

تاب‌آوری مناطق مسکونی شهری در مواجهه با پدیده نشست سطح زمین منطقه مورد مطالعه: مناطق ثامن، سه و چهار شهر مشهد

اکبری، ابراهیم (سنجش از دور و سیستم اطلاعات جغرافیایی_ دانشگاه تبریز ایران)

حاجی ولی زاده، فاطمه (کارشناس ارشد اکوتوریسم، دانشگاه پیام نور بینالود، ایران)

اکبری، علی (کارشناس ارشد جغرافیا و برنامه ریزی روستایی، دانشگاه حکیم سبزواری، سبزوار)

چکیده

امروزه توجه به مبحث تاب‌آوری به منظور کاهش خطرات و خسارات ناشی از سوانح طبیعی به منظور افزایش سطح زیست پذیری شهرها مورد توجه جدی مدیران و برنامه ریزان و دست اندرکاران مسائل شهری قرار گرفته است. کلان شهر مشهد به دلیل تراکم بالای جمعیت و فشار بر منابع طبیعی، در برابر مخاطراتی مانند فرونشست زمین بسیار آسیب پذیر است. مشهد با نرخ فرونشست بسیار بالا رو به رو است که با توجه به اهمیت این شهر، بررسی و مشخص کردن علت این پدیده امری ضروری به نظر می رسد. در این پژوهش با بهره گیری از روش تداخل سنجی راداری (InSAR) و پردازش داده های ماهواره ای Sentinel-1 در نرم افزار SNAP، میزان و الگوی فرونشست در مناطق ثامن، ۳ و ۴ شهر مشهد طی سال های ۲۰۱۸ تا ۲۰۲۳ مورد بررسی قرار گرفت. قرار گرفتن حرم مطهر امام رضا علیه السلام و اماکن تاریخی با تراکم جمعیت بسیار بالا در منطقه ثامن و همچنین قرار گرفتن ایستگاه ریلی شهر مشهد و پایانه بار و ذخیره گاه گندم در مناطق سه و چهار بر اهمیت موضوع می افزاید. نتایج نشان داد بیشترین میزان فرونشست در سال ۲۰۲۱ با مقدار حدود -۰,۰۴ متر در سال و کمترین در سال ۲۰۲۲ رخ داده است. محدوده ایستگاه ریلی و مراکز تاریخی منطقه ثامن بیشترین خطرپذیری را نشان می دهند. یافته ها حاکی از آن است که تراکم بالای جمعیت و فعالیت های شهری در این مناطق، عامل مؤثر در تشدید نرخ فرونشست است. بر این اساس، مدیریت شهری مشهد باید با پایش مستمر و اجرای سیاست های کنترل برداشت آب زیرزمینی، از خسارات آتی به زیرساخت ها و اماکن تاریخی جلوگیری کند.

واژه های کلیدی: تاب‌آوری، فرونشست زمین، تداخل سنجی راداری، اماکن مذهبی و تاریخی، مشهد

Resilience of urban residential areas in the face of land subsidence. Study area: Samen, Three and Four areas of Mashhad city.

Today, paying attention to the issue of resilience in order to reduce risks and damages caused by natural disasters in order to increase the livability of cities has received serious attention from managers, planners and those involved in urban issues. Due to its high population density and pressure on natural resources, the metropolis of Mashhad is very vulnerable to hazards such as land subsidence. Mashhad is facing a very high subsidence rate, which, given the importance of this city, seems essential to investigate and determine the cause of this phenomenon. In this study, using the radar interferometry (InSAR) method and processing Sentinel-1 satellite data in the SNAP software, the rate and pattern of subsidence in the Samen, 3 and 4 regions of Mashhad city were investigated during the years 2018 to 2023. The location of the Holy Shrine of Imam Reza (AS) and historical sites with a very high population density in the Samen region, as well as the location of the Mashhad railway station and the cargo terminal and wheat storage in regions three and four, adds to the importance of the issue. The results showed that the highest rate of subsidence occurred in 2021 with an amount of about -0.04 meters per year and the lowest in 2022. The railway station area and the historical centers of the Samen region show the highest risk. The findings indicate that the high population density and urban activities in these areas are effective factors in intensifying the subsidence rate. Accordingly, Mashhad urban management should prevent future damage to infrastructure and historical sites by continuous monitoring and implementing groundwater withdrawal control policies.

Resilience, subsidence, land surface, religious and historical sites, Mashhad

مقدمه

شهرها به عنوان پیچیده ترین ساخته دست بشر با خطرپذیری گسترده ای هم به دلیل افزایش مخاطرات و هم به دلیل آسیب پذیری چندگانه شان مواجه هستند و با وجود پیشرفت فناوری نوین، مخاطرات طبیعی از شهرهای جهان همچنان حادثه و بحران زاست. از این رو، یکی از عمده ترین مسائل و مشکلاتی که بیشتر شهرها با آن دست به گریبان اند، مخاطرات طبیعی است که همواره سکونتگاه و جان انسان را تهدید می کند (حسن زاده و همکاران، ۲۰۲۰). بافت قدیم شهری، دارای ارزش تاریخی و فرهنگی و معماری بالاست و منافع عظیم اقتصادی را مخفی می کند (نان لی^۱، ۲۰۱۷). به علاوه دارای میراث ارزشمند معماری و کالبدی است که در طول زمان در هویت بخشی به حیات شهری نقش ویژه ای ایفا می کند (محمدی و همکاران، ۲۰۱۳). لذا ساختارهای تاریخی، به ویژه آنهایی که با مصالح بومی و سنتی مانند گل و خشت ساخته شده اند، در برابر تغییرات زمین ساختی یا نشست های تدریجی حساس تر هستند و عواملی چون استحکام ابنیه، ظرفیت تطابق با بحران و هماهنگی نهادی در افزایش

¹ Nan li

تاب آوری بافت های شهری تاریخی کلیدی شناخته شده اند (انجم شعاع، ۱۴۰۲). تاب آوری، توانایی مقاومت در برابر اثرات تهدید و مواجهه با اثرات آن و بازتوانی سریع می باشد که هر دو مفهوم آسیب پذیری و تاب آوری در چگونگی تاثیرگذاری تهدید بر جامعه و دارایی های آن و نحوه بازتوانی در برابر تهدید نقش خواهند داشت (غفارپور و همکاران، ۲۰۲۰). فرونشست زمین یک پدیده زمین شناسی زیست محیطی است که ناشی از عواملی مانند بهره برداری بیش از حد از منابع زیرزمینی از جمله آب زیرزمینی است (گومیلار^۱ و همکاران، ۲۰۱۵) که باعث آسیب رسانی به نقاط جمعیتی و سکونتگاه های انسانی و خسارت های زیست محیطی، اجتماعی و اقتصادی می شود (گلی^۲ و همکاران، ۲۰۱۹). فرونشست طبیعی به واسطه فعالیت های مختلفی نظیر معدن، برداشت آب هاب زیرزمینی و یا استخراج نفت، روندی تشدید شده به خود می گیرد تا جایی که به یکی از مخاطرات مهم ژئومورفولوژی تبدیل می شود. ایران به عنوان یکی از مهمترین کشورهای در خطر فرونشست تشدید یافته در آینده ای نه چندان دور با خسارات مستقیم و غیر مستقیم جبران ناپذیری است. در این بین، مناطق شهری به دلیل تراکم بالای جمعیت، ساخت و سازها و خطوط ارتباطی مهم، در برابر فرونشست بسیار آسیب پذیر می باشند (چترسیماب و همکاران، ۱۴۰۱). برای اندازه گیری فرونشست زمین از روش های مختلفی از جمله استفاده از داده های GPS^۳، ترازابی دقیق و تکنیک های سنجش از دور به خصوص تداخل سنجی راداری^۴ استفاده می شود. تداخل سنجی راداری با درجه مصنوعی^۵ یکی از روش هایی است که در دو دهه اخیر انقلاب بزرگی در زمینه مطالعات تغییر شکل پوسته زمین ایجاد کرده است (قابریل^۶، ۱۹۸۹). تداخل سنجی با استفاده از تصاویر ماهواره ای راداری با درجه مصنوعی روش دقیق مبتنی بر استفاده از حداقل دو تصویر راداری از یک منطقه است و قادر است با دقت قابل توجهی تغییرات جابجایی ارتفاعی در سطوح وسیع و در طی بازه های زمانی مختلف را با دقتی در حد میلیمتر اندازه گیری نماید (تونگ^۷ و همکاران، ۲۰۱۶). تکنیک تداخل سنجی راداری با داشتن ویژگی هایی همچون پوشش زمینی پیوسته و قدرت تفکیک مکانی و زمانی مناسب به عنوان یکی از بهترین روش های سنجش از دور در بررسی تغییرات سطحی زمین شناخته شده است (روت و ناقلر^۸، ۲۰۰۶). در تداخل سنجی راداری، فاز تصاویری که در زمان های مختلف از یک منطقه برداشت شده اند، پیکسل به پیکسل مقایسه و سپس از هم کم می شود (فررتی^۹ و همکاران،

¹ Gumilar

² Goli

³ GPS (Global Positioning System)

⁴ Radar Interferometry

⁵ SAR Interferometry

⁶ Gabriel

⁷ Tong

⁸ Rott and Nagler

⁹ Ferretti

۲۰۰۷). از جمله مزایای دیگر این روش می توان به پوشش وسیع، نداشتن نیاز به کار میدانی، مقرون به صرفه بودن و امکان دستیابی به اطلاعات در هر شرایط آب و هوایی و دسترسی به آن با دقتی معادل با دقت اندازه گیری های سیستم مکان یابی جهانی و تراز یابی دقیق اشاره کرد. اولین تلاش ها برای نقشه برداری از فرونشست زمین در مساحت های بسیار بزرگ و در دوره های زمانی طولانی در چین صورت گرفته است (ژانگ^۱ و همکاران، ۲۰۱۶). بافت های تاریخی شهری به دلیل ماهیت آسیب پذیر خود، به ویژه در برابر پدیده هایی مانند فرونشست، نیازمند توجه ویژه ای هستند. مطالعات موردی در شهرهای تاریخی مانند شیراز و یزد شاخص هایی مانند دانه بندی فضایی، کیفیت ساخت و شدت تخریب پذیری را به عنوان معیارهای کلیدی تاب آوری معرفی کرده اند (رستمی و همکاران، ۱۳۹۹). شهر مشهد به دلیل وجود حرم مطهر امام رضا (ع) به عنوان یک قطب مذهبی و گردشگری شناخته می شود. مناطق مورد مطالعه شامل سه منطقه از شهر مشهد (منطقه ثامن، سه و چهار) می باشد. قرار گرفتن حرم مطهر امام رضا علیه السلام و اماکن تاریخی با تراکم جمعیت بسیار بالا در منطقه ثامن و همچنین قرار گرفتن ایستگاه ریلی شهر مشهد و پایانه بار و ذخیره گاه گندم در مناطق سه و چهار بر اهمیت موضوع می افزاید. این مناطق به عنوان پرجمعیت ترین مناطق شهر مشهد شناخته می شود. لذا یکی از اهداف اصلی این پژوهش بررسی خطر نشست در مناطق ذکر شده می باشد تا ارتباط نشست با تراکم جمعیت و خطوط ریلی و باربری شهر مشهد مورد بررسی و راهکار های لازم به مدیران و برنامه ریزان شهری ارائه شود. در ارتباط با موضوع مورد بررسی پژوهش هایی صورت گرفته است که در ادامه به آنها پرداخته می شود. جین^۲ و همکاران (۲۰۱۹) به بررسی نقش فعالیت های کشاورزی در فرونشست زمین در دره سان خواگین در کالیفرنیا پرداختند. خشکسالی های ۲۰۰۷ تا ۲۰۱۰ و ۲۰۱۲ موجب افزایش شدید استفاده از آب های زیرزمینی در منطقه مورد مطالعه و در نتیجه باعث فرونشست گردید. یافته های اصلی آن نشان داد در مناطقی که تقاضای استفاده از آب زیرزمینی بیشتر باشد فرونشست زمین هم در منطقه زیاد می شود. آن ها با استفاده از تصاویر ماهواره ای و مدل سازی مکان هایی که در آینده بیشتر در معرض تخریب قرار دارند را شناسایی و مدیریت منابع آب زیرزمینی را پیشنهاد دادند. شارما^۳ و همکاران (۲۰۱۶) در مطالعه ای بر جزیره شرمین واقع در دلتای ساکرامنتو-سان واکین که یک منطقه غیر شهری با تغییرات کم زمانی است، نتایج حاصل از کاربرد تکنیک تداخل سنجی راداری برای اندازه گیری فرونشست آن منطقه را با استفاده از اطلاعات باند L با طول موج ۳۲،۰۸ سانتی متر ماهواره UAVSAR انجام دادند. در این مطالعه از داده های جمع آوری شده از ژانویه ۲۰۰۹ تا اوت ۲۰۱۴ برای ارزیابی تغییرات زمانی و مکانی فرونشست جزیره شرمین استفاده شد و نرخ فرونشست به صورت مقادیر متغیر بین ۰-۵ سانتی متر در سراسر محدوده به دست آورده شد. همچنین میانگین

¹ Zhang

² Jeanne

³ SHarma

نرخ فرونشست منطقه تا حدود ۰,۲ تا ۱,۳ سانتی متر برآورد شد. نتایج این مطالعه نشان داد که چندین عامل از جمله نوع خاک، عمق آب زیرزمینی، نوع کاربری زمین ها و ارتفاع زمین بر فرونشست منطقه موثر است. مرادی و همکاران (۱۳۹۹) در تحلیل فرونشست با استفاده از تکنیک تداخل سنجی راداری، اطلاعات چاه های ژئوتکتونیک و پیژومتری در منطقه ۱۸ شهر تهران به این نتیجه رسیدند که منطقه ۱۸ شهری بر روی مخروط افکنه جوان کن که توزیع بالای گراول و متخلخل را در عمق های تحتانی دارا می باشد قرار گرفته است. با توجه به عمق چاه های موجود در منطقه که ضخامت بالای آبرفت را نشان می دهد، به همراه افت سطح ایستابی و خالی شدن خلل و فرج بین دانه بندی ها که منجر به افزایش وزن آبرفت در جهت نیروی گرانشی می شود وجود پدیده فرونشست را موجه نشان می دهد. حداکثر میزان فرونشست بدست آمده از مطالعه تداخل سنجی راداری در حدود ۴۳۰ میلی متر و در محدوده محله یافت آباد می باشد. نرخ فرونشست از غرب به شرق و از شمال به جنوب با افزایش همراه است. به طوری که قسمت شرقی و جنوبی منطقه مورد مطالعه در پهنه کامل فرونشست قرار گرفته است. با توجه به نتایج بدست آمده از مطالعه تداخل سنجی راداری بخش شرقی منطقه ۱۸ شهری بیشترین تاثیر را از پدیده فرونشست دارد. آروین و همکاران (۱۳۹۸) با استفاده از تصاویر ماهواره ای راداری Sentinel-۱ از سال های ۱۳۹۳ و ۱۳۹۷ و روش تداخل سنجی تفاضلی راداری و سیستم اطلاعات جغرافیایی به مدل سازی مکانی فرونشست زمین در جنوب حوزه آبخیز میناب پرداختند. نتایج پردازش های انجام شده بر روی این تصاویر نشان داد که در دوره مطالعاتی، حدود ۱۳ سانتی متر فرونشست داشته است. بعد از صحت سنجی پهنه بندی انجام شده با واقعیت زمینی (شهریور ۱۳۹۷)، به منظور تشخیصی رابطه فرونشست با میزان تغییرات و افت سطح آب زیرزمینی، ارتفاع سطح زمین و شیب، تحلیل های فضایی انجام و میزان همبستگی هریک از فاکتورهای مذکور با تراکم رخداد فرونشست محاسبه گردید. مقصودی و همکاران (۱۳۹۸) در پژوهشی به بررسی رفتار فرونشست زمین در منطقه غرب تهران با استفاده از تصاویر سنجیده سنتینل -۱ و تکنیک تداخل سنجی راداری مبتنی بر پراکنش گرهای دائمی پرداختند. در این مقاله یک سری زمانی دو ساله شامل ۳۰ سنجنده سنتینل -۱، با استفاده از روش تداخل سنجی راداری مبتنی بر پراکنشگرهای دائمی در دو ناحیه مطالعاتی مورد پردازش قرار گرفت. نتایج، جابجایی سالانه ۱۱ سانتی متری در جنوب منطقه مورد مطالعه را نشان داد، اما جابجایی تنها محدود به مناطق دشتی و غیر شهری نبوده بلکه به مناطق صنعتی و شهری نیز گسترش یافته است. ارزیابی نسبی نتایج در منطقه اول با استفاده از داده های مسیر پایین گذر ۳۱ انجام گرفت که با توجه به اختلاف ناچیز برآورد دو مسیر ۷۹ و ۳۱، نواحی مذکور جابجایی افقی بسیار کمی داشته و عمده بردار جابجایی را حرکت قائم تشکیل می دهد همچنین جابجایی قائم با استفاده از دو مدار بالا گذر و پایین گذر برای منطقه مطالعاتی دوم برآورد گردید که با بهره گیری از داده های یک ایستگاه GPS صحت سنجی شد. شریفی کیا (۱۳۹۱) میزان فرونشست بدست آمده از روش تداخل سنجی راداری

در دشت نومق-بهرمان واقع در استان کرمان را با تغییرات تراز آبی مستخرج از چاه های پیرومتری مقایسه نموده و پی به ارتباط عددی بین آنها برده است. فرهودی و محبی (۱۳۸۹) با بررسی داده های جی پی اس در ایستگاه گرگان طی سال های ۲۰۰۶ تا اوایل نیمه دوم ۲۰۰۸ میلادی، به این نتیجه رسیدند که در این دوره ی زمانی ۱۳۵ میلی متر فرونشست به صورت نامنظم در شهر گرگان رخ داده است. با بررسی مطالعات پیشین مشخص شد یکی از مخاطرات مهم فعلی و آینده فرونشست سطح زمین در مناطق مسکونی و غیرمسکونی می باشد. اکثر تحقیقات پیشین بر اهمیت فرونشست و پایش آن با روش هایی مانند تداخل سنجی راداری پرداخته اند یا به نوعی به تحلیل کلی در موضوع مورد مطالعه اکتفا کرده اند اما در پژوهش حاضر با نگاه و نگرش دقیق تر و جزئی تری به تحلیل فضایی موضوع پرداخته است و علاوه بر پایش فرونشست به شناسایی کاربری های مهم شهری در معرض خطر نشست، اهمیت گردشگری و تراکم جمعیت، خطوط ریلی بین شهری، انبار و سیلوهای مهم ذخیره سازی پرداخته است. وجود اماکن مذهبی و تاریخی بسیار مهم و همچنین خطوط ریلی و مراکز اقامتی و تفریحی در محدوده مورد مطالعه بر اهمیت موضوع می افزاید.

متدلوژی

این پژوهش از نوع کاربردی و از نظر ماهیت توصیفی-تحلیلی با رویکرد کمی است. جامعه آماری شامل مناطق ثامن، سه و چهار شهر مشهد می باشد که به دلیل تراکم بالای جمعیت، وجود کاربری های حساس (از جمله حرم مطهر امام رضا علیه السلام، ایستگاه راه آهن، پایانه بار و ذخیره گاه گندم) و احتمال بالای وقوع فرونشست، به عنوان محدوده های مورد مطالعه انتخاب شدند. برای استخراج میزان فرونشست، از داده های ماهواره ای Sentinel-1 در بازه زمانی سال های ۲۰۱۸ تا ۲۰۲۳ استفاده شد. این داده ها با استفاده از نرم افزار SNAP (توسعه یافته توسط آژانس فضایی اروپا) پردازش گردید. سپس نتایج حاصل به نرم افزار ArcGIS منتقل شده و با نقشه های پایه ی محدوده مناطق مورد مطالعه تطبیق داده شد. نتایج حاصل از پردازش در محیط ArcGIS Pro به نقشه های مکانی تبدیل شد. سپس لایه های تراکم جمعیت و کاربری اراضی مناطق مورد مطالعه با نقشه های نرخ فرونشست هم پوشانی داده شدند تا مناطق بحرانی از نظر تاب آوری کالبدی شناسایی گردد. در تداخل سنجی راداری، فاز تصاویر اخذ شده از موقعیت های تصویربرداری و یا زمان های تصویربرداری مختلف، پیکسل به پیکسل مقایسه گردید. از تفاضل گیری بین این مقادیر، تصویراینترفروگرام تولید شد. پس از تشکیل تداخل نگارها، یک شبکه از تصاویر ایجاد شد و با استفاده از روش کمترین مربعات، مقدار جابجایی هر پیکسل تخمین زده شد. رابطه فاز اینترفرومتری طبق رابطه (۱) محاسبه گردید.

رابطه (۱)

$$y_1 = |y_1| \exp(i\varphi_1)$$

$$y_2 = |y_2| \exp(i\varphi_2)$$

$$y_1 y_2 = |y_1| |y_2| \exp(i(\varphi_1 - \varphi_2))$$

در این رابطه؛ y_1 و y_2 سیگنال‌های دو پیکسل متناظر می‌باشد که اولی تصویر اصلی (master) و دومی تصویر فرعی (slave) می‌باشد. پس از ضرب مختلط این دو سیگنال، رابطه دیگری به دست می‌آید که در این رابطه $|y_1| |y_2|$ دامنه $\varphi_1 - \varphi_2$ و برابر فاز اینترفروگرام می‌باشد. در این رابطه، تغییر فاز به اندازه $\pi/2$ معادل جابجایی به اندازه نصف طول موج مورد استفاده توسط ماهواره است که نمایش دهنده یک فرینچ کامل در اینترفروگرام می‌باشد (اکبری و همکاران، ۱۳۹۹). فاز اینترفروگرام ایجاد شده ناشی از مؤلفه‌هایی نظیر مؤلفه مداری، توپوگرافی، جابجایی، اتمسفر و نویز می‌باشد که هر یک از این پارامترها سبب تغییر فاز می‌شود. ارتباط اختلاف فاز ایجاد شده در تداخل سنجی راداری و مؤلفه‌های ذکر شده، به وسیله رابطه زیر تعیین می‌شود.

رابطه (۲)

$$\Delta\varphi_2 = \varphi_{21} - \varphi_2 = \Delta\varphi_{Geometry} + \Delta\varphi_{Topography} + \Delta\varphi_{Deformation} + \Delta\varphi_{Atmosphere} + noise$$

موقعیت نسبی تعدادی از عوارض زمینی در بازه زمانی بین دو تصویربرداری SAR به صورت جزئی تغییر می‌کند. این تغییرات ناشی از پدیده‌هایی نظیر فرونشست، زمین‌لرزه، زمین لغزش و یا حرکت گسل‌ها می‌باشد. این اثر تغییر فازی را مستقل از خط مبنا ایجاد می‌کند که از رابطه زیر تعیین می‌شود.

رابطه (۳)

$$\Delta\varphi_d = \frac{4\pi}{\lambda} d$$

در این رابطه؛ d تصویر جابجایی نسبی عارضه در راستای رنج مایل می‌باشد. پس از مسطح سازی اینترفروگرام، فاز تداخل سنجی شامل هر دو اثر ارتفاعی و جابجایی خواهد بود. بنابراین تداخل سنجی در این حالت مطابق رابطه زیر تعیین می‌شود (زندى و همکاران، ۱۳۹۹).

رابطه (۴)

$$\Delta\varphi = -\frac{4\pi}{\lambda} \frac{B_n q}{R \sin\theta} + \frac{4\pi}{\lambda} d$$

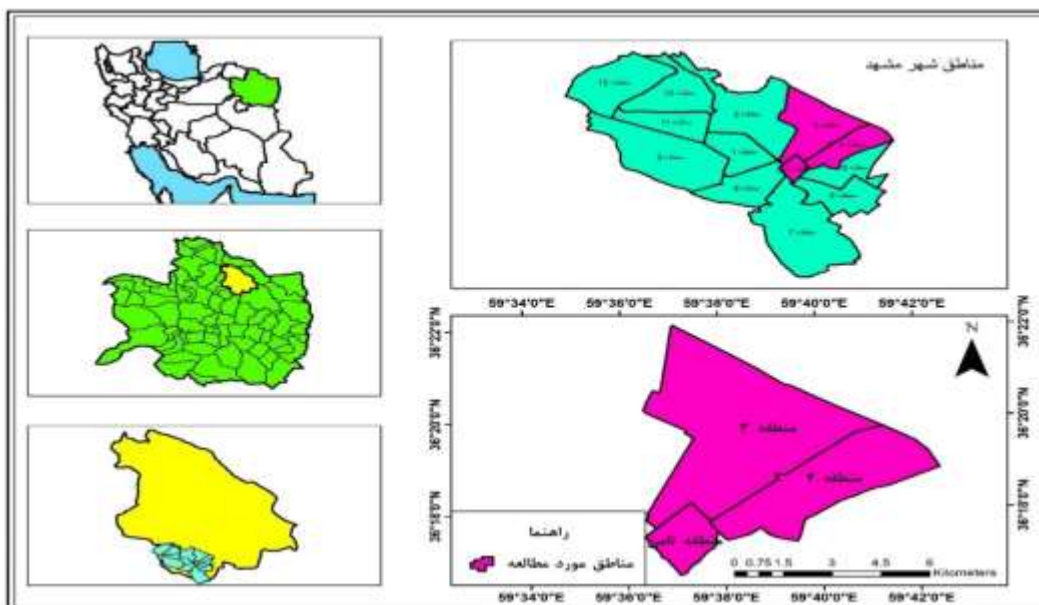
در بخش یافته های تحقیق حاصل فرمول های آماری بالا ارائه شده است. همچنین پس از پردازش تصاویر راداری و حاصل شدن نتایج، در محیط نرم افزار GIS به منظور ارزیابی دقت، خروجی حاصل از روش تداخل سنجی با نقشه تراکم جمعیت و کاربری های مهم محدوده مورد مطالعه، مقایسه شد. در پایان، ارتباط میان سه متغیر کلیدی شامل تراکم جمعیت، نوع کاربری اراضی و نرخ فرونشست زمین به عنوان عوامل مؤثر بر تاب آوری کالبدی مناطق شهری مورد بررسی قرار گرفت.

منطقه مورد مطالعه

شهر مشهد به عنوان مرکز استان خراسان رضوی در شمال شرق ایران و در حوضه آبریز کشف رود، بین رشته کوه های بینالود و هزارمسجد واقع شده است (نوری مقدم و همکاران، ۱۴۰۳). این شهر در مختصات جغرافیایی $35^{\circ}43'$ تا $37^{\circ}07'$ عرض شمالی و $59^{\circ}02'$ تا $60^{\circ}38'$ طول شرقی قرار دارد (عنابستانی و همکاران، ۱۴۰۰). مشهد پس از تهران دومین کلان شهر کشور است و به دلیل وجود بارگاه مطهر امام رضا علیه السلام، یکی از مهم ترین مقاصد گردشگری مذهبی ایران به شمار می رود.

محدوده مورد مطالعه شامل سه منطقه شهری ثامن، سه و چهار است که در بخش های مرکزی و شمال شرقی مشهد واقع شده اند (شکل ۱). این مناطق از نظر کالبدی و عملکردی نقش حیاتی در ساختار فضایی شهر دارند. منطقه ثامن به دلیل تمرکز اماکن مذهبی، تاریخی و گردشگری پیرامون حرم مطهر رضوی، تراکم بالای جمعیت و حجم زیاد زائران در طول سال را تجربه می کند. منطقه سه در شمال غربی شهر واقع بوده و با داشتن کاربری های مسکونی و صنعتی و استقرار ایستگاه راه آهن، یکی از پرترافیک ترین و مهم ترین نواحی مشهد است. منطقه چهار نیز در شمال شرقی شهر قرار دارد و علاوه بر وسعت زیاد، محل استقرار بخشی از زیرساخت های انبارداری و ذخیره گندم شهر است.

ویژگی زمین شناسی این سه منطقه به گونه ای است که بخش عمده آن ها بر روی رسوبات آبرفتی نرم و نفوذپذیر شکل گرفته و در معرض افت سطح ایستابی قرار دارند؛ عاملی که به شدت احتمال بروز فرونشست زمین را افزایش می دهد. بر اساس آخرین آمارهای شهرداری مشهد، جمعیت منطقه سه حدود ۴۰۰ هزار نفر و مساحت آن ۳۳۰۷ هکتار است؛ منطقه ثامن با ۱۳۰۸۴۹ نفر جمعیت و ۱۸۶۹ هکتار مساحت در مرکز شهر قرار گرفته و منطقه چهار با حدود ۱۰ درصد جمعیت شهر، نزدیک به ۵ درصد از کل مساحت مشهد را دربر می گیرد.



شکل ۱: موقعیت منطقه مورد مطالعه (ثامن، سه و چهار) در تقسیمات کشوری

یافته‌ها

در این پژوهش، روند تغییرات فرونشست زمین در مناطق ثامن، سه و چهار شهر مشهد طی سال‌های ۲۰۱۸ تا ۲۰۲۳ مورد تحلیل قرار گرفت. نتایج حاصل از داده‌های ماهواره‌ای نشان داد که میزان جابجایی سطح زمین در این بازه زمانی دارای نوسان بوده و در برخی سال‌ها شدت بیشتری داشته است.

خلاصه نتایج روند تغییرات سالانه به صورت جدول زیر ارائه شده است:

سال	حد اقل نرخ فرونشست (متر در سال)	حداکثر نرخ فرونشست (متر در سال)	نواحی بحرانی اصلی
2018	-0.04	0.06	شمال منطقه ۳ و شرق منطقه ۴
2019	-0.11	-0.01	مرکز منطقه ۴
2020	-0.19	-0.05	جنوب منطقه ۳ و غرب منطقه ۴
2021	-0.09	-0.04	محدوده ریلی منطقه ۳ و جنوب ثامن
2022	-0.15	-0.01	شرق منطقه ۴

بر اساس تحلیل فضایی، سال ۲۰۲۱ بیشترین مقدار فرونشست را در محدوده ایستگاه راه آهن مشهد و بخش هایی از منطقه ثامن نشان داد، در حالی که در سال ۲۰۲۳ میزان نشست کاهش یافته و پایداری نسبی سطح زمین مشاهده شد.

نتایج هم پوشانی نقشه های فرونشست و تراکم جمعیت نشان داد حدود ۴۵ درصد از نواحی با تراکم بالای جمعیت در محدوده هایی با نرخ فرونشست بیش از -0.05 متر در سال قرار دارند. این نواحی عمدتاً در شمال منطقه سه و شرق منطقه چهار متمرکز هستند.

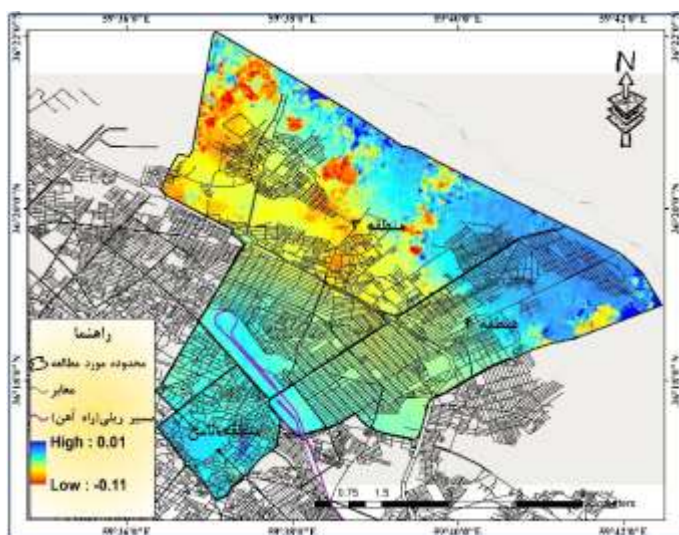
تحلیل کاربری اراضی نیز نشان داد بیش از ۵۷ درصد از مراکز درمانی و آموزشی در محدوده هایی واقع اند که دچار نرخ فرونشست بالا هستند. به ویژه در منطقه ثامن، وجود مراکز اقامتی و اماکن تاریخی در پهنه های پرخطر، ریسک آسیب پذیری کالبدی را افزایش می دهد.

از منظر زمین شناسی و تحلیل خطر، پدیده فرونشست در سال های اخیر به ویژه در مناطق شهری اهمیت فزاینده ای یافته است. شکل ۲ نقشه ارائه شده تغییرات نرخ فرونشست زمین را در بخش هایی از مناطق مرکزی شهر مشهد شامل مناطق ثامن، سه و چهار در سال ۲۰۱۸ نمایش می دهد. داده های رنگی، دامنه تغییرات فرونشست را نشان می دهد. مناطق شمالی و شمال غربی منطقه سه و بخش هایی از نواحی شرقی منطقه چهار دارای بیشترین نرخ نشست هستند (رنگ قرمز). در محدوده جنوبی و جنوب غربی منطقه ثامن، در سال ۲۰۱۹ نواحی میانی منطقه چهار و قسمت هایی از جنوب ثامن (رنگ های آبی روشن و سبز) دارای نرخ نشست کمتری هستند و نوعی پایداری نسبی سطح زمین را نشان می دهند. گسترش لکه های فرونشست به سمت مرکز منطقه چهار و مناطق جدید در شرق نشان دهنده تشدید روند پدیده فرونشست در این محدوده است. همچنین در ادامه این روند برای سال ۲۰۲۰ تمرکز نشست ها در محدوده ی منطقه سه شهر مشهد، غرب منطقه چهار و بخش هایی از شمال منطقه ثامن، ضرورت بازنگری در برنامه ریزی شهری و توسعه زیرساخت ها در این مناطق را نمایان می کند. در تصویر مربوط به سال ۲۰۲۱ تغییرات نرخ فرونشست در بازه ای بین ۰.۰۹ تا -0.04 در قرار دارد. مناطق با رنگ آبی تا فیروزه ای بیانگر نرخ فرونشست مثبت (پایدار یا دارای نشست کمتر) و مناطق قرمز تا نارنجی، نشانگر نرخ فرونشست منفی (فرونشست شدیدتر) هستند. توزیع کامل مقادیر منفی در نقشه ی سال ۲۰۲۲ نشان از گسترش همگانی پدیده فرونشست در محدوده ی مورد مطالعه دارد، به طوریکه حتی نقاط پایدار در سال ۲۰۲۱، در سال ۲۰۲۲ دچار افت

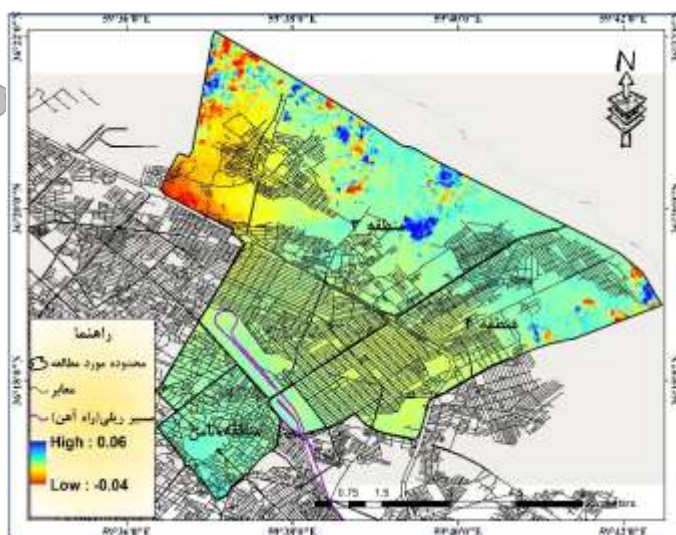
سطحی شده‌اند و کمترین مقدار فرونشست در این سال باز هم عدد منفی به ما نشان می‌دهد. نقشه فرونشست سال ۲۰۲۳ نشان‌دهنده پایداری نسبی بیشتر نسبت به سال ۲۰۲۲ است. دامنه نرخ تغییرات سطح زمین بین -۰,۰۷ و ۰,۰۳ است که این به معنی آن است که برخی نقاط، دچار نشست زیاد نشده و در محدوده پایداری قرار گرفته‌اند.

از دیدگاه تاب‌آوری شهری، استقرار زیرساخت‌های حیاتی (از جمله ایستگاه راه‌آهن، مراکز درمانی و مذهبی) در پهنه‌های دارای نرخ فرونشست بالا، ظرفیت مقاومت کالبدی این مناطق را کاهش داده است. چنین شرایطی علاوه بر خطر تخریب تدریجی ابنیه تاریخی، تهدیدی برای ایمنی زائران و ساکنان شهر به شمار می‌رود. مقایسه نتایج این پژوهش با یافته‌های خرمی و همکاران (۱۳۹۸) و مرادی و همکاران (۱۳۹۹) نشان می‌دهد که روند فرونشست در مشهد طی پنج سال اخیر تداوم داشته و با گسترش فعالیت‌های شهری هم‌زمان شده است. بر این اساس، پایش مستمر و مدیریت منابع آب زیرزمینی باید به‌عنوان اولویت راهبردی مدیریت شهری مشهد در دستور کار قرار گیرد.

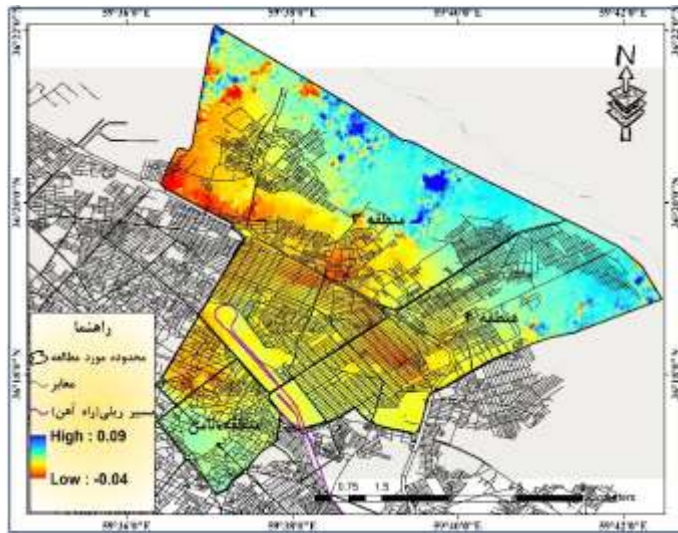
نتایج حاصل از تحلیل‌های بالا نشان می‌دهد که پدیده فرونشست در مناطق مورد مطالعه رابطه‌ای معنادار با تراکم جمعیت و کاربری اراضی دارد. نواحی دارای کاربری‌های سنگین (اقامتی، تجاری و ریلی) بیشترین نرخ نشست را تجربه کرده‌اند. بنابراین، تقویت تاب‌آوری کالبدی از طریق مدیریت آب زیرزمینی، کنترل ساخت‌وساز و توزیع متعادل‌تر خدمات شهری ضروری است.



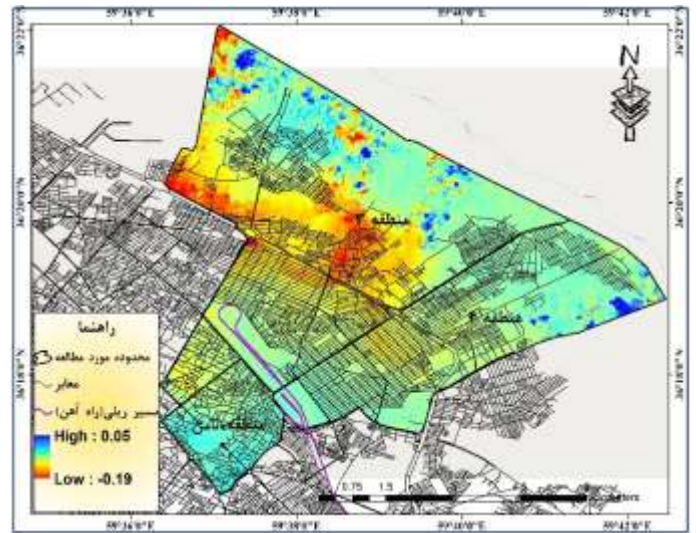
شکل ۳: فرونشست سال ۲۰۱۹ مناطق ثامن، سه و چهار مشهد



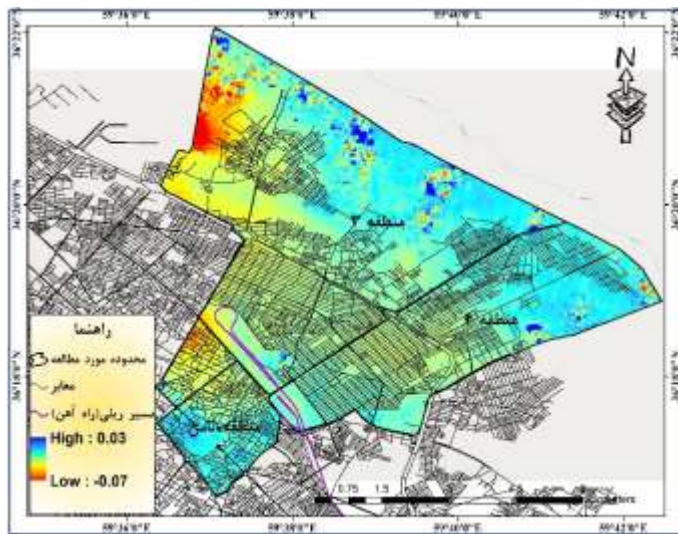
شکل ۲: فرونشست سال ۲۰۱۸ مناطق ثامن، سه و چهار مشهد



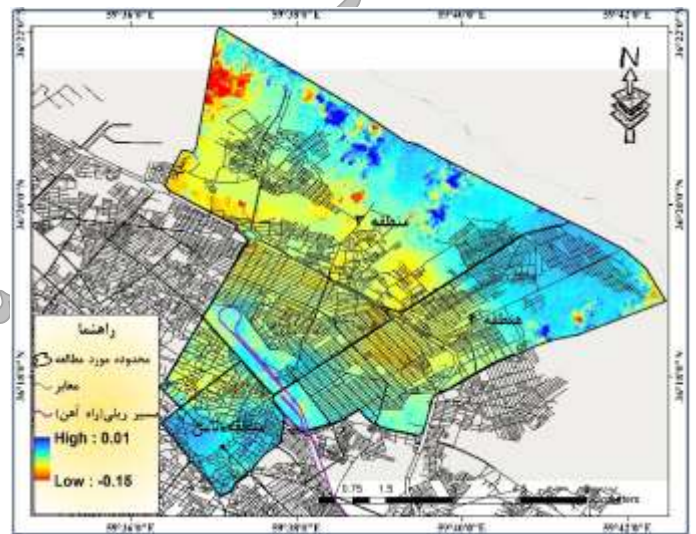
شکل ۵: فرونشست سال ۲۰۲۱ مناطق ثامن، سه و چهار مشهد



شکل ۴: فرونشست سال ۲۰۲۰ مناطق ثامن، سه و چهار مشهد



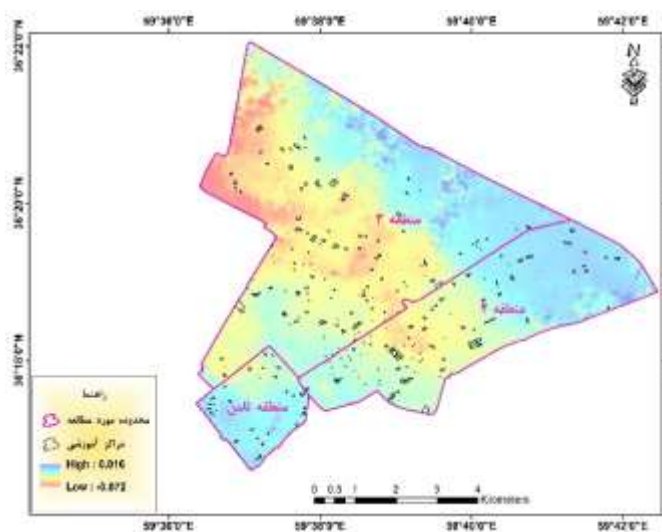
شکل ۷: فرونشست سال ۲۰۲۳ مناطق ثامن، سه و چهار مشهد



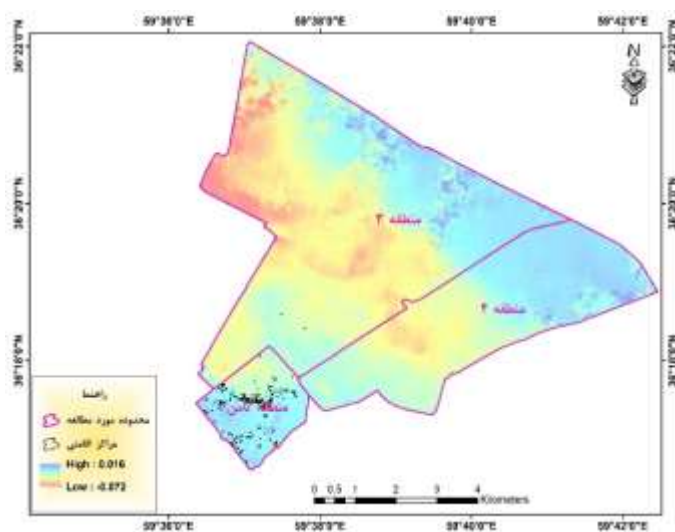
شکل ۶: فرونشست سال ۲۰۲۲ مناطق ثامن، سه و چهار مشهد

امروزه کیفیت زندگی دیگر تنها به فضای مسکونی محدود نمی شود، بلکه به محیط پیرامون و ساختار فضایی شهر نیز وابسته است (رضائی و همکاران، ۱۴۰۴). در شکل ۸، توزیع فضایی تراکم مراکز اقامتی در محدوده سه گانه مناطق مناطق ثامن، سه و چهار شهر مشهد نشان داده شده است. بر اساس اطلاعات استخراج شده، منطقه ثامن که بخش عمده ای از آن در مجاورت حرم مطهر رضوی قرار دارد، دارای بیشترین تراکم مراکز اقامتی است. نقاط

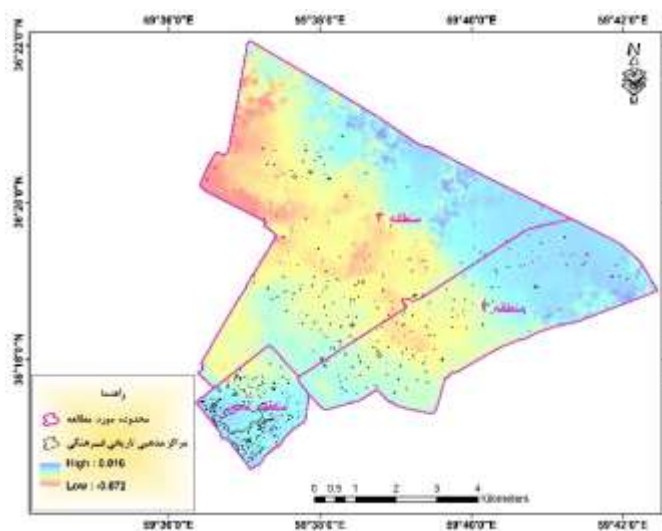
سیاه‌رنگ بر روی نقشه نشان‌دهنده موقعیت مکانی این مراکز بوده و به‌خوبی تمرکز آن‌ها را در این منطقه نمایش می‌دهد با توجه به اطلاعات می‌توان بر اهمیت منطقه مورد بررسی و توجه مدیران را جهت جلوگیری از خطر نشست در محدوده فعال کرد. شکل ۹، توزیع جغرافیایی مراکز آموزشی در سه منطقه شهری مناطق ثامن، سه و چهار شهر مشهد را نشان می‌دهد. بر اساس داده‌های ترسیمی، موقعیت مکانی مراکز آموزشی با نمادهای مشخص‌شده در نقشه (اشکال هندسی مشکی‌رنگ) به‌وضوح در سرتاسر محدوده مطالعاتی پراکنده شده‌اند. همچنین نشان می‌دهد تعداد زیادی از مراکز آموزشی در محدوده خطر نشست قرار دارد. با توجه به شکل ۱۰ تراکم مراکز درمانی در نقشه، می‌توان دریافت که تمرکز مراکز درمانی در بخش‌های مرکزی منطقه سه و در مرز مشترک با منطقه ثامن بیشتر از سایر نقاط است. در مقابل در شرق منطقه چهار، به دلیل وسعت زیاد و تراکم پایین مراکز درمانی، دسترسی پایین‌تر از حد میانگین است و در محدوده خطر قرار دارند. براساس شکل ۱۱، منطقه ثامن که هسته‌ی مذهبی شهر مشهد را شامل می‌شود، بیشترین تراکم مراکز مذهبی-فرهنگی را به خود اختصاص داده است و با توجه به نزدیکی به حرم مطهر رضوی و سایر ابنیه‌های مذهبی و تاریخی، چنین الگویی کاملاً طبیعی است. نقاط مشکی فراوان در این بخش نیز مؤید همین تراکم بالا هستند. اهمیت نگهداری و محافظت از بنای با ارزش و فرهنگی حرم مطهر امام رضا علیه السلام که اعتقادات زیادی از مردم به آن وابسته است و اماکن تاریخی و موزه ای باعث می‌شود در برابر خطر فرونشست نباید بی‌توجهی کرد و باید پیشگیری‌های لازم در جهت کاهش خرات احتمالی اجرائی شود. با توجه به تحلیل ارائه شده، می‌توان چنین برداشت کرد که تراکم بالای مراکز مورد بررسی در منطقه ثامن و منطقه سه و چهار می‌تواند یکی از عوامل مؤثر در تشدید فشارهای وارده بر سفره‌های آب زیرزمینی باشد؛ فشاری که به واسطه افزایش مصرف آب، افزایش ساخت‌وساز و کاهش نفوذپذیری سطح زمین، نهایتاً می‌تواند روند فرونشست زمین را تسریع بخشد همچنین استقرار مراکز حساس در پهنه‌های درگیر با فرونشست، می‌تواند علاوه بر افزایش مخاطرات بالقوه، هزینه‌های آتی مرتبط با نگهداری و مقاوم‌سازی سازه‌ها را نیز به‌شدت افزایش دهد. بر این اساس، توزیع متعادل‌تر خدمات شهری، بازنگری در مکان‌یابی کاربری‌های حساس و کنترل توسعه در نواحی پرخطر از مهم‌ترین راهبردهای پیشنهادی برای ارتقای تاب‌آوری شهری مشهد به‌شمار می‌روند.



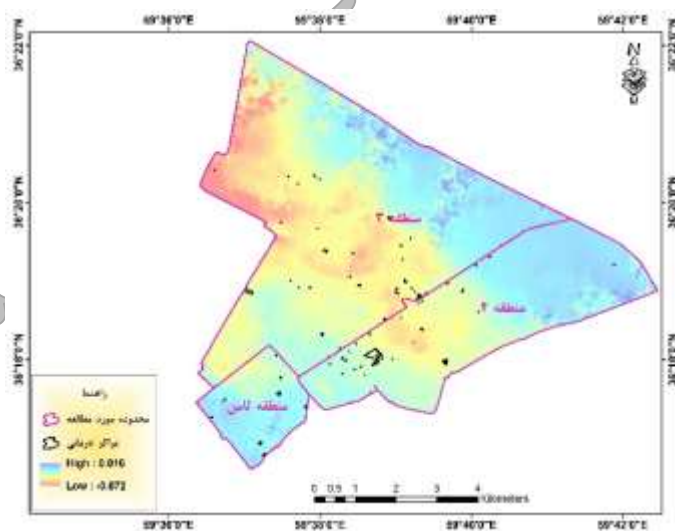
شکل ۹: مراکز آموزشی مناطق ثامن، سه و چهار مشهد



شکل ۸: مراکز اقامتی مناطق ثامن، سه و چهار مشهد



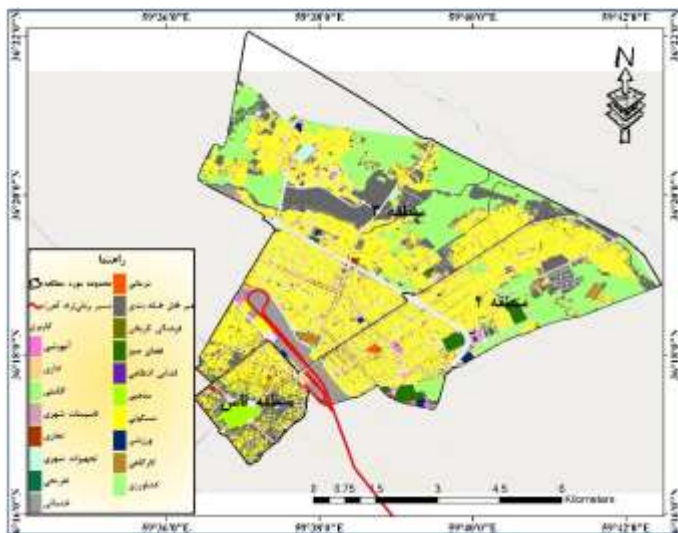
شکل ۱۱: مراکز فرهنگی مناطق ثامن، سه و چهار مشهد



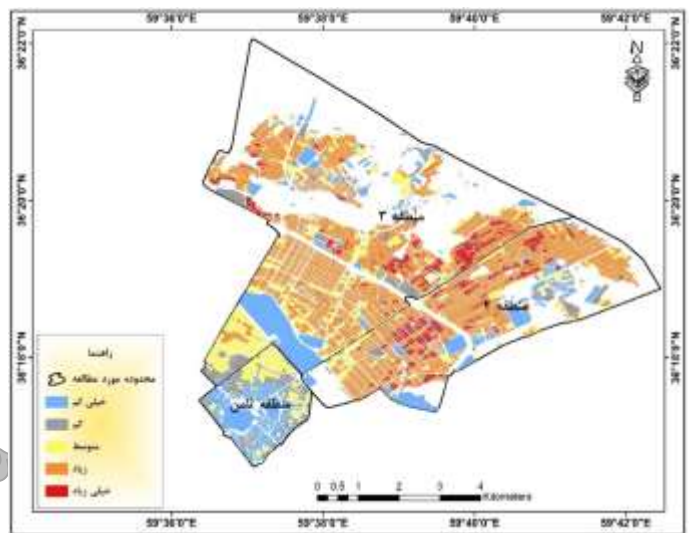
شکل ۱۰: مراکز درمانی مناطق ثامن، سه و چهار مشهد

تصاویر ارائه شده، پراکنش و تراکم مراکز مختلف خدماتی، آموزشی، درمانی و فرهنگی را بر روی نقشه مجموع فرونشست ها در سال های مورد بررسی در محدوده های مورد مطالعه نشان می دهند. این اطلاعات کمک می کند تا نقاط با تمرکز بالای کاربری ها شناسایی شده و ارتباط آن ها با فشار بر منابع و احتمال بروز فرونشست بهتر درک شود. مشاهده این الگوها برای برنامه ریزی شهری و توزیع متعادل تر خدمات در آینده اهمیت زیادی دارد.

وجود مراکز مسکونی و آپارتمان های اسکان زائران و گردشگران در سه منطقه ثامن، سه و چهار و همچنین تمایل به زندگی مردم در نزدیکی مرقد شریف حضرت رضا علیه السلام، باعث شده است این مناطق دارای تراکم بالای جمعیت باشند و دارای اهمیت بسیار بالایی در جاییابی جمعیت و اسکان به خود بگیرند. در بررسی تراکم جمعیت محدوده مورد مطالعه، مشخص شد شرق و جنوب شرقی منطقه مورد مطالعه که بخشی از منطقه سه و بیشتر منطقه چهار را دربر گرفته است دارای تراکم بالای جمعیتی می باشند و شمال و شمال غربی منطقه سه و منطقه ی ثامن که در جنوب غربی منطقه مورد مطالعه قرار دارد دارای تراکم جمعیتی کمتری نسبت به سایر محدوده مورد مطالعه می باشد. لذا در این مناطق باید تا حد امکان از خطرات احتمالی جلوگیری شود. یکی از این خطرات، نشست سطح زمین می باشد که می تواند جان انسان ها را به خطر بیندازد و آینده را دگرگون کند لذا برنامه ریزی و ارائه سناریو ها در این خصوص شديدا ضروری می باشد.



شکل ۱۳. نقشه کاربری محدوده مورد مطالعه



شکل ۱۲. نقشه تراکم جمعیتی محدوده مورد مطالعه

بحث صرفا اصلاحات نگارشی انجام شد

کلانشهرها در کشورهای مختلف با چالش های متعددی مواجه هستند. آرامش و آسایش ساکنان از اولویت های برنامه ریزان و مدیران شهری است و آنها همواره تلاش می کنند تا مخاطرات و مشکلات را کاهش دهند. یکی از مخاطرات مهم، نشست سطح زمین است که در حال حاضر شهرهای بزرگی مانند مشهد، اصفهان و یزد با آن روبرو هستند. کلانشهر مشهد، با وجود بارگاه مطهر حضرت رضا علیه السلام، اهمیت ویژه ای در جذب گردشگران مذهبی و مهاجران دارد و در سال های اخیر نقش قابل توجهی در ایجاد فرصت های شغلی برای جوانان ایفا کرده است. به

همین دلیل، در این پژوهش سه منطقه کلیدی شهر مشهد، شامل مناطق ثامن، سه و چهار مورد بررسی قرار گرفتند. از مهم‌ترین دلایل انتخاب این مناطق می‌توان به موارد زیر اشاره کرد:

- قرارگیری حرم مطهر امام رضا علیه‌السلام در محدوده این مناطق
- تراکم جمعیت بسیار بالا، به ویژه در ایام برگزاری مراسم مذهبی مانند شهادت ائمه اطهار، شب‌های قدر، اربعین حسینی و شهادت امام رضا علیه‌السلام
- وجود ایستگاه ریلی و خطوط راه‌آهن برون‌شهری
- بافت تاریخی و مذهبی باارزش
- حضور اماکن خدمات شهری مهم

بررسی نشست زمین در این محدوده نشان داد که این مناطق در معرض خطر فرونشست قرار دارند (شکل‌های ۲ تا ۷ صفحات قبل). همچنین نقشه تراکم جمعیت نشان می‌دهد که منطقه ثامن و برخی بخش‌های دیگر بالاترین تراکم را دارند که اهمیت توجه ویژه به این مسئله را افزایش می‌دهد. با توجه به جایگاه کلیدی کاربری‌ها و زیرساخت‌های مهم شهری، به‌ویژه ایستگاه راه‌آهن در منطقه ثامن، ضروری است مدیران شهری اقدامات پیشگیرانه‌ای مانند تغذیه سفره‌های آب زیرزمینی، تقویت استحکام بناها و سازه‌ها، و برنامه‌ریزی دقیق در مقابله با فرونشست انجام دهند.

نتیجه‌گیری

فرونشست یکی از چالش‌های جدی زیست‌محیطی و زیرساختی در بسیاری از مناطق، به‌ویژه در ایران، به شمار می‌رود. در این پژوهش، فرونشست زمین در مناطق ثامن، سه و چهار مشهد مورد بررسی قرار گرفت. یافته‌ها نشان دادند که روند فرونشست در این محدوده‌ها طی سال‌های ۲۰۱۸ تا ۲۰۲۳ نگران‌کننده بوده است. تغییرات نرخ فرونشست در این سال‌ها به شرح زیر مشاهده شد:

۲۰۱۸: بین ۰,۰۴- و ۰,۰۶-

۲۰۱۹: بین ۰,۰۱- و ۰,۱۱-

۲۰۲۰: بین ۰,۰۵- و ۰,۱۹-

۲۰۲۱: بین ۰,۰۴- و ۰,۰۹

۲۰۲۲: بین ۰,۰۱- و ۰,۱۵-

۲۰۲۳: بین ۰,۰۳- و ۰,۰۷-

مقایسه این سال‌ها نشان می‌دهد که نه تنها شدت فرونشست در برخی دوره‌ها افزایش یافته است، بلکه گسترش آن به پهنه‌هایی که پیش‌تر پایدار بوده‌اند نیز رخ داده است.

تحلیل داده‌ها نشان داد که تراکم بالای کاربری‌ها و زیرساخت‌های شهری در این محدوده‌ها، نه تنها احتمال خسارت مستقیم به اماکن موجود را افزایش می‌دهد، بلکه با ایجاد فشار مضاعف بر منابع آب زیرزمینی و کاهش نفوذپذیری اراضی، پدیده فرونشست را تشدید می‌کند. نتایج همچنین بیانگر آن است که میان ویژگی‌های فیزیکی شهر و میزان جابه‌جایی سطح زمین رابطه معناداری وجود دارد. به عبارت دیگر، بهبود کیفیت ساختمان‌ها، کاهش تراکم زیرساخت‌ها در مناطق پرخطر و توزیع متعادل‌تر کاربری‌ها می‌تواند نقش مهمی در کاهش آسیب‌پذیری ایفا کند.

بر همین اساس، مدیریت شهری باید در آینده بر موارد زیر تمرکز کند:

۱. پایش مداوم فرونشست با استفاده از فناوری‌های سنجش از دور

۲. مدیریت برداشت آب‌های زیرزمینی

۳. مقاوم‌سازی سازه‌های موجود

۴. رعایت دقیق ضوابط ساخت‌وساز در پهنه‌های مستعد فرونشست

ترکیب تحلیل‌های تداخل‌سنجی راداری با داده‌های شهری می‌تواند ابزاری کارآمد برای تصمیم‌گیری پیشگیرانه و برنامه‌ریزی توسعه شهری در شهرهایی مانند مشهد فراهم آورد و نمونه‌ای قابل استفاده برای سایر مناطق مستعد فرونشست باشد.

با توجه به نتایج پژوهش، اقدامات زیر به عنوان راهکارهای عملی پیشنهاد می‌شود:

- تهیه نقشه‌های خطر فرونشست شهری و استفاده از آن‌ها در طرح‌های توسعه و عمران
- پایش دوره‌ای فرونشست با تصاویر ماهواره‌ای با قدرت تفکیک بالا
- مدیریت و کنترل برداشت آب‌های زیرزمینی، به‌ویژه در مناطق با بیشترین نرخ فرونشست
- افزایش نفوذپذیری اراضی شهری از طریق توسعه فضاهای سبز و کاهش پوشش‌های غیرقابل نفوذ

۱. انجم شعاع، (۱۴۰۲) تحلیل روش های افزایش تاب آوری شهری در بافت تاریخی، سومین کنفرانس بین المللی معماری، عمران، شهرسازی، محیط زیست و افق های هنر اسلامی در بیانیه گام دوم انقلاب، تبریز.
۲. آروین، عبدالخالق؛ وهابزاده کبریا، قربان؛ موسوی، سید رمضان؛ بختیارکیا، مسعود (۱۳۹۸) مدل سازی مکانی فرونشست زمین در جنوب حوضه آبخیز میناب با استفاده از سنجش از دور و سیستم اطلاعات جغرافیایی، سنجش از دور و سامانه اطلاعات جغرافیایی در منابع طبیعی، دوره ۱۰، شماره ۳، صص ۱۹-۳۴.
۳. چترسیماب، زهرا؛ آل شیخ، علی اصغر؛ وثوقی، بهزاد؛ مدیری، مهدی؛ پاکدامن، محمدصادق (۱۴۰۱) بررسی فرونشست سطح زمین در اثر برداشت بی رویه آب زیرزمینی با استفاده از تکنیک تداخل سنجی راداری-آبخوان مروداشت، مهندسی و مدیریت آبخیز. دوره ۱۴، شماره ۱، صص ۱۱۴-۱۲۵.
۴. خرمی، محمد، ابریشمی، سعید. مقصودی، یاسر (۱۳۹۸) تعیین فرونشست شهر مشهد به روش تداخل سنجی راداری پراکنشگر دایمی، نشریه مهندسی عمران امیرکبیر، دوره ۵۱ شماره ۶، ۱۱۸۷-۱۲۰۴
۵. رستمی، محمدحسین، طبیان، سیده زهرا، خندان، معصومه. (۱۳۹۹). تحلیل تاب آوری در بافت تاریخی شیراز با استفاده از سامانه اطلاعات جغرافیایی (GIS). فصلنامه شهر تاب آور. 53-66, 2(2),
۶. رضائی، شهریار؛ محمدپور، صابر؛ آریان، اشکان (۱۴۰۴) تحلیلی بر پراکنش خدمات شهری با تأکید بر رویکرد عدالت فضایی (مطالعه موردی: شهر مشهد)، فصلنامه اقتصاد و برنامه ریزی شهری، دوره ۶ شماره ۲۱، صفحات ۹۸-۱۱۷.
۷. شریفی کیا، محمدرضا (۱۳۹۱) تعیین میزان و دامنه فرونشست زمین به کمک روش تداخل سنجی راداری (D-InSAR) در دشت نوق-بهمران، برنامه ریزی و آمایش فضا، دوره شانزدهم، پاییز ۹۱، مدرس علوم انسانی.
۸. عنابستانی، علی اکبر، عنابستانی، زهرا و اکبری، ابراهیم (۱۴۰۰). تحلیل تغییرات ساختاری سیمای سرزمین و الگوهای توسعه شهری با استفاده از تصاویر ماهواره‌ای چندزمانه - مورد مطالعه: کلان شهر مشهد. فصلنامه علمی-پژوهشی اطلاعات جغرافیایی « سپهر» 30(119), 189-206. doi: 10.22131/sepehr.2021.247894
۹. فراهودی، قدرت اله؛ محمد محبی (۱۳۸۹) بررسی برخی از وقایع تکتونیکی حاکم بر جنوب شرقی دریای خزر و بلوک خزر جنوبی، فصلنامه زمین شناسی کاربردی، سال ۶، شماره ۱، ۴۱-۲۷.

۱۰. مرادی، آیدین؛ عمادالدین، سمیه؛ آرخی، صالح؛ رضائی، خلیل (۱۳۹۹) تحلیل زمین با استفاده از تکنیک تداخل سنجی راداری، اطلاعات چاه های ژئوتکنیکی و پیژومتری، نشریه تحلیل فضایی مخاطرات محیطی، سال هفتم، شماره ۱، صص ۱۵۳-۱۷۶.

۱۱. مقصودی، یاسر؛ امانی، رضا؛ احمدی، حسن (۱۳۹۸) بررسی رفتار فرونشست زمین در منطقه غرب تهران با استفاده از تصاویر سنجنده سنتینل-۱ و تکنیک تداخل سنجی راداری مبتنی بر پراکنش گرهای دائمی، تحقیقات منابع آب ایران، دوره ۱۵، شماره ۱، صص ۲۹۹-۳۱۳.

۱۲. نوروزی مقدم، فایزه. سلیمانی مقدم، هادی و اکبری، الهه (۱۴۰۳) بررسی عوامل موثر جغرافیایی بر فرونشست مشهد با استفاده از مدل OLS، نشریه کاربرد سنجش از دور و سیستم اطلاعات جغرافیایی در علوم محیطی

1. S. Hassanzadeh Tavakoli, M. R. Zandmoghaddam, and Z. Karkababadi, "Evaluation of resilience of worn tissues against natural hazards (Case study: worn tissue of Semnan)," 2020. (In Persian)
2. Ferretti, A., Savio, G., Barzaghi, R., Borghi, A., Musazzi, S., Novali, F., ... & Rocca, F., 2007. Submillimeter accuracy of InSAR time series: Experimental validation. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 45(5), 1142-1153.
3. Rott, H., & Nagler, T., 2006. The contribution of radar interferometry to the assessment of landslide hazards. Advances in Space Research, 37(4), 710-719. <https://doi.org/10.1016/j.asr.2005.06.059>
4. Gumilar, I., Abidin, H. Z., Hutasoit, L. M., Hakim, D. M., Sidiq, T. P., Andreas, H. (2015). Land Subsidence in Bandung Basin and its Possible Caused Factors, Procedia Earth and Planetary Science, V.12, pp. 47-62.
5. Sharma, P., Jones, C. E., Dudas, J., Bawden, G. W., & Deverel, S., 2016. Monitoring of subsidence with UAVSAR on Sherman Island in California's Sacramento-San Joaquin Delta. Remote sensing of environment, 181, 218-236. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2016.04.012>
6. Goli, A., Moradi, M., Dehghani, M. (2019). Land Subsidence Vulnerability Assessment of Rural Settlements in Fars Province, Journal of Research and Rural Planning, V.8(4).
7. R. Ghaffarpour and M. I. Alizadeh, "Resiliency Concept Explanation in Electricity Network and its Relationship with Passive Defens", Journal of Shahr-e-Tabavar, Serial No. 2, vol. 2, no. 1, 2020. (In Persian)

8. Tong, X., Schmidt, D. (2016). Active movement of the Cascade landslide complex in Washington from a coherence-based InSAR time series method. *Remote Sensing of Environment*, 186, pp. 405–415.
9. Gabriel, A. K., Goldstein, R. M., & Zebker, H. A., 1989. Mapping small elevation changes over large areas: Differential radar interferometry. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 94(B7), 9183-9191. <https://doi.org/10.1029/JB094iB07p09183>
10. Nan li, (2017), study on historical urban texture restoration and control based on weaving, theory, journal of the faculty of engineering commission, vol 32, pp 35.
11. Mohammadi, Jamal, Abuzar Bakhshi and Leila Aghaei, (2013), Understanding the physical and spatial identity of the historical context of cities (Case study: Fahdan neighborhood of Yazd), First National Conference on Architecture, Restoration, Urban Planning and Sustainable Environment, Hamedan.

نسخه
پیش
انتشار