



Modeling of land use/land cover change impact on urban ecological flood resilience: a case study of Rasht city

Bahman Veisi Nabikandi^{1✉} | Arman Rastkhadiv² | Faeze Shoja³

1. Corresponding Author, Department of Landscape Architecture, Faculty of Agriculture, University of Tabriz, Tabriz, Iran. E-mail: bahmanveisi1400@ms.tabrizu.ac.ir

2. Department of Landscape Architecture, Faculty of Agriculture, University of Tabriz, Tabriz, Iran. E-mail: armanrastkhadiv1400@ms.tabrizu.ac.ir

3. Department of Physical Geography, Faculty of Geography, University of Tehran, Tehran, Iran. E-mail: faeze.shoja@pgs.usb.ac.ir

Article Info

Article type:

Research Article

Article history:

Received 09 September 2024

Received in revised form 06 October 2024

Accepted 16 October 2024

Published online 20 December 2024

Keywords:

Ecological spaces,

Ecosystem services,

Google earth engine,

InVEST-UFRM.

ABSTRACT

The changes in land use and land cover (LULC) driven by increasing human activities have resulted in a multitude of environmental challenges, including an elevated risk of flooding in densely populated urban areas. To achieve sustainable development goals, it is imperative to employ spatial-temporal modeling of urban runoff and floods and to assess urban ecological resilience to this challenge. In this study, Landsat satellite data was employed within the Google Earth Engine web-based platform to generate LULC maps for the city of Rasht, which is undergoing rapid urbanization, for the years 1990, 2005, and 2020. A CA-Markov model was employed to predict the LULC map for 2035. Subsequently, the InVEST-UFRM model was employed to assess the generation of runoff and the resilience of urban areas against potential flood hazards during these years. The findings indicated that the study area experienced a high rate of urbanization between 1990 and 2020. This trend is anticipated to persist, accompanied by a notable expansion of built-up areas and a considerable reduction in green infrastructure in the future. The InVEST-UFRM model yielded results indicating that the area with a high potential for flooding constituted 7.5%, 12.6%, and 21% of the total area in 1990, 2005, and 2020, respectively. The model predicts that this area will reach 28.2% by 2035. In conclusion, the findings of this study demonstrate that LULC changes have significantly impacted the reduction in Rasht city's ecological resilience against flood hazards. This research, which combines remote sensing data with new technologies, provides insights into assessing urban flood resilience under the influence of land use changes, particularly in data-limited areas. The results of this study can be used as a strategic tool for urban managers to make informed decisions for effective urban flood management in areas with similar characteristics.

Cite this article: Veisi Nabikandi, B., Rastkhadiv, A., & Shoja, F. (2024). Modeling of land use/land cover change impact on urban ecological flood resilience: a case study of Rasht city. *Journal of Natural Environment*, 77 (3), 385-400. DOI: <http://doi.org/10.22059/jne.2024.382160.2710>





مدل سازی تأثیر تغییر کاربری اراضی/پوشش زمین بر تاب‌آوری اکولوژیک شهری در برابر سیلاب (مطالعه شهر رشت)

بهمن ویسی نبی‌کندی^۱ | آرمان راست‌خدویو^۲ | فائزه شجاع^۳

۱. نویسنده مسئول، گروه مهندسی فضای سبز، دانشکده کشاورزی، دانشگاه تبریز، تبریز، ایران. رایانامه: bahmanveisi1400@ms.tabrizu.ac.ir

۲. گروه مهندسی فضای سبز، دانشکده کشاورزی، دانشگاه تبریز، تبریز، ایران. رایانامه: armanrastkhadiv1400@ms.tabrizu.ac.ir

۳. گروه جغرافیای طبیعی، دانشکده جغرافیا، دانشگاه تهران، تهران، ایران. رایانامه: faeze.shoja@pgs.usb.ac.ir

اطلاعات مقاله	چکیده
نوع مقاله: مقاله پژوهشی	تغییر کاربری اراضی/پوشش زمین (LULC) متأثر از افزایش فعالیت‌های مخرب انسانی باعث ایجاد چالش‌های محیط‌زیستی متعددی مانند افزایش خطر سیلاب در مناطق پرجمعیت شهری شده است. مدل سازی پراکنش مکانی-زمانی رواناب و سیلاب شهری و ارزیابی تاب‌آوری اکولوژیک شهری در برابر این چالش جهت دستیابی به اهداف توسعه پایدار ضروری است. در این پژوهش با استفاده از داده‌های ماهواره لندست در سامانه مبتنی بر وب گوگل ارث انجین، نقشه‌های LULC محدوده شهر رشت که با شهرنشینی سریع مواجه است برای سال‌های ۱۹۹۰، ۲۰۰۵ و ۲۰۲۰ تهیه گردید و با استفاده از مدل CA-Markov نقشه LULC برای سال ۲۰۳۵ پیش‌بینی شد. در ادامه با استفاده از مدل InVEST-UFRM میزان تولید رواناب و تاب‌آوری شهری در برابر خطر احتمالی سیلاب در سال‌های مذکور مورد ارزیابی قرار گرفت. نتایج نشان داد که منطقه مورد مطالعه در بازه زمانی ۱۹۹۰ تا ۲۰۲۰ شاهد نرخ بالایی از گسترش شهرنشینی بوده و این روند رو به رشد با افزایش مناطق ساخته شده و کاهش چشمگیر زیرساخت‌های سبز در آینده نیز ادامه خواهد یافت. نتایج به‌دست آمده از کاربرد مدل InVEST-UFRM در ارزیابی خطر سیلاب نیز حاکی از این بود که مساحت مناطق با پتانسیل بالای وقوع سیلاب در سال‌های ۱۹۹۰، ۲۰۰۵ و ۲۰۲۰ به ترتیب ۵/۷، ۱۲/۶ و ۲۱ درصد بوده است. براساس این مدل، انتظار می‌رود این مساحت تا سال ۲۰۳۵ به ۲۸/۲ درصد افزایش یابد. به‌طور کلی مبتنی بر یافته‌های این پژوهش، تغییرات LULC به‌طور قابل توجهی بر کاهش تاب‌آوری اکولوژیک شهر رشت در برابر مخاطرات سیلاب شهری تأثیر گذاشته است. این پژوهش با تلفیق داده‌های سنسجش از دور و فناوری‌های نوین، دیدگاه‌های نوینی در خصوص ارزیابی تاب‌آوری سیلاب شهری تحت تأثیر تغییرات کاربری اراضی، به‌ویژه در مناطق با محدودیت داده‌ای، ارائه می‌دهد. نتایج این مطالعه می‌تواند به‌عنوان یک ابزار راهبردی برای مدیران شهری در اتخاذ تصمیمات آگاهانه جهت مدیریت مؤثر سیلاب‌های شهری در مناطق با ویژگی‌های مشابه مورد استفاده قرار گیرد.
تاریخ دریافت: ۱۴۰۳/۰۶/۱۹	
تاریخ بازنگری: ۱۴۰۳/۰۷/۱۵	
تاریخ پذیرش: ۱۴۰۳/۰۷/۲۵	
تاریخ انتشار: ۱۴۰۳/۰۹/۳۰	
کلیدواژه‌ها: خدمات اکوسیستم، فضاهای اکولوژیک، گوگل ارث انجین، InVEST-UFRM	

استناد: ویسی نبی‌کندی، بهمن؛ راست‌خدویو، آرمان. و شجاع، فائزه (۱۴۰۳). مدل سازی تأثیر تغییر کاربری اراضی/پوشش زمین بر تاب‌آوری اکولوژیک شهری در برابر

سیلاب (مطالعه شهر رشت). محیط زیست طبیعی، ۷۷ (۳)، ۴۰۰-۳۸۵.

DOI: <http://doi.org/10.22059/jne.2024.382160.2710>



مقدمه

شهرها در سراسر جهان به دلیل تغییرات اقلیمی و افزایش شدت و فراوانی رویدادهای شدید آب و هوایی، به‌ویژه سیل‌های ناگهانی ناشی از بارش‌های شدید کوتاه‌مدت، با چالش‌های جدی مواجه هستند. در مناطق ساحلی، ترکیب سیل‌های ناشی از طوفان‌های دریایی و افزایش رواناب سطحی، خطر وقوع سیل‌های ترکیبی و گسترده‌تر را افزایش داده و تهدیدی جدی برای زیرساخت‌ها، اقتصاد و جوامع شهری محسوب می‌شود (Quagliolo *et al.*, 2021). سیل یکی از جدی‌ترین و متداول‌ترین بلایای طبیعی شناخته شده در دهه‌های اخیر است (Xu *et al.*, 2023). آمارها حاکی از آن است که در بازه زمانی ۱۹۸۹ تا ۲۰۱۹، به‌طور متوسط سالانه حدود ۳۲۰ رخداد بلایای طبیعی بزرگ در سطح جهان گزارش شده که در این میان، سیل با فراوانی قابل توجه‌ای بیش از ۶۰ درصد از کل وقایع را به‌خود اختصاص داده است (Xu *et al.*, 2024). پیامدهای ناشی از مخاطره سیلاب در شهرها به دلیل اثرات ترکیبی تغییرات آب و هوا و شهرنشینی سریع در حال افزایش است (Rentschler *et al.*, 2022). مطالعات نشان می‌دهند که شدت و فراوانی رویدادهای بارشی شدید در آینده افزایش خواهد یافت (Thackeray *et al.*, 2022). همزمان با این روند، پیش‌بینی می‌شود که جمعیت شهری تا سال ۲۰۵۰ به ۶۸ درصد جمعیت جهانی برسد (سازمان ملل متحد، ۲۰۱۹)، که منجر به تمرکز دارایی‌های بیشتر در مناطق شهری شده و بنابراین آسیب‌پذیری این مناطق را در برابر بلایای طبیعی همچون سیلاب افزایش می‌دهد (Rosenzweig *et al.*, 2018; Liu *et al.*, 2023). علاوه بر این، شهرنشینی تغییرات قابل توجهی در کاربری اراضی/پوشش زمین^۱ (LULC) ایجاد می‌کند که شرایط سطح زمین را تغییر می‌دهد (Tierolf *et al.*, 2021). گسترش سریع سطوح غیرقابل نفوذ ظرفیت جذب آب را کاهش داده که منجر به افزایش حجم و سرعت رواناب مستقیم سطحی می‌شود (Hemmati *et al.*, 2022). بنابراین، توانایی مناطق شهری در پاسخ به بلایای سیلاب به یک نگرانی مهم عمومی تبدیل شده است.

تحولات اخیر در پژوهش‌های مدیریت مخاطرات سیلاب، نشان‌دهنده تغییر رویکرد از تحلیل آسیب‌پذیری به سمت شناسایی و ارزیابی جامع‌تر خطر سیلاب دارد. علاوه بر این، تقویت تاب‌آوری سیلاب به‌عنوان یک هدف کلیدی در مطالعات اخیر مطرح شده است. مفهوم تاب‌آوری که نخستین بار توسط هالینگ در سال ۱۹۷۳ در حوزه اکولوژی معرفی شد، به توانایی یک سیستم برای مقابله با اختلالات خارجی و بازگشت به حالت تعادل اشاره دارد. این مفهوم در مطالعات شهری نیز وارد شده و دیدگاه نوینی در زمینه کنترل سیلاب و کاهش بلایا ارائه داده است (Zhu *et al.*, 2021). تاب‌آوری در برابر سیلاب شهری به معنی توانایی یک شهر و اجزای تشکیل‌دهنده آن (از جمله سیستم‌های اجتماعی، اقتصادی، محیط‌زیستی و زیرساختی) در جذب، مقابله، بازیابی و سازگاری با اختلالات ناشی از رویدادهای شدید آب و هوایی می‌باشد (Zhang *et al.*, 2023). Zhang (۲۰۲۳) با ادغام مفهوم تاب‌آوری در چارچوب ارزیابی خطر سیلاب شهری، گام مهمی در این زمینه برداشت. Chen و Leandro (۲۰۱۹) تاب‌آوری شهری در برابر سیلاب را توانایی سیستم‌های شهری در تحمل اثرات سیلاب و بازگشت به حالت اولیه پس از وقوع آن تعریف می‌کنند. از سوی دیگر، Mehryar و Surminski (۲۰۲۲) بر توانایی کاهش خطر سیلاب، مقاومت و سازگاری با شرایط سیلابی آینده به‌عنوان ابعاد کلیدی تاب‌آوری سیل شهری تأکید دارند.

ارزیابی سطح تاب‌آوری سیلاب‌های شهری و شناسایی راهکارهای تقویت آن، برای تدوین برنامه‌های بلندمدت توسعه شهری و تصمیم‌گیری‌های مدیریتی بسیار حائز اهمیت است. پژوهشگران مختلف با انتخاب شاخص‌های مناسب و توسعه مدل‌های ارزیابی، تلاش کرده‌اند تا به این هدف دست یابند. به‌عنوان مثال، Zhu (۲۰۲۱) با در نظر گرفتن کل چرخه سیل، شاخص‌هایی را برای ارزیابی تاب‌آوری در مراحل قبل، حین و بعد از سیلاب انتخاب کرد. همچنین، Moghadas و همکاران (۲۰۱۹) با استفاده از روش تصمیم‌گیری چند معیاره، تاب‌آوری سیلاب در تهران را ارزیابی کردند. مطالعات اخیر نشان می‌دهند که ارزیابی خطر سیلاب، به‌ویژه در مناطق شهری، نیازمند تحلیل‌هایی فراتر از فرآیندهای هیدرولوژیک است که می‌تواند بر پایداری اکوسیستم تأثیر بگذارد. برای پایش سیلاب به‌عنوان تابعی از LULC در مقیاس‌های مکانی و زمانی، محققان معمولاً از مدل‌های هیدرولوژیک، داده‌های سنجش از دور و سیستم اطلاعات جغرافیایی استفاده می‌کنند (Wijayarathne and Coulibaly, 2020; Li and Siddique, 2020; Taramideh *et al.*, 2022). یکی از مدل‌های پرکاربرد در این حوزه، مدل

^۱Land Use/Land Cover

کاهش خطر سیلاب شهری^۲ (UFRM) است که بخشی از مجموعه نرم‌افزاری InVEST محسوب می‌شود و به منظور ارزیابی خدمات اکوسیستم و پایداری محیط‌زیست توسعه یافته است. مطالعات متعدد از جمله پژوهش Kadaverugu و همکاران (۲۰۲۱) در شهر حیدرآباد هند، نشان دادند که این مدل قادر است خدمات کاهش سیلاب فضاهای سبز را کمی‌سازی کرده و خسارت‌های اقتصادی ناشی از سیلاب را برآورد نماید. به طوری که براساس پژوهش ایشان، ۴۴ تا ۵۰ درصد از بارش‌ها توسط فضاهای سبز و باز شهری حفظ می‌شوند. همچنین، Quagliolo و همکاران (۲۰۲۱) در مطالعه‌ای بر روی منطقه لیگوریا ایتالیا، از مدل InVEST-UFRM برای ارزیابی میزان رواناب ناشی از رویدادهای بارشی شدید و آسیب‌پذیری حوضه‌های آبخیز استفاده نمودند. Arslan و Salata (۲۰۲۲) نیز با بهره‌گیری از این مدل، سطح آسیب‌پذیری استان از میر ترکیه در برابر رویدادهای بارشی شدید را مورد مطالعه قرار دادند. همچنین Bose و Mazumdar (۲۰۲۳) با استفاده از مدل UFRM وضعیت سیلاب‌های شهری کلکته هند را ارزیابی نمودند و به این نتیجه رسیدند که حدود ۷۵ درصد از سطح شهر کلکته با پوشش‌های غیرقابل نفوذ مانند آسفالت و بتن پوشیده شده که این امر باعث کاهش شدید نفوذپذیری خاک و افزایش رواناب سطحی می‌شود. در چنین شرایطی با افزایش ۵۰ درصدی عمق بارش، حجم رواناب حدود ۴۷ درصد افزایش می‌یابد. این نشان می‌دهد که حتی تغییرات اندک در میزان بارندگی می‌تواند به طور قابل توجهی بر شدت سیلاب تأثیر بگذارد و تاب‌آوری اکولوژیک شهری را کاهش دهد. بنابراین فضاهای سبز به عنوان عناصر مهم در کاهش خطر سیلاب، بیشترین پتانسیل را برای جذب آب باران و کاهش رواناب دارند. Yao و همکاران (۲۰۲۴) با استفاده از تلفیق مدل InVEST و GIS به ارزیابی سازگاری سیلاب شهری در شهر نیویورک پرداختند و به این نتیجه رسیدند که توزیع فضایی سازگاری سیل در این شهر نامنظم بوده و مناطق مختلف شهر دارای سطوح مختلف سازگاری هستند.

بنابراین با توجه به سابقه پژوهش، مطالعات پیشین عمدتاً بر تحلیل‌های هیدرولوژیک حوضه‌های آبخیز و ارزیابی آسیب‌پذیری و خطر سیلاب در مناطق شهری متمرکز بوده است. اگرچه این پژوهش‌ها تأثیرات عوامل مختلف همچون تغییرات LULC و خدمات اکوسیستمی را در کاهش خطر سیلاب مورد توجه قرار داده‌اند، اما نقش تغییرات اقلیمی و توسعه شهری و اهمیت گسترش فضاهای اکولوژیک در کاهش خطر سیلاب شهری، مسئله مهمی است که کمتر به آن پرداخته شده است. پژوهش حاضر با اتخاذ رویکردی جامع و با استفاده از مدل InVEST-UFRM و داده‌های دورسنجی، به دنبال پر کردن این شکاف پژوهشی و ارائه یک چارچوب جامع برای ارزیابی تاب‌آوری سیلاب شهری در برابر تغییرات مکانی-زمانی LULC و تغییرات اقلیمی است. نوآوری اصلی این پژوهش در تلفیق مدل‌سازی هیدرولوژیک با ارزیابی خدمات اکوسیستمی و تحلیل سناریوهای مختلف تغییر کاربری اراضی و همچنین شناسایی راهکارهای کاهش خطر سیلاب در مناطق پرجمعیت شهری است. شهر رشت، به عنوان یکی از کلان‌شهرهای ساحلی شمال ایران و با توجه به موقعیت جغرافیایی خاص خود، در سال‌های اخیر شاهد افزایش قابل توجه فرکانس و شدت رویدادهای بارشی شدید بوده است. همزمان با این پدیده، تغییرات گسترده کاربری اراضی از حالت طبیعی به مصنوعی، به ویژه در مناطق شهری و افزایش سطح نفوذناپذیری ناشی از گسترش ساخت‌وسازها، سبب تشدید رواناب سطحی و در نتیجه افزایش وقوع سیلاب‌های شهری شده است (Taromideh et al., 2022). از این رو، ارزیابی جامع تأثیرات متقابل تغییرات LULC و رویدادهای بارشی شدید بر روی رژیم هیدرولوژیک و شناسایی دقیق مناطق با خطر بالای وقوع سیلاب، به عنوان یک ضرورت اجتناب‌ناپذیر در راستای مدیریت پایدار منابع آب و کاهش مخاطرات طبیعی در این منطقه پرجمعیت شهری مطرح می‌گردد. در پژوهش حاضر، نخست با استفاده از داده‌های دورسنجی در سامانه تحت وب گوگل ارث انجین^۳ (GEE)، نقشه‌های سری زمانی LULC از سال ۱۹۹۰ تا ۲۰۲۰ تهیه شده و با استفاده از مدل CA-Markov نقشه LULC برای سال ۲۰۳۵ پیش‌بینی می‌گردد. سپس با بهره‌گیری از مدل شبیه‌سازی InVEST، به عنوان یکی از ابزارهای قدرتمند و دقیق در مطالعه خدمات اکوسیستمی، تأثیر تغییرات LULC بر روی رواناب سطحی و سیلاب در محدوده شهری رشت ارزیابی می‌شود. همچنین با شناسایی مناطق آسیب‌پذیر در برابر سیلاب، پتانسیل بالقوه زیرساخت‌های سبز و فضاهای

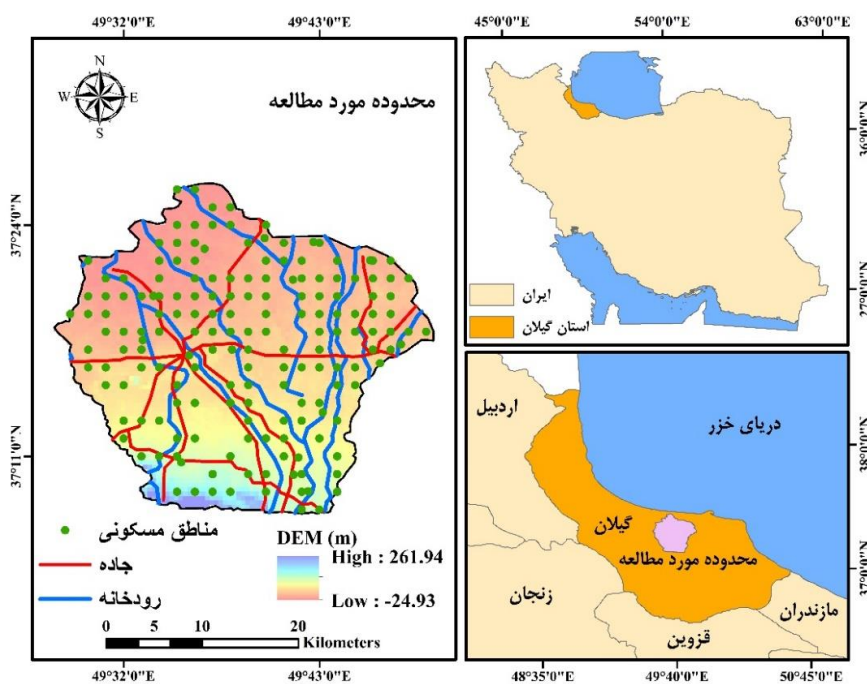
^۲Urban Flood Risk Mitigation

^۳Google Earth Engine

اکولوژیک در کاهش اثرات مخرب این مخاطره و افزایش تاب آوری شهری در برابر آن مورد بررسی و مدل سازی قرار می گیرد. نتایج حاصل از این پژوهش، می تواند به عنوان یک ابزار تصمیم گیری کارآمد برای برنامه ریزان و مدیران بحران شهری در جهت اتخاذ تدابیر مناسب برای کاهش خطر سیلاب، ارتقای کیفیت زندگی شهروندان و توسعه پایدار شهری مورد استفاده قرار گیرد.

روش شناسی پژوهش

محدوده مورد مطالعه: در این پژوهش، شهرستان رشت، مرکز استان گیلان و بزرگترین شهر این استان در شمال ایران، به عنوان منطقه مورد مطالعه انتخاب شده است. این شهرستان در مختصات جغرافیایی ۴۹ درجه و ۳۸ دقیقه و ۴۸ ثانیه طول شرقی تا ۳۷ درجه و ۱۷ دقیقه و ۴ ثانیه عرض شمالی در ارتفاع متوسط ۵ متری از سطح دریا و فاصله تقریبی ۳۰ کیلومتری جنوب دریای خزر واقع شده است (شکل ۱). موقعیت جغرافیایی رشت، منجر به شکل گیری اقلیمی نیمه گرمسیری مرطوب با میانگین دمای سالانه ۱۰ درجه سانتی گراد شده است (Borghei *et al.*, 2020). منابع آبی، مناطق شهری و صنعتی، زمین های کشاورزی، باغ ها، جنگل ها و مناطق کوهستانی نیز بخشی از ژئومورفولوژی غنی و متنوع این شهرستان را تشکیل می دهند (Hedayati *et al.*, 2022). با توجه به گزارش سرشماری سال ۱۳۹۵، جمعیت رشت تقریباً ۹۵۶۰۰۰ نفر است که آن را به یکی از پرجمعیت ترین مناطق شهری استان تبدیل کرده است. رشد جمعیت شهری و توسعه صنعت گردشگری باعث توسعه زیرساخت های شهری و تغییرات کاربری اراضی از چشم اندازهای سبز به فضاهای انسان ساخت شده است (Behrooznia *et al.*, 2020; Aghsaei *et al.*, 2020). یافته های Heydari و همکاران (۲۰۲۳) نشان می دهد که در بازه زمانی ۱۹۹۳ تا ۲۰۱۹، جمعیت شهری در منطقه مورد مطالعه با رشدی معادل ۱۰۳ درصد مواجه شده است. این افزایش چشمگیر جمعیت، تحولات سریع را در الگوهای کاربری اراضی شهری به دنبال داشته و منجر به تخریب قابل توجه منابع طبیعی و اکوسیستم های زمینی شده است. به همین دلیل، اهمیت رشت به عنوان یک منطقه تحقیقاتی نیز قابل تأمل می باشد. میانگین بارندگی سالانه در رشت حدود ۱۴۰۰ میلی متر است که آن را در زمره پربارش ترین شهر ایران قرار می دهد و احتمال رخداد سیلاب های شهری را تشدید می کند. در واقع شرایط اقلیمی منطقه همراه با بارش های شدید و ناگهانی، در ترکیب با عوامل زمینه ای همچون سیستم زهکشی نامناسب، گسترش مناطق غیرقابل نفوذ و کاهش پوشش گیاهی، این شهر را مستعد وقوع سیلاب های مکرر و شدید ساخته است (Taromideh *et al.*, 2022).



شکل ۱- موقعیت و ویژگی جغرافیایی محدوده مورد مطالعه

طبقه‌بندی نقشه‌های LULC با استفاده از GEE: در این پژوهش برای تهیه نقشه‌های LULC سال‌های ۱۹۹۰، ۲۰۰۵ و ۲۰۲۰ به ترتیب از تصاویر ماهواره Landsat-5، Landsat-7 و Landsat-8 در GEE استفاده شد. GEE امکان دسترسی به انواع داده‌های ماهواره‌ای تحقیقاتی از جمله تصاویر بایگانی‌شده Landsat به صورت آنلاین و بدون نیاز به دانلود را فراهم می‌کند (Veisi Nabikandi et al., 2024a). تمام تصاویر انتخابی از GEE در سطح یک تهیه شده است و وضوح فضایی ۳۰ متر را ارائه می‌دهد. جهت رفع چالش پوشش ابری تصاویر ماهواره‌ای که می‌تواند بر دقت نتایج مطالعات تأثیرگذار باشد، در این پژوهش از روشی مبتنی بر یکپارچه‌سازی تصاویر طی سه سال متوالی در GEE استفاده شد که منجر به تولید مجموعه‌ای از تصاویر با پوشش ابری کمتر از ۵ درصد در کل منطقه مورد مطالعه گردید (Li et al., 2019; Phan et al., 2020). نقشه‌های LULC به شیوه‌ای نظارت شده، با استفاده از الگوریتم ماشین بردار پشتیبان^۴ (SVM) طبقه‌بندی شدند که یکی از پرکاربردترین تکنیک‌های یادگیری ماشین^۵ (ML) است (Veisi Nabikandi et al., 2024b). در این پژوهش نقشه‌های LULC محدودۀ مورد مطالعه در دسته‌های کلی و جامع (مناطق ساخته‌شده، جنگل، کشاورزی، سطوح آبی و علفزارها) طبقه‌بندی گردید تا سطح مطلوبی از دقت به دست آید.

صحت‌سنجی دقت و عملکرد مدل طبقه‌بندی: اعتبارسنجی عملکرد مدل مورد استفاده از طریق تحلیل مقایسه‌ای نقشه‌های تهیه شده با تصاویر مرجع ضروری است. ارزیابی ماتریس درهم‌ریختگی^۶ اغلب برای اندازه‌گیری دقت طبقه‌بندی تصاویر سنجش از دور استفاده می‌شود که در آن نتایج طبقه‌بندی LULC با داده‌های اعتبارسنجی مقایسه می‌گردد. تکنیک ماتریس درهم‌ریختگی شامل آرایه‌ای از اعداد است که در ردیف‌ها و ستون‌ها نمایش داده می‌شوند که تعداد پیکسل‌ها یا چند ضلعی‌های نسبت داده‌شده به کلاس هر LULC را نسبت به کلاس واقعی روی زمین نشان می‌دهد (Koko et al., 2020). برای ارزیابی دقت مدل طبقه‌بندی، از دو شاخص رایج در سنجش از دور، یعنی دقت کلی و ضریب کاپا، استفاده شد. این شاخص‌ها براساس ماتریس درهم‌ریختگی محاسبه شده و با مقایسه نقشه‌های طبقه‌بندی شده با تصاویر مرجع گوگل ارث به دست آمدند. دقت کلی نسبت مجموع پیکسل‌های طبقه‌بندی صحیح (یعنی تعداد کل ورودی‌های مورب اصلی) به مجموع پیکسل‌ها در ماتریس درهم‌ریختگی است (Ikiel et al., 2012). ضریب کاپا نیز درصد پیکسل‌هایی است که به درستی طبقه‌بندی شده‌اند که از درصد واقعی مورد انتظار به طور تصادفی استخراج می‌شوند. ضریب کاپا بین ۱- و ۱+ متغیر است اما معمولاً بین ۰ و ۱ قرار می‌گیرد و مقادیر بین ۰/۸۱ تا ۱ نشان‌دهنده یک همبستگی تقریباً کامل است (Zanotta et al., 2018). روابط ۱ و ۲ نحوه محاسبه هر سه معیار مذکور را نشان می‌دهد:

$$\text{Overall Accuracy} = \left(\frac{1}{N}\right) \sum_{i=1}^r n_{ii} \quad \text{رابطه ۱}$$

$$\text{Kappa Coefficient} = \frac{n \sum_{i=1}^r n_{ii} - \sum_{i=1}^r n_{i+} n_{+i}}{n^2 - \sum_{i=1}^r n_{irow} n_{icolumn}} \quad \text{رابطه ۲}$$

که در روابط مذکور، N نشان‌دهنده تعداد کل پیکسل‌های صحیح طبقه‌بندی شده در نقشه واقعی، r تعداد کلاس‌های کاربری اراضی، n_{ii} اعضای قطری ماتریس درهم‌ریختگی، n تعداد کل پیکسل‌های صحیح، n_{irow} مجموع عناصر سطر i ام و $n_{icolumn}$ مجموع عناصر ستون i ام می‌باشد (Veisi Nabikandi and Shahbazi, 2024).

پیش‌بینی LULC با استفاده از مدل CA-Markov: گام بعدی تهیه نقشه LULC برای سال ۲۰۳۵ با استفاده از فناوری‌های نوین مدل‌سازی می‌باشد. برای این کار، رویکردهای زیر به طور متوالی انجام شد:

مدل زنجیر مارکوف^۷: در این پژوهش زنجیره مارکوف در نرم‌افزار TerrSet برای پیش و مدل‌سازی مکانی مورد استفاده قرار گرفت. این یک مدل ریاضی است که تغییرات بین کلاس‌های مختلف LULC را براساس حالت‌های قبلی پیش‌بینی می‌کند. مدل یاد شده براساس ماتریس احتمال انتقال عمل می‌کند و تغییر از یک کلاس به کلاس دیگر را نشان می‌دهد. فرمول

^۴Support Vector Machine

^۵Machine Learning

^۶Confusion Matrix

^۷Markov chain

محاسبه ماتریس احتمال انتقال به شرح زیر است:

$$P_{ij} = \frac{n_{ij}}{\sum_{j=1}^m n_{ij}} \quad \text{رابطه ۳}$$

که در این رابطه، m تعداد کل کلاس‌های LULC و P_{ij} احتمال انتقال از کلاس i به کلاس j است. n_{ij} نیز تعداد پیکسل‌های تغییر یافته از کلاس i به کلاس j را نشان می‌دهد. این ماتریس احتمال انتقال برای دوره زمانی ۲۰۰۵ تا ۲۰۲۰ را محاسبه نموده و به‌عنوان ورودی جهت پیش‌بینی تغییرات مورد استفاده قرار می‌گیرد.

مدل سلولار اتوماتا^۸ (CA): مدل شبکه‌ای CA تغییرات مکانی را براساس ماتریس احتمال و وضعیت همسایگی پیکسل‌ها پیش‌بینی می‌کند. در این مدل هر پیکسل در شبکه می‌تواند براساس حالت فعلی خود و حالت‌های همسایگی تغییر یابد (رابطه ۴):

$$S(T) = P_{ij} + S(T_0) \quad \text{رابطه ۴}$$

که در آن، $S(T)$ و $S(T_0)$ به ترتیب بیانگر وضعیت ساختار کاربری زمین در زمان‌های T و T_0 هستند و P_{ij} ماتریس انتقال از یک حالت به حالت دیگر را نشان می‌دهد.

مدل CA-Markov: یکی از مدل‌های برجسته که معمولاً برای پیش‌بینی LULC آینده استفاده می‌شود، ترکیب CA و زنجیره مارکوف است که به آن مدل CA-Markov گفته می‌شود (Hamad et al., 2018; El Haj et al., 2023). با توجه به تغییرات متمایز LULC طی سال‌های ۲۰۰۵ و ۲۰۲۰ و ماتریس احتمال انتقال، مدل CA-Markov در نرم‌افزار TerrSet برای پیش‌بینی نقشه LULC سال ۲۰۳۵ پیاده‌سازی گردید.

آشکارسازی تغییرات LULC: در ادامه، با هدف تحلیل تغییرات کاربری اراضی، از روش همپوشانی ماتریس‌های متقاطع (Cross-Tabulation) در نرم‌افزار TerrSet 2020 استفاده شد. این روش که در مطالعات برنامه‌ریزی شهری و محیطی کاربرد گسترده‌ای دارد (Azari et al., 2022)، امکان شناسایی و اندازه‌گیری تغییرات بین کلاس‌های مختلف کاربری اراضی را در دوره‌های زمانی مختلف فراهم می‌آورد. با اعمال این روش بر روی نقشه‌های طبقه‌بندی شده و پیش‌بینی شده کاربری اراضی در دوره‌های زمانی ۲۰۰۵-۱۹۹۰، ۲۰۲۰-۲۰۰۵ و ۲۰۲۰-۲۰۳۵، ماتریس‌های انتقال احتمالاتی محاسبه شده و تغییرات مکانی-زمانی کاربری اراضی در منطقه مورد مطالعه مورد تحلیل قرار گرفت.

مدل InVEST-UFRM: گام نهایی در این پژوهش ارزیابی و مدل‌سازی کاهش خطر سیلاب شهری (InVEST-UFRM) به عنوان یکی از جدیدترین ماژول‌های مدل InVEST می‌باشد. این مدل کاهش خطر سیلاب شهری را بر اساس تحلیل هیدرولوژیک و ویژگی‌های فیزیکی حوضه تخمین زده و مدل‌سازی می‌کند (Bose and Mazumdar, 2023). مدل InVEST-UFRM با ترکیب داده‌های محیطی و توپوگرافی به تحلیل تأثیر تغییرات LULC بر کاهش خطر سیلاب شهری می‌پردازد. بدین منظور ابتدا، میزان رواناب سطحی را با توجه به داده‌های بارش، نقشه LULC و بافت خاک محاسبه می‌کند. این محاسبه با پیروی از مدل شماره منحنی خدمات حفاظت خاک^۹ (SCS-CN) انجام می‌شود. SCS-CN یک مدل تجربی ساده و مؤثر برای برآورد رواناب سطحی است که توسط سازمان حفاظت خاک آمریکا (SCS) توسعه یافته که براساس سه مفهوم اصلی یعنی بارش مؤثر (P)، رواناب (Q) و میزان ذخیره اولیه (Ia) توسط خاک و پوشش گیاهی استوار است. روابط مربوطه به شرح زیر است:

$$Q = \frac{(P-Ia)^2}{(P-Ia+S)} \quad \text{رابطه ۵}$$

که در آن Ia ۰/۲s در نظر گرفته می‌شود. S نیز پتانسیل ذخیره‌سازی و جذب آب می‌باشد که به ویژگی‌های خاک و پوشش اراضی بستگی دارد و طبق معادله ۶ قابل محاسبه است:

$$S = \frac{1000}{CN} - 10 \quad \text{رابطه ۶}$$

به‌طور کلی مدل InVEST-UFRM نیاز به نقشه رستری گروه هیدرولوژیک خاک، نقشه LULC و عدد منحنی (CN) در

^۸Cellular Automata

^۹Soil Conservation Service Curve Number

منطقه مورد مطالعه دارد. نقشه گروه هیدرولوژیک خاک^{۱۰} (HSG) در محدوده مورد مطالعه این پژوهش با استفاده از داده‌های طبقه‌بندی خاک به دست آمده از نقشه هیدرولوژیک خاک جهانی (HYSOGs) با وضوح ۲۵۰ متر تهیه گردید (Ross et al., 2018). هر گروه خاک با دسته‌های A، B، C یا D درجات متفاوتی از واکنش نسبت به تولید رواناب را نشان می‌دهد. عدد منحنی^{۱۱} (CN) نیز یک مقدار تجربی است که براساس نوع خاک، نوع کاربری و شرایط رطوبتی اولیه تعیین می‌شود. CN به طور معمول بین ۳۰ تا ۱۰۰ متغیر است؛ به طوری که مقادیر بالاتر نشان‌دهنده نفوذپذیری کم‌تر و مقادیر پایین‌تر نفوذپذیری بیشتری را نشان می‌دهند. نقشه بافت خاک پس از برش متناسب با محدوده شهر رشت فقط شامل دسته C و D بود که مقدار CN کاربری‌های موجود در جدول ۱ ارائه شده است (Leta and Adugna, 2024).

جدول ۱- جدول بیوفیزیکی با اعداد منحنی مربوط به هر یک از کاربری‌ها

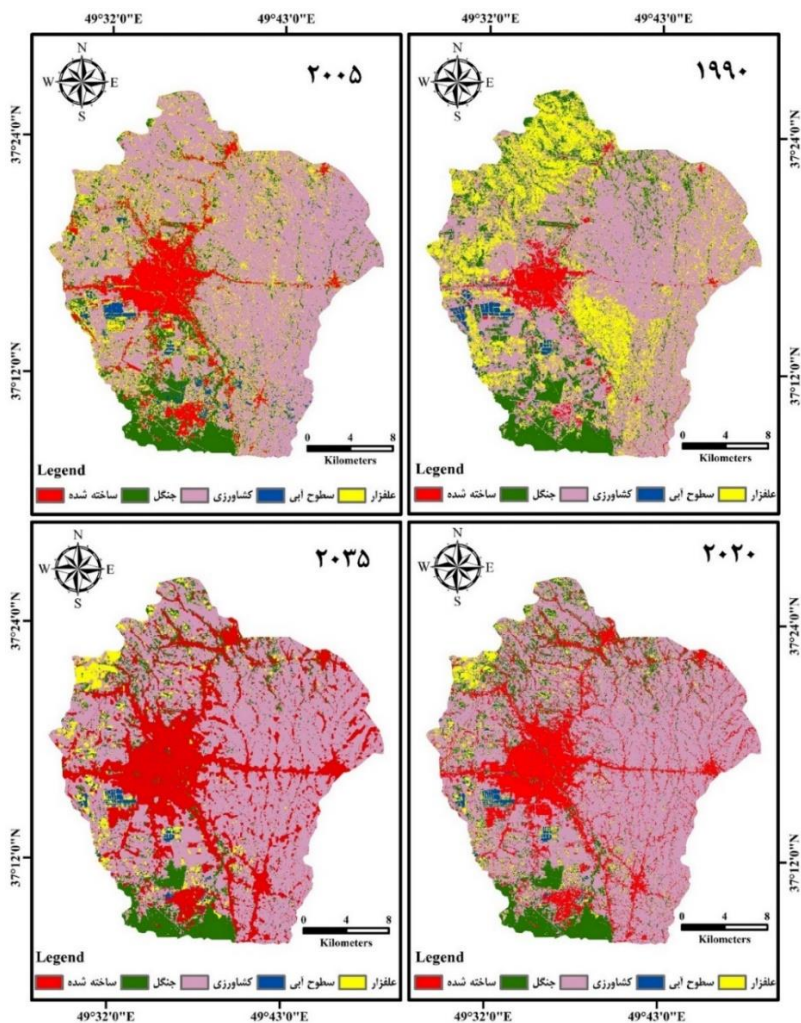
CN-D	CN-C	LULC
۹۵	۹۴	مناطق ساخته شده
۷۹	۷۳	جنگل
۸۷	۸۳	کشاورزی
۰	۰	پهنه‌های آبی
۸۴	۷۹	مرتع

یافته‌های پژوهش

تغییرپذیری الگوهای زمانی-مکانی LULC طی سال‌های ۱۹۹۰ تا ۲۰۳۵: شکل ۲ نقشه‌های LULC را که با استفاده از الگوریتم SVM در محیط GEE تولید شده‌اند، نمایش می‌دهد. ارزیابی دقت نقشه‌های تولید شده با استفاده از ضریب کاپا نشان می‌دهد که این نقشه‌ها از دقت طبقه‌بندی مناسبی برخوردار هستند. ضریب کاپا محاسبه شده به ترتیب برای سال‌های ۱۹۹۰، ۲۰۰۵ و ۲۰۲۰ برابر با ۰/۸۱، ۰/۸۳ و ۰/۸۴ بوده است؛ در حالی که دقت کلی طبقه‌بندی به ترتیب ۸۴، ۸۶ و ۸۷ درصد می‌باشد.

¹⁰Hydrologic Soil Groups

¹¹Curve Number



شکل ۲- توزیع فضایی LULC‌ها در محدوده مورد مطالعه

جدول ۲ توزیع مکانی و تغییرات زمانی کلاس‌های مختلف LULC را در محدوده مورد مطالعه طی بازه ۱۹۹۰ تا ۲۰۲۰ نشان می‌دهد. بر این اساس، در سال ۱۹۹۰ کاربری‌های کشاورزی و علفزار در مجموع بیش از ۷۵ درصد از مساحت محدوده مورد مطالعه را به‌خود اختصاص داده‌اند و سایر کاربری‌ها کمتر از یک پنجم وسعت را شامل می‌شوند. با این حال، با گذشت زمان و توسعه شهری، این الگو به‌طور قابل توجهی تغییر کرده است. به‌طوری‌که در سال ۲۰۰۵ مساحت مناطق ساخته‌شده حدود ۴۴ کیلومترمربع افزایش یافته و کاربری جنگل و علفزار با کاهش وسعت چشمگیری مواجه شده‌اند. روند افزایشی مناطق ساخته‌شده شهری و کاهش فضاهای اکولوژیک مانند جنگل و علفزار در سال ۲۰۲۰ نیز ادامه‌دار بوده و باعث شده که کاربری ساخته‌شده به‌عنوان دومین LULC از لحاظ وسعت در محدوده مورد مطالعه مطرح باشد (جدول ۲).

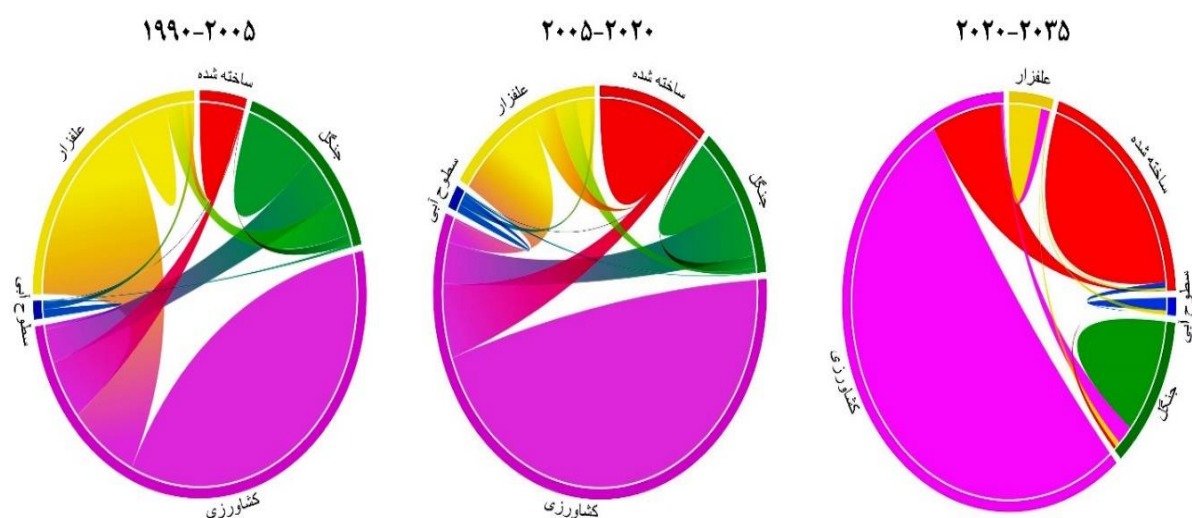
تحولات کاربری اراضی در شهر رشت طی سه دهه اخیر، الگوی مشخصی را نشان می‌دهد. افزایش چشمگیر مناطق شهری و کشاورزی به‌موازات کاهش قابل توجه فضاهای طبیعی و اکولوژیک نظیر جنگل و مرتع، گویای روند رو به رشد شهرنشینی و توسعه بی‌رویه فعالیت‌های انسانی در این منطقه است. نتایج حاصل از مدل‌سازی CA-Markov نیز حاکی از آن است که این روند در ۱۵ سال آینده تداوم خواهد یافت و منجر به تغییرات گسترده در الگوی کاربری اراضی و تشدید فشار بر محیط‌زیست طبیعی می‌شود. همان‌طور که در جدول ۲ مشاهده می‌شود، در سال ۲۰۳۵ کاربری کشاورزی و مناطق ساخته‌شده به‌ترتیب با ۵۷/۳ و ۲۷/۰ درصد، کاربری‌های غالب منطقه مطالعاتی بوده و کاربری‌های جنگل و علفزار نیز به‌ترتیب با ۷۲/۱۲ و ۲۷/۰۳ کیلومتر مربع کمترین وسعت را از سال ۱۹۹۰ به‌خود اختصاص داده‌اند.

جدول ۲- تغییرات زمانی مساحت انواع LULC از سال ۱۹۹۰ تا ۲۰۳۵

LULC	۱۹۹۰		۲۰۰۵		۲۰۲۰		۲۰۳۵	
	(کیلومتر مربع)	(درصد)	(کیلومتر مربع)	(درصد)	(کیلومتر مربع)	(درصد)	(کیلومتر مربع)	(درصد)
مناطق ساخته شده	۳۲/۳۶	۴/۷	۷۶/۳۷	۱۱/۱	۱۳۶/۴۸	۱۹/۸	۱۸۵/۵۶	۳۷/۰
جنگل	۱۱۲/۵۶	۱۶/۳	۸۵/۴۲	۱۲/۴	۸۳/۲۶	۱۲/۱	۷۲/۱۲	۱۰/۵
کشاورزی	۳۶۰/۶۷	۵۲/۴	۴۰۶/۰۷	۵۸/۹	۴۲۸/۹۶	۶۲/۳	۳۹۴/۸۵	۵۷/۳
سطوح آبی	۱۰/۳۵	۱/۵	۱۲/۹۲	۱/۹	۹/۷۳	۱/۴	۹/۲۷	۱/۳
علفزار	۱۷۲/۸۹	۲۵/۱	۱۰۸/۰۵	۱۵/۷	۳۰/۴۰	۴/۴	۲۷/۰۳	۳/۹

در ادامه این بحث، برای مقایسه و بررسی تغییرات دینامیکی LULC ها در طول دوره مورد مطالعه، از دیاگرام‌های آکورد^{۱۲} استفاده گردید (شکل ۳). این نوع دیاگرام ابزاری قدرتمند برای نمایش روابط پیچیده و تغییرات بین انواع مختلف کاربری اراضی به‌شمار می‌رود. در این نمودارها، هر دسته از کاربری اراضی (مانند کشاورزی، مناطق شهری، جنگل و ...) به‌صورت یک گره در اطراف یک دایره نمایش داده می‌شود و ضخامت خطوط اتصال بین این گره‌ها نشان‌دهنده میزان تبدیل یک نوع کاربری به نوع دیگر در دوره زمانی مشخص است. به‌عبارتی دیگر، هرچه خط اتصال بین دو گره ضخیم‌تر باشد، میزان تبدیل بین آن دو کاربری در دوره مورد نظر بیشتر بوده است. با استفاده از این نمودارها، می‌توان به‌طور شهودی تغییرات دینامیکی کاربری اراضی را در طول زمان مشاهده و الگوهای تبدیل بین کاربری‌های مختلف را شناسایی نمود.

همان‌طور که در شکل ۳ نشان داده شده است، بیشترین تغییرات LULC ها در دوره ۱۹۹۰-۲۰۰۵ و ۲۰۰۵-۲۰۲۰ رخ داده است؛ به‌طوری که حدود ۲۰ نوع تغییر بین کاربری‌های مختلف در این دو دوره مشاهده می‌شود. این در حالی است که در دوره ۲۰۲۰-۲۰۳۵، این میزان به حدود ۱۳ تغییر کاهش یافته است. تغییرات کمتر کاربری اراضی در دوره اخیر نشان‌دهنده ثبات نسبی در وضعیت LULC ها و کاهش ظرفیت منطقه برای توسعه بیشتر می‌باشد. همچنین نتایج نشان می‌دهد که در دوره ۱۹۹۰-۲۰۰۵ و ۲۰۲۰-۲۰۳۵ بیشترین تغییرات بین کلاس‌های LULC به ترتیب مربوط به تبدیل علفزار به کشاورزی (۱۲۱/۱ کیلومتر مربع) و کشاورزی به علفزار (۴۹/۹ کیلومتر مربع) بوده است. افزون‌بر این در دوره ۲۰۰۵-۲۰۲۰، ۴۳/۷ کیلومتر مربع از نواحی کشاورزی به مناطق ساخته شده تبدیل شده است که بیانگر روند رو به رشد گسترش ساخت‌وسازهای شهری در این دوره است. براساس دیاگرام‌ها، انتظار می‌رود که بیشترین تغییرات در آینده مربوط به تبدیل کشاورزی به مناطق ساخته شده (۵۰/۲ کیلومتر مربع) و جنگل به کشاورزی (۱۱/۶ کیلومتر مربع) باشد که این مهم نشان‌دهنده ادامه روند توسعه شهری و کاهش پوشش گیاهی در منطقه است.

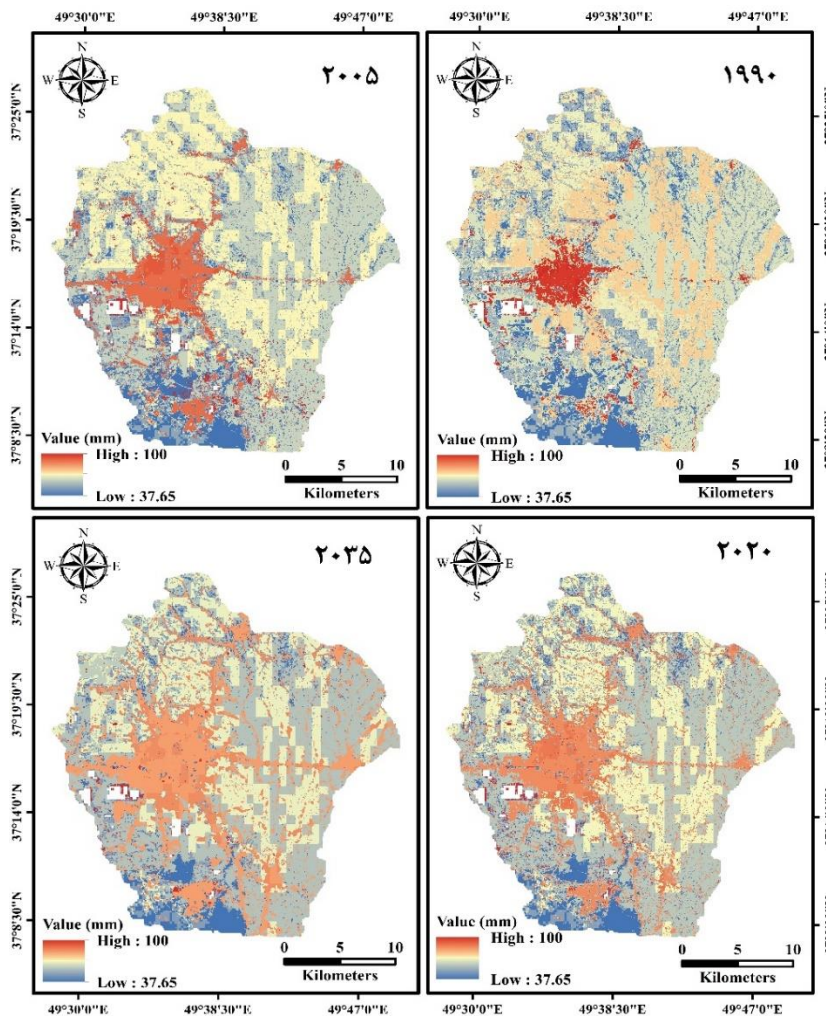


شکل ۳- دیاگرام آشکارسازی تغییرات بین کلاس‌های مختلف از سال ۲۰۰۰ تا ۲۰۳۵

¹²Chord diagram

توزیع تخمینی تأثیر تغییر LULC بر رواناب و سیلاب: در ادامه این پژوهش، با هدف ارزیابی تغییرات کمی و کیفی رواناب در منطقه مورد مطالعه، مدل‌سازی هیدرولوژیک به کمک مدل InVEST-UFRM در بازه زمانی ۱۹۹۰ تا ۲۰۳۵ انجام گرفت. نتایج حاصل از این مدل‌سازی، پتانسیل تولید رواناب در سطح منطقه را برآورد نموده که توزیع مکانی آن در شکل ۴ ارائه شده است. مطابق شکل ۴، کمینه تولید رواناب در هر پیکسل نزدیک به ۳۸ میلی‌متر و بیشینه آن معادل ۱۰۰ میلی‌متر می‌باشد که این میزان برابر با یک بارش سیل‌آسا است. همان‌طور که در شکل نیز قابل مشاهده است، از سال ۱۹۹۰ تا ۲۰۳۵ مناطق با تولید حجم رواناب زیاد در محدوده مورد مطالعه افزایش می‌یابد. تحلیل داده‌ها نشان می‌دهد که سهم عمده رواناب سطحی تولید شده در محدوده مورد مطالعه، مربوط به کاربری‌های ساختمانی و زیرساخت‌های مرتبط است. در مقابل، مناطق جنگلی واقع در بخش جنوبی حوضه، به دلیل توانایی بیشتر در جذب و نفوذ آب بارندگی، حجم رواناب کمتری تولید می‌کنند. جدول ۳ نتایج مدل InVEST-UFRM را به‌طور مشخص‌تری نشان می‌دهد. بر این اساس، کل حجم آب جاری شده در سال ۱۹۹۰ حدود ۳۸/۶۹ میلیون مترمکعب تخمین زده می‌شود که این میزان در سال ۲۰۰۵ به حدود ۴۰/۸۶ میلیون مترمکعب می‌رسد؛ با توجه به نتایج ارائه شده در جدول ۳، کاهش ۴ درصدی شاخص جذب آب، عامل اصلی افزایش رواناب در چشم‌انداز مورد مطالعه می‌باشد. علت این موضوع نیز با توجه به تغییرات LULC و افزایش ساخت و سازهای انسانی و کاهش پوشش‌های سبز قابل توجیه است. وضعیت یاد شده طی سال‌های بعد نیز ادامه پیدا می‌کند؛ به‌گونه‌ای که تغییر کاربری اراضی در سال ۲۰۲۰ منجر به کاهش جذب رواناب به میزان ۱/۹۴ میلیون مترمکعب نسبت به سال ۲۰۰۵ گردیده و در سال ۲۰۳۵ کاهش وسعت کاربری کشاورزی و جنگل زمینه افزایش حجم رواناب سطحی در محدوده شهری را فراهم خواهد نمود.

به‌منظور ارزیابی دقیق‌تر تأثیر تغییر LULC بر تولید رواناب و خطر سیلاب احتمالی در این پژوهش، با استفاده از ابزارهای موجود در نرم‌افزار ArcMap 10.8 وضعیت تولید رواناب به سه وضعیت خطر سیلاب پایین، متوسط و بالا تقسیم‌بندی گردید که در شکل ۵ قابل مشاهده می‌باشد. با توجه به نتایج، مناطق ساخته‌شده در مرکز محدوده مورد مطالعه به دلیل نفوذپذیری کم‌تر و تولید رواناب بیشتر، با خطر وقوع سیلاب بالاتری مواجه می‌باشند. از سال ۱۹۹۰ تا ۲۰۳۵ به دلیل رشد شهرنشینی و افزایش ساخت و سازهای انسانی مناطق با خطر سیلاب بالاتر افزایش پیدا می‌کند. جدول ۴، درصد مساحت تحت پوشش سه وضعیت را از سال ۱۹۹۰ تا ۲۰۳۵ نشان می‌دهد. بر این اساس مساحت تحت پوشش وضعیت با خطر سیلاب پایین از سال ۱۹۹۰ تا ۲۰۳۵ کاهش پیدا می‌کند. همچنین درصد مساحت تحت خطر سیلاب بالا در سال ۲۰۰۵ و ۲۰۲۰ نسبت به سال ۱۹۹۰ به ترتیب ۶/۹ و ۱۵/۳ درصد افزایش پیدا کرده است. همچنین این مقدار برای سال ۲۰۳۵ نیز افزایشی بوده و پیش‌بینی می‌شود ۲۸/۲ درصد از مساحت کل محدوده مورد مطالعه تحت پوشش خطر سیلاب بالا قرار گیرد و تاب‌آوری اکولوژیک شهری کاهش یابد.



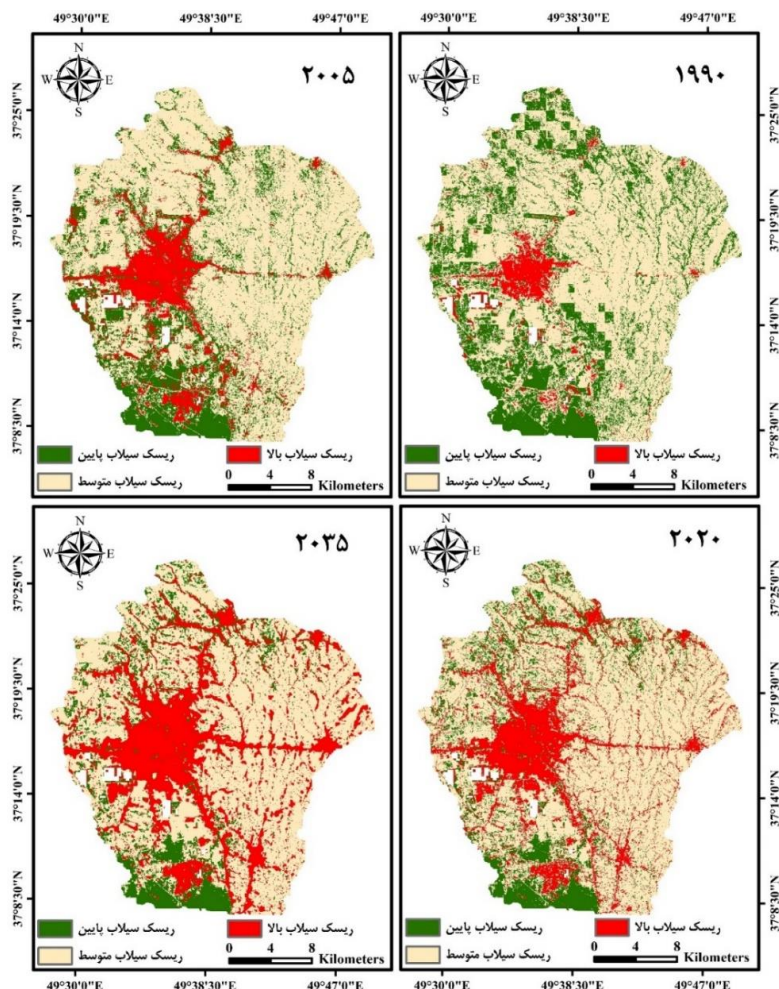
شکل ۴- پراکنش مکانی محتوی تولید رواناب در محدوده مورد مطالعه

جدول ۳- وضعیت شاخص‌های هیدرولوژیک در حوضه مطالعاتی

سال	شاخص جذب آب (%)	میزان جذب رواناب (m ³)	میزان رواناب جاری شده (m ³)
۱۹۹۰	۰/۴۳	۲۹/۲۹ × ۱۰ ^۶	۳۸/۶۹ × ۱۰ ^۶
۲۰۰۵	۰/۳۹	۲۷/۱۲ × ۱۰ ^۶	۴۰/۸۶ × ۱۰ ^۶
۲۰۲۰	۰/۳۷	۲۵/۱۸ × ۱۰ ^۶	۴۲/۷۹ × ۱۰ ^۶
۲۰۳۵	۰/۳۵	۲۳/۷۰ × ۱۰ ^۶	۴۴/۲۷ × ۱۰ ^۶

جدول ۴- درصد مساحت تحت تأثیر خطر ریسک سیلاب طی دوره‌های مورد مطالعه

سال	ریسک سیلاب پایین (%)	ریسک سیلاب متوسط (%)	ریسک سیلاب بالا (%)
۱۹۹۰	٪ ۲۹/۱	٪ ۶۵/۲	٪ ۵/۷
۲۰۰۵	٪ ۲۱/۱	٪ ۶۶/۳	٪ ۱۲/۶
۲۰۲۰	٪ ۱۴/۲	٪ ۶۴/۸	٪ ۲۱/۰
۲۰۳۵	٪ ۱۱/۹	٪ ۵۹/۹	٪ ۲۸/۲



شکل ۵- پراکنش مکانی ریسک سیلاب شهری

بحث و نتیجه‌گیری

رشد بی‌رویه جمعیت و گسترش سریع شهرنشینی در دهه‌های اخیر، به‌عنوان محرک اصلی تغییرات LULC در مناطق شهری پرجمعیت شناخته شده‌اند (Hussain *et al.*, 2024). مطالعات متعدد، چه در سطح ملی (Dadashpoor and Salarian, 2020) و چه در سطح بین‌المللی (Al-Dousari *et al.*, 2023; Manna *et al.*, 2024)، تأیید می‌کنند که این دو عامل به‌طور قابل توجهی بر الگوهای فضایی کاربری اراضی در مناطق شهری تأثیرگذار بوده و منجر به تغییرات چشمگیری در پوشش اراضی شده‌اند. در پژوهش حاضر، با بهره‌گیری از داده‌های ماهواره‌ای Landsat و الگوریتم یادگیری ماشین SVM، به‌شیوه‌ای نظارت شده، تغییرات LULC در محدوده شهر رشت، طی دوره زمانی ۱۹۹۰ تا ۲۰۳۵ مورد ارزیابی قرار گرفت. نتایج حاصل از تحلیل روند LULC در منطقه مطالعاتی حاکی از این بود که مناطق ساخته‌شده طی دوره ارزیابی، افزایش یافته و از سویی دیگر پوشش‌های سبز به‌ویژه جنگل و علفزار کاهش قابل توجهی داشته‌اند. این تغییرات، به‌ویژه در دهه‌های اخیر، شدت بیشتری نیز پیدا کرده، به‌گونه‌ای که پیش‌بینی می‌شود، در سال ۲۰۳۵ کاربری‌های کشاورزی و مناطق ساخته‌شده به‌ترتیب با ۵۷/۳ و ۲۷/۰ درصد، کاربری‌های غالب منطقه مطالعاتی باشند. Zarandian و همکاران (۲۰۱۶) در پژوهش خود، فعالیت‌های مخرب انسانی را عامل اصلی کاهش فضاهای اکولوژیک مانند پوشش جنگلی در بیشتر مناطق شمال ایران معرفی کردند. یافته‌های پژوهش حاضر مبنی بر افزایش مناطق ساخته‌شده و کشاورزی در محدوده شهر رشت، با نتایج مطالعات پیشین از جمله Rahmaninezhad و Hashjin (۲۰۲۳) همخوانی دارد. همچنین، کاهش مستمر پوشش گیاهی طبیعی و زیرساخت‌های سبز در دوره زمانی ۱۹۹۰ تا ۲۰۲۰، با نتایج Pourahmad و Heydari (۲۰۲۱) که از طریق مدل‌سازی و پیش‌بینی تغییرات LULC در شهر رشت به آن دست یافته‌اند، تأیید می‌شود. علاوه بر این، یافته‌های Hasani و همکاران (۲۰۱۷) مبنی بر گسترش سریع اراضی کشاورزی در شهرستان رشت، با توجه به تمرکز این پژوهش بر مناطق پیراشهری، قابل توجه است. پیش‌بینی روند تغییرات کنونی برای آینده

با مدل CA-Markov در این پژوهش توسعه یافته بودن محدوده مورد مطالعه را نتیجه گیری می کند. همچنین کاهش قابل توجه کاربری کشاورزی در بازه زمانی ۲۰۲۰ تا ۲۰۳۵، به عنوان یک تغییر معنی دار نسبت به روند افزایشی گذشته، نشان دهنده محدود شدن ظرفیت منطقه مورد مطالعه برای گسترش بیشتر فعالیت های کشاورزی است. این تغییر، احتمالاً به دلیل افزایش تقاضا برای اراضی شهری و صنعتی و محدودیت منابع طبیعی همچون آب و خاک رخ داده است. بنابراین می توان انتظار داشت که در آینده، کاربری های ساخته شده به تدریج جایگزین اراضی کشاورزی شوند. در ادامه به منظور ارزیابی تأثیر تغییرات LULC بر پتانسیل تولید رواناب و خطر سیلاب، از مدل هیدرولوژیک InVEST-UFRM استفاده شد. نتایج این مدل نیز نشان دهنده این بود که در شرایط فعلی سهم عمده رواناب سطحی تولید شده در محدوده مورد مطالعه، مربوط به کاربری های ساختمانی و زیرساخت های مرتبط است. در مقابل، مناطق جنگلی واقع در بخش جنوبی حوضه، به دلیل توانایی بیشتر در جذب و نفوذ آب بارندگی، حجم رواناب کمتری تولید می کنند. با افزایش مناطق ساخته شده و کاهش پوشش گیاهی، حجم رواناب سطحی به طور قابل توجهی افزایش یافته و میزان آن از حدود ۳۸/۶۹ میلیون مترمکعب در سال ۱۹۹۰ به ۴۴/۲۷ میلیون مترمکعب در ۲۰۳۵ خواهد رسید. این افزایش رواناب، خطر وقوع سیلاب شهری را به ویژه در مناطق با نفوذپذیری کم مانند کاربری های انسان ساخت، به طور چشمگیری افزایش می دهد. براساس پیش بینی های انجام شده، انتظار می رود در سال ۲۰۳۵، حدود ۲۸/۲٪ از مساحت کل محدوده مورد مطالعه با خطر سیلاب بالا مواجه باشد. آشکارسازی تأثیر تغییرات LULC بر رواناب و در نهایت تاب آوری شهری در برابر سیلاب در این پژوهش تایید کننده نتایج Lei و همکاران (۲۰۲۴) و همکاران Banjara و همکاران (۲۰۲۴) می باشد. همچنین Wang و همکاران (۲۰۲۴) با اشاره به افزایش فعالیت های مخرب انسانی در محیط های شهری، به طور مستقیم به ارتباط بین تغییرات LULC و کاهش تاب آوری در برابر مخاطرات طبیعی مانند سیلاب پرداخته اند. این پژوهش از رویکردی نوآورانه با استفاده از تلفیق داده های دورسنجی و مدل سازی اکولوژیک نقش مهم تغییر LULC بر حجم تولیدی رواناب و خطر سیلاب شهری را با مدل InVEST-UFRM مورد ارزیابی قرار داد. نتایج حاصل از این پژوهش، به طور قابل توجهی با یافته های مطالعات پیشین Douglas (۲۰۱۸) و Sarmah و همکاران (۲۰۲۰) همسو بوده و بر نقش کلیدی تغییرات LULC در افزایش خطر سیلاب شهری تأکید دارد. Wang و همکاران (۲۰۲۳) نیز در مطالعه ای مشابه در جنوب چین، به ارتباط مستقیم بین گسترش شهرنشینی و افزایش خطر سیلاب اشاره کرده اند. بنابراین، می توان نتایج به دست آمده از این پژوهش را با توجه به تحقیقات مشابه قابل استناد معرفی کرد. با وجود محدودیت هایی مانند داده های بارش سیل آسا، عدم دسترسی به داده های با تفکیک مکانی بالا مانند Gaofen-1 (Li et al., 2021) و سنتینل (Veisi Nabikandi and Shahbazi, 2024) برای مطالعه اثر تغییرات LULC از گذشته، کارای مدل InVEST-UFRM در ارزیابی و مدل سازی تاب آوری شهری در برابر خطر سیلاب های احتمالی در مناطق که با کمبود داده مواجه هستند، نمایان شد.

نتایج این پژوهش، اهمیت در نظر گرفتن تغییرات کاربری اراضی در برنامه ریزی های شهری و مدیریت منابع آب را بیش از پیش آشکار می سازد. بنابراین، برای کاهش مخاطرات ناشی از سیلاب، ضرورت دارد تا برنامه ریزی های جامع و مبتنی بر شواهد علمی در جهت مدیریت پایدار کاربری اراضی و حفظ پوشش گیاهی طبیعی صورت گیرد. پیشنهاد می شود مطالعات آتی با تمرکز بر مکانیسم های هیدرولوژیک حاکم بر تولید رواناب و سیلاب در مناطق شهری و با در نظر گرفتن اثر تغییرات اقلیمی، به توسعه مدل های پیش بینی دقیق تر و ابزارهای تصمیم گیری مؤثر برای مدیریت خطر سیلاب شهری پردازند.

References

- Aghsaei, H., Dinan, N.M., Moridi, A., Asadolahi, Z., Delavar, M., Fohrer, N., Wagner, P.D., 2020. Effects of dynamic land use/land cover change on water resources and sediment yield in the Anzali wetland catchment, Gilan, Iran. *Science of the Total Environment* 712, 136449.
- Al-Dousari, A.E., Mishra, A., Singh, S., 2023. Land use land cover change detection and urban sprawl prediction for Kuwait metropolitan region, using multi-layer perceptron neural networks (MLPNN). *The Egyptian Journal of Remote Sensing and Space Science* 26(2), 381-392.
- Azari, M., Billa, L., Chan, A., 2022. Multi-temporal analysis of past and future land cover change in the highly urbanized state of Selangor, Malaysia. *Ecological Processes* 11(1), 2.
- Banjara, M., Bhusal, A., Ghimire, A.B., Kalra, A., 2024. Impact of Land Use and Land Cover Change on Hydrological Processes in Urban Watersheds: Analysis and Forecasting for Flood Risk Management.

- Geosciences 14(2), 40.
- Behrooznia, L., Sharifi, M., Hosseinzadeh-Bandbafha, H., 2020. Comparative life cycle environmental impacts of two scenarios for managing an organic fraction of municipal solid waste in Rasht-Iran. *Journal of Cleaner Production* 268, 122217.
- Borghai, Y., Moghadamnia, M.T., Sigaroudi, A.E., Ghanbari, A., 2020. Association between climate variables (cold and hot weathers, humidity, atmospheric pressures) with out-of-hospital cardiac arrests in Rasht, Iran. *Journal of Thermal Biology* 93, 102702.
- 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.
- Chen, K.F., Leandro, J., 2019. A conceptual time-varying flood resilience index for urban areas: Munich city. *Water* 11(4), 830.
- Dadashpoor, H., Salarian, F., 2020. Urban sprawl on natural lands: Analyzing and predicting the trend of land use changes and sprawl in Mazandaran city region, Iran. *Environment, Development and Sustainability* 22, 593-614.
- Douglas, I., 2018. The challenge of urban poverty for the use of green infrastructure on floodplains and wetlands to reduce flood impacts in intertropical Africa. *Landscape and Urban Planning* 180, 262-272.
- El Haj, F.A., Oquadif, L., Akhssas, A., 2023. Simulating and predicting future land-use/land cover trends using CA-Markov and LCM models. *Case Studies in Chemical and Environmental Engineering* 7, 100342.
- Hamad, R., Balzter, H., Kolo, K., 2018. Predicting land use/land cover changes using a CA-Markov model under two different scenarios. *Sustainability* 10(10), 3421.
- Hasani, M., Sakieh, Y., Dezhkam, S., Ardakani, T., Salmanmahiny, A., 2017. Environmental monitoring and assessment of landscape dynamics in southern coast of the Caspian Sea through intensity analysis and imprecise land-use data. *Environmental Monitoring and Assessment* 189, 1-19.
- Hedayati, A., Vahidnia, M.H., Behzadi, S., 2022. Paddy lands detection using Landsat-8 satellite images and object-based classification in Rasht City, Iran. *The Egyptian Journal of Remote Sensing and Space Science* 25(1), 73-84.
- Hemmati, M., Kornhuber, K., Kruczkiewicz, A., 2022. Enhanced urban adaptation efforts needed to counter rising extreme rainfall risks. *NPJ Urban Sustainability* 2(1), 16.
- Heydari, R., Aliakbari, E., Pourahmad, A., 2023. A measurement of Urban sprawl in spatial dynamics of Rasht, Iran. *Journal of Studies of Human Settlements Planning* 17(4), 961-976.
- Hussain, S., Wang, Y., Awais, M., Sajjad, M.M., Ejaz, N., Javed, U., Iqbal, J., 2024. Integrated assessment of groundwater quality dynamics and land use/land cover changes in rapidly urbanizing semi-arid region. *Environmental Research* 260, 119622.
- Ikiel, C., Dutucu, A.A., Ustaoglu, B., Kilic, D.E., 2012. Land use and land cover (LULC) classification using Spot-5 image in the Adapazari Plain and its surroundings, Turkey. *Tojsat* 2(2), 37-42.
- 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.
- Koko, A.F., Yue, W., Abubakar, G.A., Hamed, R., Alabsi, A.A.N., 2020. Monitoring and predicting spatio-temporal land use/land cover changes in Zaria City, Nigeria, through an integrated cellular automata and Markov chain model (CA-Markov). *Sustainability* 12(24), 10452.
- Lei, Y., Cao, H., Zhou, X., Mills, J., Xiao, W., 2024. Impact of land use/land cover changes on urban flooding: a case study of the Greater Bay Area, China. *IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing*.
- Leta, B.M., Adugna, 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.
- Li, X., Siddique, K.H., 2020. Future Smart Food: harnessing the potential of neglected and underutilized species for Zero Hunger. *Maternal & Child Nutrition* 16, e13008.
- Li, Y., Zhao, Z., Wei, S., Sun, D., Yang, Q., Ding, X., 2021. Prediction of regional forest soil nutrients based on Gaofen-1 remote sensing data. *Forests* 12(11), 1430.
- Li, Z., Shen, H., Cheng, Q., Li, W., Zhang, L., 2019. Thick cloud removal in high-resolution satellite images using stepwise radiometric adjustment and residual correction. *Remote Sensing* 11, 1925.
- Liu, J., Wang, J., Tan, Y., 2023. Spatiotemporal pattern and influencing mechanism of the flood-regulating ecosystem service capacity and demand in China's Yellow River basin, 2000-2020. *Journal of Hydrology: Regional Studies* 45, 101312.
- Manna, H., Sarkar, S., Hossain, M., Dolui, M., 2024. Modeling and predicting spatio-temporal land use land cover changes and urban sprawling in Kalaburagi City Corporation, Karnataka, India: a geospatial analysis. *Modeling Earth Systems and Environment* 10(1), 809-832.
- Mehryar, S., Surminski, S., 2022. Investigating flood resilience perceptions and supporting collective decision-making through fuzzy cognitive mapping. *Science of the Total Environment* 837, 155854.
- Moghadas, M., Asadzadeh, A., Vafeidis, A., Fekete, A., Kötter, T., 2019. A multi-criteria approach for assessing urban flood resilience in Tehran, Iran. *International Journal of Disaster Risk Reduction* 35, 101069.

- Phan, T.N., Kuch, V., Lehnert, L.W., 2020. Land cover classification using Google Earth Engine and random forest classifier—The role of image composition. *Remote Sensing* 12, 2411.
- Pourahmad, A., Heydari, R., 2021. Monitoring and predicting land use and land cover changes in large cities; application of CA-Markov model in Rasht, Iran. *Physical Social Planning* 8(1), 111-133.
- Quagliolo, C., Comino, E., Pezzoli, A., 2021. Experimental flash floods assessment through urban flood risk mitigation (UFRM) model: the case study of Ligurian coastal cities. *Frontiers in Water* 3, 663378.
- Rahmaninezhad, M., Sharifi Hashjin, S.S., 2023. Investigating the land use changes in the city of Rasht using satellite image analysis. *Geographical Studies of Coastal Areas Journal* 4(3), 69-88.
- Rentschler, J., Salhab, M., Jafino, B.A., 2022. Flood exposure and poverty in 188 countries. *Nature communications* 13(1), 3527.
- Rosenzweig, C., Solecki, W.D., Romero-Lankao, P., Mehrotra, S., Dhakal, S., Ibrahim, S.A., 2018. *Climate change and cities: Second assessment report of the urban climate change research network*. Cambridge University Press.
- Ross, C.W., Prihodko, L., Anchang, J., Kumar, S., Ji, W., Hanan, N.P., 2018. Global hydrologic soil groups (HYSOGs250m) for curve number-based runoff modeling. ORNL DAAC, Oak Ridge, Tennessee, USA.
- Salata, S., Arslan, B., 2022. Designing with ecosystem modelling: The sponge district application in İzmir, Turkey. *Sustainability* 14(6), 3420.
- Sarmah, T., Das, S., Narendr, A., Aithal, B.H., 2020. Assessing human vulnerability to urban flood hazard using the analytic hierarchy process and geographic information system. *International Journal of Disaster Risk Reduction* 50, 101659.
- Taromideh, F., Fazloulou, R., Choubin, B., Emadi, A., Berndtsson, R., 2022. Urban flood-risk assessment: integration of decision-making and machine learning. *Sustainability* 14(8), 4483.
- Thackeray, C.W., Hall, A., Norris, J., Chen, D., 2022. Constraining the increased frequency of global precipitation extremes under warming. *Nature Climate Change* 12(5), 441-448.
- Tierolf, L., de Moel, H., van Vliet, J., 2021. Modeling urban development and its exposure to river flood risk in Southeast Asia. *Computers, Environment and Urban Systems* 87, 101620.
- Veisi Nabikandi, B., Shahbazi, F., 2024. Determining carbon storage content at different pools under various land uses in Miandoab region using remotely-sensed data and InVEST model. *Journal of Natural Environment* 77(2), 241-253. (In Persian)
- Veisi Nabikandi, B., Shahbazi, F., Hami, A., 2024a. Spatiotemporal dynamic simulation of carbon storage and sequestration in response to land use/land cover changes. *Advanced Engineering Days* 9, 153-156.
- Veisi Nabikandi, B., Shahbazi, F., Hami, A., Malone, B., 2024b. Exploring carbon storage and sequestration as affected by land use/land cover changes toward achieving sustainable development goals. *Soil Advances* 2, 100017.
- Wang, M., Fu, X., Zhang, D., Chen, F., Liu, M., Zhou, S., Tan, S.K., 2023. Assessing urban flooding risk in response to climate change and urbanization based on shared socio-economic pathways. *Science of The Total Environment* 880, 163470.
- Wang, Q., Zhao, G., Zhao, R., 2024. Resilient urban expansion: Identifying critical conflict patches by integrating flood risk and land use predictions: A case study of Min Delta Urban Agglomerations in China. *International Journal of Disaster Risk Reduction* 100, 104192.
- Wijayarathne, D.B., Coulibaly, P., 2020. Identification of hydrological models for operational flood forecasting in St. John's, Newfoundland, Canada. *Journal of Hydrology: Regional Studies* 27, 100646.
- Xu, W., Yu, Q., Proverbs, D., 2023. Evaluation of factors found to influence urban flood resilience in China. *Water* 15(10), 1887.
- Xu, Z., Ma, J., Zheng, H., Wang, L., Ying, L., Li, R., Yang, Y., 2024. Quantification of the flood mitigation ecosystem service by coupling hydrological and hydrodynamic models. *Ecosystem Services* 68, 101640.
- Yao, S., Huang, G., Chen, Z., 2024. Evaluation of urban flood adaptability based on the InVEST model and GIS: A case study of New York City, USA. *Natural Hazards* pp. 1-20.
- Zanotta, D.C., Zortea, M., Ferreira, M.P., 2018. A supervised approach for simultaneous segmentation and classification of remote sensing images. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing* 142, 162-173.
- Zarandian, A., Baral, H., Yavari, A.R., Jafari, H.R., Stork, N.E., Ling, M.A., Amirnejad, H., 2016. Anthropogenic decline of ecosystem services threatens the integrity of the unique Hyrcanian (Caspian) forests in Northern Iran. *Forests* 7(3), 51.
- Zhang, Z., Zhang, J., Zhang, Y., Chen, Y., Yan, J., 2023. Urban flood resilience evaluation based on GIS and multi-source data: a case study of Changchun City. *Remote Sensing* 15(7), 1872.
- Zhu, S., Li, D., Huang, G., Chhipi-Shrestha, G., Nahiduzzaman, K.M., Hewage, K., Sadiq, R., 2021. Enhancing urban flood resilience: A holistic framework incorporating historic worst flood to Yangtze River Delta, China. *International Journal of Disaster Risk Reduction* 61, 102355.