

Evaluation of Urban Flood Risk Mitigation Ecosystem Service With A Long-Term Return Period Approach 25 Years: A case study of Tabriz Metropolitan

Mahdi Herischian¹ , Hassan Mahmoudzadeh²  

1. Department of Urban and Regional Planning, Faculty of Planning and Environmental Sciences, University of Tabriz, Tabriz, Iran

Email: mahdi.herischian@tabrizu.ac.ir

2. (Corresponding Author) Department of Urban and Regional Planning, Faculty of Planning and Environmental Sciences, University of Tabriz, Tabriz, Iran

Email: mahmoudzadeh@tabrizu.ac.ir

Article Info

Article type:
Research Article

Article History:

Received:

7 July 2025

Revised:

11 October 2025

Accepted:

20 November 2025

Available online:

24 December 2025

Keywords:

Ecosystem Service,
Urban Flood Risk
Mitigation, Runoff
Absorption and
Retention,
InVEST Model,
Tabriz
Metropolitan.

ABSTRACT

Urban districts, especially metropolises, increase impervious surfaces, leading to large volumes of rainwater runoff on the ground surface rather than penetrating underground. This can result in urban hazards such as urban floods and the negative, irreparable consequences that follow. In the meantime, urban green infrastructure plays a significant role in mitigating urban flood risk due to its low cost and its provision of ecosystem regulation services. Therefore, this study aims to evaluate the ecosystem service of mitigating urban flood risk in Tabriz metropolitan with a 25-year return period. In this research, data from Landsat satellite images, land use/land cover, meteorology, a biophysical table, GIS, and the InVEST software were used. The findings showed that in 1984, during 15-, 30-, and 45-minute rainfall events, the volume of water absorbed and retained was 6.77, 5.47, and 4.72 million cubic meters, respectively, and the ecosystem service benefit of mitigating urban flood risk was 17.19, 13.89, and 11.99 million dollars, respectively. In 2002, during 15-, 30-, and 45-minute rainfall events, the volumes of water absorbed and retained were 7, 5.62, and 4.83 million cubic meters, respectively, and the ecosystem service benefits of mitigating urban flood risk were 32.08, 25.78, and 22.16 million dollars, respectively. In 2022, during 15-, 30-, and 45-minute rainfall events, it was 7.85, 6.15, and 5.20 million cubic meters, respectively, and the ecosystem service benefit of mitigating urban flood risk was 56.08, 43.96, and 37.14 million dollars for the entire Tabriz metropolitan area. The results showed that land use/land cover had a greater role in the potential for runoff absorption and retention in Tabriz than other factors, including soil hydrological group. In Tabriz metropolitan, across all three time periods, wasteland, agricultural land, and low residential density land uses had the highest runoff absorption and retention, while water and pasture land uses had the lowest. The results also showed that in Tabriz metropolis, during all three time periods, districts 6, 5, and 7 had the highest runoff absorption and retention, while districts 9 and 8 had the lowest

Cite this article: Behzadi, Z., & Sharifi Paichoon, M. (2025). Spatiotemporal Trend and Correlation Analysis of Climatic and Environmental Indices Associated with Desertification in Khatam and Abarkooh Counties Using Satellite Data. *Physical Geography Research Quarterly*, 57 (4), 63-83.

<http://doi.org/10.22059/jphgr.2026.385886.1007855>



© The Author(s).

Publisher: University of Tehran Press

Extended Abstract

Introduction

Urban districts, especially metropolitan areas, with increasing impervious surfaces, cause stormwater runoff from rain to flow on the ground surface rather than penetrate underground, thereby posing urban hazards, including urban floods and their negative, irreparable consequences. In the meantime, gray stormwater infrastructure, due to its age and cost, lacks the capacity to comprehensively address urban flooding and its negative consequences, whereas green infrastructure, due to its low cost and provision of ecosystem regulation services, plays a significant role in mitigating urban flood risk. Therefore, the purpose of this study is to evaluate the ecosystem service of mitigating urban flood risk in Tabriz metropolitan with a 25-year return period.

Methodology

The current research is descriptive-analytical in terms of method and has a developmental-applicative nature. The required information was collected using library, documentary, electronic sources, surveys, and field observations. In this research, the urban flood risk mitigation model from the InVEST 3.12.0 software package has been used. This model is one of the models that mitigates the risk of urban flooding based on the vector map of the study area/watershed map of the study area, rainfall (in millimeters), land use/land cover map, soil hydrological group raster map, the biophysical table, vector map of built infrastructure, and table of damage caused by urban flood estimates. Finally, this model estimates the result through the following raster and vector files:

- 1) It calculates the amount of runoff in the form of raster data.
- 2) It estimates the amount of absorption and retention of runoff (in millimeters) in the form of a raster file that shows the relative amount of rainfall (expressed as a percentage of rainfall).
- 3) It calculates the volume of runoff retention (in cubic meters) through a raster file.
- 4) It calculates the flood risk in the form of a descriptive table and the field of vector files and raster data that help to identify spatial

changes in the specified local limits through the calculated values.

5) It estimates the damage caused by the flood through a monetary assessment.

6) It estimates the monetary value of the ecosystem service of urban flood risk reduction using the avoided damage cost method in the form of a descriptive table.

Results and discussion

The findings showed that in 1984, with a rainfall of 21.93 mm (0.000022 cubic meters) and a 15-minute rainfall and a 25-year return period, the amount of water absorbed and retained was 49 percent, the volume of water absorbed and retained was 6.77 million cubic meters, and the ecosystem service benefit of mitigating urban flood risk was \$17.19 million. With a 30-minute rainfall, the amount of water absorbed and retained was 62 percent, the volume of water absorbed and retained was 5.47 million cubic meters, and the ecosystem service benefit of mitigating urban flood risk was \$13.89 million. During a 45-minute rainfall event, 70 percent of the rainfall was absorbed and retained, totaling 4.72 million cubic meters, and the ecosystem service benefit of mitigating urban flood risk was \$11.99 million for the entire Tabriz metropolitan area. In 2002, with a 15-minute rainfall of 14.07 mm (0.000014 cubic meters), the amount of water absorbed and retained was 51 percent, the volume absorbed and retained was 7 million cubic meters, and the ecosystem service benefit of mitigating urban flood risk was \$32.08 million. With a 30-minute rainfall, the amount of water absorbed and retained was 64 percent, the volume of water absorbed and retained was 5.62 million cubic meters, and the ecosystem service benefit of mitigating urban flood risk was \$25.78 million. With a 45-minute rainfall, the amount of water absorbed and retained was 72 percent, the volume of water absorbed and retained was 4.83 million cubic meters, and the ecosystem service benefit of mitigating urban flood risk was \$22.16 million for the entire Tabriz metropolitan area. In 2022, with a rainfall of 10.78 mm (0.000011 cubic meters) and a 15-minute rainfall, the amount of water absorbed and retained was 57 percent, the volume of water

absorbed and retained was 7.85 million cubic meters, and the ecosystem service benefit of mitigating urban flood risk was 56.08 million dollars. With a 30-minute rainfall, the amount of water absorbed and retained was 70 percent, the volume of water absorbed and retained was 6.15 million cubic meters, and the ecosystem service benefit of mitigating urban flood risk was 43.96 million dollars. With a 45-minute rainfall event and a 25-year return period, the amount of water absorbed and retained was 77 percent, the volume absorbed and retained was 5.20 million cubic meters, and the ecosystem service benefit of mitigating urban flood risk was 37.14 million dollars for the entire Tabriz metropolitan area.

Conclusion

The results showed that with increased rainfall duration (15, 30, and 45 minutes) across all three periods (1984, 2002, and 2022), the amount of runoff absorption and retention, and consequently the ecosystem service benefit of reducing urban flood risk, decreased. The results also showed that districts with higher population density and consequently higher residential land use had the lowest potential for runoff absorption and retention. In Tabriz metropolitan, due to the small amount of land uses related to green infrastructure, including green space, agricultural lands, and pastures, which play a major role in mitigating urban flood risk, these land uses have not been able to play a significant role in mitigating urban flood risk. However, green infrastructure has played a greater role than water infrastructure in mitigating the risk of urban flooding in Tabriz. Also, land use/land cover has played a greater role than other factors, including the soil hydrological group. Despite the low capacity of Tabriz's runoff absorption and retention, the role of ecosystem services in mitigating the risk of urban flooding in Tabriz remains significant. Without this role, Tabriz would have to bear the high costs of potential flood risk. As the trend of increasing impervious surfaces in the Tabriz metropolitan area continues, which has increased continuously over recent decades, the capacity for runoff absorption and retention in Tabriz will decrease further, and as a result, the volume

of possible floods and the resulting economic damage will increase significantly.

Funding

There is no funding support.

Authors' Contribution

Authors contributed equally to the conceptualization and writing of the article. All of the authors approved the content of the manuscript and agreed on all aspects of the work declaration of competing interest none.

Conflict of Interest

Authors declared no conflict of interest.

Acknowledgments

We are grateful to all the scientific consultants of this paper.

ارزیابی خدمت اکوسیستمی کاهش خطر سیلاب شهری با رویکرد دوره بازگشت بلندمدت ۲۵ ساله، مطالعه موردی: کلان‌شهر تبریز

مهدی هریسچیان^۱، حسن محمودزاده^۲

۱- گروه برنامه‌ریزی شهری و منطقه‌ای، دانشکده برنامه‌ریزی و علوم محیطی، دانشگاه تبریز، تبریز، ایران. رایانامه: mahdi.herischian@tabrizu.ac.ir

۲- نویسنده مسئول، گروه برنامه‌ریزی شهری و منطقه‌ای، دانشکده برنامه‌ریزی و علوم محیطی، دانشگاه تبریز، تبریز، ایران. رایانامه: mahmoudzadeh@tabrizu.ac.ir

چکیده	اطلاعات مقاله
مناطق شهری به‌ویژه کلان‌شهرها با افزایش سطوح نفوذناپذیر، رواناب‌های ناشی از باران را با حجم زیاد به‌جای نفوذ در زیرزمین در سطح زمین جاری می‌سازند و باعث به‌وجودآمدن مخاطرات شهری از جمله سیلاب‌های شهری و پیامدهای منفی و جبران‌ناپذیر ناشی از آن می‌شوند. در این بین زیرساخت‌های سبز شهری به دلیل کم هزینه بودن و ارائه خدمات تنظیمی اکوسیستمی نقش زیادی در کاهش ریسک سیلاب شهری ایفاء می‌کنند. ازاین‌رو هدف این پژوهش، ارزیابی خدمت اکوسیستمی کاهش ریسک سیلاب شهری تبریز با دوره بازگشت ۲۵ ساله می‌باشد. در پژوهش حاضر از داده‌های مربوط به تصاویر ماهواره‌ای لندست، کاربری اراضی/پوشش اراضی، هواشناسی، جدول بیوفیزیکی، GIS و نرم‌افزار InVEST استفاده شده است. یافته‌ها نشان داد که در سال ۱۳۶۳ در طی بارندگی‌های ۱۵، ۳۰ و ۴۵ دقیقه‌ای، حجم آب جذب و نگه داشته شده به ترتیب ۶/۷۷، ۵/۴۷ و ۴/۷۲ میلیون مترمکعب و میزان منفعت خدمت اکوسیستمی کاهش ریسک سیلاب شهری ۱۷/۱۹، ۱۳/۸۹ و ۱۱/۹۹ میلیون دلار، در سال ۱۳۸۱ در طی بارندگی‌های ۱۵، ۳۰ و ۴۵ دقیقه‌ای، حجم آب جذب و نگه داشته شده، ۷، ۵/۶۲ و ۴/۸۳ میلیون مترمکعب و میزان منفعت خدمت اکوسیستمی کاهش ریسک سیلاب شهری ۳۲/۰۸، ۲۵/۷۸ و ۲۲/۱۶ میلیون دلار و در سال ۱۴۰۱ در طی بارندگی‌های ۱۵، ۳۰ و ۴۵ دقیقه‌ای، ۷/۸۵، ۶/۱۵ و ۵/۲۰ میلیون مترمکعب و میزان منفعت خدمت اکوسیستمی کاهش ریسک سیلاب شهری، ۵۶/۰۸، ۴۳/۹۶ و ۳۷/۱۴ میلیون دلار برای کل محدوده کلان‌شهر تبریز بوده است. نتایج نشان داد که در پتانسیل جذب و نگهداشت رواناب تبریز، کاربری اراضی/پوشش اراضی در مقایسه با سایر موارد از جمله گروه هیدرولوژیکی خاک نقش بیشتری را داشته است. در کلان‌شهر تبریز در طی هر سه دوره زمانی مذکور، به ترتیب کاربری‌های اراضی بایر، اراضی کشاورزی و تراکم مسکونی کم بیشترین میزان جذب و نگهداشت رواناب و کاربری‌های آب و مرتع کمترین میزان جذب و نگهداشت رواناب را داشته‌اند. همچنین نتایج نشان داد که در کلان‌شهر تبریز در طی هر سه دوره زمانی مذکور به ترتیب مناطق ۶، ۵ و ۷ بیشترین میزان جذب و نگهداشت رواناب و مناطق ۹ و ۸ کمترین میزان جذب و نگهداشت رواناب را داشته‌اند.	نوع مقاله: مقاله پژوهشی تاریخ دریافت: ۱۴۰۴/۰۴/۱۶ تاریخ بازنگری: ۱۴۰۴/۰۷/۱۹ تاریخ پذیرش: ۱۴۰۴/۰۸/۲۹ تاریخ چاپ: ۱۴۰۴/۱۰/۰۳ واژگان کلیدی: خدمت اکوسیستمی، کاهش ریسک سیلاب شهری، جذب و نگهداشت رواناب، مدل InVEST، کلان‌شهر تبریز.

استناد: هریسچیان، مهدی و محمودزاده، حسن. (۱۴۰۴). ارزیابی خدمت اکوسیستمی کاهش خطر سیلاب شهری با رویکرد دوره بازگشت بلند مدت ۲۵ ساله، مطالعه موردی: کلان‌شهر تبریز. *مجله پژوهش‌های جغرافیای طبیعی*، ۵۷ (۴)، ۸۳-۶۳.
<http://doi.org/10.22059/jphgr.2026.385886.1007855>

مقدمه

از جمله شایع‌ترین و مخرب‌ترین بلایای طبیعی که جان انسان‌ها را تهدید کرده و خسارات مالی زیادی را در سرتاسر جهان به دنبال دارد، سیل است (Mensah & Ahadzie, 2020). سیلاب شهری باتوجه به تغییرات اقلیمی و شهرنشینی شتابان، تأثیرات منفی عدیده‌ای را بر توسعه پایدار شهرها خاصه کلان‌شهرها تحمیل می‌کند (Wang et al., 2024). ویژگی عمده مناطق شهری که در آن بخش زیادی از پوشش سطح زمین به صورت نفوذناپذیر است، کاهش نفوذ آب در زیرزمین و افزایش رواناب در سطح زمین است که منجر به جاری شدن سیل در مکان‌هایی می‌شود که معمولاً به صورت دشت سیلابی نیستند (Chen et al., 2009). در کل، پیچیدگی‌های محیط‌های شهری و سیستم‌های زهکشی بر رواناب سطحی تأثیر گذاشته، موجب ایجاد سیلاب‌های شهری شده و مدل‌سازی آسیب‌پذیری‌های مرتبط با سیلاب شهری را پیچیده‌تر کرده و با مشکل مواجه می‌کند (Cea & Costabile, 2022; Dekongmen et al., 2021). آسیب‌پذیری‌های هیدرولوژیکی در چشم‌اندازهای شهری معاصر در اثر فشارهای دوگانه ناشی از شهرنشینی سریع و نوسانات اقلیمی به طور فزاینده‌ای افزایش یافته و چالش‌های مهمی را برای شهرهای سرتاسر جهان ایجاد کرده‌اند (Dong et al., 2020; Yousefi et al., 2021). این اختلالات هیدرولوژیکی نه تنها منجر به هزینه‌های اقتصادی قابل توجهی می‌شود، بلکه منجر به اختلالات زیرساختی و متأسفانه تلفات جانی زیادی نیز می‌شود (Chan et al., 2021; Larsen et al., 2016). اغلب زیرساخت‌های سنتی خاکستری مرتبط با رواناب‌های رگباری، شامل کانال‌ها، سیستم‌های زهکشی، آبراهه‌ها و سازه‌های نگهدارنده برای مقابله با پیامدهای مختلف سیلاب شهری، ناکافی هستند. این نارسایی سیستم‌های سنتی ناشی از انطباق هیدرولوژیکی محدود، آسیب‌پذیری ذاتی آن‌ها در برابر حوادث مرتبط با سیل و تهدیدات بالقوه مرتبط با اکوسیستم‌های آبی است (Wang et al., 2023). اکوسیستم‌ها با ارائه تسهیلات و خدمات متنوع و متعدد، نقش مهمی در افزایش سلامتی و رفاه انسان‌ها بازی می‌کنند (Akhtar et al., 2020; Gupta & Nair, 2012; Haque et al., 2023). یکی از این خدمات اکوسیستمی، خدمت تنظیمی کاهش ریسک سیلاب شهری است که به وسیله زیرساخت‌های سبز شهری ارائه می‌شود. زیرساخت‌های سبز شهری با اتکاء به برنامه‌ریزی شبکه‌های سبز چندمنظوره و با ارتقای تنوع زیستی و ارائه خدمات ضروری اکوسیستمی به توسعه پایدار مناطق شهری کمک می‌کنند (Pauleit et al., 2011). ادبیات اخیر نشان می‌دهد که زیرساخت‌های سبز در شاخص‌های عملکردی مانند تاب‌آوری، قابلیت اطمینان و پایداری سیلاب شهری و سیستم‌های زهکشی شهری، بهتر از زیرساخت‌های خاکستری عمل می‌کند (Tansar et al., 2023). استفاده از خدمات اکوسیستمی برای مقابله با خطر سیلاب شهری در کشورهای در حال توسعه، جایی که در آن جمعیت در حال انفجار بوده، و نیاز مبرم به سرانه، غذا و آب بهداشتی وجود دارد، ضرورتی اجتناب‌ناپذیر است (Barnaud et al., 2018; Franzluebbbers & Martin, 2022).

اکثر شهرهای ایران در خروجی حوضه‌ها بنا شده‌اند و کلان‌شهر تبریز نیز از این امر مستثنی نیست (وهابی، ۱۳۸۵: ۳۴). سیستم حرکت آب‌های سطحی در کلان‌شهر تبریز به تبعیت از شیب عمومی زمین و ویژگی‌های توپوگرافی و هیدرولوژیکی شهر، شکل گرفته است. جهت عمومی شیب زمین از شرق به غرب و از شمال به جنوب می‌باشد. این سیستم به تبعیت از موقعیت مسیل‌های عمده و رودخانه‌های بزرگی چون آجی‌چای و مهران‌رود است (مهندسین مشاور نقش محیط، ۱۳۹۱: ۹۴). ساخت‌وسازهای متعددی که از ابتدای ورود رودخانه مهران به شهر و تا منطقه مرکزی آن انجام شده، عمدتاً غیرمجاز بوده و حریم رودخانه را اشغال کرده‌اند. درعین حال، توپوگرافی منطقه دارای تفاوت‌های زیادی است؛ شیب در پایین‌دست کم است، اما در بالادست، به‌ویژه در ارتفاعات سه‌پند، به بیش از ۸۰ درصد می‌رسد. این شیب زیاد در بالادست، عاملی است که سرعت جریان آب‌های سطحی را در زمان بارندگی به شدت افزایش می‌دهد. همچنین برخی سازمان‌های شهری، به دلیل عدم کار کارشناسی، برخلاف مقررات موجود، اقدام به دخل و تصرف در حریم رودخانه‌ها و آبراهه‌ها کرده و باعث

کاهش ظرفیت عبوری در برخی مقاطع و گاه انسداد آن‌ها شده‌اند (آذر و همکاران، ۱۳۹۳: ۹۷-۱۰۰). وجود بارش‌های رگباری در سطح حوضه آبریز رودخانه مهران رود، ایجاد سیلاب‌های شهری باتوجه به افزایش نفوذناپذیری سطوح شهری خاصه در طی دهه‌های اخیر و به تبع آن به زیر آب رفتن زیرساخت‌های شهری و بالا بودن خسارت‌های جانی و مالی ناشی از سیلاب‌های شهری در سطح کلان‌شهر تبریز از جمله ضرورت‌های پژوهش حاضر است. از این‌رو هدف این پژوهش ارزیابی خدمت اکوسیستمی کاهش ریسک سیلاب شهری کلان‌شهر تبریز است. در زمینه خدمت اکوسیستمی کاهش ریسک سیلاب شهری در عرصه‌های داخلی و خارجی پژوهش‌هایی انجام شده که در جدول ۱ به تعدادی از آنها اشاره می‌شود. در زمینه خدمت اکوسیستمی کاهش ریسک سیلاب شهری در عرصه‌های داخلی و خارجی پژوهش‌هایی انجام شده که در ادامه به تعدادی از آنها اشاره می‌شود. در عرصه داخلی باقلانی و همکاران (۱۳۹۸) عوامل مؤثر بر بروز سیلاب شهری حوضه آبخیز شهر ایلام را مورد بررسی قرار داده و به این نتیجه رسیده‌اند که کافی نبودن ابعاد کانال‌های شهری برای عبور حجم سیلاب، افزایش مناطق نفوذناپذیر، ضریب زبری مناطق نفوذناپذیر، شیب، مساحت، عرض، معادل و ضریب زبری مناطق نفوذناپذیر از جمله عوامل مؤثر بر بروز سیلاب در شهر ایلام می‌باشند. آذریان (۱۴۰۰) رواناب شهری بندرعباس را با استفاده از تحلیل‌های فضایی مورد بررسی قرار داده و به این نتیجه رسیده که به دلیل افزایش سطوح نفوذناپذیر، ضریب رواناب از ۰/۵۶ به ۰/۷۰ افزایش یافته است. خاتونی و همکاران (۱۴۰۲) سیلاب شهری حوضه شمال شهر کرج را با استفاده از HEC-RAS 2D مدل‌سازی و پهنه‌بندی دوبعدی کرده و به این نتیجه رسیده‌اند که بیشتر مناطقی که با سیل‌زدگی و آب‌گرفتگی مواجه هستند در بین مناطق دارای بافت فرسوده هستند که طراحی شبکه زهکشی قدیمی‌تری داشته‌اند. ایرانی و همکاران (۱۴۰۴) تأثیر تهدیدات تغییر اقلیم و تغییر کاربری اراضی را بر افزایش ریسک سیلاب حوضه آبخیز شهرچای مورد بررسی قرار داده و به این نتیجه رسیده‌اند که برای سال‌های ۲۰۱۶، ۲۰۲۳ و ۲۰۳۰ در ضلع جنوبی حوضه آبخیز شهرچای، پتانسیل تولید رواناب خیلی کم و کم است. این در حالی است که میزان رواناب در قسمت مرکزی حوضه آبخیز متوسط و بالا می‌باشد. در عرصه خارجی نیز کاداوریگو^۱ و همکاران (۲۰۲۱) خدمات کاهش سیل فضاهای سبز شهری حیدرآباد هند را با استفاده از مدل InVEST کمی‌سازی کرده و به این نتیجه رسیده‌اند که ۴۴ تا ۵۰ درصد از رواناب ناشی از بارش به‌وسیله فضاهای سبز و باز شهری حفظ و نگهداشت می‌شود. بوز و مازومدار^۲ (۲۰۲۳) کاهش خطر سیلاب شهری کلکته^۳، ایالت بنگال^۴ غربی (هند) را با استفاده از مدل InVEST-UFRM مورد ارزیابی قرار داده و بیان داشته‌اند که فضاهای سبز و باز بیشترین پتانسیل را در حفظ و نگهداشت رواناب دارند. کانسال و بوز^۵ (۲۰۲۵) نقش خدمت اکوسیستمی کاهش خطر سیل در مدیریت آب‌های سطحی مناطق MCD دهلی را با استفاده از مدل InVEST مورد بررسی قرار داده و به این نتیجه رسیده‌اند که مناطق با سایبان‌های سبز نزدیک رودخانه بیشترین میزان نگهداشت آب‌های سطحی (۰/۸۳) را داشته‌اند. درحالی که ظرفیت جذب و نگهداشت رواناب مراتع در حدود ۰/۵۵ است، مناطق با پوشش گیاهی کم و اراضی کشاورزی مقادیر کمتری را به ترتیب در حدود ۰/۴۵ و ۰/۳۰ نشان می‌دهند. ویلکا - کامپانا^۶ و همکاران (۲۰۲۵) خطر سیلاب شهری را در مورد بخش شهری با کریدور رودخانه چیلی^۷ در آرکیپا^۸، منطقه‌ای خشک در جنوب پرو^۹

1. Kadaverugu
2. Bose & Mazumdar
3. Kolkata
4. Bengal
5. Kansal & Bose
6. Vilca-Campana
7. Chili
8. Arequipa
9. Peru

و با استفاده از مدل Geospatial مورد ارزیابی قرار داده و به این نتیجه رسیده‌اند که میزان حفظ و نگهداشت رواناب در طی سال‌های ۱۹۸۴ و ۲۰۲۲، به‌ویژه در بخش شمالی به طور قابل توجهی کاهش یافته است، به‌طوری که ظرفیت حفظ رواناب مناطق موجود در این بخش از ۷۰ الی ۸۰ درصد به ۲۰ الی ۳۰ درصد کاهش یافته است. این نتایج نقش حیاتی رودخانه را در کاهش خطرات مرتبط با سیل ناگهانی در یک منطقه کویری نشان می‌دهد. نوآوری پژوهش حاضر در مقایسه با پژوهش‌های داخلی و خارجی انجام شده در رابطه با موضوع پژوهش در موارد زیر است:

✓ ارائه سناریوی زمانی بلندمدت (۱۳۶۳ تا ۱۴۰۱)

تحلیل سه دهه تغییرات شهری تبریز نشان می‌دهد که چگونه گسترش سطوح نفوذناپذیر باعث کاهش ظرفیت نگهداشت رواناب شده است. این دوره زمانی (دوره ۲۵ ساله) به‌ندرت در پژوهش‌های اکوسیستمی لحاظ می‌شود. پژوهش حاضر با استفاده از داده‌های لندست و بارش‌های با دوره بازگشت ۲۵ ساله توانسته روند تغییر اکولوژیکی در کاربری‌ها و اثر آن بر جذب رواناب را نشان دهد. پیشرفت علمی: ایجاد ارتباط بین دینامیک کاربری اراضی و عملکرد اکوسیستمی حفظ رواناب در افق بلندمدت.

✓ تبیین سازوکار اکولوژیکی بین زیرساخت‌های سبز و حفظ و نگهداشت رواناب

در طی این پژوهش ارزیابی کمی نقش مذکور برای مناطق ده‌گانه تبریز انجام شده است. پیشرفت علمی: پژوهش حاضر مدلی کاربردی برای اولویت‌بندی انواع کاربری‌های اکوسیستمی بر اساس کارایی در حفظ و نگهداشت رواناب ارائه می‌دهد. ✓ ارزش‌گذاری اقتصادی خدمت حفظ رواناب

بر اساس روش Avoided Damage Cost (هزینه خسارت اجتناب شده)، ارزش اقتصادی خدمت حفظ و نگهداشت رواناب محاسبه و بر حسب دلار بیان شده است. این کار امکان ترجمه مفاهیم اکولوژیکی به زبان اقتصادی را فراهم می‌کند، که تصمیم‌گیران شهری و سیاست‌گذاران می‌توانند نتایج آن را هر چه بهتر و بیشتر در طرح‌های شهری لحاظ کنند. پیشرفت علمی: یکپارچگی میان ارزش اکولوژیکی و اقتصادی خدمات آب در نظام شهری.

✓ گسترش مفهوم خدمت اکوسیستمی کاهش سیلاب در مقیاس منطقه شهری

بیشتر مطالعات جهانی تا کنون در مقیاس حوضه، رودخانه یا کلان منطقه انجام شده‌اند (مثلاً در دهلی، حیدرآباد یا کلکته). پژوهش حاضر برای نخستین بار به سطح مناطق شهری در درون یک کلان‌شهر توجه کرده است. این سطح از تفکیک مکانی، اطلاعات دقیق‌تری را برای مدیریت محلی و تخصیص منابع برای هر منطقه شهرداری فراهم می‌کند. پیشرفت علمی: گسترش مقیاس کاربرد مدل‌های اکوسیستمی از سطح حوضه به سطح نواحی شهری خرد مقیاس.

روش پژوهش

در این پژوهش از مدل کاهش ریسک سیلاب شهری^۱ از مجموعه بسته‌های نرم‌افزاری InVEST 3.12.0 استفاده شده است. این مدل از جمله مدل‌هایی است که کاهش ریسک سیلاب شهری را بر اساس نقشه وکتوری محدوده مورد مطالعه/نقشه حوضه آبریز محدوده مورد مطالعه، میزان بارش (برحسب میلی‌متر)، نقشه کاربری اراضی/پوشش اراضی، نقشه رستری گروه هیدرولوژیکی خاک، جدول بیوفیزیکی، نقشه وکتوری زیرساخت‌های ساخته شده، جدول خسارات ناشی از سیلاب شهری برآورد می‌کند. در نهایت این مدل نتیجه را از طریق فایل‌های رستری و وکتوری زیر برآورد می‌کند:

(۱) میزان رواناب را در قالب داده‌های رستری محاسبه می‌کند.

- ۲) میزان جذب و نگهداشت رواناب (برحسب میلی‌متر) را در قالب فایل رستری که نشان‌دهنده میزان نسبی بارندگی است، تخمین می‌زند (به صورت درصدی از بارندگی بیان می‌کند).
- ۳) حجم نگهداشت رواناب (برحسب مترمکعب) را از طریق فایل رستری محاسبه می‌کند.
- ۴) خطر سیل را در قالب یک جدول توصیفی و فیلد فایل‌های وکتوری و داده‌های رستری که از طریق مقادیر محاسبه شده به شناسایی تغییرات فضایی در محدوده‌های مکانی مشخص شده کمک می‌کند، محاسبه می‌کند.
- ۵) خسارت ناشی از سیل را از طریق ارزیابی پولی برآورد می‌کند (Bose & Mazumdar, 2023: 6).
- ۶) ارزش پولی خدمت اکوسیستمی کاهش ریسک سیلاب شهری را با استفاده از روش هزینه خسارت اجتناب شده در قالب جدول توصیفی برآورد می‌کند.

برای تهیه هر یک از داده‌های موردنیاز مدل InVEST 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 ۱ وارد نرم‌افزار InVEST شود (www.xiaoganghe.github.io). این نقشه می‌تواند شامل محدوده مورد مطالعه یا حوضه آبریز محدوده مورد مطالعه نیز باشد. در این پژوهش، از نقشه محدوده کلان‌شهر تبریز و نه حوضه آبریز محدوده مورد مطالعه استفاده شد. داده‌های مورد استفاده در پژوهش حاضر شامل داده‌های مربوط به کاربری اراضی/پوشش اراضی مستخرج از تصاویر ماهواره‌ای لندست، داده‌های جمعیتی و مناطق شهری، گروه هیدرولوژیکی خاک مستخرج از نقشه‌های ملی خاک، همگی در قالب مرزهای اداری شهر تبریز تهیه شده‌اند.

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 مدت‌زمان بارندگی بستگی دارد (Bose & Mazumdar, 2023). منظور از این مورد، میزان بارش با در نظر گرفتن رخدادهای با دوره‌های بازگشت مخصوصاً دوره‌های بازگشت طولانی است که به صورت میلی‌متر در نرم‌افزار 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 ۲۵ ساله و برای بارندگی‌های ۱۵، ۳۰ و ۴۵ دقیقه‌ای به ترتیب ۵۲/۴۱، ۳۳/۶۳ و ۱۰/۷۸ میلی‌متر وارد نرم‌افزار InVEST گردید. در این پژوهش، داده‌های مربوط به بارش از طریق ایستگاه سینوپتیک^۲ تبریز به دست آمده و برای محاسبه دوره بازگشت از رابطه شدت - مدت - فراوانی که توسط بل^۳ به وجود آمده و به وسیله قهرمان - آبخضر (۱۳۸۳) در ایران محاسبه و توسعه یافته استفاده شد:

طبق روابط ۱ و ۲، 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 ۲۵ ساله محاسبه شد)، R_{1440}^2 میانگین حداکثر بارندگی روزانه، t دوره زمانی مورد نظر، T دوره بازگشت و A ، B ،

1. Shapefile
2. Synoptic
3. Bell

a_1, a_2 و a_3 ضرایب ثابت رابطه که بسته به مدت زمان بارش، مقادیر آن متفاوت هست (فرحناکیان و همکاران، ۱۴۰۳) (جدول ۲).

$$R_t^T = At^B [a_1 + a_2 \ln (T - a_3) R_{60}^{10}] \quad \text{رابطه (۱)}$$

$$R_{60}^{10} = e^{-\frac{0}{993}} (R_{1440}^2)^{\frac{1}{06}} \quad \text{رابطه (۲)}$$

جدول ۱. ضرایب ثابت رابطه قهرمان-آبخضر

مدت تداوم باران (ساعت)	$1 >$	$2 >$	$3 <$	$4 < t \leq 9$	$2 >$	> 2
A	۰/۱۳	۰/۱۴	۰/۱۶	۰/۲		
B	۰/۵	۰/۴۸	۰/۴۴	۰/۳۹		
a_1					۰/۴۶	۰/۵۶
a_2					۰/۲۴	۰/۱۹
a_3					۰/۶۲	۰/۸

منبع: فرحناکیان و همکاران، ۱۴۰۳

نقشه کاربری اراضی/پوشش اراضی (LULC^۱)

نقشه LULC باید در قالب رستری یا TIF وارد نرم‌افزار InVEST شود (www.xiaoganghe.github.io). در این پژوهش، تصاویر ماهواره‌ای LULC کلان‌شهر تبریز از سایت USGS Earth Explorer استخراج شد (<https://earthexplorer.usgs.gov>). برای تهیه نقشه LULC از تصاویر ماهواره‌ای لندست ۵ برای سال ۱۹۸۴ از سنجنده TM، ۲۰۰۲ از سنجنده ETM+ و لندست ۸ برای سال ۲۰۲۲ سنجنده OLS، ArcGIS/ArcMap، نرم‌افزار ENVI 5.8 و روش طبقه‌بندی حداکثر احتمال (MLC^۲) استفاده شد. تصاویر ماهواره‌ای موردنظر مربوط به فصل تابستان، طول روز و تاریخ‌های ۱۹۸۴/۰۶/۲۴، ۲۰۰۲/۰۶/۲۶ و ۲۰۲۲/۰۶/۱۷ بوده است. برای ارزیابی صحت نقشه‌های به‌دست‌آمده از طبقه‌بندی تصاویر ماهواره‌ای، از روش نمونه‌برداری تصادفی (نمونه‌های تعلیمی) به‌عنوان نقاط واقعیت زمینی (نقاط کنترلی) استفاده شد. با به‌کارگیری نقاط کنترلی که از طریق تصاویر گوگل ارث، نقشه‌های LULC و تفسیر بصری جمع‌آوری شده‌اند، دقت طبقه‌بندی با استفاده از ماتریس خطا و پارامترهای آماری (صحت کلی و ضریب کاپا)، محاسبه گردید که نشان‌دهنده دقت بالای طبقه‌بندی است (جدول ۲).

جدول ۲. مقادیر ارزیابی صحت تصاویر طبقه‌بندی شده به روش حداکثر احتمال

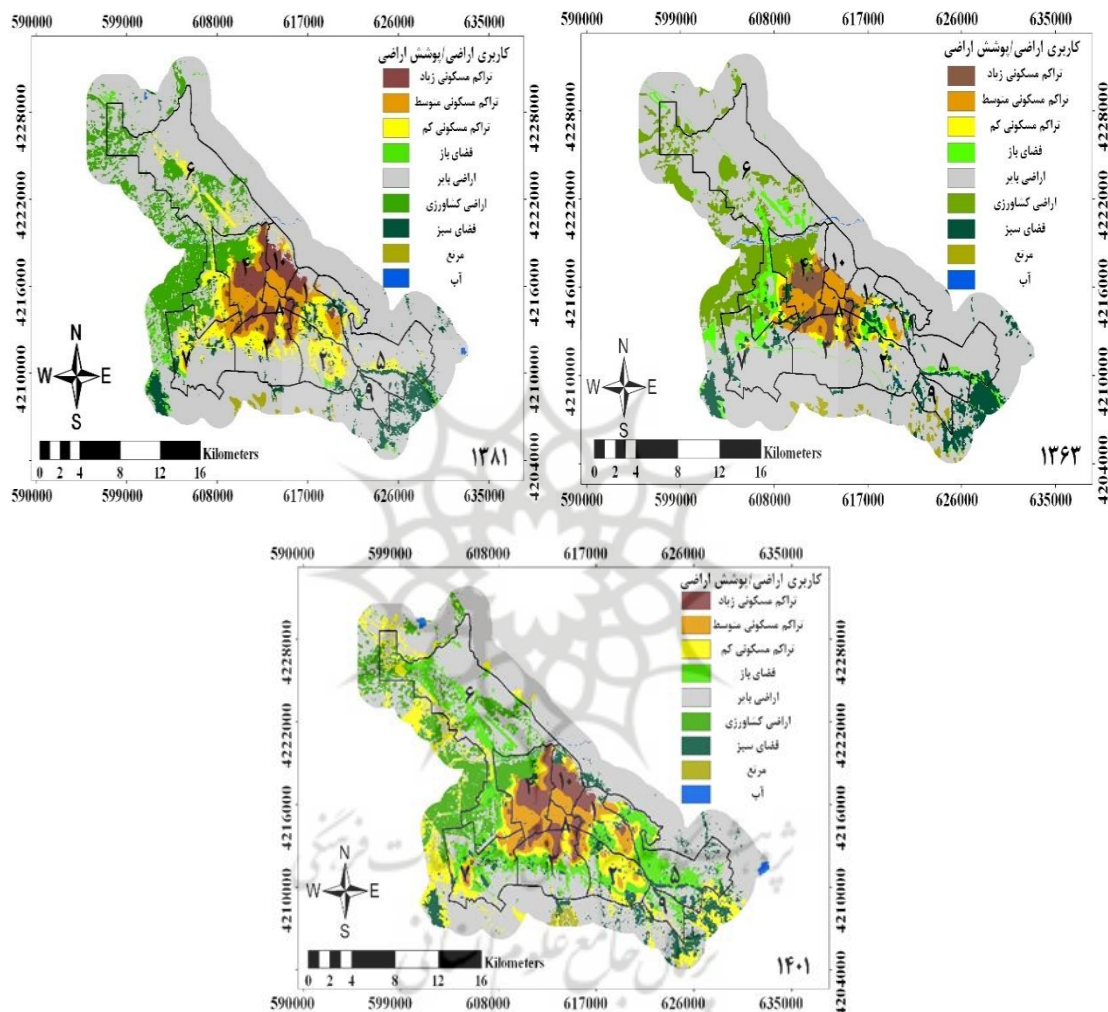
سال	ضریب کاپا (%)	صحت کلی (%)
۱۹۸۴	۹۵	۹۶/۴
۲۰۰۲	۹۳	۹۵/۲
۲۰۲۲	۹۶/۶	۹۷/۴

نقشه LULC 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 هم‌پوشانی نقشه تراکم ساختمانی با لایه LULC در مرحله طبقه‌بندی و در مرحله پس پردازش با لایه برداری به دست آمده است. همچنین در این پژوهش

1. Land Use/LandCover

2. Maximum Likelihood Classification

کلاس کاربری اراضی کشاورزی، فضای سبز و مرتع از نظر موقعیت جغرافیایی، در شیب‌های متفاوت زمین قرار گرفته و در کنار بازتاب طیفی مختلف با استفاده از طبقه‌بندی و پس پردازش از هم جدا شده‌اند. باتوجه 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 LULC تبریز در حدود ۲۵۰ هکتار از تمام جهات بیشتر از محدوده مناطق ده‌گانه شهرداری در نظر گرفته شده و ترسیم گردید (شکل ۱).



شکل ۱. نقشه کاربری اراضی/پوشش اراضی کلان‌شهر تبریز به ترتیب از چپ به راست برای سال‌های ۱۳۶۳، ۱۳۸۱ و ۱۴۰۱

نقشه رستری گروه هیدرولوژیکی خاک

گروه هیدرولوژیکی خاک جهت طبقه‌بندی خاک بر اساس پتانسیل رواناب آنها مورد استفاده قرار می‌گیرد. وزارت کشاورزی ایالات متحده (USDA¹) خاک را به چهار نوع عمده با عناوین A، B، C و D طبقه‌بندی کرده که A نشان‌دهنده بافت شنی، B نشان‌دهنده لوم شنی و ماسه لومی، C نشان‌دهنده لوم رسی و لوم رسی سیلتی و D نشان‌دهنده بافت شنی عمدتاً از نوع خاک رسی است. این طبقه‌بندی بیشتر بر اساس در دسترس بودن ماسه، لوم و خاک رس است. این چهار کلاس

1. United States Department of Agriculture

نشان‌دهنده پتانسیل رواناب از کمترین به بیشترین است 7: Bose & Mazumdar, 2023. گروه A به دلیل میزان نفوذ بالا، پتانسیل رواناب پایینی دارد. این خاک‌ها عمدتاً از ماسه و شن‌های زیرین و با زهکشی خوب تشکیل شده‌اند. گروه B به دلیل میزان نفوذ متوسط، پتانسیل رواناب نسبتاً پایینی دارد (Leta & Adugna, 2024: 3265-3266). خاک گروه C دارای پتانسیل رواناب نسبتاً بالایی است، زیرا از لوم رسی، لوم رسی شنی، لوم، لوم سیلتی و سیلت تشکیل شده است (Bose & Mazumdar, 2023: 7). خاک گروه D نیز نشان‌دهنده پتانسیل رواناب بالا است، زیرا از خاک رس، رس سیلتی و رس شنی تشکیل شده است (Leta & Adugna, 2024: 3266). نقشه گروه هیدرولوژیکی خاک محدوده مورد مطالعه باید به صورت رستری وارد نرم‌افزار InVEST شود (www.xiaoganghe.github.io).

جدول بیوفیزیکی

جدول بیوفیزیکی حاوی اطلاعاتی از داده‌های عدد منحنی برای هر یک از طبقات LULC است (Vilca-Campana et al., 2024). داده‌های عدد منحنی (CN^1) مهم‌ترین پیش‌نیاز ورودی مدل کاهش ریسک سیلاب شهری است. CN برای تخمین میزان رواناب در سطح و نفوذ آن در خاک پس از میزان معینی بارش، مدیریت منابع آبی، مدل‌سازی سیلاب و غیره مورد استفاده قرار می‌گیرد (Bose & Mazumdar, 2023, 7-8; Gitika & Ranjan, 2014; Tessema et al., 2019; Soomro et al., 2019). CN 2014 نشان‌دهنده پتانسیل رواناب زمین است که متأثر از وضعیت پیشین رطوبت خاک (AMC^2)، نوع خاک، کاربری اراضی بوده و مقدار آن بین ۰ تا ۱۰۰ است. مقادیر بالاتر CN نشان‌دهنده پتانسیل بیشتر رواناب است (https://www.hec.usace.army.mil/confluence/hmsdocs/hmstrm/cn-tables). یعنی به عبارتی مقادیر بالاتر CN نشان‌دهنده 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 پژوهش حاضر نیز میزان CN برای گروه‌های هیدرولوژیکی خاک تبریز از طریق سایت سازمان مذکور اخذ و برآورد شد (جدول ۳).

جدول ۳. بیوفیزیکی

lucode	Description	NEH type (to define CN)	CN A	CN B	CN C	CN D	SW type	EMC
۰	Background		۱	۱	۱	۱	۷۰۰۰	۰
۱	High Intensity Developed	Urban districts	۸۹	۹۲	۹۴	۹۵	۸۰۰۰	۰/۱۰۷
۲	Medium Intensity Developed	Res districts	۶۱	۷۵	۸۳	۸۷	۹۰۰۰	۰/۰۷۷
۳	Low Intensity Developed		۵۱	۶۸	۷۹	۸۴	۱۰۰۰۰	۰/۰۴۱
۴	Open Space Developed	Open space	۴۹	۶۹	۷۹	۸۴	۱۱۰۰۰	۰/۰۱۲
۵	Bare Land		۷۷	۸۶	۹۱	۹۴	۷۰۰۰	۰
۶	Cultivated Land	Small grain	۶۳	۷۵	۸۳	۸۷	۵۰۰۰	۰
۷	Deciduous Forest	Woods	۳۶	۶۰	۷۳	۷۹	۵۰۰۰	۰
۸	Pasture/Hay		۴۹	۶۹	۷۹	۸۴	۳۰۰۰	۰
۹	Water		۱	۱	۱	۱	۶۰۰۰	۰

1. Curve Number

2. Antecedent Moisture Condition

نقشه‌برداری زیرساخت‌های ساخته شده

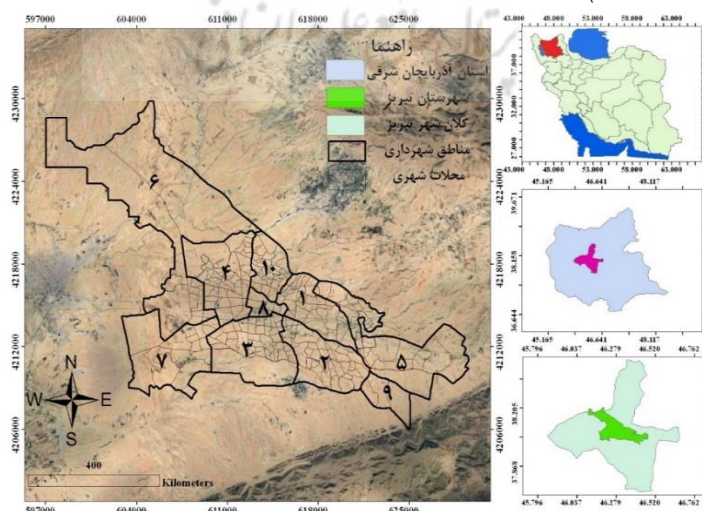
در کل، زیرساخت‌های ساخته شده در یک محدوده شهری منعکس‌کننده امکانات و تسهیلات پایه‌ای و اساسی مانند حمل‌ونقل، ارتباطات، شبکه‌های برق و زیرساخت‌های مشابه است (Bose & Mazumdar, 2023: 9). برای نقشه وکتوری زیرساخت‌های ساخته شده کلان‌شهر تبریز از نقشه طرح تفصیلی ۱۳۹۵ شهرداری تبریز استفاده شد.

جدول خسارات ناشی از سیلاب شهری

جدول مذکور شامل داده‌های خسارت ناشی از سیلاب احتمالی برای هر نوع ساختمان است (www.xiaoganghe.github.io). ارزش‌گذاری خسارت اقتصادی زیرساخت‌های شهری از منطقه‌ای به منطقه دیگر بسیار متفاوت بوده، فلذا جمع‌آوری این نوع داده‌ها بسیار مشکل است. فلذا در این پژوهش جهت برآورد خسارت اقتصادی، کل محدوده کلان‌شهر تبریز انتخاب شد. همچنین باید واحد پولی انتخاب شود که بتواند ارزش واقعی خسارات را به دست دهد (Bose & Mazumdar, 2023: 9). از این‌رو در این پژوهش، واحد پولی دلار باتوجه‌به پذیرش جهانی آن انتخاب شد. همچنین در این پژوهش، تمامی ساختمان‌های موجود در کلان‌شهر تبریز از نوع مسکونی و با کد ۰ در نظر گرفته شد و برای هر مترمربع خسارت ناشی از سیلاب شهری، ۱۰۰ دلار لحاظ شد.

محدوده 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 (شکل ۲). شهر 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 (زینالی عظیم و همکاران، ۱۴۰۰: ۵۰). رودخانه آجی‌چای (تلخه‌رود) از قسمت شمال و شمال غرب تبریز می‌گذرد و بعد از طی مسافتی قابل‌توجه در دشت تبریز به دریاچه ارومیه می‌ریزد و مهران‌رود نیز از میانه تبریز می‌گذرد (<https://www.tabriz.ir>). بر اساس آمار مربوط به آخرین سرشماری عمومی نفوس و مسکن (۱۳۹۵) کلان‌شهر تبریز دارای ۱,۵۵۸,۶۹۳ نفر جمعیت و ۴۹۷,۸۹۸ خانوار است که از این تعداد ۷۸۶,۶۶۱ نفر مرد و ۷۷۲,۰۳۲ نفر زن هستند و بعد خانوار آن هم ۳/۱ است (معاونت برنامه‌ریزی و توسعه سرمایه انسانی شهرداری تبریز، ۱۴۰۱: ۷۸). 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 (تابعی و همکاران، ۱۴۰۱: ۱۲۰).

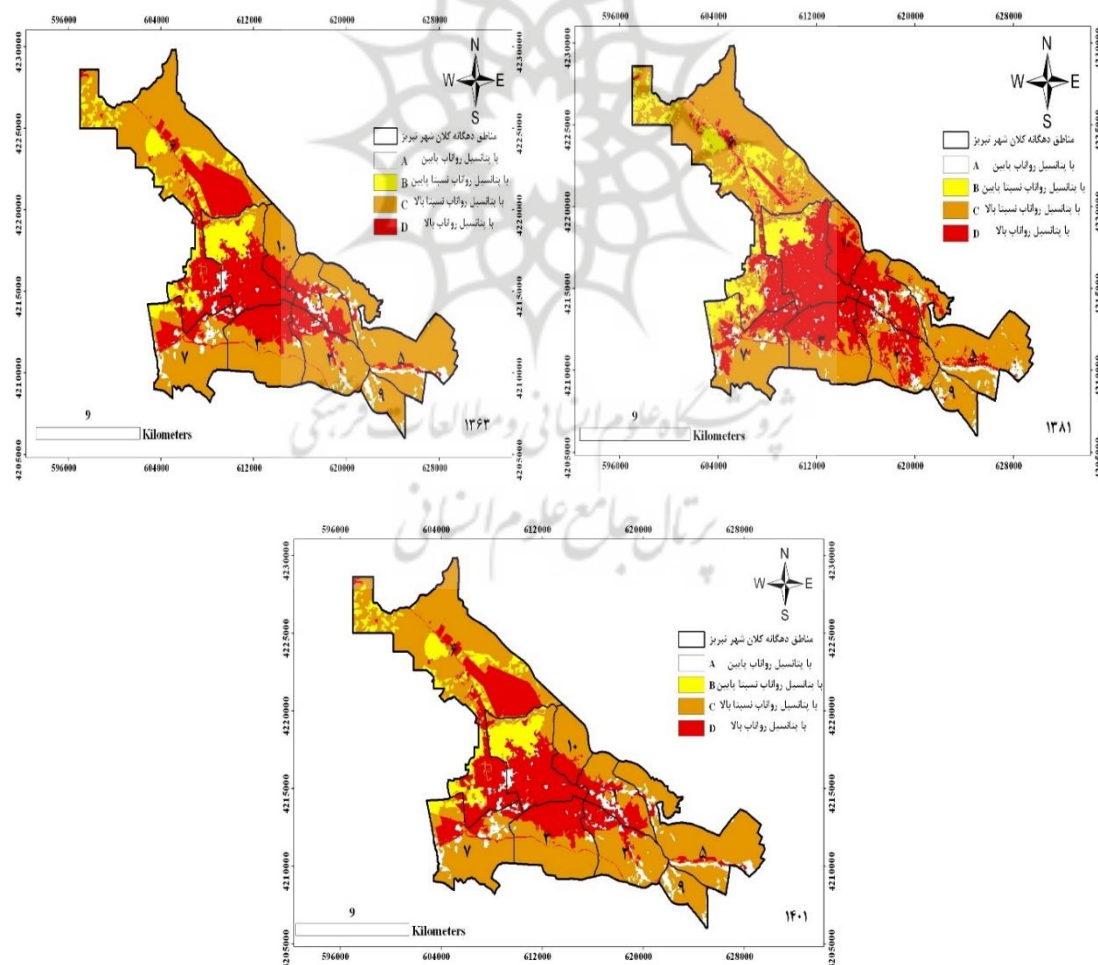


شکل ۲. نقشه محدوده مورد مطالعه

یافته‌ها

گروه هیدرولوژیکی خاک

نقشه رستری گروه هیدرولوژیکی خاک کلان‌شهر تبریز نشان می‌دهد که در سال ۱۳۶۳ حدود ۵/۱۶ درصد خاک کلان‌شهر تبریز در گروه A، حدود ۸/۸۳ درصد در گروه B، حدود ۵۸/۰۵ درصد در گروه C و حدود ۲۷/۹۶ درصد در گروه D قرار داشته است. در سال ۱۳۸۱ نیز در حدود ۴/۸۵ درصد خاک کلان‌شهر تبریز در گروه A، حدود ۱۰/۵۶ درصد در گروه B، حدود ۵۲/۱۰ درصد در گروه C و حدود ۳۲/۴۹ درصد در گروه D قرار داشته است. در این سال بیشتر خاک‌های تبریز (۸۴/۵۹ درصد) به ترتیب در گروه‌های هیدرولوژیکی C و D با پتانسیل رواناب نسبتاً بالا و بالا و میزان کمتری از خاک‌های تبریز (۱۵/۴۱ درصد) در گروه‌های هیدرولوژیکی A و B با پتانسیل رواناب نسبتاً پایین و پایین قرار داشته است. در سال ۱۴۰۱ نیز همچون سال ۱۳۶۳، حدود ۵/۱۶ درصد خاک کلان‌شهر تبریز در گروه A، حدود ۸/۸۳ درصد در گروه B، حدود ۵۸/۰۵ درصد در گروه C و حدود ۲۷/۹۶ درصد در گروه D قرار داشته است. بنابراین 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 قرار داشته است، یعنی به عبارتی قسمت عمده خاک‌های تبریز در هر سه دوره زمانی ۱۳۶۳، ۱۳۸۱ و ۱۴۰۱، کمترین میزان رواناب را در زیر زمین نفوذ داده و بیشترین میزان رواناب را در سطح زمین جاری می‌سازند (شکل ۳).



شکل ۳. نقشه‌های رستری گروه هیدرولوژیکی خاک کلان‌شهر تبریز به ترتیب از چپ به راست برای سال‌های ۱۳۶۳، ۱۳۸۱ و ۱۴۰۱

کاربری اراضی/پوشش اراضی (LULC)

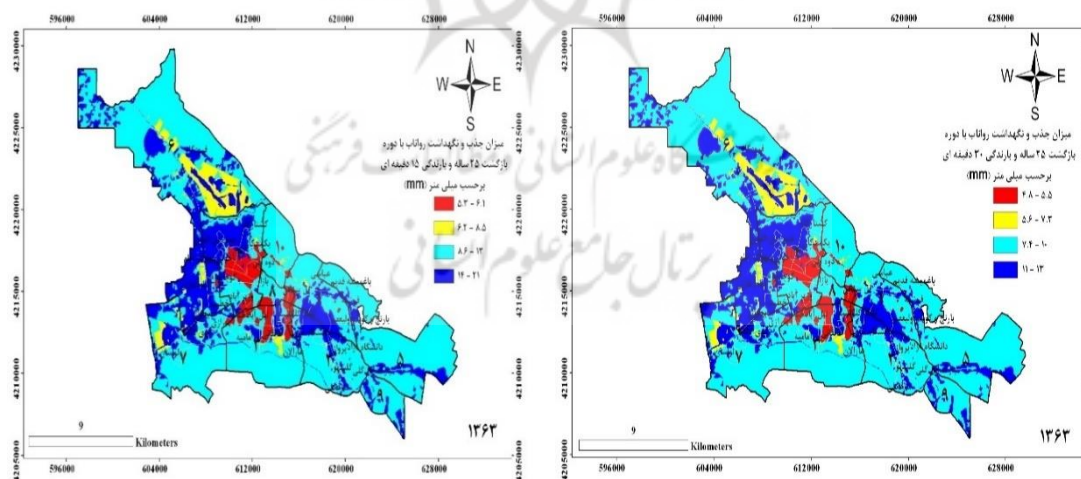
بررسی روند تغییرات LULC از سال ۱۳۶۳ تا ۱۴۰۱ نشان می‌دهد که اراضی بایر و اراضی کشاورزی در این بازه زمانی ۳۸ ساله روند کاهشی داشته است، کاربری مسکونی از سال ۱۳۶۳ تا ۱۳۸۱ روند افزایشی در حدود ۱۶/۵۴ درصد داشته و از سال ۱۳۸۱ تا ۱۴۰۱، در حدود ۰/۵۰ درصد کاهش داشته است. فضای سبز نیز از سال ۱۳۶۳ تا ۱۳۸۱ روند کاهشی در حدود ۰/۸۷ درصد داشته و از سال ۱۳۸۱ تا ۱۴۰۱ در حدود ۰/۹۷ درصد افزایش داشته است. در کل بررسی تغییرات LULC 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 کاربری اراضی کلان‌شهر تبریز را به خود اختصاص داده‌اند (شکل ۲).

ظرفیت حفظ و نگهداشت رواناب (قابلیت جذب رواناب)

منظور از مورد مذکور، قابلیت حفظ و نگهداشت رواناب در هر پیکسل است که در دو کلاس کمینه و بیشینه هم در سطح مناطق ده‌گانه کلان‌شهر تبریز و هم در رابطه با LULC کلان‌شهر تبریز مورد بررسی و ارزیابی قرار گرفته است.

ظرفیت حفظ و نگهداشت رواناب در بین مناطق ده‌گانه کلان‌شهر تبریز

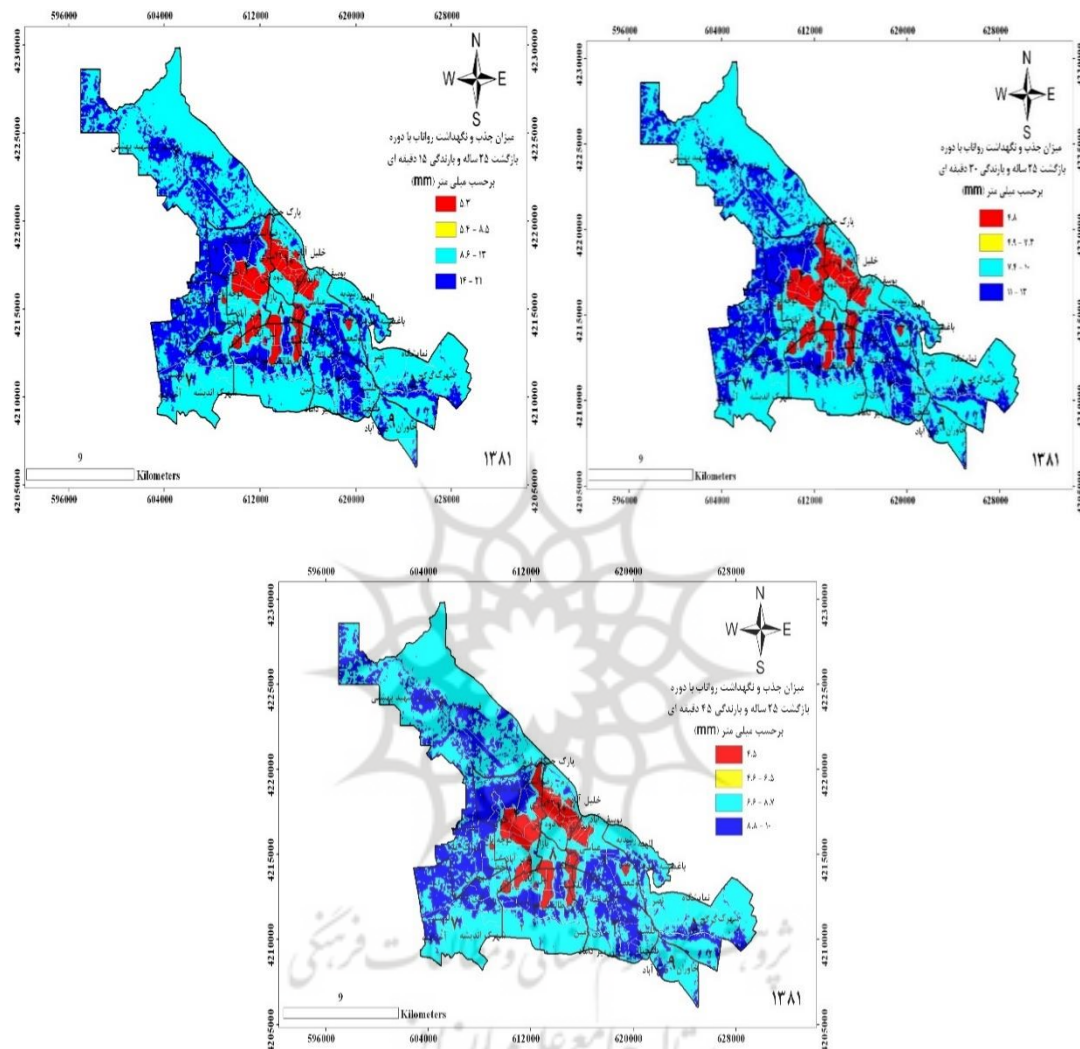
ظرفیت حفظ و نگهداشت رواناب در بین مناطق ده‌گانه کلان‌شهر تبریز حاکی از آن است که در سال ۱۳۶۳ در طی بارندگی ۱۵ دقیقه‌ای و دوره بازگشت ۲۵ ساله در کلاس کمینه (۵/۲۸ مترمکعب) در بین مناطق ده‌گانه کلان‌شهر تبریز مناطق ۶، ۵، ۳ به ترتیب با ۲۹/۱۹، ۱۵/۶۸ و ۱۲/۳۷ درصد، در کلاس بیشینه (۲۰/۹۶ مترمکعب)، مناطق ۶، ۴، ۷ به ترتیب با ۴۱/۷۱، ۱۵/۹۷، ۱۱/۶۷ درصد، در طی بارندگی ۳۰ دقیقه‌ای در کلاس کمینه (۴/۸۰ مترمکعب)، مناطق ۶، ۵، ۳ به ترتیب با ۲۹/۱۹، ۱۵/۶۸ و ۱۲/۳۷ درصد، در کلاس بیشینه (۱۳/۴۵ مترمکعب) مناطق ۶، ۴ و ۷ به ترتیب با ۴۱/۷۱، ۱۵/۹۷، ۱۱/۶۷ درصد، در طی بارندگی ۴۵ دقیقه‌ای در کلاس کمترین میزان (۴/۴۶ مترمکعب)، مناطق ۶، ۵، ۳ به ترتیب با ۳۱/۱۰، ۱۷/۴۸ و ۱۲/۱۷ درصد و در کلاس بیشینه (۱۰/۳۱ مترمکعب) مناطق ۶، ۴، ۷ به ترتیب با ۳۴/۶۰، ۱۸/۱۴، ۱۰/۱۹ درصد رتبه‌های اول تا سوم را به خود اختصاص داده‌اند (شکل ۴).



شکل ۴. نقشه‌های میزان جذب و نگهداشت رواناب ناشی از بارش سال ۱۳۶۳ کلان‌شهر تبریز با دوره بازگشت ۲۵ ساله و بارندگی‌های ۱۵، ۳۰ و ۴۵ دقیقه‌ای بر حسب مترمکعب (mm) به ترتیب از چپ به راست

در کلان‌شهر تبریز در سال ۱۳۸۱ در طی بارندگی ۱۵ دقیقه‌ای و دوره بازگشت ۲۵ ساله در کلاس کمینه (۵/۲۸ مترمکعب) مناطق ۶، ۵، ۳ به ترتیب با ۳۰/۲۶، ۱۵/۹۶ و ۱۱/۲۴ درصد، در کلاس بیشینه (۲۰/۹۶ مترمکعب)، مناطق ۶، ۷، ۲ به ترتیب با ۳۶/۷۷، ۱۳/۷۲، ۱۲ درصد، در طی بارندگی ۳۰ دقیقه‌ای در کلاس کمینه (۴/۸۰ مترمکعب)، مناطق ۶

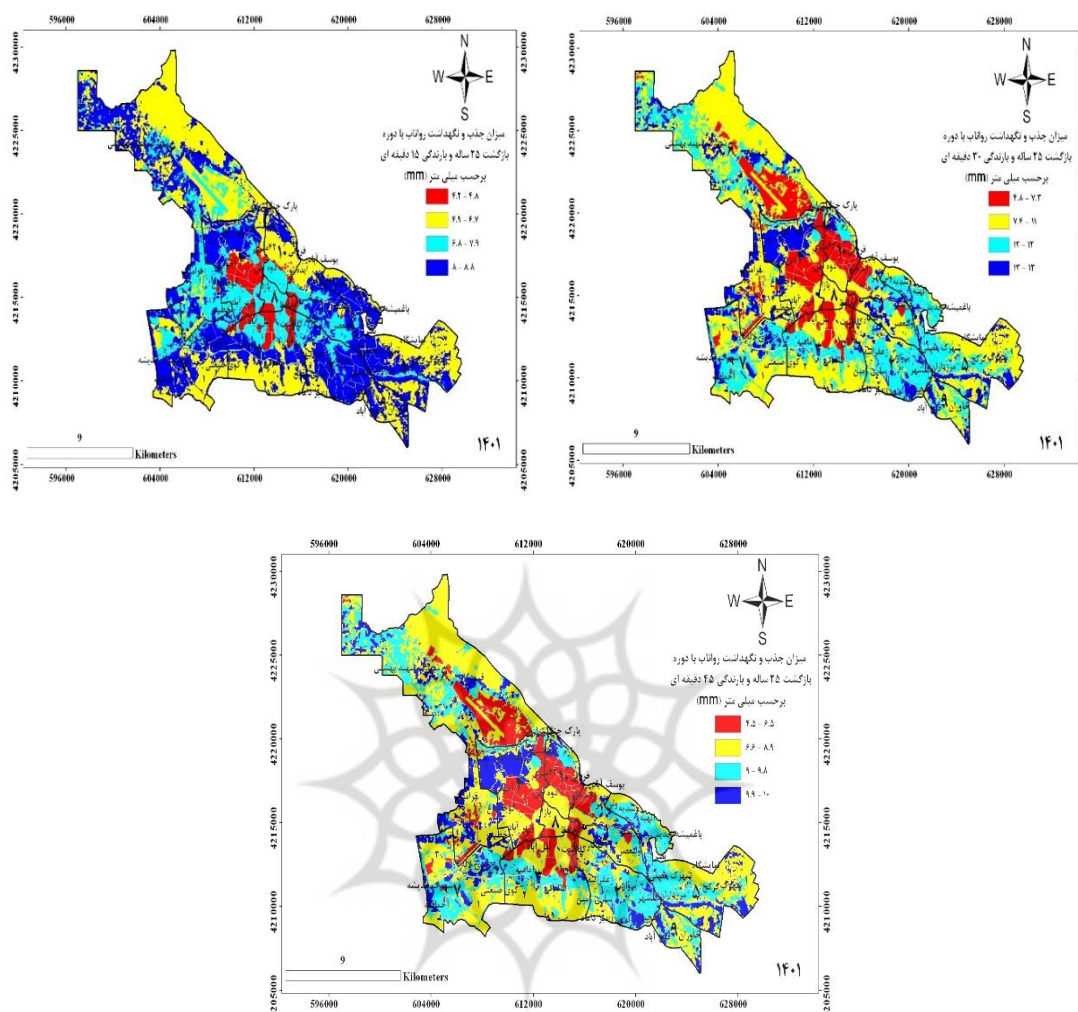
۵، ۳ به ترتیب با ۳۳/۹۸، ۱۸/۴۴ و ۱۰/۸۴ درصد، در کلاس بیشینه (۱۳/۴۵ مترمکعب) مناطق ۴، ۷ به ترتیب با ۲۹/۶۱، ۱۵، ۱۲/۵۲ درصد و در طی بارندگی ۴۵ دقیقه‌ای در کلاس کمینه (۴/۴۶ مترمکعب) مناطق ۴، ۵، ۳ به ترتیب با ۳۳/۹۸، ۱۸/۴۴ و ۱۰/۸۴ درصد و در کلاس بیشینه (۱۰/۳۱ مترمکعب) مناطق ۴، ۷ به ترتیب با ۲۹/۶۱، ۱۵، ۱۲/۵۲ درصد رتبه‌های اول تا سوم را به خود اختصاص داده‌اند (شکل ۵).



شکل ۵. نقشه‌های میزان جذب و نگهداشت رواناب ناشی از بارش سال ۱۳۸۱ کلان‌شهر تبریز با دوره بازگشت ۲۵ ساله و بارندگی‌های ۱۵، ۳۰ و ۴۵ دقیقه‌ای بر حسب مترمکعب (m^3) به ترتیب از چپ به راست

در کلان‌شهر تبریز در سال ۱۴۰۱ در طی بارندگی ۱۵ دقیقه‌ای و دوره بازگشت ۲۵ ساله در کلاس کمینه (۴/۲۳ مترمکعب) مناطق ۴، ۵، ۳ به ترتیب با ۳۰/۲۶، ۱۵/۹۶ و ۱۱/۲۴ درصد، در کلاس بیشینه (۸/۷۷ مترمکعب) مناطق ۴، ۷، ۲ به ترتیب با ۳۶/۷۷، ۱۳/۷۲، ۱۲ درصد، در طی بارندگی ۳۰ دقیقه‌ای در کلاس کمینه (۴/۸۰ مترمکعب) مناطق ۴، ۵، ۳ به ترتیب با ۳۷/۵۰، ۱۴/۵۰، ۱۲/۸۳ درصد، در کلاس بیشینه (۱۳/۴۵ مترمکعب) مناطق ۴، ۵، ۷ به ترتیب با ۲۸/۶۷، ۱۳/۰۴، ۱۲/۶۴ درصد و در طی بارندگی ۴۵ دقیقه‌ای در کلاس کمینه (۴/۴۶ مترمکعب) مناطق ۴، ۵، ۳ به ترتیب با

۳۷/۵۰، ۱۴/۵۰، ۱۲/۸۳ درصد و در کلاس بیشینه (۱۰/۳۱ مترمکعب) مناطق ۶، ۵، ۷ به ترتیب با ۳۲/۲۳، ۱۳/۶۳، ۱۱/۲۸ درصد رتبه‌های اول تا سوم را به خود اختصاص داده‌اند (شکل ۶).



شکل ۶. نقشه‌های میزان جذب و نگهداشت رواناب ناشی از بارش سال ۱۴۰۱ کلان‌شهر تبریز با دوره بازگشت ۲۵ ساله و بارندگی‌های ۱۵، ۳۰ و ۴۵ دقیقه‌ای بر حسب مترمکعب (m3) به ترتیب از چپ به راست

در کل در سال‌های ۱۳۶۳، ۱۳۸۱ و ۱۴۰۱ با بارندگی‌های ۱۵، ۳۰ و ۴۵ دقیقه‌ای و دوره بازگشت ۲۵ ساله مناطق ۶، ۵، ۷، ۳، ۴، ۲، ۱، ۱۰، ۹ و ۸ به ترتیب با ۸/۴۳ میلیون مترمکعب (۳۲/۲۳ درصد)، ۳/۵۷ میلیون مترمکعب (۱۳/۶۳ درصد)، ۲/۹۵ میلیون مترمکعب (۱۱/۲۸ درصد)، ۲/۷۱ میلیون مترمکعب (۱۰/۳۵ درصد)، ۲/۵۳ میلیون مترمکعب (۹/۶۷ درصد)، ۲/۱۰ میلیون مترمکعب (۸/۰۴ درصد)، ۱/۶۱ میلیون مترمکعب (۶/۱۶ درصد)، ۱/۰۹ میلیون مترمکعب (۴/۱۶ درصد)، ۰/۷۹ میلیون مترمکعب (۳ درصد) و ۰/۳۹ میلیون مترمکعب (۱/۴۷ درصد) رتبه‌های اول تا دهم را به خود اختصاص داده‌اند. به عبارتی در بین مناطق ده‌گانه کلان‌شهر تبریز در طی 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 نیز توانسته‌اند کمترین میزان رواناب را جذب کرده و در زمین نفوذ دهند (اشکال ۷ تا ۹).

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

ظرفیت جذب و نگهداشت رواناب در رابطه با کاربری اراضی/پوشش اراضی کلان‌شهر تبریز حاکی از آن است که در سال ۱۳۶۳ با بارندگی‌های ۱۵ دقیقه‌ای (۵/۲۸ مترمکعب) و ۳۰ دقیقه‌ای (۴/۸۰ مترمکعب) و دوره بازگشت ۲۵ ساله، در رابطه با کاربری اراضی/پوشش اراضی حاکی از آن است که کاربری‌های اراضی بایر، تراکم مسکونی متوسط و تراکم مسکونی زیاد به ترتیب با ۸۳/۱۲، ۹/۶۵ و ۶/۳۱ درصد رتبه‌های اول تا سوم، در کلاس بیشینه، کاربری‌های اراضی کشاورزی، فضای باز و فضای سبز به ترتیب با ۳۶/۲۵، ۲۵/۹۰ و ۲۲/۹۹ درصد و در طی بارندگی ۴۵ دقیقه‌ای در کلاس کمینه (۴/۴۶ مترمکعب)، کاربری‌های اراضی بایر، تراکم مسکونی زیاد و فضای سبز به ترتیب با ۹۲/۸۱، ۷/۰۴ و ۰/۰۴ درصد رتبه‌های اول تا سوم و در کلاس بیشینه (۱۰/۳۱ مترمکعب) کاربری‌های اراضی کشاورزی، تراکم مسکونی متوسط و فضای باز به ترتیب با ۲۹/۱۵، ۲۲/۶۵ و ۱۹/۵۶ درصد، رتبه‌های اول تا سوم را به خود اختصاص داده‌اند. در کل، در سال ۱۳۶۳ در طی بارندگی‌های ۱۵، ۳۰ و ۴۵ دقیقه‌ای، کاربری‌های اراضی بایر، اراضی کشاورزی، تراکم مسکونی متوسط، فضای باز، فضای سبز، تراکم مسکونی زیاد، تراکم مسکونی کم، مرتع و آب به ترتیب با ۱۶/۴۷ میلیون مترمکعب (۶۲/۹۷ درصد)، ۲/۴۶ میلیون مترمکعب (۹/۴۲ درصد)، ۱/۹۲ میلیون مترمکعب (۷/۳۳ درصد)، ۱/۶۶ میلیون مترمکعب (۶/۳۳ درصد)، ۱/۴۷ میلیون مترمکعب (۵/۶۴ درصد)، ۱/۲۵ میلیون مترمکعب (۴/۷۸ درصد)، ۰/۸۳ میلیون مترمکعب (۳/۱۸ درصد)، ۰/۰۷ میلیون مترمکعب (۰/۲۵ درصد) و ۰/۰۳ میلیون مترمکعب (۰/۱۰ درصد) رتبه‌های اول تا نهم را به خود اختصاص داده‌اند. به عبارتی در سال ۱۳۶۳ در طی هر سه بارندگی‌های ۱۵، ۳۰ و ۴۵ دقیقه‌ای و دوره بازگشت ۲۵ ساله، 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 نیز توانسته‌اند کمترین میزان رواناب را جذب کنند.

در کلان‌شهر تبریز در سال ۱۳۸۱ با بارندگی ۱۵ دقیقه‌ای و دوره بازگشت ۲۵ ساله در کلاس کمینه (۵/۲۸ مترمکعب)، کاربری‌های اراضی بایر، تراکم مسکونی متوسط و تراکم مسکونی زیاد به ترتیب با ۷۴/۴۱، ۱۳/۹۷ و ۱۱/۳۴ درصد رتبه‌های اول تا سوم، در کلاس بیشینه (۲۰/۹۶ مترمکعب)، کاربری‌های تراکم مسکونی کم، اراضی کشاورزی و فضای سبز با ۴۶/۴۸، ۳۴/۷۷ و ۱۵/۵۶ درصد رتبه‌های اول تا سوم، در طی بارندگی ۳۰ دقیقه‌ای در کلاس کمینه (۴/۸۰ مترمکعب)، کاربری‌های اراضی بایر، تراکم مسکونی زیاد و تراکم مسکونی کم با ۸۶/۵۱، ۱۳/۱۷ و ۰/۱۳ درصد رتبه‌های اول تا سوم، در کلاس بیشینه (۱۳/۴۵ مترمکعب)، کاربری‌های تراکم مسکونی کم، اراضی کشاورزی و تراکم مسکونی متوسط به ترتیب با ۳۵/۱۸، ۲۶/۲۸ و ۲۴/۳۳ درصد و در طی بارندگی ۴۵ دقیقه‌ای (۴/۴۶ مترمکعب)، همچون بارندگی ۳۰ دقیقه‌ای در کلاس کمینه (۴/۴۶ مترمکعب)، کاربری‌های اراضی بایر، تراکم مسکونی زیاد و تراکم مسکونی کم به ترتیب با ۸۶/۵۱، ۱۳/۱۷ و ۰/۱۳ رتبه‌های اول تا سوم و در کلاس بیشینه (۱۰/۳۱ مترمکعب) کاربری‌های تراکم مسکونی کم، اراضی کشاورزی و تراکم مسکونی متوسط به ترتیب با ۳۵/۱۸، ۲۶/۲۸ و ۲۴/۳۳ درصد رتبه‌های اول تا سوم را به خود اختصاص داده‌اند. در کل، در سال ۱۳۸۱ در طی بارندگی‌های ۱۵، ۳۰ و ۴۵ دقیقه‌ای، کاربری‌های اراضی بایر، تراکم مسکونی کم، اراضی کشاورزی، تراکم مسکونی متوسط، تراکم مسکونی زیاد، فضای سبز، فضای باز، آب و مرتع به ترتیب با ۱۳/۶۳ میلیون مترمکعب (۵۲/۰۹ درصد)، ۳/۷۰ میلیون مترمکعب (۱۴/۱۶ درصد)، ۲/۷۶ میلیون مترمکعب (۱۰/۵۵ درصد)، ۲/۵۶ میلیون مترمکعب (۹/۷۷ درصد)، ۲/۰۷ میلیون مترمکعب (۷/۹۲ درصد)، ۱/۲۴ میلیون مترمکعب (۴/۷۶ درصد)، ۰/۱۷ میلیون مترمکعب (۰/۶۵ درصد)، ۰/۰۲ میلیون مترمکعب (۰/۰۹ درصد) و ۰/۰۰۱ میلیون مترمکعب (۰/۰۰۵ درصد)، رتبه‌های اول تا نهم را به خود اختصاص داده‌اند. به عبارتی در سال ۱۳۸۱ در طی هر سه بارندگی‌های ۱۵، ۳۰ و ۴۵ دقیقه‌ای و دوره بازگشت ۲۵ 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 نیز توانسته‌اند کمترین میزان رواناب را جذب کنند.

در کلان‌شهر تبریز در سال ۱۴۰۱ با بارندگی‌های ۱۵ دقیقه‌ای (۸/۷۷ مترمکعب)، ۳۰ دقیقه‌ای (۱۳/۴۵ مترمکعب) و ۴۵ دقیقه‌ای (۱۰/۳۱ مترمکعب) و دوره بازگشت ۲۵ ساله در کلاس کمینه کاربری‌های اراضی بایر، تراکم مسکونی زیاد و فضای باز به ترتیب با ۷۸/۹۲، ۲۰/۵۴ و ۰/۲۱ درصد رتبه‌های اول تا سوم و در کلاس بیشینه، کاربری‌های فضای باز، تراکم مسکونی کم و تراکم مسکونی متوسط به ترتیب با ۵۳۳۰۹۲۰۰ (۳۴/۱۵ درصد)، ۳۱۴۵۰۵۰۰ (۲۰/۱۵ درصد) و ۲۸۶۶۲۵۰۰ (۱۸/۳۶ درصد) رتبه‌های اول تا سوم را به خود اختصاص داده‌اند. در کل در سال ۱۴۰۱ در طی بارندگی‌های ۱۵، ۳۰ و ۴۵ دقیقه‌ای، کاربری‌های اراضی بایر، فضای باز، تراکم مسکونی کم، تراکم مسکونی متوسط، تراکم مسکونی زیاد، اراضی کشاورزی، فضای سبز، آب و مرتع به ترتیب با ۸/۹۸ میلیون مترمکعب (۳۴/۳۱ درصد)، ۵/۳۵ میلیون مترمکعب (۲۰/۴۶ درصد)، ۳/۱۵ میلیون مترمکعب (۱۲/۰۴ درصد)، ۲/۸۷ میلیون مترمکعب (۱۰/۹۸ درصد)، ۲/۱۷ میلیون مترمکعب (۸/۳۰ درصد)، ۲/۱۱ میلیون مترمکعب (۸/۰۷ درصد)، ۱/۵۰ میلیون مترمکعب (۵/۷۳ درصد)، ۰/۰۳ میلیون مترمکعب (۰/۱۰ درصد) و ۰/۰۰۰۰۳ میلیون مترمکعب (۰/۰۰۰۱ درصد) رتبه‌های اول تا نهم را در جذب و نگهداشت رواناب به خود اختصاص داده‌اند. به عبارتی در سال ۱۴۰۱ در طی هر سه بارندگی‌های ۱۵، ۳۰ و ۴۵ دقیقه‌ای و دوره بازگشت ۲۵ ساله، کاربری‌های اراضی بایر، فضای باز و تراکم مسکونی کم توانسته‌اند بیشترین میزان رواناب را جذب کرده و به زمین نفوذ دهند و کاربری‌های آب و مرتع نیز توانسته‌اند کمترین میزان رواناب را جذب کنند.

ارزیابی ارزش پولی خدمت اکوسیستمی کاهش ریسک سیلاب شهری با استفاده از روش هزینه خسارت اجتناب شده
ارزش پولی خدمت اکوسیستمی کاهش ریسک سیلاب شهری از طریق حفظ و نگهداشت رواناب که در قالب هزینه خسارت اجتناب شده نصیب منطقه مورد مطالعه می‌شود، در قالب واحد پولی دلار مورد بررسی قرار می‌گیرد. لازم به ذکر است از آنجاکه فرمت خروجی مورد مذکور، شیپ فایل یا فایل وکتوری می‌باشد (فایل‌های وکتوری محاسبات را در مورد کل محدوده مورد مطالعه انجام می‌دهد) و نه TIF یا فایل رستری (فایل‌های رستری محاسبات را به صورت پیکسل به پیکسل انجام می‌دهد، لذا در این پژوهش ارزش پولی خدمت اکوسیستمی کاهش ریسک سیلاب شهری نه به تفکیک مناطق ده‌گانه بلکه برای کل محدوده کلان‌شهر تبریز مورد بررسی قرار گرفته است. در سال ۱۳۶۳ با میزان بارش ۲۱/۹۳ میلیمتری (۰/۰۰۰۰۲۲ مترمکعب) و با بارندگی ۱۵ دقیقه‌ای و دوره بازگشت ۲۵ ساله، میزان آب جذب و نگه داشته شده ۴۹ درصد، حجم آب جذب و نگه داشته شده ۶/۷۷ میلیون مترمکعب و میزان منفعت خدمت اکوسیستمی کاهش ریسک سیلاب شهری ۱۷/۱۹ میلیون دلار، با بارندگی ۳۰ دقیقه‌ای، میزان آب جذب و نگه داشته شده ۶۲ درصد، حجم آب جذب و نگه داشته شده ۵/۴۷ میلیون مترمکعب و میزان منفعت خدمت اکوسیستمی کاهش ریسک سیلاب شهری ۱۳/۸۹ میلیون دلار و با بارندگی ۴۵ دقیقه‌ای، میزان آب جذب و نگه داشته شده ۷۰ درصد، حجم آب جذب و نگه داشته شده ۴/۷۲ میلیون مترمکعب و میزان منفعت خدمت اکوسیستمی کاهش ریسک سیلاب شهری ۱۱/۹۹ میلیون دلار برای کل محدوده کلان‌شهر تبریز بوده است.

در سال ۱۳۸۱ با میزان بارش ۱۴/۰۷ میلیمتری (۰/۰۰۰۰۱۴ مترمکعب) و با بارندگی ۱۵ دقیقه‌ای، میزان آب جذب و نگه داشته شده ۵۱ درصد، حجم آب جذب و نگه داشته شده ۷ میلیون مترمکعب و میزان منفعت خدمت اکوسیستمی کاهش ریسک سیلاب شهری ۳۲/۰۸ میلیون دلار، با بارندگی ۳۰ دقیقه‌ای، میزان آب جذب و نگه داشته شده ۶۴ درصد، حجم آب جذب و نگه داشته شده ۵/۶۲ میلیون مترمکعب و میزان منفعت خدمت اکوسیستمی کاهش ریسک سیلاب

شهری ۲۵/۷۸ میلیون دلار و با بارندگی ۴۵ دقیقه، میزان آب جذب و نگه داشته شده ۷۲ درصد، حجم آب جذب و نگه داشته شده ۴/۸۳ میلیون مترمکعب و میزان منفعت خدمت اکوسیستمی کاهش ریسک سیلاب شهری ۲۲/۱۶ میلیون دلار، برای کل محدوده کلان‌شهر تبریز بوده است.

در سال ۱۴۰۱ با میزان بارش ۱۰/۷۸ میلیمتری (۰/۰۰۰۰۱۱ مترمکعب) و بارندگی ۱۵ دقیقه‌ای، میزان آب جذب و نگه داشته شده ۵۷ درصد، حجم آب جذب و نگه داشته شده ۷/۸۵ میلیون مترمکعب و میزان منفعت خدمت اکوسیستمی کاهش ریسک سیلاب شهری ۵۶/۰۸ میلیون دلار، با بارندگی ۳۰ دقیقه‌ای، میزان آب جذب و نگه داشته شده ۷۰ درصد، حجم آب جذب و نگه داشته شده ۶/۱۵ میلیون مترمکعب و میزان منفعت خدمت اکوسیستمی کاهش ریسک سیلاب شهری ۴۳/۹۶ میلیون دلار و بارندگی ۴۵ دقیقه‌ای و دوره بازگشت ۲۵ ساله، میزان آب جذب و نگه داشته شده ۷۷ درصد، حجم آب جذب و نگه داشته شده ۵/۲۰ میلیون مترمکعب و میزان منفعت خدمت اکوسیستمی کاهش ریسک سیلاب شهری ۳۷/۱۴ میلیون دلار برای کل محدوده کلان‌شهر تبریز بوده است.

بحث

در کلان‌شهر تبریز در هر سه دوره زمانی ۱۳۶۳، ۱۳۸۱ و ۱۴۰۱ با افزایش مدت‌زمان بارندگی (از ۱۵ به ۳۰ و ۴۵ دقیقه) میزان جذب و نگهداشت رواناب و به تبع آن میزان منفعت خدمت اکوسیستمی ریسک سیلاب شهری کاهش می‌یابد. به عبارتی با افزایش میزان زمان بارندگی، ظرفیت خاک برای جذب و نگهداشت رواناب کاهش می‌یابد که از این حیث این پژوهش با پژوهش بوز و مازومدار (۲۰۲۳) مطابقت دارد. این پژوهشگران نیز اذعان کرده‌اند که با افزایش میزان رواناب، ظرفیت جذب و نگهداشت آن کاهش می‌یابد. همچنین این که ظرفیت جذب و نگهداشت رواناب تبریز رفته رفته با گذشت زمان (سال ۱۴۰۱ نسبت به سال‌های ۱۳۸۱ و ۱۳۶۳) افزایش پیدا کرده است. چنان‌چه در سال ۱۳۶۳ در طی بارندگی‌های ۱۵، ۳۰ و ۴۵ دقیقه‌ای، حجم آب جذب و نگه داشته شده به ترتیب ۶/۷۷، ۵/۴۷ و ۴/۷۲ میلیون مترمکعب، با نرخ واحد سطح ۶۲٪، ۴۹٪ و ۷۰٪ و میزان منفعت خدمت اکوسیستمی کاهش ریسک سیلاب شهری ۱۷/۱۹، ۱۳/۸۹ و ۱۱/۹۹ میلیون دلار، در سال ۱۳۸۱ در طی بارندگی‌های ۱۵، ۳۰ و ۴۵ دقیقه‌ای، حجم آب جذب و نگه داشته شده، ۷، ۵/۶۲ و ۴/۸۳ میلیون مترمکعب، با نرخ واحد سطح ۵۱٪، ۶۴٪ و ۷۲٪ و میزان منفعت خدمت اکوسیستمی کاهش ریسک سیلاب شهری ۳۲/۰۸، ۲۵/۷۸ و ۲۲/۱۶ میلیون دلار و در سال ۱۴۰۱ در طی بارندگی‌های ۱۵، ۳۰ و ۴۵ دقیقه‌ای، ۷/۸۵، ۶/۱۵ و ۵/۲۰ میلیون مترمکعب، با نرخ واحد سطح ۵۷٪، ۷۰٪ و ۷۷٪ و میزان منفعت خدمت اکوسیستمی کاهش ریسک سیلاب شهری، ۵۶/۰۸، ۴۳/۹۶ و ۳۷/۱۴ میلیون دلار برای کل محدوده کلان‌شهر تبریز بوده است. یکی از دلایل این امر می‌تواند ناشی از افزایش زیرساخت‌های سبز تبریز از جمله فضای سبز باشد. چنان‌چه فضای سبز تبریز از سال ۱۳۶۳ تا ۱۳۸۱ روند کاهشی (۰/۸۷ درصد) داشته است و از سال ۱۳۸۱ تا ۱۴۰۱ در حدود ۰/۹۷ درصد افزایش داشته است.

بررسی وضعیت کاربری اراضی شهری تبریز نشان می‌دهد که افزایش روند مستمر شهرنشینی، تغییرات زیاد کاربری اراضی، افزایش ساخت‌وسازهای شهری در کلان‌شهر تبریز در طی دهه‌های اخیر باعث شده که میزان کاربری‌های با سطوح غیرقابل نفوذ به صورت پیوسته در حال افزایش بوده، چنان‌که کاربری مسکونی از ۷/۹۴ درصد در سال ۱۳۶۳ به ۱۶/۵۴ درصد در سال ۱۳۸۱ و ۱۶/۹۴ درصد در سال ۱۴۰۱ افزایش یافته است. این مورد باعث کاهش ظرفیت جذب و نگهداشت رواناب در بیشتر مناطق ده‌گانه کلان‌شهر تبریز شده که با افزایش هر چه بیشتر سطوح غیرقابل نفوذ در آینده نیز می‌تواند منجر به افزایش هر چه بیشتر ریسک سیلاب شهری در سطح مناطق شهری تبریز، به زیر آب رفتن زیرساخت‌های شهری و به تبع آن افزایش خسارات اقتصادی شده و همچنین باعث به مخاطره افتادن وضعیت کلی پایداری شهری تبریز

شود. چنان چه باقلانی و همکاران (۱۳۹۸) نیز همچون این پژوهش، تغییرات کاربری اراضی را از جمله عوامل اصلی افزایش نفوذناپذیری سطوح شهری و در نتیجه افزایش میزان ریسک سیلاب شهری دانسته‌اند. در کلان‌شهر تبریز در طی هر سه دوره زمانی ۱۳۶۳، ۱۳۸۱ و ۱۴۰۱ و با بارندگی‌های ۱۵، ۳۰ و ۴۵ دقیقه‌ای، به ترتیب مناطق ۶، ۵ و ۷ (با وسعت بیشتر و پوشش سبز نسبی) بیشترین میزان جذب و نگهداشت رواناب و مناطق ۹ و ۸ (با تراکم بالا) کمترین میزان جذب و نگهداشت رواناب را داشته‌اند. بدین‌سان نرخ واحد سطح در مناطق متراکم ۲۰ الی ۳۰ درصد کمتر است، که نشان‌دهنده تأثیر تراکم مسکونی بر CN است.

نتیجه‌گیری

هدف از این پژوهش، ارزیابی خدمت اکوسیستمی کاهش ریسک سیلاب شهری کلان‌شهر تبریز با دوره بازگشت ۲۵ ساله بوده است. نتایج نشان داد که با افزایش مدت‌زمان بارندگی (از ۱۵ به ۳۰ و ۴۵ دقیقه) در طی هر سه دوره ۱۳۶۳، ۱۳۸۱ و ۱۴۰۱ میزان جذب و نگهداشت رواناب و به تبع آن میزان منفعت خدمت اکوسیستمی کاهش ریسک سیلاب شهری نیز کاهش می‌یابد، ولی در کل میزان جذب در طی هر سه مدت‌زمان بارندگی (۱۵، ۳۰ و ۴۵ دقیقه) و هر سه دوره ۱۳۶۳، ۱۳۸۱ و ۱۴۰۱ (به دلیل کاهش بارش کل و افزایش جزئی زیرساخت‌های سبز) افزایش یافته است. نرخ واحد سطح نیز نشان‌دهنده بهبود کارایی نفوذ است (به طور متوسط از ۶۰٪ به ۶۸٪). این میزان تفاوت مهم است، زیرا حجم کل تحت‌تأثیر وسعت تبریز (۱۱۸۰۰ km²) است، درحالی‌که نرخ واحد سطح (mm/m²) تحت‌تأثیر پتانسیل محلی است. همچنین نتایج نشان داد که مناطقی که در آن‌ها تراکم جمعیتی و به تبع آن کاربری با تراکم مسکونی زیاد بیشتر بوده، کمترین پتانسیل جذب و نگهداشت رواناب را داشته‌اند. در کلان‌شهر تبریز به دلیل ناچیز بودن میزان کاربری‌های مرتبط با زیرساخت‌های سبز از جمله کاربری‌های فضای سبز، اراضی کشاورزی و مرتع که نقش عمده‌ای در کاهش ریسک سیلاب شهری دارند، این کاربری‌ها نتوانسته‌اند نقش چندان زیادی در کاهش ریسک سیلاب شهری ایفا کنند. با این‌وجود، زیرساخت‌های سبز نسبت به زیرساخت‌های آبی نقش بیشتری در کاهش ریسک سیلاب شهری تبریز داشته‌اند. در پتانسیل جذب و نگهداشت رواناب تبریز، کاربری اراضی/پوشش اراضی در مقایسه با سایر موارد از جمله گروه هیدرولوژیکی خاک نقش بیشتری را داشته است. با وجود پایین بودن ظرفیت جذب و نگهداشت رواناب تبریز، باز نقش خدمت اکوسیستمی کاهش ریسک سیلاب شهری تبریز همچنان چشمگیر است، که اگر این نقش نبود کلان‌شهر تبریز باید متحمل هزینه‌های گزاف ناشی از ریسک سیلاب احتمالی می‌شد. در کل، تبریز ظرفیت جذب ۵ الی ۸ میلیون مترمکعبی رواناب را دارد که در حدود ۲۰ الی ۵۰ میلیون دلار ارزش اقتصادی ایجاد می‌کند، اما نرخ واحد سطح در وضعیت آبی نشان‌دهنده کاهش پتانسیل میزان جذب رواناب در نتیجه افزایش میزان شهرنشینی است. باتوجه‌به نتایج پژوهش، پیشنهادهای زیر ارائه می‌گردد:

- ✓ باتوجه‌به محدودیت‌های داده‌ای؛ مانند رزولوشن ۳۰ متری لندست (با دقت ۹۰٪ و عدم‌قطعیت ۱۰ الی ۲۰٪ CN) و داده‌های بارش مبتنی بر یک‌ایستگاه، پیشنهاد می‌شود مدل با استفاده از تصاویر دقیق‌تر مانند Sentinel-2 و داده‌های توزیع فضایی بارش (از ایستگاه‌های متعدد) به‌روزرسانی شود که این مورد از نیاز به بهبود دقت در نرخ واحد سطح جذب ناشی می‌شود و می‌تواند عدم‌قطعیت اقتصادی را در حدود ۳۰ الی ۵۰٪ کاهش دهد.
- ✓ نتایج نشان‌دهنده کاهش پتانسیل جذب با افزایش سطوح نفوذناپذیر (از ۷/۹۴٪ مسکونی در ۱۳۶۳ به ۱۶/۹۴٪ در ۱۴۰۱) هست، بنابراین پیشنهاد می‌شود سناریوهای ۲۰۵۰-۲۱۰۰ با داده‌های IPCC و افزایش شدت بارش‌های رگباری مدل‌سازی شود و این مدل با مدل‌های دیگر InVEST مانند Urban Cooling برای ارزیابی همزمان سیلاب و جزایر

حرارتی شهری، به‌ویژه در شرایط نیمه‌خشک تبریز، ادغام شود. این پیشنهاد بر پایه روند زمانی پژوهش (۳۸ ساله) و عدم قطعیت‌های مدل (مانند فرض ثابت وضعیت رطوبت پیشین خاک) استوار است.

✓ با افزایش ارزش خدمت اکوسیستمی به طور متوسط از ۱۵ میلیون دلار در ۱۳۶۳ به ۴۵ میلیون دلار در ۱۴۰۱ (بر پایه روش هزینه خسارت اجتناب شده)، پیشنهاد می‌شود این ارقام در بودجه‌بندی شهرداری تبریز برای سرمایه‌گذاری در زیرساخت‌های سبز مورد استفاده قرار گیرد. برای مثال، تحلیل هزینه-فایده برای پروژه‌های سبز در مناطق پرریسک مانند مناطق ۹ و ۸، با تمرکز بر کاهش خسارات احتمالی (۱۰۰ دلار بر مترمربع ساختمان). این رویکرد محدودیت‌های اقتصادی مدل (مانند نرخ ثابت خسارت) را جبران می‌کند.

✓ نتایج نشان‌دهنده سهم بیشتر کاربری اراضی بایر و اراضی کشاورزی در حجم کل جذب (به طور متوسط ۱۳ الی ۱۶ میلیون مترمکعب) هست، اما روند کاهشی آن‌ها از ۱۳۶۳ تا ۱۴۰۱ (از ۶۲٪ به ۳۴٪ کاربری اراضی/پوشش اراضی) پتانسیل سیلاب را افزایش داده است. پیشنهاد می‌شود سیاست‌های حفاظتی برای جلوگیری از تبدیل این اراضی به کاربری‌های شهری همراه با ادغام کشاورزی پایدار برای بهبود نفوذ خاک‌های گروه C/D اجرا شود. این پیشنهاد مستقیماً بر پایه منطق هیدرولوژیکی SCS-CN (با CN پایین‌تر در این کلاس‌ها) استوار است.

✓ باتوجه به این که مناطق ۹ و ۸ به دلیل تراکم مسکونی بالا و سطوح نفوذناپذیر کمترین حجم و نرخ جذب رواناب را دارند، پیشنهاد می‌شود برنامه‌ریزی برای توسعه فضای سبز، باغ‌های بارانی و بام‌های سبز در این مناطق در اولویت اجرایی قرار گیرد. این اقدام مستقیماً از نقش غالب کلاس‌های کاربری اراضی/پوشش اراضی مانند اراضی کشاورزی و فضای سبز در افزایش میزان جذب ۷۰ الی ۹۰٪ ناشی می‌شود و می‌تواند عدم قطعیت مدل در مقیاس محلی را کاهش دهد.

حامی مالی

این اثر حامی مالی نداشته است.

سهم نویسندگان در پژوهش

نویسندگان در تمام مراحل و بخش‌های انجام پژوهش سهم برابر داشتند.

تضاد و منافع

نویسندگان اعلام می‌دارند که هیچ تضاد منافی در رابطه با نویسندگی و یا انتشار این مقاله ندارند.

تقدیر و تشکر

نویسندگان از همه کسانی که در انجام این پژوهش به ما یاری رساندند، به‌ویژه کسانی که کار ارزیابی کیفیت مقالات را انجام دادند، تشکر و قدردانی می‌نمایند.

منابع

ایرانی، طیب؛ عبقری، هیراد و رسولی، علی‌اکبر. (۱۴۰۴). تحلیل تهدیدات تغییر اقلیم و تغییر کاربری اراضی بر افزایش ریسک سیلاب حوضه آبخیز شهرچای. *مخاطرات محیط طبیعی*، ۱۴(۴)، ۱۰۵-۱۲۶. <https://doi.org/10.22111/jneh.2024.49039.2053>

آذر، علی؛ پناهی، علی و شریفی، رقیه. (۱۳۹۳). کاهش خسارت سیل از طریق تعیین حریم و بستر رودخانه مهران‌رود تبریز. *نشریه امداد و نجات*، ۶(۲)، ۹۶-۱۰۳.

آذریان، کامیار. (۱۴۰۰). برآورد رواناب شهری و پهنه‌بندی آن با استفاده از تحلیل‌های فضایی در شهر بندرعباس. فصلنامه جغرافیا و برنامه‌ریزی شهری چشم‌انداز زاگرس، ۱۳ (۵۰)، ۲۷-۵۴.

باقلانی، میلاد؛ رستمی، نورالدین و توکلی، محسن. (۱۳۹۸). شناسایی عوامل مؤثر بر بروز سیلاب شهری در حوزه آبخیز شهر ایلام. نشریه مهندسی و مدیریت آبخیز، ۱۱ (۲)، ۵۳۳-۵۳۶. <https://doi.org/10.22092/ijwmse.2018.120069.1417>

تابعی، نادر؛ بابایی اقدم، فریدون و حکیمی، هادی. (۱۴۰۱). شهر همه‌شمول؛ رویکردی نوین در برنامه‌ریزی شهری مطالعه موردی: شهر تبریز. مجله پژوهش‌های جغرافیایی برنامه‌ریزی شهری، ۱۰ (۲)، ۱۱۵-۱۳۲. <https://doi.org/10.22059/JURBANGEO.2022.335543.1627>

خاتونی، کوشا؛ هوشیاری‌پور، فرهاد؛ نوری، روح‌الله و ملک‌محمدی، بهرام. (۱۴۰۲). مدل‌سازی و پهنه‌بندی دوبعدی سیلاب شهری در حوضه شمال شهر کرج با استفاده از HEC-RAS 2D. فصلنامه مهندسی آب، ۱۱ (۱)، ۹۹-۱۱۰.

زینالی‌عظیم، علی؛ حاتمی‌گلزاری، الهام؛ کرمی، اسلام و بابازاده‌اسکوئی، سولماز. (۱۴۰۰). سنجش پایداری محیطی شهر تبریز بر اساس شاخص‌های زیست‌محیطی. فصلنامه پایداری، توسعه و محیط‌زیست، ۲ (۳)، ۴۱-۵۹. <https://doi.org/JSDE-2111-1168>

(R1)

علیزاده، امین. (۱۳۹۴). اصول هیدرولوژی کاربردی. چاپ سی و نهم، مشهد: انتشارات دانشگاه امام رضا (ع).

فرحناکیان، زهرا؛ قضاوی، رضا؛ دخانی، سیامک و امیدوار، ابراهیم. (۱۴۰۳). بررسی تأثیر تغییرات اقلیمی بر دما، بارندگی و منحنی‌های شدت - مدت - فراوانی در مناطق خشک (مطالعه موردی: حوضه آبخیز کاشان). مدل‌سازی و مدیریت آب‌و‌خاک، ۴ (۲)، ۲۱۱-۲۲۶. <https://doi.org/10.22098/mmws.2023.12570.1254>

قهرمان، بیژن و آبخضر، حمیدرضا. (۱۳۸۳). اصلاح روابط شدت - مدت - فراوانی بارندگی در ایران. علوم آب‌و‌خاک، ۸ (۲)، ۱-۱۴.

معاونت برنامه‌ریزی و توسعه سرمایه انسانی شهرداری تبریز. (۱۴۰۱). سالنامه آماری شهر و شهرداری تبریز (سال ۱۳۹۹). چاپ اول، تبریز: معاونت برنامه‌ریزی و توسعه سرمایه انسانی شهرداری تبریز، اداره کل برنامه و بودجه، گروه آمار و تحلیل اطلاعات.

مهندسین مشاور نقش محیط. (۱۳۹۱). طرح توسعه و عمران (جامع) شهر تبریز، گزارش محیطی مرحله موجود، وزارت راه و شهرسازی، اداره کل راه و شهرسازی استان آذربایجان شرقی.

References

- Akhtar, M., Zhao, Y., Gao, G., Gulzar, Q., Hussain, A., & Samie, A. (2020). Assessment of ecosystem services value in response to prevailing and future land use/cover changes in Lahore, Pakistan. *Regional Sustainability*, 1(1), 37-47. <https://doi.org/10.1016/j.regsus.2020.06.001>.
- Alizadeh, A. (2015). *Principles of Applied Hydrology*, 39th edition, Mashhad: Imam Reza University Press. [In Persian].
- Azar, A., Panahi, A., & Sharifi, R. (2014). Reducing flood damage by determining the boundary and bed of the Mehran River in Tabriz, *Journal of Rescue and Relief*, 6 (2), 96-103. [In Persian].
- Azarian, K. (2021). Urban runoff estimation and zoning using spatial analysis in Bandar Abbas city, *Journal of Geography and Urban Planning Zagros Landscape*, 13 (50), 27-54. [In Persian].
- Baghalani, M., Rostami, N., & Tavakoli, M. (2019). Identification of factors affecting urban flood in Ilam City Watershed. *Journal of Watershed Engineering and Management*, 1 (2), 523-536. <https://doi.org/10.22092/ijwmse.2018.120069.1417> [In Persian].
- Barnaud, C., Corbera, E., Muradian, R., Salliou, N., Sirami, C., Vialatte, A., ... & Antona, M. (2018). Ecosystem services, social interdependencies, and collective action. *Ecology and society*, 23(1). <https://doi.org/10.5751/ES-09848-230115>
- 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>

- Cea, L., & Costabile, P. (2022). Flood risk in urban areas: Modelling, management and adaptation to climate change. A review. *Hydrology*, 9(3), 50. <https://doi.org/10.3390/hydrology9030050>.
- Chan, F. K. S., Yang, L. E., Scheffran, J., Mitchell, G., Adekola, O., Griffiths, J., ... & McDonald, A. (2021). Urban flood risks and emerging challenges in a Chinese delta: The case of the Pearl River Delta. *Environmental Science & Policy*, 122, 101-115. <https://doi.org/10.1016/j.envsci.2021.04.009>.
- Chen, J., Hill, A. A., & Urbano, L. D. (2009). A GIS-based model for urban flood inundation. *Journal of Hydrology*, 373(1-2), 184-192. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2009.04.021>.
- Dekongmen, B. W., Kabo-bah, A. T., Domfeh, M. K., Sunkari, E. D., Dile, Y. T., Antwi, E. O., & Gyimah, R. A. A. (2021). Flood vulnerability assessment in the Accra Metropolis, southeastern Ghana. *Applied Water Science*, 11, 1-10. <https://doi.org/10.1007/s13201-021-01463-9>.
- Dong, X., Jiang, L., Zeng, S., Guo, R., & Zeng, Y. (2020). Vulnerability of urban water infrastructures to climate change at city level. *Resources, Conservation and Recycling*, 161, 104918. <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2020.104918>.
- 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. <https://doi.org/10.22098/mmws.2023.12570.1254> [In Persian].
- Foster, S. R. (2006). The city as an ecological space: Social capital and urban land use. *Notre Dame L. Rev.*, 82, 527.
- Franzluebbbers, A. J., & Martin, G. (2022). Farming with forages can reconnect crop and livestock operations to enhance circularity and foster ecosystem services. *Grass and Forage Science*, 77(4), 270-281. <https://doi.org/10.1111/gfs.12592>.
- 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. <https://doi.org/20.1001.1.24763594.1383.8.2.1.4> [In Persian].
- 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.
- Gupta, A. K., & Nair, S. S. (Eds.). (2012). Ecosystem approach to disaster risk reduction. New Delhi: National Institute of Disaster Management.
- Haque, M. N., Mahi, M. M., Sharif, M. S., Rudra, R. R., & Sharifi, A. (2023). Changes in the economic value of ecosystem services in rapidly growing urban areas: the case of Dhaka, Bangladesh. *Environmental Science and Pollution Research*, 30(18), 52321-52339. <https://doi.org/10.1007/s11356-023-26096-0>.
- <https://earth.explore.usgs.gov>
- <https://www.tabriz.ir>
- <https://www.hec.usace.army.mil/confluence/hmsdocs/hmstrm/cn-tables>
- <https://xiaoganghe.github.io/InVEST-Cities-in-Nature/docs/Flood-Risk-Mitigation/about>
- Irani, T., Abghari, H. & Rasouli, A. A. (2025). Analyzing the Threats of Climate Change and Land Use Changes on Increasing Flood Risk in the Shahrchay Drainage Basin. *Journal of Natural Environmental Hazards*, 14(44), 105-126. <https://doi.org/10.22111/jneh.2024.49039.2053> [In Persian].
- Kadaverugu, A., Nageshwar Rao, C., & Viswanadh, G. K. (2021). Quantification of flood mitigation services by urban green spaces using InVEST model: a case study of Hyderabad city, India. *Modeling earth systems and environment*, 7(1), 589-602. <https://doi.org/10.1007/s40808-020-00937-0>
- Kansal, M. L., & Bose, S. (2025). Ecosystem services importance in stormwater management and flood risk mitigation through InVEST model—a case study on MCD zones of Delhi. *Sustainable Water Resources Management*, 11(2), 1-21. <https://doi.org/10.1007/s40899-025-01202-x>
- Khatouni, K., Hoshyaripour, F., Nouri, R., & Malek Mohammadi, B. (2023). Two-dimensional modeling and zoning of urban flood in the northern basin of Karaj city using HEC-RAS 2D, *Journal of Water Engineering*, 11 (1), 99-110. [In Persian].
- Larsen, T. A., Hoffmann, S., Lüthi, C., Truffer, B., & Maurer, M. (2016). Emerging solutions to the water challenges of an urbanizing world. *Science*, 352(6288), 928-933. <https://doi.org/10.1126/science.aad8641>.

- Leta, B. M., & Adegna, D. (2024). Quantifying flood risk using InVEST-UFRM model and mitigation strategies: the case of Adama City, Ethiopia. *Modeling Earth Systems and Environment*, 1-21. <https://doi.org/10.1007/s40808-024-01956-x>
- Mensah, H., & Ahadzie, D. K. (2020). Causes, impacts and coping strategies of floods in Ghana: a systematic review. *SN Applied Sciences*, 2, 1-13. <https://doi.org/10.1007/s42452-020-2548-z>.
- Naghsh-E-Mohit Consulting Engineers. (2012). *Development and Construction (Comprehensive) Plan of Tabriz City, Environmental Report of the Existing Stage*, Ministry of Roads and Urban Development, General Office of Roads and Urban Development of East Azerbaijan Province. [In Persian].
- Pauleit, S., Liu, L., Ahern, J., & Kazmierczak, A. (2011). Multifunctional green infrastructure planning to promote ecological services in the city.
- Row, S. (1976). Appendix I : USDA / SCS curve number method for estimating daily runoff, 88–90.
- 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., Babae 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. <https://doi.org/10.22059/JURBANGEO.2022.335543.1627>. [In Persian].
- Tansar, H., Duan, H. F., & Mark, O. (2023). A multi-objective decision-making framework for implementing green-grey infrastructures to enhance urban drainage system resilience. *Journal of Hydrology*, 620, 129381. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2023.129381>.
- 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>
- Vice President of Planning and Development of Human Capital of Tabriz Municipality. (2022). *Statistical yearbook of Tabriz city and municipality (year 2020)*, Tabriz: Vice President of Planning and Development of Human Capital of Tabriz Municipality, Program and Budget Department, Group of Statistics and Information Analysis, First Edition. [In Persian].
- 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>
- Vilca-Campana, K., Carrasco-Valencia, L., Iruri-Ramos, C., Cárdenas-Pillco, B., Escudero, A., & Chanove-Manrique, A. (2025). Improving Urban Flood Resilience: Urban Flood Risk Mitigation Assessment Using a Geospatial Model in the Urban Section of a River Corridor. *Water*, 17(7), 1047. <https://doi.org/10.3390/w17071047>.
- Wang, M., Liu, M., Zhang, D., Qi, J., Fu, W., Zhang, Y., ... & Tan, S. K. (2023). Assessing and optimizing the hydrological performance of Grey-Green infrastructure systems in response to climate change and non-stationary time series. *Water Research*, 232, 119720. <https://doi.org/10.1016/j.watres.2023.119720>.
- Wang, Z., Li, Z., Wang, Y., Zheng, X., & Deng, X. (2024). Building green infrastructure for mitigating urban flood risk in Beijing, China. *Urban Forestry & Urban Greening*, 93, 128218. <https://doi.org/10.1016/j.ufug.2024.128218>
- Yousefi, S., Pourghasemi, H. R., Rahmati, O., Keesstra, S., Emami, S. N., & Hooke, J. (2021). Geomorphological change detection of an urban meander loop caused by an extreme flood using remote sensing and bathymetry measurements (a case study of Karoon River, Iran). *Journal of Hydrology*, 597, 125712. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2020.125712>.
- 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. <https://doi.org/JSDE-2111-1168> [In Persian].