ارزیابی کمی عملکرد زیرساخت سبز شهری در تنظیم رواناب و ارزش‌گذاری اقتصادی آن (مطالعه موردی: شهر تهران)

ایمان سعیدی[1*]

[1]. استادیار، گروه علوم و مهندسی محیط زیست، دانشکده منابع طبیعی و محیط زیست، دانشگاه ملایر، ملایر، ایران.

مقاله پژوهشی

تاریخ دریافت:1405-06-23
تاریخ بازنگری: 1405-08-07
تاریخ پذیرش:1405-08-20

چکیده

هدف این پژوهش، ارزیابی کمی عملکرد زیرساخت سبز موجود شهر تهران در تنظیم رواناب شهری و ارزش‌گذاری اقتصادی این خدمت اکوسیستمی با استفاده از یک چارچوب یکپارچه مبتنی بر سنجش‌ازدور، سامانه اطلاعات جغرافیایی، مدل شماره منحنی رواناب و ارزش‌گذاری اقتصادی است. در این مطالعه، شاخص‌های محیطی شامل شاخص زیرساخت سبز، شاخص پوشش گیاهی نرمال‌شده ، شاخص ساخت‌وساز نرمال‌شده و داده‌های کاربری اراضی با استفاده از داده‌های سنجش‌ازدور استخراج شدند. سپس حجم رواناب تحت شرایط موجود شهری با استفاده از مدل SCS-CN برآورد و نقش زیرساخت سبز در کاهش رواناب با مقایسه سناریوی موجود و شرایط فرضی بدون اثر زیرساخت سبز کمی‌سازی شد. نتایج نشان داد که میانگین شاخص زیرساخت سبز شهر تهران برابر با ۰.۲۷۱ بوده است. حجم رواناب تولیدشده در شرایط موجود برابر با ۲۶.۵۹ میلیون مترمکعب محاسبه شد، در حالی که زیرساخت سبز موجود توانسته است حدود ۱.۴۷ میلیون مترمکعب از رواناب را تنظیم کند. ارزش اقتصادی این خدمت اکوسیستمی حدود ۲،۳۴ میلیون دلار، بر اساس ضریب انتقال‌یافته و تعدیل‌نشده میلیون دلار برآورد شد. نتایج نشان می‌دهد که زیرساخت سبز شهری تهران، علاوه بر نقش محیط زیستی، دارای عملکرد هیدرولوژیکی و اقتصادی قابل اندازه‌گیری است و می‌تواند به عنوان یک راهبرد مؤثر برای مدیریت پایدار رواناب و افزایش تاب‌آوری شهری مورد استفاده قرار گیرد.

کلمات کلیدی:
ارزش‌گذاری اقتصادی، تنظیم رواناب، خدمات اکوسیستمی، زیرساخت سبز شهری ،سنجش‌ازدور، شهر تهران

۱.مقدمه

رشد سریع شهرنشینی در دهه‌های اخیر، تغییرات گسترده‌ای در ساختار فضایی شهرها ایجاد کرده و به یکی از مهم‌ترین عوامل تغییر چرخه طبیعی آب در محیط‌های شهری تبدیل شده است(Amani-Beni et al., 2019). افزایش سطوح نفوذناپذیر مانند ساختمان‌ها، خیابان‌ها و پارکینگ‌ها موجب کاهش نفوذ آب باران، افزایش سرعت جریان سطحی، کاهش تغذیه آب زیرزمینی و

تشدید خطر آب‌گرفتگی و سیلاب‌های شهری شده است(Hou et al., 2020; Saeedi et al., 2022). این چالش‌ها در شهرهای بزرگ و متراکم، به‌ویژه در مناطق دارای اقلیم خشک و نیمه‌خشک، اهمیت بیشتری دارد زیرا ترکیب دوره‌های طولانی خشکی با رخدادهای کوتاه‌مدت بارش شدید، فشار مضاعفی بر سامانه‌های مدیریت آب شهری وارد می‌کند (Lizárraga-Mendiola et al., 2017; Saeedi & Goodarzi, 2020). در چنین شرایطی، رویکردهای سنتی مبتنی بر زیرساخت‌های خاکستری مانند کانال‌ها، شبکه‌های زهکشی و سازه‌های کنترل سیلاب، به تنهایی قادر به پاسخ‌گویی به پیچیدگی‌های جدید ناشی از تغییرات اقلیمی و توسعه شهری نیستند(Aghili Mahabadi et al., 2022). ازاین‌رو، در سال‌های اخیر مفهوم زیرساخت سبز شهری(Urban Green Infrastructure) و راهکارهای مبتنی بر طبیعت (Nature-based Solutions) به عنوان رویکردهای مکمل و پایدار برای افزایش تاب‌آوری شهرها مورد توجه گسترده پژوهشگران و برنامه‌ریزان شهری قرار گرفته است. مطالعات اخیر نشان داده‌اند که زیرساخت سبز علاوه بر ارتقای کیفیت محیط زیستی شهرها، مجموعه‌ای از خدمات اکوسیستمی شامل تنظیم رواناب، کاهش اثر جزیره گرمایی، بهبود کیفیت هوا، افزایش تنوع زیستی و ارتقای کیفیت زندگی شهروندان را فراهم می‌کند (Yao et al., 2025).

زیرساخت سبز شهری به عنوان شبکه‌ای برنامه‌ریزی‌شده از فضاهای طبیعی و نیمه‌طبیعی، با هدف حفظ فرآیندهای اکولوژیکی و ارائه خدمات محیطی در ساختار شهری تعریف می‌شود. برخلاف فضاهای سبز سنتی که عمدتاً با اهداف زیبایی‌شناختی یا تفریحی طراحی می‌شوند، زیرساخت سبز دارای عملکرد چندگانه بوده و می‌تواند هم‌زمان نقش هیدرولوژیکی، اکولوژیکی و اجتماعی ایفا کند(Choi et al., 2021). یکی از مهم‌ترین خدمات تنظیمی این زیرساخت‌ها، کنترل رواناب سطحی از طریق افزایش نفوذ، ذخیره موقت آب، کاهش سرعت جریان و افزایش تبخیر و تعرق است(Zubelzu et al., 2020). پژوهش‌های اخیر نشان داده‌اند که نوع، ساختار و توزیع فضایی عناصر سبز، تأثیر مستقیمی بر میزان خدمات اکوسیستمی ارائه‌شده دارند و ارزیابی صرف مساحت فضای سبز نمی‌تواند عملکرد واقعی آن‌ها را نشان دهد(Saeedi et al., 2022). به همین دلیل، رویکردهای جدید به سمت توسعه شاخص‌های ترکیبی مانند شاخص زیرساخت سبز(Green Infrastructure Index) حرکت کرده‌اند که می‌توانند ویژگی‌های مختلف پوشش زمین، وضعیت پوشش گیاهی و قابلیت عملکرد اکولوژیکی را در یک چارچوب فضایی یکپارچه نمایش دهند (Dvornikov et al., 2025).

در این میان، فناوری سنجش از دور و سامانه‌های اطلاعات جغرافیایی به ابزارهای مهمی برای پایش و ارزیابی زیرساخت سبز شهری در مقیاس‌های بزرگ تبدیل شده‌اند. داده‌های ماهواره‌ای امکان استخراج شاخص‌های محیطی با پوشش مکانی گسترده و تکرار زمانی مناسب را فراهم می‌کنند و می‌توانند تغییرات فضایی شرایط اکولوژیکی شهرها را بدون نیاز به برداشت‌های گسترده زمینی آشکار سازند. مطالعات جدید تأکید کرده‌اند که استفاده از سنجش از دور نه تنها برای شناسایی پوشش سبز، بلکه برای نگاشت خدمات اکوسیستمی و پشتیبانی از تصمیم‌گیری‌های برنامه‌ریزی شهری نیز اهمیت فزاینده‌ای یافته است(Di Palma et al., 2024).

یکی از مهم‌ترین حوزه‌های کاربرد زیرساخت سبز، مدیریت رواناب شهری است. تغییر کاربری اراضی و افزایش سطوح نفوذناپذیر باعث افزایش ضریب رواناب و کاهش زمان تمرکز جریان شده و در نتیجه احتمال وقوع سیلاب‌های ناگهانی شهری را افزایش داده است(Young et al., 2009). در مقابل، عناصر زیرساخت سبز مانند پارک‌ها، فضاهای سبز، باغ‌های شهری، بام‌های سبز و سطوح نفوذپذیر می‌توانند با افزایش ظرفیت نگهداری آب، بخشی از بار هیدرولوژیکی وارد بر شهر را کاهش دهند. برای کمی‌سازی این عملکرد، مدل‌های هیدرولوژیکی مختلفی توسعه یافته‌اند که در میان آن‌ها روش شماره منحنی رواناب سازمان حفاظت خاک آمریکا (Soil Conservation Service Curve Number; SCS-CN) به دلیل سادگی، قابلیت اتصال به داده‌های کاربری اراضی و امکان کاربرد در محیطGIS ، یکی از پرکاربردترین روش‌ها در مطالعات شهری محسوب می‌شود (Soulis & Valiantzas, 2012). این مدل امکان تبدیل ویژگی‌های سطح زمین به مقادیر کمی رواناب را فراهم کرده و می‌تواند برای مقایسه سناریوهای مختلف توسعه شهری یا حذف و حضور زیرساخت سبز مورد استفاده قرار گیرد(Mishra & Singh, 1999).

۲.پیشینه نظری و تجربی

مطالعات در دهه‌های اخیر زیرساخت سبز را به عنوان یک شبکه عملکردی از عناصر طبیعی و نیمه‌طبیعی معرفی می‌کنند که قادر است هم‌زمان چندین خدمت اکوسیستمی را در محیط شهری فراهم کند. بندیکت و مک ماهون(۲۰۰۶) از نخستین پژوهشگرانی بودند که مفهوم زیرساخت سبز را به عنوان یک چارچوب برنامه‌ریزی برای اتصال عناصر طبیعی و حفظ عملکردهای اکولوژیکی مطرح کردند. پس از آن، مطالعات بسیاری نشان دادند که زیرساخت سبز می‌تواند در کاهش اثرات منفی توسعه شهری، افزایش تاب‌آوری در برابر تغییرات اقلیمی و بهبود کیفیت محیط شهری نقش مهمی ایفا کند.

خدمات اکوسیستمی ارائه‌شده توسط زیرساخت سبز شامل خدمات تنظیمی، پشتیبانی، فرهنگی و تأمین‌کننده است. در میان این خدمات، تنظیم رواناب و کاهش خطر سیلاب شهری یکی از مهم‌ترین عملکردهای زیرساخت سبز در شهرهای متراکم محسوب می‌شود. در سال‌های اخیر، مفهوم راهکارهای مبتنی بر طبیعت ارتباط نزدیکی با زیرساخت سبز پیدا کرده است (Fang et al., 2024). این رویکرد بر استفاده از فرآیندهای طبیعی برای حل چالش‌های شهری تأکید دارد و برخلاف راهکارهای مهندسی سنتی، تلاش می‌کند هم‌زمان اهداف محیط‌زیستی، اقتصادی و اجتماعی را تأمین کند. مطالعات انجام‌شده نشان داده‌اند که توسعه زیرساخت سبز نه تنها موجب کاهش خطرات اقلیمی مانند سیلاب و گرمای شهری می‌شود، بلکه ارزش فرهنگی و روانشناسی قابل توجهی از طریق ارائه خدمات اکوسیستمی ایجاد می کند (Saeedi et al., 2025; Shokri Biarargh & Nematimehr, 2019; Summers & Vivian, 2018).

در این میان کنترل رواناب یکی از مهمترین خدمات اکوسیستمی زیرساخت های سبز است. مطالعات متعددی نشان داده‌اند که عناصر زیرساخت سبز مانند پارک‌های شهری، باغ‌های بارانی، بام‌های سبز و سطوح نفوذپذیر می‌توانند از طریق ذخیره موقت آب، افزایش نفوذ و کاهش دبی اوج، نقش مؤثری در کنترل رواناب داشته باشند. به عنوان مثال محققان نشان دادند که سیستم‌های مدیریت پایدار آب‌های سطحی می‌توانند به عنوان مکمل شبکه‌های زهکشی سنتی عمل کنند(Jia et al., 2015). همچنین در یک مطالعه مروری نشان دادند که زیرساخت‌های سبز کوچک‌مقیاس می‌توانند حجم رواناب و آلاینده‌های منتقل‌شده توسط جریان سطحی را کاهش دهند(Liu et al., 2017).

لازم به ذکر است که برای کمی‌سازی اثرات هیدرولوژیکی زیرساخت سبز، استفاده از مدل‌های بارش-رواناب ضروری است. روش SCS-CNبر اساس رابطه میان نوع پوشش زمین، شرایط هیدرولوژیکی خاک و مقدار بارش، ظرفیت تولید رواناب را برآورد می‌کند(Mishra & Singh, 1999). این روش در مطالعات مختلف برای بررسی اثر تغییر کاربری اراضی، توسعه شهری و سناریوهای مختلف مدیریت رواناب مورد استفاده قرار گرفته است.

با وجود افزایش مطالعات درباره نقش زیرساخت سبز در کاهش رواناب، هنوز چندین شکاف پژوهشی وجود دارد. بخش قابل توجهی از مطالعات گذشته تنها بر اندازه‌گیری مساحت فضای سبز یا ارزیابی شاخص‌های پوشش گیاهی تمرکز داشته‌اند و ارتباط کمی میان وضعیت واقعی زیرساخت سبز موجود، کاهش حجم رواناب و ارزش اقتصادی این خدمت اکوسیستمی برقرار نکرده‌اند. همچنین، در بسیاری از مطالعات، ارزیابی عملکرد زیرساخت سبز در مقیاس شهری بدون ترکیب هم‌زمان داده‌های سنجش از دور، مدل‌سازی هیدرولوژیکی و ارزش‌گذاری اقتصادی انجام شده است. مطالعات جدید بر ضرورت توسعه چارچوب‌های یکپارچه تأکید دارند که بتوانند عملکرد چندبعدی زیرساخت سبز را از منظر اکولوژیکی، هیدرولوژیکی و اقتصادی ارزیابی کنند(Khalili et al., 2024).

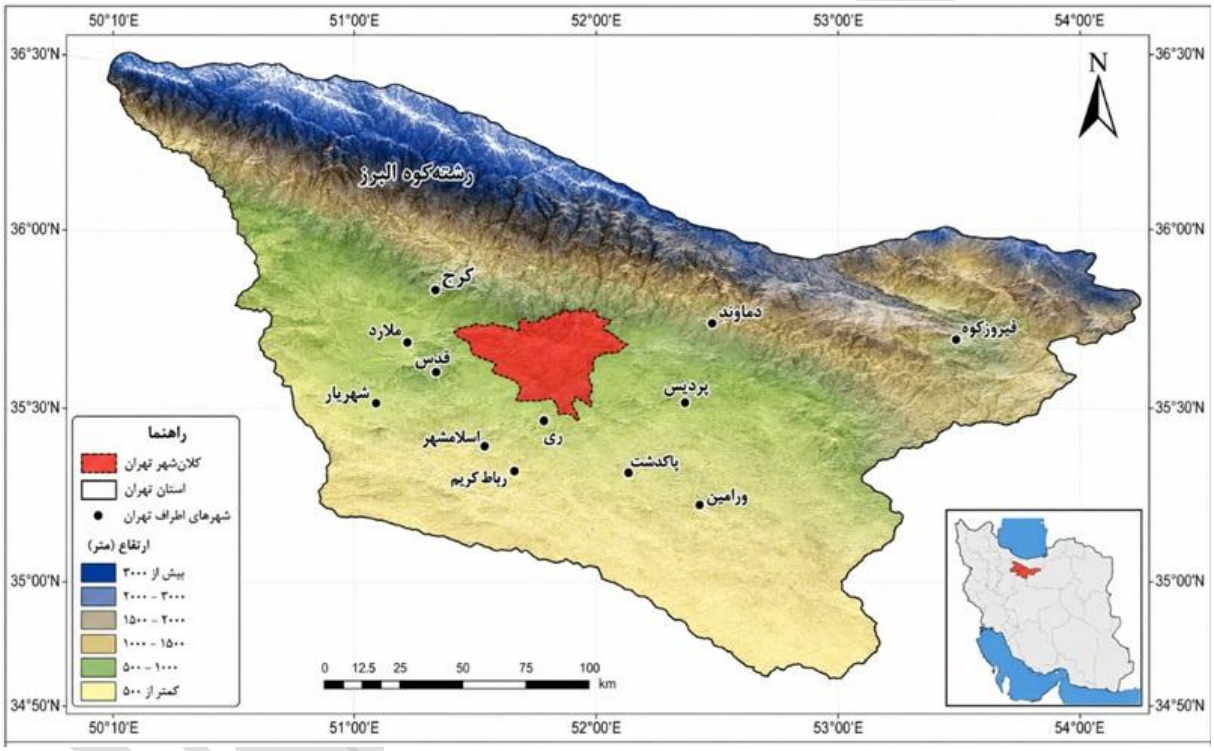
شهر تهران به عنوان یکی از بزرگ‌ترین کلان‌شهرهای منطقه خاورمیانه، نمونه‌ای مناسب برای بررسی این موضوع است. توسعه سریع کالبدی، افزایش تراکم ساختمانی، کاهش سطوح نفوذپذیر و قرارگیری در اقلیم نیمه‌خشک، این شهر را با چالش‌های جدی در زمینه مدیریت رواناب مواجه کرده است(Yalveh et al., 2025). اگرچه تهران دارای شبکه‌ای از پارک‌ها، فضاهای سبز شهری و عناصر طبیعی است، اما توزیع فضایی و عملکرد هیدرولوژیکی این عناصر تاکنون کمتر به صورت کمی و یکپارچه ارزیابی شده است. بنابراین، شناخت ظرفیت واقعی زیرساخت سبز موجود تهران برای ارائه خدمات تنظیم رواناب می‌تواند اطلاعات ارزشمندی برای برنامه‌ریزی شهری، مدیریت سیلاب و توسعه راهکارهای مبتنی بر طبیعت فراهم کند.

بر این اساس، هدف اصلی پژوهش حاضر توسعه یک چارچوب یکپارچه مبتنی بر سنجش از دور، مدل‌سازی هیدرولوژیکی و ارزش‌گذاری اقتصادی برای ارزیابی نقش زیرساخت سبز موجود شهر تهران در تنظیم رواناب شهری است. به بیان دیگر هدف نهایی این تحقیق برآورد ارزش اقتصادی خدمت تنظیم رواناب ارائه‌شده توسط زیرساخت سبز شهری است. نوآوری اصلی این پژوهش در ترکیب هم‌زمان تحلیل فضایی سنجش از دور، مدل‌سازی هیدرولوژیکی و ارزش‌گذاری اقتصادی برای ارزیابی عملکرد واقعی زیرساخت سبز موجود در مقیاس یک کلان‌شهر است.

۳. روش‌شناسی

۱.۳.محدوده مطالعاتی

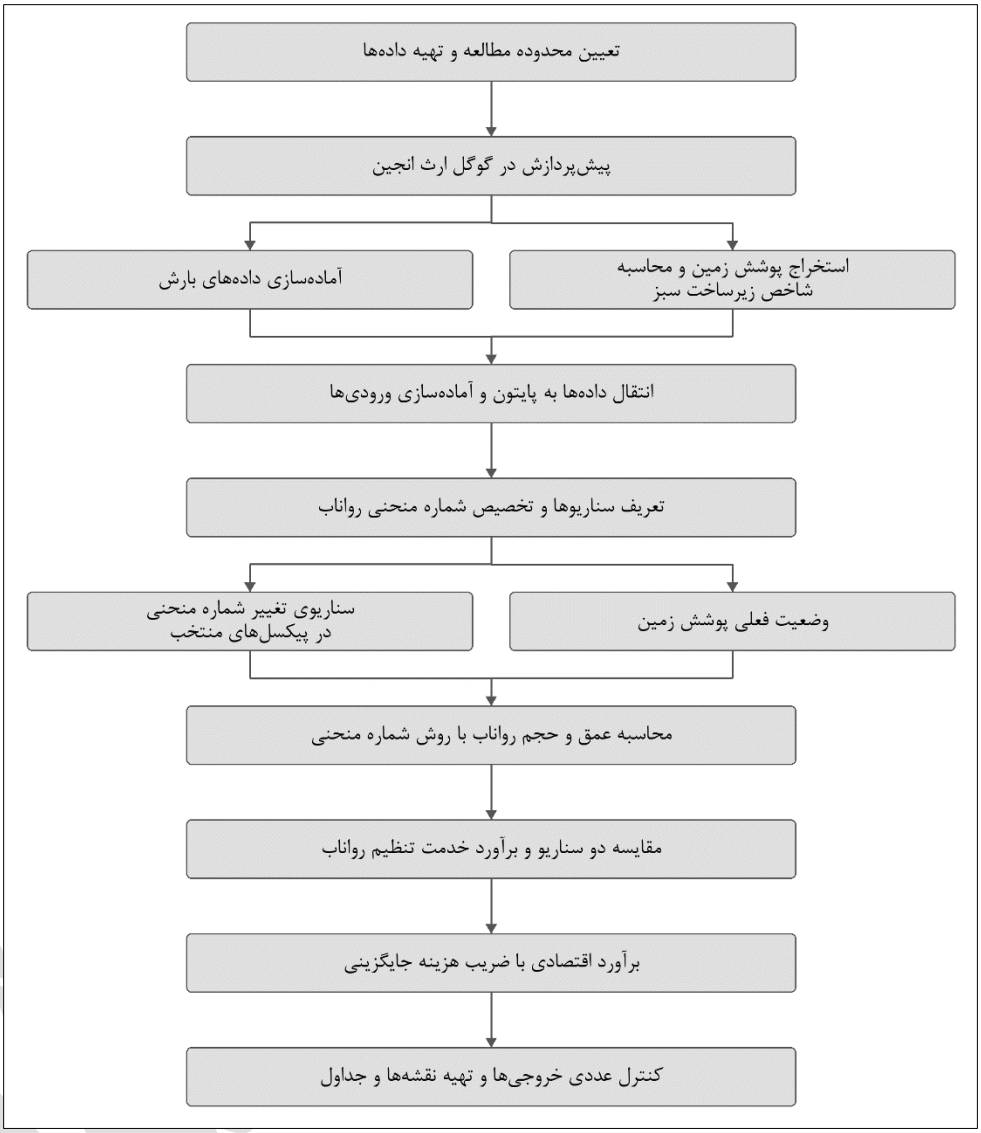
این پژوهش در شهر تهران، به عنوان یکی از بزرگ‌ترین و پرتراکم‌ترین کلان‌شهرهای خاورمیانه، انجام شد. توسعه سریع شهری، افزایش سطوح نفوذناپذیر، کاهش پوشش گیاهی و تغییر الگوی طبیعی زهکشی، موجب افزایش چالش‌های مرتبط با مدیریت رواناب سطحی در این شهر شده است. محدوده مطالعه بر اساس مرز رسمی شهرداری تهران صورت پذیرفت. این مرز به عنوان محدوده اصلی تحلیل و برش تمامی داده‌های مکانی مورد استفاده قرار گرفت. مساحت محدوده مطالعه حدود ۶۳۰۶۸ هکتار، معادل ۶۳۰٫۶۸ کیلومترمربع است. چارچوب کلی پژوهش شامل چهار مرحله اصلی شامل استخراج شاخص‌های محیطی از داده‌های سنجش از دور، توسعه شاخص زیرساخت سبز، مدل‌سازی رواناب شهری و ارزش‌گذاری اقتصادی خدمت اکوسیستمی کنترل رواناب است.



شکل ۱. محدوده مطالعه و موقعیت شهر تهران در منطقه مورد بررسی.

۲.۳.روش تحقیق

روند اجرای پژوهش، مطابق شکل ۲، با تعیین محدوده مطالعه و تهیه داده‌های پوشش زمین، تصاویر ماهواره‌ای و بارش آغاز شد. پس از پیش‌پردازش داده‌ها در گوگل ارث انجین، شاخص زیرساخت سبز محاسبه و لایه‌های موردنیاز برای تحلیل هیدرولوژیکی به محیط پایتون منتقل شدند. سپس دو سناریوی وضعیت فعلی پوشش زمین و تغییر شماره منحنی رواناب در پیکسل‌های منتخب تعریف شد و عمق و حجم رواناب هر دو سناریو تحت بارش یکسان، با روش شماره منحنی برآورد گردید. مقایسه خروجی‌های دو سناریو مبنای محاسبه خدمت تنظیم رواناب قرار گرفت و معادل پولی این خدمت با استفاده از ضریب انتقال‌یافته هزینه جایگزینی برآورد شد. در پایان، سازگاری عددی خروجی‌ها بررسی و نتایج در قالب نقشه‌ها و جداول ارائه شدند.



شکل ۲. روند اجرای پژوهش برای برآورد خدمت تنظیم رواناب و معادل پولی آن

در این تحقیق مجموعه‌ای از داده‌های سنجش از دور، اقلیمی و مکانی برای ارزیابی ظرفیت زیرساخت سبز شهری در کنترل رواناب استفاده شد. داده‌های مورد استفاده شامل نقشه کاربری اراضی، شاخص زیرساخت سبز، شاخص پوشش گیاهی NDVI، شاخص ساخت‌وساز NDBI، داده بارش CHIRPSو مرز محدوده شهری تهران بود. مشخصات داده های مورد استفاده در این تحقیق در جدول ۱ ارایه شده است. تمامی داده‌های رستری ابتدا از نظر سیستم مختصات، محدوده مکانی، اندازه سلول و مقادیر فاقد داده استانداردسازی شدند .به منظور انجام محاسبات مساحت و حجم، تمامی لایه‌ها به سیستم مختصات UTM Zone 39N (EPSG:32639)تبدیل شدند .سپس داده‌ها با استفاده از مرز شهر تهران برش داده شدند تا تمامی تحلیل‌ها تنها در محدوده شهری تهران انجام شود.

جدول ۱. داده های مورد استفاده در تحقیق

ردیف	داده مورد استفاده	منبع داده	دوره زمانی یا نسخه	نوع و تفکیک مکانی بومی	کاربرد در پژوهش
۱	پوشش زمین و احتمال کلاس‌های پوشش زمین	محصول آماده Dynamic World V1 در Google Earth Engine	۲۰۲۴	رستری؛ ۱۰ متر	تهیه نقشه پوشش زمین با ترکیب زمانی داده‌ها، محاسبه مساحت کلاس‌ها و تعریف سناریوهای پوشش گیاهی
۲	تصاویر چندطیفی Sentinel-2	مجموعه تصاویر Sentinel-2 در Google Earth Engine؛ شناسه دقیق مجموعه مطابق کد درج شود	سال ۲۰۲۴	رستری؛ ۱۰ متر برای باندهای قرمز و فروسرخ نزدیک	محاسبه شاخص پوشش گیاهی نرمال‌شده، NDVI
۳	بارش روزانه	CHIRPS Daily؛ مجموعه UCSB-CHG/CHIRPS/DAILY در Google Earth Engine	سال ۲۰۲۴؛ روز منتخب: ۱۱ ژانویه؛ بارش پیشین: ۶ تا ۱۰ ژانویه	رستری؛ ۰٫۰۵ درجه، حدود ۵ کیلومتر	بررسی بارش روزانه، تأمین ورودی بارش روز منتخب برای مدل و محاسبه مجموع بارش پنج روز پیشین
۴	گروه هیدرولوژیکی خاک، HSG	HiHydroSoil v2.0؛ لایه گروه هیدرولوژیکی خاک در مجموعه عمومی میزبان Earth Engine	نسخه ۲٫۰؛ مستقل از سال پوشش زمین	رستری؛ حدود ۲۵۰ متر	شناسایی گروه‌های خاک C و D در محدوده و تخصیص CN بر اساس ترکیب خاک و پوشش زمین
۵	نقشه شماره منحنی رواناب، CN	تولیدشده در پژوهش از ترکیب پوشش زمین، HSG و مقادیر مرجع CN	متناظر با پوشش زمین سال ۲۰۲۴؛ حالت مرجع AMC II	رستری مشتق‌شده؛ شبکه محاسباتی ۱۰ متر^2	محاسبه رواناب وضعیت موجود و سناریوهای تبدیل پوشش گیاهی و تحلیل حساسیت CN و رطوبت پیشین

در ارتباط با استفاده از داده های بارشی ذکر این نکته مهم است که داده بارش CHIRPS دارای تفکیک مکانی حدود ۵ کیلومتر است و تغییرات بارش در مقیاس محله و قطعه شهری را تفکیک نمی‌کند. در پیاده‌سازی حاضر، بیشینه مکانی رستر بارش ورودی استخراج و به‌عنوان مقدار بارش یکنواخت در سراسر محدوده محاسباتی اعمال شد. بنابراین، شبکه محاسباتی ۱۰ متری بیانگر مقیاس نمایش ویژگی‌های سطح زمین و محاسبات رواناب است و به معنای وجود اطلاعات مستقل بارش در این مقیاس نیست. تفاوت مکانی رواناب برآوردشده در این چارچوب، تحت بارش یکسان، از تفاوت پارامترهای سطح زمین ناشی می‌شود.

محاسبات رواناب در این پژوهش بر مبنای مجموع بارش سالانه انجام نشد، بلکه یک سناریوی بارش با استفاده از رستر حداکثر بارش روزانه دوره مورد بررسی تعریف شد. در پیاده‌سازی Python ، بیشینه مکانی رستر ورودی استخراج و به‌صورت مقدار یکنواخت برای مقایسه سناریوهای پوشش زمین به کار رفت. این نحوه انتخاب بارش، به‌تنهایی بیانگر بازسازی یک رخداد واقعی هم‌زمان در سراسر محدوده نیست و تاریخ رخداد مشخصی از آن استنتاج نمی‌شود. لایه بارش سالانه صرفاً برای توصیف شرایط بارشی محدوده گزارش شده و ورودی محاسبه

حجم‌های رواناب ارائه‌شده نبوده است. بنابراین، حجم رواناب، خدمت تنظیم رواناب و معادل پولی آن مربوط به سناریوی بارش مورد بررسی‌اند و مقادیر سالانه محسوب نمی‌شوند.

به منظور ارزیابی شرایط محیطی شهر تهران، از شاخص‌های طیفی استخراج‌شده از تصاویر ماهواره‌ای Sentinel-2استفاده شد. شاخص NDVIبرای بررسی وضعیت پوشش گیاهی و شدت فعالیت گیاهان شهری محاسبه شد .این شاخص بر اساس رابطه ۱ محاسبه می‌شود.

رابطه ۱:

NDVI=(NIR-Red)/(NIR+Red)

که در آن NIRبازتاب باند مادون قرمز نزدیک و Redبازتاب باند قرمز است. مقادیر بالاتر NDVIنشان‌دهنده تراکم بیشتر پوشش گیاهی و ظرفیت بالاتر برای نگهداری آب، افزایش نفوذ و کاهش رواناب سطحی است. همچنین شاخص NDBIبرای ارزیابی شدت توسعه شهری و سطوح ساخته‌شده مطابق رابطه ۲ محاسبه شد.

رابطه ۲:

NDBI=(SWIR-NIR)/(SWIR+NIR)

مقادیر بالاتر NDBIبیانگر افزایش سطوح نفوذناپذیر شهری است. بر اساس ترکیب اطلاعات پوشش گیاهی، ساخت‌وساز و ویژگی‌های سطح زمین، شاخص زیرساخت سبز به صورت نرمال‌شده بین صفر و یک ایجاد شد؛ به‌طوری‌که مقادیر بالاتر نشان‌دهنده ظرفیت بیشتر زیرساخت سبز برای ارائه خدمات تنظیم رواناب است. شاخص زیرساخت سبز با ترکیب سه مؤلفه شامل NDVI نرمال‌شده، مجموع مقادیر احتمال کلاس‌های درختان، پوشش علفی و اراضی کشت در محصولDynamic World ، و مکمل احتمال کلاس ساخته‌شده محاسبه شد. ابتدا میانه زمانی هر یک از باندهای احتمال در دوره مورد بررسی محاسبه شد NDVI .با استفاده از حدود ثابت ۰٫۲− و ۰٫۸ به بازه صفر تا یک تبدیل و مقادیر خارج از این بازه محدود شدند. سپس شاخص زیرساخت سبز از مجموعه روابط ۳به دست آمد.

رابطه ۳ :

$$N = clip(\frac{(NDVI + 0.2)}{1.0}. 0 .1)$$

$$V = median(p_trees) + median(p_grass) + median(p_crops)$$

$$B = median(p_built)$$

$$GII = 0.4N + 0.4V + 0.2(1 - B)$$

در این رابطه، (N)نشان‌دهنده NDVI نرمال‌شده، (V)مجموع میانه زمانی احتمال کلاس‌های درختان، پوشش علفی و اراضی کشت، و (B)میانه زمانی احتمال کلاس ساخته‌شده در هر پیکسل است. در ارتباط با متغیر V، برای استخراج مؤلفه پوشش

گیاهی، از باندهای احتمال تعلق به کلاس‌های درختان، علفزار و اراضی زراعی در محصول Dynamic World استفاده شد. ابتدا میانه زمانی هر باند در بازه تصاویر انتخاب‌شده سال ۲۰۲۴، به‌صورت مستقل برای هر پیکسل محاسبه شد.

در این روابط، علامت مد بیانگر میانه زمانی باند احتمال هر کلاس و تابع clip بیانگر محدودکردن مقادیر به بازه مشخص‌شده است. وزن‌های مؤلفه‌ها به‌ترتیب برابر با ۰٫۴، ۰٫۴ و ۰٫۲ در نظر گرفته شدند. این وزن‌ها انتخاب‌های مدل‌سازی پژوهش‌لند و در کد ارائه‌شده روشی برای برآورد یا کالیبراسیون آن‌ها اجرا نشده است. برای محاسبه مساحت، پیکسل‌های دارای GII بزرگ‌تر از ۰٫۵ به‌عنوان محدوده منتخب شاخص در نظر گرفته شدند.

برای شبیه‌سازی رواناب سطحی ناشی از بارش، از روش استاندارد شماره منحنی رواناب سازمان حفاظت خاک آمریکا (SCS-CN) استفاده شد. این روش یکی از روش‌های متداول در مطالعات هیدرولوژی شهری است که اثر کاربری زمین، نفوذپذیری سطح و شرایط هیدرولوژیکی را در تولید رواناب لحاظ می‌کند. شماره منحنی رواناب هر پیکسل بر اساس ترکیب کلاس پوشش زمین و گروه هیدرولوژیکی خاک تعیین شد. گروه‌های هیدرولوژیکی خاک از لایه HSG محصول HiHydroSoil نسخه ۲٫۰ با تفکیک مکانی حدود ۲۵۰ متر استخراج شدند. در محدوده مطالعه، گروه C حدود ۶۳۰۰۵۲٫۷۵ هکتار و گروه D حدود ۱۴٫۲۱ هکتار از سطح دارای داده معتبر خاک را پوشش دادند. مقادیر CN متناسب با هر ترکیب پوشش زمین و گروه خاک تخصیص یافتند (جدول ۲). انتقال لایه خاک به شبکه محاسباتی ۱۰ متری با روش نزدیک‌ترین همسایه انجام شد و به معنای افزایش تفکیک اطلاعات خاک نیست. شرایط رطوبت پیشین متوسط، AMC II، به‌عنوان فرض مرجع محاسبات در نظر گرفته شد. برای بررسی زمینه بارشی، مجموع بارش پنج روز پیش از روز منتخب، از ۶ تا ۱۰ ژانویه ۲۰۲۴، محاسبه شد که میانگین مساحتی آن در محدوده مطالعه ۱۵٫۷۵ میلی‌متر بود. این مقدار به‌تنهایی مبنای تأیید شرایط رطوبتی یکسان در کل محدوده قرار نگرفت. همچنین، حساسیت نتایج به شرایط خشک و مرطوب با محاسبه سناریوهای AMC I و AMC III بررسی شد. در این آزمون، اصلاح رطوبتی CN فقط برای کلاس‌های نفوذپذیر اعمال شد و CN سطوح ساخته‌شده و سطوح جایگزین سناریوی تبدیل، برابر با ۹۸ ثابت ماند. ظرفیت نگهداری بالقوه آب پس از شروع رواناب از رابطه ۴ محاسبه شد.

رابطه۴:

$$S=25400/CN-254$$

که در آن S ظرفیت نگهداری بالقوه آب بر حسب میلی‌متر و CN شماره منحنی رواناب است .سپس عمق رواناب با استفاده از رابطه ۵ محاسبه شد.

رابطه۵:

$$Q=((P-0.2S)^2)/(P+0.8S)$$

در این رابطه، (Q) عمق رواناب مستقیم و (P) عمق بارش ورودی سناریو، هر دو بر حسب میلی‌متر، هستند. مقدار (P) از بیشینه مکانی رستر حداکثر بارش روزانه دوره مورد بررسی استخراج و به‌صورت یکنواخت در محاسبات اعمال شد. مجموع بارش سالانه در رابطه وارد نشد. محاسبه رواناب برای یک بارش مفروض انجام شده است و خروجی آن نباید به‌عنوان رواناب سالانه تفسیر شود. همچنین، چون انتخاب بارش از این رستر لزوماً توزیع مکانی یک رخداد هم‌زمان را بازنمایی نمی‌کند، نتایج به‌عنوان پاسخ مدل به سناریوی بارش منتخب گزارش می‌شوند.

در سناریوی اصلی، پیکسل‌های متعلق به کلاس‌های درختان، پوشش علفی و بوته‌زار در نقشه پوشش زمینDynamic World ، به سطح نفوذناپذیر با شماره منحنی ۹۸ تبدیل شدند. در سناریوی گسترده، علاوه بر این کلاس‌ها، اراضی کشت نیز به سطح نفوذناپذیر با همین شماره منحنی تبدیل شدند. مقادیر CN سایر کلاس‌های خشکی معتبر بدون تغییر باقی ماندند؛ پهنه‌های آبی و پوشش گیاهی آب‌گرفته از دامنه محاسبات کنار گذاشته شدند. بارش روز منتخب، شبکه محاسباتی، محدوده معتبر و فرض رطوبتی مرجع AMC II در وضعیت موجود و سناریوهای تبدیل یکسان بودند. سپس رواناب هر سناریو به‌طور مستقل با رابطه SCS-CNمحاسبه شد و اختلاف حجم رواناب سناریوی تبدیل و وضعیت موجود، به‌عنوان رواناب اجتناب‌شده ناشی از حفظ پوشش گیاهی برآورد شد. این سناریوها مقایسه‌های فرضی‌اند و پیش‌بینی توسعه واقعی شهر محسوب نمی‌شوند. مقدار CN برابر با ۹۸ نیز فرض صریح سطح جایگزین است.

جدول ۲. تطبیق کلاس‌های کاربری اراضی و مقادیر CN مورد استفاده در مدلSCS-CN

کد پوشش زمین	کلاس پوشش زمین	شماره منحنی تخصیص‌یافته در کد
۰	آب	۱۰۰
۱	درختان	۴۵
۲	علفزار	۶۱
۳	پوشش گیاهی آب‌گرفته	۵۵
۴	اراضی زراعی	۷۰
۵	بوته‌زار و درختچه‌زار	۶۵
۶	اراضی ساخته‌شده	۹۰
۷	اراضی بایر	۸۵
۸	برف و یخ	۱۰۰

لازم به ذکر است که کدهای پوشش زمین صرفاً شناسه کلاس‌های محصول Dynamic World هستند و با مقادیر شماره منحنی تفاوت دارند. مقادیر CN جدول به‌صورت ثابت در مدل تخصیص یافته‌اند و از واسنجی با داده‌های مشاهده‌ای رواناب به دست نیامده‌اند. خارج از محدوده مطالعه، کلاس مستقلی برای تخصیص CN محسوب نمی‌شود. همچنین مقادیر فاقد داده و نواحی خارج محدوده، کلاس پوشش زمین محسوب نمی‌شوند و شماره منحنی برای آن‌ها تعریف نمی‌شود. کد صفر در محصول Dynamic Worldمعرف کلاس آب است و نباید با NoData اشتباه گرفته شود.

پس از محاسبه عمق رواناب، حجم رواناب تولیدشده در هر سلول با استفاده از مساحت سلول‌های رستری محاسبه شد. حجم رواناب از رابطه ۶ به دست آمد.

رابطه۶:

$$V=(Q/1000)\times A$$

که در آن Vحجم رواناب بر حسب مترمکعب، Qعمق رواناب بر حسب میلی‌متر و Aمساحت سلول بر حسب مترمربع است. خدمت اکوسیستمی تنظیم رواناب برابر با اختلاف حجم رواناب در شرایط بدون زیرساخت سبز و شرایط فعلی تعریف شد. این مقدار نشان‌دهنده حجم آبی است که به دلیل وجود زیرساخت سبز شهری از تولید رواناب اضافی جلوگیری می‌شود.

برای برآورد معادل پولی خدمت تنظیم رواناب، از انتقال یک ضریب هزینه جایگزینی از مطالعه مرجع استفاده شد. راهنمای مدل نگهداشت رواناب شهریInVEST، با ارجاع به Simpson و McPherson (۲۰۰۷)، مقدار ۱،۵۹ دلار آمریکا بر مترمکعب را برای منطقه خلیج سان‌فرانسیسکو گزارش می‌کند(Simpson & McPherson, 2007). در مطالعه حاضر، این ضریب به‌عنوان مبنای یک برآورد انتقالی و مشروط به کار رفت و معادل پولی خدمت از رابطه ۷ محاسبه شد.

رابطه ۷:

$$E=V\times A$$

در این رابطه، (E) معادل پولی خدمت بر حسب دلار آمریکا، (V)حجم کاهش رواناب میان دو سناریو بر حسب مترمکعب و (A) ضریب هزینه جایگزینی برابر با ۱،۵۹ دلار بر مترمکعب است. ضریب مذکور بدون تعدیل تورمی یا تعدیل تفاوت هزینه‌های منطقه‌ای اعمال شد. نتایج ارزش اقتصادی به صورت مکانی در واحد دلار بر هکتار تهیه شد تا امکان مقایسه فضایی ارزش خدمات اکوسیستمی در بخش‌های مختلف شهر فراهم شود.

پردازش داده‌ها در دو محیط Google Earth Engine و Python انجام شد. درGoogle Earth Engine ، داده‌ها با استفاده از رابط برنامه‌نویسی JavaScript فراخوانی و به محدوده مطالعه محدود شدند. داده‌های پوشش زمین از مجموعه GOOGLE/DYNAMICWORLD/V1و تصاویر بازتاب سطحی Sentinel-2 از مجموعه COPERNICUS/S2_SR_HARMONIZEDتهیه شدند. پردازش‌ها شامل اعمال فیلترهای زمانی و مکانی، تهیه ترکیب زمانی میانه، استخراج لایه‌های موردنیاز، محاسبه شاخص‌های طیفی و شاخص زیرساخت سبز و صدور لایه‌های رستری بود. جزئیات فرمول‌ها و پارامترهای شاخص زیرساخت سبز در بخش مربوط ارائه شده است. لایه‌های خروجی این مرحله با اندازه پیکسل خروجی ۱۰ متر در قالب GeoTIFF برای پردازش‌های بعدی صادر شدند. در محیطPython ، لایه‌های پوشش زمین، شاخص زیرساخت سبز و بارش وارد شدند و محاسبات هیدرولوژیکی و اقتصادی انجام گرفت. مراحل اصلی شامل آماده‌سازی داده‌های رستری، تخصیص شماره منحنی به کلاس‌های پوشش زمین، محاسبه ظرفیت نگهداشت و عمق رواناب با روشSCS-CN ، محاسبه رواناب سناریوی مرجع، برآورد اختلاف رواناب دو سناریو، تبدیل عمق رواناب به حجم و ارزش‌گذاری اقتصادی بود. تعاریف سناریوها، مقادیر شماره منحنی و مفروضات ارزش‌گذاری در بخش‌های مربوط گزارش شده‌اند.

۴.یافته‌ها

نتایج این تحقیق نشان داد که محدوده شهری تهران از نظر شرایط اکولوژیکی و هیدرولوژیکی دارای ناهمگنی قابل توجهی است و توزیع شاخص‌های محیطی در سطح شهر یکنواخت نیست. بر اساس نتایج ارائه‌شده در جدول ۳، مقدار میانگین شاخص زیرساخت سبز برابر با ۰.۲۷۱ به دست آمد که نشان‌دهنده سطح متوسط عملکرد زیرساخت سبز در مقیاس کل شهر است. دامنه تغییرات این شاخص از ۰.۰۹۴ تا ۰.۸۹۸ بیانگر وجود تفاوت‌های فضایی قابل توجه میان مناطق مختلف شهری و تمرکز ظرفیت‌های اکولوژیکی

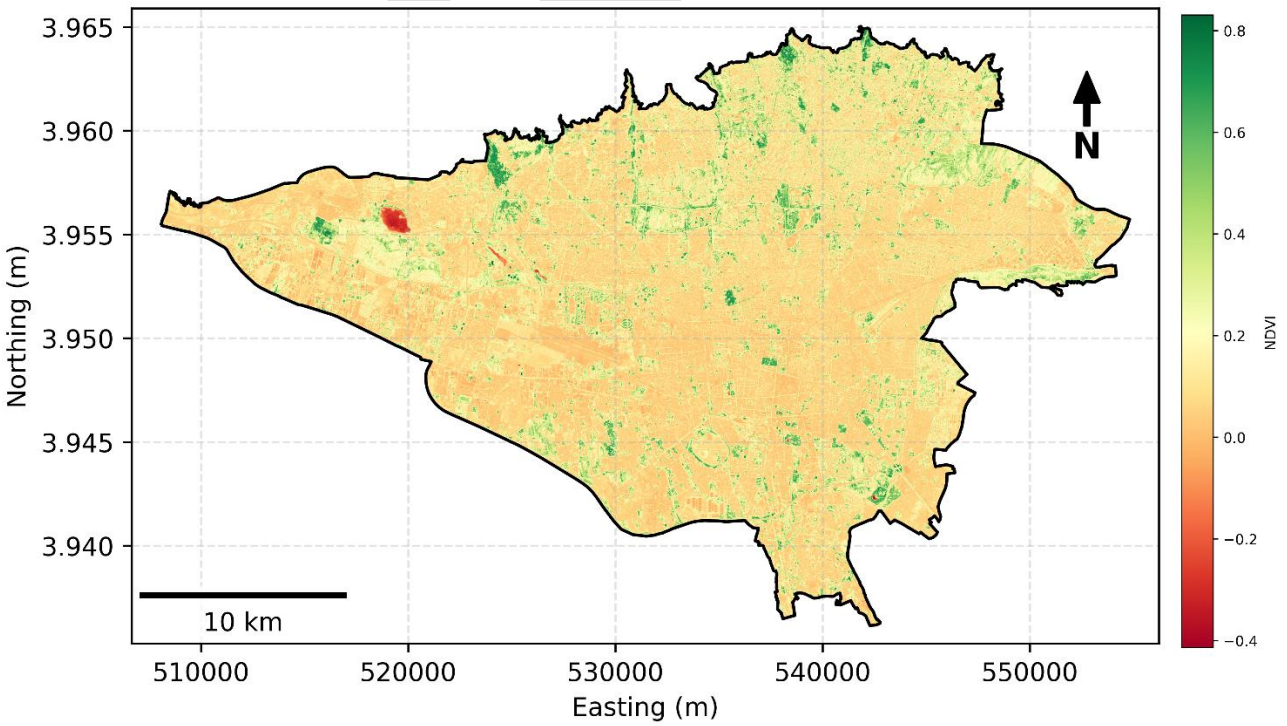
juep.net

در برخی بخش‌های شهر است. همچنین مقدار انحراف معیار ۰.۱۰۳ نشان می‌دهد که پراکنش زیرساخت سبز در سطح شهر دارای تغییرات مکانی قابل توجهی بوده و الگوی توزیع آن تحت تأثیر ساختار شهری و شرایط طبیعی قرار دارد.

جدول ۳. خلاصه آماری لایه‌های مکانی مورد استفاده در پژوهش

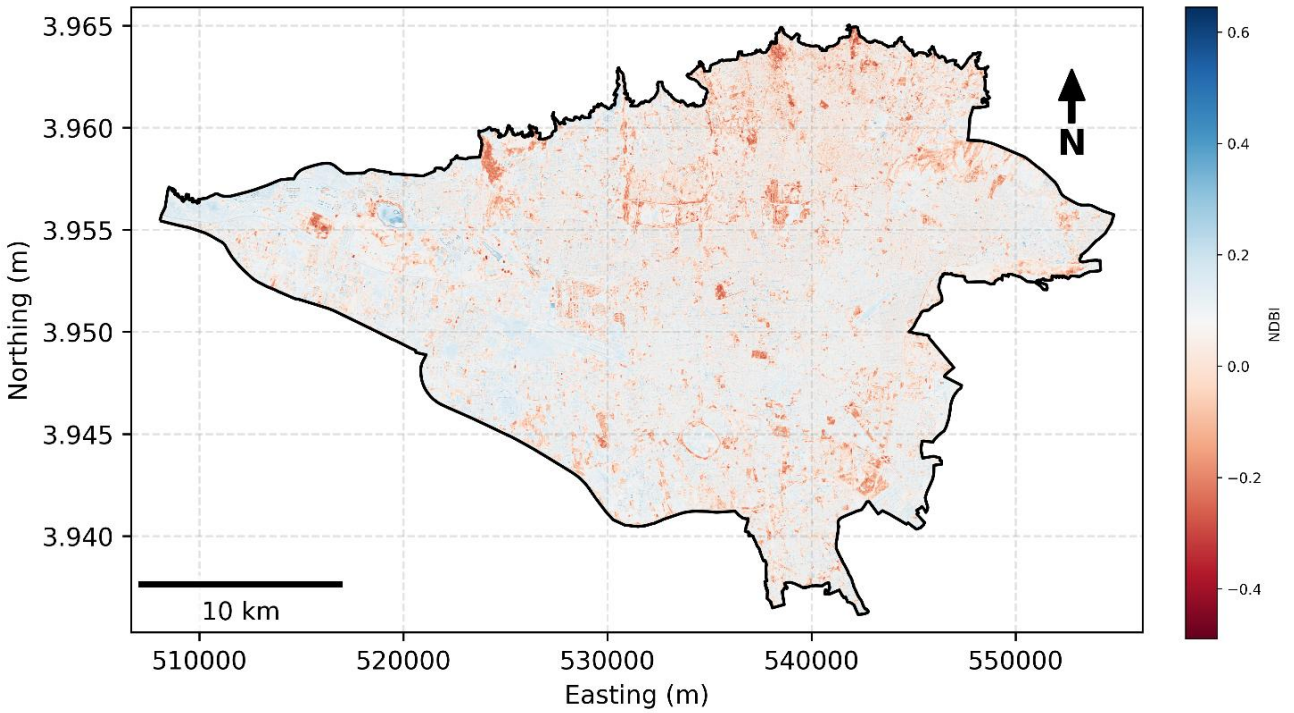
لایه مکانی	میانگین	حداقل	حداکثر	انحراف معیار
GII	۰/۲۷۱	۰/۰۹۴	۰/۸۹۸	۰/۱۰۳
NDVI	۰/۱۴۲	−۰/۴۱۹	۰/۸۳۵	۰/۱۴۵
NDBI	۰/۰۵۹	−۰/۵۲۱	۰/۷۰۳	۰/۰۹۷
حداکثر بارش روزانه (میلی‌متر)	۴۰/۰۶۹	۱۹/۳۸۱	۱۰۷/۰۱۸	۱۷/۶۵۵
بارش سالانه (میلی‌متر)	۴۵۶/۰۴۵	۲۱۰/۷۰۳	۹۹۱/۴۷۹	۲۰۹/۸۴۰
رواناب (میلی‌متر)	۳۵/۲۳۹	۰	۱۰۷/۰۱۸	۳۸/۶۴۰
احتمال پوشش گیاهی	۰/۱۲۴	۰/۰۶۸	۰/۷۷۵	۰/۰۸۲

بررسی شاخص‌های پوشش گیاهی و توسعه شهری نیز تفاوت‌های فضایی قابل توجهی را در ساختار شهری تهران نشان داد. مقدار میانگین NDVI برابر با ۰.۱۴۲ بود که بیانگر سطح محدود تا متوسط پوشش گیاهی در بخش زیادی از محدوده شهری است. با این حال، دامنه تغییرات NDVI از مقادیر منفی تا ۰.۸۳۵ نشان می‌دهد که برخی مناطق دارای پوشش گیاهی متراکم و برخی دیگر فاقد پوشش گیاهی قابل توجه هستند (شکل ۳). در مقابل، شاخص NDBI دارای میانگین ۰.۰۵۹ بود که نشان‌دهنده حضور گسترده سطوح ساخته‌شده در محدوده شهری است (شکل ۴). مقادیر بالای NDBI در برخی مناطق، بیانگر تمرکز توسعه شهری، افزایش سطوح نفوذناپذیر و در نتیجه افزایش پتانسیل تولید رواناب سطحی است.



شکل۳. نقشه توزیع مکانی NDVI توزیع مکانی شاخص‌های محیطی شامل NDVI

juep.net



شکل ۴. نقشه توزیع مکانی NDBIدر محدوده شهر تهران

برای توصیف داده‌های بارشی، آمار رستر بارش سالانه و رستر حداکثر بارش روزانه ارائه شد (جدول ۳). میانگین پیکسل‌های معتبر بارش سالانه حدود ۴۵۶ میلی‌متر بود. میانگین مکانی رستر حداکثر بارش روزانه حدود ۴۰ میلی‌متر و بیشینه آن حدود ۱۰۷ میلی‌متر به دست آمد. این آمار توصیفی باید از بارش ورودی مدل تفکیک شود؛ محاسبات رواناب بر اساس سناریوی بارش تعریف‌شده در روش‌شناسی انجام شدند، نه مجموع بارش سالانه.

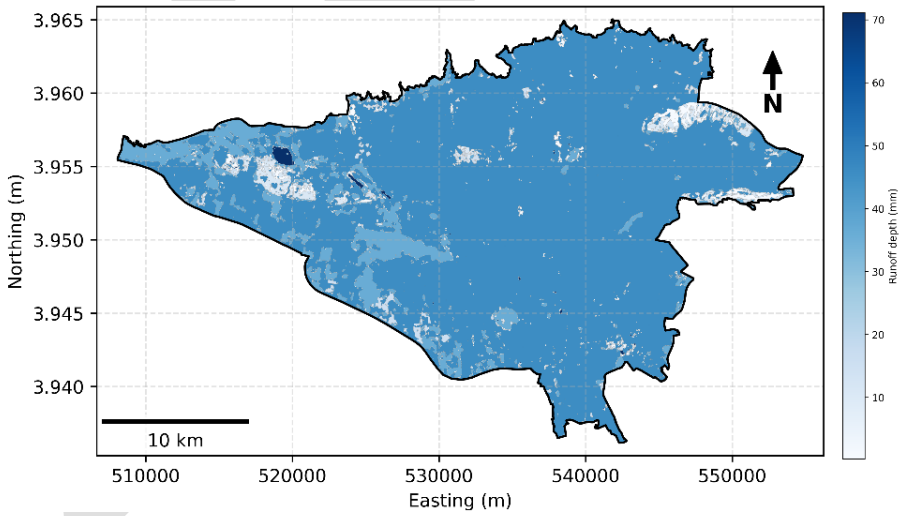
نتایج مدل‌سازی رواناب نشان داد که زیرساخت سبز موجود در شهر تهران دارای ظرفیت قابل توجهی برای کاهش جریان‌های سطحی و ارائه خدمت تنظیم رواناب است. بر اساس محاسبات انجام‌شده، مساحت تحت پوشش داده معتبر شاخص زیرساخت سبز برابر با ۶۳۰۲۴.۹۶ هکتار بوده و مساحت طبقه‌بندی‌شده به عنوان زیرساخت سبز برابر با ۲۷۳۵۶۲ هکتار محاسبه شد. مقدار رواناب تولیدشده در شرایط موجود برابر با ۲.۶۵۹۰۳×۱۰^{۷} مترمکعب به دست آمد که نشان‌دهنده حجم قابل توجه جریان سطحی در یک محیط شهری متراکم است. در مقابل، عملکرد زیرساخت سبز باعث تنظیم ۱.۴۷۱۲۲۹×۱۰^{۶} مترمکعب از رواناب تولیدی شد. لازم به ذکر است که این مقادیر بیانگر نتایج محاسبات تحت مفروضات بارش، تخصیص شماره منحنی و سناریوی تعریف‌شده هستند و مقادیر اندازه‌گیری‌شده رواناب محسوب نمی‌شوند.

جدول۴. نتایج کمی عملکرد زیرساخت سبز در تنظیم رواناب شهری

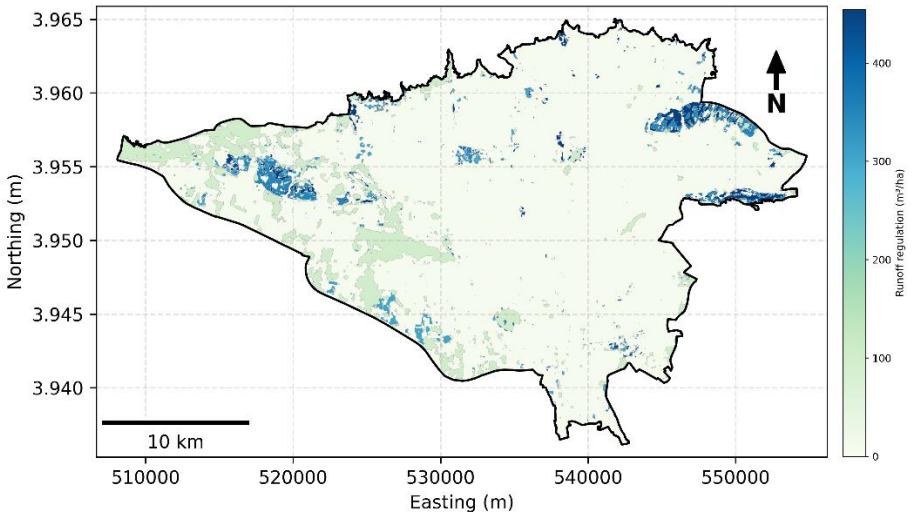
ردیف	شاخص	مقدار
۱	مساحت تحت پوشش داده معتبر شاخص زیرساخت سبز (هکتار)	۶۳،۱۶۸،۱۸

۲	مساحت زیرساخت سبز بر اساس آستانه<GII ۰٫۵ (هکتار)	۲٬۷۳۵٫۶۲
۳	سهم زیرساخت سبز از مساحت معتبر نقشه، بر اساس آستانه<GII ۰٫۵ (درصد)	۴٫۳۳
۴	میانگین شاخص زیرساخت سبز(GII)	۰٫۲۷۱
۵	میانگین شاخص پوشش گیاهی(NDVI)	۰٫۱۴۲
۶	میانگین شاخص ساخت‌وساز(NDBI)	۰٫۰۵۹
۷	بیشینه مکانی رستر حداکثر بارش روزانه (میلی‌متر)	۱۰۷
۸	حداکثر عمق رواناب برآوردشده (میلی‌متر)	۷۱٫۰۸۶
۹	حجم رواناب فعلی برآوردشده (مترمکعب)	۲۶٬۵۹۰٬۰۳۴
۱۰	حجم خدمت تنظیم رواناب برآوردشده (مترمکعب)	۱٬۴۷۱٬۲۲۹

تحلیل فضایی خروجی مدل نشان داد که توزیع خدمت تنظیم رواناب در سطح شهر تهران یکنواخت نیست و مناطق دارای ظرفیت بالاتر زیرساخت سبز، بیشترین میزان کاهش رواناب را ارائه می‌کنند. مقایسه نقشه GII با نقشه خدمت تنظیم رواناب نشان داد که مناطق دارای مقادیر بالاتر شاخص زیرساخت سبز، توانایی بیشتری در کنترل رواناب دارند. همچنین مناطق دارای NDVI بالاتر و NDBIپایین‌تر، به عنوان نقاط دارای عملکرد بهتر اکولوژیکی شناسایی شدند. در مقابل، مناطق متراکم شهری با سطوح نفوذناپذیر بیشتر، مقادیر بالاتری از رواناب سطحی را تولید کردند. این الگوی فضایی در شکل ۵ و شکل ۶ نشان داده شده است.

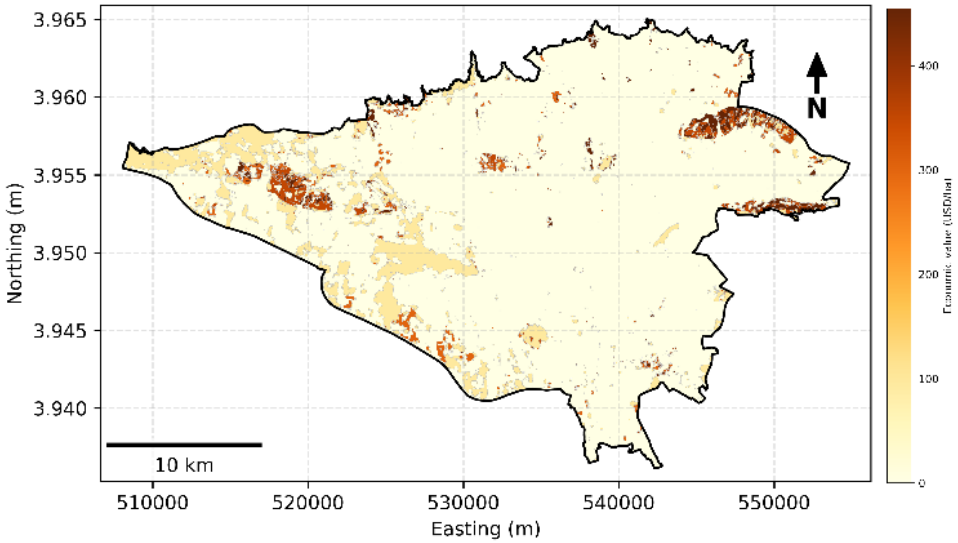


شکل ۵. توزیع مکانی عمق رواناب سطحی در شهر تهران



شکل ۶. توزیع مکانی خدمت تنظیم رواناب ناشی از زیرساخت سبز شهری.

با اعمال ضریب انتقال‌یافته هزینه جایگزینی برابر با ۱،۵۹ دلار بر مترمکعب بر حجم خدمت تنظیم رواناب، معادل پولی سناریویی برابر با ۲،۳۳۹،۲۵۴ دلار، معادل حدود ۲،۳۴ میلیون دلار، محاسبه شد. این برآورد به حجم مدل‌شده و ضریب اقتصادی منتخب وابسته است و بیانگر صرفه‌جویی مالی مشاهده‌شده یا هزینه واقعی مدیریت رواناب در تهران نیست. نتیجه صرفاً یک برآورد انتقالی برای سناریوی بارش مورد بررسی است و به‌عنوان ارزش سالانه یا خسارت سیلاب اجتناب‌شده تفسیر نمی‌شود. این مقدار نشان می‌دهد که زیرساخت سبز شهری علاوه بر مزایای محیط زیستی، دارای ارزش اقتصادی قابل توجهی در کاهش هزینه‌های مدیریت رواناب شهری است. نتایج حاصل تأکید می‌کند که توسعه و حفاظت از زیرساخت سبز می‌تواند به عنوان یک راهبرد اقتصادی-اکولوژیکی برای مدیریت پایدار آب‌های سطحی مورد استفاده قرار گیرد. نقشه توزیع فضایی ارزش اقتصادی خدمت تنظیم رواناب در شکل ۷ ارائه شده است.



شکل ۷. توزیع فضایی ارزش اقتصادی خدمت تنظیم رواناب در شهر تهران

۵.بحث وتفسیر یافته‌ها

نتایج این پژوهش نشـان داد که زیرسـاخت سـبز موجود در شـهر تهران دارای توزیع فضـایی ناهمگن بوده و ظرفیت ارائه خدمات اکوسـیسـتمی در بخش‌های مختلف شـهر یکسـان نیسـت. مقدار میانگین شـاخص زیرسـاخت سـبز برابر با ۰.۲۷۱ به دسـت آمد که نشـان‌دهنده وجود ظرفیت متوسـط زیرسـاخت سـبز در مقیاس کل شـهر اسـت، اما دامنه تغییرات این شـاخص (۰.۰۹۴ تا ۰.۸۹۸) بیانگر تفاوت قابل توجه میان مناطق شـهری از نظر توان اکولوژیکی اسـت. این یافته با نتایج مطالعات پیشـین که بر اهمیت توزیع فضـایی و اتصـال عناصـر سـبز در عملکرد واقعی زیرسـاخت سـبز تأکید کرده‌اند، همخوانی دارد (Benedict & McMahon, 2006; Tian et al., 2021). در واقع، صـرف وجود فضـای سـبز نمی‌تواند تضـمین‌کننده عملکرد هیدرولوژیکی باشـد، بلکه ویژگی‌هایی مانند پیوسـتگی، موقعیت مکانی، نوع پوشـش زمین و ارتباط آن با مناطق دارای تولید رواناب بالا، تعیین‌کننده میزان خدمات ارائه‌شده هستند.

بررسـی شـاخص‌های سـنجش از دور نیز این الگو را تأیید کرد. مقدار میانگین NDVI برابر با ۰.۱۴۲ نشـان داد که پوشـش گیاهی متراکم در بخش محدودی از شهر متمرکز است، در حالی که میانگین NDBI برابر با ۰.۰۵۹ بیانگر غلبه نسبی سطوح ساخته‌شده در ساختار شهری تهران است. این رابطه معکوس میان پوشش گیاهی و توسعه کالبدی در بسیاری از مطالعات شهری گزارش شده است؛ به‌گونه‌ای که افزایش تراکم ساختمانی معمولاً با کاهش نفوذپذیری سطح، کاهش پوشش گیاهی و افزایش خطر رواناب همراه است(Dietz, 2007; Donofrio *et al.*, 2009; Saeedi and Darabi, 2019) . بنابراین، نتایج حاضر نشـان می‌دهد که الگوی توسعه شهری تهران موجب ایجاد نواحی با ظرفیت پایین‌تر تنظیم طبیعی آب شده است. از دیدگاه برنامه‌ریزی شهری، این یافته اهمیت حرکت از رویکرد افزایش صرف مساحت فضای سبز به سمت برنامه‌ریزی عملکردمحور زیرساخت سبز را نشان می‌دهد. در بسیاری از شهرها، فضاهای سبز کوچک و پراکنده ممکن است از نظر مساحت قابل توجه باشند، اما به دلیل قرارگیری نامناسب یا عدم اتصـال عملکردی، تأثیر محدودی بر فرآیندهای هیدرولوژیکی داشـته باشـند (Dvornikov et al., 2025; Saeedi, 2025). اسـتفاده از شـاخص ترکیبی GII در پژوهش حاضـر امکان شـناسـایی مناطقی را فراهم کرد که نه‌تنها دارای پوشـش سـبز هسـتند، بلکه ظرفیت بیشـتری برای ارائه خدمات تنظیمی دارند. این رویکرد می‌تواند در اولویت‌بندی مداخلات آینده مانند توسـعه پارک‌های خطی، افزایش سطوح نفوذپذیر و ایجاد شبکه‌های سبز شهری مورد استفاده قرار گیرد.

یکی از مهم‌ترین یافته‌های این پژوهش، کمی‌سـازی نقش زیرسـاخت سـبز موجود تهران در کاهش رواناب شـهری بود. نتایج مدل‌سازی نشان داد که در شرایط بارش مورد بررسی، حجم رواناب تولیدشده در شهر تهران حدود ۲۶.۵۹ میلیون مترمکعب است، در حالی که زیرساخت سبز موجود توانسته است حدود ۱.۴۷میلیون مترمکعب از این حجم را تنظیم کند. این مقدار نشان می‌دهد که حتی زیرساخت سبز موجود، بدون توسعه اضافی، دارای عملکرد هیدرولوژیکی قابل اندازه‌گیری است. مطالعات مشابه نیز نشان داده‌اند که عناصـر سـبز شـهری می‌توانند از طریق افزایش ذخیره موقت آب، افزایش نفوذ و کاهش سـرعت جریان، نقش مؤثری در کاهش رواناب ایفا کنند (Donofrio *et al.*, 2009; Pour *et al.*, 2020; dos Santos, Barbassa and Vasconcelos, 2021). اهمیت این یافته برای تهران به دلیل شـرایط اقلیمی خاص این شـهر بیشـتر اسـت. تهران در منطقه‌ای با بارش متوسـط سالانه محدود اما با رخدادهای بارشی کوتاه‌مدت و شدید قرار دارد. بنابراین مشکل اصلی تنها مقدار سالانه بارش نیست، بلکه پاسخ سریع حوزه شهری به بارش‌های شدید است. در چنین شرایطی، زیرساخت سبز می‌تواند به عنوان یک سیستم تعدیل‌کننده طبیعی عمل کرده و زمان تمرکز رواناب را افزایش دهد. این موضـوع با مطالعات جدید درباره راهکارهای مبتنی بر طبیعت در شـهرهای خشک و نیمه‌خشک که بر نقش این سیستم‌ها در افزایش تاب‌آوری آبی تأکید دارند، مطابقت دارد (Lizárraga-Mendiola et al., 2017; Saeedi & Goodarzi, 2020; Van Mechelen et al., 2015). از طرف دیگر، مقایسه فضایی نقشه رواناب

و نقشه خدمت تنظیم رواناب نشان داد که بیشترین ظرفیت کاهش رواناب در مناطقی مشاهده می‌شود که دارای ترکیب مناسبی از پوشش گیاهی، سطوح نفوذپذیر و شاخص GII بالاتر هستند. در مقابل، مناطق دارای تراکم ساختمانی بالا و NDBI بیشتر، بیشترین تولید رواناب را نشان دادند. این خود تایید کننده اهمیت استفاده از تحلیل‌های مکانی در مدیریت رواناب شهری است. چراکه یک راهبرد یکسان برای تمام مناطق شهر نمی‌تواند کارایی مطلوب داشته باشد. به عبارت دیگر، برنامه‌ریزی زیرساخت سبز باید بر اساس نیاز هیدرولوژیکی و ظرفیت اکولوژیکی هر منطقه انجام شود.

یکی از جنبه‌های مهم این پژوهش، تبدیل عملکرد هیدرولوژیکی زیرساخت سبز به یک شاخص اقتصادی قابل درک برای تصمیم‌گیران شهری بود. نتایج نشان داد که خدمت تنظیم رواناب ارائه‌شده توسط زیرساخت سبز موجود تهران دارای ارزش اقتصادی حدود ۲.۳۴ میلیون دلار است. این مقدار نشان می‌دهد که فضاهای سبز شهری علاوه بر ارزش‌های محیط زیستی و اجتماعی، دارای منافع اقتصادی مستقیم نیز هستند. مطالعات اخیر در حوزه ارزش‌گذاری خدمات اکوسیستمی ن۴یز تأکید کرده‌اند که در نظر گرفتن ارزش اقتصادی طبیعت شهری می‌تواند موجب تغییر نگاه مدیریت شهری از هزینه نگهداری فضای سبز به سرمایه‌گذاری در زیرساخت طبیعی شود(Kuller et al., 2017; Sarkar et al., 2018) . لازم به ذکر است که ارزش اقتصادی به‌دست‌آمده در این پژوهش تنها بخشی از منافع واقعی زیرساخت سبز را نشان می‌دهد، زیرا این مطالعه صرفاً خدمت تنظیم رواناب را مورد ارزیابی قرار داده است. در حالی که زیرساخت سبز شهری خدمات دیگری مانند کاهش دمای سطح زمین، بهبود کیفیت هوا، افزایش تنوع زیستی و ارتقای سلامت روانی شهروندان را نیز فراهم می‌کند. بنابراین، ارزش واقعی زیرساخت سبز تهران احتمالاً بیش از مقدار محاسبه‌شده در این پژوهش است. این موضوع اهمیت انجام مطالعات چندخدمتی در آینده را نشان می‌دهد که بتوانند مجموعه کامل خدمات اکوسیستمی شهر را ارزیابی کنند.

کاهش حجم رواناب در مطالعه حاضر، نسبت به سناریوی مرجع بدون زیرساخت سبز، حدود ۵٫۲۴ درصد برآورد شد. برای مقایسه، مطالعه ای در شهر وهان چین در سال ۲۰۲۴، کاهش حجم رواناب را برای رخدادهای با دوره بازگشت ۱، ۵ و ۱۰ سال به‌ترتیب ۲۴٫۸۵، ۵٫۲۳ و ۵٫۵۰ درصد گزارش کرده است(Lin et al., 2024). مقدار مطالعه حاضر از نظر عددی به دو سناریوی اخیر نزدیک است، اما این نزدیکی به معنای یکسان‌بودن عملکرد یا اعتبارسنجی مدل نیست زیرا بارش، مقیاس مطالعه، نوع مداخلات و تعریف سناریوی مرجع متفاوت‌اند. همچنین ژیائو و همکاران (۲۰۰۷) در مقیاس قطعات مسکونی لس‌آنجلس، برای تبدیل چمن به حوضچه نگهداشت کاهش ۱۲ درصدی و برای مجموعه اقدامات کاهش ۹۷ درصدی رواناب گزارش کردند. تفاوت مقیاس مکانی و سالانه‌بودن ارزیابی اخیر، مقایسه مستقیم آن با سناریوی بارش این پژوهش را محدود می‌کند.

چارچوب معرفی شده در این تحقیق می‌تواند برای سایر شهرهای دارای شرایط مشابه نیز قابل استفاده باشد، زیرا نیازمند داده‌هایی است که در بسیاری از شهرها از طریق سنجش از دور و سامانه‌های اطلاعات جغرافیایی قابل دسترس هستند. همچنین نتایج نشان می‌دهد که تصمیم‌گیری درباره توسعه زیرساخت سبز نباید صرفاً بر افزایش تعداد یا مساحت فضاهای سبز متمرکز باشد، بلکه باید بر مکان‌یابی بهینه و افزایش عملکرد اکولوژیکی این عناصر تأکید کند. در این زمینه، استفاده از شاخص‌های ترکیبی مانند GII می‌تواند ابزار مناسبی برای پشتیبانی از برنامه‌ریزی شهری مبتنی بر شواهد باشد.

نقشه‌های پژوهش می‌توانند برای غربالگری اولیه مکان‌های نیازمند بررسی تکمیلی استفاده شوند. برای شناسایی فرصت‌های توسعه زیرساخت سبز، پیشنهاد می‌شود پهنه‌های دارای رواناب مدل‌شده بیشتر، مقادیر پایین‌تر GII و غلبه سطوح ساخته‌شده، به‌صورت هم‌زمان بررسی شوند. در مقابل، پهنه‌های دارای مقادیر بالاتر GII و خدمت تنظیم رواناب مدل‌شده، نامزد بررسی برای حفاظت از پوشش موجود و جلوگیری از تبدیل آن هستند. این معیارها پیشنهادهایی برای ارزیابی مکانی بعدی‌اند و در پژوهش حاضر به نقشه اولویت‌بندی تلفیقی تبدیل نشده‌اند.

در مرحله اجرایی، انتخاب محل و نوع مداخله باید با اطلاعات شیب، نفوذپذیری خاک، عمق آب زیرزمینی، مسیر جریان، شبکه زهکشی، سابقه آب‌گرفتگی، مالکیت و تأسیسات زیرزمینی تکمیل شود. در حاشیه خیابان‌ها و پارکینگ‌های دارای فضای کافی، امکان احداث باغچه بارانی و نوار گیاهی بررسی شود؛ در فضاهای باز عمومی و پارک‌ها، امکان نگهداشت موقت و تخلیه کنترل‌شده رواناب ارزیابی گردد؛ و در قطعات متراکم، ظرفیت جمع‌آوری آب بام‌ها و اجرای بام سبز با بررسی سازه‌ای سنجیده شود. انتخاب راهکارهای نفوذی نیز باید به تأیید شرایط خاک و ملاحظات آلودگی وابسته باشد.

نتایج پژوهش تحت تأثیر عدم‌قطعیت داده‌های ورودی، ساختار مدل و مفروضات اقتصادی قرار دارند. در بخش داده‌های ورودی، خطای تشخیص کلاس‌های پوشش زمین و تغییرات زمانی پوشش گیاهی می‌تواند بر شاخص زیرساخت سبز و تخصیص شماره منحنی اثر بگذارد. افزون بر این، در ترکیب زمانی نقشه پوشش زمین از میانه کدهای اسمی استفاده شده که در فایل خروجی مقادیر غیرصحیح ایجاد کرده است؛ بنابراین، این لایه با یک محدودیت پردازشی مشخص مواجه است و تخصیص کلاس‌ها و پارامترهای وابسته به آن نیازمند بازبینی است. تفکیک مکانی درشت بارش CHIRPS و اعمال بارش یکنواخت در محاسبات Pythonنیز ناهمگنی بارش درون‌شهری را بازنمایی نمی‌کند. اندازه پیکسل کوچک‌تر در خروجی، این محدودیت اطلاعاتی را برطرف نمی‌سازد. همچنین، تفاوت محدوده پیکسل‌های معتبر میان لایه‌ها بر قابلیت مقایسه مستقیم مساحت‌ها و آمار اثر می‌گذارد.

در بخش هیدرولوژیکی، نتایج به مقادیر شماره منحنی، فرض تلفات اولیه و تعریف سناریوی مرجع وابسته‌اند. در پیاده‌سازی Pythonبررسی‌شده، شماره منحنی به‌صورت ثابت برای کلاس‌های پوشش زمین تخصیص یافته و تفکیک مکانی گروه هیدرولوژیکی خاک و تعدیل شرایط رطوبت پیشین اعمال نشده است. همچنین، مسیریابی جریان، عملکرد شبکه زهکشی و ورود رواناب از خارج محدوده در محاسبات منظور نشده‌اند؛ ازاین‌رو، خروجی‌ها بیانگر تولید رواناب در محدوده محاسباتی هستند و برای تعیین محل، عمق یا خسارت آب‌گرفتگی کفایت نمی‌کنند. وزن‌ها و آستانه‌های شاخص زیرساخت سبز و معیار انتخاب پیکسل‌های سناریو نیز بر نتایج اثرگذارند. در نبود اعتبارسنجی مشاهداتی و تحلیل جامع عدم‌قطعیت، حجم‌های گزارش‌شده باید برآوردهای مشروط مدل تلقی شوند.

در بخش اقتصادی، انتقال ضریب هزینه جایگزینی ۱٫۵۹ دلار بر مترمکعب از مطالعه خارجی، بدون تعدیل زمانی و مکانی، عدم‌قطعیت دیگری ایجاد می‌کند. تفاوت هزینه‌های ساخت، بهره‌برداری و الزامات مدیریت رولناب میان منطقه مرجع و تهران، تعمیم مستقیم این ضریب را محدود می‌سازد. همچنین، استفاده از آن برای حجم حاصل از سناریوی بارش این مطالعه، یک تقریب سناریویی است. مبلغ حاصل با ضریب هزینه رابطه خطی دارد؛ بنابراین، هر درصد تغییر در ضریب، با ثابت‌بودن حجم، همان درصد تغییر در مبلغ برآوردشده ایجاد می‌کند. نتیجه اقتصادی، صرفه‌جویی مالی تحقق‌یافته یا هزینه جاری تأییدشده تهران نیست.

۶.نتیجه‌گیری

این پژوهش با هدف ارزیابی کمی نقش زیرساخت سبز موجود شهر تهران در تنظیم رواناب شهری و ارزش‌گذاری اقتصادی این خدمت اکوسیستمی انجام شد. برای دستیابی به این هدف، یک چارچوب یکپارچه مبتنی بر داده‌های سنجش‌ازدور، تحلیل‌های مکانیGIS ، شاخص ترکیبی زیرساخت سبز، مدل هیدرولوژیکی SCS-CN و ارزش‌گذاری اقتصادی توسعه داده شد. نتایج نشان داد که زیرساخت سبز شهری تهران دارای توزیع فضایی نامتوازن بوده و ظرفیت ارائه خدمات اکوسیستمی در مناطق مختلف شهر تفاوت قابل توجهی دارد. مقدار میانگین GII برابر با ۰.۲۷۱ نشان داد که اگرچه تهران دارای شبکه‌ای از عناصر سبز شهری است، اما پراکنش و عملکرد این عناصر در سطح شهر یکنواخت نیست. تحلیل شاخص‌های سنجش‌ازدور نشان داد که مناطق دارای

پوشش گیاهی بیشتر و مقادیر بالاترNDVI ، معمولاً دارای ظرفیت بالاتر برای تنظیم فرآیندهای هیدرولوژیکی هستند، در حالی که مناطق با مقادیر بالاتر NDBI و تراکم ساخت‌وساز بیشتر، پتانسیل بالاتری برای تولید رواناب دارند. این یافته نشان می‌دهد که توسعه شهری بدون توجه به حفظ عناصر طبیعی و سطوح نفوذپذیر، موجب کاهش ظرفیت خودتنظیمی هیدرولوژیکی شهر می‌شود.

نتایج مدل‌سازی رواناب نشان داد که حجم رواناب تولیدشده در شرایط موجود تهران حدود ۲۶.۵۹ میلیون مترمکعب است. در مقابل، زیرساخت سبز موجود توانسته است حدود ۱.۴۷ میلیون مترمکعب از این حجم را تنظیم کند. این مقدار بیانگر نقش قابل توجه عناصر سبز شهری در کاهش فشار وارد بر سیستم‌های زهکشی شهری و مدیریت پایدار آب‌های سطحی است. همچنین ارزش‌گذاری اقتصادی نشان داد که این خدمت اکوسیستمی دارای ارزش مالی قابل اندازه‌گیری بوده و ارزش اقتصادی تنظیم رواناب توسط زیرساخت سبز موجود حدود ۲،۳۴ میلیون دلار برآورد شد.

بر اساس یافته‌های این پژوهش، برنامه‌ریزی آینده شهر تهران باید از رویکرد صرفاً توسعه فضای سبز به سمت طراحی شبکه‌های عملکردی زیرساخت سبز حرکت کند. اولویت‌بندی مناطق بر اساس ترکیب شاخص‌های اکولوژیکی، پتانسیل تولید رواناب و ارزش خدمات اکوسیستمی می‌تواند موجب افزایش اثربخشی سرمایه‌گذاری‌های شهری شود. همچنین نتایج نشان می‌دهد که زیرساخت سبز باید به عنوان یک سرمایه طبیعی شهری در کنار زیرساخت‌های خاکستری مدیریت آب مورد توجه قرار گیرد. در نهایت، چارچوب ارائه‌شده در این پژوهش می‌تواند به عنوان یک ابزار تصمیم‌گیری برای ارزیابی عملکرد زیرساخت سبز در سایر کلان‌شهرهای دارای شرایط اقلیمی مشابه مورد استفاده قرار گیرد. مطالعات آینده می‌توانند با توسعه سناریوهای تغییر اقلیم، ارزیابی چندخدمتی اکوسیستم و استفاده از مدل‌های هیدرولوژیکی پویا، تصویر جامع‌تری از نقش زیرساخت سبز در افزایش تاب‌آوری شهری ارائه دهند.

مشارکت نویسندگان

نویسنده اصلی ۱۰۰ درصد

تشکر و قدردانی

نویسنده از دانشگاه ملایر به خاطر حمایت‌های علمی و فراهم کردن فرصت و چارچوب لازم برای انجام این تحقیق، کمال تشکر و قدردانی را دارند.

تعارض منافع

این مقاله تعارض منافع ندارد.

References

Aghili Mahabadi, N., Zarif Sanayei, H. R., & Hatefi, S. M. (2022). Prioritization of low-impact development methods for management of urban surface runoff, using the fuzzy TOPSIS and TOPSIS method (case study: Sepahan-Shahr town, Isfahan). *Amirkabir Journal of Civil Engineering, 53*(11). https://doi.org/10.22060/ceej.2020.18619.6909 [In Persian]

Amani-Beni, M., Zhang, B., Xie, G.-D., & Shi, Y. (2019). Impacts of urban green landscape patterns on land surface temperature: Evidence from the adjacent area of Olympic Forest Park of Beijing, China. *Sustainability, 11*(2), 513. https://doi.org/10.3390/su11020513

Benedict, M. A., & McMahon, E. T. (2006). *Green infrastructure: Linking landscapes and communities*. Washington, DC: Island Press. https://doi.org/10.2307/jj.41379772

Choi, C., Berry, P., & Smith, A. (2021). The climate benefits, co-benefits, and trade-offs of green infrastructure: A systematic literature review. *Journal of Environmental Management, 291*, 112583. https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2021.112583

Dietz, M. E. (2007). Low impact development practices: A review of current research and recommendations for future directions. *Water, Air, and Soil Pollution, 186*(1–4), 351–363. https://doi.org/10.1007/s11270-007-9484-z

Di Palma, M., Rigillo, M., & Leone, M. F. (2024). Remote sensing technologies for mapping ecosystem services: An analytical approach for urban green infrastructure. *Sustainability, 16*(14), 6220. https://doi.org/10.3390/su16146220

Donofrio, J., Kuhn, Y., McWalter, K., & Winsor, M. (2009). Water-sensitive urban design: An emerging model in sustainable design and comprehensive water-cycle management. *Environmental Practice, 11*(3), 179–189. https://doi.org/10.1017/S1466046609990263

dos Santos, M. F. N., Barbassa, A. P., & Vasconcelos, A. F. (2021). Low impact development strategies for a low-income settlement: Balancing flood protection and life cycle costs in Brazil. *Sustainable Cities and Society, 65*, 102650. https://doi.org/10.1016/j.scs.2020.102650

Dvornikov, Y., Grigorieva, V., Vasenev, V., Varentsov, M., Romzaykina, O., Maximova, O., Konstantinova, A., Matasov, V., & Kozlova, E. (2025). Urban green infrastructure index: Assessing supply of regulating and cultural ecosystem services at a megacity scale. *Ecological Indicators, 170*, 113014. https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2024.113014

Fang, X., Li, J., Ma, Q., Zhou, R., & Du, S. (2024). A quantitative review of nature-based solutions for urban sustainability (2016–2022): From science to implementation. *Science of the Total Environment, 927*, 172219. https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2024.172219

Hou, J., Zhu, M., Wang, Y., & Sun, S. (2020). Optimal spatial priority scheme of urban LID-BMPs under different investment periods. *Landscape and Urban Planning, 202*, 103858. https://doi.org/10.1016/j.landurbplan.2020.103858

Jia, H., Yao, H., Tang, Y., Yu, S. L., Field, R., & Tafuri, A. N. (2015). LID-BMPs planning for urban runoff control and the case study in China. *Journal of Environmental Management, 149*, 65–76. https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2014.10.003

Khalili, S., Kumar, P., & Jones, L. (2024). Evaluating the benefits of urban green infrastructure: Methods, indicators, and gaps. *Heliyon, 10*(19), e38446. https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2024.e38446

Kuller, M., Bach, P. M., Ramirez-Lovering, D., & Deletic, A. (2017). Framing water sensitive urban design as part of the urban form: A critical review of tools for best planning practice. *Environmental Modelling & Software, 96*, 265–282. https://doi.org/10.1016/j.envsoft.2017.07.003

Lin, Y., Liang, X., Xu, J., Song, Z., Lou, Y., & Yu, Y. (2024). Evaluation of the urban sponge stormwater regulation effectiveness based on SWMM: A case study of Wuhan, China. *Frontiers in Water, 6*, 1406520. https://doi.org/10.3389/frwa.2024.1406520

Liu, Y., Engel, B. A., Flanagan, D. C., Gitau, M. W., McMillan, S. K., & Chaubey, I. (2017). A review on effectiveness of best management practices in improving hydrology and water quality: Needs and opportunities. *Science of the Total Environment, 601–602*, 580–593. https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2017.05.212

Lizárraga-Mendiola, L., Vázquez-Rodríguez, G. A., Lucho-Constantino, C. A., Bigurra-Alzati, C. A., Beltrán-Hernández, R. I., Ortiz-Hernández, J. E., & López-León, L. D. (2017). Hydrological design of two low-impact development techniques in a semi-arid climate zone of central Mexico. *Water, 9*(8), 561. https://doi.org/10.3390/w9080561

Mishra, S. K., & Singh, V. P. (1999). Another look at SCS-CN method. *Journal of Hydrologic Engineering, 4*(3), 257–264. https://doi.org/10.1061/(ASCE)1084-0699(1999)4:3(257)

Pour, S. H., Abd Wahab, A. K., Shahid, S., Asaduzzaman, M., & Dewan, A. (2020). Low impact development techniques to mitigate the impacts of climate-change-induced urban floods: Current trends, issues and challenges. *Sustainable Cities and Society, 62*, 102373. https://doi.org/10.1016/j.scs.2020.102373

Saeedi, I. (2025). The structural limits of cooling: Fragmentation and shape inefficiency constrain green infrastructure in an arid urban heat island. *Desert, 30*(2), 417–430. https://doi.org/10.22059/jdesert.2025.106187

Saeedi, I., & Darabi, H. (2019). Ecological landscape design in semi-arid areas on basis of water sensitive urban design approach (case study: Mohajeran city). *Journal of Environmental Studies, 44*(4), 689–701. https://www.magiran.com/paper/1976871 [In Persian]

Saeedi, I., & Goodarzi, M. (2020). Rainwater harvesting system: A sustainable method for landscape development in semiarid regions, the case of Malayer University campus in Iran. *Environment, Development and Sustainability, 22*(2), 1579–1598. https://doi.org/10.1007/s10668-018-0218-8

Saeedi, I., Hoveyzavi, A., & Darabi, H. (2025). Adaptive planting design against climate change around the Karun River in Ahvaz: A systematic approach for green infrastructure development.

Journal of Arid Biome, 14(2), 109–133. https://doi.org/10.29252/aridbiom.2025.21741.2016 [In Persian]

Saeedi, I., Mikaeili Tabrizi, A. R., Behremand, A. R., & Salman Mahini, A. R. (2022). Multi-criteria prioritization of green infrastructure practices and their combinations to control runoff in Tehran metropolitan. *Journal of Environmental Studies, 48*(1), 80–100. https://doi.org/10.22059/JES.2022.335865.1008264 [In Persian]

Saeedi, I., et al. (2022). *Green infrastructure development in urban areas for runoff control (case study: District 5, Tehran)*. Gorgan University of Agricultural Sciences and Natural Resources.

Sarkar, C., Webster, C., & Gallacher, J. (2018). Residential greenness and prevalence of major depressive disorders: A cross-sectional, observational, associational study of 94,879 adult UK Biobank participants. *The Lancet Planetary Health, 2*(4), e162–e173. https://doi.org/10.1016/S2542-5196(18)30051-2

Shokri Biarargh, R., & Nematimehr, M. (2019). Sustainable management of urban water resources through water sensitive urban design (WSUD) in Iran (case study: Rasht city). *Environmental Sciences, 17*(1), 1–24. https://doi.org/10.29252/envs.17.1.1 [In Persian]

Simpson, J. R., & McPherson, E. G. (2007). *San Francisco Bay Area state of the urban forest: Final report*. Center for Urban Forest Research, USDA Forest Service, Pacific Southwest Research Station. https://www.fs.usda.gov/psw/topics/urban_forestry/products/2/psw_cufr719_SFBay.pdf

Soulis, K. X., & Valiantzas, J. D. (2012). SCS-CN parameter determination using rainfall-runoff data in heterogeneous watersheds – the two-CN system approach. *Hydrology and Earth System Sciences, 16*(3), 1001–1015. https://doi.org/10.5194/hess-16-1001-2012

Summers, J. K., & Vivian, D. N. (2018). Ecotherapy – A forgotten ecosystem service: A review. *Frontiers in Psychology, 9*, 1389. https://doi.org/10.3389/fpsyg.2018.01389

Tian, P., Li, J., Cao, L., Pu, R., Wang, Z., Zhang, H., Chen, H., & Gong, H. (2021). Assessing spatiotemporal characteristics of urban heat islands from the perspective of an urban expansion and green infrastructure. *Sustainable Cities and Society, 74*, 103208. https://doi.org/10.1016/j.scs.2021.103208

Van Mechelen, C., Dutoit, T., & Hermy, M. (2015). Adapting green roof irrigation practices for a sustainable future: A review. *Sustainable Cities and Society, 19*, 74–90. https://doi.org/10.1016/j.scs.2015.07.007

Xiao, Q., McPherson, E. G., Simpson, J. R., & Ustin, S. L. (2007). Hydrologic processes at the urban residential scale. *Hydrological Processes, 21*(16), 2174–2188. https://doi.org/10.1002/hyp.6482

Yalveh, N., Saeedi, I., & Shayesteh, K. (2025). Spatial prioritization of urban green infrastructure in semi-arid regions for runoff management (study area: Tehran city). *Journal of Arid Biome, 15*(2), 87–102. https://www.magiran.com/volume/252879 [In Persian]

Yao, Y., Zheng, H., Ouyang, Z., Gong, C., Zhang, J., Ying, L., & Wen, Z. (2025). Impact of urban green infrastructure on ecosystem services: A systematic review. *Ecological Indicators, 178*, 113885. https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2025.113885

Young, C. B., McEnroe, B. M., & Rome, A. C. (2009). Empirical determination of rational method runoff coefficients. *Journal of Hydrologic Engineering, 14*(12), 1283–1289. https://doi.org/10.1061/(ASCE)HE.1943-5584.0000114

Zubelzu, S., Rodríguez-Sinobas, L., Sordo-Ward, A., Pérez-Durán, A., & Cisneros-Almazán, R. (2020). Multi-objective approach for determining optimal sustainable urban drainage systems combination at city scale. The case of San Luis Potosí (México). *Water, 12*(3), 835. https://doi.org/10.3390/w12030835