



Assessment of Urban Flood Risk Mitigation (UFRM) Ecosystem Service with A Short-Term Approach (2 Years), Case Study: Tabriz Metropolitan

Mahdi Herischian¹, Hassan Mahmoudzadeh^{2*}

¹ Ph.D. Student in Geography and Urban Planning, Department of Urban and Regional Planning, Faculty of Planning and Environmental Sciences, University of Tabriz, Tabriz, Iran

^{2*} Professor in Geography and Urban Planning, Department of Urban and Regional Planning, Faculty of Planning and Environmental Sciences, University of Tabriz, Tabriz, Iran

ARTICLE INFO

Article History

Received: 22 June 2025

Revised: 16 September 2025

Accepted: 18 September 2025

Available Online: 20 September 2025

Keywords:

Urban flood risk

Ecosystem Service

Flood mitigation

Blue and Green Infrastructure

InVEST Software

Metropolis of Tabriz

ABSTRACT

Urban flooding can lead to inundation and destruction of urban infrastructure, severe human and financial losses, and widespread socio-economic damages. Blue and green infrastructure plays a critical role in mitigating urban flood risk. Therefore, the objective of this study was to evaluate the ecosystem service of urban flood risk mitigation in the Tabriz metropolis under a 2-year return period. In this research, Landsat satellite imagery, land use/land cover data, meteorological data, a biophysical table, GIS techniques, and the InVEST software were employed to assess the ecosystem service of urban flood risk reduction in Tabriz. The results showed that in 1984, under a 2-year return period and a 15-minute rainfall event, the volume of retained and infiltrated water and the economic benefit of the urban flood risk mitigation ecosystem service were 4.28 million m³ and US\$10.87 million, respectively; for a 30-minute rainfall event, 3.17 million m³ and US\$8.04 million; and for a 45-minute rainfall event, 2.58 million m³ and US\$ 6.56 million. In 2002, the corresponding values were 4.37 million m³ and US\$ 2.01 million for 15 minutes, 3.21 million m³ and US\$14.71 million for 30 minutes, and 2.60 million m³ and US\$11.94 million for 45 minutes. In 2022, the retained water volumes and economic benefits were 4.65 million m³ and US\$33.25 million for 15 minutes, 6.15 million m³ and US\$43.96 million for 30 minutes, and 5.20 million m³ and US\$37.14 million for 45 minutes. The findings indicated that, due to the negligible extent of green infrastructure in the Tabriz metropolis, these land uses have played only a limited role in reducing urban flood risk. In the runoff retention and infiltration potential of Tabriz, land use/land cover exerted a greater influence than soil hydrologic groups. Overall, the results demonstrated that the ecosystem service of urban flood risk mitigation in Tabriz has been relatively significant.

* Corresponding author: Hassan Mahmoudzadeh

E-mail address: mahmoudzadeh@tabrizu.ac.ir

How to cite this article: Herischian, M., & Mahmoudzadeh, M. (2025). Assessment of Urban Flood Risk Mitigation (UFRM) Ecosystem Service with A Short-Term Approach (2 Years), Case Study: Tabriz Metropolitan. *Journal of Geography and Environmental Hazards*, 14(4), 153-180. <https://doi.org/10.22067/GEOEH.2025.94245.1589>



©2025 The author(s). This is an open access article distributed under Creative Commons Attribution 4.0 International License (CC BY 4.0)

EXTENDED ABSTRACT

Introduction

With global climate change and rapid urbanization, urban flooding has become increasingly frequent and severe, causing significant damage worldwide (Tellman et al., 2021). Flood-related disasters are among the most common and destructive natural hazards, leading to a growing proportion of populations at risk of flooding (Rentschler et al., 2023; Tellman et al., 2021). In densely populated urban areas, floods result in substantial human and economic losses, including infrastructure damage, reduced agricultural productivity, disrupted communication systems, and risks to human health and safety (Alderman et al., 2012; Peng & Zhang, 2022; Pham et al., 2021). Mitigating urban flooding is a critical component of urban planning and disaster risk reduction strategies. Traditional mitigation measures, often referred to as gray infrastructure, include urban drainage systems and flood pumping stations, which have been widely implemented to manage runoff and reduce flood-related impacts (Prudencio & Null, 2018; Qi et al., 2021; Zischg et al., 2017). However, these measures often require substantial financial investment and have limited effectiveness (Sohn et al., 2019). In contrast, green infrastructure solutions—such as green roofs, rain gardens, permeable pavements, urban green spaces, and urban forests—play a vital role in regulating stormwater runoff through ecosystem services (Ahiablame & Shakya, 2016; Qin et al., 2013).

These measures are environmentally sustainable, require minimal energy input, and are often cost-effective. In the metropolitan area of Tabriz, located in the Urmia Lake Basin, the city's topographic position on a plain and the presence of two major rivers, the Ajichay and Quri, have historically contributed to devastating floods. Rapid urban expansion, particularly following the Islamic Revolution, coupled with widespread migration and unplanned development, has exacerbated flood risks in Tabriz (Yazdani et al., 2018). Therefore, this study aims to evaluate the ecosystem services provided by green infrastructure in mitigating urban flood risk in the Tabriz metropolitan area.

Material and Methods

This study employs a descriptive-analytical methodology with a developmental-applicative focus. Data were collected from library resources, documentary records, electronic sources, surveys, and field observations. The research utilizes the urban flood risk mitigation model from the InVEST 3.12.0 software package. This model assesses urban flood risk mitigation based on inputs including a vector map of the study area (watershed), rainfall data (in millimeters), a land use/land cover map, a soil hydrological group raster map, a biophysical table, a vector map of built infrastructure, and a table estimating damages from urban flooding. The model generates the following outputs:

1. Runoff volume, presented as raster data.
2. Runoff absorption and retention (in millimeters), expressed as a percentage of rainfall in a raster file.
3. Runoff retention volume (in m³), depicted in a raster file.
4. Flood risk, summarized in a descriptive table and represented through vector and raster data, enabling identification of spatial variations within defined local boundaries.
5. Monetary assessment of flood-related damages.
6. Monetary valuation of the ecosystem service of urban flood risk mitigation, calculated using the avoided damage cost method and presented in a descriptive table.

Results and Discussion

Across the three study periods (1984, 2002, and 2022), the soil in most of the ten districts of the Tabriz metropolitan area, except for parts of Districts 4, 6, and 7 and minor portions of other districts, was predominantly loam and clay. These soil types exhibit moderate to high runoff potential, meaning that a significant portion of rainfall runoff flows over the surface rather than infiltrating the soil. Consequently, most districts in Tabriz are at elevated risk of urban flooding due to their high runoff potential.

The continuous urbanization, significant land-use changes, and increased construction and urban density in Tabriz over recent decades have resulted in a substantial increase in impervious surfaces. These surfaces, particularly those associated with high-density residential areas, have consistently contributed to the highest runoff volumes across all three periods. Green infrastructure, including green spaces, agricultural lands, and pastures, has played a more significant role in mitigating urban flood risk than water infrastructure in all three periods, with the exception of one instance (a 15-minute rainfall event in 2002).

An examination of the land use/land cover (LULC) in Tabriz city indicates that impervious surfaces increased continuously from 1984 to 2002, whereas a slight decrease was observed in 2022. Specifically, residential land use increased by approximately 16.54% from 1984 to 2002, followed by a decrease of about 0.50% from 2002 to 2022. This expansion of impervious surfaces has reduced the capacity of most districts in the Tabriz metropolitan area to absorb and retain runoff, thereby increasing the risk of urban flooding. Continued growth of impervious areas in the future could further exacerbate flooding, potentially inundating urban infrastructure, increasing economic losses, and threatening the stability of the city.

The findings reveal that in 1984, for a 2-year return period rainfall event, the volume of water absorbed and retained, along with the associated ecosystem service benefits for mitigating urban flood risk, were as follows: for a 15-minute rainfall, 4.28 million m³ valued at US\$10.87 million; for a 30-minute rainfall, 3.17 million m³ valued at US\$8.04 million; and for a 45-minute rainfall, 2.58 million m³ valued at US\$6.56 million. In 2002, the corresponding values were: for a 15-minute rainfall, 4.37 million m³ valued at US\$2.01 million; for a 30-minute rainfall, 3.21 million m³ valued at US\$14.71 million; and for a 45-minute rainfall, 2.60 million m³ valued at US\$11.94 million. In 2022, the values were: for a 15-minute rainfall, 4.65 million m³ valued at US\$33.25 million; for a 30-minute rainfall, 6.15 million m³ valued at US\$43.96 million; and for a 45-minute rainfall, 5.20 million m³ valued at US\$37.14 million.

Conclusion

The results showed that in the metropolitan of Tabriz, due to the insignificance of green infrastructure, these land uses have not played a significant role in reducing urban flood risk. In the potential for absorption and retention of runoff, land use/land cover has played a more significant role compared to the hydrological soil group. Furthermore, the results suggest that ecosystem services have played a relatively significant role in mitigating urban flood risk in Tabriz.



DOI: 10.22067/GEOEH.2025.94245.1589

مقاله پژوهشی

ارزیابی خدمت اکوسیستمی کاهش خطر سیلاب شهری (UFRM) با رویکرد دوره کوتاه مدت (۲ ساله)، مطالعه موردی: کلان شهر تبریز

مهدی هریسچیان^۱، حسن محمودزاده^{۲*}

^۱ دانشجوی دکتری جغرافیا و برنامه ریزی شهری، گروه برنامه ریزی شهری و منطقه ای، دانشکده برنامه ریزی و علوم

محیطی، دانشگاه تبریز، تبریز، ایران

^۲ استاد جغرافیا و برنامه ریزی شهری، گروه برنامه ریزی شهری و منطقه ای، دانشکده برنامه ریزی و علوم محیطی، دانشگاه

تبریز، تبریز، ایران

اطلاعات مقاله	چکیده
تاریخچه مقاله: تاریخ دریافت: ۱۴۰۴/۰۴/۰۱ تاریخ بازنگری: ۱۴۰۴/۰۶/۲۵ تاریخ پذیرش: ۱۴۰۴/۰۶/۲۷ کلمات کلیدی: ریسک سیلاب شهری خدمت اکوسیستمی کاهش ریسک سیلاب زیرساخت های آبی و سبز نرم افزار InVEST کلان شهر تبریز	وقوع سیلاب شهری می تواند باعث به زیر آب رفتن و از بین رفتن زیرساخت های شهری، تلفات جانی و مالی شدید و خسارات گسترده اقتصادی و اجتماعی ناشی از آن شود. در این بین زیرساخت های آبی و سبز شهری نقش مؤثری در کاهش ریسک سیلاب شهری ایفاء می کنند. از این رو هدف این پژوهش ارزیابی نقش خدمت اکوسیستمی کاهش ریسک سیلاب شهری کلان شهر تبریز با دوره بازگشت ۲ ساله می باشد. در این پژوهش با استفاده از داده های تصاویر ماهواره ای لندست، کاربری اراضی / پوشش اراضی، هواشناسی، جدول بیوفیزیکی، GIS و نرم افزار InVEST به ارزیابی خدمت اکوسیستمی کاهش ریسک سیلاب شهری تبریز پرداخته شده است. یافته ها نشان داد که در سال ۱۳۶۳ با دوره بازگشت ۲ ساله و در طی بارندگی ۱۵ دقیقه ای، حجم آب جذب و نگهداشته شده و میزان منفعت خدمت اکوسیستمی کاهش ریسک سیلاب شهری به ترتیب ۴/۲۸ میلیون متر مکعب، ۱۰/۸۷ میلیون دلار، با بارندگی ۳۰ دقیقه ای ۳/۱۷ میلیون متر مکعب و ۸/۰۴ میلیون دلار و با بارندگی ۴۵ دقیقه ای ۲/۵۸ میلیون متر مکعب و ۶/۵۶ میلیون دلار، در سال ۱۳۸۱ با بارندگی ۱۵ دقیقه ای ۴/۳۷ میلیون متر مکعب و ۲/۰۱ میلیون دلار، با بارندگی ۳۰ دقیقه ای ۳/۲۱ میلیون متر مکعب ۱۴/۷۱ میلیون دلار و با بارندگی ۴۵ دقیقه ای ۲/۶۰ میلیون متر مکعب و ۱۱/۹۴ میلیون دلار و در سال ۱۴۰۱ با بارندگی ۱۵ دقیقه ای ۴/۶۵ میلیون متر مکعب و ۳۳/۲۵ میلیون دلار، با بارندگی ۳۰ دقیقه ای ۶/۱۵ میلیون متر مکعب و ۴۳/۹۶ میلیون دلار و با بارندگی ۴۵ دقیقه ای، ۵/۲۰ میلیون متر مکعب و ۳۷/۱۴ میلیون دلار برای تبریز بوده است. نتایج نشان داد که در کلان شهر تبریز به دلیل ناچیز بودن زیرساخت های سبز، این کاربری ها نقش چندانی در کاهش ریسک سیلاب شهری نداشته اند. در پتانسیل جذب و نگهداشت رواناب تبریز، کاربری اراضی / پوشش اراضی در مقایسه با گروه هیدرولوژیکی خاک نقش بیشتری را داشته است. همچنین نتایج نشان داد که نقش خدمت اکوسیستمی کاهش ریسک سیلاب شهری تبریز نسبتاً چشمگیر بوده است.

مقدمه

با تغییرات اقلیمی جهانی و شهرنشینی سریع، سیلاب شهری به طور مداوم افزایش پیدا کرده و باعث بروز آسیب‌های شدید در سرتاسر جهان شده است (Tellman et al., 2021). بلایای مرتبط با سیل به یکی از شایع‌ترین و مخرب‌ترین مخاطرات در سرتاسر جهان تبدیل شده که در نتیجه آن نسبت جمعیت در معرض خطر سیل به طور مداوم افزایش پیدا می‌کند (Rentschler et al., 2023; Tellman et al., 2021). در مناطق شهری پرجمعیت و متراکم، سیل منجر به خسارات انسانی و اقتصادی عمده‌ای مانند آسیب به زیرساخت‌ها، کاهش بازده محصولات کشاورزی، وقفه‌های ارتباطی (Pham et al., 2021)، و ریسک‌های انسانی (Alderman, Turner & Tong, 2012) می‌شود (Peng & Zhang, 2022). چنانچه طی ماه‌های مارس تا آوریل ۲۰۲۴، چندین ایالت روسیه دچار سیل شدید شدند که در نتیجه آن بیش از ۱۰۰،۰۰۰ نفر آواره و نزدیک به ۱۸۰۰۰ واحد مسکونی دچار آب گرفتگی شد. در ماه مه سال ۲۰۲۳، منطقه شمال مرکزی ایتالیا به دلیل بارندگی‌های شدید متوالی، سیل شدیدی را تجربه کرد که منجر به کشته شدن ۱۵ نفر، آب گرفتگی بیش از ۴۰ شهر و خسارات اقتصادی مستقیمی شد که تخمین زده می‌شود میزان این خسارت‌ها در حد میلیاردها یورو باشد. چین بیشترین میزان آسیب‌ها را در بین کشورهای جهان از نظر بلایای طبیعی به ویژه سیل به خود اختصاص داده است (UN Office for Disaster Risk Reduction, 2020). از ۲۹ ژوئیه تا ۲ آگوست ۲۰۲۳، پکن تحت تأثیر بارش رگباری شدید قرار گرفت که نزدیک به ۱/۲۹ میلیون نفر را تحت تأثیر مستقیم قرار داد و ۵۹۰۰۰ منزل مسکونی نیز دچار فروریختگی شد. طبق آمار، از سال ۲۰۱۲ تا ۲۰۲۲، به طور متوسط ۷۴،۹۶۸،۴۰۰ نفر در چین سالانه تحت تأثیر سیل قرار می‌گیرند که خسارت مستقیم اقتصادی آن به طور متوسط ۲۲۵،۳۵۵ میلیون یوان در سال است. این امر بیانگر آن است که سیل شهری موجب بروز خسارات و تلفات اقتصادی زیادی می‌شود که در نتیجه آن توسعه پایدار انسانی، اقتصادی و اجتماعی مورد تهدید جدی قرار می‌گیرد (Rözer et al., 2022; Rufat & Botzen, 2022). با این وجود، به دلیل افزایش فراوانی رخدادهای شدید اقلیمی و سیستم‌های زهکشی نسبتاً قدیمی در مقایسه با توسعه سریع شهری، سیلاب شهری به طور مکرر رخ می‌دهد که به طور مستقیم بر حمل و نقل روزانه مردم تأثیر گذاشته و زندگی و سلامتی آنها را به خطر می‌اندازد (Ekmekcioğlu, Koc & Özger, 2021).

اقدامات مرتبط با کاهش سیلاب شهری جزء مهم‌ترین استراتژی‌های تصمیم‌گیری جهت پیشگیری و کاهش سیلاب شهری است. این اقدامات را می‌توان به دو نوع طبقه‌بندی کرد: اقدامات خاکستری و اقدامات سبز (Qi et al., 2021). اقدامات سنتی کاهشی شامل اقدامات خاکستری، از قبیل سیستم شبکه زهکشی شهری و ایستگاه پمپاژ سیل، به طور گسترده‌ای در مناطق شهری برای جابه‌جایی سریع رواناب رگباری و کاهش بلایای ناشی از سیل مورد استفاده قرار گرفته است (Prudencio & Null, 2018; Zischg et al., 2017) که در نتیجه آن مدیران شهری اغلب بر اقدامات کاهشی خاکستری مانند بهبود سیستم زهکشی شهری جهت کاهش وقوع و پیامدهای ناشی از سیلاب شهری تکیه می‌کنند. با این حال، اثربخشی این اقدامات چندان مطلوب نیست و به سرمایه‌گذاری‌های اقتصادی گسترده‌ای نیاز دارد (Sohn, Kim, Li & Brown, 2019). از این رو، استراتژی‌های مدیریتی پایدار رواناب رگباری مبتنی بر طبیعت، مانند رویکردهای بهینه مدیریت در ایالات متحده، سیستم‌های زهکشی پایدار شهری در بریتانیا، و شهر اسفنجی در چین، در سال‌های اخیر رواج زیادی پیدا کرده است (Ma et al., 2019; Kuller, Farrelly, Deletic & Bach, 2018; Fletcher et al., 2015). این رویکردهای سازگار با محیط زیست، استفاده از منابع آب را بهبود بخشیده و باعث افزایش رضایت ساکنان از محیط زندگی‌شان می‌شود. اقدامات کاهشی سبز، مانند بام‌های سبز، باغ‌های بارانی، و روسازی‌های نفوذپذیر، فضاهای سبز شهری، جنگل‌های شهری و در کل زیرساخت‌های سبز شهری نقش مهمی در تنظیم رواناب رگباری از طریق خدمات زیست محیطی ایفا می‌کنند (Ahiablame & Shakya, 2016; Qin, Li & Fu, 2013). اقدامات کاهشی سبز از طریق طراحی اکولوژیکی منظر و فناوری مهندسی برای مقابله با مسائل مختلف آب شهری، مانند مدیریت ریسک سیل، به اجرا گذاشته می‌شود (Liang, You & Lee, 2019; Zeng, Guo & Dong, 2019; Kuller et al., 2018; Pyke et al., 2011). این نوع از اقدامات دارای

اهمیت بسیاری هستند، زیرا به حداقل انرژی ورودی نیاز دارند و اغلب از لحاظ زیست محیطی مقرون به صرفه هستند. با این حال، محققان دریافته‌اند که اتکاء صرف به اقدامات کاهشی سبز با وجود این که مزایای زیست محیطی آن قابل توجه است به دلیل این که ظرفیت آنها در کاهش حجم سیل با افزایش مدت زمان بارندگی و دوره بازگشت کاهش می‌یابد، ممکن است همیشه بهترین راه حل نباشد (Hou et al., 2020). این مورد ناشی از ظرفیت محدود ذخیره سازی آنها است که می‌تواند قبل از شروع اوج بارندگی اشباع شود (Sohn et al., 2019; Ahiablame & Shakya, 2016).

قرار گرفتن کلان‌شهر تبریز در حوضه آبریز دریاچه ارومیه، موقعیت دشتی آن و عبور دو رودخانه اصلی آجی چای و قوری چای از بافت شهر باعث شده که در طول تاریخ بارها سیلاب‌های ویرانگر در آن رخ داده و ویرانی‌های زیادی بر جای بگذارد. علاوه بر دو رود اصلی که طول شهر را طی می‌کنند، مسیل‌های فراوانی نیز در عرض شهر وجود دارد که از ارتفاعات شمالی و جنوبی شهر شروع و در بافت میانی به دو رود اصلی شهر می‌پیوندند. توسعه روزافزون شهر به خصوص پس از انقلاب اسلامی که با مهاجرت‌های گسترده و توسعه کالبدی یک باره شهر همراه بود، موجب شده شهر تبریز روی یک پهنه وسیع سیلابی گسترده شود. از طرفی اکثر این توسعه‌ها یا کاملاً بی‌برنامه و بی‌ضابطه مانند بافت اسکان غیر رسمی رخ داده است، یا غیر کارشناسی مانند توسعه محور شرقی شهر بوده است که در هر دو صورت عدم رعایت حریم مسیل‌ها و رودخانه‌های فصلی و دائمی منجر به بروز بحران‌های شدید و بروز سیلاب‌های متعدد برای شهر تبریز شده که این بحران‌ها هر ساله خسارات شدیدی را به همراه داشته است (Yazdani, Ghasemi & Saleki Maleki, 2018). در پژوهشی که محمودزاده و همکاران (MahmoodZadeh, Emami Kia & Rasooli, 2015) در مورد ریز پهنه‌بندی خطر سیل در محدوده شهر تبریز انجام داده‌اند بیان کرده‌اند که طبق نقشه، ارزیابی خسارات، بیشترین خسارات مربوط به مناطقی است که از بافت فرسوده، مصالح غیر استاندارد و نامقاوم برخوردارند. این مناطق اگر چه از تراکم مسکونی کمی برخوردارند و رشد عمودی چندانی ندارند؛ اما تراکم جمعیت در آنها بیشتر از مناطق نوساز شهر است. با توجه به ضرورت‌های ذکر شده در بالا و تأثیری که خدمات اکوسیستمی در کاهش خطر سیلاب شهری دارد، هدف این پژوهش ارزیابی نقش خدمت اکوسیستمی کاهش ریسک سیلاب شهری کلان‌شهر تبریز است.

در زمینه خدمت اکوسیستمی کاهش ریسک سیلاب شهری در عرصه‌های داخلی و خارجی پژوهش‌های متعددی انجام شده که در ادامه به تعدادی از آنها اشاره می‌شود. در عرصه داخلی فتوحی و کیانی (Fotouhi & Kiani, 2015) در طی پژوهشی ریز پهنه‌بندی ریسک سیلاب شهری شهر نهاوند را با استفاده از مدل AHP و GIS انجام داده و به این نتیجه رسیدند که از وسعت ۸۶۱ هکتاری شهر نهاوند ۴۰/۲ درصد از محدوده دارای وضعیت با ریسک کم تا بسیار کم، ۳۱/۵ درصد دارای وضعیت با ریسک متوسط و ۲۸/۱ درصد از محدوده مورد مطالعه نیز در شرایط با ریسک بالا تا بسیار بالا قرار دارد. احمدی و همکاران (Ahmadi, Bazrafshan, Salajeghe, Holisaz & Azare, 2021) ریسک و آسیب‌پذیری سیلاب شهری بندرعباس را با استفاده از مدل یادگیری ماشینی بیشینه بی‌نظمی (MaxEnt) و ماشین بردار پشتیبان (SVM)، تحلیل سلسله مراتبی AHP و GIS انجام داده و به این نتیجه رسیدند که در ریسک و آسیب‌پذیری سیلاب شهری بندرعباس عامل تراکم جمعیت دارای بیشترین اهمیت است. قدبیگی و همکاران (Ghadbeygi, Mazaheri, Shafiei & Mardian, 2024) مدیریت ریسک سیلاب شهری شهر اراک را با استفاده از مدل تصمیم‌گیری چندمعیاره AHP، مدل TOPSIS و GIS انجام دادند. نتایج نشان داد که حدود ۷۷۷ هکتار از مساحت شهر که ۶/۶۳ درصد را شامل می‌شود و عمدتاً مرکز شهر و پیرامون رودخانه کرهرود را در بر می‌گیرد، دارای پتانسیل ریسک بالای سیلاب است. در این مناطق که پتانسیل ریسک سیلاب شهر اراک بالاتر است، عمدتاً شیب کمتر، فاصله تا رودخانه و مسیل‌ها کمتر و تراکم جمعیت بالاتر می‌باشد.

در عرصه خارجی نیز گو و لیو (Gu & Liu, 2024) پیش‌بینی خطر سیل را برای شهر هنگ کنگ با استفاده از مدل تحلیل مؤلفه‌های اصلی (PCA) انجام داده و به این نتیجه رسیدند که با برنامه‌ریزی ثالث (TPU)^۱، شاخص خطر سیل (FRI^۲) سالانه افزایش می‌یابد که در نتیجه آن بیشترین تهدیدات متوجه مناطق با تراکم حمل‌ونقلی و امکانات عملکردی بالا خواهد بود. علاوه بر این، شاخص خطر سیل بر مجموعه برنامه‌ریزی ثالث ساحلی آبی در غرب هنگ کنگ تأثیر زیادی خواهد گذاشت و در نتیجه بیشترین تأثیرات منفی آن متوجه مناطق دارای ساختمان‌های با تراکم بالا خواهد بود. وو و همکاران (Wu et al., 2024) تأثیرات مقیاس فضایی عناصر شهری بر سیلاب شهری را با استفاده از رگرسیون وزن دار جغرافیایی چند مقیاسی (MGWR) انجام دادند. نتایج پژوهش آن‌ها نشان داد که دوره بازگشت بارش‌های شدید، تراکم جمعیت و نیروی انسانی ورودی از جمله مؤثرترین عوامل بر سیلاب شهری بوده است. شیب، فاصله از رودخانه و نسبت مساحت جاده‌ای کمترین تأثیر را بر سیلاب شهری داشتند. دای و همکاران (Dai, Cheng, Shen, Geng & Zhang, 2024) ظرفیت کاهش خطر سیل‌های آبی در شهرهای بزرگ چین را با استفاده از مدل شبیه‌سازی محیط‌های شهری - منطقه‌ای آینده (SSP^۳) انجام داده و به این نتیجه رسیدند که ۱) پیش‌بینی می‌شود اندازه شهرهای بزرگ تا سال ۲۰۵۰، ۳۰ درصد افزایش یابد و شمال و شرق چین جزء قطب‌های اصلی رشد شهری باشند. ۲) شدت بارش در شهرهای بزرگ در SSP126 (در سناریوهای با روندهای یکسان اجتماعی - اقتصادی)، ۰/۴ درصد افزایش یابد، اما در سناریوهای SSP245 و SSP585، شدت بارش به ترتیب ۵/۴ درصد و ۲/۳ درصد کاهش یابد. ۳) ظرفیت کاهش خطر سیل شهرهای بزرگ در سناریوی SSP126، ۲/۷ درصد و در سناریوی SSP585، ۲/۱ درصد کاهش یابد، اما در سناریوی SSP245، ۰/۲ درصد افزایش یابد. بیشتر شهرهای با ظرفیت کم در شمال و شرق چین واقع شده‌اند. وانگ و همکاران (Wang, Peng, Yang, Wang & Deng, 2024) بررسی تأثیرات نسبتی مدیریت زیرساخت‌های طبقه بندی شده بر کاهش خطر سیلاب شهری شهر پکن را با استفاده از رگرسیون لجستیک انجام دادند. نتایج نشان داد که زیرساخت‌های سبز نقش مؤثرتری در کاهش مخاطرات مرتبط با سیل در بیشتر مناطق شهری پکن دارد تا زیرساخت‌های آبی، در حالی که زیرساخت‌های خاکستری خطر سیل را به ویژه در حومه‌های شمال شرقی افزایش می‌دهد. نوآوری این پژوهش عبارت است از:

استفاده از مدل InVEST: این پژوهش نخستین مطالعه داخلی است که از مدل UFRM بسته نرم‌افزاری InVEST 3.12.0 برای ارزیابی خدمت اکوسیستمی کاهش ریسک سیلاب شهری استفاده کرده است. پژوهش‌های داخلی قبلی عمدتاً بر مدل‌های تصمیم‌گیری چندمعیاره مانند AHP، TOPSIS، GIS و مدل‌های یادگیری ماشینی (مانند MaxEnt و SVM) مبتنی بوده‌اند و به ارزیابی خدمت اکوسیستمی کاهش ریسک سیلاب شهری با این مدل پرداخته‌اند.

تمرکز بر مقیاس شهری و محلی: برخلاف مطالعات قبلی که ریسک سیلاب شهری را در مقیاس کلی یا بدون تمرکز بر خدمات اکوسیستمی مورد بررسی قرار داده‌اند، این پژوهش خدمت اکوسیستمی کاهش ریسک سیلاب شهری را در سطح مناطق دهگانه کلان‌شهر تبریز (با استفاده از تحلیل فضایی و زمانی) مورد ارزیابی قرار داده که این رویکرد در هیچ پژوهش داخلی یا خارجی در مورد تبریز انجام نشده است.

استفاده از تحلیل زمانی و برای سه دوره: بررسی تغییرات خدمات اکوسیستمی UFRM در سه دوره زمانی ۱۹۸۴، ۲۰۰۲ و ۲۰۲۲، با در نظر گرفتن تغییرات کاربری اراضی/پوشش اراضی، گروه هیدرولوژیکی خاک و شدت بارندگی، نوآوری دیگری است که به درک روند تاریخی و آینده ریسک سیلاب کمک می‌کند. مطالعات خارجی (مانند مطالعاتی که با استفاده از مدل‌های PCA، MGWR، SSP و رگرسیون لجستیک انجام شده) اغلب بر پیش‌بینی آینده با استفاده از عوامل خاص تمرکز دارند، اما نه در مقیاس زمانی و محلی انجام شده در این پژوهش و برای یک کلان‌شهر مانند تبریز.

1-Tertiary Planning Units

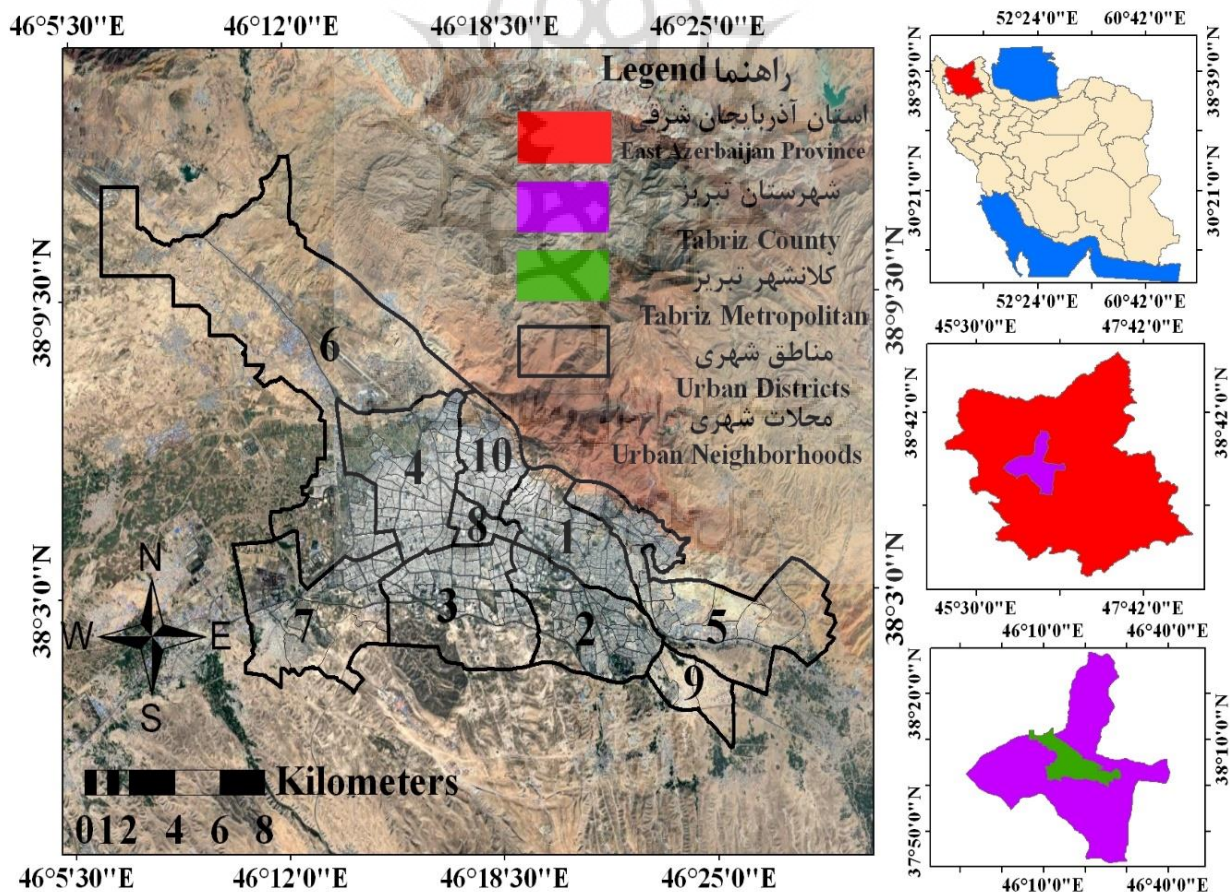
2-Flood Risk Index

3- Shared Socioeconomic Pathways Scenarios (SSP)

ارزیابی اقتصادی با روش هزینه خسارت اجتناب شده: محاسبه ارزش پولی خدمات اکوسیستمی (به دلار) بر اساس حجم جذب و نگهداشت رواناب، و مقایسه نقش زیرساخت‌های سبز (مانند فضای سبز و اراضی کشاورزی) با زیرساخت‌های آبی و خاکستری، جنبه‌ای نوین است که به سیاست‌گذاری پایدار شهری کمک می‌کند. در مجموع، این مقاله خلأ موجود در ادبیات را پر کرده و رویکردی یکپارچه برای مدیریت ریسک سیلاب در کلان‌شهرهای ایرانی ارائه می‌دهد که می‌تواند الگویی برای مطالعات مشابه باشد.

منطقه مورد مطالعه

کلان‌شهر تبریز در گوشه شمال غربی کشور و در امتداد محور بین‌المللی تهران - بازرگان که ایران را به اروپا متصل می‌سازد قرار گرفته است. کلان‌شهر تبریز با وسعتی حدود ۱۱۸۰۰ کیلومتر در ۴۶ درجه و ۲۵ دقیقه طول شرقی و ۳۸ درجه و ۲ دقیقه عرض شمالی از نصف‌النهار گرینویچ واقع شده است. متوسط ارتفاع شهر حدود ۱۳۴۰ متر از سطح دریاهای آزاد برآورد گردیده است (Zeynali Azim, Hatami Golzari, Karami & Babazadeh Oskoui, 2021). رودخانه آجی‌چای (تلخه رود) از قسمت شمال و شمال غرب تبریز می‌گذرد و بعد از طی مسافتی قابل توجه در دشت تبریز به دریاچه ارومیه می‌ریزد و مهران رود نیز از میانه تبریز می‌گذرد (<https://www.tabriz.ir>). بر پایه آخرین تقسیمات اداری، کلان‌شهر تبریز از ۱۰ منطقه شهرداری تشکیل شده است (شکل ۱). بزرگ‌ترین آن از لحاظ وسعت، منطقه ۶ و کوچک‌ترین آن، منطقه ۸ می‌باشد. از لحاظ جمعیتی نیز، منطقه ۴ بیشترین جمعیت و منطقه ۹، کمترین جمعیت را دارد (Tabeyi, Babae Aghdam & Hakimi, 2022).



شکل ۱- نقشه محدوده مورد مطالعه

Fig. 1. Map of the study area

مواد و روش‌ها

داده‌ها

در این پژوهش از مدل کاهش ریسک سیلاب شهری از مجموعه بسته‌های نرم‌افزاری InVEST 3.12.0 استفاده شده است. برای تهیه هر یک از داده‌های مورد نیاز مدل طبق روش زیر عمل شد:

نقشه محدوده مورد مطالعه / نقشه حوضه آبریز محدوده مورد مطالعه

منظور از این نقشه، نقشه مناطقی است که نتایج نهایی باید بر روی آن‌ها اعمال شود. این نقشه باید در قالب وکتوری یا شیب فایل وارد نرم افزار InVEST شود (www.xiaoganghe.github.io). این نقشه می‌تواند شامل محدوده مورد مطالعه یا حوضه آبریز محدوده مورد مطالعه نیز باشد. در این پژوهش نقشه محدوده کلان‌شهر تبریز وارد نرم افزار InVEST گردید.

میزان بارش (برحسب میلیمتر)

استفاده از شدت بارندگی یکی از مهمترین شاخص‌هایی است که برای مدل خدمت اکوسیستمی کاهش ریسک سیلاب شهری ضروری است. شدت بارندگی رابطه مستقیمی با خطر سیل دارد. شدت بارندگی در یک منطقه خاص به میزان و زمان بارندگی بستگی دارد (Bose & Mazumdar, 2023). منظور از این مورد، میزان بارش با در نظر گرفتن رخدادها با دوره‌های بازگشت مخصوصاً دوره‌های بازگشت طولانی است که به صورت میلیمتر در نرم افزار InVEST وارد شده و در تمامی پیکسل‌ها به صورت یکسان اعمال می‌شود (www.xiaoganghe.github.io). این میزان برای سال‌های ۱۳۶۳، ۱۳۸۱ و ۱۴۰۱ کلان‌شهر تبریز با دوره بازگشت ۲ ساله و برای بارندگی‌های ۱۵ دقیقه‌ای، ۳۰ دقیقه‌ای، ۱۴/۰۷ و ۴۵ دقیقه‌ای، ۱۰/۷۸ میلیمتر وارد نرم افزار InVEST گردید. در این پژوهش، داده‌های مربوط به بارش از طریق ایستگاه سینوپتیک^۱ تبریز به دست آمده و برای محاسبه دوره بازگشت از رابطه شدت - مدت - فراوانی که توسط بل^۲ به وجود آمده و به وسیله قهرمان و آبخضر (Ghahraman & Abkhezr, 2004) در ایران ارتقاء داده شده استفاده شد:

طبق روابط (۹) و (۸)، R_T^T شدت بارندگی در مدت و دوره بازگشت مورد نظر، R_{60}^{10} شدت بارش یک ساعته با دوره بازگشت ۱۰ سال (در این پژوهش شدت بارش برای بارندگی‌های با مدت زمان‌های ۱۵، ۳۰ و ۴۵ دقیقه به صورت جداگانه و با دوره بازگشت ۲ ساله محاسبه شد)، R_{1440}^2 میانگین حداکثر باران روزانه، t دوره زمانی مورد نظر، T دوره بازگشت و A ، B ، a_1 ، a_2 و a_3 ضرایب ثابت رابطه که بسته به مدت تداوم بارش مقادیر آن متفاوت هست (Farahnakian, Ghazavi, Dokhan & Omidvar, 2024) (جدول‌های ۴ و ۱).

جدول ۱- ضرایب ثابت رابطه قهرمان - آبخضر

Table 1- Fixed coefficients of the Ghahraman-Abkhezr Equation (Farahnakian et al., 2024)

مدت تداوم باران (ساعت)	1 >=	2 >=	9 <=	2 < t <= 9	2 >=	>2
A	0.13	0.14	0.16	0.2		
B	0.5	0.48	0.44	0.39		
A1					0.46	0.56
a2					0.24	0.19
a3					0.62	0.8

1- Synoptic

2- Bell

نقشه کاربری اراضی / پوشش اراضی

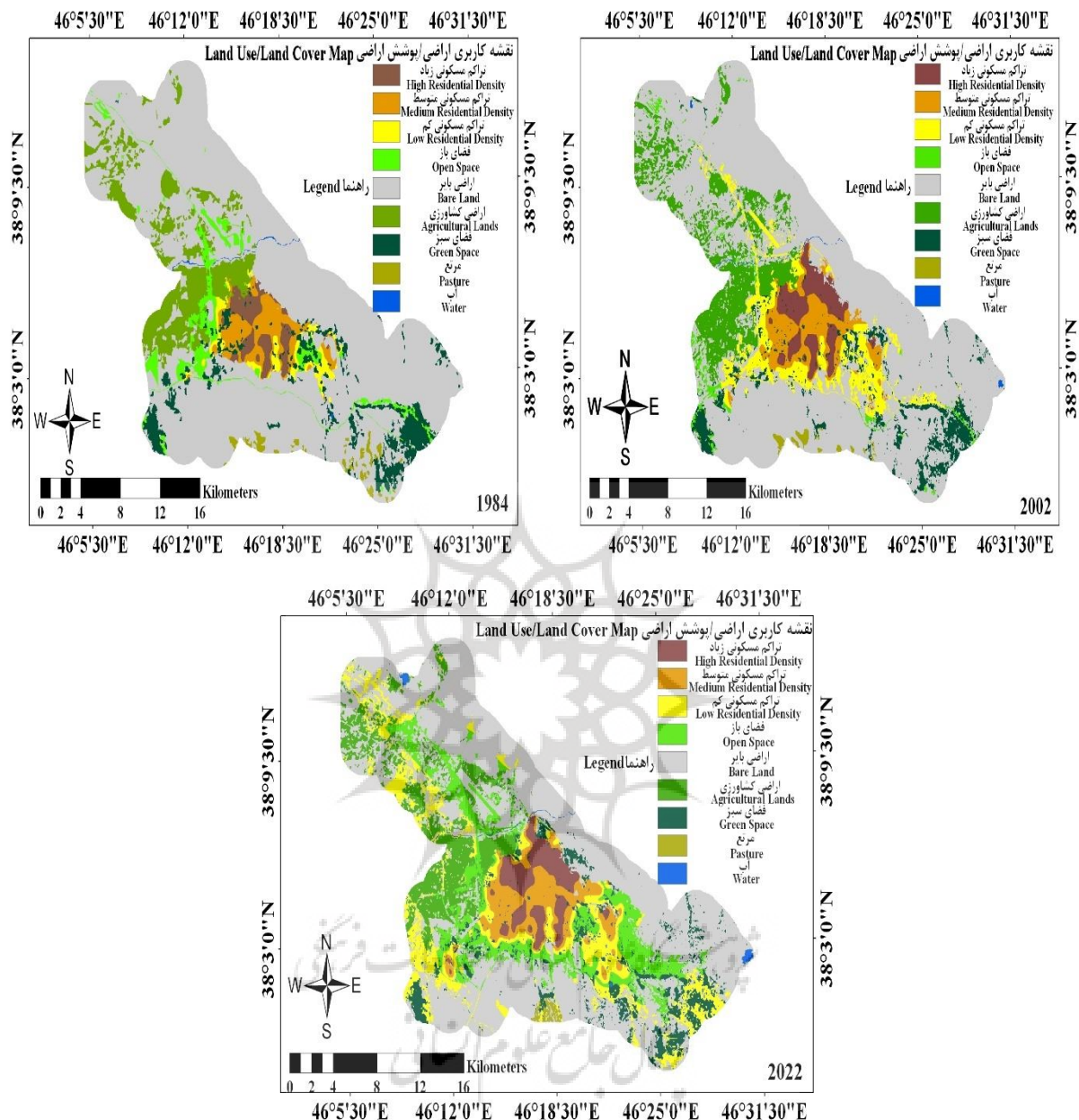
نقشه کاربری اراضی / پوشش اراضی باید در قالب رستری یا TIF وارد نرم افزار InVEST شود (www.xiaoganghe.github.io). در این پژوهش، تصاویر ماهواره‌ای کاربری اراضی / پوشش اراضی کلان‌شهر تبریز از سایت USGS Earth Explorer (<https://earthexplorer.usgs.gov>) برای تهیه نقشه کاربری اراضی / پوشش اراضی از تصاویر ماهواره ای لندست ۵ برای سال‌های ۱۹۸۴ سنجنده TM و ۲۰۰۲ سنجنده ETM+ و لندست ۸ برای سال ۲۰۲۲ سنجنده OLS، نرم افزار ENVI 5.8، GIS و روش طبقه‌بندی حداکثر احتمال (MLC^1) استفاده شد. تصاویر ماهواره‌ای مورد نظر مربوط به فصل تابستان، طول روز و تاریخ‌های ۱۹۸۴/۰۶/۲۴، ۲۰۰۲/۰۶/۲۶ و ۲۰۲۲/۰۶/۱۷ بوده است. برای ارزیابی صحت نقشه‌های به دست آمده از طبقه‌بندی تصاویر ماهواره‌ای، از روش نمونه‌برداری تصادفی (نمونه‌های تعلیمی) به عنوان نقاط واقعیت زمینی (نقاط کنترلی) استفاده شد. با به کارگیری نقاط کنترلی که از طریق تصاویر گوگل ارث، نقشه‌های کاربری اراضی و تفسیر بصری جمع آوری شده‌اند، دقت طبقه‌بندی با استفاده از ماتریس خطا و پارامترهای آماری (صحت کلی و ضریب کاپا)، محاسبه گردید که نشان دهنده دقت بالای طبقه‌بندی است (جدول ۲). علت استفاده از روش طبقه‌بندی حداکثر احتمال در این پژوهش قابلیت این روش در محاسبه دقیق احتمال تعلق هر پیکسل به کلاس‌های مختلف بر اساس توزیع آماری و ضریب همبستگی باندهای مورد استفاده در داده‌های آموزشی می‌باشد.

جدول ۲- مقادیر ارزیابی صحت تصاویر طبقه بندی شده به روش حداکثر احتمال

Table 2- Accuracy assessment values of images classified by maximum likelihood method

سال	ضریب کاپا (%)	صحت کلی (%)
Year	(%) Kappa Coefficient	(%) Overall Accuracy
1984	95	96/4
2002	93	95/2
2022	96/6	97/4

نقشه کاربری اراضی / پوشش اراضی در ۹ کلاس شامل تراکم مسکونی زیاد، تراکم مسکونی متوسط، تراکم مسکونی کم، فضای باز، اراضی بایر، اراضی کشاورزی، فضای سبز، مرتع و آب با پیکسل ۳۰ متر تهیه شد. در این پژوهش کلاس کاربری تراکم مسکونی زیاد، تراکم مسکونی متوسط و تراکم مسکونی کم با استفاده از نقشه طرح جامع تبریز و هم پوشانی نقشه تراکم ساختمانی با لایه کاربری اراضی در مرحله طبقه‌بندی و در مرحله پس پردازش با لایه برداری به دست آمده است. همچنین در این پژوهش کلاس کاربری اراضی کشاورزی، فضای سبز و مرتع از نظر موقعیت جغرافیایی، در شیب های متفاوت زمین قرار گرفته و در کنار بازتاب طیفی مختلف با استفاده از طبقه‌بندی و پس پردازش از هم جدا شده‌اند. با توجه به این که خارج از محدوده مناطق شهرداری تبریز و در اطراف این مناطق زیرساخت‌های سبزی وجود دارد که در کاهش ریسک سیلاب شهری نقش دارند، از این رو برای این که بتوان به صورت کامل نقش زیرساخت‌های سبز را در کاهش ریسک سیلاب تبریز نشان داد، نقشه کاربری اراضی / پوشش اراضی تبریز در حدود ۲۵۰ هکتار از تمام جهات بیشتر از محدوده مناطق دهگانه شهرداری در نظر گرفته شده و ترسیم گردید (شکل ۲).



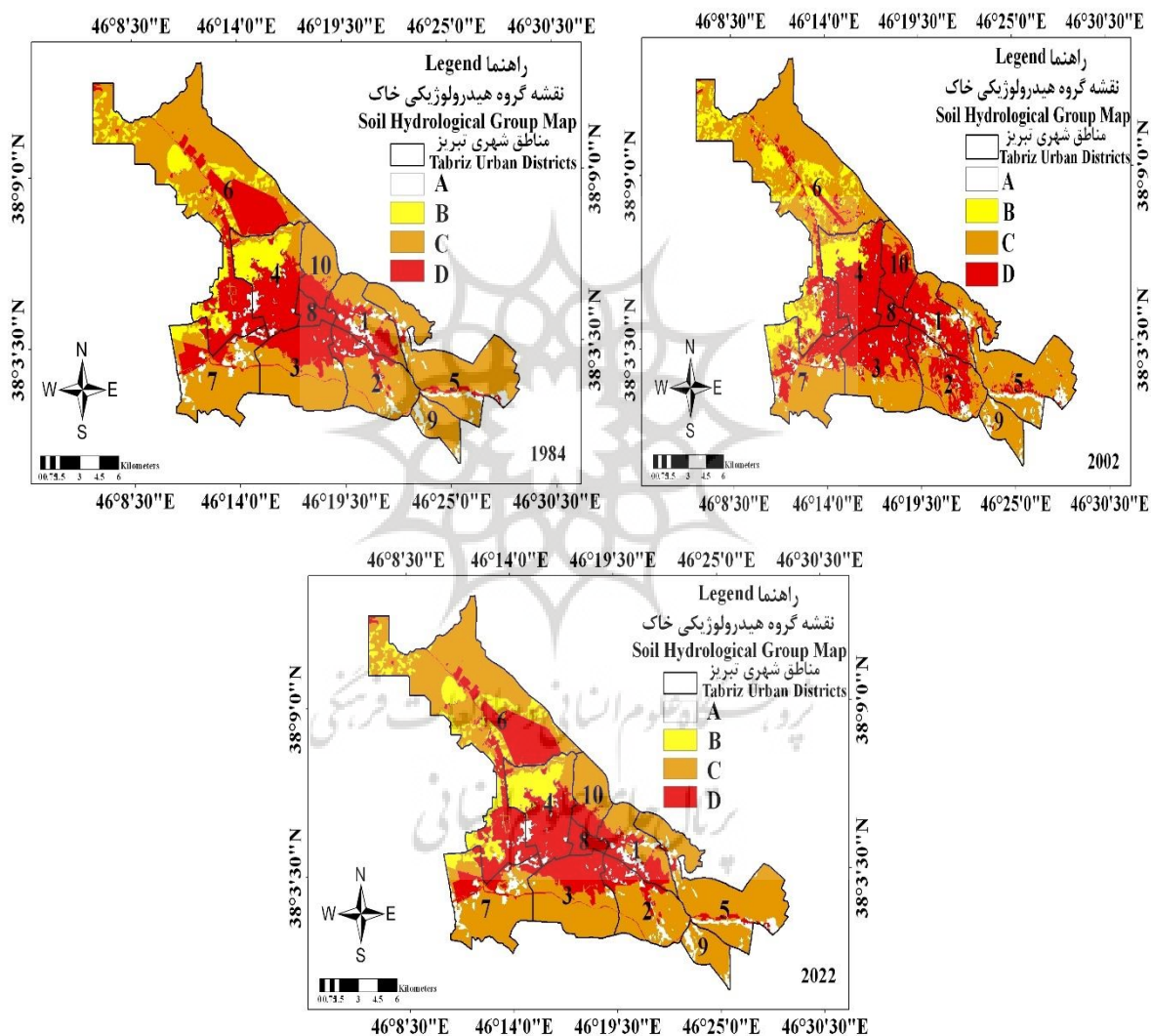
شکل ۲- نقشه کاربری اراضی/ پوشش اراضی کلان‌شهر تبریز به ترتیب از چپ به راست برای سال‌های ۱۹۸۴، ۲۰۰۲ و ۲۰۲۲

Fig. 2. Land use/land cover map of Tabriz metropolis for 1984, 2002, and 2022 (from left to right)

نقشه رستری گروه هیدرولوژیکی خاک

نقشه گروه هیدرولوژیکی خاک محدوده مورد مطالعه باید به صورت رستری وارد نرم‌افزار InVEST شود (www.xiaoganghe.github.io). اطلاعات مربوط به گروه هیدرولوژیکی خاک کلان‌شهر تبریز از سایت <https://www.futurewater.eu/2015/07/soil-hydraulic-properties> اخذ شد. نقشه گروه هیدرولوژیکی خاک محدوده مورد مطالعه از سازمان جهاد کشاورزی آذربایجان شرقی که برای دشت تبریز تهیه شده و به صورت کاغذی بود اخذ گردیده و سپس با

اسکن و تصحیح هندسی رقومی سازی آن انجام شد. در طی سال‌های ۱۳۶۳ و ۱۴۰۱ بیشتر خاک‌های تبریز (۸۶/۰۱ درصد) به ترتیب در گروه‌های هیدرولوژیکی C و D با پتانسیل رواناب نسبتاً بالا و بالا و میزان کمتری از خاک‌های تبریز (۱۳/۹۹ درصد) در گروه‌های هیدرولوژیکی A و B با پتانسیل رواناب نسبتاً پایین و پایین و در سال ۱۳۸۱ نیز در حدود ۸۴/۵۹ درصد در گروه‌های هیدرولوژیکی C و D با پتانسیل رواناب نسبتاً بالا و بالا و در حدود ۱۵/۴۱ درصد در گروه‌های هیدرولوژیکی A و B با پتانسیل رواناب نسبتاً پایین و پایین قرار داشته است. یعنی به عبارتی در هر سه دوره زمانی ۱۳۶۳، ۱۳۸۱ و ۱۴۰۱، قسمت عمده خاک‌های تبریز کمترین میزان از رواناب را در زیر زمین نفوذ داده و بیشترین میزان از رواناب را در سطح زمین جاری ساخته‌اند (شکل ۳).



شکل ۳- نقشه‌های رستری گروه هیدرولوژیکی خاک کلان‌شهر تبریز به ترتیب از چپ به راست برای سال‌های ۱۹۸۴، ۲۰۰۲ و ۲۰۲۲

Fig. 3. Raster maps of the soil hydrologic groups in Tabriz metropolis for 1984, 2002, and 2022 (from left to right)

جدول بیوفیزیکی

جدول بیوفیزیکی حاوی اطلاعاتی از داده‌های عدد منحنی برای هر یک از طبقات کاربری اراضی / پوشش اراضی است (Vilca- Campana et al., 2024). داده‌های عدد منحنی (CN^1) مهم‌ترین پیش نیاز ورودی مدل کاهش ریسک سیلاب شهری است. CN به طور گسترده‌ای برای تخمین میزان رواناب در سطح و نفوذ آن در خاک پس از مقدار معینی (Bose & Mazumdar, 2023)، مدیریت منابع آبی، مدل‌سازی سیلاب و غیره مورد استفاده قرار می‌گیرد (Gitika & Ranjan 2014; Tessema, Lyon, Setegn & Mörtberg, 2014; Soomro et al., 2019). CN نشان دهنده پتانسیل رواناب زمین است که متأثر از وضعیت پیشین رطوبت خاک (AMC)، نوع خاک، کاربری اراضی بوده و مقدار آن بین ۰ تا ۱۰۰ است. مقادیر بالاتر نشان دهنده پتانسیل بیشتر رواناب است (<https://www.hec.usace.army.mil/confluence/hmsdocs/hmstrm/cn-tables>). یعنی به عبارتی مقادیر بالاتر نشان دهنده این است که خاک نفوذناپذیرتر بوده و آب ناشی از بارش را به جای زیر زمین در سطح زمین به صورت رواناب جاری می‌سازد. CN را می‌توان از طریق مدل SCS که به وسیله سازمان حفاظت خاک ایالات متحده تهیه شده به دست آورد (Row, 1976). در این پژوهش نیز میزان CN از طریق سایت سازمان مذکور اخذ گردید. در جدول ۳ میزان CN، برای هر گروه هیدرولوژیکی خاک کلان‌شهر تبریز برآورد شده است.

جدول ۳- جدول بیوفیزیکی مورد استفاده در مدل کاهش ریسک سیلاب شهری InVEST

Table 3- Biophysical table used in the InVEST urban flood risk mitigation model

lucode	Description	NEH type (to define CN)	CN_A	CN_B	CN_C	CN_D	SW_type	EMC
0	Background		1	1	1	1	7000	0
1	High Intensity Developed	Urban districts	89	92	94	95	8000	0.107
2	Medium Intensity Developed	Res districts	61	75	83	87	9000	0.077
3	Low Intensity Developed		51	68	79	84	10000	0.041
4	Open Space Developed	Open space	49	69	79	84	11000	0.012
5	Bare Land		77	86	91	94	7000	0
6	Cultivated Land	Small grain	63	75	83	87	5000	0
7	Deciduous Forest	Woods	36	60	73	79	5000	0
8	Pasture/Hay		49	69	79	84	3000	0
9	Water		1	1	1	1	6000	0

نقشه وکتوری زیرساخت‌های ساخته شده

در کل، زیرساخت‌های ساخته شده در یک محدوده شهری منعکس کننده امکانات و تسهیلات پایه‌ای و اساسی مانند حمل‌ونقل، ارتباطات، شبکه‌های برق و زیرساخت‌های مشابه است (Bose & Mazumdar, 2023). برای نقشه وکتوری زیرساخت‌های ساخته شده کلان‌شهر تبریز از نقشه طرح تفصیلی ۱۳۹۵ شهرداری تبریز استفاده شد.

جدول خسارات ناشی از سیلاب شهری

این جدول شامل داده‌های خسارت ناشی از سیلاب احتمالی برای هر نوع ساختمان است (www.xiaoganghe.github.io). در شهرها، ارزش‌گذاری زیرساخت‌های ساخته شده از منطقه‌ای به منطقه‌ای دیگر بسیار متفاوت است و از این رو جمع‌آوری این نوع

داده ها بسیار مشکل است. بنابراین جهت برآورد میزان خسارت اقتصادی، کل محدوده کلان شهر تبریز انتخاب شده است. همچنین در این مورد، باید واحد پولی ای انتخاب شود که بتواند ارزش واقعی خسارات را به دست دهد (Bose & Mazumdar, 2023). از این رو در این پژوهش، واحد پولی دلار با توجه به پذیرش جهانی آن انتخاب شده است. در این پژوهش، تمامی ساختمان های موجود در شهر از نوع مسکونی و با کد ۰ در نظر گرفته شده و برای هر متر مربع خسارت ناشی از سیلاب شهری، ۱۰۰ دلار لحاظ شده است.

مدل کاهش ریسک سیلاب شهری

مدل کاهش سیلاب شهری نرم افزار InVEST برای مطالعه خدمت اکوسیستمی کاهش سیل بر زیرساخت های طبیعی تمرکز دارد که در کاهش میزان رواناب ناشی از سیلاب نقش دارد. این مدل از جمله مدل هایی است که کاهش ریسک سیلاب شهری را بر اساس نقشه وکتوری محدوده مورد مطالعه/ نقشه حوضه آبریز محدوده مورد مطالعه، میزان بارش (برحسب میلی متر)، نقشه کاربری اراضی/ پوشش اراضی، نقشه رستری گروه هیدرولوژیکی خاک، جدول بیوفیزیکی، نقشه وکتوری زیرساخت های ساخته شده، جدول خسارات ناشی از سیلاب شهری برآورد می کند. در نهایت این مدل نتیجه را از طریق فایل های رستری و وکتوری زیر برآورد می کند:

- (۱) میزان رواناب را در قالب داده های رستری محاسبه می کند.
- (۲) میزان جذب و نگهداشت رواناب (برحسب میلی متر) را در قالب فایل رستری که نشان دهنده میزان نسبی بارندگی است، تخمین می زند (به صورت درصدی از بارندگی بیان می کند).
- (۳) حجم نگهداشت رواناب (برحسب متر مکعب) را از طریق فایل رستری محاسبه می کند.
- (۴) خطر سیل را در قالب یک جدول توصیفی و فیلد فایل های وکتوری و داده های رستری که از طریق مقادیر محاسبه شده به شناسایی تغییرات فضایی در محدوده های مکانی مشخص شده کمک می کند، محاسبه می کند.
- (۵) خسارت ناشی از سیل را از طریق ارزیابی پولی برآورد می کند.
- (۶) ارزش پولی خدمت اکوسیستمی کاهش ریسک سیلاب شهری را با استفاده از روش هزینه خسارت اجتناب شده در قالب جدول توصیفی برآورد می کند.

برای تجزیه و تحلیل زمانی مدل، میانگین بارش سال های مورد مطالعه و تغییرات کاربری اراضی/ پوشش اراضی مورد نیاز است. روابط (۴) و (۵) مدل مبتنی بر تغییرات کاربری اراضی، متغیری است که میزان رواناب و جذب و نگهداشت رواناب را تعیین می کند. برای محاسبه حجم جذب و نگهداشت رواناب در هر پیکسل، میزان رواناب i و Qp طبق رابطه (۱) عمل می شود (جدول ۴). به طوری که:

P : میزان بارندگی بر حسب میلی متر است. $Smax_i$: پتانسیل جذب و نگهداشت بر حسب میلی متر است. $\lambda Smax, i$: میزان بارندگی لازم برای شروع رواناب و $\lambda = 0.2$ است. $Smax$: تابعی از CN و پارامتر تجربی وابسته به i و ویژگی های کاربری اراضی/ پوشش اراضی و خاک است (رابطه (۲) در جدول ۴).

میزان حفظ و نگهداشت رواناب (برحسب میلی متر) در هر پیکسل با R_i طبق رابطه (۳) محاسبه می شود. حجم نگهداشت رواناب (برحسب متر مکعب) در هر پیکسل با R_m3i طبق رابطه (۴) محاسبه می شود. حجم رواناب (همچنین به عنوان «حجم سیل» نیز نامیده می شود) Q_m3i در هر پیکسل طبق رابطه (۵) محاسبه می شود (جدول ۴) (Vilca-Campana et al., 2024).

محاسبه خسارت ناشی از سیلاب احتمالی

ابتدا، ساختمان‌های آسیب دیده، بعد از آن مجموع خسارت احتمالی به دلار برای زیرساخت‌های ساخته شده و برای هر حوضه یا دهانه‌های شبکه‌های فاضلاب W به صورت زیر محاسبه می‌شود:

به طوری که طبق رابطه (۶):

b: میزان ساختمان‌های مسکونی از مجموع زیرساخت‌های ساخته شده B است. a (b, W): مساحت (متر مربع) ساختمان‌های b است که حوضه آبریز W را قطع می‌کند. d(b): میزان خسارت به متر مربع / واحد پول (جدول خسارت) برای نوع ساختمان b است (جدول ۴).

محاسبه ارزش پولی خدمت اکوسیستمی کاهش ریسک سیلاب شهری

محاسبه خدمت اکوسیستمی انجام شده که به صورت شاخصی از آسیب‌های اجتناب شده به زیرساخت‌های ساخته شده برای هر حوضه W که به صورت زیر محاسبه می‌شود:

به طوری که طبق رابطه (۷):

i یک پیکسل در حوضه W است و R_m3i حجم جذب و نگهداشت رواناب در هر پیکسل i است (جدول ۴).

جدول ۴- روابط ریاضی مدل InVEST

Table 4- Mathematical equations of the InVEST model

فرمول روابط Equation Formulations	شماره روابط Equations Number
$Q_{p,i} = \begin{cases} \frac{(P - \lambda S_{max})^2}{P + (1 - \lambda)S_{max,i}} \end{cases} \text{ if } P > \lambda \cdot S_{max,i}$	1
$S_{max,i} = \frac{254000}{CN_i} - 254$	2
$R_i = 1 - \frac{Q_{p,i}}{P}$	3
$R_{m3i} = R_i \cdot P \cdot \text{pixel} \cdot \text{area} \cdot 10^{-3}$	4
$Q_{m3i} = Q_{p,i} \cdot P \cdot \text{pixel} \cdot \text{area} \cdot 10^{-3}$	5
$\text{Affected.build}_w = \sum_{i \in w} a(b, W) \cdot d(b)$	6
$\text{Service.build}_w = \text{Affected.build}_w \cdot \sum_{i \in w} R_{m3i}$	7
$R_t^T = At^B [a_1 + a_2 \ln (T - a_3) R_{60}^{10}]$	8
$R_{60}^{10} = e^{-\frac{0}{993} (R_{1440}^2)^{\frac{1}{06}}}$	9

ارزش خدمات انجام شده به صورت واحد پولی برای هر متر مکعب بیان می‌شود. این مورد باید به عنوان یک شاخص و نه به عنوان یک معیار واقعی برای ذخیره (مالی) در نظر گرفته شود (Sharp et al., 2020).

یافته‌های پژوهش

کاربری اراضی / پوشش اراضی

بررسی روند تغییرات کاربری اراضی از سال ۱۳۶۳ تا ۱۴۰۱ نشان می‌دهد که اراضی بایر و اراضی کشاورزی در این بازه زمانی ۳۸ ساله روند کاهشی داشته است، کاربری مسکونی از سال ۱۳۶۳ تا ۱۳۸۱ روند افزایشی (در حدود ۱۶/۵۴ درصد) داشته و از سال ۱۳۸۱ تا ۱۴۰۱، در حدود ۰/۵۰ درصد کاهش داشته است. فضای سبز نیز از سال ۱۳۶۳ تا ۱۳۸۱ روند کاهشی (۰/۸۷ درصد) داشته و از سال ۱۳۸۱ تا ۱۴۰۱ در حدود ۰/۹۷ درصد افزایش داشته است. در کل بررسی تغییرات کاربری اراضی مربوط به کلان‌شهر تبریز در بازه زمانی ۳۸ ساله نشان می‌دهد که کاربری‌های مرتبط با زیرساخت‌های سبز از قبیل فضای سبز، اراضی کشاورزی و مرتع که نقش فزاینده‌ای در کاهش ریسک سیلاب شهری دارند، کمترین میزان از کل کاربری‌های شهری تبریز را به خود اختصاص داده‌اند (شکل ۲ و جدول‌های ۵، ۶ و ۷).

جدول ۵- داده‌های مربوط به کاربری اراضی / پوشش اراضی سال ۱۳۶۳ مناطق دهگانه کلان‌شهر تبریز به درصد

Table 5- Land Use/Land Cover Data for the Ten Zones of Tabriz Metropolis in 1984 (percent)

کاربری اراضی / پوشش اراضی land use/land cover									
مناطق	تراکم مسکونی زیاد (کد ۱)	تراکم مسکونی متوسط (کد ۲)	تراکم مسکونی کم (کد ۳)	فضای باز (کد ۴)	اراضی بایر (کد ۵)	اراضی کشاورزی (کد ۶)	فضای سبز (کد ۷)	مرتع (کد ۸)	آب (کد ۹)
Districts	High Residential Density (Code 1)	Medium Residential Density (Code 2)	Low Residential Density (Code 3)	Open Space (Code 4)	Waste land (Code 5)	Agricultural Land (Code 6)	Green Space (Code 7)	Pasture (Code 8)	Water (Code 9)
1	3.53	18.58	9.83	5.97	48.08	-	13.98	-	-
2	2.45	4.54	10.41	4.14	68.20	-	10.04	-	0.21
3	14.09	10.72	6.17	1.70	65.60	-	1.71	-	-
4	23.40	19.37	2.01	1.83	16.12	32.08	4.50	-	0.68
5	-	0.13	0.71	3.90	86.89	-	8.36	-	-
6	0.12	1.88	1.85	11.94	65.25	17.48	1.40	-	0.05
7	0.53	3.09	1.39	7.67	70.32	6.08	10.91	-	-
8	28.43	66.25	3.73	1.58	-	-	-	-	-
9	-	-	-	0.89	73.86	-	16.94	8.30	-
10	3	21.28	-	-	75.71	-	-	-	-
کل مناطق All Districts	4.78	7.32	3.18	6.33	62.97	9.42	5.63	0.25	0.10

جدول ۶- داده‌های مربوط به کاربری اراضی / پوشش اراضی سال ۱۳۸۱ مناطق دهگانه کلان‌شهر تبریز به درصد

Table 6- Land Use/Land Cover Data for the Ten Zones of Tabriz Metropolis in 2002 (percent)

کاربری اراضی / پوشش اراضی land use/land cover									
مناطق	تراکم مسکونی زیاد (کد ۱)	تراکم مسکونی متوسط (کد ۲)	تراکم مسکونی کم (کد ۳)	فضای باز (کد ۴)	اراضی بایر (کد ۵)	اراضی کشاورزی (کد ۶)	فضای سبز (کد ۷)	مرتع (کد ۸)	آب (کد ۹)
Districts	High Residential	Medium Residential	Low Residential	Open Space	Waste	Agricultural Land (Code 6)	Green Space	Pasture (Code 8)	Water (Code 9)

		(Code 7)		land (Code 5)	(Code 4)	Density (Code 3)	Density (Code 2)	Density (Code 1)	
-	-	10.98	-	23.59	-	23.38	28.06	13.98	1
0.17	0.022	7.72	-	45.53	2.55	34.63	6.79	2.59	2
-	0.011	3.07	-	48.19	-	21.17	12.93	14.62	3
0.62	-	1.83	24.37	6.91	-	9.73	25.51	31.02	4
-	0.0043	9.82	-	81.14	0.59	7.92	0.51	-	5
0.065	-	1.14	21.69	63.09	0.60	10.96	2.24	0.19	6
-	0.011	7.25	10.71	54.80	1.32	17.47	7.61	0.81	7
-	-	0.79	-	-	-	3.73	66.95	28.52	8
-	-	13.55	-	85.21	0.66	0.57	-	-	9
-	-	0.58	-	28.66	-	3.26	25.22	42.28	10
0.095	0.0048	4.76	10.55	52.10	0.65	14.15	9.76	7.91	کل مناطق All Districts

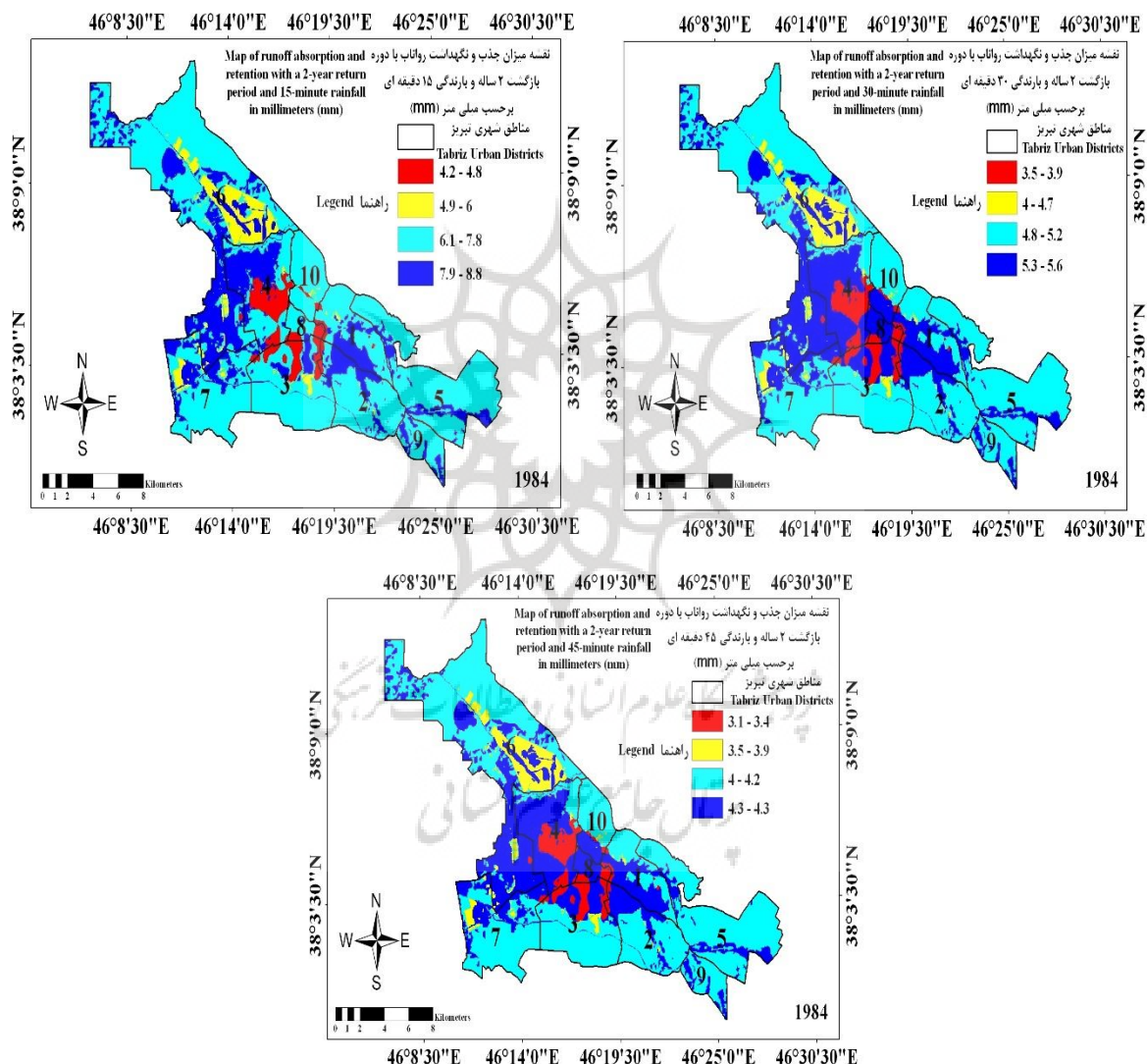
جدول ۷- داده‌های مربوط به کاربری اراضی / پوشش اراضی سال ۱۴۰۱ مناطق دهگانه کلان‌شهر تبریز به درصد

Table 7- Land Use/Land Cover Data for the Ten Zones of Tabriz Metropolis in 2022 (percent)

کاربری اراضی / پوشش اراضی land use/land cover									
مناطق Districts	تراکم مسکونی زیاد (کد ۱) High Residential Density (Code 1)	تراکم مسکونی متوسط (کد ۲) Medium Residential Density (Code 2)	تراکم مسکونی کم (کد ۳) Low Residential Density (Code 3)	فضای باز (کد ۴) Open Space (Code 4)	اراضی بایر (کد ۵) Waste land (Code 5)	اراضی کشاورزی (کد ۶) Agricultural Land (Code 6)	فضای سبز (کد ۷) Green Space (Code 7)	مرتع (کد ۸) Pasture (Code 8)	آب (کد ۹) Water (Code 9)
1	15.67	31.78	19.55	13.97	10.36	-	8.66	-	-
2	2.57	9.16	41.54	19.70	13.60	0.15	12.96	-	0.30
3	14.93	13.35	11.42	21.04	35.09	0.080	4.07	0.00094	-
4	31.50	26.53	6.47	6.48	5.58	19.74	3.09	-	0.60
5	-	2.66	6.23	35.88	43.39	0.0014	11.83	-	-
6	0.18	2.26	7.74	20.45	51.52	16.96	0.81	-	0.060
7	1.18	9.70	16.05	25.45	34.24	5.98	7.39	-	-
8	28.92	67.23	3.73	-	-	-	0.111	-	-
9	-	-	10.76	27.50	52.03	-	9.70	-	-
10	46.13	27.76	4.09	0.49	10.98	-	10.54	-	-
کل مناطق All Districts	8.30	10.97	12.05	20.45	34.31	8.07	5.73	0.000098	0.101

ظرفیت حفظ و نگهداشت رواناب در بین مناطق دهگانه کلان‌شهر تبریز

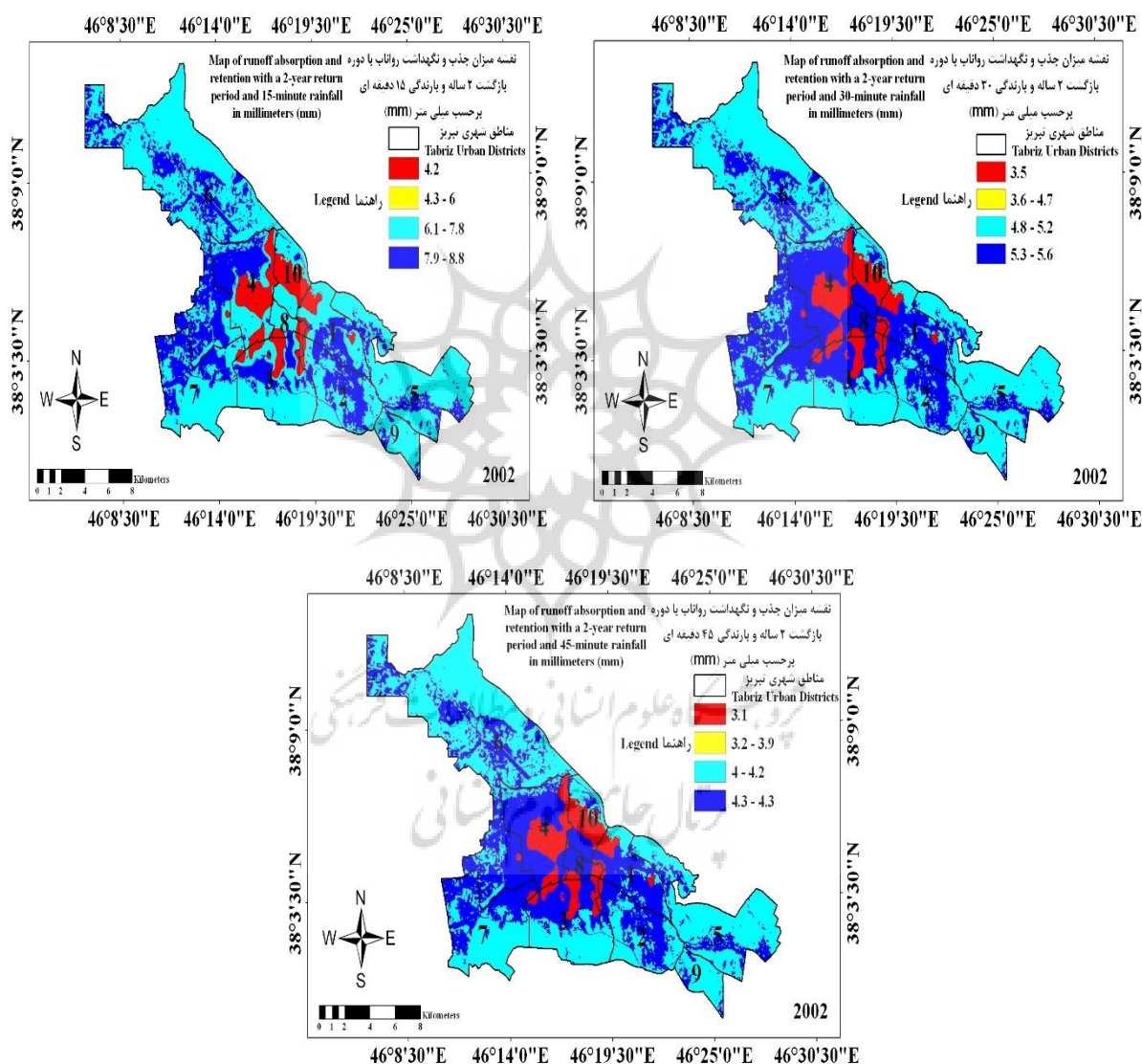
در سال ۱۳۶۳ با بارندگی ۱۵ دقیقه‌ای و با میزان بارش ۲۱/۹۳ میلی متری (۰/۰۰۰۲۲ متر مکعب) در کلاس بیشترین میزان (۸/۷۷ متر مکعب) به ترتیب مناطق ۶، ۴ و ۷ با ۳۴/۶۰، ۱۸/۱۴ و ۱۰/۱۹ درصد رتبه‌های اول تا سوم و منطقه ۹ هم با ۲/۴۳ درصد رتبه آخر را به خود اختصاص داده‌اند. در سال ۱۳۶۳ با بارندگی ۳۰ دقیقه‌ای در کلاس بیشترین میزان (۵/۶۳ متر مکعب) مناطق ۶، ۴ و ۷ با ۳۴/۶۰، ۱۸/۱۴ و ۱۰/۱۹ درصد رتبه‌های اول تا سوم و منطقه ۹ با ۲/۴۳ درصد رتبه آخر را به خود اختصاص داده‌اند. در سال ۱۳۶۳ با بارندگی ۴۵ دقیقه‌ای و دوره بازگشت ۲ ساله در کلاس بیشترین میزان (۴/۳۱ متر مکعب)، مناطق ۶، ۵ و ۷ هم به ترتیب با ۳۱/۲۸، ۱۱/۱۴، ۱۱/۱۵ درصد رتبه‌های اول تا سوم و منطقه ۸ با ۱/۱۷ درصد رتبه آخر را به خود اختصاص داده‌اند (شکل ۴).



شکل ۴- نقشه‌های میزان جذب و نگهداشت رواناب ناشی از بارش سال ۱۹۸۴ کلان‌شهر تبریز با دوره بازگشت ۲ ساله و بارندگی‌های ۱۵، ۳۰ و ۴۵ دقیقه‌ای بر حسب متر مکعب (m^3) به ترتیب از چپ به راست

Fig. 4. Maps of Runoff Retention and Infiltration Capacity in Tabriz Metropolis for 1984 under a 2-Year Return Period and 15, 30, and 45 Minute Rainfall Durations (m^3), from left to right

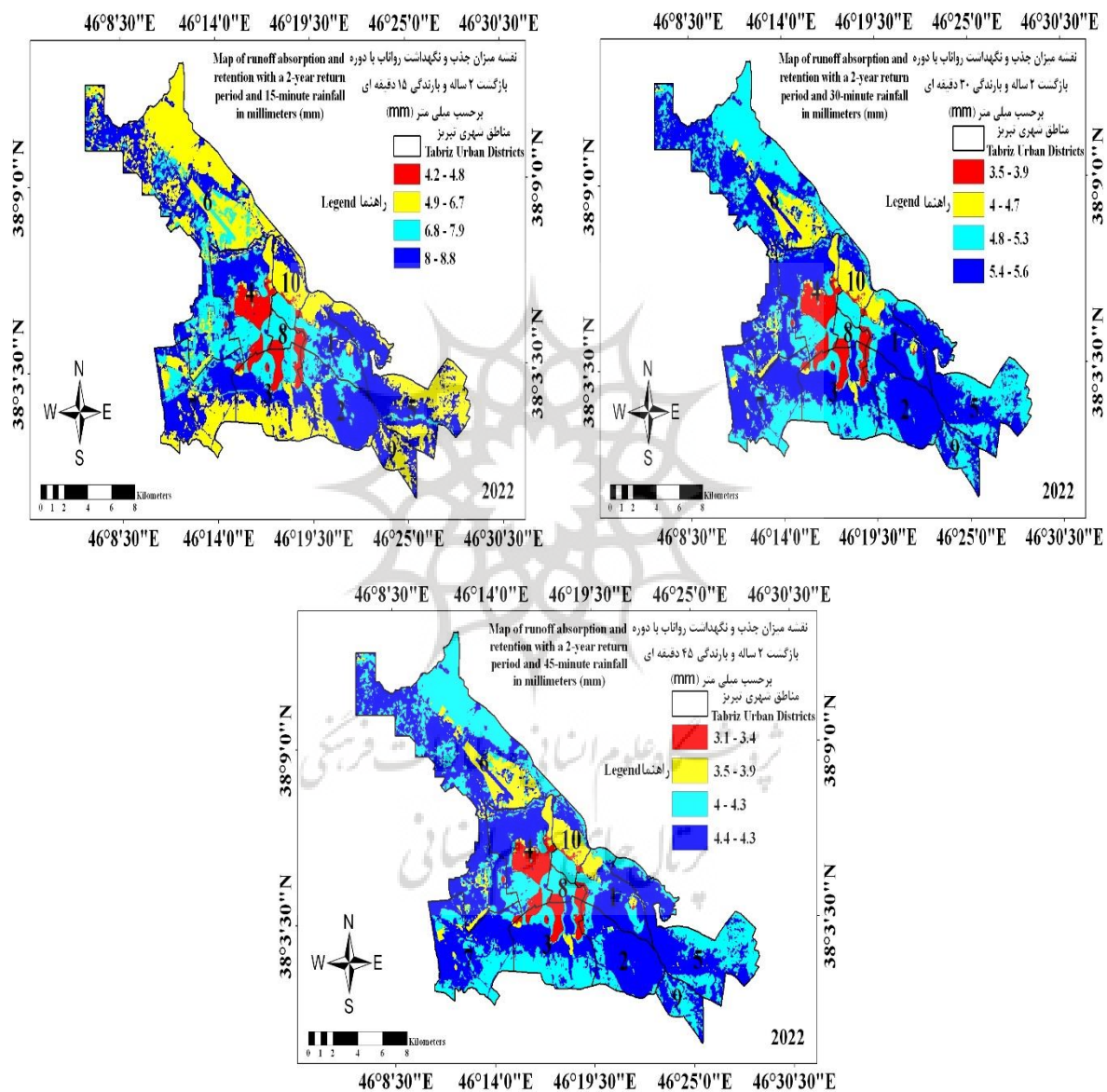
در سال ۱۳۸۱ با میزان بارش ۱۴/۰۷ میلیمتری (۰/۰۰۰۰۱۴ متر مکعب) با بارندگی ۱۵ دقیقه‌ای در کلاس بیشترین میزان (۸/۷۷ متر مکعب) مناطق ۹، ۸ و ۱۰ به ترتیب با ۲۹/۶۱، ۱۵، ۱۲/۵۲ درصد رتبه‌های اول تا سوم و منطقه ۶ با ۱/۱۱ درصد رتبه آخر را به خود اختصاص داده‌اند. در سال ۱۳۸۱ با بارندگی ۳۰ دقیقه‌ای در کلاس بیشترین میزان (۵/۶۳ متر مکعب) مناطق ۶، ۴ و ۷ به ترتیب با ۲۹/۶۱، ۱۵، ۱۲/۵۲ درصد رتبه‌های اول تا سوم و منطقه ۹ با ۱/۱۱ درصد رتبه آخر را به خود اختصاص داده‌اند. در سال ۱۳۸۱ با بارندگی ۴۵ دقیقه‌ای و با دوره بازگشت ۲ ساله در کلاس بیشترین میزان (۴/۳۱ متر مکعب) مناطق ۶، ۵ و ۷ به ترتیب با ۳۴/۹۴، ۱۴/۸۱، ۱۲/۱۵ درصد رتبه‌های اول تا سوم و منطقه ۸ با ۱/۱۴ درصد رتبه آخر را به خود اختصاص داده‌اند (شکل ۵).



شکل ۵- نقشه‌های میزان جذب و نگهداشت رواناب ناشی از بارش سال ۲۰۰۲ کلان‌شهر تبریز با دوره بازگشت ۲ ساله و بارندگی‌های ۱۵، ۳۰ و ۴۵ دقیقه‌ای بر حسب متر مکعب (m^3) به ترتیب از چپ به راست

Fig. 5. Maps of Runoff Retention and Infiltration Capacity in Tabriz Metropolis for 2002 under a 2-Year Return Period and 15, 30, and 45 Minute Rainfall Durations (m^3), from left to right

در سال ۱۴۰۱ با میزان بارش ۱۰/۷۸ میلی متری (۰/۰۰۰۱۱ متر مکعب) با بارندگی ۱۵ دقیقه‌ای در کلاس بیشترین میزان (۸/۷۷ متر مکعب) مناطق ۶، ۵، ۷ به ترتیب با ۲۸/۶۷، ۱۳/۰۴، ۱۲/۶۴ درصد رتبه‌های اول تا سوم و منطقه ۸ با ۱/۷۵ درصد رتبه آخر را به خود اختصاص داده‌اند. در سال ۱۴۰۱ با بارندگی ۳۰ دقیقه‌ای در کلاس بیشترین میزان (۵/۶۳ متر مکعب) مناطق ۶، ۵، ۷ به ترتیب با ۲۸/۶۳، ۱۳/۰۲، ۱۲/۶۴ درصد رتبه‌های اول تا سوم و منطقه ۸ با ۱/۷۶ درصد رتبه آخر را به خود اختصاص داده‌اند. در سال ۱۴۰۱ با بارندگی ۴۵ دقیقه‌ای و دوره بازگشت ۲ ساله در کلاس بیشترین میزان (۴/۳ متر مکعب) مناطق ۶، ۵ و ۷ به ترتیب با ۳۲/۱۷، ۱۵/۶، ۱۲/۵ درصد رتبه‌های اول تا سوم و منطقه ۸ با ۱/۲ درصد رتبه آخر را به خود اختصاص داده‌اند (شکل ۶).



شکل ۶- نقشه‌های میزان جذب و نگهداشت رواناب ناشی از بارش سال ۲۰۲۲ کلان‌شهر تبریز با دوره بازگشت ۲ ساله و بارندگی‌های ۱۵، ۳۰ و ۴۵ دقیقه‌ای بر حسب متر مکعب (m^3) به ترتیب از راست به چپ

Fig. 6. Maps of Runoff Retention and Infiltration Capacity in Tabriz Metropolis for 2022 under a 2-Year Return Period and 15, 30, and 45 Minute Rainfall Durations (m^3), from right to left

در کل در سال‌های ۱۳۶۳، ۱۳۸۱ و ۱۴۰۱ با بارندگی‌های ۱۵، ۳۰ و ۴۵ دقیقه‌ای و دوره بازگشت ۲ ساله در پتانسیل جذب و نگهداشت رواناب، مناطق ۶، ۵، ۷، ۳، ۴، ۲، ۱، ۱۰، ۹ و ۸ به ترتیب با ۳۲/۲۳، ۱۳/۶۳، ۱۱/۲۸، ۱۰/۳۵، ۹/۶۷، ۸/۰۴، ۶/۱۶، ۴/۱۶، ۳ و ۱/۴۷ درصد رتبه‌های اول تا دهم را به خود اختصاص داده‌اند. به عبارتی در بین مناطق دهگانه کلان‌شهر تبریز در هر سه دوره، مناطق ۶، ۵ و ۷ توانسته‌اند بیشترین میزان رواناب را جذب کرده و در زمین نفوذ دهند. همچنین مناطق ۹ و ۸ کمترین میزان رواناب را توانسته‌اند جذب کرده و در زمین نفوذ دهند.

ظرفیت جذب و نگهداشت رواناب در رابطه با کاربری اراضی / پوشش اراضی کلان‌شهر تبریز

در سال ۱۳۶۳ با بارندگی ۱۵ دقیقه‌ای و بارندگی ۳۰ دقیقه‌ای در رابطه با کاربری اراضی / پوشش اراضی، در کلاس بیشترین میزان (۸/۷۷ متر مکعب)، کاربری‌های اراضی کشاورزی، تراکم مسکونی متوسط و فضای باز به ترتیب با ۲۹/۱۵، ۲۲/۶۵ و ۱۹/۵۶ درصد رتبه‌های اول تا سوم و تراکم مسکونی زیاد با ۰/۰۴ درصد رتبه آخر را به خود اختصاص داده‌اند. در سال ۱۳۶۳ با بارندگی ۴۵ دقیقه‌ای و دوره بازگشت ۲ ساله در کلاس بیشترین میزان (۴/۳۱ متر مکعب)، کاربری‌های اراضی بایر، اراضی کشاورزی و تراکم مسکونی متوسط با ۶۴/۲۲، ۱۰/۴۴ و ۸/۱۲ درصد رتبه‌های اول تا سوم و تراکم مسکونی زیاد با ۰/۰۲ درصد رتبه آخر را به خود اختصاص داده‌اند. در کل در سال ۱۳۶۳ در طی بارندگی‌های ۱۵، ۳۰ و ۴۵ دقیقه‌ای و با دوره بازگشت ۲ ساله در پتانسیل جذب و نگهداشت رواناب، کاربری‌های اراضی بایر، اراضی کشاورزی و تراکم مسکونی متوسط توانسته‌اند بیشترین میزان رواناب را جذب کرده و به زمین نفوذ دهند و کاربری‌های مرتع و آب توانسته‌اند کمترین میزان رواناب را جذب کنند.

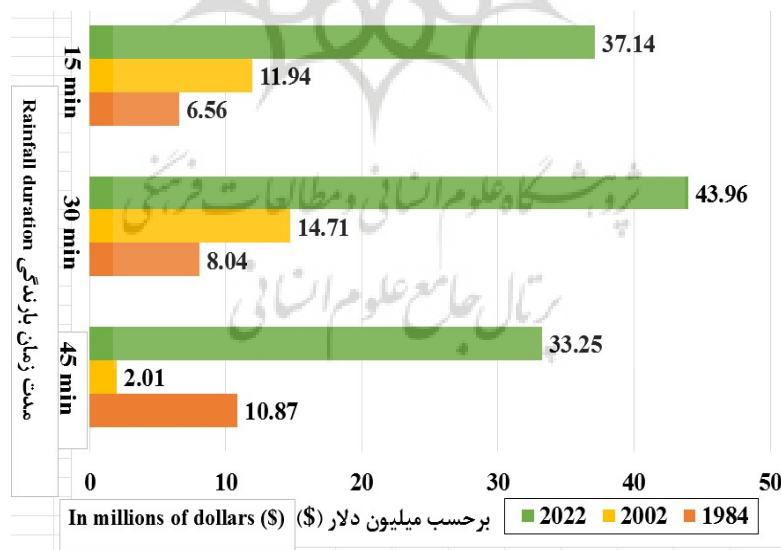
در سال ۱۳۸۱ با بارندگی‌های ۱۵ و ۳۰ دقیقه‌ای، در کلاس بیشترین میزان به ترتیب ۸/۷۷ و ۵/۶۳ متر مکعب، کاربری‌های تراکم مسکونی کم، اراضی کشاورزی و تراکم مسکونی متوسط با ۳۵/۱۸، ۲۶/۲۸ و ۲۴/۳۳ درصد رتبه‌های اول تا سوم و کاربری مرتع با ۰/۰۱ درصد رتبه آخر را به خود اختصاص داده‌اند. در سال ۱۳۸۱ با بارندگی ۴۵ دقیقه‌ای، در کلاس بیشترین میزان (۴/۳۱ متر مکعب)، کاربری‌های اراضی بایر، تراکم مسکونی کم و اراضی کشاورزی به ترتیب با ۵۶/۵۷، ۱۵/۳۸ و ۱۱/۴۶ درصد رتبه‌های اول تا سوم و کاربری مرتع با ۰/۰۱ درصد رتبه آخر را به خود اختصاص داده‌اند. در سال ۱۳۸۱ در طی هر سه بارندگی‌های ۱۵، ۳۰ و ۴۵ دقیقه‌ای و با دوره بازگشت ۲ ساله کاربری‌های اراضی بایر، تراکم مسکونی کم و اراضی کشاورزی توانسته‌اند بیشترین میزان رواناب را جذب کرده و در زمین نفوذ دهند و کاربری‌های آب و مرتع، توانسته‌اند کمترین میزان رواناب را جذب کنند.

در سال ۱۴۰۱ با بارندگی ۱۵ دقیقه‌ای، در کلاس بیشترین میزان (۸/۷۷ متر مکعب) کاربری‌های فضای باز، تراکم مسکونی کم و تراکم مسکونی متوسط به ترتیب با ۳۴/۱۵، ۲۰/۱۵ و ۱۸/۳۶ درصد رتبه‌های اول تا سوم و کاربری مرتع با ۰/۰۰۲ (درصد) رتبه آخر را به خود اختصاص داده‌اند. در سال ۱۴۰۱ با بارندگی ۳۰ دقیقه‌ای، در کلاس بیشترین میزان (۵/۶۳ متر مکعب) کاربری‌های فضای باز، تراکم مسکونی کم و تراکم مسکونی متوسط با ۳۴/۰۸، ۲۰/۱۰ و ۱۸/۳۲ درصد رتبه‌های اول تا سوم و کاربری مرتع با ۰/۰۰۲ درصد رتبه آخر را به خود اختصاص داده‌اند. در سال ۱۴۰۱ با بارندگی ۴۵ دقیقه‌ای و دوره بازگشت ۲ ساله، در کلاس بیشترین میزان (۴/۳۱ متر مکعب) کاربری‌های اراضی بایر، فضای باز و تراکم مسکونی کم با ۳۳/۹۲، ۲۳/۴۳ و ۱۳/۸۱ درصد رتبه‌های اول تا سوم و کاربری مرتع با ۰/۰۰۱ درصد رتبه آخر را به خود اختصاص داده‌اند. در کل در سال ۱۴۰۱ در طی بارندگی‌های ۱۵، ۳۰ و ۴۵ دقیقه‌ای و دوره بازگشت ۲ ساله کاربری‌های اراضی بایر، فضای باز و تراکم مسکونی کم توانسته‌اند بیشترین میزان از رواناب را جذب کرده و به زمین نفوذ دهند و کاربری‌های آب و مرتع نیز تنها توانسته‌اند کمترین میزان از رواناب را جذب کنند.

ارزیابی ارزش پولی خدمت اکوسیستمی کاهش ریسک سیلاب شهری با استفاده از روش هزینه خسارت اجتناب شده در سال ۱۳۶۳ با میزان بارش ۲۱/۹۳ میلی متری (۰/۰۰۰۰۲۲ متر مکعب)، بارندگی ۱۵ دقیقه‌ای، حجم آب جذب و نگهداشته شده ۴/۲۸ میلیون متر مکعب، و میزان منفعت خدمت اکوسیستمی کاهش ریسک سیلاب شهری ۱۰/۸۷ میلیون دلار، با بارندگی ۳۰ دقیقه‌ای، حجم آب جذب و نگهداشته شده ۳/۱۷ میلیون متر مکعب، و میزان منفعت خدمت اکوسیستمی کاهش ریسک سیلاب شهری ۸/۰۴ میلیون دلار و بارندگی ۴۵ دقیقه‌ای و دوره بازگشت ۲ ساله، حجم آب جذب و نگهداشته شده ۲/۵۸ میلیون متر مکعب، و میزان منفعت خدمت اکوسیستمی کاهش ریسک سیلاب شهری ۶/۵۶ میلیون دلار برای کلان‌شهر تبریز بوده است.

در سال ۱۳۸۱ با میزان بارش ۱۴/۰۷ میلی‌متری (۰/۰۰۰۰۱۴ متر مکعب)، بارندگی ۱۵ دقیقه‌ای، حجم آب جذب و نگهداشته شده ۴/۳۷ میلیون متر مکعب، و میزان منفعت خدمت اکوسیستمی کاهش ریسک سیلاب شهری ۲/۰۱ میلیون دلار، با بارندگی ۳۰ دقیقه‌ای، حجم آب جذب و نگهداشته شده ۳/۲۱ میلیون متر مکعب، و میزان منفعت خدمت اکوسیستمی کاهش ریسک سیلاب شهری ۱۴/۷۱ میلیون دلار و بارندگی ۴۵ دقیقه‌ای و دوره بازگشت ۲ ساله حجم آب جذب و نگهداشته شده ۲/۶۰ میلیون متر مکعب، و میزان منفعت خدمت اکوسیستمی کاهش ریسک سیلاب شهری ۱۱/۹۴ میلیون دلار برای کلان‌شهر تبریز بوده است.

در سال ۱۴۰۱ با میزان بارش ۱۰/۷۸ میلی متری (۰/۰۰۰۰۱۱ متر مکعب)، بارندگی ۱۵ دقیقه‌ای، حجم آب جذب و نگهداشته شده ۴/۶۵ میلیون متر مکعب، و میزان منفعت خدمت اکوسیستمی کاهش ریسک سیلاب شهری ۳۳/۲۵ میلیون دلار، با بارندگی ۳۰ دقیقه‌ای، حجم آب جذب و نگهداشته شده ۶/۱۵ میلیون متر مکعب، و میزان منفعت خدمت اکوسیستمی کاهش ریسک سیلاب شهری ۴۳/۹۶ میلیون دلار و بارندگی ۴۵ دقیقه و دوره بازگشت ۲ ساله حجم آب جذب و نگهداشته شده ۵/۲۰ میلیون متر مکعب، و میزان منفعت خدمت اکوسیستمی کاهش ریسک سیلاب شهری ۳۷/۱۴ میلیون دلار برای کلان‌شهر تبریز بوده است که اگر این خدمت اکوسیستمی نبود بایستی همین میزان منفعت ناشی از آن برای جبران خسارت اقتصادی ناشی از سیلاب احتمالی صرف می‌شد (شکل ۷).



شکل ۷- میزان منفعت اقتصادی خدمت اکوسیستمی کاهش ریسک سیلاب شهری تبریز بر اساس دلار برای بارندگی های ۱۵، ۳۰ و ۴۵ دقیقه‌ای با دوره بازگشت ۲ ساله برای سال های ۱۹۸۴، ۲۰۰۲ و ۲۰۲۲

Fig. 7. Economic Benefit of the Ecosystem Service for Urban Flood Risk Mitigation in Tabriz, in US dollars, for 15, 30, and 45-minute rainfall events with a 2-year return period for the years 1984, 2002, and 2022

نتایج و بحث

در طی هر سه دوره ۱۳۶۳، ۱۳۸۱ و ۱۴۰۱ نوع خاک بیشتر قسمت های مناطق دهگانه کلان شهر تبریز (به جز قسمت هایی از مناطق ۴، ۶ و ۷ و قسمت های کوچکی از مناطق دیگر) از نوع لوم و رسی بوده که قابلیت رواناب نسبتاً بالا و بالایی دارد، یعنی به عبارتی قسمت عمده خاک های تبریز، بخش بزرگی از رواناب حاصل از بارندگی را به جای نفوذ در زمین در سطح زمین جاری می سازند که این امر موجب می شود، بیشتر مناطق تبریز دارای پتانسیل رواناب بالایی بوده و در معرض خطر سیلاب شهری باشد. از این رو در کلان شهر تبریز در طی هر سه دوره ۱۳۶۳، ۱۳۸۱ و ۱۴۰۱، در طی هر سه بارندگی های ۱۵، ۳۰ و ۴۵ دقیقه ای و با دوره بازگشت ۲ ساله، مناطق با وسعت بزرگ و نسبتاً بزرگ تبریز از جمله مناطق ۶، ۵ و ۷ که نوع خاک قسمت هایی از مناطق ۶ و ۷ با پتانسیل رواناب پایین و نسبتاً پایین (A و B) می باشد و کاربری قسمت های زیادی از منطقه ۵ از کاربری های اراضی بایر، فضای باز و فضای سبز تشکیل شده، دارای ظرفیت جذب رواناب بالایی می باشد و مناطق با وسعت کوچک و نسبتاً کوچک تبریز یعنی مناطق ۹ و ۸ که بیشتر نوع خاک آن ها از خاک با پتانسیل رواناب بالا (C و D) تشکیل شده، دارای ظرفیت جذب رواناب پایینی می باشند.

افزایش روند مستمر شهرنشینی، تغییرات زیاد کاربری اراضی، افزایش ساخت و سازها و تراکم های شهری تبریز در طی دهه های اخیر باعث شده که قسمت های زیادی از این کلان شهر به سطوح غیر قابل نفوذ تبدیل گردد، چنان که کمترین میزان جذب و نگهداشت رواناب در طی هر سه دوره مربوط به کاربری تراکم مسکونی زیاد بوده است. از این حیث پژوهش حاضر با پژوهش های انجام شده داخلی و خارجی از جمله پژوهش های قدیمی و همکاران (Ghadbeygi et al., 2024) و پژوهش احمدی و همکاران (Ahmadi et al., 2021)، پژوهش گو و ليو (Gu & Liu, 2024) و پژوهش وو و همکاران (Wu et al., 2024) که در این پژوهش ها نیز به ترتیب عامل تراکم به ویژه ساختمان های با تراکم بالا و تراکم جمعیت بیشترین نقش را در افزایش ریسک سیلاب شهری داشته اند، مطابقت دارد.

مرتع اولین کاربری ای است که در بین کاربری های دیگر کلان شهر تبریز دارای پتانسیل رواناب پایینی می باشد، کاربری های آب، فضای سبز و... در رتبه های بعدی قرار دارند، دلیل این که چرا فضای سبز تبریز دارای ظرفیت جذب رواناب پایینی است، این است که فضای سبز تبریز در هر سه دوره ۱۳۶۳، ۱۳۸۱ و ۱۴۰۱ درصد ناچیزی از کل کاربری های تبریز را به خود اختصاص داده است، به طوری که در طی این سه دوره به ترتیب ۶/۲۵، ۵/۳۸ و ۶/۲۳ درصد از کاربری اراضی شهری مربوط به این کاربری بوده و همچنین این که اراضی دارای پوشش گیاهی و علفزارها از جمله فضاهای سبز عمدتاً میزان مشخصی از بارندگی را جذب می کنند، به عبارتی دارای ظرفیت جذب معینی بوده و بیشتر از آن را نمی توانند جذب کنند و بقیه را به صورت رواناب در سطح زمین جاری می سازند. چنان چه در طی هر دو دوره ۱۳۶۳ و ۱۳۸۱ با افزایش مدت زمان بارندگی از ۱۵ به ۳۰ و از ۳۰ به ۴۵ دقیقه ظرفیت جذب و نگهداشت کاربری اراضی/ پوشش اراضی تبریز کاهشی بوده ولی در سال ۱۴۰۱ این روند افزایشی بوده است که این میزان افزایش در این سال می تواند ناشی از کاهش سطوح غیر قابل نفوذ از جمله کاربری مسکونی به میزان ۰/۵۰ بوده باشد. همچنین این که میزان جذب و نگهداشت رواناب در سال ۱۴۰۱ در طی بارندگی ۴۵ دقیقه ای نسبت به بارندگی ۳۰ دقیقه ای نیز کاهشی بوده است. در طی هر سه دوره زمانی و در طی هر سه مدت زمان بارندگی میزان ظرفیت جذب و نگهداشت کاربری اراضی/ پوشش اراضی تبریز با وجود افزایش سطوح غیر قابل نفوذ افزایشی بوده است. به دلیل این که گروه هیدرولوژیکی خاک بیشتر قسمت های کلان شهر تبریز با پتانسیل رواناب نسبتاً بالا و بالا بوده است، بنابراین در این افزایش کاربری اراضی/ پوشش اراضی و تغییرات آن تأثیرگذارتر بوده است. در کل در طی هر سه دوره ۱۳۶۳، ۱۳۸۱ و ۱۴۰۱ در کلان شهر تبریز، زیرساخت های سبز (فضای سبز، اراضی کشاورزی و مرتع) نسبت به زیرساخت های آبی به جز یک مورد (بارندگی ۱۵ دقیقه ای سال ۱۳۸۱) نقش بیشتری در کاهش ریسک سیلاب شهری داشته است که از این جهت پژوهش حاضر با پژوهش وانگ و همکاران (Wang et al., 2024) مطابقت دارد.

نتیجه‌گیری

هدف از این پژوهش، ارزیابی نقش خدمت اکوسیستمی کاهش ریسک سیلاب شهری کلان‌شهر تبریز بوده است. نتایج نشان داد که مناطقی که در آن‌ها تراکم جمعیتی و به تبع آن کاربری با تراکم مسکونی زیاد بیشتر بوده، کمترین میزان جذب و نگهداشت رواناب را داشته‌اند. در کلان‌شهر تبریز به دلیل ناچیز بودن میزان کاربری‌های مرتبط با زیرساخت‌های سبز از جمله فضای سبز، اراضی کشاورزی و مرتع، این کاربری‌ها نقش چندان زیادی در کاهش ریسک سیلاب شهری (جذب و نگهداشت رواناب) نداشته‌اند. زیرساخت‌های سبز در مقایسه با زیرساخت‌های آبی نقش بیشتری را در کاهش ریسک سیلاب شهری تبریز داشته‌اند. همچنین در پتانسیل جذب و نگهداشت رواناب، کاربری اراضی/ پوشش اراضی در مقایسه با گروه هیدرولوژیکی خاک نقش بیشتری را داشته است. همچنین نتایج نشان داد که نقش خدمت اکوسیستمی کاهش ریسک سیلاب شهری تبریز نسبتاً چشمگیر بوده است که اگر این نقش نبود کلان‌شهر تبریز باید متحمل هزینه‌های ناشی از ریسک سیلاب احتمالی و خسارات تصاعدی آن می‌شد. مدل InVEST در ارزیابی خدمت اکوسیستمی کاهش ریسک سیلاب شهری (UFRM) تبریز، در سطح متوسط موفق عمل نموده است، اما این مدل محدودیت‌هایی نیز دارد که عبارت است از:

۱) خطاهای ورودی داده‌ها: مدل InVEST به شدت به دقت نقشه‌های کاربری اراضی/ پوشش اراضی وابسته است. در این پژوهش، نقشه‌ها از تصاویر لندست تهیه شده‌اند که رزولوشن ۳۰ متری آن‌ها ممکن است جزئیات کوچک (مانند باغ‌های بارانی یا سطوح نفوذپذیر محلی) را نادیده بگیرد.

۲) فرضیات ساده‌سازی شده مدل: مدل InVEST بر اساس روش SCS-CN (عدد منحنی) عمل می‌کند که در آن فرضیاتی مانند $\lambda=0/2$ (میزان بارندگی لازم برای شروع رواناب) را اعمال می‌کند. این فرضیات برای مناطق شهری پیچیده مانند تبریز (با رودخانه‌های عبوری و مسیل‌های متعدد) ممکن است دقیق نباشد، زیرا عوامل توپوگرافیکی یا ظرفیت اشباع خاک را به طور کامل در نظر نمی‌گیرد.

۳) عدم حساسیت به تغییرات زمانی و مکانی: مدل InVEST توزیع بارش را یکنواخت فرض می‌کند، در حالی که بارش در تبریز (بر اساس ایستگاه سینوپتیک) ممکن است در مناطق شمالی و جنوبی متفاوت باشد. این امر منجر به خطا در محاسبه حجم نگهداشت رواناب شده، به طوری که در سال ۱۴۰۱ با بارندگی ۴۵ دقیقه‌ای، حجم رواناب جذب و نگهداشته شده ۵/۲۰ میلیون متر مکعب برآورد شده، اما واقعیت ممکن است به دلیل افزایش سطوح غیرقابل نفوذ کمتر از این میزان باشد.

۴) خطاهای محاسباتی و خروجی: خروجی‌های رستری مدل InVEST (مانند نقشه‌های جذب رواناب) ممکن است به دلیل مقیاس پیکسلی، تغییرات فضایی را دقیق نشان ندهد. برای مثال، در مناطق ۹ و ۸ با وسعت کوچک، پتانسیل رواناب پایین‌تر برآورد شده، اما این بیشتر به وسعت محدود این مناطق مربوط است تا ویژگی‌های واقعی، که نشان‌دهنده خطای محاسباتی مکانی مدل است. در کل، محدودیت‌های مدل بیشتر جنبه ورودی و فرضیاتی دارد و مدل در سناریوهای ساده (مانند تمرکز بر خاک) دقیق عمل می‌کند، اما برای کاربری‌های پیچیده شهری نیاز به کالیبراسیون محلی نیز دارد. بر اساس نتایج پژوهش، پیشنهاد‌های زیر در دو زمینه کاربرد عملی و تحقیقاتی ارائه می‌شود تا به بهبود مدیریت ریسک سیلاب شهری تبریز و تحقیقات مشابه آتی کمک کند.

پیشنهاد‌های کاربردی (عملی):

۱) توسعه زیرساخت‌های سبز: با توجه به نقش محدود فضای سبز در جذب رواناب (کمتر از ۶ درصد از کاربری اراضی)، شهرداری تبریز باید برنامه‌هایی برای افزایش فضای سبز شهری (مانند بام‌های سبز، باغ‌های بارانی و روسازی‌های نفوذپذیر) طراحی کرده و اجرا کند. اولویت باید با مناطق پرریسک مانند مناطق ۶، ۵ و ۷ باشد که پتانسیل جذب بالایی دارند، و از اراضی کشاورزی و مراتع اطراف شهر نیز از طریق قوانین سخت‌گیرانه حفاظت به عمل آید.

۲) بهبود سیستم‌های زهکشی ترکیبی: ترکیب اقدامات خاکستری (مانند بهبود شبکه زهکشی) با اقدامات سبز (مانند جنگل‌های شهری) پیشنهاد می‌شود. برای مثال، در مناطق با تراکم مسکونی زیاد (مانند مناطق مرکزی)، نصب سیستم‌های LID^۱ می‌تواند ظرفیت جذب را افزایش داده و خسارات اقتصادی را کاهش دهد (مانند اجتناب از ۳۷ میلیون دلار خسارت اجتناب شده ناشی از خدمت اکوسیستمی کاهش ریسک سیلاب شهری تبریز برای سال ۱۴۰۱).

۳) آموزش و آگاهی عمومی: برنامه‌های آموزشی برای شهروندان در مورد اهمیت حفظ مسیل‌ها و رودخانه‌ها (مانند آبی‌چای و قوری‌چای) و جلوگیری از ساخت‌وسازهای غیرمجاز اجرا شود. همچنین، ادغام نتایج مدل InVEST در برنامه‌ریزی شهری تبریز برای شناسایی مناطق پرریسک و تخصیص بودجه برای کاهش میزان ریسک آن.

۴) پایش مداوم و سناریوسازی: ایجاد سیستم پایش مداوم بارش و رواناب واقعی با استفاده از سنسورها در ایستگاه‌های محلی، و شبیه‌سازی سناریوهای آینده (مانند افزایش شهرنشینی) برای پیش‌بینی میزان ریسک.

پیشنهادهای تحقیقاتی:

۱) استفاده از مدل‌های پیشرفته‌تر: تحقیقات آینده می‌توانند مدل InVEST را با مدل‌های یادگیری ماشین (مانند MaxEnt یا SVM) ترکیب کنند تا دقت ارزیابی میزان ریسک افزایش یابد. همچنین، بررسی سناریوهای تغییرات آب‌وهوایی (مانند SSP) برای پیش‌بینی میزان ریسک تا سال ۲۰۵۰.

۲) توسعه زمانی و مکانی: پژوهش‌های آتی با استفاده از دوره‌های زمانی بیشتر (از سال ۱۴۰۱ به بعد) انجام شده و نتیجه آن با سایر کلان‌شهرها (مانند تهران یا اصفهان) مقایسه شود. همچنین، در نظر گرفتن عوامل انسانی مانند مهاجرت و رشد جمعیت در این زمینه.

۳) بهبود داده‌ها و کالیبراسیون: تحقیقات آتی از داده‌های میدانی دقیق (مانند نمونه‌برداری خاک) و تصاویر ماهواره‌ای با رزولیشن بالاتر (مانند Sentinel) استفاده کنند. کالیبراسیون مدل InVEST با داده‌های محلی تبریز برای کاهش خطاهای کاربری اراضی پیشنهاد می‌شود.

۴) ارزیابی اقتصادی دقیق‌تر: بررسی روش‌های ارزش‌گذاری جایگزین (مانند هزینه جایگزینی) و ادغام عوامل تورم محلی برای برآورد دقیق‌تر منافع ناشی از خدمات اکوسیستمی.

تعارض منافع

بنابر اظهار نویسندگان این مقاله تعارض منافع ندارد.

References

- Ahiablame, L., & Shakya, R. (2016). Modeling flood reduction effects of low impact development at a watershed scale. *Journal of Environmental Management*, 171, 81-91. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2016.01.036>
- Ahmadi, Y., Bazrafshan, O. B., Salajeghe, A., Holisaz, A., & Azare, A. (2021). Risk analysis of urban flood in Bandar Abbas using Machine Learning model and Analytic Hierarchy Process, *Journal of Environmental Erosion Research*, 11(1), 36-57. [In Persian] <https://doi.org/10.52547/jeer.11.1.36>
- Alderman, K., Turner, L. R., & Tong, S. (2012). Floods and human health: a systematic review. *Environment International*, 47, 37-47. <https://doi.org/10.1016/j.envint.2012.06.003>

- Bose, S., & Mazumdar, A. (2023). Urban flood risk assessment and mitigation with InVEST-UFRM model: a case study on Kolkata city, West Bengal state (India). *Arabian Journal of Geosciences*, 16(5), 320. <https://doi.org/10.1007/s12517-023-11486-y>
- Dai, K., Cheng, C., Shen, S., Geng, J., & Zhang, T. (2024). Evaluating future flood risk mitigation capacities in major cities across China. *Urban Climate*, 55, 101890. <https://doi.org/10.1016/j.uclim.2024.101890>
- Ekmekcioğlu, Ö., Koc, K., & Özger, M. (2021). District based flood risk assessment in Istanbul using fuzzy analytical hierarchy process. *Stochastic Environmental Research and Risk Assessment*, 35, 617-637. <https://doi.org/10.1007/s00477-020-01924-8>
- Farahnakian, Z., Ghazavi, R., Dokhan, S., & Omidvar, E. (2024). Investigating the effect of climate change on temperature, rainfall, and intensity-duration-frequency curves in dry areas (case study: Kashan Watershed). *Journal of Water and Soil Management and Modelling*, 4(2), 211-226. [In Persian] <https://doi.org/10.22098/mmws.2023.12570.1254>
- Fletcher, T. D., Shuster, W., Hunt, W. F., Ashley, R., Butler, D., Arthur, S., ... & Viklander, M. (2015). SUDS, LID, BMPs, WSUD and more—The evolution and application of terminology surrounding urban drainage. *Urban water journal*, 12(7), 525-542. <https://doi.org/10.1080/1573062X.2014.916314>
- Fotouhi, S., & Kiani, S. (2015). Micro-zonation of the Urban Flood Risk Model Using AHP (Case Study: Nahavand city). *Quarterly Journal of Environmental-based Territorial Planning*, 8(29), 133-152. [In Persian] https://journals.iau.ir/article_515572.html
- Ghadbeygi, M., Mazaheri, H., Shafiei, H., & Mardian, M. (2024). Urban flood risk management, a solution for the protection of ecosystems (Case study: Arak City). *Journal of Research in Ethnobiology and Conservation*, 1(2), 38-50. [In Persian] <https://doi.org/10.22091/ETHC.2024.10558.1018>
- Ghahraman, B., & Abkhezr, H. (2004). Improvement in Intensity-Duration-Frequency Relationships of Rainfall in Iran. *Journal of Water and Soil Science*, 8(2), 1-14. [In Persian] <https://doi.org/20.1001.1.24763594.1383.8.2.1.4>
- Gitika, T., & Ranjan, S. (2014). Estimation of surface runoff using NRCS curve number procedure in Buriganga Watershed, Assam, India—a geospatial approach. *International Research Journal of Earth Sciences*, 2(5), 1-7. https://www.isca.in/EARTH_SCI/Archive/v2/i5/1.ISCA-IRJES-2014-011.php
- Gu, X., & Liu, X. (2024). Planning scale flood risk assessment and prediction in ultra-high density urban environments: The case of Hong Kong. *Ecological Indicators*, 162, 112000. <https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2024.112000>
- Hou, J., Liu, F., Tong, Y., Guo, K., Ma, L., & Li, D. (2020). Numerical simulation for runoff regulation in rain garden using 2D hydrodynamic model. *Ecological Engineering*, 153, 105794. <https://doi.org/10.1016/j.ecoleng.2020.105794>
- Kuller, M., Farrelly, M., Deletic, A., & Bach, P. M. (2018). Building effective Planning Support Systems for green urban water infrastructure—Practitioners' perceptions. *Environmental Science & Policy*, 89, 153-162. <https://doi.org/10.1016/j.envsci.2018.06.011>
- Liang, C. Y., You, G. J. Y., & Lee, H. Y. (2019). Investigating the effectiveness and optimal spatial arrangement of low-impact development facilities. *Journal of Hydrology*, 577, 124008. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2019.124008>
- Ma, Y., Deilami, K., Egodawatta, P., Liu, A., McGree, J., & Goonetilleke, A. (2019). Creating a hierarchy of hazard control for urban stormwater management. *Environmental Pollution*, 255, 113217. <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2019.113217>
- MahmoodZadeh, H., Emami Kia, V., & Rasooli, A. A. (2015). Micro Zonation of Flood Risk in Tabriz Suburb with using Analytical Hierarchy Process. *Journal of Geographical Research*, 30(1), 167-180. [In Persian] https://jgr.ui.ac.ir/article_18098.html?

- Peng, J., & Zhang, J. (2022). Urban flooding risk assessment based on GIS-game theory combination weight: A case study of Zhengzhou City. *International Journal of Disaster Risk Reduction*, 77, 103080. <https://doi.org/10.1016/j.ijdr.2022.103080>
- Pham, B. T., Luu, C., Van Phong, T., Nguyen, H. D., Van Le, H., Tran, T. Q., ... & Prakash, I. (2021). Flood risk assessment using hybrid artificial intelligence models integrated with multi-criteria decision analysis in Quang Nam Province, Vietnam. *Journal of Hydrology*, 592, 125815. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2020.125815>
- Prudencio, L., & Null, S. E. (2018). Stormwater management and ecosystem services: A review. *Environmental Research Letters*, 13(3), 033002. <https://doi.org/10.1088/1748-9326/aaa81a>
- Pyke, C., Warren, M. P., Johnson, T., LaGro Jr, J., Scharfenberg, J., Groth, P., ... & Main, E. (2011). Assessment of low impact development for managing stormwater with changing precipitation due to climate change. *Landscape and Urban Planning*, 103(2), 166-173. <https://doi.org/10.1016/j.landurbplan.2011.07.006>
- Qi, W., Ma, C., Xu, H., Chen, Z., Zhao, K., & Han, H. (2021). A review on applications of urban flood models in flood mitigation strategies. *Natural Hazards*, 108, 31-62. <https://doi.org/10.1007/s11069-021-04715-8>
- Qin, H. P., Li, Z. X., & Fu, G. (2013). The effects of low impact development on urban flooding under different rainfall characteristics. *Journal of Environmental Management*, 129, 577-585. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2013.08.026>
- Rentschler, J., Avner, P., Marconcini, M., Su, R., Strano, E., Vousdoukas, M., & Hallegatte, S. (2023). Global evidence of rapid urban growth in flood zones since 1985. *Nature*, 622(7981), 87-92. <https://doi.org/10.1038/s41586-023-06468-9>
- Row, S. (1976). *Appendix I : USDA / SCS curve number method for estimating daily runoff*, 88-90.
- Rözer, V., Mehryar, S., & Surminski, S. (2022). From managing risk to increasing resilience: a review on the development of urban flood resilience, its assessment and the implications for decision making. *Environmental Research Letters*, 17(12), 123006. <https://doi.org/10.1088/1748-9326/aca8bc>
- Rufat, S., & Botzen, W. W. (2022). Drivers and dimensions of flood risk perceptions: Revealing an implicit selection bias and lessons for communication policies. *Global Environmental Change*, 73, 102465. <https://doi.org/10.1016/j.gloenvcha.2022.102465>
- Sharp, R., Douglass, J., Wolny, S., Arkema, K., Bernhardt, J., Bierbower, W., ... & Wyatt, K. (2020). SDR: Sediment Delivery Ratio—InVEST documentation. *InVEST*, 3(2). <https://storage.googleapis.com/releases.naturalcapitalproject.org/invest/3.9.0/userguide/index.html>
- Sohn, W., Kim, J. H., Li, M. H., & Brown, R. (2019). The influence of climate on the effectiveness of low impact development: A systematic review. *Journal of Environmental Management*, 236, 365-379. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2018.11.041>
- Soomro, A. G., Babar, M. M., Memon, A. H., Zaidi, A. Z., Ashraf, A., & Lund, J. (2019). Sensitivity of direct runoff to curve number using the SCS-CN method. *Civil Engineering Journal*, 5(12), 2738-2746. <https://doi.org/10.28991/cej-2019-03091445>
- Tabeyi, N., Babaee Aghdam, F., & Hakimi, H. (2022). Inclusive city; A new approach in urban planning A case study the Tabriz city. *Journal of Geographical Urban Planning Research*, 10(2), 115-132. [In Persian] <https://doi.org/10.22059/JURBANGEO.2022.335543.1627>
- Tellman, B., Sullivan, J. A., Kuhn, C., Kettner, A. J., Doyle, C. S., Brakenridge, G. R., ... & Slayback, D. A. (2021). Satellite imaging reveals increased proportion of population exposed to floods. *Nature*, 596(7870), 80-86. <https://doi.org/10.1038/s41586-021-03695-w>
- Tessema, S. M., Lyon, S. W., Setegn, S. G., & Mörtberg, U. (2014). Effects of different retention parameter estimation methods on the prediction of surface runoff using the SCS curve number method. *Water Resources Management*, 28, 3241-3254. <https://doi.org/10.1007/s11269-014-0674-3>

- UN Office for Disaster Risk Reduction. (2020). *Human cost of disasters. An overview of the last 20 years 2000-2019*. UN.
- Vilca-Campana, K., Carrasco-Valencia, L., Iruri-Ramos, C., Cárdenas-Pillco, B., Escudero, A., & Chanove-Manrique, A. (2024). *An Ecosystem Service Evaluation for Urban Flood Mitigation in a Desert Region Using the Invest Model*. Available at SSRN 4885367. <http://dx.doi.org/10.2139/ssrn.4885367>
- Wang, Y., Peng, L., Yang, L. E., Wang, Z., & Deng, X. (2024). Attributing effects of classified infrastructure management on mitigating urban flood risks: A case study in Beijing, China. *Sustainable Cities and Society*, 101, 105141. <https://doi.org/10.1016/j.scs.2023.105141>
- Wu, M., Wei, X., Ge, W., Chen, G., Zheng, D., Zhao, Y., ... & Xin, Y. (2024). Analyzing the spatial scale effects of urban elements on urban flooding based on multiscale geographically weighted regression. *Journal of Hydrology*, 132178. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2024.132178>
- Yazdani, M. H., Ghasemi, M., & Saleki Maleki, M. A. (2018). Micro-zoning vulnerability of cities against flood risk (case study: Tabriz city). *Journal of Rescue and Relief*, 10(4), 33-44. [In Persian] <http://jorar.ir/article-1-355-en.html>
- Zeng, S., Guo, H., & Dong, X. (2019). Understanding the synergistic effect between LID facility and drainage network: With a comprehensive perspective. *Journal of Environmental Management*, 246, 849-859. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2019.06.028>
- Zeynali Azim, A., Hatami Golzari, E., Karami, I., & Babazadeh Oskoui, S. (2021). Measuring the Environmental Sustainability of Tabriz City Based on Environmental Indicators of Smart Urban Growth. *Journal of Sustainability, Development & Environment*, 2(3), 41-59. [In Persian] <https://sanad.iau.ir/Journal/jsde/Article/846581/FullText>
- Zischg, J., Goncalves, M. L., Bacchin, T. K., Leonhardt, G., Viklander, M., Van Timmeren, A., ... & Sitzenfrie, R. (2017). Info-Gap robustness pathway method for transitioning of urban drainage systems under deep uncertainties. *Water Science and Technology*, 76(5), 1272-1281. <https://doi.org/10.2166/wst.2017.320>