Researches in Earth Sciences

Journal homepage: https://esrj.sbu.ac.ir

Research Article

Assessment of the relationship between urbanization of Mashhad metropolis and geomorphic hazards susceptibility in the Middle Kashafroud Watershed

Mahboubeh Kani[1], Neda Mohseni[1] *, Seyed Reza Hosseinzadeh[1]

1-Department of Geography, Faculty of Literatures & human sciences, Ferdowsi University of Mashhad, Mashhad, Iran

Received: 13 Mar 2025 Accepted: 25 Apr 2025

Extended Abstract

Introduction

Urbanization is affected by multiple variables such as geomorphic landform and landscape, population growth, economic growth, and geomorphic hazards. However, during urban planning and development, more emphasis is given to social and economic factors. Usually, the cities or region's vulnerability to hazards is not properly assessed. Hence, in areas which lie in a rugged landscape, such as alluvial fan, slope area, alluvial plain, and pediment, geomorphic hazards such as landslide, land subsidence, flash flood, and debris flow can occur frequently. This can cause severe damage to human lives and their property. To avoid such scenarios, urban planners, decision-makers, engineers, policymakers should consider not only the physical urban environment but also its susceptibility to natural hazards. The Mashhad is the second largest metropolitan area in Iran with nearly 294 square kilometers. The Mashhad is located on northeast Iran. Mashhad is one of the Iranian metropolitan cities which is located in semi-arid with annual precipitation of 260mm, and mean annual temperature of 14 °C. The Mashhad has experienced a rapid growth in recent decades and has been suffering from geomorphic hazard. Nonetheless, no geomorphological practical analysis has been carried out for Mashhad. Due to its unbalanced development, it has many environmental problems. The Mashhad is highly migratory and suffers severely from informal settlements. Groundwater overexploitation due to population pressure stimulates the occurrence of geomorphic hazard such as land subsidence, and it urgently needs planned development and management of geomorphological structures. In this regard, the multi-hazard approach helps understand how hazards and vulnerabilities are combined over territory and gives a more accurate representation of the complexity of the risks for an area. This study investigated the urbanization impacts of Mashhad Metropolis and Geomorphologic Hazards with Emphasis on the Middle Kashafroud Watershed. In this regard, the physical development of Mashhad during a 20-year period (2003-2023) was first investigated and its development trend was predicted for the next 10 years (2033). Then, a comprehensive analysis of the relationship between the current and future physical development of Mashhad and its effects on the processes of landslides and subsidence has been presented. The results of this research, by improving comprehensive understanding of the environmental challenges, provide a pathway for urban planners and managers to increase urban resilience against these hazards.

Citation: Kani, M., 2025. Assessment of the relationship between urbanization of Mashhad metropolis and geomorphic, *Res. Earth. Sci:* 16(2), (112-130) DOI: 10.48308/esrj.2025.105827

* Corresponding author E-mail address: nedamohseni@um.ac.ir

Copyright: © 2025 by the authors. Submitted for possible open access publication under the terms and conditions of the Creative Commons Attribution (CC BY). license (https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/).

Materials and Methods

This research was designed in three main steps with the aim of studying and predicting the relationship between the urbanization of Mashhad metropolises and geomorphologic hazards with emphasis on the middle Kashafroud watershed. In the first step, the physical development of Mashhad from 2003 to 2023 was investigated using Landsat satellite images and the maximum likelihood classification algorithm, and a land use map was generated. Then, using the Land Change Modeler (LCM) and Markov chain, the physical development trend of the city was predicted for the ten years (until 2033). In the second step, the landslide susceptibility assessment was evaluated using the weighted linear combination (WLC) method and analytical hierarchy process (AHP). Then, the land subsidence susceptibility assessment was estimated using the radar interferometry technique and Sentinel-1 images. Finally, the relationship between the physical development of Mashhad and changes in the processes related to landslides and land subsidence was analyzed.

Results and Discussion

Based on the results of the land use classification map, during the 20-year period, the urbanization has significantly developed. Agricultural land use has been decreasing. Rainfed agricultural land use, developed in the central and eastern parts of the Kashafroud watershed, increased in 2013 and decreased again in 2023. Poor pastures, which is covered the northern basin, significantly decreased in 2013 compared to 2003. Orchards, which are mostly spread along the valleys, especially in the southwest and northern basin, have decreased in recent years. Medium pasture is covered the southwestern areas. This type of land use showed a significant increase in 2013 compared to 2003, but it did not show much change compared to 2023. Other land uses, such as water bodies and fallow lands, have not changed during the 20 years; only fallow lands have slightly increased in 2013. The results showed that the physical development of the Mashhad metropolis is closely related to two geomorphic hazards, landslide and land subsidence. Slopes of the Binalood Mountain and Hazar Masjed Mountain in the southwest and northeast of Mashhad are prone to landslide due to sensitive geological structure and high erodibility of the rocks. Urban expansion towards the highlands and steep areas and along valleys, and the destruction of vegetation, increase the risk of landslide. On the other hand, land subsidence in Mashhad is mainly due to the overexploitation of groundwater resources and subsequently declining groundwater levels. The urban expansion in the southeast and northwest of the Mashhad plain have increased the vulnerability of these areas to land subsidence, so that in some areas the subsidence rate reaches more than 45 cm per year. This phenomenon is a serious threat to infrastructure, structures, and the urban environment.

Conclusion

The Mashhad metropolises exhibit the rapid and significant expansion in recent years. This physical expansion has occurred due to population growth, migration, economic and cultural development. However, this expansion has been accompanied by environmental, social, and economic challenges and consequences. A critical factor in managing these challenges is the integration of geomorphological aspects and its principles into urban planning. A comprehensive understanding of how geomorphological processes affect urban areas is crucial for developing effective and sustainable urban planning and management strategies. These solutions are particularly important in dealing with natural hazards, managing risks, and enhancing urban resilience. In the present research, land use changes in the middle Kashafrood watershed were investigated over a 20-year period (2003 to 2023). Then, the changes were predicted until 2033. Residential areas, with a significant increasing trend in the past 20 years, have accounted for the most changes. A significant decrease in the area of agricultural land indicates the impact of the physical expansion of the urban area on decreasing agricultural land. Study of lithological units shows that landslide-prone structures such as the Mozduran, Chaman-Bid, and Upper Red structures, especially in the northern watershed, have a high potential for landslide occurrence. Based on the subsidence results, the highest subsidence values have occurred in the northwestern and the northeastern Mashhad. This is due to the presence of several factors, including groundwater overexploitation and the geological conditions of the region. The northwestern and northeastern areas of Mashhad, which showed the highest subsidence rates, are usually areas where groundwater overexploitation has occurred. These areas include urban and agricultural areas that

require special water resource management. Finally, the present research has investigated the geomorphological impacts on the urban development and the challenges arising from natural hazards such as landslides and subsidence. The expansion of Mashhad is closely related to geomorphological landforms. Accur ate knowledge of these landforms and their impacts on urban development can help to improve the planning and management process. Geomorphological landforms, due to their multifaceted impacts on various factors such as location, urban growth pattern, infrastructure, and hazard management, are considered one of the fundamental aspects of urban planning. Mashhad, as one of the metropolises of Iran, is directly influenced by geomorphological elements such as highlands, slopes, alluvial fans, streams, riverbeds, and topography. The Binaloud Mountain in the south and Hazar-Masjed in the northeast of Mashhad, as natural barriers, have limited the physical expansion of the city. Construction on these slopes faces problems such as landslides and soil erosion. In contrast, plain surfaces with alluvial soils in the southern and northwestern parts have provided a favorable condition for urban and agricultural development. However, groundwater overexploitation in these areas has caused the occurrence of land subsidence, which is a serious challenge for sustainable development. Alluvial fan areas, due to their suitable soil permeability, have been employed as suitable conditions for the urban expansion, especially in the northwest and along the Binaloud pediment. The relationship between the expansion of Mashhad and the occurrence of landslide and land subsidence is an important challenge that requires serious attention. The physical expansion of Mashhad and its surroundings, especially in the northwest of the Mashhad plain, has increased the need for water resources. Expansion in steep areas, construction in steep and unstable areas without considering geological characteristics can lead to landslides, which cause great loss of life and property. The Hazar-Masjed and Binaloud Mountains present distinct geomorphological and lithological characteristics influencing landslide susceptibility. The western Binaloud Mountains, dominated by resistant rock units like the Mashhad phyllite, exhibit a moderate landslide potential. In general, lack of proper planning for urbanization management, human manipulation, destabilization of slopes, deforestation, and geological and lithological structures are among the causes of landslides in the Mashhad plain. Overall, a detailed study of the geomorphology of a region not only helps to better understand the natural dynamics and their effects on urban development, but can also lead to the development of efficient policies for urban management and reducing the risk of natural hazard. The results of this research, by improving comprehensive understanding of the environmental challenges, provide a pathway for urban planners and managers to increase urban resilience against these hazards.

Keywords: Landslide, Land Subsidence, Management, Physical Expansion, Urban Geomorphology

پژوهشهای دانش زمین
Journal homepage: https://esrj.sbu.ac.ir
Shahid Beheshti University

ارزیابی ارتباط توسعه فیزیکی کلانشهر مشهد و پتانسیل مخاطرات ژئومورفیک در حوضه آبریز کشف‌رود میانی

محبوبه کنی[۱]، ندا محسنی[۱] *، سید رضا حسین زاده[۱]
۱-گروه جغرافیا، دانشکده ادبیات و علوم انسانی، دانشگاه فردوسی مشهد، مشهد، ایران

(**پژوهشی**) دریافت مقاله: ۱۴۰۳/۱۲/۲۳ پذیرش نهایی مقاله: ۱۴۰۴/۰۲/۰۵

چکیده گسترده

مقدمه

توسعه شتابان شهری در دهه‌های اخیر، به ویژه در مناطق مستعد مخاطرات طبیعی، چالش‌های فزاینده‌ای را در پی داشته است. تحلیل تعامل بین ژئومورفولوژی و گسترش شهری می‌تواند نشان‌دهنده اهمیت نقش فرم‌ها و فرایندهای ژئومورفیک در گسترش شهری و تأثیرات متقابل آن‌ها باشد. لندفرم‌ها و چشم‌اندازهای مرتبط با آن‌ها به عنوان مهمترین میراث‌های طبیعی یکی از مهمترین ابعاد تعامل ژئومورفولوژی و گسترش شهری را به نمایش می‌گذارند. این لندفرم‌ها بخشی از هویت و تصویر شهر بوده و ارائه دهنده ارزش‌های زیبایی‌شناختی و فرهنگی می‌باشند. از سوی دیگر، لندفرم‌ها می‌توانند زمینه‌ساز محدودیت‌هایی در توسعه فضاهای شهری و زیرساخت‌های مرتبط باشند. رشد سریع و بی‌رویه‌ی شهرها، به ویژه در کشورهای در حال توسعه، به عنوان یکی از عوامل کلیدی در تشدید مخاطرات طبیعی شناخته می‌شود. این پدیده، با تغییرات گسترده در کاربری اراضی، افزایش جمعیت و تراکم ساخت‌وساز می‌تواند به طور مستقیم و غیرمستقیم بر وقوع و شدت مخاطراتی همچون لغزش زمین، فرونشست، سیل و زلزله تأثیرگذار باشد. این پژوهش با تمرکز بر واکاوی و تحلیل چندوجهی ارتباط متقابل بین توسعه شهری و مخاطرات ژئومورفولوژیک، به‌ویژه پدیده‌های بحرانی فرونشست زمین و زمین لغزش در حوضه آبریز کشف رود میانی با تاکید بر کلان‌شهر مشهد می‌پردازد تا درک عمیق‌تر و جامع‌تری از این چالش‌ها ارائه نماید. نتایج این تحقیق بستری مناسب برای برنامه‌ریزان و مدیران شهری فراهم می‌آورد تا با تدوین و به کارگیری راهبردهای مؤثر و مبتنی بر شواهد، ضمن کاهش اثرات مخاطرات، تاب‌آوری شهری در برابر این تهدیدات را به‌طور چشمگیری ارتقاء بخشند. علاوه بر این، شناسایی مناطق آسیب‌پذیر در برابر مخاطرات، امکان اجرای اقدامات پیشگیرانه برای حفاظت از زیرساخت‌های حیاتی، مناطق مسکونی و سرمایه‌های اقتصادی را فراهم می‌آورد. در این مطالعه تلاش شده است در گام اول ضمن بررسی توسعه فیزیکی شهر مشهد طی بازه زمانی ۲۰ سال گذشته، پیش‌بینی روند توسعه آن تا ۱۰ سال آینده انجام پذیرد. در گام دوم تحلیلی از ارتباط توسعه فیزیکی فعلی و آینده شهر مشهد و اثرات آن بر روند فرآیندهای زمین لغزش و فرونشست انجام شده است.

مواد و روش‌ها

حوضه آبریز کشف‌رود میانی که محدوده کلان شهر مشهد در آن واقع شده است، منطقه‌ای پیچیده از نظر ژئومورفولوژی، زمین‌شناسی و هیدرولوژی است که تحت تأثیر عوامل طبیعی و انسانی قرار دارد. این منطقه نیازمند مدیریت جامع و پایدار منابع آب و خاک بوده تا از پتانسیل‌های آن به بهترین نحو استفاده و از مخاطرات احتمالی جلوگیری شود.

استناد: کنی، م. و همکاران، ۱۴۰۴. ارزیابی ارتباط توسعه فیزیکی کلانشهر مشهد و پتانسیل مخاطرات ژئومورفیک، پژوهشهای دانش زمین: ۱۶(۲)، (۱۳۰-۱۱۲)، DOI: 10.48308/esrj.2025.105827

* نویسنده مسئول: E-mail: nedamohseni@um.ac.ir

Copyright: © 2025 by the authors. Submitted for possible open access publication under the terms and conditions of the Creative Commons Attribution (CC BY). license (https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/).

تحقیق حاضر با هدف بررسی و پیش‌بینی توسعه فیزیکی شهر مشهد و ارتباط آن با مخاطرات زمین‌لغزش و فرونشست، در سه گام اصلی طراحی شده است. در گام نخست، توسعه فیزیکی شهر مشهد طی سال‌های ۲۰۰۳ تا ۲۰۲۳ با استفاده از تصاویر ماهواره‌ای لندست و الگوریتم طبقه‌بندی حداکثر احتمال بررسی و نقشه کاربری اراضی تهیه شد. سپس با استفاده از مدل‌سازی تغییرات زمین (LCM) و زنجیره مارکوف، روند توسعه فیزیکی شهر برای ۱۰ سال آینده (تا سال ۲۰۳۳) پیش‌بینی گردید. در گام دوم، پهنه‌بندی خطر زمین‌لغزش با استفاده از روش ترکیب وزنی خطی (WLC) و تحلیل سلسله مراتبی (AHP) انجام و میزان فرونشست با استفاده از تکنیک تداخل‌سنجی راداری و تصاویر Sentinel-1 برآورد شد. در نهایت، ارتباط بین توسعه فیزیکی شهر مشهد و تغییرات در فرایندهای مرتبط با زمین‌لغزش و فرونشست مورد تحلیل قرار گرفت.

نتایج و بحث

بر اساس نتایج نقشه طبقه‌بندی کاربری اراضی، طی بازه ۲۰ ساله، فضای کالبدی و فیزیکی شهری در منطقه موردمطالعه، گسترش زیادی داشته است که به‌طور واضح در پیرامون شهر مشهد مشاهده می‌شود. کاربری اراضی کشاورزی به صورت آبی در پیرامون شهر مشهد، روند کاهشی نشان داده است. اراضی زراعی دیمی در بخش مرکزی و شرقی حوضه آبریز کشف رود، در سال ۲۰۱۳ روند افزایشی و مجدد در سال ۲۰۲۳، کاهش یافته است. کاربری مراتع کم تراکم واقع در بخش شمالی حوضه، در سال ۲۰۱۳ نسبت به ۲۰۰۳ کاهش چشمگیری داشته در حالی که در سال ۲۰۲۳، تغییرات چندانی را نشان نمی‌دهد. کاربری باغات که بیشتر در امتداد دره‌ها، به خصوص در بخش جنوب غربی و شمالی حوضه پراکنش دارند، طی سال‌های اخیر کاهش یافته‌اند. کاربری مراتع متوسط واقع در ارتفاعات جنوب غربی در سال ۲۰۱۳ نسبت به سال ۲۰۰۳ روند افزایشی چشمگیری داشته در حالی که نسبت به سال ۲۰۲۳، تغییرات چندانی را نشان نمی‌دهد. سایر کاربری‌ها از جمله پهنه آبی و اراضی آیش (بایر) طی ۲۰ سال اخیر تغییرات زیادی نداشته، صرفاً کاربری آیش در سال ۲۰۱۳ تغییرات افزایشی به صورت ناچیز نشان داده است. توجه به نقشه پیش‌بینی، می‌توان بیان کرد که مناطق مسکونی و فضای کالبدی شهر، گسترش قابل ملاحظه‌ای را می‌تواند طی ۱۰ سال آینده تجربه خواهند کرد. بیشترین گسترش و توسعه شهری در پیرامون شهرهای مشهد، طرقبه و شاندیز مشهود است. این مناطق، به دلیل قرارگیری در اراضی هموار و با شیب مناسب و دسترسی به شبکه راه ارتباطی، پتانسیل تغییر کاربری به مناطق مسکونی را دارا هستند. مطالعه انجام شده در مورد شهر مشهد نشان می‌دهد که توسعه فیزیکی این شهر، به‌ویژه در مناطق حاشیه‌ای و کوهستانی، با دو مخاطره زمین‌لغزش و فرونشست ارتباط تنگاتنگی دارد. دامنه‌های ارتفاعات بینالود در جنوب غربی و هزار مسجد در شمال شرق مشهد به دلیل شیب تند، ساختار زمین‌شناسی حساس و فرسایش‌پذیری بالای سنگ‌ها، مستعد زمین‌لغزش هستند. عواملی مانند توسعه شهری به سمت ارتفاعات، ساخت‌وسازهای بی‌رویه، گسترش سکونتگاه‌های غیررسمی در مناطق شیب‌دار و در امتداد دره‌ها و تخریب پوشش گیاهی، خطر وقوع زمین‌لغزش و تخریب ساختمان‌ها را تشدید کرده است. از سوی دیگر، فرونشست زمین در مشهد عمدتاً به دلیل برداشت بی‌رویه از منابع آب زیرزمینی و کاهش سطح آب‌های زیرزمینی ناشی از گسترش شهر و افزایش جمعیت است. گسترش شهر به سمت جنوب شرقی و به ویژه شمال غرب دشت مشهد، آسیب‌پذیری این مناطق در برابر فرونشست افزایش داده، به طوری که در برخی محدوده‌ها نرخ فرونشست به بیش از ۴۵ سانتی‌متر در سال می‌رسد. بنابراین، توسعه فیزیکی شهر مشهد بدون در نظر گرفتن ملاحظات ژئوتکنیکی و زیست‌محیطی، خطر وقوع زمین‌لغزش و فرونشست زمین را به طور قابل توجهی افزایش داده و این امر نیازمند توجه جدی در برنامه‌ریزی‌های شهری است.

نتیجه‌گیری

شهر مشهد به عنوان یکی از کلان‌شهرهای ایران، در سال‌های اخیر شاهد گسترش سریع و قابل توجهی بوده است. این گسترش به دلایل مختلفی از جمله افزایش جمعیت، مهاجرت، توسعه اقتصادی و فرهنگی، و نیاز به زیرساخت‌های جدید صورت گرفته است. با این حال، این گسترش با چالش‌ها و پیامدهای محیطی، اجتماعی و اقتصادی همراه بوده است. یکی از عوامل کلیدی در مدیریت این چالش‌ها، عدم توجه به ژئومورفولوژی و اصول آن در برنامه‌ریزی شهری است. شناخت صحیح از فرآیندهای ژئومورفولوژیک و اثرات آن‌ها بر محیط‌های شهری، می‌تواند به ارائه راهکارهای مؤثر بر برنامه‌ریزی و مدیریت پایدار شهری منجر شود. در پژوهش حاضر، تغییرات کاربری اراضی حوضه آبریز کشف‌رود میانی در بازه ۲۰ ساله (۲۰۰۳ تا ۲۰۲۳) و پیش‌بینی

تغییرات تا سال ۲۰۳۳ انجام شد. مناطق مسکونی با روند افزایشی قابل‌توجه در ۲۰ سال گذشته، بیشترین تغییرات را به خود اختصاص داده‌اند. این افزایش به ویژه در پیرامون شهر مشهد و شهرهای طرقبه و شاندیز مشهود است. کاهش چشمگیر وسعت اراضی کشاورزی بیانگر تأثیر گسترش فضای کالبدی شهر بر کاهش زمین‌های زراعی است. بررسی واحدهای سنگ‌شناسی نشان می‌دهد که سازندهای حساس به زمین‌لغزش مانند سازند مزدوران، چمن‌بید و تشکیلات قرمز بالایی، به‌ویژه در نواحی شمالی حوضه، پتانسیل بالایی برای وقوع زمین‌لغزش فراهم می‌آورند. بر اساس نتایج فرونشست بیشترین مقادیر فرونشست در مناطق شمال غربی و حاشیه شمال شرقی شهر مشهد به دلیل برداشت‌های بی رویه از آب زیرزمینی و وجود سازندهای حساس زمین‌شناسی رخ داده است. گسترش شهر مشهد ارتباط تنگاتنگی با لندفرم‌های ژئومورفولوژیک دارد. لندفرم‌ها و چشم اندازهای مرتبط به دلیل تأثیرات چندجانبه خود بر عوامل مختلفی مانند مکان‌یابی، الگوی رشد شهری، زیرساخت‌ها و مدیریت مخاطرات، یکی از ارکان اساسی برنامه‌ریزی شهری محسوب می‌شوند. مشهد، به‌عنوان یکی از کلان‌شهرهای ایران، تحت تأثیر مستقیم عناصر ژئومورفولوژیکی از جمله ارتفاعات، دامنه‌ها، مخروط‌افکنه‌ها، مسیل‌ها، بستر رودخانه‌ها، توپوگرافی و شیب زمین قرار دارد. ارتفاعات بینالود در جنوب و هزار مسجد در شمال شرق، به‌عنوان موانع طبیعی، گسترش فیزیکی شهر را محدود کرده‌اند. ساخت‌وساز در این دامنه‌ها با مشکلاتی نظیر زمین‌لغزش و فرسایش خاک مواجه است. در مقابل، سطوح دشتی با خاک‌های آبرفتی در بخش‌های جنوبی و شمال غربی، زمینه مساعدی برای توسعه شهری و کشاورزی و برداشت بی‌رویه آب‌های زیرزمینی و متعاقبا پدیده فرونشست فراهم آورده است. مناطق مخروط‌افکنه‌ای، به دلیل نفوذپذیری مناسب خاک، برای گسترش شهر به‌ویژه در شمال غرب و امتداد دره‌های بینالود مناسب ارزیابی شده‌اند. در محدوده شهر مشهد، گسترش و توسعه فیزیکی شهر، در امتداد دره‌ها، بخصوص ارتفاعات بینالود و هزارمسجد، خطر آسیب‌پذیری ناشی از مخاطره زمین لغزش را افزایش می‌دهد. ارتفاعات هزارمسجد، مناطق ناهموار و کوهستانی با شیب زیاد، و از نظر واحد سنگ‌شناسی، سازندهای حساس به زمین‌لغزش را در برمی‌گیرد. ازجمله سازند مزدوران، چمن بید و تشکیلات قرمز بالایی را می‌توان در این محدوده مشاهده کرد. هم‌چنین مناطق غربی که ارتفاعات بینالود را در برمی‌گیرد، به دلیل وجود واحدهای سنگی مقاوم ازجمله فیلیت مشهد، از پتانسیل متوسط لحاظ وقوع زمین‌لغزش برخوردار است. درکل، عدم برنامه‌ریزی درست در زمینه برنامه‌ریزی شهری، دستکاری‌های انسانی و ناپایدار کردن شیب، تخریب پوشش گیاهی و ساختار زمین شناسی از جمله علل رخداد زمین لغزش در محدوده ارتفاعات منتهی به دشت مشهد هستند. در مجموع، مطالعه دقیق ژئومورفولوژی شهر مشهد، نه تنها به درک بهتر از پویایی‌های طبیعی و اثرات آن‌ها بر توسعه شهری کمک می‌کند، بلکه می‌تواند به تدوین سیاست‌های کارآمد در زمینه مدیریت شهری و کاهش خطرات طبیعی منجر شود. اتخاذ چنین رویکردی، به‌ویژه در شهرهای بزرگ و در حال توسعه، امری ضروری و اجتناب‌ناپذیر است.

واژگان کلیدی: توسعه فیزیکی، زمین لغزش، ژئومورفولوژی شهری، فرونشست، مدیریت.

مقدمه

براساس پیش‌بینی‌ها، تا سال ۲۰۵۰ حدود ۷۰ درصد جمعیت جهان در شهرها زندگی خواهند کرد (United Nations, 2025). علی‌رغم مزایای مناطق شهری، کلانشهرها در برابر مخاطرات محیطی مانند سیل، زلزله، رانش زمین و فرونشست به شدت آسیب‌پذیر بوده و گرمایش جهانی با افزایش پنج‌برابری مخاطرات جوی در نیم قرن سال گذشته، این آسیب‌پذیری را تشدید کرده است (Sidle et al, 2017). این مسئله به‌ویژه در کلان‌شهرهای کشورهای در حال توسعه که مدل‌های شهری متنوعی را در تعامل با فرآیندها و فرم‌های ژئومورفولوژیک به نمایش می‌گذارند، اهمیت حیاتی دارد؛ چرا که نقش فرم‌های زمین در توسعه شهری، تأثیرات متقابل میان پدیده‌های ژئومورفولوژیک و شهرنشینی را برجسته کرده و چالش‌هایی نظیر فرونشست زمین، سیلاب-های شهری، تخریب محیط‌زیست طبیعی و آسیب‌پذیری-های اکولوژیکی را نمایان می‌سازد. لندفرم‌ها و چشم‌اندازهای مرتبط با آن‌ها به عنوان مهم‌ترین میراث‌های طبیعی یکی از مهم‌ترین ابعاد تعامل ژئومورفولوژی و گسترش شهری را به نمایش می‌گذارند. لندفرم‌ها می‌توانند

زمینه‌ساز محدودیت‌هایی در توسعه فضاهای شهری و زیرساخت‌های مرتبط باشند. ویژگی‌های ژئومورفولوژیکی مانند توپوگرافی، الگوهای زهکشی، تپه‌های ماسه‌ای، گالی-ها و خطوط ساحلی، همچنین فعالیت‌های آنتروپوژنیک نظیر سدسازی، راه‌سازی، تغییرشکل کانال‌های زهکشی به عنوان نمونه‌ای از ابعاد توسعه شهری می‌توانند مخاطراتی همچون فرونشست، زمین لغزش، سیلاب و فرایندهای گالی را تشدید نمایند (Williams, 2015; Martín-Díaz et al, 2011). با توجه به اهمیت لندفرم‌ها در فراهم آوری منابعی همچون مصالح ساختمانی، معادن، منابع آبی سطحی و زیرزمینی، خاک‌های حاصلخیز و فضاهای گردشگری، بهره‌برداری و مدیریت پایدار آن‌ها ضروری به نظر می‌رسد (Gierlinger et al, 2013). کلان‌شهرها به دلیل تراکم بالای جمعیت و انباشت زیرساخت‌ها، آسیب‌پذیری قابل توجهی در برابر چنین مخاطراتی داشته که این آسیب‌پذیری با گسترش فیزیکی شهرها تشدید می‌شود (Pica et al, 2024). فرونشست، که عمدتاً بر اثر برداشت بی‌رویه از منابع آب‌های زیرزمینی، تغییرات در ویژگی‌های فیزیکی خاک و توپوگرافی سطح زمین رخ می‌دهد، می‌تواند به تخریب ساختمان‌ها، اختلال در شبکه‌های زیرساختی و حمل‌ونقل، فرسایش خاک، از بین رفتن زمین‌های کشاورزی و بسیاری اثرات دیگر بر روی کیفیت خاک و منابع آب‌های زیر زمینی منجر شود. زمین‌لغزش و انواع جریانات واریزه‌ای تهدیدی جدی برای بسیاری از مناطق شهری توسعه یافته بر روی مخروط افکنه‌ها محسوب می‌شود (Li and Samsudin, 2024). از سوی دیگر، سیلاب‌های شهری که نتیجه‌ی مستقیم تغییر اقلیم، تغییرات شدید کاربری اراضی و توسعه ناپایدار شهری می‌باشند، خسارات مالی و جانی گسترده‌ای را به‌همراه داشته و موجب اختلال در عملکرد زیرساخت‌ها می‌گردد (Chai and Wu, 2023). مطالعات متعددی در مناطق مختلف جهان به بررسی ابعاد اثرات توسعه شهری بر تشدید مخاطرات محیطی پرداخته‌اند. بررسی فرونشست زمین با استفاده از داده‌های چندزمانه راداری InSAR طی سال‌های ۲۰۰۷ تا ۲۰۱۱ در ویتنام توسط دنگ و همکاران (Dang et al, 2014) انجام شد. نتایج آن‌ها نشان داد که برخی مناطق در جنوب رودخانه سرخ با نرخ متوسط فرونشست تا ۶۸ میلی‌متر در سال تحت تأثیر کاهش سطح آب‌های زیرزمینی و توسعه شهری شدید قرار گرفته‌اند. نتایج نشان‌دهنده ارتباط میان تغییرات سطح زمین، سطح آب‌های زیرزمینی و توسعه شهری است. در مطالعه‌ای دیگر روجاس و همکاران (Rojas et al, 2017) در شیلی به تحلیل تاریخی رشد شهری (۱۹۴۳-۲۰۱۱) و مدل‌سازی الگوهای توسعه شهری و تأثیر آن بر مناطق مستعد سیل پرداختند. نتایج آن‌ها نشان داد توسعه شهری نامناسب باعث افزایش آسیب‌پذیری در برابر سیلاب‌ها شده و مدیریت رودخانه تنها در کاهش سیلاب‌های کوچک موثر بوده، در حالی که خطر سیلاب‌های بزرگ همچنان بالاست. زونیگا و همکاران (Zúñiga et al, 2020) در مکزیک با ترکیب داده‌های خطر بارش‌های سنگین (به عنوان عامل طبیعی) و تخمین آسیب‌پذیری (از طریق بررسی تغییرات کاربری اراضی و گسترش مناطق شهری) نشان دادند تخریب حوضه‌های آبخیز و از بین رفتن پوشش گیاهی، نقش مهم‌تری در افزایش خطر سیلاب نسبت به تغییرات الگوهای بارش دارد. سایدل و همکاران (Sidle et al, 2022) به بررسی چالش‌های برنامه‌ریزی برای جوامع و مناطق روستایی استرالیا و ژاپن در مواجهه با مخاطرات طبیعی با روش DAIR پرداخته و تأثیرات مخاطرات مزمن و دوره‌ای را در برنامه‌ریزی بلندمدت تحلیل کردند. نتایج آن‌ها نشان داده است که فشارهای انسانی و مخاطرات ترکیبی می‌توانند آسیب‌پذیری مناطق را افزایش داده و نیاز به برنامه‌ریزی جامع‌تری دارند. دی ناپولی و همکاران (Napoli et al, 2023) به بررسی مخاطرات زمین‌لغزش در بخش‌های مختلف اکوادور با استفاده از داده‌های جمعیتی پرداختند و تغییرات جمعیتی و افزایش خطر در سال‌های ۲۰۱۰ تا ۲۰۲۰ را تحلیل کردند. نتایج آن‌ها نشان داد مناطق جنوبی و پیرامونی شهر با افزایش جمعیت و خطر نسبی روبرو هستند و نقشه خطر می‌تواند ابزار مفیدی برای برنامه‌ریزی شهری و مدیریت مخاطرات باشد. مطالعات متعددی در ایران به بررسی اثرات توسعه شهری بر گسترش مخاطرات محیطی پرداخته‌اند. این مطالعات نشان می‌دهند توسعه سریع و اغلب برنامه‌ریزی نشده شهرها، به ویژه در مناطق مستعد به وقوع مخاطرات، می‌تواند منجر به تشدید این مخاطرات و افزایش آسیب‌پذیری شهرها شود. پروین (Parvin, 2019) به بررسی تاثیرات متقابل ژئومورفولوژی و توسعه شهری در شهر کرمانشاه طی چهار دهه گذشته پرداخت. وی با ترسیم نقشه عوارض ژئومورفولوژی و ارزیابی

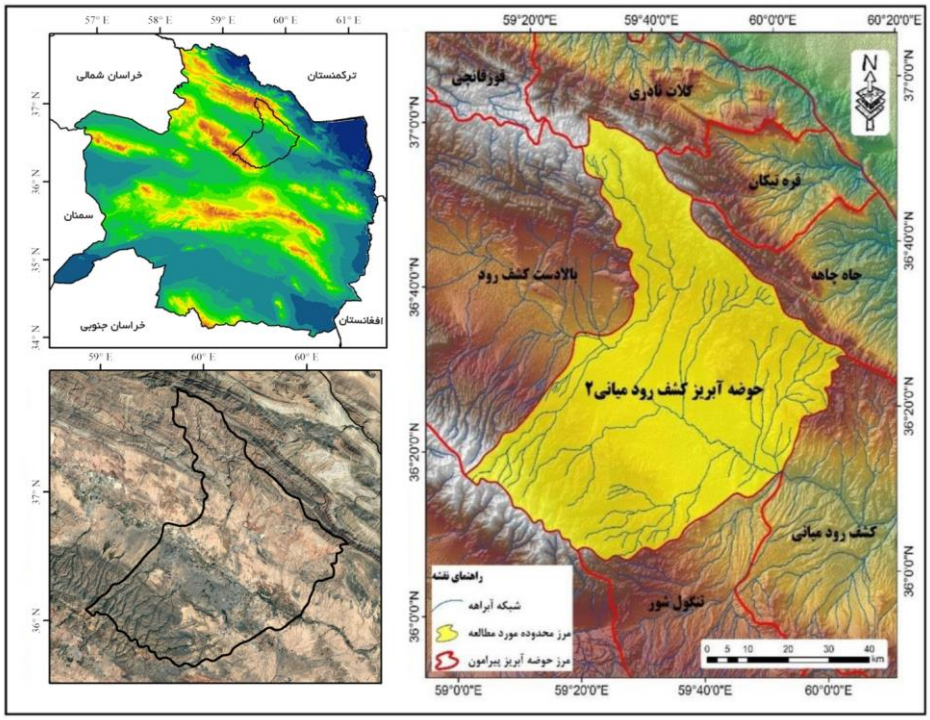
روند توسعه شهر بر اساس تصاویر ماهواره‌ای، نشان داد لندفرم‌های هموار دشت آبرفتی، جهت توسعه شهری را تعیین کرده و توسعه شهر باعث نابودی بستر رودخانه‌ها و توقف روند تکاملی لندفرم‌ها شده است. احمدی و واسعی (Ahmadi and Veysi, 2021) به بررسی تأثیر فرم‌ها و فرایندهای ژئومورفولوژیکی بر توسعه شهری پاوه و تحلیل مخاطرات محیطی آن با استفاده از مطالعات میدانی و مدل ویکور پرداختند. نتایج آن‌ها نشان داد محدودیت‌های توپوگرافی، به‌ویژه شیب زیاد و خطر زمین‌لغزش، موانع اصلی توسعه پایدار شهر پاوه هستند و بخش قابل توجهی از شهر بر روی مناطق ناپایدار واقع شده است. عفیفی (Afifi, 2023) با هدف شناسایی مناطق مناسب توسعهٔ فیزیکی شهر شیراز براساس شرایط ژئومورفولوژیکی، با به‌کارگیری مدل فازی و ارزیابی داده‌های توپوگرافی و کاربری اراضی نشان داد که ۵۴ درصد از منطقه به‌دلیل خطرات ژئومورفولوژیکی نامناسب بوده و جهت بهینه توسعهٔ شهری شرق شهر شیراز است. شریفی و همکاران (Sharifi et al, 2024) با بررسی توسعه فضای شهری در شهرستان نور با هدف مواجهه با مخاطرات محیطی با استفاده از روش‌های توصیفی، ANP و منطق فازی به پهنه‌های مخاطرات پرداخته و با استفاده از مدل ترکیبی زنجیره مارکوف پیش‌بینی توسعه مناطق مسکونی را انجام داده‌اند. نتایج آن‌ها نشان داد گسترش مناطق مسکونی بدون توجه به مخاطرات طبیعی منجر به افزایش شهرنشینی در مناطق پرخطر خواهد شد، اما با اجرای سیاست‌های توسعه پایدار، می‌توان از این روند جلوگیری کرد. بررسی پیشینه تحقیق نشان می‌دهد که توسعه شهری، با پیچیدگی‌های خاص خود و تاثیر بر مخاطرات گوناگونی چون فرونشست، زمین لغزش، سیل و زلزله نیازمند رویکردی جامع و متناسب با نوع مخاطره در برنامه‌ریزی‌های شهری است تا بتواند گسترش مخاطرات را مدیریت و کنترل کند. این پژوهش با تمرکز بر واکاوی و تحلیل چندوجهی ارتباط متقابل بین توسعه شهری و مخاطرات ژئومورفولوژیک، به‌ویژه پدیده‌های بحرانی فرونشست زمین و زمین لغزش در حوضه آبریز کشف رود میانی با تاکید بر کلان‌شهر مشهد می‌پردازد. حوضه آبریز کشف‌رود میانی (محدوده شهر مشهد) منطقه‌ای با ویژگی‌های پیچیده ژئومورفیک، زمین‌شناسی و هیدرولوژیک بوده که رشد و توسعه کالبدی فضاهای شهری در دهه‌های اخیر آسیب پذیری این منطقه به مخاطرات محیطی را تشدید کرده است. بنابراین نیازمند مدیریت جامع و پایدار منابع آب و خاک بوده تا از پتانسیل‌های آن به بهترین نحو استفاده و از مخاطرات احتمالی جلوگیری شود. شناسایی مناطق آسیب‌پذیر در برابر مخاطرات، امکان اجرای اقدامات پیشگیرانه برای حفاظت از زیرساخت‌های حیاتی، مناطق مسکونی و سرمایه‌های اقتصادی را فراهم می‌آورد. این مطالعه در گام اول ارتباط توسعه فیزیکی فعلی و آینده شهر مشهد و اثرات آن بر وقوع فرآیندهای زمین لغزش و فرونشست را ارائه می‌دهد. سپس، ضمن بررسی توسعه فیزیکی شهر طی ۲۰ سال گذشته، با پیش‌بینی روند گسترش آن تا ۱۰ سال آینده، تحلیلی از اثرات احتمالی گسترش شهری بر وقوع مخاطرات را نشان داده است.

مواد و روش‌ها

منطقه مورد مطالعه

حوضه آبریز کشف‌رود میانی (محدوده شهر مشهد) منطقه‌ای با ویژگی‌های متنوع ژئومورفولوژیک، زمین‌شناسی و هیدرولوژیک است (شکل ۱). این محدوده با اختلاف ارتفاع ۲۳۹۰ متر، بازه‌ای بین ۸۴۰ تا ۳۲۳۰ متر از سطح دریا را شامل می‌شود (شکل ۲ الف). بیشترین مساحت (۳۳ درصد) در طبقه ارتفاعی ۱۰۰۰ تا ۱۳۰۰ متر و کمترین (۰/۵۰ درصد) در طبقه ارتفاعی ۲۷۰۰ تا ۳۲۳۰ متر قرار دارد. کمترین میزان شیب در مناطق مرکزی (دشت مشهد) و بیشترین در ارتفاعات شمالی و جنوب غربی دیده می‌شود (شکل ۲ ب و ج). بیشترین مساحت (۲۴ درصد) در طبقه شیب ۰ تا ۵ درصد و کمترین (۷ درصد) در طبقه شیب بیش از ۵۰ درصد قرار دارد. این حوضه تحت تأثیر گسل‌های متعددی همچون گسل کشف‌رود (فشاری در حاشیه ارتفاعات شمالی)، گسل شاندیز (پهنه‌ای به عرض ۳ کیلومتر و طول ۷۷ کیلومتر در ۱۵ کیلومتری غرب مشهد)، گسل جنوب مشهد (در کناره جنوبی دشت مشهد) و گسل توس (شاخه‌ای از گسل کشف‌رود) قرار دارد. از دیدگاه ژئومورفولوژی، این حوضه از واحدهای کوهستانی (با شیب بیش از ۲۵ درصد)، کوهپایه، مخروط‌افکنه (که بخش اعظم شهر مشهد روی آن قرار دارد)، دشت‌های هموار و آبرفت‌های جوان تشکیل شده است (شکل ۲ د). مورفولوژی حوضه، جوان بوده و تحت

تأثیر حرکات تکتونیکی آلپی و فرسایش کواترنری است. ساختمان‌های زمین‌شناسی اغلب با امتداد شمال غرب-جنوب شرق هستند. سازندهای سخت کربناته مزدوران و تیرگان در کوه‌های شمالی رخنمون داشته و سازندهای بینالود شامل سنگ‌های کربناته، ماسه‌سنگ‌ها، سنگ‌های دگرگونی و توده‌های گرانیتی می‌باشند (شکل ۲ ه). کاربری اراضی در حوضه کشف رود میانی متنوع است. از جمله مهم‌ترین کاربری‌های حوضه می‌توان به اراضی زراعی آبی (از چناران تا شرق مشهد)، اراضی فاقد پوشش گیاهی (رخنمون‌های سنگی در مناطق کوهستانی شمالی)، کاربری‌های انسانی (مشهد، شاندیز و طرقبه)، اراضی مرتعی و پهنه‌های آبی (دریاچه چشمه سبز گلمکان، سد طرق و گلستان) اشاره کرد (شکل ۲ و). در مجموع، حوضه آبریز کشف‌رود میانی که محدوده کلان شهر مشهد در آن واقع شده است، منطقه‌ای پیچیده از نظر ژئومورفولوژی، زمین‌شناسی و هیدرولوژی است که تحت تأثیر عوامل طبیعی و انسانی قرار دارد. این منطقه نیازمند مدیریت جامع و پایدار منابع آب و خاک بوده تا از پتانسیل‌های آن به بهترین نحو استفاده و از مخاطرات احتمالی جلوگیری شود.



شکل ۱: موقعیت حوضه آبریز کشف رود میانی در استان خراسان رضوی.

Fig. 1: Location of the middle Kashafroud watershed in Khorasan-Razavi Province.

داده‌های مورد استفاده

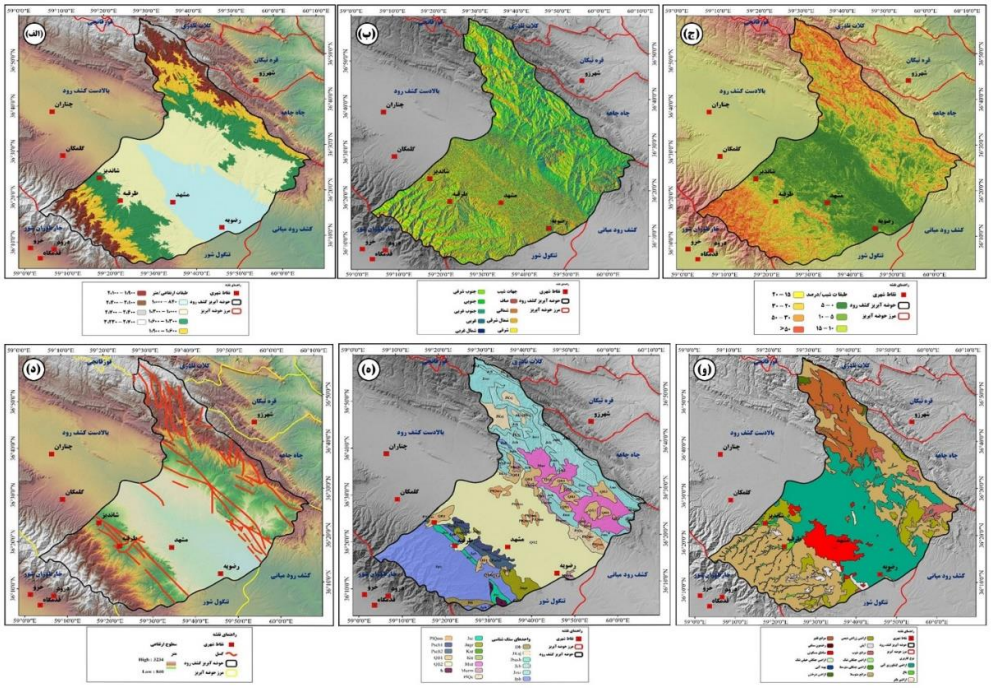
در این پژوهش، به‌منظور دستیابی به اهداف تحقیق، از طیف مختلفی از داده‌های مکانی و توصیفی استفاده شده است. این داده‌ها شامل تصاویر ماهواره‌ای، نقشه‌های زمین‌شناسی، مدل رقومی ارتفاعی و داده‌های راداری می‌باشد.

تصاویر ماهواره‌ای لندست و تصاویر راداری سنتینل

به‌منظور بررسی توسعه فیزیکی شهر مشهد در بازه زمانی ۲۰ ساله (۲۰۲۳-۲۰۰۳) و تهیه نقشه‌های کاربری اراضی، از تصاویر ماهواره‌ای لندست ۸ (سنجنده OLI)، لندست ۷ (سنجنده +ETM) و لندست ۵ (سنجنده TM) با تفکیک افقی ۳۰ متر استفاده شد. به‌منظور برآورد میزان فرونشست در منطقه مورد مطالعه، از تصاویر راداری Sentinel-1 برای بازه زمانی ۲۰۱۴ تا ۲۰۲۳ استفاده شد. این تصاویر با استفاده از تکنیک تداخل‌سنجی راداری پردازش تا میزان جابجایی سطح زمین مشخص شود. ماهواره سنتینل-۱ با قابلیت تصویربرداری در شرایط مختلف جوی و پوشش ابر، امکان پایش مداوم و دقیق فرونشست را فراهم می‌کند.

مدل رقومی ارتفاعی و نقشه زمین‌شناسی

مدل رقومی ارتفاعی با تفکیک مکانی ۱۲/۵ متر، از سنجنده راداری PALSAR تهیه شد. از لایه DEM برای استخراج لایه‌های شیب، جهت شیب و تغییرات ارتفاعی استفاده که از جمله عوامل مهم و موثر بر وقوع زمین‌لغزش و فرونشست به شمار می‌روند. این لایه‌ها در مدل‌سازی پتانسیل وقوع زمین‌لغزش (WLC) و همچنین در تحلیل‌های مربوط به فرونشست، مورد استفاده قرار گرفتند. نقشه زمین‌شناسی با مقیاس ۱:۱۰۰۰۰۰، برای بررسی واحدهای سنگی، گسل‌ها، سازندهای زمین‌شناسی و سایر ویژگی‌های ساختاری منطقه استفاده شد.



شکل ۲: حوضه آبریز کشف رود میانی؛ الف: مدل رقومی ارتفاعی با تفکیک مکانی ۱۲/۵ متر از سنجنده راداری PALSAR (واحد: متر)؛ ب: جهت شیب؛ ج: شیب (واحد: درصد)؛ ه: گسل؛ ه: واحدهای سنگ‌شناسی؛ و: کاربری اراضی.

Fig. 2: Middle Kashafroud River watershed; a: Digital Elevation Model with a spatial resolution of 12.5 meters from the PALSAR radar sensor (unit: meter); b: Slope aspect; c: Slope (unit: percent); d: Faults; e: Lithological units; f: Land use.

روش تجزیه و تحلیل

تحقیق حاضر با هدف بررسی و پیش‌بینی توسعه فیزیکی شهر مشهد و ارتباط آن با مخاطرات زمین‌لغزش و فرونشست، در سه گام اصلی طراحی شده است. در گام نخست، پهنه‌بندی خطر زمین‌لغزش با استفاده از روش ترکیب وزنی خطی (WLC) و تحلیل سلسله مراتبی (AHP) انجام و میزان فرونشست با استفاده از تکنیک تداخل‌سنجی راداری و تصاویر Sentinel-1 برآورد شد. سپس، توسعه فیزیکی شهر طی سال‌های ۲۰۰۳ تا ۲۰۲۳ با استفاده از تصاویر ماهواره‌ای لندست و الگوریتم طبقه‌بندی حداکثر احتمال بررسی و نقشه کاربری اراضی تهیه شد. در مرحله بعد، با استفاده از مدل‌ساز تغییرات زمین (LCM) و زنجیره مارکوف، روند توسعه فیزیکی شهر برای ۱۰ سال آینده (تا سال ۲۰۳۳) پیش‌بینی شد. در نهایت، ارتباط بین توسعه فیزیکی شهر مشهد و تغییرات در فرایندهای مرتبط با زمین‌لغزش و فرونشست مورد تحلیل قرار گرفت.

پهنه‌بندی خطر زمین‌لغزش با استفاده از روش ترکیب وزنی خطی

روش ترکیب وزنی خطی (WLC) یکی از رایج‌ترین تکنیک‌ها در تحلیل‌های ارزیابی چندمعیاره است که بر پایه مفهوم میانگین وزنی استوار است (Ahmadpour et al, 2024). این روش به‌طور گسترده در پهنه‌بندی خطر زمین‌لغزش مورد استفاده قرار می‌گیرد. در روش WLC، تحلیل‌گر بر اساس اهمیت نسبی هر یک از معیارهای مؤثر بر وقوع زمین‌لغزش، وزن‌هایی را به آن‌ها اختصاص می‌دهد.

در این پژوهش، به منظور تهیه نقشه پهنه‌بندی مناطق مستعد وقوع زمین‌لغزش، از ۱۰ متغیر مستقل شامل زمین شناسی، شاخص پوشش گیاهی (NDVI)، انحنای پروفیل، انحنای پلان، فاصله از رودخانه، جهت شیب، ارتفاع، درصد شیب، نرخ بارش و فاصله از گسل، استفاده شد (اشکال ۲ و ۳). سپس، به منظور همگن‌سازی معیارها با واحدهای مختلف، استانداردسازی با استفاده از تبدیل خطی و براساس ماهیت مثبت و منفی هر معیار انجام شد. برای وزن‌دهی معیارها از روش تحلیل سلسله مراتبی (AHP) استفاده شد، که در آن وزن نسبی هر معیار با تشکیل ماتریس مقایسات زوجی و محاسبه بردار ویژه مشخص می‌گردد. در نهایت، لایه‌های استانداردشده با وزن‌های متناظر با استفاده از تابع جمع وزنی ترکیب و نقشه نهایی پهنه‌بندی خطر زمین‌لغزش تهیه شد.

تخمین فرونشست با استفاده از سری‌های زمانی تصاویر راداری Sentinel-1

تکنیک تداخل‌سنجی راداری (InSAR) به عنوان یک تکنیک قدرتمند و دقیق در پایش تغییرات سطح زمین، به طور گسترده‌ای برای برآورد میزان فرونشست مورد استفاده قرار می‌گیرد. این روش با استفاده از تصاویر راداری Sentinel-1، که پوشش سراسری و تفکیک مکانی بالایی دارند، قادر به اندازه‌گیری جابجایی‌های سطح زمین می‌باشد (De Luca et al, 2016). پردازش داده‌های رادار شامل مراحلی چون تبدیل داده‌های خام به تصاویر SLC، ثبت هندسی تصاویر، تولید تداخل‌نما، حذف اثرات توپوگرافی، فیلترگذاری، بازیابی فاز و زمین مرجع کردن است. در این تحقیق با استفاده از این تکنیک و داده‌های ماهواره‌ای Sentinel-1 با پوشش زمانی ۶ روزه و تفکیک افقی ۲۰ متر میزان فرونشست زمین را در مناطق مختلف پایش و برآورد شد.

پیش‌بینی تغییرات کاربری اراضی با استفاده از مدل LCM و زنجیره مارکوف

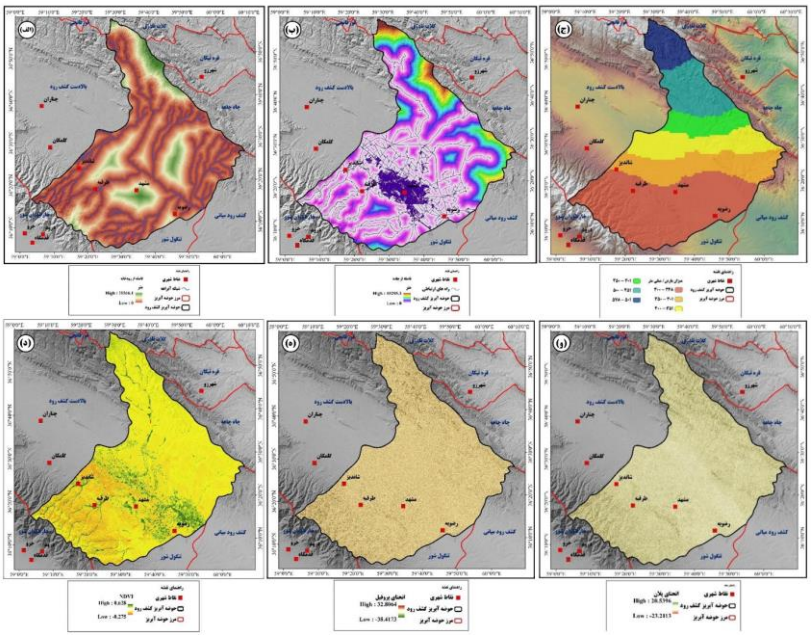
پژوهش حاضر با هدف تهیه نقشه کاربری اراضی و پیش‌بینی تغییرات آن، از روشی ترکیبی و چندمرحله‌ای بهره برده است. ابتدا، با استفاده از روش طبقه‌بندی نظارت‌شده و الگوریتم حداکثر احتمال، نقشه کاربری اراضی در ۸ طبقه تهیه شد. سپس، صحت این نقشه با استفاده از معیارهایی مانند صحت کلی و ضریب کاپا ارزیابی تا مقدار همخوانی آن با واقعیت زمینی مشخص شود. در مرحله بعد، برای مدل‌سازی پتانسیل انتقال کاربری اراضی، از مدل‌سازی تغییرات زمین (LCM) و روش شبکه عصبی مصنوعی استفاده شد. دو زیرمدل انتقال (اراضی زراعی دیمی به مناطق مسکونی و اراضی کشاورزی آبی به مناطق مسکونی) با در نظر گرفتن متغیرهای مستقلی همچون نقشه انتقال کاربری، فاصله از جاده و رودخانه، شیب و ارتفاع تعریف و نقشه‌های پتانسیل انتقال برای هر زیرمدل استخراج گردید. در نهایت، با استفاده از خروجی‌های مرحله قبل و زنجیره مارکوف که ابزاری مناسب برای مدل‌سازی تغییرات کاربری اراضی است (Mohammadyary et al, 2018)، مقدار تغییرات هر کاربری پیش‌بینی شده و نقشه کل تغییرات کاربری اراضی تهیه شد. نتایج حاصل از ارزیابی صحت مدل، دقت نسبتاً خوبی را ارائه می‌دهند. برای سال ۲۰۰۳، ضریب کاپا برابر با ۰/۸۳ و دقت کلی برابر با ۸۶/۷۰ درصد، برای سال ۲۰۱۳، با دقت ۸۶/۹۱ و ضریب کاپا ۰/۸۳ و برای سال ۲۰۲۳، با دقت ۹۳/۴۰ و ضریب کاپا ۰/۹۱ نشان داده شده است.

نتایج

تحلیل گسترش فیزیکی شهر مشهد در ارتباط با مخاطرات زمین لغزش و فرونشست

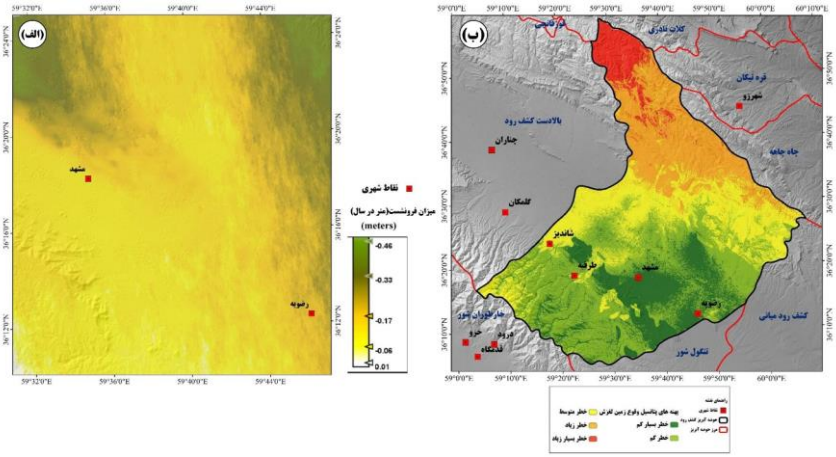
همان‌طور که در شکل ۴ مشاهده می‌شود پهنه‌های شمالی حوضه آبریز کشف رود میانی، پتانسیل بسیار زیادی به لحاظ وقوع زمین‌لغزش دارند. این بخش از حوضه، مناطق ناهموار و کوهستانی با شیب زیاد، و از نظر سنگ‌شناسی، سازندهای حساس به زمین‌لغزش از جمله سازند مزدوران، چمن بید و تشکیلات قرمز بالایی را در بر می‌گیرد. محدوده‌هایی با پتانسیل وقوع بسیار کم زمین‌لغزش مناطق هموار و با شیب کم که پیرامون شهرهای مشهد، طرقبه و شاندیز را پوشش داده است. هم‌چنین مناطق جنوبی و غربی حوضه، به دلیل وجود واحدهای سنگی مقاوم مانند فیلیت مشهد، از پتانسیل متوسط و کم به لحاظ وقوع زمین‌لغزش برخوردار است. براساس نتایج حاصل از میزان فرونشست، در محدوده شهر مشهد و پیرامون آن، بطور میانگین حداکثر ۴۶ سانتی‌متر و حداقل ۶ سانتی‌متر در سال فرونشست رخ داده است. بررسی وضعیت پراکنش میزان فرونشست بیانگر بیشترین میزان فرونشست در

مناطق شمال غربی و سپس حاشیه شمال شرقی شهر مشهد می‌باشد (شکل ۴). شهر مشهد، به عنوان یکی از کلان‌شهرهای ایران، با چالش‌های محیط زیستی متعددی روبرو است. از جمله این چالش‌ها می‌توان به پدیده‌های زمین‌لغزش و فرونشست اشاره کرد. گسترش شهر مشهد در سال‌های اخیر به طور عمده در سه جهت اصلی صورت گرفته است که هر یک چالش‌های ژئوتکنیکی خاص خود را به همراه داشته است. توسعه در جهت شمال، به ویژه در مجاورت رشته کوه‌های بینالود، با توجه به توپوگرافی منطقه و پتانسیل رخداد زمین‌لغزش، نیازمند مطالعات دقیق پایداری شیب و ارزیابی خطر می‌باشد. گسترش به سمت شرق، که عمدتاً شامل تغییر کاربری اراضی کشاورزی به مناطق مسکونی و تجاری است، می‌تواند منجر به استخراج بی رویه منابع آب‌های زیرزمینی، تخریب پوشش گیاهی و افزایش خطر فرونشست زمین گردد.



شکل ۳: متغیرهای موثر بر وقوع زمین لغزش؛ الف: فاصله از رودخانه؛ ب: فاصله از جاده؛ ج: نقشه همبارش؛ د: شاخص پوشش گیاهی NDVI؛ ه: شاخص انحنای پروفیل؛ و: شاخص انحنای پلان. سایر فاکتورها در شکل ۲ قابل مشاهده می‌باشند.

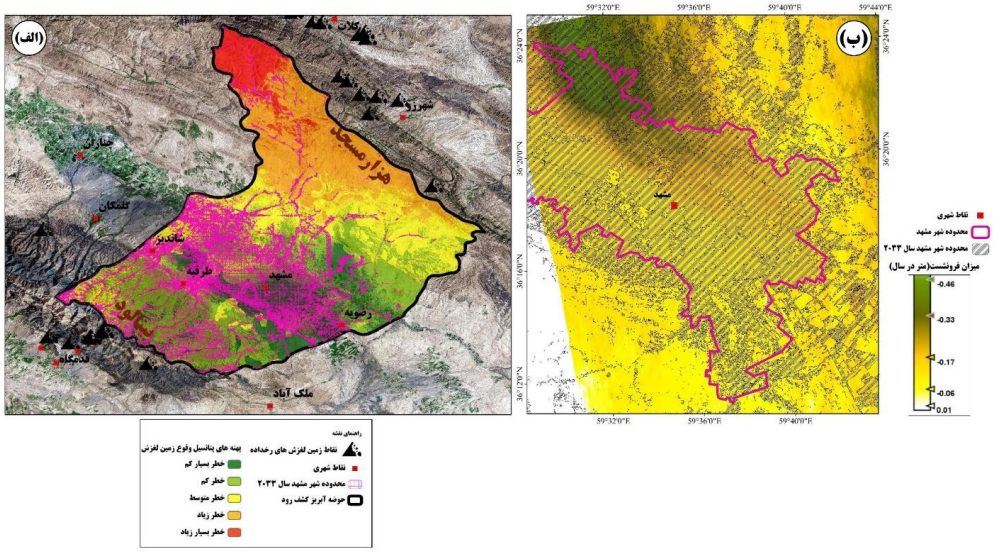
Fig. 3: Variables affecting landslide occurrence; a: Distance from river; b: Distance from road; c: precipition map; d: NDVI vegetation index; e: Profile curvature index; f: Plan curvature index. Other factors can be seen in Figure 2.



شکل ۴: الف: نقشه میزان فرونشست دشت مشهد؛ ب: نقشه حساسیت پذیری مناطق مستعد وقوع زمین لغزش.

Fig. 4: a: Subsidence map of the Mashhad plain; b: Susceptibility map of areas prone to landslide occurrence.

در نهایت، توسعه در جنوب شرق و شمال غرب مشهد نیز به دلیل نیاز به تأمین مسکن و زیرساخت‌های شهری صورت گرفته است، اما این مناطق ممکن است با پدیده فرونشست ناشی از برداشت بی‌رویه آب‌های زیرزمینی مواجه شوند. لذا، بررسی دقیق مخاطرات در هر یک از این مناطق و اتخاذ تدابیر پیشگیرانه مناسب، امری ضروری در راستای توسعه پایدار شهری مشهد محسوب می‌گردد. بر اساس آمار رخداد و پراکنش زمین‌لغزش، محدوده شهر مشهد، به‌ویژه حاشیه‌ها و مناطق کوهستانی اطراف آن، مستعد رخداد این پدیده بوده و در گذشته نیز مواردی از آن ثبت شده است. ارتفاعات هزار مسجد که در شمال شرق مشهد واقع شده است، زمین‌لغزش‌های ناشی از ناپایداری دامنه‌ها و وجود سنگ‌های فرسایش‌پذیر ثبت شده است. از این رو، توسعه فیزیکی شهر مشهد به سمت ارتفاعات، به‌ویژه در نواحی کوهستانی حاشیه‌ای مانند ارتفاعات بینالود در جنوب غربی و هزار مسجد در شمال شرق، تأثیر مستقیمی بر افزایش خطر وقوع زمین‌لغزش دارد (شکل ۵ الف). رشد سریع شهر مشهد و تقاضا برای سکونت در مناطق مرتفع باعث افزایش فشار بر ارتفاعات اطراف شده است. این روند در مناطقی مانند حاشیه‌های ارتفاعات بینالود به‌وضوح قابل مشاهده است. گسترش سکونتگاه‌های غیررسمی در شیب‌های تند و کوهپایه‌ها خطر زمین‌لغزش و تخریب ساختمان‌ها را افزایش می‌دهد. بخصوص گسترش در امتداد دره‌های بینالود و هزار مسجد که مناطق مستعد زمین لغزش هستند، میزان آسیب‌پذیری ناشی از پدیده زمین‌لغزش را افزایش می‌دهد. پدیده فرونشست زمین و توسعه فیزیکی شهر مشهد به دلیل برداشت بی‌رویه منابع آب زیرزمینی و افزایش فشار ناشی از گسترش شهر ارتباط تنگاتنگی دارند. این پدیده در سال‌های اخیر به یکی از چالش‌های مهم برای زیرساخت‌ها، سازه‌ها، و محیط زیست شهر مشهد تبدیل شده است. گسترش شهر به سمت جنوب شرقی و شمال غرب، منجر به افزایش آسیب‌پذیری دشت مشهد و پیرامون آن به لحاظ فرونشست شده است. بررسی جهات گسترش شهر مشهد به سمت شمال غربی در دهه‌های اخیر و برداشت بی‌رویه از منابع آب زیرزمینی و کاهش سطح آب‌های زیرزمینی ساختار زمین را تضعیف کرده و منجر به افزایش فرونشست در محدوده شمال غربی شده که تهدیدی جدی برای توسعه آتی شهر در این سمت از دشت محسوب می‌شود (شکل ۵ ب).



شکل ۵: همپوشانی محدوده گسترش شهر مشهد در سال ۲۰۳۳ با پهنه‌های زمین لغزش (الف) و فرونشست (ب).

Fig. 5: Overlay of the expansion area of Mashhad in 2033 with landslide (a) and subsidence (b) zones.

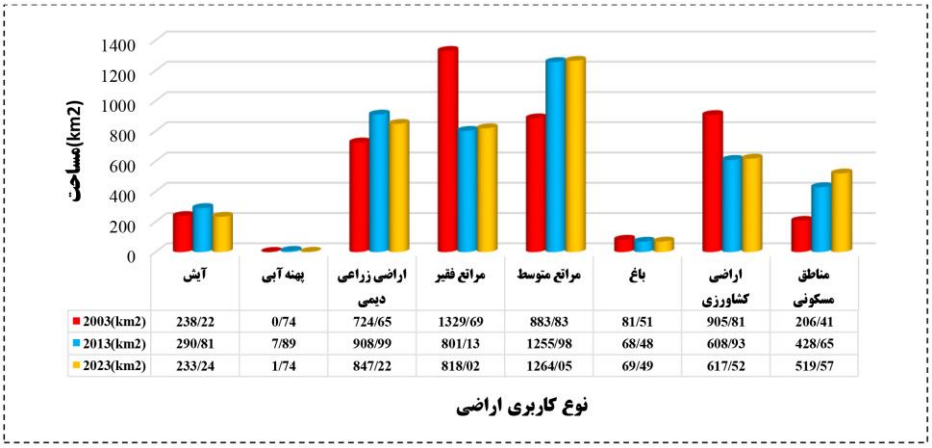
تحلیل توسعه فیزیکی شهر مشهد بر اساس مدل زنجیره مارکوف

در پژوهش حاضر با استفاده از تصاویر سه دوره زمانی (۲۰۲۳-۲۰۱۳-۲۰۰۳) کاربری اراضی طبقه‌بندی شد. سپس میزان تغییرات با استفاده از مدل‌ساز تغییر زمین (LCM) مشخص شد. در مرحله بعد بر اساس نقشه‌های طبقه‌بندی کاربری فوق، میزان تغییرات برای ده سال آینده (۲۰۳۳) پیش‌بینی گردید. بر اساس نتایج نقشه طبقه‌بندی

کاربری اراضی، طی بازه ۲۰ ساله، فضای کالبدی و فیزیکی شهری در منطقه موردمطالعه، گسترش زیادی داشته است که بوضوح در پیرامون شهر مشهد مشاهده می‌شود. کاربری اراضی کشاورزی به‌صورت آبی در پیرامون شهر مشهد، روند کاهشی نشان داده است. اراضی زراعی دیمی در بخش مرکزی و شرقی حوضه آبریز کشف رود، در سال ۲۰۱۳ روند افزایشی و مجدد در سال ۲۰۲۳، کاهش یافته است. کاربری مراتع کم تراکم واقع در بخش شمالی حوضه، در سال ۲۰۱۳ نسبت به ۲۰۰۳ کاهش چشمگیری داشته درحالی‌که در سال ۲۰۲۳، تغییرات چندانی را نشان نمی‌دهد. کاربری باغات که بیشتر در امتداد دره‌ها، بخصوص در بخش جنوب غربی و شمالی حوضه پراکنش دارند، طی سال‌های اخیر کاهش یافته‌اند. کاربری مراتع متوسط واقع در ارتفاعات جنوب غربی در سال ۲۰۱۳ نسبت به سال ۲۰۰۳ روند افزایشی چشمگیری داشته در حالی که نسبت به سال ۲۰۲۳، تغییرات چندانی را نشان نمی‌دهد. سایر کاربری‌ها ازجمله پهنه آبی و اراضی آیش (بایر) طی ۲۰ سال اخیر تغییرات زیادی نداشته، صرفاً کاربری آیش در سال ۲۰۱۳ تغییرات افزایشی به‌صورت ناچیز نشان داده است (شکل ۶).

تغییرات کاربری اراضی بر اساس مدل تغییرات زمین

تحلیل تغییرات کاربری اراضی در حوضه آبریز کشف رود میانی طی سال‌های ۲۰۰۳، ۲۰۱۳ و ۲۰۲۳ نشان‌دهنده پویایی قابل توجهی در این منطقه است (شکل ۶). کاربری آیش که در سال ۲۰۰۳ با ۲۳۸/۲۲ کیلومترمربع (۵ درصد) شروع شده بود، در سال ۲۰۱۳ به ۲۹۰/۸۱ کیلومترمربع (۶ درصد) افزایش یافت، اما در سال ۲۰۲۳ به ۲۳۳/۲۴ کیلومترمربع (۵ درصد) کاهش پیدا کرد. پهنه آبی با تغییرات اندک به ترتیب در سال‌های مذکور ۰/۰۲، ۰/۱۸ و ۰/۰۴ درصد از مساحت حوضه را پوشش داده است. اراضی زراعی دیم از ۷۲۴/۶۵ کیلومترمربع در سال ۲۰۰۳ به ۹۰۸/۹۹ کیلومترمربع در سال ۲۰۱۳ افزایش و سپس در سال ۲۰۲۳ به ۸۴۷/۲۲ کیلومترمربع کاهش یافت. مراتع کم تراکم از ۱۳۲۹/۶۹ کیلومترمربع (۳۰ درصد) در سال ۲۰۰۳ به ۸۰۱/۱۳ کیلومترمربع (۱۸ درصد) در سال ۲۰۱۳ کاهش و سپس در سال ۲۰۲۳ به ۸۱۸/۰۲ کیلومترمربع (۱۸درصد) افزایش یافت. مراتع با تراکم متوسط از ۸۸۳/۸۳ کیلومترمربع (۲۰ درصد) در سال ۲۰۰۳ به ۱۲۵۵/۹۸ کیلومترمربع (۲۸ درصد) در سال ۲۰۱۳ افزایش و در سال ۲۰۲۳ اندکی کاهش یافته و به ۱۲۶۴/۰۵ کیلومترمربع (۲۸/۹۲ درصد) رسید. مساحت باغات از ۸۱/۵۱ کیلومترمربع (۱/۸۶ درصد) در سال ۲۰۰۳ به ۶۸/۴۸ کیلومترمربع در سال ۲۰۱۳ کاهش و در سال ۲۰۲۳ تقریباً ثابت مانده و به ۶۹/۴۹ کیلومترمربع (۱۴ درصد) رسید. اراضی کشاورزی آبی از ۹۰۵/۸۱ کیلومترمربع (۲۰ درصد) در سال ۲۰۰۳ به ۶۰۸/۹۳ کیلومترمربع (۱۳ درصد) در سال ۲۰۱۳ کاهش و در سال ۲۰۲۳ به ۶۱۷/۵۲ کیلومترمربع (۱۴درصد) افزایش یافت. در نهایت، مناطق مسکونی بیشترین تغییرات افزایشی را داشتند، به طوری که از ۲۰۶/۴۱ کیلومترمربع (۴ درصد) در سال ۲۰۰۳ به ۴۲۸/۶۵ کیلومترمربع (۱۰درصد) در سال ۲۰۱۳ و سپس به ۵۱۹/۵۷ کیلومترمربع (۱۱درصد) در سال ۲۰۲۳ افزایش یافتند (شکل ۶).

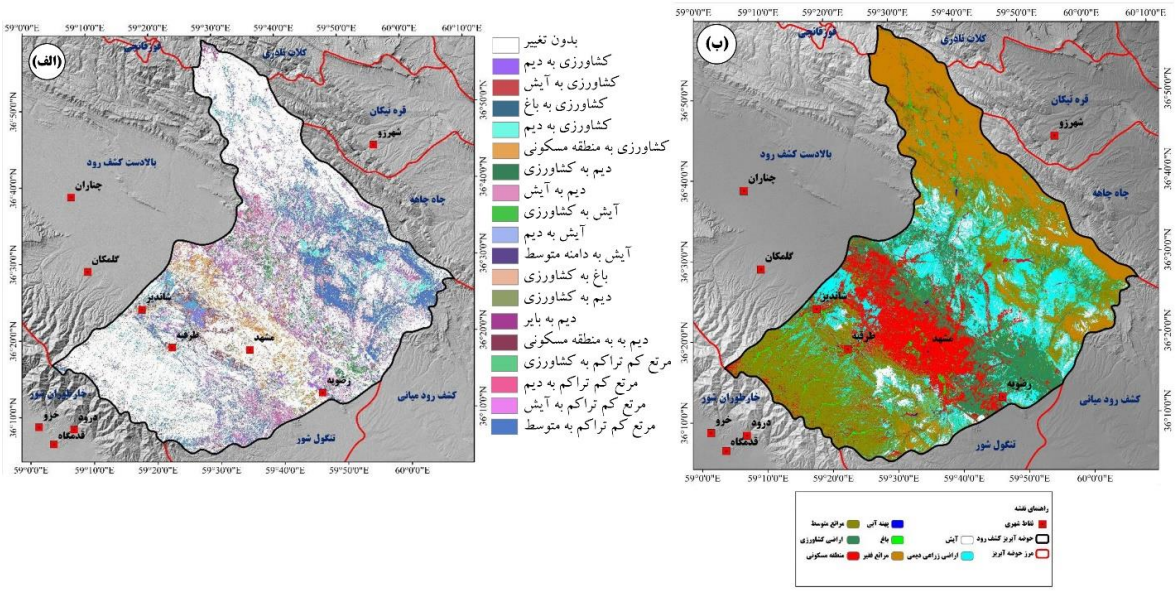


	آیش	پهنه آبی	اراضی زراعی دیمی	مراتع فقیر	مراتع متوسط	باغ	اراضی کشاورزی	مناطق مسکونی
2003(km2)	238/22	0/74	724/65	1329/69	883/83	81/51	905/81	206/41
2013(km2)	290/81	7/89	908/99	801/13	1255/98	68/48	608/93	428/65
2023(km2)	233/24	1/74	847/22	818/02	1264/05	69/49	617/52	519/57

شکل ۶: تغییرات کاربری اراضی حوضه کشف رود میانی طی بازه زمانی ۲۰ ساله (۲۰۰۳-۲۰۲۳).

Fig. 6: Land use changes of the middle Kashafroud during the 20-year period (2003-2023).

به‌منظور پیش‌بینی تغییرات کاربری اراضی حوضه آبریز کشف رود از مدل تغییرات زمین (LCM) استفاده شده است. بدین‌صورت که ابتدا نقشه کاربری اراضی سال ۲۰۰۳ و ۲۰۱۳، به‌عنوان ورودی مدل معرفی و میزان تغییرات هر کاربری به‌صورت روند افزایشی و کاهشی استخراج شده است. همان‌طور که نمودار تغییرات کاربری از سال ۲۰۰۳ تا ۲۰۱۳ نشان می‌دهد (شکل ۶)، کاربری مناطق مسکونی، مراتع متوسط، اراضی زراعی دیمی و زمین بایر و پهنه آبی روند افزایشی طی ده سال داشته است. کاربری‌های اراضی کشاورزی آبی، مراتع کم تراکم و باغ روند کاهشی را تجربه کرده‌اند. در مرحله بعد، با توجه به میزان پتانسیل انتقال کاربری، نقشه حاصل از مدل برای سال ۲۰۳۳، تهیه شد (شکل ۷ ب).



شکل ۷: الف: تغییرات کاربری اراضی از سال ۲۰۰۳ تا ۲۰۱۳؛ ب: پیش بینی کاربری اراضی تا سال ۲۰۳۳.

Fig. 7: a: Land use changes from 2003 to 2013; b: Land use prediction to 2033.

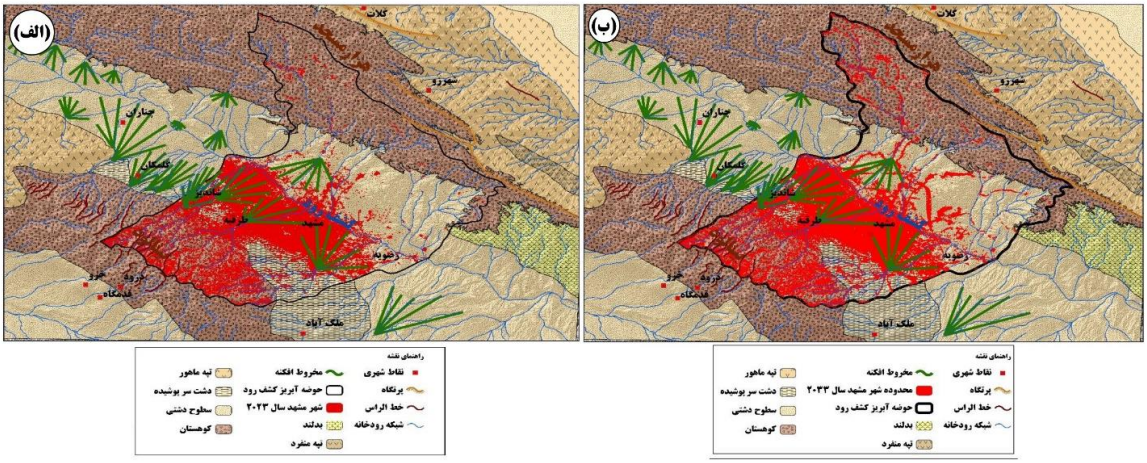
میزان شاخص Kno با ۹۷ درصد و شاخص Kstandard با ۹۶ درصد دقت، حاکی از اعتبار بالای نقشه شبیه‌سازی شده سال ۲۰۳۳ است. پنج متغیر مستقل دینامیک و استاتیک، شامل نقشه انتقال کاربری از سال ۲۰۱۳ به ۲۰۲۳، فاصله از جاده، فاصله از رودخانه، میزان شیب، ارتفاع به‌عنوان متغیرهای تأثیرگذار در عملکرد تغییرات کاربری، برای تهیه نقشه میزان پتانسیل انتقال کاربری استفاده شده است. شاخص ارزیابی صحت و دقت مدل برابر با ۷۳/۴۲ درصد، خطای آموزش ۰/۳۰ و خطای تست ۰/۳۰ برای روش شبکه عصبی پرسپترون محاسبه شده است. مقدار عددی شاخص صحت مدل نشان‌دهنده دقت و اعتبار در روند پیش‌بینی کاربری اراضی است. متغیر فاصله از رودخانه کمترین تأثیر و متغیر انتقال کاربری به کاربری دیگر، بیشترین تأثیر را بر تغییرات کاربری اراضی و مدل‌سازی پتانسیل انتقال داشته‌اند. متغیر فاصله از جاده در رده ۲ تأثیرگذاری، متغیر ارتفاع در رده ۳ و متغیر میزان شیب در رده ۴ تأثیرگذاری در پتانسیل انتقال کاربری اراضی نقش داشته است (جدول ۱). در مرحله نهایی، پس از بررسی میزان تغییرات کاربری و تعیین زیرمدل و متغیر مستقل و تهیه نقشه پتانسیل انتقال کاربری‌ها، اقدام به پیش‌بینی کاربری اراضی برای سال ۲۰۳۳ شده است. با توجه به نقشه پیش‌بینی، می‌توان بیان کرد که مناطق مسکونی و فضای کالبدی شهر، گسترش قابل ملاحظه‌ای را می‌تواند طی ۱۰ سال آینده تجربه خواهند کرد. بیشترین گسترش و توسعه شهری در پیرامون شهرهای مشهد، طرقبه و شاندیز مشهود است. این مناطق، به دلیل قرارگیری در اراضی هموار و با شیب مناسب و دسترسی به شبکه راه ارتباطی، پتانسیل تغییر کاربری به مناطق مسکونی را دارا هستند (شکل ۷).

جدول ۱: ارزیابی متغیرهای موثر بر تغییرات کاربری اراضی حوضه کشف رود میانی براساس نتایج مدل تغییرات زمین.

Table 1: Evaluation of variables affecting land use changes in the middle Kashafroud based on land change model.

Effective rate	Skill measure	Accuracy (%)	Variables
-	0.64	73.42	-
3	0.61	70.76	Elevation
5 (Effective min)	0.63	72.68	Distance from the river
2	0.52	64.34	Distance from the road
4	0.62	72.08	Slope
1(Effective Max)	0.32	49.56	Land use transition

با توجه به موقعیت مکانی شهر مشهد، از جمله ارتفاعات، دامنه‌ها، مخروط افکنه‌ها، مسیل‌ها، بستر رودخانه‌ها، توپوگرافی، شیب و جهات شیب، تأثیرات متفاوتی در شکل‌گیری و توسعه این کلان‌شهر داشته است. هر یک از این عناصر ژئومورفولوژیکی به‌صورت مستقیم و غیرمستقیم بر مکان‌یابی کاربری‌های شهری، توسعه شبکه‌های حمل و نقل، مدیریت سیلاب، ساخت و سازهای شهری و حتی بر پراکنش جمعیتی تأثیر گذاشته‌اند. ارتفاعات و دامنه‌های شهر مشهد به‌عنوان موانعی طبیعی برای گسترش فیزیکی شهر عمل کرده است. مخروط‌افکنه‌ها و بسترهای رودخانه‌ای، با توجه به قابلیت‌های تامین آب و خاک مناسب و مطلوب جهت گسترش کشاورزی و اراضی زراعی در نظر گرفته شده است. بازشناسی واحدهای شکل زمین در محدوده شهر مشهد و پیرامون آن به وضوح نشان می‌دهد که واحدهای دشتی بر واحدهای کوهستانی غلبه دارند. این وضعیت به وضوح نشان‌می‌دهد که وجود ارتفاعات در بخش‌های غرب و جنوب‌غربی شهر منجر به محدودیت‌های توسعه‌ای شده در حالی که بخش‌های جنوبی و شمال غربی، بر روی دشت‌های آبرفتی و مخروط‌افکنه‌ها توسعه یافته‌اند و همین امر موجب شده تا گرایش‌های توسعه‌ای به سمت شمال‌غربی هدایت شود (شکل ۷). با توجه به نقشه پیش‌بینی سال ۲۰۳۳، می‌توان بیان کرد که به دلیل نفوذپذیری مناسب خاک‌ها در محدوده مخروط‌افکنه‌های شهر مشهد و پیرامون آن، توسعه شهر مشهد به سمت شمال غرب و همچنین در امتداد دره‌های رشته کوه بینالود نیز توسعه پیدا خواهد نمود. می‌توان بیان کرد که غلبه واحدهای دشتی به واحدهای کوهستانی، از مهم‌ترین قابلیت‌های ژئومورفولوژیکی شهر مشهد برای توسعه‌های آتی این شهر به‌شمار می‌آید (شکل ۸). اما باید تأکید کرد که این امر نیازمند تحلیل‌های عمیق‌تر بر مبنای سایر شاخص‌های برنامه‌ریزی شهری می‌باشد.



شکل ۸: همپوشانی محدوده فعلی گسترش شهر مشهد (الف) و گسترش آینده در ۲۰۳۳ (ب) با عوارض ژئومورفولوژی

Fig. 8: Overlay of the current expansion of Mashhad (a) and the future expansion in 2033 (b) along with geomorphologic features.

نتیجه‌گیری

شهر مشهد به عنوان یکی از کلان‌شهرهای ایران، در سال‌های اخیر شاهد گسترش سریع و قابل توجهی بوده است. این گسترش به دلایل مختلفی از جمله افزایش جمعیت، مهاجرت، توسعه اقتصادی و فرهنگی، و نیاز به زیرساخت‌های جدید صورت گرفته است. با این حال، این گسترش با چالش‌ها و پیامدهای محیطی، اجتماعی و اقتصادی همراه بوده است. یکی از عوامل کلیدی در مدیریت این چالش‌ها، عدم توجه به ژئومورفولوژی و اصول آن در برنامه‌ریزی شهری است. شناخت صحیح از فرآیندهای ژئومورفولوژیک و اثرات آن‌ها بر محیط‌های شهری، می‌تواند به ارائه راهکارهای مؤثر بر برنامه‌ریزی و مدیریت پایدار شهری منجر شود. بررسی واحدهای سنگ‌شناسی نشان می‌دهد که سازندهای حساس به زمین‌لغزش مانند سازند مزدوران، چمن‌بید و تشکیلات قرمز بالایی، به‌ویژه در نواحی شمالی حوضه، پتانسیل بالایی برای وقوع زمین‌لغزش فراهم می‌آورند. بر اساس نتایج فرونشست بیشترین مقادیر فرونشست در مناطق شمال غربی و حاشیه شمال شرقی شهر مشهد به دلیل برداشت‌های بی رویه از آب زیرزمینی و وجود سازندهای حساس زمین‌شناسی رخ داده است. گسترش شهر مشهد ارتباط تنگاتنگی با لندفرم‌های ژئومورفولوژیک دارد. لندفرم‌ها و چشم اندازهای مرتبط به دلیل تأثیرات چندجانبه خود بر عوامل مختلفی مانند مکان‌یابی، الگوی رشد شهری، زیرساخت‌ها و مدیریت مخاطرات، یکی از ارکان اساسی برنامه‌ریزی شهری محسوب می‌شوند. مشهد، به‌عنوان یکی از کلان‌شهرهای ایران، تحت تأثیر مستقیم عناصر ژئومورفولوژیکی از جمله ارتفاعات، دامنه‌ها، مخروط‌افکنه‌ها، مسیل‌ها، بستر رودخانه‌ها، توپوگرافی و شیب زمین قرار دارد. ارتفاعات بینالود در جنوب و هزار مسجد در شمال شرق، به‌عنوان موانع طبیعی، گسترش فیزیکی شهر را محدود کرده‌اند. ساخت‌وساز در این دامنه‌ها با مشکلاتی نظیر زمین‌لغزش و فرسایش خاک مواجه است. در مقابل، سطوح دشتی با خاک‌های آبرفتی در بخش‌های جنوبی و شمال غربی، زمینه مساعدی برای توسعه شهری و کشاورزی و برداشت بی‌رویه آب‌های زیرزمینی و متعاقبا پدیده فرونشست فراهم آورده است. مناطق مخروط‌افکنه‌ای، به دلیل نفوذپذیری مناسب خاک، برای گسترش شهر به‌ویژه در شمال غرب و امتداد دره‌های بینالود مناسب ارزیابی شده‌اند. در محدوده شهر مشهد، گسترش و توسعه فیزیکی شهر، در امتداد دره‌ها، بخصوص ارتفاعات بینالود و هزارمسجد، خطر آسیب‌پذیری ناشی از مخاطره زمین لغزش را افزایش می‌دهد. ارتفاعات هزار مسجد، مناطق ناهموار و کوهستانی با شیب زیاد، و ازنظر واحد سنگ‌شناسی، سازندهای حساس به زمین‌لغزش را در برمی‌گیرد. از جمله سازند مزدوران، چمن بید و تشکیلات قرمز بالایی را می‌توان در این محدوده مشاهده کرد. هم‌چنین مناطق غربی که ارتفاعات بینالود را در برمی‌گیرد، به دلیل وجود واحدهای سنگی مقاوم ازجمله فیلیت مشهد، از پتانسیل متوسط لحاظ وقوع زمین‌لغزش برخوردار است. در پژوهش حاضر، تغییرات کاربری اراضی حوضه آبریز کشف‌رود میانی در بازه ۲۰ ساله (۲۰۰۳ تا ۲۰۲۳) و پیش‌بینی تغییرات تا سال ۲۰۳۳ انجام شد. مناطق مسکونی با روند افزایشی قابل‌توجه در ۲۰ سال گذشته، بیشترین تغییرات را به خود اختصاص داده‌اند. این افزایش به‌ویژه در پیرامون شهر مشهد و شهرهای طرقبه و شاندیز مشهود است. کاهش چشمگیر وسعت اراضی کشاورزی بیانگر تأثیر گسترش فضای کالبدی شهر بر کاهش زمین‌های زراعی است. مطالعات معتق و همکاران (Motagh et al, 2007) با استفاده از InSAR، نقشه‌برداری دقیق و GPS، بیشینه نرخ فرونشست در دشت مشهد را حدود ۲۵ سانتی‌متر در سال تخمین زده بودند، که این اختلاف فاحش با نرخ ۴۵ سانتی متری در پژوهش حاضر می‌تواند نشان‌دهنده تشدید پدیده فرونشست در سال‌های اخیر به دلیل عواملی همچون برداشت بی‌رویه از منابع آب زیرزمینی و ویژگی‌های ژئوتکنیکی خاص منطقه باشد. خرمی و همکاران (Khorrami et al, 2020) با استفاده از PSInSARو در نظر گرفتن برداشت آب زیرزمینی و خصوصیات ژئوتکنیکی، نشان دادند که بخش‌های وسیعی از شهر مشهد تحت تأثیر فرونشست شدید قرار داشته و این پدیده با افت سطح آب زیرزمینی و ویژگی‌های خاک منطقه ارتباط مستقیم دارد. یافته‌های تحلیل زمین لغزش با نتایج پژوهش‌های پیشین به‌ویژه مطالعه (Ghayoor Bolorfroshan et al, 2024) که به وقوع مکرر زمین‌لغزش در مشهد و ارائه داده‌های آماری از رخدادهای آن در دوره‌های بارش شدید پرداخته، همخوانی دارد. این مطالعه نشان داد حساسیت بالای دشت مشهد و حوضه آبریز آن به

دلیل شرایط توپوگرافی، بارش‌های سنگین، شرایط اشباع خاک و افزایش ناپایداری دامنه‌ها، و فعالیت‌های انسانی مانند ساخت‌وساز و جنگل‌زدایی در مناطق شیب‌دار، خطر وقوع زمین‌لغزش را افزایش می‌دهد. این رخداد بیشتر در دامنه‌های ارتفاعات بینالود و هزار مسجد، که دارای شیب‌های تند و ساختار زمین‌شناسی حساس هستند، اتفاق افتاده‌اند. توسعه‌ی فزاینده‌ی زیرساخت‌های شهری، احداث مجتمع‌های مسکونی، تفریحی و تجاری در مناطق دامنه‌ای، بدون در نظر گرفتن ملاحظات ژئوتکنیکی و زیست‌محیطی، به طور چشمگیری احتمال وقوع زمین‌لغزش‌های گسترده در آینده را افزایش می‌دهد. یافته‌های مطالعه آلکانترا-آیالا (Alcántara-Ayala, 2025) در تائید پژوهش حاضر نشان می‌دهد تغییر کاربری اراضی و بهره‌برداری بی‌رویه از منابع، به ویژه در مناطق پرشیب، ناپایداری دامنه‌ها را تشدید کرده و خطر زمین‌لغزش را افزایش می‌دهد. علاوه بر این، کاساگلی و توفانی (Casagli and Tofani, 2025) بر اهمیت ارزیابی جامع سایت قبل از توسعه‌ی شهری تأکید می‌کنند. عدم برنامه‌ریزی درست در زمینه برنامه‌ریزی شهری، دستکاری‌های انسانی و ناپایدار کردن شیب، تخریب پوشش گیاهی و ساختار زمین شناسی از جمله علل رخداد زمین لغزش در محدوده ارتفاعات منتهی به دشت مشهد می باشند. در مجموع، مطالعه دقیق ژئومورفولوژی شهر مشهد، نه تنها به درک بهتر از پویایی‌های طبیعی و اثرات آن‌ها بر توسعه شهری کمک می‌کند، بلکه می‌تواند به تدوین سیاست‌های کارآمد در زمینه مدیریت شهری و کاهش خطرات طبیعی منجر شود.

سپاسگزاری

مقاله مستخرج از طرح پژوهشی با کد ۶۲۹۴۵-۳ با حمایت مادی و معنوی دانشگاه فردوسی مشهد می‌باشد.

References

Afifi, M.E., 2023. Zoning of areas prone to urban development with emphasis on geomorphological limitations and hazards (Case study: Shiraz). Journal of Natural Environmental Hazards, v. 12(35), p. 1-20. (In Persian).

Ahmadi, M. and Veysi, A., 2021. Landslide risk assessment in relation to urban development of Paveh. Quantitative Geomorphological Research, v. 10(1), p. 172-191 (In Persian).

Ahmadpour, A., Ghaforpur Anbaran, P., & Babayyan, H. R., 2024. Landslide and Rockfall susceptibility zoning in the area of Kerend-e Gharb and Sarpol –e Zahab (the axis of Pataq pass) in Kermanshah province. Geographical Studies of Mountainous Regions, v. 5(2), p. 39-58. (In Persian).

Alcántara-Ayala, I., 2025. Landslides in a changing world. Landslides, p. 1-15.

Cascini, L.C.J.R.J.O., Bonnard, C., Corominas, J., Jibson, R. and Montero-Olarte, J., 2005. Landslide hazard and risk zoning for urban planning and development. In Landslide risk management, p. 209-246. CRC Press.

Chai, J. and Wu, H.Z., 2023. Prevention/mitigation of natural disasters in urban areas. Smart Construction and Sustainable Cities, v. 1(1), p. 4.

Casagli, N. and Tofani, V., 2025. Landslide science for sustainable development. Landslides, p. 1-3.

Cigna, F. and Tapete, D., 2022. Urban growth and land subsidence: Multi-decadal investigation using human settlement data and satellite InSAR in Morelia, Mexico. Science of the total Environment, v. 811, p. 152211.

Dang, V.K., Doubre, C., Weber, C., Gourmelen, N. and Masson, F., 2014. Recent land subsidence caused by the rapid urban development in the Hanoi region (Vietnam) using ALOS InSAR data. Natural Hazards and Earth System Sciences, v. 14(3), p. 657-674.

De Luca, C., Bonano, M., Casu, F., Fusco, A., Lanari, R., Manunta, M. et al, 2016. Automatic and systematic Sentinel-1 SBAS-DInSAR processing chain for deformation time-series generation. Procedia Computer Science, v. 100, p. 1176-1180.

Dehghani, M., Zoej, M.J.V., Hooper, A., Hanssen, R.F., Entezam, I. and Saatchi, S., 2013. Hybrid conventional and persistent scatterer SAR interferometry for land subsidence monitoring in the Tehran Basin, Iran. ISPRS journal of photogrammetry and remote sensing, v. 79, p. 157-170.

Di Napoli, M., Miele, P., Guerriero, L., Annibali Corona, M., Calcaterra, D., Ramondini, M. et al, 2023. Multitemporal relative landslide exposure and risk analysis for the sustainable development of rapidly growing cities. Landslides, v. 20(9), p. 1781-1795.

Gierlinger, S., Haidvogl, G., Gingrich, S. and Krausmann, F., 2013. Feeding and cleaning the city: the role of the urban waterscape in provision and disposal in Vienna during the industrial transformation. Water History, v. 5, p. 219-239.

Ghayoor Bolorfroshan, M., Hosseinzadeh, S.R., Lashkaripour, G.R., Minaei, M. and Morabbi Heravi, H., 2024. Assessment of Landslide Risk

with a Geomorphological Approach in the Kalpush Catchment. Quantitative Geomorphological Research, v. 13(3) (In Persian).

Gourmelen, N., Amelung, F., Casu, F., Manzo, M. and Lanari, R., 2007. Mining-related ground deformation in Crescent Valley, Nevada: Implications for sparse GPS networks. Geophysical Research Letters, v. 34(9).

Gupta, K., Satyam, N. and Gupta, V., 2023. Probabilistic physical modelling and prediction of regional seismic landslide hazard in Uttarakhand state (India). Landslides, v. 20(5), p. 901-912.

Holzer, T.L. and Galloway, D.L., 2005. Impacts of land subsidence caused by withdrawal of underground fluids in the United States.

Hosseinzadeh, S.R. and Jahadi Toroghi, M., 1386. The effects of Mashhad city expansion on the natural drainage pattern and intensification of urban floods, Geographical Research Quarterly, v. 39(9), p. 145-159 (In Persian).

Khorrami, M., Abrishami, S., Maghsoudi, Y., Alizadeh, B. and Perissin, D., 2020. Extreme subsidence in a populated city (Mashhad) detected by PSInSAR considering groundwater withdrawal and geotechnical properties. Scientific Reports, v. 10(1), p. 11357.

Li, H. and Samsudin, N.A., 2024. A systematic review of landslide research in urban planning worldwide. Natural Hazards, p. 1-21.

Motagh, M., Djamour, Y., Walter, T.R., Wetzel, H.U., Zschau, J. and Arabi, S., 2007. Land subsidence in Mashhad Valley, northeast Iran: results from InSAR, levelling and GPS. Geophysical Journal International, v. 168(2), p. 518-526.

Martín-Díaz, J., Nofre, J., Oliva, M. and Palma, P., 2011. Geomorphological risks, suburbanisation and neoliberalisation of the urban space in post-war Sarajevo. Area, v. 47, p. 371-378.

Mohammadyary, F., pourkhabbaz, H., aghdar, H. and Tavakoly, M., 2018. Empirical modeling potential transfer of land cover change pa city with neural network algorithms. jgs, v. 18(50), p. 219-234 (In Persian).

Parvin, M., 2019. Evaluation of the interaction between geomorphologic and urban development conditions (Case study: Kermanshah city). Quantitative Geomorphological Research, v. 7(3), p. 231-244 (In Persian).

Pica, A., Lämmle, L., Burnelli, M., Del Monte, M., Donadio, C., Faccini, F. et al, 2024. Urban geomorphology methods and applications as a guideline for understanding the city environment. Land, v. 13(7), p. 907.

Rojas, O., Mardones, M., Rojas, C., Martínez, C. and Flores, L., 2017. Urban growth and flood disasters in the coastal river basin of south-central Chile (1943–2011). Sustainability, v. 9(2), p. 195.

Sassa, K., Wang, G., Fukuoka, H., Wang, F., Ochiai, T., Sugiyama, M. and Sekiguchi, T., 2004. Landslide risk evaluation and hazard zoning for rapid and long-travel landslides in urban development areas. Landslides,
v. 1, p. 221-235.

Sharifi, H., Ramezanipour, M. and Ebrahimi, L., 2024. Investigating the Development of Urban Space in the face of Environmental Hazards (Case Study of Noor County). jgs, v. 24(75), p. 354-377 (In Persian).

Sidle, R.C., Gallina, J. and Gomi, T., 2017. The continuum of chronic to episodic natural hazards: Implications and strategies for community and landscape planning. Landscape and Urban Planning, v. 167, p. 189-197.

United Nations, 2025. Department of Economic and Social Affairs. Around 2.5 billion more people will be living in cities by 2050, projects new UN report. Retrieved March 2, 2025, from https://www.un.org/en/desa/around - 25-billion-more-people-will-be-living-cities-2050-projects-new-un-report

Williams, D.B., 2015. Too high and too steep: Reshaping Seattle’s topography. University of Washington Press.

Zhou, Y., & Liu, M., 2012. Risk assessment of major hazards and its application in urban planning: A case study. Risk Analysis: An International Journal, v. 32(3), p. 566-577.

Zúñiga, E., Magaña, V. and Piña, V., 2020. Effect of urban development in risk of floods in Veracruz, Mexico. Geosciences, v. 10(10), 402 p.