



Evaluation of Urban Flood Risk Mitigation Ecosystem Service (UFRM) 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:

Ecosystem Service

Urban Flood Risk Mitigation

Urban Water and Green Infrastructure

InVEST Software

Tabriz Metropolitan

ABSTRACT

Urban flooding can result in severe damage to infrastructure, significant loss of life and property, and substantial economic and social impacts. Blue and green infrastructure plays a critical role in mitigating urban flood risk. This study evaluates the contribution of ecosystem services to flood risk mitigation in the Tabriz metropolitan area for a 2-year return period. In this study using Landsat satellite imagery, land use/land cover data, meteorological information, biophysical tables, Geographic Information Systems (GIS), and the InVEST software, assessed the ecosystem service of urban flood risk mitigation in Tabriz. The results indicate that in 1984, for a 2-year return period, the volume of water absorbed and retained, along with the economic value of ecosystem services for flood mitigation, was 4.28 million cubic meters and \$10.87 million for a 15-minute rainfall event, 3.17 million cubic meters and \$8.04 million for a 30-minute rainfall event, and 2.58 million cubic meters and \$6.56 million for a 45-minute rainfall event. In 2002, the corresponding values were 4.37 million cubic meters and \$2.01 million (15-minute rainfall), 3.21 million cubic meters and \$14.71 million (30-minute rainfall), and 2.60 million cubic meters and \$11.94 million (45-minute rainfall). In 2022, the values were 4.65 million cubic meters and \$33.25 million (15-minute rainfall), 6.15 million cubic meters and \$43.96 million (30-minute rainfall), and 5.20 million cubic meters and \$37.14 million (45-minute rainfall). 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 mitigating urban flood risk. In the potential for absorption and retention of runoff in Tabriz, 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.

* Corresponding author: Dr. Hassan Mahmoudzadeh

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

How to cite this article: Herischian, M., & Mahmoudzadeh, M. (2025). Evaluation of Urban Flood Risk Mitigation Ecosystem Service (UFRM) With A Short Term Approach (2 Years), Case Study: Tabriz Metropolitan. *Journal of Geography and Environmental Hazards*, ?(?), ?-?. <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 cubic meters), 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) situation in Tabriz city indicates that the area of impervious surfaces has been continuously increasing across all three periods (1984, 2002, and 2022), with the exception of 2022, which saw a slight decreasing trend. Specifically, residential land use increased by approximately 16.54% from 1984 to 2002, but then experienced a decrease of about 0.50% from 2002 to 2022. This increase in impervious surfaces has reduced the capacity of most districts in the Tabriz metropolitan area to absorb and retain runoff, thereby heightening the risk of urban flooding. Continued expansion of impervious surfaces in the future could further exacerbate flooding risks, potentially submerging urban infrastructure, increasing economic losses, and threatening the stability of Tabriz.

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 cubic meters valued at \$10.87 million; for a 30-minute rainfall, 3.17 million cubic meters valued at \$8.04 million; and for a 45-minute rainfall, 2.58 million cubic meters valued at \$6.56 million. In 2002, the corresponding values were: for a 15-minute rainfall, 4.37 million cubic meters valued at \$2.01 million; for a 30-minute rainfall, 3.21 million cubic meters valued at \$14.71 million; and for a 45-minute rainfall, 2.60 million cubic meters valued at \$11.94 million. In 2022, the values were: for a 15-minute rainfall, 4.65 million cubic meters valued at \$33.25 million; for a 30-minute rainfall, 6.15 million cubic meters valued at \$43.96 million; and for a 45-minute rainfall, 5.20 million cubic meters valued at \$37.14 million.

Conclusions

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.



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

چکیده	اطلاعات مقاله
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 موثری در کاهش ریسک سیلاب شهری ایفاء می کنند. از این رو هدف این پژوهش ارزیابی نقش خدمت اکوسیستمی کاهش ریسک سیلاب شهری کلانشهر تبریز با دوره بازگشت ۲ ساله می باشد. در این پژوهش با استفاده از داده های تصاویر ماهواره ای لندست، کاربری اراضی/پوشش اراضی، هوشناسی، 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 دروه 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 کلانشهر 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 نسبتا چشم گیر بوده است.	تاریخچه مقاله: تاریخ دریافت: ۱۴۰۴/۰۴/۰۱ تاریخ بازنگری: ۱۴۰۴/۰۶/۲۵ تاریخ پذیرش: ۱۴۰۴/۰۶/۲۷ کلمات کلیدی: خدمت اکوسیستمی کاهش ریسک سیلاب شهری زیرساخت های آبی و سبز شهری نرم افزار InVEST کلانشهر تبریز

مقدمه

با تغییرات اقلیمی جهانی و شهرنشینی سریع، سیلاب شهری به طور مداوم افزایش پیدا کرده و باعث بروز آسیب های شدید در سرتاسر جهان شده است (Tellman et al., 2021). بلایای مرتبط با سیل به یکی از شایع ترین و مخرب ترین مخاطرات در سرتاسر جهان تبدیل شده که در نتیجه آن نسبت جمعیت در معرض خطر سیل به طور مداوم افزایش پیدا می کند (Rentschler et al., 2023; Tellman et al., 2021). در مناطق شهری پرجمعیت و متراکم، سیل منجر به خسارات انسانی و اقتصادی عمده ای مانند آسیب به زیرساخت ها، کاهش بازده محصولات کشاورزی، وقفه های ارتباطی (Pham et al., 2021)، و ریسک های انسانی (Alderman, Turner & Tong, 2012) می شود (Peng & Zhang, 2022). چنان چه طی ماه های 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 بارندگی های 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 می شود میزان این خسارت ها در حد میلیاردها یورو باشد. چین بیشترین میزان آسیب ها 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 تاثیر 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 تاثیر سیل قرار می گیرند 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 می شود که در نتیجه آن توسعه پایدار انسانی، اقتصادی و اجتماعی مورد تهدید جدی قرار می گیرد (Rözer et al., 2022; Rufat & Botzen, 2022). با این وجود، به دلیل افزایش فراوانی رخداد های شدید اقلیمی و سیستم های زهکشی نسبتاً قدیمی در مقایسه با توسعه سریع شهری، سیلاب شهری به طور مکرر رخ می دهد که به طور مستقیم بر حمل و نقل روزانه مردم تأثیر گذاشته و زندگی و سلامتی آنها را به خطر می اندازد (Ekmekcioğlu, Koc & Özger, 2021).

اقدامات مرتبط با کاهش سیلاب شهری جزء مهم ترین استراتژی های تصمیم گیری جهت پیشگیری و کاهش سیلاب شهری است. این اقدامات را می توان به دو نوع طبقه بندی 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 گسترده ای در مناطق شهری برای جابجایی 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 می کنند. با این حال، اثربخشی این اقدامات چندان مطلوب نیست و به سرمایه گذاری های اقتصادی گسترده ای نیاز دارد (Sohn, Kim, Li & Brown, 2019). از این رو، استراتژی های مدیریتی پایدار رواناب رگباری مبتنی بر طبیعت، مانند رویکردهای بهینه مدیریت در ایالات متحده، سیستم های زهکشی پایدار شهری در بریتانیا، و شهر اسفنجی در چین، در سال های 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 زندگی شان می شود. اقدامات کاهشی سبز، مانند بام های سبز، باغ های بارانی، و روسازی های نفوذ پذیر، فضاهای سبز شهری، جنگل های شهری و در کل زیرساخت های سبز شهری نقش مهمی در تنظیم رواناب رگباری از طریق خدمات زیست محیطی ایفا می کنند (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 می شود.

(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 دریافته اند 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 می یابد، ممکن است همیشه بهترین راه حل نباشد (Hou et al., 2020). این مورد ناشی از ظرفیت محدود ذخیره سازی آن ها است که می تواند 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 سیلاب های ویرانگر در آن رخ داده و ویرانی های زیادی بر جای بگذارد. علاوه بر دو رود اصلی که طول شهر را طی می کنند، مسیل های فراوانی نیز در عرض شهر وجود دارد که از ارتفاعات شمالی و جنوبی شهر شروع و در بافت میانی به دو رود اصلی شهر می پیوندند. توسعه روزافزون شهر به خصوص پس از انقلاب اسلامی که با مهاجرت های گسترده و توسعه کالبدی یک باره شهر همراه بود، موجب شده شهر تبریز روی یک پهنه وسیع سیلابی گسترده شود. از طرفی اکثر این توسعه ها یا کاملاً بی برنامه و بی ضابطه 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 مسیل ها و رودخانه های فصلی و دائمی منجر به بروز بحران های شدید و بروز سیلاب های متعدد برای شهر تبریز شده که این بحران ها هر ساله خسارات شدیدی را به همراه داشته است (Yazdani, 2018; Ghasemi & Saleki Maleki, 2018). در پژوهشی که محمودزاده و همکاران (MahmoodZadeh, Emami Kia & Rasooli, 2015) در مورد ریز پهنه بندی خطر سیل در محدوده شهر تبریز انجام داده اند بیان کرده اند که طبق نقشه ارزیابی خسارات، بیشترین خسارات مربوط به مناطقی است که از بافت فرسوده، مصالح غیر استاندارد و نامقاوم برخوردارند. این مناطق اگرچه از تراکم مسکونی کمی برخوردارند و رشد عمودی چندانی ندارند؛ اما تراکم جمعیت در آن ها بیشتر از مناطق نوساز شهر است. با توجه به ضرورت های 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 عرصه های داخلی و خارجی پژوهش های متعددی انجام شده که در ادامه به تعدادی از آن ها اشاره می شود. در عرصه داخلی فتوحی و کیانی (Fotouhi & Kiani, 2015) در طی پژوهشی ریز پهنه بندی 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, 2021; Bazrafshan, Salajeghe, Holisaz & Azare, 2021) ریسک و آسیب پذیری سیلاب شهری بندرعباس را با استفاده از مدل یادگیری ماشینی بیشینه بی نظمی (MaxEnt) و ماشین بردار پشتیبان (SVM)، تحلیل سلسله مراتبی AHP و GIS انجام داده و به این نتیجه رسیدند که در ریسک و آسیب پذیری سیلاب شهری بندرعباس عامل تراکم جمعیت دارای بیشترین اهمیت است. قدیگی و همکاران (Ghadbeygi, Mazaheri, Shafiei & Mardian, 2024) مدیریت ریسک سیلاب شهری شهر اراک را با استفاده از مدل تصمیم گیری چندمعیاره AHP، مدل TOPSIS و GIS انجام دادند. نتایج نشان داد که حدود ۷۷۷ هکتار از مساحت شهر که ۶/۶۳ درصد را شامل می شود و عمدتاً مرکز شهر و پیرامون رودخانه کرهرود را در بر می گیرد، دارای پتانسیل ریسک بالای سیلاب است. در این مناطق که پتانسیل ریسک سیلاب شهر اراک بالاتر است، عمدتاً شیب کمتر، فاصله تا رودخانه و مسیل ها کمتر و تراکم جمعیت بالاتر می باشد. در عرصه خارجی نیز گو و لیو (Gu & Liu, 2024) پیش بینی خطر سیل را برای شهر هنگ کنگ با استفاده از مدل تحلیل

مؤلفه های اصلی (PCA) انجام داده و به این نتیجه رسیدند که با برنامه ریزی ثالث (TPU¹)، شاخص خطر سیل (FRI²) سالانه افزایش می یابد که در نتیجه آن بیشترین تهدیدات متوجه مناطق با تراکم حمل و نقلی و امکانات عملکردی بالا خواهد بود. علاوه بر این، شاخص خطر سیل بر مجموعه برنامه ریزی ثالث ساحلی آبی در غرب هنگ کنگ تأثیر زیادی خواهد گذاشت و در نتیجه بیشترین تأثیرات منفی آن متوجه مناطق دارای ساختمان های 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 آن ها نشان داد که دوره بازگشت بارش های شدید، تراکم جمعیت و نیروی انسانی ورودی از جمله مؤثرترین عوامل بر سیلاب شهری بوده است. شیب، فاصله از رودخانه و نسبت مساحت جاده ای کمترین تأثیر را بر سیلاب شهری داشتند. دای و همکاران (Dai, Cheng, Shen, Geng & Zhang, 2024) ظرفیت کاهش خطر سیل های آبی در شهرهای بزرگ چین را با استفاده از مدل شبیه سازی محیط های شهری - منطقه ای آینده (SSP³) انجام داده و به این نتیجه رسیدند که (۱) پیش بینی می شود اندازه شهرهای بزرگ تا سال ۲۰۵۰، ۳۰ درصد افزایش یابد و شمال و شرق چین جزء قطب های 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 شده اند. وانگ و همکاران (Wang, Peng, Yang, Wang & Deng, 2024) بررسی تأثیرات نسبتی مدیریت زیرساخت های طبقه بندی شده بر کاهش خطر سیلاب شهری شهر پکن را با استفاده از رگرسیون لجستیک انجام دادند. نتایج نشان داد که زیرساخت های سبز نقش مؤثرتری در کاهش مخاطرات مرتبط با سیل در بیشتر مناطق شهری پکن دارد تا زیرساخت های آبی، در حالی که زیرساخت های خاکستری خطر سیل را به ویژه در حومه های شمال شرقی افزایش می دهد. نوآوری این پژوهش عبارت است از:

استفاده از مدل InVEST: این پژوهش نخستین مطالعه داخلی است که از مدل UFRM بسته نرم افزاری InVEST 3.12.0 برای ارزیابی خدمت اکوسیستمی کاهش ریسک سیلاب شهری استفاده کرده است. پژوهش های داخلی قبلی عمدتاً بر مدل های تصمیم گیری چندمعیاره مانند AHP، TOPSIS، GIS و مدل های یادگیری ماشینی (مانند MaxEnt و SVM) مبتنی بوده اند و به ارزیابی خدمت اکوسیستمی کاهش ریسک سیلاب شهری با این مدل نپرداخته اند.

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 داده اند، 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 می کند. مطالعات خارجی (مانند مطالعاتی که با استفاده از مدل های PCA، MGWR، SSP و رگرسیون لجستیک انجام شده) اغلب بر پیش بینی 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

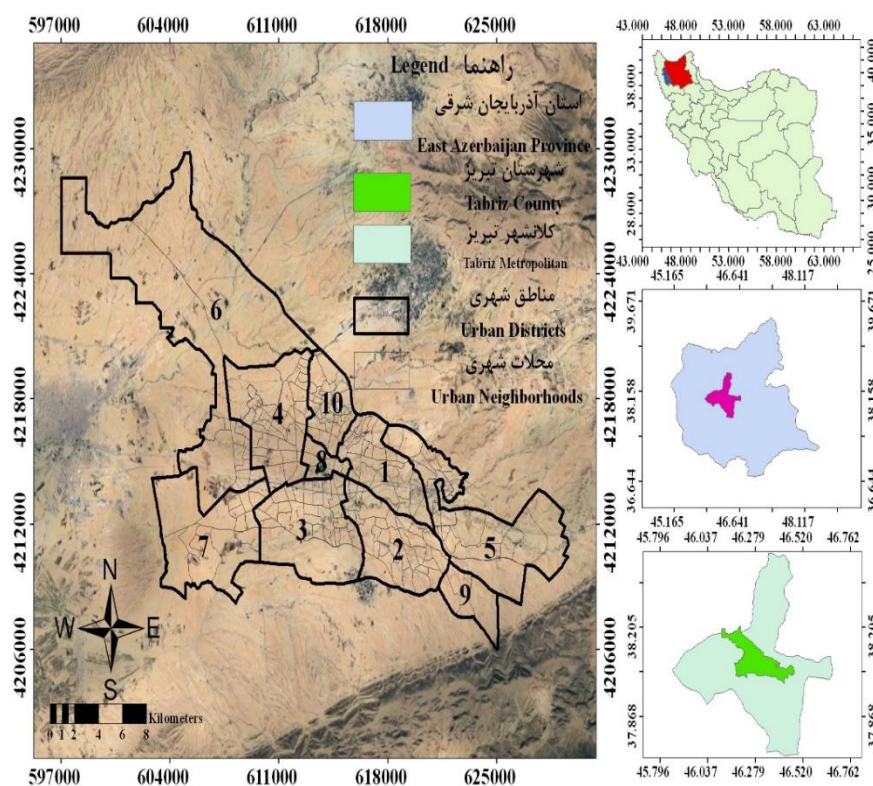
2-Flood Risk Index

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 نصف النهار 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 آجی چای (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, Babaee 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 شیپ 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 رخداد‌های با دوره‌های بازگشت مخصوصا دوره‌های بازگشت طولانی است که به صورت میلی متر 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، ۲۱/۹۳، ۴۵ دقیقه‌ای، ۱۴/۰۷ و ۱۰/۷۸ میلی متر 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 relationship (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

نقشه کاربری اراضی/پوشش اراضی

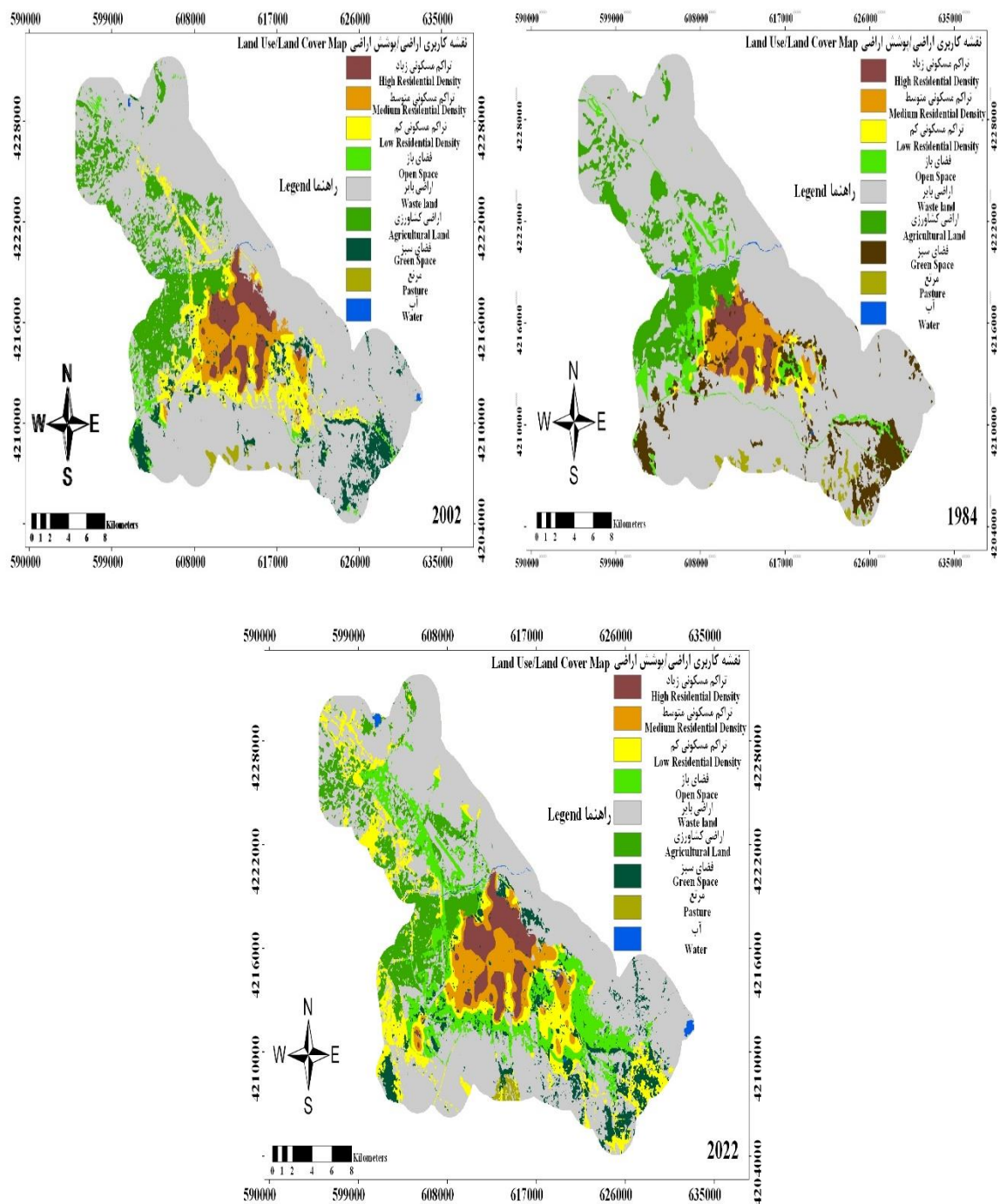
نقشه کاربری اراضی/پوشش اراضی باید در قالب رستری یا TIF وارد نرم افزار InVEST شود (www.xiaoganghe.github.io). در این پژوهش، تصاویر ماهواره ای کاربری اراضی/پوشش اراضی کلانشهر تبریز از سایت USGS Earth Explorer استخراج شد (<https://earthexplorer.usgs.gov>). برای تهیه نقشه کاربری اراضی/پوشش اراضی از تصاویر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

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 طبقه بندی 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 طبقه بندی و پس پردازش از هم جدا شده اند. با توجه به این که خارج از محدوده مناطق شهرداری تبریز و در اطراف این مناطق زیرساخت های سبزی وجود دارد که در کاهش ریسک سیلاب شهری نقش دارند، از این رو برای این که بتوان به صورت کامل نقش زیرساخت های 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).

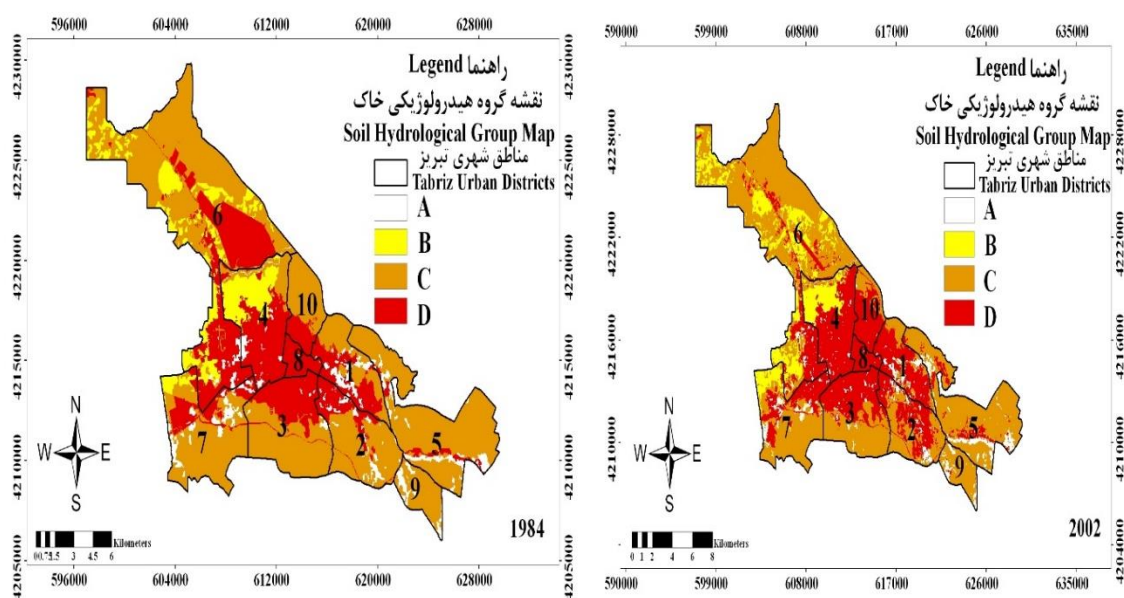


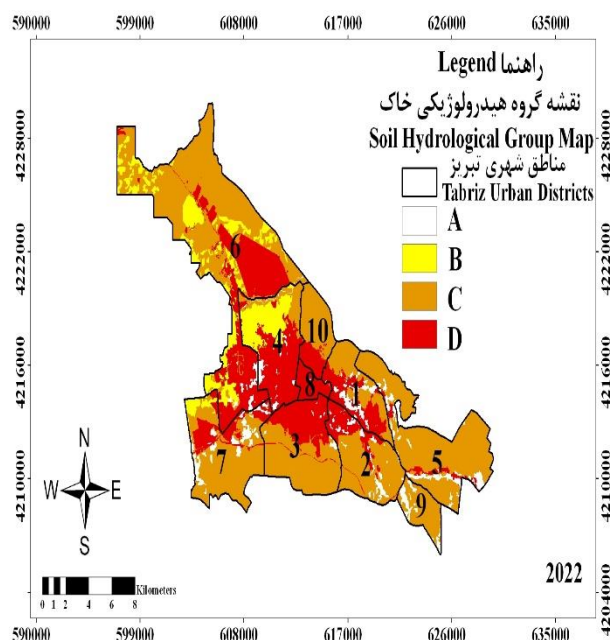
شکل ۲- نقشه کاربری اراضی/پوشش اراضی کلانشهر تبریز به ترتیب از چپ به راست برای سال های ۱۹۸۴، ۲۰۰۲ و ۲۰۲۲

Fig. 2. Land use/land cover map of Tabriz metropolitan from left to right for the years 1984, 2002, and 2022, respectively

نقشه رستری گروه هیدرولوژیکی خاک

نقشه گروه هیدرولوژیکی خاک محدوده مورد مطالعه باید به صورت رستری وارد نرم افزار 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 hydrological group of Tabriz metropolitan, from left to right, for the years 1984, 2002, and 2022, respectively

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 گسترده ای برای تخمین میزان رواناب در سطح و نفوذ آن در خاک پس از مقدار معینی (Bose & Mazumdar, 2023)، مدیریت منابع آبی، مدل سازی سیلاب و غیره مورد استفاده قرار می گیرد (Gitika & Ranjan 2014; Tessema, Lyon, Setegn, 2019; CN & Mörtberg, 2014; Soomro et al., 2019). نشان دهنده پتانسیل رواناب زمین است که متاثر 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 مقایر 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 می سازد. 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 n 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 پایه ای و اساسی مانند حمل و نقل، ارتباطات، شبکه های برق و زیرساخت های 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 داده های خسارت ناشی از سیلاب احتمالی برای هر نوع ساختمان است (www.xiaoganghe.github.io). در شهرها، ارزش گذاری زیرساخت‌های ساخته شده از منطقه ای به منطقه ای دیگر بسیار متفاوت است و از این رو جمع آوری این نوع داده ها بسیار مشکل است. بنابراین جهت برآورد میزان خسارت اقتصادی، کل محدوده کلانشهر 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 Q_p طبق رابطه (۱) عمل می شود (جدول ۴). به طوری که:

P : میزان بارندگی بر حسب میلی متر است. $S_{max,i}$: پتانسیل جذب و نگهداشت بر حسب میلی متر است. $\lambda S_{max,i}$: میزان بارندگی لازم برای شروع رواناب و $\lambda = 0.2$ است. S_{max} : تابعی از CN و پارامتر تجربی وابسته به l 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، ساختمان های آسیب دیده، بعد از آن مجموع خسارت احتمالی به دلار برای زیرساخت های ساخته شده و برای هر حوضه یا دهانه های شبکه های فاضلاب W به صورت زیر محاسبه می شود:

به طوری که طبق رابطه (۶):

b : میزان ساختمان های مسکونی از مجموع زیرساخت های ساخته شده B است. $a(b, W)$: مساحت (متر مربع) ساختمان های b است که حوضه آبریز W را قطع می کند. $d(b)$: 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 آسیب های اجتناب شده به زیرساخت های ساخته شده برای هر حوضه W که به صورت زیر محاسبه می شود:

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 relations of the InVEST model

فرمول روابط	شماره روابط
Relationship formula	Relationship number
$Q_{p,i} = \left\{ \frac{(P - \lambda S_{max})^2}{P + (1 - \lambda)S_{max,i}} \right\}$ 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
$\text{Service.build}_w = \text{Affected.build}_w \cdot \sum_{i \in W} R_{m3}$	7
$R_t^B = A t^B [a_1 + a_2 \ln (T - a_3) R_{60}^{10}]$	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 می شود. 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 می دهد 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 می دهد که کاربری های مرتبط با زیرساخت های سبز از قبیل فضای سبز، اراضی کشاورزی و مرتع که نقش فزاینده ای در کاهش ریسک سیلاب شهری دارند، کمترین میزان از کل کاربری های شهری تبریز را به خود اختصاص داده اند (شکل ۲ و جدول های ۵، ۶ و ۷).

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

Table 5- Data on land use/land cover in 1984 for the ten districts of Tabriz metropolitan in percentage

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 ی(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	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- داده های مربوط به کاربری اراضی/پوشش اراضی سال ۱۳۸۱ مناطق دهگانه کلانشهر تبریز به درصد

Table 6- Data on land use/land cover in 2002 for the ten districts of Tabriz metropolitan in percentage

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 ی(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	13.98	28.06	23.38	-	23.59	-	10.98	-	-
2	2.59	6.79	34.63	2.55	45.53	-	7.72	0.022	0.17
3	14.62	12.93	21.17	-	48.19	-	3.07	0.011	-
4	31.02	25.51	9.73	-	6.91	24.37	1.83	-	0.62
5	-	0.51	7.92	0.59	81.14	-	9.82	0.0043	-
6	0.19	2.24	10.96	0.60	63.09	21.69	1.14	-	0.065
7	0.81	7.61	17.47	1.32	54.80	10.71	7.25	0.011	-
8	28.52	66.95	3.73	-	-	-	0.79	-	-
9	-	-	0.57	0.66	85.21	-	13.55	-	-

10	42.28	25.22	3.26	-	28.66	-	0.58	-	-
کل مناطق All Districts	7.91	9.76	14.15	0.65	52.10	10.55	4.76	0.0048	0.095

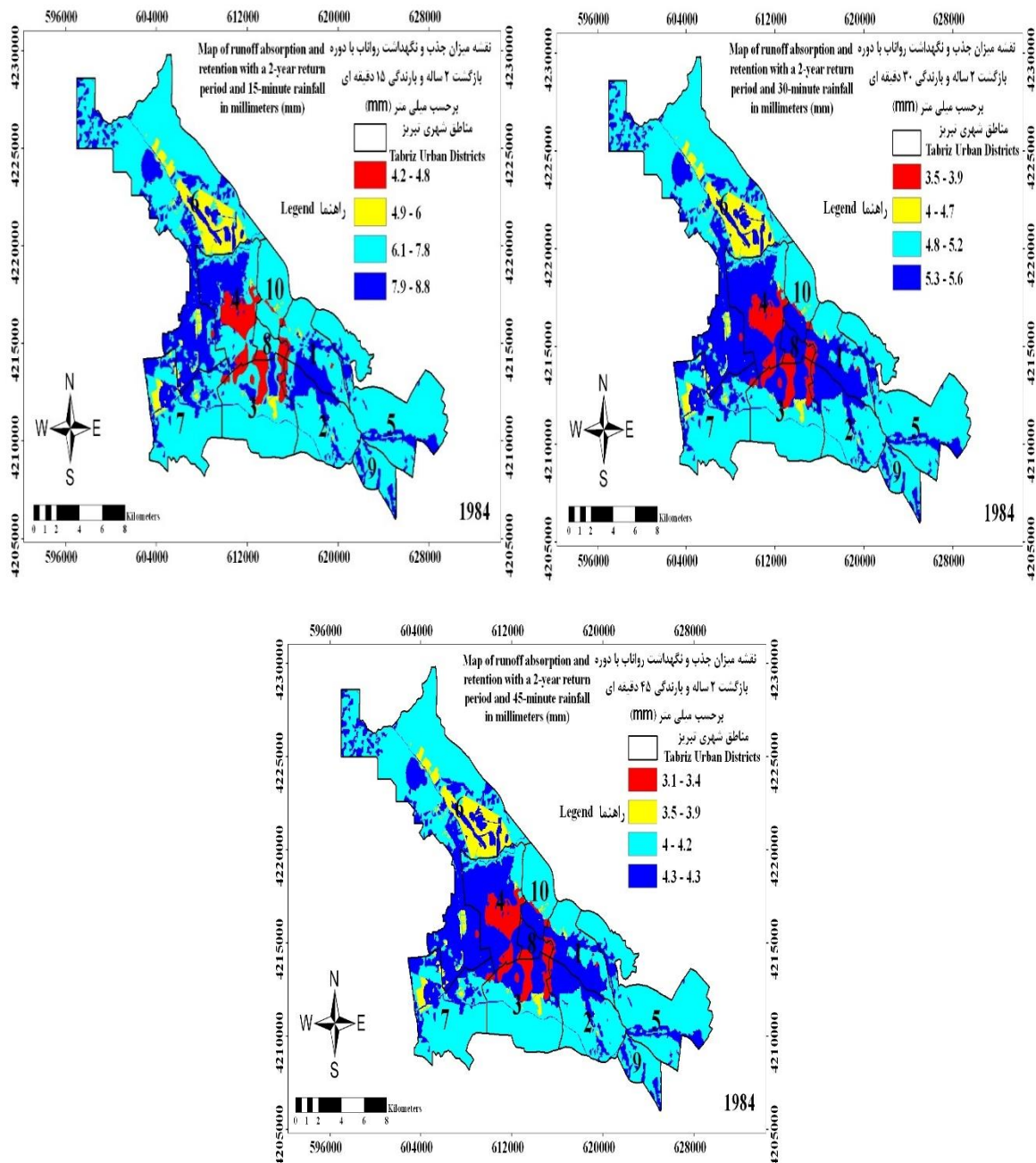
جدول ۷- داده‌های مربوط به کاربری اراضی/پوشش اراضی سال ۱۴۰۱ مناطق دهگانه کلانشهر تبریز به درصد

Table 7- Data on land use/land cover in 2022 for the ten districts of Tabriz metropolitan in percentage

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)	مرتفع (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

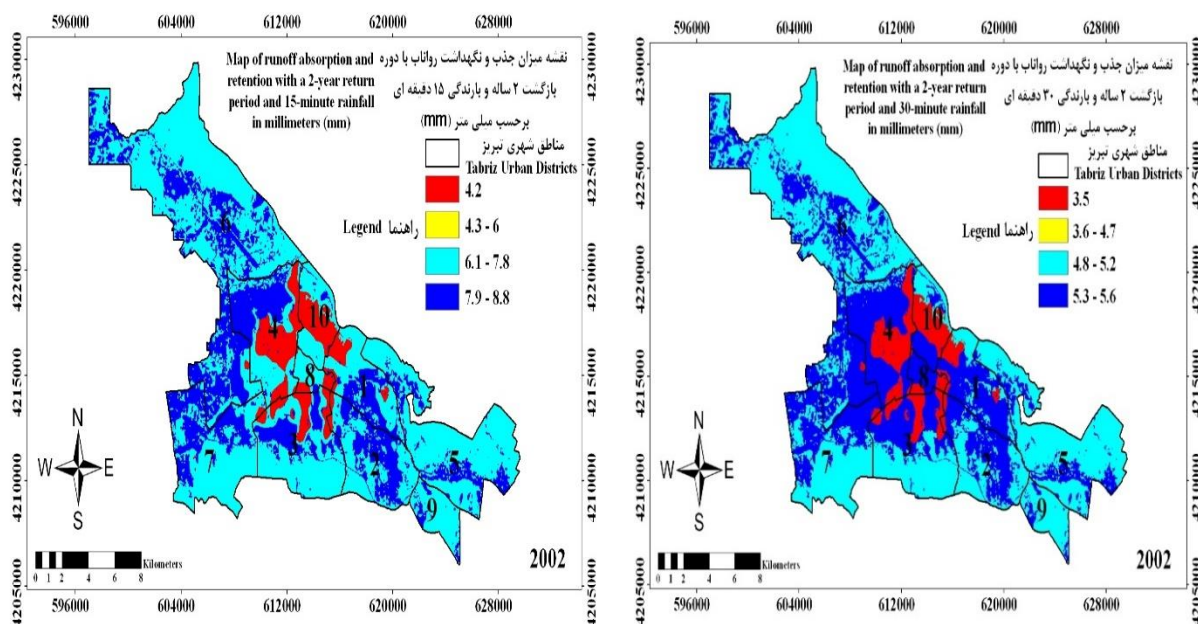
در سال ۱۳۶۳ با بارندگی ۱۵ دقیقه ای و با میزان بارش ۲۱/۹۳ میلی متری (۰/۰۰۰۰۲۲ متر مکعب) در کلاس بیشترین میزان (۸/۷۷ متر مکعب) به ترتیب مناطق ۴، ۶ و ۷ با ۳۴/۶۰، ۱۸/۱۴ و ۱۰/۱۹ درصد رتبه های اول تا سوم و منطقه ۹ هم با ۲/۴۳ درصد رتبه آخر را به خود اختصاص داده‌اند. در سال ۱۳۶۳ با بارندگی ۳۰ دقیقه ای در کلاس بیشترین میزان (۵/۶۳ متر مکعب) مناطق ۴، ۶ و ۷ با ۳۴/۶۰، ۱۸/۱۴ و ۱۰/۱۹ درصد رتبه های اول تا سوم و منطقه ۹ با ۲/۴۳ درصد رتبه آخر را به خود اختصاص داده‌اند. در سال ۱۳۶۳ با بارندگی ۴۵ دقیقه ای و دوره بازگشت ۲ ساله در کلاس بیشترین میزان (۴/۳۱ متر مکعب)، مناطق ۶، ۵ و ۷ هم به ترتیب با ۳۱/۲۸، ۱۵/۱۴، ۱۱/۸۱ درصد رتبه های اول تا سوم و منطقه ۸ با ۱/۱۷ درصد رتبه آخر را به خود اختصاص داده‌اند (شکل ۴).

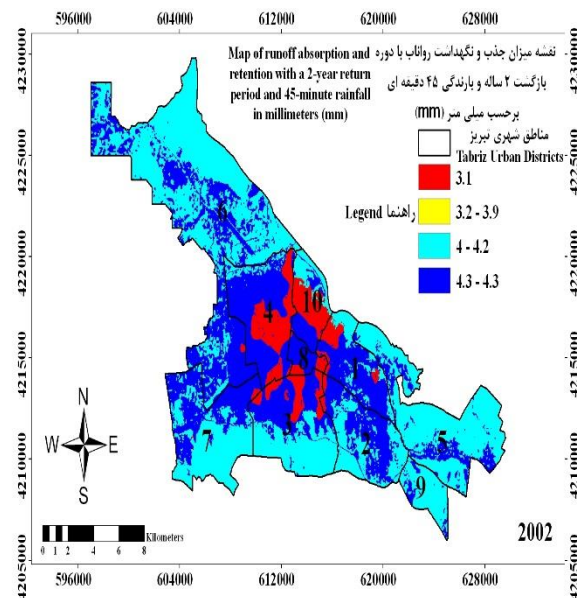


شکل ۴- نقشه‌های میزان جذب و نگهداشت رواناب ناشی از بارش سال ۱۹۸۴ کلانشهر تبریز با دوره بازگشت ۲ ساله و بارندگی‌های ۱۵، ۳۰ و ۴۵ دقیقه‌ای بر حسب متر مکعب (m^3) به ترتیب از چپ به راست

Fig. 4. Maps of runoff absorption and retention rates resulting from rainfall in 1984 in Tabriz metropolitan with a 2-year return period and 15, 30, and 45-minute rainfalls in cubic meters (m^3), respectively, from left to right

در سال ۱۳۸۱ با میزان بارش ۱۴/۰۷ میلی متری (۰/۰۰۰۰۱۴ متر مکعب) با بارندگی ۱۵ دقیقه ای در کلاس بیشترین میزان (۸/۷۷ متر مکعب) مناطق ۹، ۸ و ۱۰ به ترتیب با ۲۹/۶۱، ۱۵، ۱۲/۵۲ درصد رتبه های اول تا سوم و منطقه ۶ با ۱/۱۱ درصد رتبه آخر را به خود اختصاص داده اند. در سال ۱۳۸۱ با بارندگی ۳۰ دقیقه ای در کلاس بیشترین میزان (۵/۶۳ متر مکعب) مناطق ۶، ۴ و ۷ به ترتیب با ۲۹/۶۱، ۱۵، ۱۲/۵۲ درصد رتبه های اول تا سوم و منطقه ۹ با ۱/۱۱ درصد رتبه آخر را به خود اختصاص داده اند. در سال ۱۳۸۱ با بارندگی ۴۵ دقیقه ای 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 رتبه های اول تا سوم و منطقه ۸ با ۱/۱۴ درصد رتبه آخر را به خود اختصاص داده اند (شکل ۵).

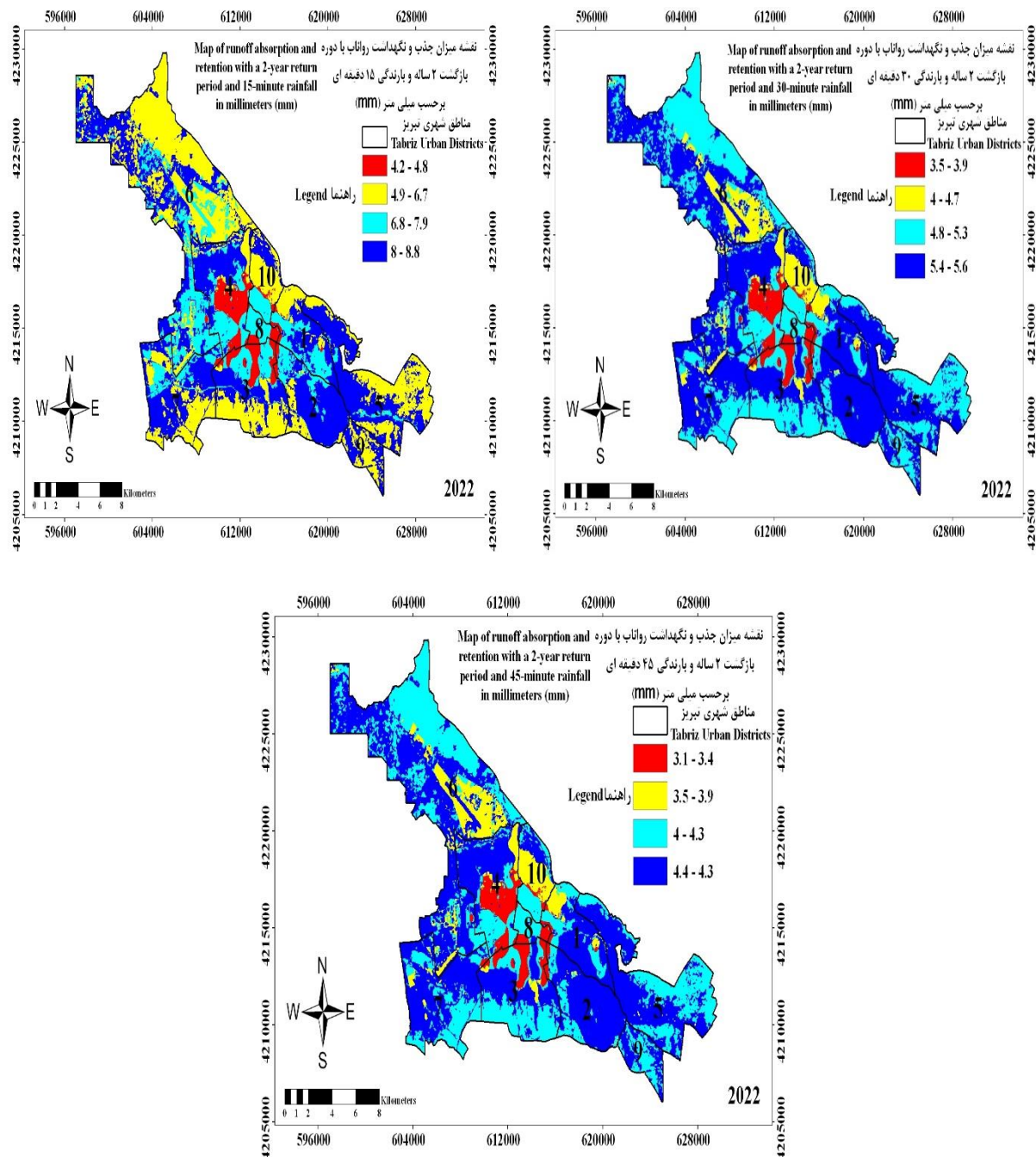




شکل ۵- نقشه‌های میزان جذب و نگهداشت رواناب ناشی از بارش سال ۲۰۰۲ کلانشهر تبریز با دوره بازگشت ۲ ساله و بارندگی های ۱۵، ۳۰ و ۴۵ دقیقه ای بر حسب متر مکعب (m^3) به ترتیب از چپ به راست

Fig. 5. Maps of runoff absorption and retention rates resulting from rainfall in 2002 in Tabriz metropolitan with a 2-year return period and 15, 30, and 45-minute rainfalls in cubic meters (m^3), respectively, from left to right

در سال ۱۴۰۱ با میزان بارش ۱۰/۷۸ میلی متری (۰/۰۰۰۰۱۱ متر مکعب) با بارندگی ۱۵ دقیقه ای در کلاس بیشترین میزان (۸/۷۷ متر مکعب) مناطق ۶، ۵، ۷ به ترتیب با ۲۸/۶۷، ۱۳/۰۴، ۱۲/۶۴ درصد رتبه های اول تا سوم و منطقه ۸ با ۱/۷۵ درصد رتبه آخر را به خود اختصاص داده اند. در سال ۱۴۰۱ با بارندگی ۳۰ دقیقه ای در کلاس بیشترین میزان (۵/۶۳ متر مکعب) مناطق ۶، ۵، ۷ به ترتیب با ۲۸/۶۳، ۱۳/۰۲، ۱۲/۶۴ درصد رتبه های اول تا سوم و منطقه ۸ با ۱/۷۶ درصد رتبه آخر را به خود اختصاص داده اند. در سال ۱۴۰۱ با بارندگی ۴۵ دقیقه ای و دوره بازگشت ۲ ساله در کلاس بیشترین میزان (۴/۳۱ متر مکعب) مناطق ۶، ۵ و ۷ به ترتیب با ۳۲/۱۷، ۱۵/۶۰، ۱۲/۵۱ درصد رتبه های اول تا سوم و منطقه ۸ با ۱/۲۱ درصد رتبه آخر را به خود اختصاص داده اند (شکل ۶).



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

Fig. 6. Maps of runoff absorption and retention rates resulting from rainfall in 2022 in Tabriz metropolitan with a 2-year return period and 15, 30, and 45-minute rainfalls in cubic meters (m^3), respectively, 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 و ۳ 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.

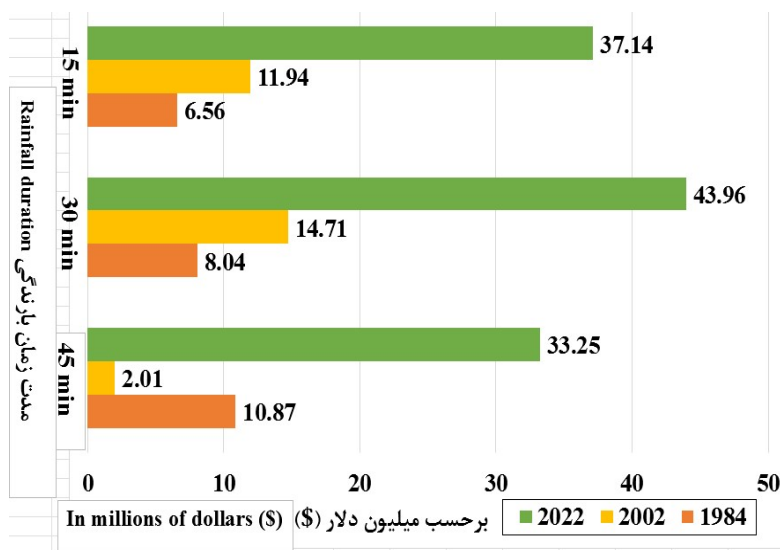
در سال ۱۳۸۱ با بارندگی‌های ۱۵ و ۳۰ دقیقه‌ای، در کلاس بیشترین میزان به ترتیب ۸/۷۷ و ۵/۶۳ متر مکعب، کاربری‌های تراکم مسکونی کم، اراضی کشاورزی و تراکم مسکونی متوسط با ۳۵/۱۸، ۲۶/۲۸ و ۲۴/۳۳ درصد رتبه‌های اول تا سوم و کاربری مرتع با ۰/۰۱ درصد رتبه آخر را به خود اختصاص داده‌اند. در سال ۱۳۸۱ با بارندگی ۴۵ دقیقه‌ای، 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 ۰/۰۰۰۲ 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 ۰/۰۰۰۲ 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 ۰/۰۰۰۱ 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 دقیقه ای، 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 دقیقه ای، 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 دقیقه ای 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 میلی متری (۰/۰۰۰۰۱۴ متر مکعب)، بارندگی ۱۵ دقیقه ای، 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 دقیقه ای، 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 دقیقه ای 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 دقیقه ای، 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 دقیقه ای، 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 می شد (شکل ۷).



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

Fig. 7. Economic benefit of ecosystem service of mitigating urban flood risk in Tabriz based on dollars for 15, 30 and 45 minute rainfalls with 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 کلانشهر تبریز (به جز قسمت هایی از مناطق ۴، ۶ و ۷ و قسمت هایی 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 کلانشهر 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 کلانشهر 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 کلانشهر 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 کلانشهر تبریز با پتانسیل رواناب نسبتاً بالا و بالا بوده است، فلذا در این افزایش کاربری اراضی/پوشش اراضی و تغییرات آن تاثیرگذارتر بوده است. در کل در طی هر سه دوره ۱۳۶۳، ۱۳۸۱ و ۱۴۰۱ در کلانشهر 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، پیشنهادها 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 مراعات 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 LID¹ 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 آب و هوایی (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>
- Ekmekcioglu, 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/10.1001.1.24763594.1383.8.2.1.4>
- 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>