند. این رویکرد میان رشته ای که سنجش از دور را با تحلیل فرهنگی و تاریخی پیوند می زند، گامی نو در فهم اثرات مکانی پدیده های زمین ساختی بر پایداری گردشگری به شمار می رود و می تواند مبنای طراحی سیاست های حفاظتی و مدیریت پایدار گردشگری در شهرهای تاریخی باشد.

در جمع بندی مبانی نظری، می توان گفت فرونشست زمین به عنوان یکی از جدی ترین مخاطرات ژئومورفولوژیکی، پیامد مستقیم افت سطح آب های زیرزمینی، توسعه بی رویه شهری و بهره برداری ناپایدار از منابع طبیعی است که آثار زیان بار فیزیکی، اقتصادی و فرهنگی بر جای می گذارد. این پدیده در شهرهایی با بافت تاریخی، علاوه بر تهدید کالبدی بناها، پایداری اقتصادی و گردشگری را نیز تضعیف می کند. از این رو پژوهش حاضر با تأکید بر شهر اصفهان، به دنبال تبیین رابطه میان تغییرات سطح زمین و دوام میراث فرهنگی است تا چارچوبی علمی برای حفاظت از آثار تاریخی و توسعه گردشگری پایدار ارائه دهد.

۳. مواد و روش ها

روش تحقیق براساس ماهیت توصیفی-تحلیلی و بر مبنای هدف، کاربردی است که به بررسی روند فرونشست زمین در ارتباط با جاذبه های تاریخی و گردشگری شهر اصفهان با تصاویر سنتینل ۱ از سال ۲۰۱۶ تا ۲۰۲۴ پرداخته است. در ابتدا، مطالعات کتابخانه ای انجام شد. سپس در مرحله دوم، تصاویر سنتینل ۱ تهیه و تحلیل گردید. توضیح اینکه میزان و وضعیت فرونشست در شهر اصفهان، به ویژه در مناطق تاریخی و گردشگری، با استفاده از نرم افزار SNAP و داده های موجود در سایت آلاسکا^۲ برآورد می شود. در این پژوهش، به منظور بررسی وضعیت فرونشست زمین در شهر اصفهان، استفاده از تصاویر ماهواره ای سنتینل ۱ در دوره های زمانی ۲۰۱۶ تا ۲۰۲۴ استفاده شد. برای دستیابی به این هدف، تصاویر مرتبط از وبسایت آلاسکا دانلود گردید. در آغاز این فرآیند، پژوهشگران برای هر سال دو تصویر را جمع آوری کردند؛ یکی از ابتدای سال و دیگری از انتهای سال. این تصاویر به عنوان داده های پایه برای تحلیل وضعیت فرونشست زمین در نظر گرفته شدند. سپس، به منظور بررسی دقیق تر روند فرونشست در شهر اصفهان در بازه زمانی ۲۰۱۶ تا ۲۰۲۴، دو تصویر کلیدی انتخاب شد. این انتخاب به پژوهشگران این امکان را می دهد که تغییرات و نوسانات زمین را در طول زمان به خوبی رصد کنند و الگوهای فرونشست را شناسایی نمایند. با استفاده از این تصاویر، می توان به درک بهتری از وضعیت زمین و چالش های مرتبط با آن در شهر اصفهان دست یافت.

1. Sentinel1

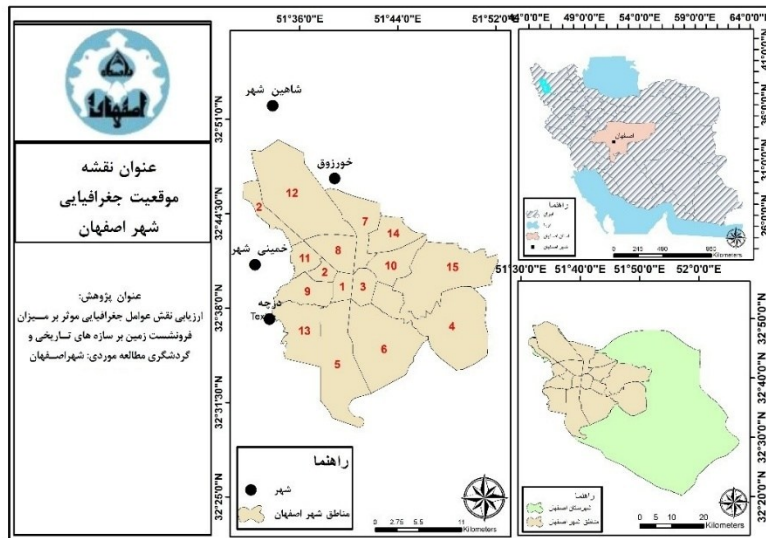
2. Alaska

مراحل انجام و تحلیل داده ها بشرح ذیل بوده است. در گام نخست، برای برآورد فرونشست در شهر اصفهان، تصاویر ماهواره ای سنتینل سری ۱ فراخوانی می شود. در گام دوم، استخراج فاز از تصویر ماهواره ای با استفاده از دستور Interferogram generation انجام می گیرد. در گام سوم، به دلیل وجود نویز های مختلف، لازم است که تصحیحات مناسبی بر روی تصویر صورت گیرد. این تصحیحات به ترتیب با استفاده از دستورات Topographic Remove، Tops Deburst و Mollt، Goldstein Filtering انجام می شود. در گام نهایی، با استفاده از Unwrapping و سپس تبدیل فاز به جا به جایی زمین با دستور Phase to Displacement، اطلاعات دقیق تری از وضعیت فرونشست به دست می آید. از آنجایی که تصویر به دست آمده هنوز زمین مرجع نشده است، پژوهشگران از دستور Range Doppler برای مرجع کردن تصویر فرونشست زمین استفاده می کنند. سپس در نرم افزار ArcMap، لایه های مربوط به آثار تاریخی و گردشگری بر روی لایه فرونشست قرار داده شد. این اقدام به پژوهشگران کمک می کند تا از طریق تحلیل های فضایی و بررسی های دقیق، میزان فرونشست در این مناطق را شناسایی و ارزیابی کنند.



شکل ۱. روش برآورد میزان فرونشست در محیط SNAP (۲۰۲۴-۲۰۱۶)

شهر اصفهان، به عنوان یکی از باستانی ترین 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 مرتفع ترین نقطه آن، قله کوه صفه در غرب شهر با ارتفاع ۲۲۱۶ متر می باشد. این شهر به ۱۵ منطقه شهری تقسیم شده است که به دلیل وجود رودخانه زاینده رود، به دو بخش شمالی و جنوبی تقسیم می گردد. در بخش جنوبی، سه منطقه ۵، ۶ و ۱۳ واقع شده اند، در حالی که سایر مناطق در بخش شمالی استقرار یافته اند. تعداد محلات موجود در این شهر به حدود ۱۹۳ محله می رسد (Salehi & Gandomkar, 2022). این تنوع در محلات و مناطق شهری، نشان دهنده غنای فرهنگی و اجتماعی اصفهان است و بر جذابیت این شهر به عنوان یک مرکز تاریخی و فرهنگی می افزاید.



شکل ۲. موقعیت شهر اصفهان

۴. یافته‌ها

۴.۱. روند فرونشست در مناطق شهر اصفهان از سال ۲۰۱۶ تا ۲۰۲۴

براساس نتایج حاصل از مدل‌سازی فرونشست در محیط نرم‌افزار SNAP، طی سال‌های ۲۰۱۶ تا ۲۰۲۴، شهر اصفهان شاهد پدیده‌ای بوده است که به طور قابل توجهی بر پیکره و ساختار آن تأثیر گذاشته است. این پدیده، یعنی فرونشست زمین، در این مدت زمان، نرخ‌های متفاوت و متنوعی را نشان داده است. در واقع، از سال ۲۰۱۶ تا ۲۰۲۰، روند نرخ فرونشست در این شهر به طور پیوسته در حال افزایش بود، گویی زنگ خطری برای آینده شهر به صدا درآمده است. اما پس از آن، در بازه زمانی ۲۰۲۱ تا ۲۰۲۲، این روند کاهش شد و کاهش قابل توجهی در میزان فرونشست مشاهده گردید، که شاید نشان‌دهنده تلاش‌های صورت گرفته یا تغییرات در عوامل مؤثر بر این پدیده باشد. با این حال، در سال ۲۰۲۴، مجدداً روند افزایشی در نرخ فرونشست آغاز شد، که این تغییرات در شکل (۳) به وضوح قابل مشاهده است.

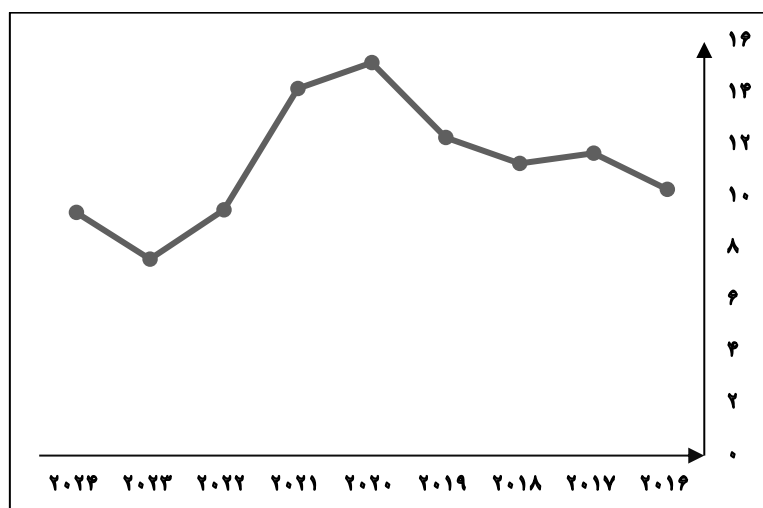
همچنین جدول (۱) جزئیات دقیقی از میزان و مناطق درگیر در این پدیده را ارائه می‌دهند. این جدول نشان می‌دهند که در هر سال، چه درصدی از مساحت کل شهر با درجات مختلف خطر فرونشست مواجه بوده است. برای نمونه، در سال ۲۰۱۶، میزان فرونشست با خطر بسیار زیاد و زیاد به ترتیب ۲ و ۱۰ درصد از مساحت شهر را در بر می‌گرفت. در سال ۲۰۱۷، این ارقام به ۸ و ۱۸ درصد رسید، که نشان دهنده افزایش قابل توجه در مناطق در معرض خطر است. در سال ۲۰۱۸، این میزان‌ها به ترتیب ۲ و ۸ درصد بودند، و در سال ۲۰۱۹، حدود ۳ درصد با خطر بسیار زیاد و ۱۳ درصد با خطر زیاد گزارش شد. در سال ۲۰۲۰، این ارقام به ۵ و ۱۶ درصد رسیدند، و در سال ۲۰۲۱، حدود ۴ و ۷ درصد، و در سال ۲۰۲۲، ۵ و ۱۳ درصد، و در سال ۲۰۲۳، ۹ و ۲۰ درصد، که نشان‌دهنده روند نوسانی و در عین حال نگران‌کننده در میزان مناطق درگیر است. در نهایت، در سال ۲۰۲۴، این درصدها به ۵ و ۱۲ درصد کاهش یافته است، اما همچنان نشان‌دهنده وجود خطرات جدی در سطح شهر است.

این نتایج، نشان می‌دهند که با اتخاذ راهکارهای مناسب و به موقع، می‌توان از شدت و گسترش این پدیده مخرب جلوگیری کرد و روند آن را کنترل نمود. در غیر این صورت، اگر اقدامات لازم صورت نگیرد، شهر اصفهان پتانسیل بالایی برای تشدید و گسترش فرونشست دارد، که می‌تواند پیامدهای جدی و جبران‌ناپذیری برای زیرساخت‌ها و زندگی ساکنان آن داشته باشد.

جدول ۱. میزان فرونشست در مناطق شهر اصفهان از سال ۲۰۱۶ تا ۲۰۲۴

سال	میزان فرونشست (سانتی متر)	مناطق درگیر شده	مساحت (کیلومتر)؛ درصد	
			مساحت فرونشست با خطر زیاد	مساحت فرونشست با خطر خیلی زیاد
۲۰۱۶	۱۲/۶	مناطق ۱۲، ۱۵، ۲۰	۶۸۰/۶۰ (۱۰ درصد)	۱۲/۴۴۱ (۲ درصد)
۲۰۱۷	۱۱/۵	مناطق ۱۴، ۱۵، ۱۲	۱۰۴/۵۱۶ (۱۸ درصد)	۴۷/۱۴۲ (۸ درصد)
۲۰۱۸	۱۴/۲	مناطق ۱۰، ۱۵، ۱۲، ۹	۴۳/۷۸۴ (۷ درصد)	۱۵/۰۸۵۳ (۲ درصد)
۲۰۱۹	۱۱/۹	مناطق ۱۴، ۱۵، ۱۰، ۲	۷۳/۲۸۲ (۱۳ درصد)	۱۹/۸۲۷ (۳ درصد)
۲۰۲۰	۹/۵	مناطق ۱۴، ۱۵، ۱۴، ۱	۹۰/۱۳۰ (۱۶ درصد)	۲۹/۵۰۸ (۵ درصد)

۲۰۲۱	۱۳/۶	مناطق ۱۴، ۱۵، ۱۰، ۱۵، ۸	۲۵/۳۵۳ (۴ درصد)	۴۳/۴۴ (۷ درصد)
۲۰۲۲	۷/۹	مناطق ۱۲، ۱۵، ۱۰، ۱۴، ۷، ۸، ۲	۲۹/۷۰۵ (۵ درصد)	۷۳/۵۱۵ (۱۳ درصد)
۲۰۲۳	۷/۶	مناطق ۱۴، ۱۵، ۹، ۵، ۶، ۱۰، ۲، ۸، ۱۲	۵۳/۲۰۹ (۹ درصد)	۱۱۰/۲۲ (۲۰ درصد)
۲۰۲۴	۸/۵	مناطق ۲، ۹، ۱۵، ۱۰، ۱۱، ۹، ۱۴، ۱۲، ۷، ۸	۲۷/۵۷۳ (۵ درصد)	۶۷/۳۲ (۱۲ درصد)



شکل ۳. نمودار روند و میزان فرونشست در شهر اصفهان (از سال ۲۰۱۶-۲۰۲۴)

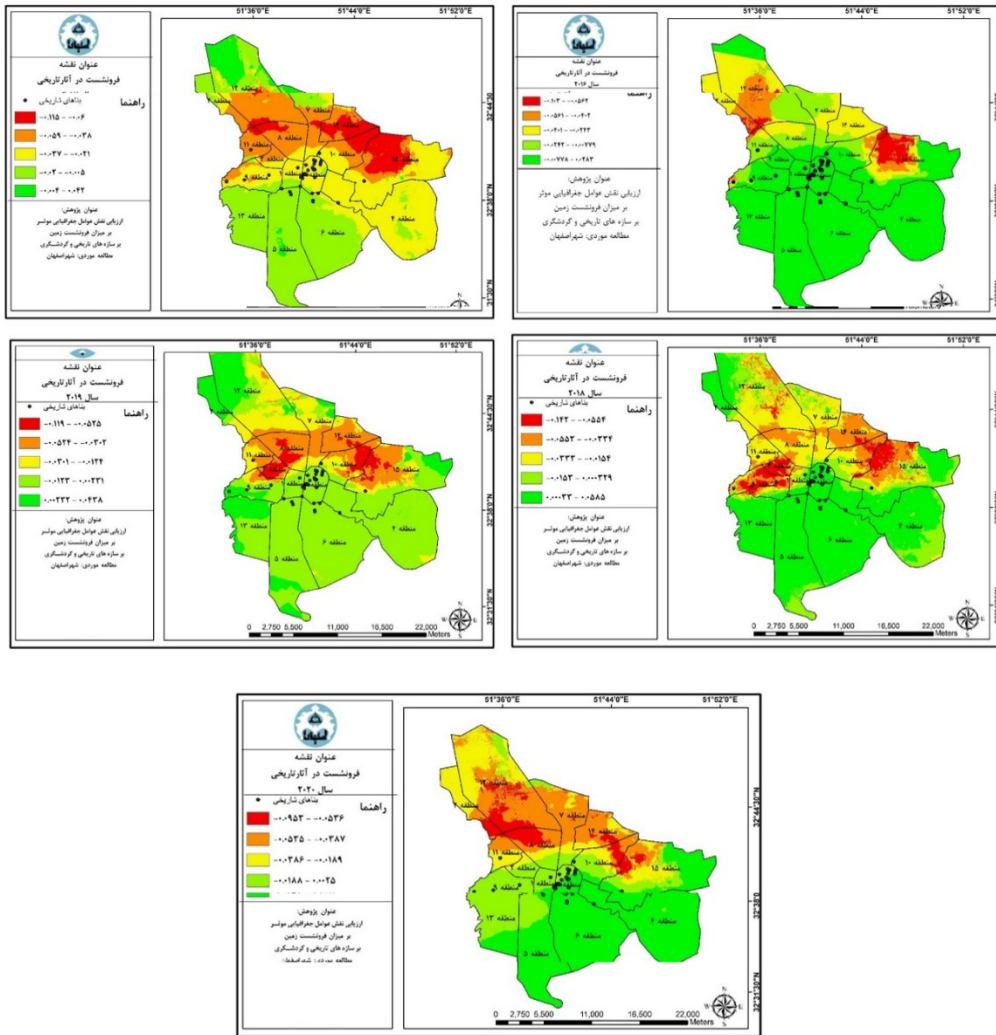
۴.۲. محاسبه وضعیت فرونشست در ارتباط با آثار تاریخی و گردشگری (۲۰۱۶ تا ۲۰۲۴)

در شکل (۴) وضعیت فرونشست زمین در ارتباط با آثار تاریخی از سال ۲۰۱۶ تا ۲۰۲۰ نمایش داده شده است. بر اساس نقشه سال ۲۰۱۶، سازه تاریخی حمام رهنان در منطقه ۱۱ بیشترین میزان فرونشست را در آن سال داشته است، به طوری که نرخ آن حدود ۱ سانتی‌متر بوده است. سایر سازه‌ها نیز فرونشستی بسیار کم و در حدود ۱ سانتی‌متر را نشان می‌دهند، که نشان‌دهنده ثبات نسبی این آثار در آن زمان است. در سال ۲۰۱۷، میزان فرونشست در آثار تاریخی و گردشگری شهر اصفهان در منطقه ۳ به طور قابل توجهی بالا بوده است. در این منطقه، سازه‌هایی که در این سال قرار داشتند، با نرخ فرونشستی حدود ۳ سانتی‌متر در سال مواجه شده‌اند. اما در میان این آثار، حمام رهنان به عنوان یکی از بناهای تاریخی مهم، با فرونشستی نزدیک به ۶ سانتی‌متر در همان سال، وضعیت نگران‌کننده تری را نشان می‌دهد.

همچنین در سال ۲۰۱۸، بیشترین سازه‌های تاریخی و گردشگری شهر اصفهان که در معرض خطر بالای فرونشست زمین قرار داشتند، در منطقه ۹ واقع شده بودند. این سازه‌ها، از جمله منارجنبان، آتشکده و مقبره سلطان ایوب، با نرخ فرونشستی حدود ۱۴ سانتی‌متر در سال، در معرض تهدید جدی قرار داشتند. در کنار این آثار، حمام رهنان که در منطقه یازدهم قرار دارد، با نرخ فرونشستی متوسط و حدود ۳ سانتی‌متر در سال، نشان می‌دهد که این اثر تاریخی نیز در معرض خطر است، هرچند شدت آن کمتر از دیگر سازه‌ها است. در مقابل، نرخ فرونشست در سازه‌های واقع در منطقه سوم این شهر، به طور قابل توجهی صفر اعلام شده است، که نشان می‌دهد در این منطقه، زمین در وضعیت نسبتاً پایدارتر قرار دارد و خطر فرونشست در آن کمتر احساس می‌شود.

بر اساس یافته‌های مربوط به میزان فرونشست سازه‌های تاریخی و گردشگری شهر اصفهان در سال ۲۰۱۹، وضعیت این سازه‌ها در مناطق مختلف شهر به وضوح قابل مشاهده است. در منطقه ۱۵، حمام نقاشی و در منطقه ۱۱، حمام تاریخی رهنان، هر دو با نرخ فرونشستی حدود ۳ سانتی‌متر در سال قرار دارند، که نشان‌دهنده تأثیر قابل توجه فعالیت‌های زمین‌شناسی بر این آثار ارزشمند است. در مقابل، سازه‌های تاریخی واقع در منطقه ۳، مانند چهلستون و کاخ هشت بهشت، با نرخ فرونشستی تقریباً ۱ سانتی‌متر در سال، در وضعیت نسبتاً پایدارتری قرار دارند. همچنین، سازه‌ای موجود در مناطق ۵، ۶ و ۹، هر یک با نرخ فرونشستی حدود ۱ سانتی‌متر در سال، نشان‌دهنده میزان ثبات نسبی این بخش‌ها در مقابل تغییرات زمین است.

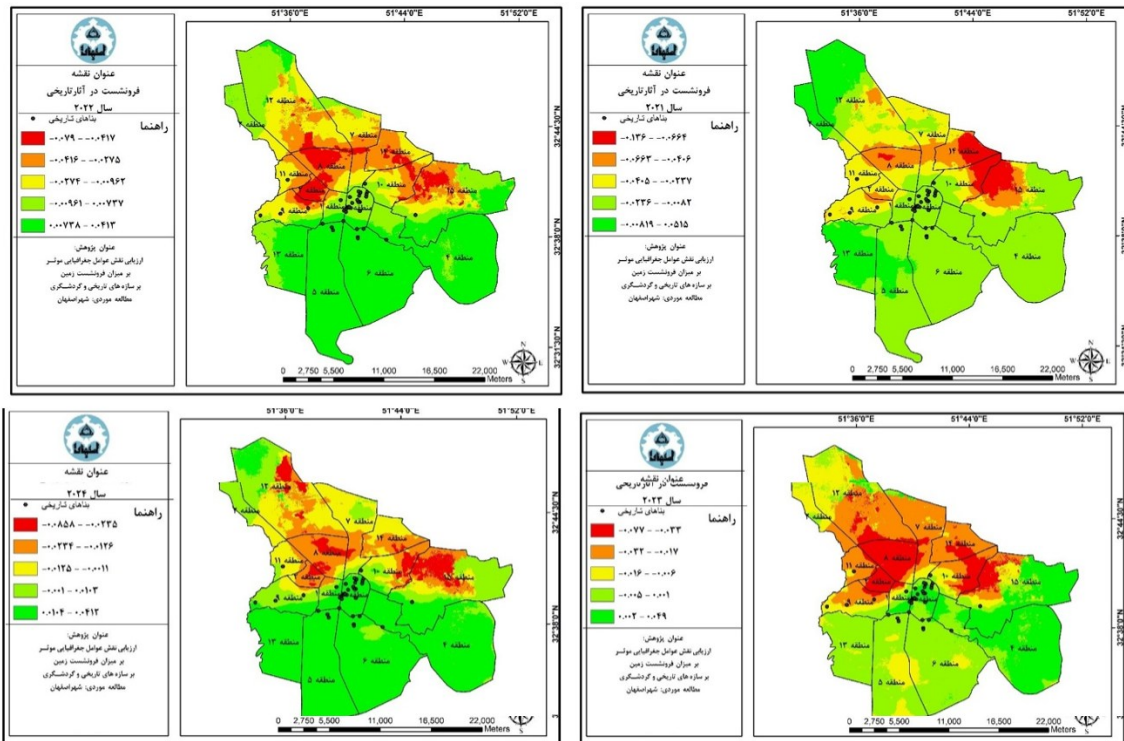
نقشه فرونشست سال ۲۰۲۰ نشان می‌دهد که در این سال، میزان فرونشست نسبت به سال‌های قبل کاهش یافته است و بیشتر این آثار در وضعیت نسبتاً پایدار قرار دارند. به طور خاص، سازه‌های منطقه ۹، مانند مقبره سلطان ایوب، آتشکده و منارجنبان، تقریباً ۱ سانتی‌متر فرونشست داشته‌اند. همچنین، سازه تاریخی حمام رهنان در منطقه ۱۱، حدود ۳ سانتی‌متر فرونشست را تجربه کرده است.



شکل ۴. میزان فرونشست در ارتباط با بناهای تاریخی و گردشگری از سال ۲۰۱۶ تا ۲۰۲۰

شکل (۵) وضعیت فرونشست زمین در ارتباط با آثار تاریخی از سال ۲۰۲۱ تا ۲۰۲۴ نمایش داده شده است. نقشه فرونشست زمین در سال ۲۰۲۱ نشان می‌دهد که سازه‌های منطقه ۹، مانند مقبره سلطان ایوب، آتشکده و منارجنبان، حدود ۴ سانتی‌متر فرونشست داشته‌اند. همچنین، حمام تاریخی رهنان نیز با نرخ متوسط ۴ سانتی‌متر در سال، دچار فرونشست شده است. سایر آثار مهم مانند سی و سه پل، چهلستون و کاخ هشت بهشت، کم‌ترین میزان فرونشست را با نرخ حدود ۲ سانتی‌متر در سال نشان می‌دهند، که این نشان‌دهنده وضعیت نسبتاً پایدار این مکان‌ها است و اهمیت مراقبت و حفاظت بیشتر را نشان می‌دهد. همچنین بر اساس نقشه فرونشست زمین در سال ۲۰۲۲، سازه‌های منطقه ۹، مانند مقبره سلطان ایوب، آتشکده و منارجنبان، حدود ۲ و ۴ سانتی‌متر فرونشست داشته‌اند. همچنین، حمام تاریخی رهنان با نرخ متوسط ۱ سانتی‌متر در سال، دچار فرونشست شده است. آثار مهم دیگری مانند چهلستون و کاخ هشت بهشت در منطقه ۳، کم‌ترین میزان فرونشست را با حدود ۱ سانتی‌متر در سال نشان می‌دهند، که این وضعیت نسبتاً پایدار این مکان‌ها را نشان می‌دهد و بر اهمیت مراقبت و حفاظت بیشتر تأکید می‌کند. بر اساس نقشه سال ۲۰۲۳، بیشترین میزان فرونشست در اثرهای تاریخی حمام رهنان در منطقه ۱۱، آتشکده و منارجنبان در منطقه ۹ مشاهده می‌شود که حدوداً ۳ سانتی‌متر در سال است. همچنین، حمام نقاشی در منطقه ۱۵ و مناره باقشوخانه در منطقه ۱۰، با نرخ تقریبی یک سانتی‌متر در سال، دچار فرونشست شده‌اند. در سایر آثار، این نرخ بسیار کم و در حد صفر باقی مانده است، که نشان‌دهنده وضعیت نسبتاً پایدار و نیازمند مراقبت بیشتر این مکان‌های ارزشمند است. نتایج بررسی‌ها در سال ۲۰۲۴ نشان می‌دهد که حمام رهنان در منطقه ۱۱

با نرخ فرونشست حدود یک سانتی متر در سال، بیشترین میزان فرونشست را داشته است. سازه های منطقه ۹ نیز در حد میلی متر دچار فرونشست شده اند. اما در مناطق ۳ و ۵، هیچگونه فرونشستی در این سال ثبت نشده است، که نشان دهنده ثبات نسبی این جاذبه های گردشگری این مناطق است.



شکل ۵. میزان فرونشست در ارتباط با بناهای تاریخی و گردشگری از سال ۲۰۲۱ تا ۲۰۲۴

۴.۳. محاسبه و تحلیل روند فرونشست آثار تاریخی و گردشگری در بازه زمانی ۲۰۱۶ تا ۲۰۲۴ با تفکیک سلسه های تاریخی بر اساس داده های جدول (۲) به وضوح مشخص است که هر ساله میزان کمی فرونشست در آثار تاریخی شهر اصفهان رخ داده است. از سال ۲۰۱۶، این فرونشست ها شروع شده و به طور پیوسته ادامه یافته اند. در سال های ۲۰۱۶ و ۲۰۱۷، بیشترین میزان فرونشست ثبت شده است، اما در سال ۲۰۲۴، این میزان کاهش یافته است. در مجموع، بیشترین نرخ فرونشست در آثار تاریخی و گردشگری در بازه زمانی ۲۰۱۶ تا ۲۰۲۴، مربوط به سازه هایی مانند حمام رهنان در منطقه ۱۱، منارجنبان، آتشکده و مقبره سلطان ایوب در منطقه ۹، مناره باقوشخانه در منطقه ۱۰ و حمام نقاشی در منطقه ۱۵ است. سایر سازه ها نیز با میانگین فرونشستی حدود ۰/۵ تا ۱ سانتی متر، دچار تغییرات جزئی شده اند. بررسی آثار دوره سلجوقیان نظیر مسجد جامع، آرامگاه الراشد بالله، و مناره ساربان، علی رغم قدمت تاریخی و موقعیت مرکزی در منطقه ۳، از نظر مقدار تجمعی فرونشست در وضعیت نسبتاً پایدارتری قرار دارند؛ به طوری که میانگین سالانه فرونشست این بناها حدود ۰/۵۶ تا ۰/۶۰ سانتی متر برآورد شده است. هرچند این میزان پایین تر از مقادیر بحرانی است، اما استمرار آن در بلندمدت می تواند تهدیدات تدریجی و تخریبی به همراه داشته باشد. آثار دوره ایلخانی و تیموری نیز با الگوی مشابهی مواجهند؛ با این تفاوت که برخی از این بناها، مانند «مناره باقوشخانه» با ۱۰/۴۶ سانتی متر فرونشست، از آستانه های هشدار عبور کرده اند. این امر می تواند ناشی از تغییرات لایه های خاک در منطقه ۱۰ و افزایش بارهای سازه ای بر بسترهای سست باشد.

در آثار دوره صفویه که از نظر تعداد در این جدول بیشترین سهم را دارند، پراکندگی و شدت فرونشست به شدت متغیر است. از یک سو پل هایی چون سی و سه پل و خواجو با میانگین سالانه حدود ۰/۵۶ سانتی متر دچار فرونشست نسبتاً پایدار بوده اند، و از سوی دیگر آثاری مانند «منارجنبان» و «حمام رهنان» که پیش تر نیز به آن اشاره شد، در وضعیت فوق بحرانی قرار دارند. این تفاوت می تواند گویای حساسیت بالای برخی سازه ها به شرایط هیدروژئولوژیک محلی باشد. همچنین، کلیسا های تاریخی دوره صفوی مانند «وانک» و «گئورگ» در منطقه ۵ نیز دچار فرونشست شده اند، هرچند شدت آن ها کمتر از ۵ سانتی متر است و در محدوده فرونشست متوسط ارزیابی می گردند.

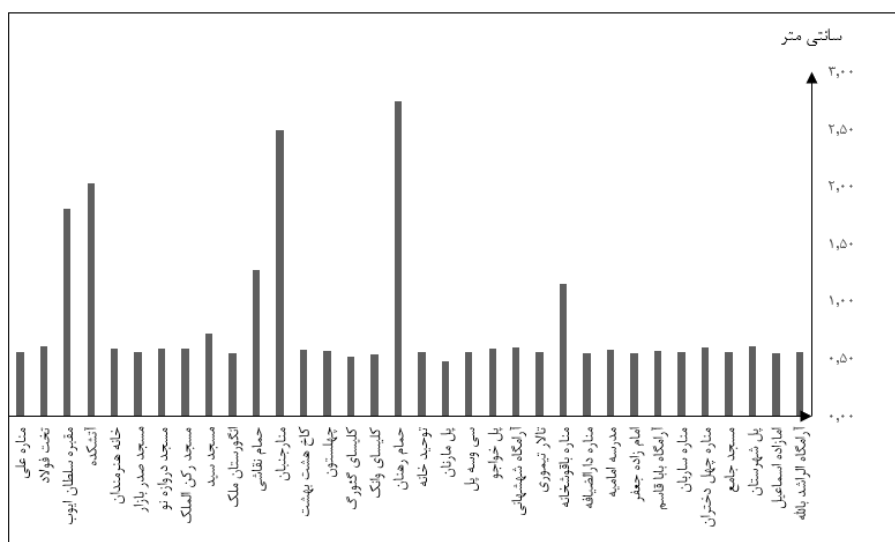
در آثار متعلق به دوره قاجار مانند «انگورستان ملک»، «مسجد سید» و «خانه هنرمندان»، میانگین فرونشست در اکثر موارد در حدود ۰/۵۵ تا ۰/۷۲ سانتی متر بوده است. این رقم گرچه نسبت به آثار صفوی پایین تر است، اما روند صعودی آن به ویژه در سال های پایانی جدول (۲۰۲۲ تا ۲۰۲۳) نگران کننده به نظر می رسد و بیانگر اثرگذاری تغییرات اقلیمی و فشارهای انسانی در دهه اخیر است. از سوی دیگر، بناهای متعلق به سایر دوره ها مانند «آتشکده»، «مقبره ایوب» و «تخت فولاد» نیز به ویژه در منطقه ۹، با میانگین سالانه ۱/۸ تا ۲ سانتی متر، از نرخ بالای فرونشست برخوردارند. این آثار که دارای ارزش تاریخی پیشا اسلامی یا محلی هستند، تاکنون کمتر مورد توجه قرار گرفته اند، اما داده های موجود نشان می دهد که وضعیت آنها از نظر پایداری بسیار حاد و نیازمند مطالعات ژئوتکنیکی تفصیلی است.

جدول ۲. میزان فرونشست آثار تاریخی و گردشگری شهر اصفهان در بازه زمانی ۲۰۱۶ تا ۲۰۲۴ با تفکیک سلسله های تاریخی

سلسله	ردیف	عنوان بنا تاریخی	منطقه	میزان فرونشست در آثار تاریخی شهر اصفهان (سانتی متر)											
				۲۰۱۶	۲۰۱۷	۲۰۱۸	۲۰۱۹	۲۰۲۰	۲۰۲۱	۲۰۲۲	۲۰۲۳	۲۰۲۴			
دوره سلجوقیان	۱	آرامگاه الراشد بالله	۱	۱/۵۱	۲/۲۸	۰	-۰/۰۷	۰	۱/۲۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰/۵۶
	۲	امازاده اسماعیل	۳	۱/۲۳	۲/۲۶	۰	-۰/۳۱	۰	۱/۱۷	۰	۰	۰	۰	۰	۰/۵۵
	۳	پل شهرستان	۴	۱/۲۸	۲/۳۲	۰	-۰/۴۴	۰	۱/۴۷	۰	۰	-۰/۰۲	۰	۰	۰/۶۱
	۴	مسجد جامع	۳	۱/۱۴	۲/۴۴	۰	-۰/۲۱	۰	۱/۱۹	۰	۰	۰	۰	۰	۰/۵۶
	۵	مناره چهل دختران	۳	۱/۰۹	۲/۴۴	۰	-۰/۶۰	۰	۱/۱۸	۰	-۰/۰۵	-۰/۰۳	۰	۰	۰/۶۰
	۶	مناره ساربان	۳	۱/۱۱	۲/۳۶	۰	-۰/۴۴	۰	۱/۱۵	۰	۰	۰	۰	۰	۰/۵۶
دوره ایلخانان و تیموریان	۷	آرامگاه بابا قاسم	۳	۱/۱۳	۲/۵۰	۰	-۰/۳۳	۰	۱/۲۰	۰	-۰/۰۱	۰	۰	۰	۰/۵۷
	۸	امام زاده جعفر	۳	۱/۲۱	۲/۲۷	۰	-۰/۳۱	۰	۱/۱۸	۰	۰	۰	۰	۰	۰/۵۵
	۹	مدرسه امامیه	۳	۱/۱۳	۲/۵۱	۰	-۰/۳۴	۰	۱/۱۹	۰	-۰/۰۳	۰	۰	۰	۰/۵۸
	۱۰	مناره دارالضیافه	۳	۱/۱۲	۲/۲۷	۰	-۰/۴۴	۰	۱/۱۳	۰	۰	۰	۰	۰	۰/۵۵
	۱۱	مناره باقوشخانه	۱۰	۱/۶۱	۲/۸۰	۱/۲۱	۱/۸۰	-۰/۴۱	۱/۲۹	۰/۷۱	-۰/۶۳	۰	۰	۰	۱/۱۶
	۱۲	تالار تیموری	۳	۱/۳۷	۲/۳۵	۰	-۰/۲۱	۰	۱/۱۵	۰	۰	۰	۰	۰	۰/۵۶
	۱۳	آرامگاه شهشهانی	۳	۱/۱۸	۲/۵۴	۰	-۰/۴۰	۰	۱/۱۹	۰	-۰/۰۹	۰	۰	۰	۰/۶۰
دوره صفویه	۱۴	پل خواجه	۳ و ۶	۱/۸۳	۲/۰۷	۰	-۰/۲۳	۰	۱/۱۷	۰	۰	۰	۰	۰	۰/۵۹
	۱۵	سی وسه پل	۱، ۳، ۵، ۶	۱/۷۲	۲/۰۳	۰	-۰/۱۷	۰	۱/۰۹	۰	۰	۰	۰	۰	۰/۵۶
	۱۶	پل مارنان	۱	۱/۴۳	۱/۹۱	۰	-۰/۰۵	۰	۰/۹۶	۰	۰	۰	۰	۰	۰/۴۸
	۱۷	توحید خانه	۳	۱/۴۰	۲/۲۹	۰	-۰/۲۲	۰	۱/۱۱	۰	۰	۰	۰	۰	۰/۵۶
	۱۸	حمام رهنان	۱۱	۳/۶۸	۴/۰۷	۲/۸۶	۲/۹۶	۳/۰۰	۲/۹۲	۲/۳۶	۱/۷۵	-۰/۲۰	۲/۷۵	۲/۷۵	۲/۷۵
	۱۹	کلیسای وانک	۵	۱/۶۳	۱/۸۵	۰	-۰/۱۹	۰	۱/۰۱	۰	-۰/۱۹	۰	۰	۰	۰/۵۴
	۲۰	کلیسای گتورگ	۵	۱/۶۷	۱/۸۵	۰	-۰/۰۶	۰	۱/۰۴	۰	-۰/۱۰	۰	۰	۰	۰/۵۲
	۲۱	چهلستون	۳	۱/۴۲	۲/۳۵	۰	-۰/۱۷	۰	۱/۱۷	۰	۰	۰	۰	۰	۰/۵۷
	۲۲	کاخ هشت بهشت	۳	۱/۵۴	۲/۲۶	۰	-۰/۱۵	۰	۱/۱۷	۰	۰	۰	۰	۰	۰/۵۸
	۲۳	منارجنبان	۹	۱/۹۹	۳/۴۵	-۰/۰۶	۰	۱/۰۶	۳/۹۸	۱/۹۷	۱/۸۷	۰	۲/۵۰	۲/۴۸	۲/۵۰
	۲۴	حمام نقاشی	۱۵	۲/۹۳	۳/۰۷	۸/۱۶	۱/۶۷	۰	۱/۹۵	-۰/۵۱	-۰/۴۷	۰	۱/۲۸	۱۱/۴۹	۱/۲۸
دوره قاجاریه	۲۵	انگورستان ملک	۳	۱/۴۵	۲/۱۸	-۰/۹۰	-۰/۲۹	۰	۱/۰۸	۰	۰	۰	۰	۰	۰/۵۵
	۲۶	مسجد سید	۱	۱/۴۵	۲/۶۹	۰	-۰/۰۲	-۰/۰۷	۱/۵۹	-۰/۳۱	-۰/۲۳	۰	۰/۷۲	۶/۴۴	۰/۷۲
	۲۷	مسجد رکن الملک	۶	۱/۷۳	۱/۹۷	-۰/۰۸	-۰/۳۱	۰	۱/۲۲	۰	-۰/۱۱	۰	۰/۵۹	۵/۳۴	۰/۵۹
	۲۸	مسجد دروازه نو	۳	۱/۲۸	۲/۵۲	۰	-۰/۱۵	۰	۱/۲۶	۰	-۰/۰۵	۰	۰/۵۹	۵/۲۷	۰/۵۹
	۲۹	مسجد صدر بازار	۳	۲/۲۷	۲/۳۵	۰	-۰/۲۲	۰	۱/۲۱	۰	۰	۰	۰/۵۶	۵/۰۴	۰/۵۶
	۳۰	خانه هنرمندان	۶	۱/۶۷	۲/۱۴	۰	-۰/۳۱	۰	۱/۱۶	۰	۰	۰	۰/۵۹	۵/۲۸	۰/۵۹
سایر دوره ها	۳۱	آتشکده	۹	۴/۲۸	۳/۷۷	۰	۰	۱/۳۰	۳/۱۱	۱/۶۸	۱/۴۲	۰	۲/۰۳	۱۸/۲۶	۲/۰۳
	۳۲	مقبره ایوب	۹	۱/۳۲	۲/۵۶	۲/۶۹	-۰/۲۸	-۰/۱۰	۳/۱۲	۳/۰۲	۲/۵۳	۰	۱/۸۱	۱۶/۳۰	۱/۸۱
	۳۳	تخت فولاد	۶	۱/۷۴	۱/۹۹	۳/۲۷	-۰/۳۳	۰	۱/۲۵	۰	-۰/۱۴	۰	۰/۶۱	۵/۴۶	۰/۶۱
	۳۴	مناره علی	۳	۱/۱۸	۲/۳۱	۰	-۰/۳۱	۰	۱/۲۰	۰	۰	۰	۰/۵۶	۵	۰/۵۶

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 جدول (۲) و شکل (۶) نشان می‌دهد که الگوی زمانی و مکانی فرونشست در این دوره از توزیع یکنواختی برخوردار نبوده و شاهد تفاوت‌های قابل توجهی از نظر شدت و پراکنش مکانی هستیم. در میان آثار تاریخی بررسی‌شده، حمام رهنان با میزان تجمعی فرونشست ۲۴/۷۱ سانتی‌متر و میانگین سالانه ۲/۷۵ سانتی‌متر، بیشترین نرخ فرونشست را ثبت کرده است. پس از آن، منارجنبان با ۲۲/۴۸ سانتی‌متر (میانگین سالانه ۲/۵۰ سانتی‌متر)، آتشکده با ۱۸/۲۶ سانتی‌متر (میانگین ۲/۰۳ سانتیمتر) حمام نقاشی با ۱۱/۴۹ سانتی‌متر (میانگین ۱/۲۸ 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 قابل توجه 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 ۶. نمودار میانگین روند فرونشست آثار تاریخی و گردشگری شهر اصفهان (سانتی‌متر) (از سال ۲۰۱۶ تا ۲۰۲۴)

۴.۴. میزان فرونشست آثار تاریخی و گردشگری شهر اصفهان برحسب سلسله (سال ۲۰۱۶ تا ۲۰۲۴)

مطابق داده‌های ارائه‌شده (جدول ۳) و شکل (۷)، در بازه زمانی ۲۰۱۶ تا ۲۰۲۴، میزان فرونشست در بناهای تاریخی متعلق به سلسله‌های مختلف دچار نوسان بوده، اما روند کلی نشان از فرونشست قابل توجه به ویژه در آثار دوره صفویه دارد. دوره صفویه با مجموع ۴۹/۲۵ سانتی‌متر و میانگین ۵/۴۷ سانتی‌متر بیشترین میزان فرونشست را نسبت به سایر دوره‌ها تجربه کرده‌اند. این رقم قابل تأمل است و با توجه به پراکندگی جغرافیایی این آثار، به‌ویژه در نواحی مرکزی و پرتدد شهر اصفهان، نشان‌دهنده آسیب‌پذیری بالا و تهدید مستمر میراث فرهنگی این دوره است. این سازه‌ها در مناطقی مانند منطقه ۳، منطقه ۵، منطقه ۹ و منطقه ۱۱ قرار گرفته‌اند، مناطقی که بیشترین میزان فرونشست را نشان می‌دهند. آثار قاجاریه با میانگین ۳/۵۹ سانتی‌متر کمترین آسیب را از فرونشست داشته‌اند. این وضعیت می‌تواند به واسطه قرارگیری این آثار در نواحی کمتر بحرانی و یا استفاده از مصالح و فنون متفاوت در ساخت و ساز آن‌ها توضیح داده شود.

در ارتباط فرونشست زمین با سازه‌های تاریخی، مصالح بکاررفته در بناهای مربوط به هر دوره نیز مهم است. در بررسی مصالح به‌کاررفته در بناهای تاریخی دوره‌های سلجوقی، ایلخانی، صفوی و قاجاریه مشاهده می‌شود که نوع مصالح به‌طور کلی مشابه بوده است؛ آجر پخته، گچ و

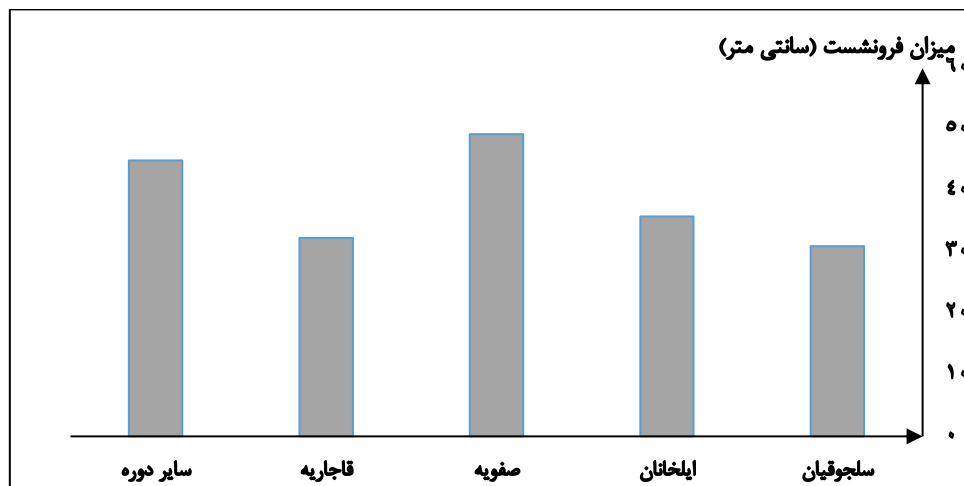
کاشی در همه این دوره‌ها کاربرد گسترده داشتند و در برخی دوره‌ها مانند ایلخانی و قاجاری، سنگ‌های محلی و به‌ویژه سنگ مرمر نیز به کار گرفته شدند. آجرها با وجود مقاومت نسبتاً مناسب، در برابر فرورفتگی‌های شدید زمین دچار ترک‌خوردگی و آسیب می‌شوند. گچ به دلیل ماهیت شکننده و حساسیت بالا به رطوبت و تغییرات زمین، بیشترین آسیب‌پذیری را دارد و معمولاً دچار ترک و جداشدگی می‌شود. کاشی‌ها نیز در صورت تغییر شکل زیرساخت آجری و گچی ترک برمی‌دارند یا از سطح جدا می‌شوند. سنگ‌های محلی و به‌ویژه مرمر، اگرچه مقاوم‌ترند، اما در برابر فشارهای ناشی از فرورفتگی، به‌ویژه همراه با تغییرات دما و رطوبت، می‌توانند ترک‌های عمیق یا شکستگی پیدا کنند. بنابراین، در یک مقایسه کلی می‌توان گفت که گچ ضعیف‌ترین و سنگ مرمر مقاوم‌ترین مصالح در برابر فرورفتگی هستند، اما هیچ‌یک مصونیت کامل ندارند و حفاظت و مرمت مستمر برای پایداری این بناها ضروری است.

تحلیل نتایج نشان داد از منظر سالیانه، سال ۲۰۱۷ با مجموع فرورفتگی بسیار بالا در همه دوره‌ها (به‌ویژه صفویه و سلجوقیان)، و سال ۲۰۲۱ با بازگشت مجدد به مقادیر نسبتاً بالا، به‌عنوان دو نقطه اوج بحرانی در نمودار فرورفتگی مطرح‌اند. در مقابل، سال‌های ۲۰۲۳ و ۲۰۲۴ با کاهش چشمگیر، نشانه‌هایی از تثبیت یا بهبود شرایط در برخی نواحی دارند، اگرچه در سال ۲۰۲۳ آثار دوره صفویه و سایر دوره‌ها هنوز مقادیر نسبتاً بالایی (۱/۹۴ و ۴/۰۹ سانتی‌متر) را ثبت کرده‌اند.

مجموع تحلیل نشان می‌دهد که فرورفتگی در اصفهان صرفاً پدیده‌ای مکانیکی یا اتفاقی نیست، بلکه روندی معنادار و تاریخ‌مند است که رابطه‌ای مستقیم با جایگاه جغرافیایی، اقلیمی، ویژگی‌های کالبدی و اهمیت فرهنگی آثار دارد. آثار صفوی به دلیل قرارگیری در قلب شهر، مجاورت با بافت متراکم شهری، و فشار ترافیکی و جمعیتی، برداشت بی‌رویه آب، بیشترین میزان فرورفتگی را تجربه کرده‌اند، در حالی که آثار قاجاریه و سلجوقیان، که اغلب در نقاط حاشیه‌ای تر قرار دارند، آسیب کمتری دیده‌اند.

جدول ۳. میزان فرورفتگی آثار تاریخی و گردشگری شهر اصفهان برحسب سلسله، سال ۲۰۱۶ تا ۲۰۲۴

سلسله					سال	ردیف
سایر دوره	قاجاریه	صفویه	ایلخانیان	سلجوقیان		
میزان فرورفتگی (سانتی‌متر)						
۸/۵۲	۸/۸۴	۱۱/۶۹	۷/۵۷	۷/۳۶	۲۰۱۶	۱
۱۰/۶۳	۱۳/۸۵	۱۵/۱۲	۱۴/۷	۱۴/۱	۲۰۱۷	۲
۵/۹۶	۰/۰۸	۲/۸۶	۱/۲۱	۰	۲۰۱۸	۳
۱/۰۲	۱/۳	۳/۸۲	۳/۴۳	۲/۰۷	۲۰۱۹	۴
۱/۴	۰/۰۷	۳	۰/۴۱	۰	۲۰۲۰	۵
۸/۶۸	۷/۵۲	۸/۲۶	۷/۱۴	۷/۳۶	۲۰۲۱	۶
۴/۷	۰/۳۶	۲/۳۶	۰/۷۵	۰/۰۵	۲۰۲۲	۷
۴/۰۹	۰/۳۴	۱/۹۴	۰/۶۳	۰/۰۵	۲۰۲۳	۸
۰	۰	۰/۲	۰	۰	۲۰۲۴	۹
۴۵	۳۲/۳۶	۴۹/۲۵	۳۵/۸۴	۳۰/۹۹	جمع	۱۰
۵	۳/۵۹	۵/۴۷۲	۳/۹۸	۳/۴۴	میانگین	۱۱



شکل ۷. نمودار میزان فرورفتگی در آثار تاریخی برحسب سلسله، سال ۲۰۱۶ تا ۲۰۲۴

۵. نتیجه گیری و ارائه پیشنهادات

میراث تاریخی و گردشگری اصفهان، به عنوان بخشی از سرمایه های فرهنگی جهانی، امروز با چالشی جدی به نام فرونشست زمین مواجه است. این پدیده نه تنها پایداری سازه ها را تهدید می کند، بلکه استمرار هویت فرهنگی و ظرفیت گردشگری شهر را نیز در معرض خطر قرار می دهد. بررسی روند فرونشست طی سال های اخیر نشان می دهد که شدت و پیامدهای آن فراتر از یک مخاطره طبیعی ساده بوده و به یک مسئله اساسی تبدیل شده است. در این پژوهش ضمن بررسی وضعیت و روند فرونشست آثار تاریخی و گردشگری در بازه زمانی ۲۰۱۶ تا ۲۰۲۴ سعی شده که میزان فرونشست به تفکیک آثار مربوط به سلسله های تاریخی نیز مشخص شود.

بررسی نتایج فرونشست در نه سال متوالی نشان می دهد که میزان این پدیده در هر سال متفاوت بوده است. به طوری که در سال های ۲۰۱۶، ۲۰۱۷، ۲۰۱۸، ۲۰۱۹، ۲۰۲۰، ۲۰۲۱، ۲۰۲۲، ۲۰۲۳ و ۲۰۲۴ به ترتیب فرونشستی به میزان ۱۲/۶، ۱۱/۵، ۱۴/۲، ۱۱/۸، ۹/۵، ۱۳/۶، ۷/۷، ۷/۷ و ۸/۵ مشاهده شده است. این تغییرات فرونشست که در برخی سال ها بیشتر و در برخی دیگر کمتر است، نشان دهنده وقوع تغییراتی در عوامل جغرافیایی است که بر این پدیده تأثیر گذاشته اند. یافته ها حاکی از آن است که بیشترین میزان فرونشست در سال های ۲۰۱۸ و ۲۰۲۱ اتفاق افتاده است، در حالی که کمترین میزان آن در سال های ۲۰۲۲ و ۲۰۲۳ مشاهده شده است. تحلیل های صورت گرفته نشان می دهد که کمترین میزان بارش در سال های ۲۰۱۶، ۲۰۱۷ و ۲۰۱۸ رخ داده است. این موضوع به وضوح نشان می دهد که با کاهش بارش و در پی آن کاهش سطح آب های زیرزمینی، میزان فرونشست در این سال ها نسبت به سایر سال ها بیشتر بوده است. به عبارت دیگر، کاهش بارش به عنوان یک عامل کلیدی در تشدید پدیده فرونشست در این سال ها عمل کرده است. از سوی دیگر، در سال های ۲۰۲۲ و ۲۰۲۳، میزان بارش و سطح آب های زیرزمینی افزایش یافته است که این امر به طور مستقیم منجر به کاهش میزان فرونشست در این سال ها شده است.

تحلیل نقشه های تهیه شده نشان می دهد که بیشترین مناطقی که دچار فرونشست شده اند، شامل مناطق دو، هفت، هشت، نه، ده، یازده، دوازده، چهارده و پانزدهم هستند. از میان این مناطق، بیشترین میزان فرونشست در مناطق ۱۰، ۱۴ و ۱۵ مشاهده شده است. این سه منطقه به طور خاص دارای بارش کمتری نسبت به سایر مناطق بوده اند، که به نوبه خود منجر به کاهش سطح آب های زیرزمینی در این نواحی شده است. این کاهش سطح آب زیرزمینی به وضوح تأثیر مستقیمی بر پدیده فرونشست در این مناطق داشته است. به عبارتی، با توجه به شرایط جوی و هیدرولوژیکی، این مناطق به عنوان نقاط آسیب پذیر در برابر فرونشست شناخته می شوند. علاوه بر این، براساس یافته ها، بناهای تاریخی و گردشگری که در این مناطق قرار دارند، بیشترین میزان فرونشست را تجربه کرده اند. این موضوع می تواند به عنوان یک هشدار جدی برای حفظ و نگهداری این آثار ارزشمند تلقی شود. در مقابل، سایر آثار تاریخی و گردشگری که در مناطق با بارش و سطح آب زیرزمینی مناسب تری واقع شده اند، کمترین میزان فرونشست را داشته اند. تحقیقات طالبی نیا و همکاران (۱۴۰۲) مناطق شهری و راه سازی را مستعد فرونشست دانسته اند. همچنین، عابدینی و همکاران (۱۴۰۲) نشان داده اند که فرونشست در محوطه های تاریخی و گردشگری بیشترین تأثیر را دارد.

بیشترین تعداد آثار تاریخی و گردشگری در منطقه ۳ قرار دارند. نتایج بررسی میزان فرونشست این سازه ها نشان می دهد که آثار مهمی مانند حمام رهنان، منار جبان، آتشکده و مقبره سلطان ایوب، که در مناطق ۹ و ۱۱ واقع شده اند، در مدت زمان این نه سال بیشترین میزان فرونشست را تجربه کرده اند. به طور کلی، پل مارنان در منطقه ۱ کمترین میانگین فرونشست با نرخ ۰/۴۸ سانتی متر را دارد. سازه هایی مانند کلیسای گئورگ، وانک، امامزاده اسماعیل و جعفر، مناره دارالضیافه و انگورستان ملک، میانگین فرونشستی حدود ۰/۵۴ سانتی متر دارند. در ادامه، آثار دیگری مانند آرامگاه الراشد بالله، مسجد جامع، مناره ساربان، تالار تیموری، سی و سه پل، توحیدخانه، مسجد صدر بازار و مناره علی، نرخ میانگین ۰/۵۶ سانتی متر، پدیده فرونشست را تجربه نموده اند. همچنین، آرامگاه بابا قاسم، چهل ستون، مدرسه امامیه و کاخ هشت بهشت، نرخ میانگین ۰/۵۷ سانتی متر داشته اند. آثار دیگری مانند پل خواجه، مسجد رکن الملک، مسجد دروازه نو، خانه هنرمندان، مناره چهل دختران، آرامگاه شهشهانی و پل شهرستان تخت فولاد، نرخ فرونشست با میانگین ۰/۵۹ تا ۰/۶۰ سانتی متر را نشان می دهند. بیشترین میزان فرونشست، با نرخ ۲/۷۵ سانتی متر، مربوط به مناره باقوشخانه، حمام نقاشی، مقبره ایوب، آتشکده منارجنبان و حمام رهنان است. پژوهش عابدینی و همکاران (۱۴۰۲) و نظری گریک (۱۴۰۳) نشان داده اند که فرونشست بر ژئوسایت ها و محوطه های گردشگری تأثیر منفی دارد و این آثار در خطر هستند.

این نتایج نشان می دهد که این بناهای تاریخی، به دلیل موقعیت جغرافیایی و شرایط هیدرولوژیکی خاص خود، در معرض خطر جدی فرونشست قرار دارند. به ویژه، آثار در منطقه ۹، شامل منار جبان، آتشکده و مقبره سلطان ایوب، به طور خاص تحت تأثیر این پدیده قرار گرفته اند. سایر بناهای تاریخی نیز به میزان قابل توجهی با این مشکل روبه رو هستند، که نشان دهنده تشدید روند فرونشست در شهر اصفهان است. این پدیده نه تنها بر ساختارهای تاریخی تأثیر می گذارد، بلکه تهدیدی جدی برای میراث فرهنگی و گردشگری این شهر محسوب می شود. نتایج

نشان می‌دهد که بسیاری از سازه‌های تاریخی و گردشگری، بر اساس میانگین، از ۱ تا ۳ سانتی‌متر دچار فرونشست شده‌اند. به‌ویژه، سازه‌هایی که در خطر فرونشست بیشتری قرار دارند، مربوط به دوران سلسله صفویه هستند، که خود گواهی بر اهمیت این آثار در تاریخ و فرهنگ اصفهان است. داده‌های مربوط به سازه‌های تاریخی، به‌ویژه آنهایی که متعلق به دوره صفوی هستند، نشان می‌دهد که بسیاری از این آثار در محدوده‌های پرریسک واقع شده‌اند و نشانه‌هایی از تغییرات مورفولوژیکی و جابجایی‌های فیزیکی در برخی از آن‌ها قابل مشاهده است. این وضعیت بر لزوم اعمال سیاست‌های حفاظتی اختصاصی برای میراث فرهنگی در معرض فرونشست تأکید دارد. یافته‌ها با مطالعات از کوئرو و همکاران (۲۰۲۰)، و مطالعات عابدینی و همکاران (۱۴۰۲) مطابقت دارد. همچنین شواهد جهانی و داخلی نشان می‌دهد که فرونشست یک تهدید چندعاملی و سیستماتیک برای سازه‌های تاریخی است.

در مجموع نتیجه‌گیری نشان می‌دهد که روند فرونشست در ارتباط با جاذبه‌های گردشگری و تاریخی شهر اصفهان یک روند افزایشی داشته و در طی چند ساله گذشته سرعت گرفته است. همچنین آثار مربوط به دوره صفویه به علت تعداد زیاد و همچنین تراکم در بخش مرکزی این شهر، بیشتر در معرض خطر فرونشست قرار دارند. نتیجه آنکه فرونشست زمین در اصفهان دیگر یک رویداد گاه به‌گاه یا موردی نیست، بلکه روندی نظام‌مند و چندعاملی است که اگر به‌درستی مدیریت نشود، می‌تواند به فروپاشی بخشی از سرمایه‌های کالبدی و فرهنگی این شهر بیانجامد. راهکارهای میان‌مدت مانند کنترل ساخت‌وساز، مدیریت منابع آب، و شناسایی مناطق پرریسک باید در کنار پایش مستمر با استفاده از فناوری‌های نوین سنجش از دور و GIS، به عنوان سیاست‌های بلندمدت در دستور کار نهاد‌های متولی قرار گیرند. تنها با نگاه بین‌رشته‌ای و مشارکت جدی میان متخصصان زمین‌شناسی، جغرافیا، شهرسازی، میراث فرهنگی و مدیریت منابع آب، می‌توان امید داشت که اصفهان بتواند از این بحران خاموش عبور کند.

یکی از محدودیت‌های اصلی این پژوهش، محدودیت زمانی داده‌ها که تنها بازه ۲۰۱۶ تا ۲۰۲۴ را پوشش می‌دهد. استفاده از داده‌های سنجش از دور و مدل‌سازی نرم‌افزاری، اگرچه امکان تحلیل گسترده و مکانی فرونشست را فراهم می‌کند، اما نمی‌تواند تمامی عوامل محلی و سازه‌ای را به‌طور کامل بازتاب دهد. علاوه بر این، تغییرات اقلیمی و فعالیت‌های انسانی غیرمستمر و غیرقابل پیش‌بینی، همچون برداشت بی‌رویه آب یا تغییر کاربری زمین، محدودیت‌هایی در تحلیل علل دقیق فرونشست ایجاد کرده است. بنابراین، نتایج باید با احتیاط تفسیر شود و مطالعات آینده با داده‌های گسترده‌تر تکمیل شود.

جدول ۴. پیشنهادات مصدافی برای برخی جاذبه‌های گردشگری در معرض خطر فرونشست زمین

ردیف	جاذبه‌های تاریخی و گردشگری	میزان فرونشست	پیشنهاد
۱	مناره باقوشخانه، حمام نقاشی، آتشکده منارجنبان، مقبره سلطان ایوب، حمام رهنان	میزان فرونشست: بالا (بیش از ۲/۵ سانتی‌متر)؛ منطقه: عمدتاً در نواحی ۹، ۱۰ و ۱۱	<ul style="list-style-type: none"> ✓ انجام مطالعات ژئوتکنیکی فوری و مستندسازی دیجیتال سه بعدی از وضعیت فعلی بناها. ✓ تثبیت فونداسیون سازه‌ها با روش‌های غیرمخرب مانند تزریق ژل‌های تقویت‌کننده زیرسطحی. ✓ محدودسازی ترافیک سنگین و توقف ماشین‌آلات در شعاع ۵۰ تا ۱۰۰ متری اطراف آثار. ✓ تخصیص بودجه ویژه برای مرمت اضطراری و بازپایش سازه‌های سالانه.
۲	سی‌وسه‌پل، پل خواجه، پل مارنان	میزان فرونشست: متوسط تا پایین مجاور رودخانه زاینده‌رود	<ul style="list-style-type: none"> ✓ مدیریت منابع آبی برای جلوگیری از خشکی مداوم بستر زاینده‌رود، به‌ویژه در فصول گرم. ✓ طراحی زهکش‌های هوشمند برای هدایت آب‌های سطحی به سمت بستر رودخانه جهت افزایش تغذیه سفره‌های زیرزمینی. ✓ نظارت فصلی با حسگرهای لیزری برای تشخیص جابجایی‌های میلی‌متری در پایه‌ها و قوس‌ها. ✓ شناسایی ترک‌ها و نشست‌های مشکوک در کف و بدنه پل.
۳	چهل‌ستون، هشت‌بهشت، مدرسه امامیه، مسجد جامع، آرامگاه بابا قاسم	میزان فرونشست: حدود ۰/۵۵-۰/۶۰ سانتی‌متر؛ مناطق مرکزی با گردشگری بالا	<ul style="list-style-type: none"> ✓ پایش سطح زمین اطراف این سازه‌ها با استفاده از تحلیل تصاویر راداری ماهواره‌ای. ✓ ایجاد سیستم مانیتورینگ داخلی در ستون‌ها و دیوارهای باربر (با استفاده از سنسورهای رطوبت، کشش و لرزش). ✓ ایجاد نوارهای سبز جاذب آب در اطراف این بناها برای افزایش نفوذپذیری خاک و کنترل خشکی بستر. ✓ برگزاری دوره‌های آموزشی برای راهنمایان گردشگری و مدیران میراث در زمینه آسیب‌شناسی ناشی از فرونشست.
۴	کلیسای وانک، کلیسای گئورگ، انگورستان ملک، مناره چهل‌دختران	میزان فرونشست: پایین (۰/۴۸ تا ۰/۵۵)؛ مناطق ۱ تا ۶ با وضعیت نسبتاً پایدار	<ul style="list-style-type: none"> ✓ حفظ وضعیت موجود با تداوم تغذیه سفره‌های آب زیرزمینی اطراف از طریق برنامه‌ریزی شهری. ✓ تدوین طرح‌های توسعه گردشگری پایدار که تراکم بازدیدکننده را کنترل کند و فشار مکانیکی به بناها وارد نکند. ✓ استفاده از این آثار به‌عنوان نمونه‌های موفق در آموزش بازدیدکنندگان در خصوص اهمیت پایداری و حفاظت از میراث.

✓ ایجاد کمربند حفاظتی برای محدود کردن تردد وسایل نقلیه سنگین در مجاورت این آثار.	میزان فرونشست:	مسجد رکن الملک،	
✓ تعیین شعاع امن گردشگری (حدود ۱۰ متر) در اطراف سازه های بلند مانند مناره ها.	متوسط (حدود ۰/۶ سانتی متر)؛ مناطق در	مسجد دروازه نو،	
✓ تهیه طرح «نوسازی همگن اطراف بافت تاریخی» با رویکرد مقاوم سازی خاک و حذف سازه های فرسوده مجاور.	حال گذار با تغییرات ترافیکی و جمعیتی	مناره علی، توجیدخانه، دارالضیافه	۵

۶. منابع

1. Abedini, M., Motekalleem, L. and Seifi, H. (2024). Investigating the hazards caused by land subsidence and its effect on historical sites using differential radar interferometric technique, case study: Ardabil Plain. *Quantitative Geomorphological Research*, 13(3), 141-158. doi: 10.22034/gmpj.2024.477322.1521. [In Persian].
2. Abedini, M. and Nazari, Z. (2024). Analyzing the amount of land subsidence and its effects on geomorphosites of tourism in Shandiz tourist city, Razavi Khorasan. *Quantitative Geomorphological Research*, 12(4), 171-192. doi: 10.22034/gmpj.2024.423463.1462. [In Persian].
3. 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(372), 115-120. <https://doi.org/10.5194/piahs-372-115-2015>
4. Akbarian, M. and Ghahroudi Tali, M. (2024). "Assessment of Land Subsidence in Asadabad Plain of Hamadan and its Hazards". *Environmental Management Hazards*, 10(4), 277-290. doi: 10.22059/jhsci.2024.370217.807. [In Persian].
5. Allam, A. M., Ibrahim, M. G., Kanae, S., & Sharaan, M. (2025). Evaluating flood and landslide hazards to cultural heritage sites in Historic Cairo. *Natural Hazards*, 121(3), 491-535. <https://link.springer.com/article/10.1007/s11069-025-07401-1>
6. Azarm, Z., Mehrabi, H. and 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. doi: 10.22067/geoeh.2022.75774.1199. [In Persian].
7. Bagheri-Gavkosh, M., Hosseini, S. M., Ataie-Ashtiani, B., Sohani, Y., Ebrahimian, H., Morovat, F., & Ashrafi, S. (2021). Land subsidence: A global challenge. *Science of The Total Environment*, 778, 146193. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2021.146193>
8. 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). <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2023.e14690>.
9. Cao, A., Esteban, M., Valenzuela, V. P. B., Onuki, M., Takagi, H., Thao, N. D., & Tsuchiya, N. (2021). Future of Asian Deltaic Megacities under sea level rise and land subsidence: current adaptation pathways for Tokyo, Jakarta, Manila, and Ho Chi Minh City. *Current opinion in environmental sustainability*, 50, 87-97. <https://doi.org/10.1016/j.cosust.2021.02.010>
10. Chatterjee, R. S., Singha, S., Aggarwal, A., Sharma, V., Pranjali, P., Karunakalage, A., ... & Chauhan, P. (2023). Reconnaissance to characterisation of land subsidence due to groundwater overdraft and oil extraction in and around Mehsana City, Gujarat, India by long-term hybrid differential interferometric SAR technique. *Journal of Hydrology*, 627, 130441. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2023.130441>
11. 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>.
12. Cvetković, V. M., Renner, R., Aleksova, B., & Lukić, T. (2024). Geospatial and Temporal Patterns of Natural and Man-Made (Technological) Disasters (1900–2024): Insights from Different Socio-Economic and Demographic Perspectives. *Applied Sciences*, 14(18), 41-62. <https://doi.org/10.3390/app14188129>
13. Danzi, L., Orchiston, C., Higham, J., Baggio, R. (2024). Tourism disaster management: A social network analysis. *Journal of Travel Research*. 18, 1-28. DOI:10.1177/00472875241268623
14. Dinar, A., Esteban, E., Calvo, E., & Herrera, G. (2021). Global assessment of land subsidence impact extent. *Science of The Total Environment*, 786(1), 142-153. DOI:10.1016/j.scitotenv.2021.147415
15. 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>

16. Fiorentino, S., & Vandini, M. (2024). Resilience and Sustainable Territorial Development: Safeguarding Cultural Heritage at Risk for Promoting Awareness and Cohesiveness Among Next-Generation Society. *Sustainability*, 16(24), 1-15. <https://doi.org/10.3390/su162410968>
17. Ghahroudi Tali, M. , Alinoori, K. and Rivandi, H. (2021). An analysis of factors affecting subsidence in Sabzevar plain. *Scientific- Research Quarterly of Geographical Data (SEPEHR)*, 30(117), 165-180. doi: 10.22131/sepehr.2021.244457.[In Persian].
18. Gutiérrez, F., & Cooper, A. H. (2002). Evaporite dissolution subsidence in the historical city of Calatayud, Spain: damage appraisal and prevention. *Natural Hazards*, 25(3), 259-288. <https://link.springer.com/article/10.1023/A:1014807901461>
19. Haghghi, M., & Motagh, M. (2024). Uncovering the impacts of depleting aquifers: A remote sensing analysis of land subsidence in Iran. *Science Advances*, 10(19),1-11. <https://doi.org/10.1126/sciadv.adk3039>
20. Herrera-García, G., Ezquerro, P., Tomás, R., Béjar-Pizarro, M., López-Vinielles, J., Rossi, M., Mateos, R.M., Carreon-Freyre, D., Lambert, J.W., Teatini, P., Cabral-Cano, E., Erkens, G., Galloway, D.L., Hung, W., Kakar, N., Sneed, M., Tosi, L., Wang, H., & Ye, S. (2020). Mapping the global threat of land subsidence. *Science*, 371, 34 - 36. <https://doi.org/10.1126/science.abb8549>.
21. Huning, L. S., Love, C., Anjileli,H., & Vahedifard, F.(2024). Global Land Subsidence: Impact of Climate Extremes and Human Activities. *Reviews of Geophysics*, 62(4), 1-22. <https://doi.org/10.1029/2023RG000817>
22. Jamini, D. , Javan, F. , & Heydarian, B. (2024). Identification of Challenges and Solutions for The Development of Geotourism in Selected Rural Settlements in Kurdistan, Kermanshah and Hamedan Provinces. *Journal of Tourism Planning and Development*, 13(51), 215-237. doi: 10.22080/jtpd.2024.28159.3943.[In Persian].
23. Jamini, D. , Javan, F. and Atashbahar, R. (2025). Application of artificial intelligence in locating eco-camps. *Tourism Management Studies*, 20(72),1-33. doi: 10.22054/tms.2025.85190.3055.[In Persian].
24. Jamini, D. , Shahabi, H. , Nazari, H. and 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. doi: 10.22034/jsnap.2023.410697.1066.[In Persian].
25. Keating, A., Fordham, M., & Penning-Rowsell, E. (2017). Disaster resilience: what it is and how it can engender a meaningful change in development policy. *Development Policy Review*, 35(1), 65-91. <https://DOI:10.1111/dpr.12201>
26. Li, H., Zhu, L., Guo, G., Zhang, Y., Dai, Z., Li, X., ... & Teatini, P. (2021). Land subsidence due to groundwater pumping: hazard probability assessment through the combination of Bayesian model and fuzzy set theory. *Natural Hazards and Earth System Sciences*, 21(2), 823-835. <https://doi.org/10.5194/nhess-21-823-2021, 2021>.
27. Li, M., Fan, Y., Guo, C., & Li, X. (2025). Tourism prosperity and high-quality economic development. *International Review of Economics & Finance*. 101(3),20-39.<https://doi.org/10.1016/j.iref.2025.104246>
28. 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, p. 012050). IOP Publishing. 10.1088/1755-1315/658/1/012050
29. Ohenhen, L. O., Zhai,G., Lucy,J., & Werth,S. (2024). Land subsidence risk to infrastructure in US metropolises. *Nature Cities*.2,543-554. <https://www.nature.com/articles/s44284-025-00240-y>
30. Oli, d., Gywali,B., Neupane,B., & Oshikoya,S.(2025). Assessment of land use land cover change and its impact on variations of land surface temperature in Atlanta, USA. *Environmental and Sustainability Indicators*.26(2),1-20. <https://doi.org/10.1016/j.indic.2025.100712>
31. Padli, J., Habibullah, M. S., & Baharom, A. H. (2018). The impact of human development on natural disaster fatalities and damage: Panel data evidence. *Economic research-Ekonomska istraživanja*, 31(1), 1557-1573. <https://hrcak.srce.hr/file/306855>
32. Qiu, H., Wei, Y., & Liu, W. (2025). Controllable Subsidence and Reasonable Planning May Mitigate Geo-Hazards in Large-Scale Land Creation Area. *Journal of Earth Science*, 36(2), 806-811. <https://link.springer.com/article/10.1007/s12583-024-0141-x>
33. Sadeghi, H. (2023). Comparative evaluation of fuzzy overlap models to determine areas prone to creating residential-tourism places in the Despart region with Gamma models, *Spatial Planning*, 13(4), 1-22. <https://doi.org/10.22108/sppl.2023.138669.1759>. [In Persian].
34. Sadeghi, H. and Javan, F. (2024). The Evaluation of Tourist Villages of Iran in terms of Geophysical Vulnerability using Fuzzy Scenarios. *Journal of Rural Research*, 15(4), 85-100. doi: 10.22059/jrur.2024.383580.1993.[In Persian].
35. Sadeghi, H. and Javan, F. (2025). Vulnerability of Iranian tourism villages in terms of Landslide hazard using GIS. *Geography*, 23(84), 153-170. doi: 10.22034/jiga.2025.2055364.1385.[In Persian].

36. Sadeghi, HO & Seidaiy, S.(2023). Tourism and rural development. Rural areas—Development and Transformations. Intechopen press. Pp. 137-161. DOI: 10.5772/intechopen.111400.
37. Salehi, K; Gandomkar, A. (2022). Analysis of the temperature change trend in Isfahan city and its surroundings. Journal of Physical Geography. 16(61), 43-57. https://journals.iau.ir/article_704928.html. [In Persian].
38. Seidai, S. S. , Nazari, H. , Jamini, D. and Ghanbari, Y. (2023). Investigating the impact of environmental hazards on the image capital of tourist destinations, (case study: Miankooch District of Ardal Township). Environmental Management Hazards, 10(2), 121-135. doi: 10.22059/jhsci.2023.361711.785. [In Persian].
39. 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>
40. Streimikiene, D., Svagzdiene, B., Jasinskas, E., & Simanavicius, A. (2021). Sustainable tourism development and competitiveness: The systematic literature review. Sustainable development, 29(1), 259-271. <https://doi.org/10.1002/sd.2133>
41. Talebinia, M; Khosravi, J; Zehtabian, G.R; Malekian, A; Keshtkar, H.R. (2023). Study of 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].
42. Török, Á., & Gábris, G. (2022). Land subsidence and its impact on cultural heritage: Case studies from Central Europe. Journal of Cultural Heritage, 56, 68–78. <https://doi.org/10.1016/j.culher.2022.01.012>
43. Tzampoglou, P., Ilia, I., Karalis, K., Tsangaratos, P., Zhao, X., & Chen, W. (2023). Selected Worldwide Cases of Land Subsidence Due to Groundwater Withdrawal. Water. <https://doi.org/10.3390/w15061094>.
44. 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 example. Bulletin of Engineering Geology and the Environment, 81(8), 1-19. <https://link.springer.com/article/10.1007/s10064-022-02832-7>
45. Zaccariello, G., Tesser, E., Piovesan, R., & Antonelli, F. (2024). The (Building) Stones of Venice under Threat: A Study about Their Deterioration between Climate Change and Land Subsidence. Sustainability, 16(11), 4701. <https://doi.org/10.3390/su16114701>