

اولویت‌بندی فضایی زیرساخت سبز شهری در مناطق نیمه‌خشک برای مدیریت رواناب (محدوده مطالعاتی: شهر تهران)

۱- نادیا یلوه، دانش آموخته کارشناسی ارشد، گروه علوم و مهندسی محیط‌زیست، دانشکده منابع طبیعی و محیط زیست، دانشگاه ملایر، ملایر، ایران.

۲- ایمان سعیدی*، استادیار، گروه علوم و مهندسی محیط زیست، دانشکده منابع طبیعی و محیط‌زیست، دانشگاه ملایر، ملایر، ایران.

isaeedi@malayeru.ac.ir

۳- کامران شایسته، استادیار، گروه علوم و مهندسی محیط زیست، دانشکده منابع طبیعی و محیط‌زیست، دانشگاه ملایر، ملایر، ایران.

دریافت: ۱۴۰۵/۰۲/۰۳

پذیرش: ۱۴۰۵/۰۵/۰۳

چکیده

مدیریت رواناب شهری در مناطق نیمه‌خشک یکی از چالش‌های مهم برنامه‌ریزی شهری می‌باشد. این پژوهش با هدف ارائه چارچوبی علمی برای اولویت‌بندی فضایی توسعه زیرساخت‌های سبز شهری با تأکید بر مدیریت رواناب در کلان شهر تهران انجام شده است. روش تحقیق مبتنی بر تلفیق سامانه اطلاعات جغرافیایی و تصمیم‌گیری چندمعیاره مکانی با استفاده از فرآیند تحلیل سلسله مراتبی است. بدین منظور، نه معیار کلیدی شامل پتانسیل رواناب، شیب، تراکم جمعیت، بافت خاک، فاصله از فضای سبز، فاصله از رودخانه‌ها، فاصله از مراکز آموزشی، فاصله از مراکز درمانی و فاصله از راه‌های اصلی شناسایی، وزن دهی و در محیط سامانه اطلاعات جغرافیایی تلفیق شدند. تحلیل حساسیت مدل از طریق ایجاد ۱۸ سناریوی وزنی و محاسبه ضریب کاپا انجام گرفت. یافته‌ها نشان داد که سطوح نفوذپذیر بیش از ۸۰ درصد مساحت شهر را پوشش می‌دهند. پهنه‌های با اولویت بسیار بالا عمدتاً در مناطق مرکزی، جنوبی و غربی تهران (مناطق ۱۰، ۱۱، ۱۲، ۱۵، ۱۶، ۱۷ و ۲۰) متمرکز شده‌اند که با تراکم جمعیتی بالا، پتانسیل رواناب شدید و کمبود فضای سبز همراه است. در مقابل، مناطق شمالی شهر به دلیل پوشش گیاهی مطلوب و تراکم کمتر، اولویت پایین‌تری دارند. نتایج تحلیل حساسیت، پایداری بالای مدل (کاپا بزرگتر از ۰/۸۲) و حساسیت بالای معیارهای پتانسیل رواناب و تراکم جمعیت را تأیید کرد. این پژوهش نقشه‌ای عملیاتی و مبتنی بر شواهد را به‌عنوان ابزاری برای پشتیبانی از تصمیم‌گیری مدیران شهری در راستای تخصیص بهینه منابع و افزایش تاب‌آوری هیدرولوژیکی تهران ارائه می‌نماید.

واژگان کلیدی: زیرساخت سبز شهری، اولویت‌بندی مکانی، رواناب سطحی، تصمیم‌گیری چندمعیاره، تهران.

مقدمه

شهرنشینی شتابان به‌عنوان یکی از بارزترین پدیده‌های قرن بیست و یکم، الگوهای طبیعی چرخه آب را در سراسر جهان به‌شدت دگرگون ساخته است [۷]. جایگزینی سطوح نفوذپذیر با پوشش‌های مصالح ساختمانی، منجر به افزایش چشمگیر حجم رواناب سطحی، کاهش تغذیه آب‌های زیرزمینی و تشدید خطر وقوع سیلاب‌های شهری می‌گردد [۵]. این پیامدها در مناطق نیمه‌خشک که با محدودیت منابع آبی و بارش‌های سیل‌آسا روبرو هستند، بحرانی‌تر می‌شود [۱۰]. کلان‌شهر تهران با وسعت ۷۳۰

شهرنشینی شتابان به‌عنوان یکی از بارزترین پدیده‌های قرن بیست و یکم، الگوهای طبیعی چرخه آب را در سراسر جهان به‌شدت دگرگون ساخته است [۷]. جایگزینی سطوح نفوذپذیر با پوشش‌های مصالح ساختمانی، منجر به افزایش چشمگیر حجم رواناب

کیلومتر مربع و جمعیت بیش از ۸.۵ میلیون نفر، تجسم عینی این تعارض است. ساختار فیزیکی تهران متأثر از شیب عمومی شمال به جنوب و گسترش بی‌رویه کالبد شهری، آن را در معرض تهدید مستمر سیلاب قرار داده است. برآوردها نشان می‌دهد بیش از ۸۰ درصد از سطح شهر را سطوح نفوذناپذیر تشکیل می‌دهند که چرخه هیدرولوژیکی طبیعی را مختل کرده است [۲۵]. در پاسخ به این چالش‌های چندبعدی، پارادایم «زیرساخت سبز شهری» در دو دهه اخیر به‌عنوان یک راهبرد نوآورانه، پایدار و چندمنظوره در مدیریت شهری مطرح شده است [۲]. زیرساخت سبز را می‌توان شبکه‌ای از فضاهای طبیعی، نیمه‌طبیعی و طراحی‌شده تعریف کرد که طیف وسیعی از خدمات اکوسیستمی را ارائه می‌دهند. این خدمات شامل تنظیم کیفیت و کمیت آب (مدیریت رواناب)، تعدیل میکرواقلیم، بهبود کیفیت هوا، افزایش تنوع زیستی و ارتقای سلامت روانی شهروندان است [۱۶]. در حوزه مدیریت آب شهری، زیرساخت‌های سبز در قالب‌هایی همچون بام‌های سبز، باغچه‌های باران، کف‌سازی‌های نفوذپذیر و حوضچه‌های نگه‌داشت، با تقلید از فرآیندهای هیدرولوژیکی طبیعی، در مبدأ تولید رواناب اقدام به جذب، نفوذ، تبخیر و ذخیره آب می‌کنند [۲۴].

مطالعات متعدد اثربخشی این راهکارها را تأیید کرده‌اند. بام‌های سبز می‌توانند با توجه به عمق بستر و نوع پوشش گیاهی، بین ۴۰ تا ۸۰ درصد از حجم رواناب را در محل نگه‌داری و به تعویق بیندازند [۲۴]. کف‌سازی‌های نفوذپذیر مانند آسفالت متخلخل یا بلوک‌های چمنی، با امکان نفوذ مستقیم آب باران به لایه‌های زیرین، نقش مؤثری در تغذیه آبخوان‌ها و کاهش بار شبکه‌های زهکشی ایفا می‌کنند [۴]. باغچه‌های باران و ترانشه‌های نفوذی قادرند علاوه بر کاهش قابل توجه سرعت و حجم رواناب، آلاینده‌های معلق و فلزات سنگین را نیز تا حد زیادی جذب و تصفیه کنند [۳]. با وجود شناخت فزاینده از مزایای

زیرساخت‌های سبز، یکی از موانع اصلی در تحقق عملی این پروژه‌ها، چالش «مکان‌یابی بهینه» و «تخصیص منابع محدود» است [۱۷]. سرمایه‌گذاری در فضاهایی با اولویت پایین نه تنها بازدهی محیطی و اجتماعی مطلوبی ندارد، بلکه می‌تواند به اتلاف منابع مالی و کاهش اعتماد عمومی منجر شود. موفقیت این راهکارها به‌شدت وابسته به مکان‌یابی صحیح و طراحی مناسب آن‌ها با توجه به شرایط بیوفیزیکی و اجتماعی-اقتصادی محل است [۱۲]. از این رو، توسعه چارچوب‌های علمی و سیستماتیک برای شناسایی پهنه‌هایی که بیشترین نیاز را به مداخلات سبز دارند و بیشترین تأثیر را از دریافت این خدمات می‌پذیرند، به یک ضرورت غیرقابل انکار در برنامه‌ریزی شهری تبدیل شده است. در این زمینه، رویکرد «تصمیم‌گیری چندمعیاره مکانی» که در آن لایه‌های اطلاعاتی متنوع با در نظر گرفتن اهمیت نسبی هر یک (وزن‌دهی) تلفیق می‌شوند، به یک ابزار قدرتمند در پشتیبانی از فرآیندهای برنامه‌ریزی تبدیل شده است [۱۵]. در میان روش‌های مختلف تصمیم‌گیری چندمعیاره، «فرآیند تحلیل سلسله مراتبی» به‌دلیل ساختار سلسله مراتبی، قابلیت در نظر گرفتن معیارهای کیفی و کمی و امکان بررسی سازگاری قضاوت‌ها، به‌طور گسترده‌ای در مطالعات مکانی‌یابی زیرساخت‌های سبز مورد استفاده قرار گرفته است [۲۱]. مرور ادبیات پژوهش نشان می‌دهد که مطالعات متعددی در سطح بین‌المللی و ملی به اولویت‌بندی یا مکانی‌یابی فضاهای سبز و زیرساخت‌های مرتبط پرداخته‌اند. در سطح بین‌المللی، لی و همکاران با استفاده از فرآیند تحلیل سلسله مراتبی و سامانه اطلاعات جغرافیایی به اولویت‌بندی مکان‌های توسعه زیرساخت سبز در یک شهر نیمه‌خشک چین پرداختند [۱۳]. میلر و همکاران در سانتیاگو شیلی با تلفیق مدل هیدرولوژیکی و تحلیل شبکه‌های اکولوژیکی، مناطق بحرانی برای مدیریت آب باران را شناسایی نمودند [۱۸]. یاناموتو و همکاران در شهر

آدلاید استرالیا، با ترکیب فرآیند تحلیل سلسله مراتبی فازی و مدل‌سازی هیدرولوژیکی، به ارزیابی سناریوهای مختلف مدیریت آب باران پرداختند [۲۶]. در ایران نیز پژوهش‌های ارزشمندی انجام شده است. سعیدی و همکاران به ارزیابی و اولویت‌بندی انواع مختلف زیرساخت‌های سبز برای کنترل رواناب در تهران پرداختند [۲۲]. جمالی و همکاران چارچوبی برای شناسایی مکان‌های اولویت‌دار توسعه در شهرهای نیمه‌خشک ارائه کردند [۸]. خدابخشی و همکاران در مشهد با استفاده از فرآیند تحلیل سلسله مراتبی، پهنه‌های مناسب برای احداث پارک‌های شهری را اولویت‌بندی کردند [۱۱]. علیزاده و همکاران در شیراز، با ترکیب فرآیند تحلیل سلسله مراتبی و منطق فازی، به اولویت‌بندی فضایی توسعه زیرساخت سبز با هدف بهبود کیفیت محیطی پرداختند [۱].

با وجود غنای این مطالعات، شکاف‌های تحقیقاتی مهمی وجود دارد که این پژوهش در صدد پر کردن آنهاست: اولاً، بسیاری از پژوهش‌های داخلی موجود، اگرچه از روش تصمیم‌گیری چندمعیاره بهره‌برده‌اند، اما تمرکز اصلی و وزن‌دهی معیارها لزوماً بر مدیریت رواناب به‌عنوان یک کارکرد حیاتی زیرساخت سبز در شهرهای نیمه‌خشک نبوده است. ثانیاً، استفاده همزمان و یکپارچه از داده‌های نوین سنجش از دور و پلتفرم‌های ابری برای استخراج و پردازش لایه‌های معیار با دقت بالا در چارچوب تصمیم‌گیری چندمعیاره برای کلان‌شهر تهران کمتر مورد توجه قرار گرفته است [۶]. ثالثاً، انجام تحلیل حساسیت کمی و نظام‌مند (مانند روش تغییر وزن و محاسبه ضریب کاپا) برای ارزیابی پایداری و قابلیت اطمینان مدل تصمیم‌گیری در این زمینه، در مطالعات پیشین کم‌رنگ است [۲۳].

براساس آنچه گفته شد، سوالات پژوهش حول محورهای زیر شکل می‌گیرند: (۱) آیا الگوی مکانی اولویت توسعه زیرساخت‌های سبز در تهران از گرادیان

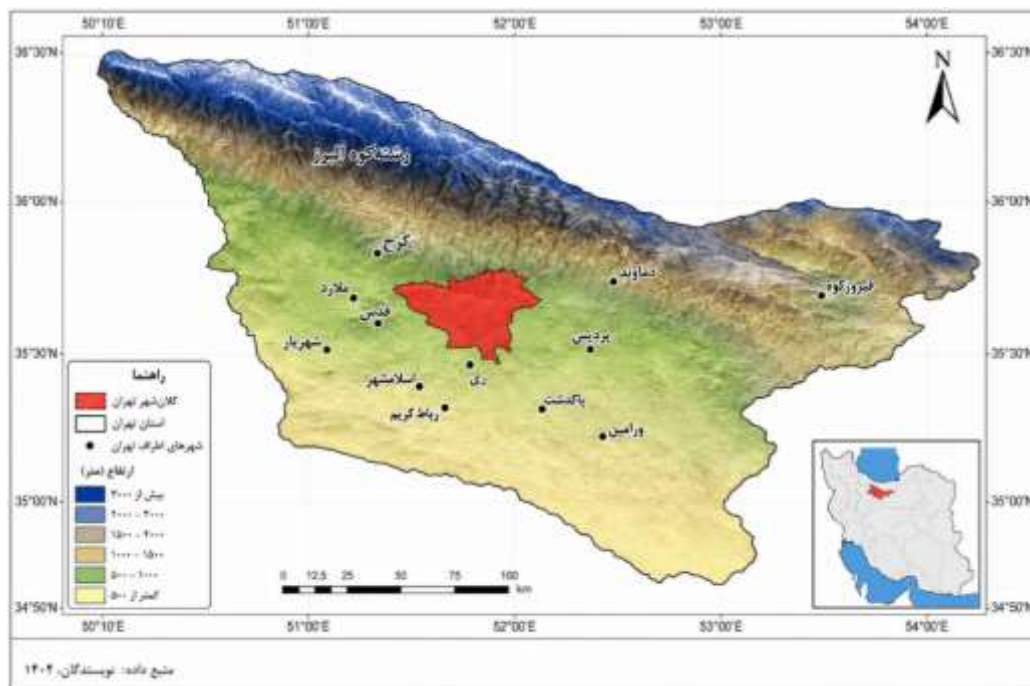
شمالی-جنوبی پیروی می‌کند و مناطق پرتراکم مرکزی و جنوبی در اولویت بالاتری قرار دارند؟ (۲) آیا معیارهای مرتبط با هیدرولوژی شهری (پتانسیل رواناب و شیب) و فشار انسانی (تراکم جمعیت) نسبت به سایر معیارها وزن و تأثیر بیشتری در مدل نهایی دارند؟ (۳) آیا مدل طراحی‌شده از پایداری و قابلیت اطمینان کافی برخوردار است و نتایج آن نسبت به تغییرات جزئی در وزن معیارها حساسیت مفرط نشان نمی‌دهد؟ هدف اصلی این پژوهش، توسعه یک چارچوب علمی و کاربردی مبتنی بر تلفیق سامانه اطلاعات جغرافیایی و تصمیم‌گیری چندمعیاره برای اولویت‌بندی فضایی توسعه زیرساخت‌های سبز شهری با تأکید ویژه بر کارکرد مدیریت رواناب در کلان‌شهر تهران است [۱۷].

اهداف اختصاصی این تحقیق به شرح زیر تعریف می‌شوند: (۱) شناسایی و تهیه لایه‌های اطلاعاتی مؤثر و به‌روز (با استفاده از فناوری سنجش از دور و داده‌های مکانی) در تعیین اولویت توسعه زیرساخت سبز با محوریت کنترل رواناب؛ (۲) تعیین وزن و اهمیت نسبی هر یک از این معیارها با استفاده از روش فرآیند تحلیل سلسله مراتبی؛ (۳) تولید نقشه نهایی پهنه‌بندی اولویت مناطق ۲۲ گانه تهران برای توسعه زیرساخت‌های سبز؛ و (۴) ارزیابی حساسیت مدل و شناسایی معیارهای کلیدی تأثیرگذار بر خروجی نهایی از طریق تحلیل حساسیت کمی. نوآوری این پژوهش را می‌توان در موارد زیر خلاصه کرد: رویکرد یکپارچه‌ای که مدیریت رواناب را در قلب فرآیند اولویت‌بندی فضایی زیرساخت سبز در یک کلان‌شهر نیمه‌خشک قرار می‌دهد؛ بکارگیری عملیاتی و گسترده از پلتفرم گوگل ارث انجین برای تهیه لایه‌های پایه با دقت و سرعت بالا [۶]؛ ادغام تحلیل حساسیت کمی (ضریب کاپا) برای اعتبارسنجی مدل [۲۳]؛ و در نهایت، ارائه خروجی‌ای که نه تنها یک نقشه پژوهشی، بلکه یک ابزار پشتیبانی تصمیم برای مدیران و برنامه‌ریزان شهری تهران محسوب می‌شود.

مواد و روش‌ها

پژوهش حاضر با هدف اولویت‌بندی فضایی توسعه زیرساخت‌های سبز شهری با تأکید بر مدیریت رواناب در کلان‌شهر تهران انجام شده است. کلان‌شهر تهران، پایتخت ایران، در دامنه جنوبی رشته‌کوه البرز واقع شده و وسعتی حدود ۷۳۰ کیلومتر مربع دارد [۲۵]. این شهر در مختصات جغرافیایی $34^{\circ} 35'$ تا $35^{\circ} 50'$ عرض شمالی و $51^{\circ} 08'$ تا $51^{\circ} 37'$ طول شرقی قرار گرفته است. ویژگی مهم تهران برای مدیریت رواناب، توپوگرافی متغیر و شیب عمومی قابل توجه از شمال به جنوب است. ارتفاع از حدود ۱۸۰۰ متر در نواحی شمالی به حدود ۱۰۵۰ متر در مناطق جنوبی

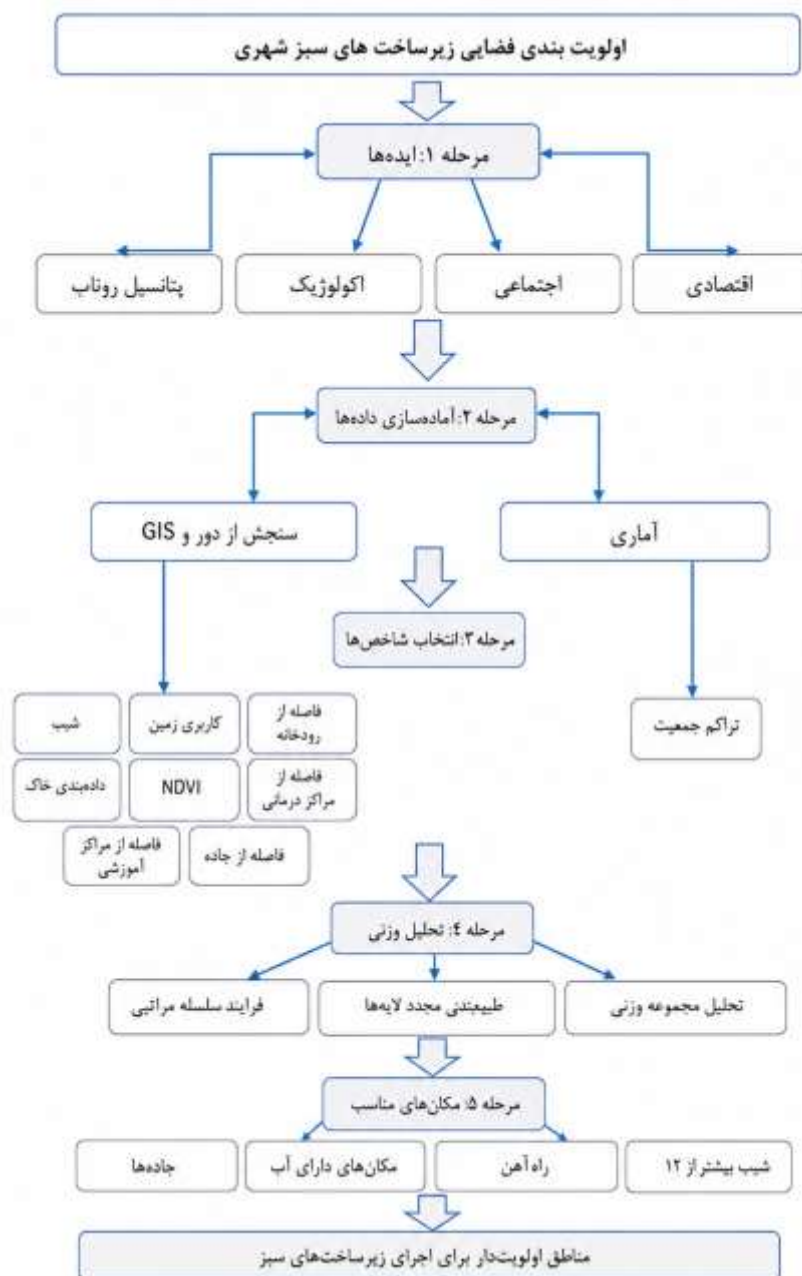
کاهش می‌یابد. از منظر اقلیمی، تهران دارای آب و هوای نیمه‌خشک با میانگین بارش سالانه بین ۲۰۰ تا ۴۰۰ میلی‌متر است. بخش عمده بارش‌ها به‌صورت رگبارهای کوتاه‌مدت و شدید رخ می‌دهد که پتانسیل ایجاد رواناب‌های سریع و سیل‌آسا را دارد. برآوردها نشان می‌دهد بیش از ۸۰ درصد از سطح شهر را سطوح نفوذناپذیر تشکیل می‌دهند [۲۵]. در شکل ۱، نقشه موقعیت جغرافیایی و توپوگرافی کلان‌شهر تهران به‌همراه شیب شمال به جنوب، رشته‌کوه البرز و مناطق ۲۲گانه شهرداری تهران نمایش داده شده است.



شکل ۱- نقشه موقعیت جغرافیایی و توپوگرافی تهران

خلاصه گام‌های روش‌شناسی پژوهش در شکل ۲ ارائه شده است که به‌صورت نمودار گردش کار، مراحل متوالی از جمع‌آوری داده‌ها تا تولید نقشه نهایی اولویت‌بندی را نمایش می‌دهد. این مراحل شامل سه فاز اصلی است: فاز اول، جمع‌آوری و آماده‌سازی داده‌های مکانی از منابع مختلف (شامل تصاویر ماهواره‌ای، داده‌های جمعیت، خاک و

توپوگرافی)؛ فاز دوم، استانداردسازی لایه‌ها، وزن‌دهی با روش AHP و تلفیق وزنی در محیط GIS؛ و فاز سوم، تولید نقشه نهایی اولویت‌بندی و انجام تحلیل حساسیت.



شکل ۲- نمودار گردش کار مراحل روش‌شناسی پژوهش

ماهوره‌ای در مقیاس وسیع را بدون نیاز به دانلود حجم بالای داده فراهم می‌آورد. نقشه کاربری اراضی و پوشش زمین با پردازش تصاویر ماهواره سنتینل-۲ (Sentinel-۲) و استفاده از الگوریتم جنگل تصادفی در پلتفرم گوگل ارث انجین تهیه گردید. الگوریتم جنگل تصادفی به دلیل توانایی بالا در طبقه‌بندی تصاویر ماهواره‌ای با دقت مناسب و مقاومت در برابر بیش‌برازش انتخاب شد. برای آموزش الگوریتم، تعداد

این پژوهش مبتنی بر گردآوری و تلفیق داده‌های مکانی از منابع معتبر است. کلیه داده‌ها در سیستم مختصات UTM Zone ۳۹N، WGS ۸۴ یکسان‌سازی شده‌اند. برای استخراج و پیش‌پردازش داده‌ها از پلتفرم ابری گوگل ارث انجین (Google Earth Engine) استفاده شد که دسترسی به آرشیو عظیمی از داده‌های سنجش از دور را فراهم می‌کند [۶]. این پلتفرم ابری امکان پردازش سریع تصاویر

۵۰۰ نقطه نمونه به صورت تصادفی طبقه بندی شده در سطح محدوده مطالعه انتخاب گردید. این نقاط با استفاده از تصاویر با وضوح بسیار بالای گوگل ارث و بازدید میدانی (۲۰۰ نقطه) اعتبارسنجی شدند. مبنای انتخاب نقاط، تأمین حداقل ۵۰ نقطه نمونه برای هر کلاس کاربری (ساختمانی، فضای سبز، معابر، اراضی بایر و پهنه های آبی) بود. دقت کلی طبقه بندی ۸۹ درصد و ضریب کاپا ۰/۸۰ محاسبه شد که نشان دهنده دقت قابل قبول طبقه بندی است. مدل رقومی ارتفاع با وضوح ۳۰ متر (SRTM) از سایت سازمان زمین شناسی آمریکا (USGS) دریافت گردید. داده های تراکم جمعیت از مجموعه داده جهانی GHSL (Human Settlement Global Layer) با وضوح ۱۰۰ متر برای سال ۲۰۲۳ استخراج شد. این مجموعه داده با استفاده از داده های ماهواره ای و روش های یادگیری ماشین، توزیع مکانی جمعیت را با دقت نسبتاً خوبی برآورد می کند. داده های بافت خاک از مجموعه داده جهانی

SoilGrids با وضوح ۲۵۰ متر تهیه گردید. این مجموعه داده شامل درصد رس، سیلت و ماسه در عمق ۰ تا ۵ سانتی متری خاک است که برای تعیین نفوذپذیری و گروه هیدرولوژیکی خاک ضروری می باشد. شاخص پوشش گیاهی (NDVI) با پردازش تصاویر سنتینل-۲ در گوگل ارث انجین محاسبه شد. این شاخص که از نسبت بازتاب باند قرمز و باند مادون قرمز نزدیک محاسبه می شود، وضعیت پوشش گیاهی و تراکم آن را در سطح شهر نشان می دهد. شبکه هیدروگرافی (رودخانه ها و مسیل ها) از سازمان آبخیزداری کشور با مقیاس ۱:۵۰۰۰۰ دریافت گردید. مراکز آموزشی و درمانی از طریق گوگل ارث پرو دیجیتالی شده و با منابع سازمانی اعتبارسنجی شدند. شبکه معابر اصلی (راه ها) نیز از داده های وکتوری شهرداری تهران استخراج گردید. مشخصات اصلی لایه های داده، شامل منبع، روش گردآوری و وضوح مکانی، در جدول ۱ ارائه شده است.

جدول ۱- مشخصات لایه های داده مکانی مورد استفاده در پژوهش

ردیف	لایه داده	منبع/روش گردآوری	وضوح مکانی
۱	کاربری اراضی و پوشش زمین (LULC)	پردازش تصاویر Sentinel-۲ در Google Earth Engine با الگوریتم Forest Random	۱۰ متر
۲	مدل رقومی ارتفاع (DEM)	SRTM (USGS)	۳۰ متر
۳	تراکم جمعیت	GHSL (Global Human Settlement Layer, A۲۰۲۳P)	۱۰۰ متر
۴	بافت خاک	SoilGrids (درصد رس، سیلت و ماسه در عمق ۵-۰ سانتی متر)	۲۵۰ متر
۵	شاخص پوشش گیاهی (NDVI)	پردازش تصاویر Sentinel-۲ در Google Earth Engine	۱۰ متر
۶	شبکه هیدروگرافی (رودخانه ها)	سازمان آبخیزداری کشور + Google Earth Pro	مقیاس ۱:۵۰۰۰۰
۷	مراکز آموزشی و درمانی	اعتبارسنجی سازمانی	نقطه ای
۸	شبکه معابر اصلی (راه ها)	داده های وکتوری شهرداری تهران	خطی

کلیه داده‌ها به سیستم مختصات UTM Zone ۳۹N, WGS ۸۴ تبدیل شده‌اند. دقت کلی طبقه‌بندی تصاویر ۸۹٪ و ضریب کاپای آن ۰.۸۰ محاسبه گردید. برای داده‌های نقطه‌ای و خطی، وضوح مکانی به صورت «نقطه‌ای» و «خطی» گزارش شده است زیرا این داده‌ها به صورت برداری هستند و وضوح پیکسلی مشخصی ندارند.

در این پژوهش، جامعه آماری به صورت سنتی (انسان‌محور) تعریف نشده است، بلکه رویکرد پژوهش مبتنی بر تحلیل فضایی و لایه‌های اطلاعات مکانی می‌باشد. به عبارت دیگر، به جای بررسی افراد یا خانوارها، این پژوهش به تحلیل سلول‌های فضایی (پیکسل‌ها) در سطح کل محدوده مطالعاتی می‌پردازد. تعداد نمونه از نوع نمونه‌گیری فضایی بوده و شامل سلول‌های شبکه‌ای (پیکسل‌ها) با ابعاد ۱۰×۱۰ متر در محدوده شهر تهران (با وسعت ۷۳۰ کیلومتر مربع) می‌باشد. با توجه به اینکه لایه‌های ورودی با وضوح‌های متفاوت (از ۱۰ متر تا ۲۵۰ متر) تهیه شده‌اند، کلیه لایه‌ها پیش از تحلیل نهایی به وضوح مکانی مشترک ۱۰×۱۰ متر بازنمونه‌سازی شدند تا قابلیت تلفیق در محیط GIS فراهم گردد. بدین ترتیب، تعداد کل پیکسل‌های تحلیل‌شده در این پژوهش حدود ۷.۳ میلیون پیکسل (۷۳۰ کیلومتر مربع ÷ ۰.۰۰۰۱ کیلومتر مربع برای هر پیکسل ۱۰×۱۰ متر) برآورد می‌گردد.

براساس ادبیات موضوع و شرایط خاص منطقه تهران، ۹ معیار کلیدی انتخاب شدند. در ادامه به تشریح هر یک از این معیارها و روش تولید لایه مربوط به آنها پرداخته می‌شود. نخستین و مهم‌ترین معیار، پتانسیل رواناب است که با استفاده از نقشه کاربری اراضی و تخصیص ضرایب رواناب استاندارد (ضریب رواناب ۰/۹۰ برای سطوح نفوذناپذیر مانند ساختمان‌ها و راه‌ها، ضریب رواناب ۰/۳ برای فضای سبز و اراضی باز با پوشش گیاهی، و ضریب رواناب ۰/۷ برای اراضی بایر و بدون پوشش) تولید شد [۴].

دومین معیار، شیب است که لایه شیب درصد از مدل رقومی ارتفاع با وضوح ۳۰ متر در محیط GIS و با استفاده از ابزار Slope استخراج گردید. شیب زمین به طور مستقیم بر سرعت رواناب، زمان تمرکز و نفوذپذیری تأثیر می‌گذارد. سومین معیار، تراکم جمعیت است که از مجموعه داده جهانی GHSL با وضوح ۱۰۰ متر استخراج شد. مناطقی با تراکم جمعیتی بالاتر، به دلیل افزایش سطح نفوذناپذیر و تعداد بیشتر افراد در معرض خطر سیلاب، اولویت بالاتری دارند. چهارمین معیار، بافت خاک است که با استفاده از مثلث بافت خاک USDA از داده‌های SoilGrids تولید گردید. خاک‌های رسی با نفوذپذیری پایین، اولویت بیشتری برای توسعه زیرساخت سبز دارند. پنجمین معیار، فاصله از فضای سبز موجود است که با استفاده از شاخص NDVI و محاسبه فاصله اقلیدسی تهیه شد. ششمین معیار، فاصله از رودخانه‌ها و مسیل‌ها است که با استفاده از داده‌های شبکه هیدروگرافی و محاسبه فاصله اقلیدسی تولید گردید. هفتمین، هشتمین و نهمین معیارها به ترتیب شامل فاصله از مراکز آموزشی، فاصله از مراکز درمانی و فاصله از راه‌های اصلی هستند که با محاسبه فاصله اقلیدسی تولید گردیدند. در خصوص این معیارها، از رویکرد فاصله اقلیدسی پیوسته به جای تعریف بافر با شعاع ثابت استفاده شده است تا درجه‌بندی ظریف دسترسی فضایی حفظ شود.

برای تعیین اهمیت نسبی هر یک از ۹ معیار، از فرآیند تحلیل سلسله مراتبی استفاده شد [۲۱]. در این روش، یک ماتریس مقایسه زوجی ۹×۹ تشکیل گردید و اهمیت هر معیار نسبت به معیار دیگر با استفاده از مقیاس ۱ تا ۹ ساعتی قضاوت شد. قضاوت‌ها توسط تیمی متشکل از ۵ نفر از متخصصان حوزه مدیریت آب شهری، برنامه‌ریزی محیط‌زیست و GIS انجام شد و سپس میانگین هندسی قضاوت‌ها برای تشکیل ماتریس نهایی مورد استفاده قرار گرفت. وزن نرمال‌شده هر معیار با استفاده از روش میانگین

هندسی ردیف‌ها محاسبه گردید. شاخص ناسازگاری (CR) برابر ۰.۰۳ به دست آمد که کمتر از آستانه قابل قبول ۰.۱ است و نشان‌دهنده سازگاری بالای ماتریس مقایسات می‌باشد. وزن نهایی معیارها در بخش نتایج (جدول ۲) ارائه شده است.

سیستم اطلاعات جغرافیایی (GIS) به عنوان ابزار اصلی و محوری در تمامی مراحل این پژوهش ایفای نقش نموده است. در مرحله جمع‌آوری و آماده‌سازی داده‌ها، از پلتفرم ابری GEE استفاده گردید. در مرحله پردازش و تحلیل مکانی، نرم‌افزار ArcGIS (شامل افزونه Spatial Analyst) بستر اصلی انجام عملیات زیر بوده است: استخراج نقشه شیب با ابزار Slope، محاسبه فاصله اقلیدسی با ابزار Euclidean Distance، بازطبقه‌بندی لایه‌ها با ابزار Reclassify. کلیه لایه‌های رستری پیش از تلفیق، با استفاده از روش حداقل-حداکثر (Max-Min) در محدوده ۰ تا ۱ استاندارد شدند تا اثر مقیاس‌های اندازه‌گیری مختلف حذف گردد. سپس از عملگر ترکیب خطی وزنی (WLC) برای تولید نقشه نهایی استفاده شد. در این روش، هر لایه استاندارد شده در وزن مربوط به خود ضرب و سپس حاصل جمع همه لایه‌ها محاسبه می‌گردد. فرمول ریاضی این عملگر به صورت $\Sigma = S$ ($W_i \times X_i$) است که در آن S امتیاز نهایی تناسب مکانی، W_i وزن معیار i ، و X_i مقدار استاندارد شده لایه معیار i می‌باشد. خروجی این مرحله یک لایه رستری پیوسته با مقادیر بین ۰ تا ۱ بود که با استفاده از روش شکست‌های طبیعی به پنج کلاس اولویت (بسیار کم، کم، متوسط، بالا و بسیار بالا) تقسیم‌بندی شد.

برای ارزیابی میزان اتکاپذیری نتایج، یک تحلیل حساسیت کمی انجام شد. روش به کار گرفته شده، روش تغییر وزن یک‌باره (OAT) می‌باشد. در این روش، وزن هر یک از ۹ معیار به‌طور جداگانه به میزان

۱۰ درصد افزایش و ۱۰ درصد کاهش یافت و این تغییر به‌صورت مساوی بین ۸ معیار دیگر توزیع شد. در نتیجه، ۱۸ سناریوی وزنی جدید به همراه سناریوی پایه ایجاد گردید. برای هر سناریو، عملیات ترکیب خطی وزنی مجدداً اجرا شد. سپس شباهت نقشه‌های حاصل با نقشه مرجع با استفاده از ضریب کاپا محاسبه گردید [۲۳]. ضریب کاپا مقداری بین ۱- تا ۱+ دارد و مقادیر بالای ۰.۸ نشان‌دهنده توافق قوی بین دو نقشه است. معیارهایی که تغییر وزن در آنها منجر به بیشترین کاهش در ضریب کاپا شود، به‌عنوان حساسترین معیارهای مدل شناسایی می‌شوند. در پژوهش حاضر، گرچه مدل‌های هیدرولیکی و هیدرولوژیکی مانند HMS-HEC، RAS-HEC یا SWMM به‌طور مستقیم به کار گرفته نشدند، اما لایه پتانسیل رواناب با وزن ۰/۳ توانست تا حد زیادی اثر فقدان یا ناکارآمدی سیستم‌های زهکشی را منعکس سازد. برای مطالعات آتی، استفاده تلفیقی از مدل‌های مذکور به همراه رویکرد مکانی این پژوهش توصیه می‌شود.

نتایج

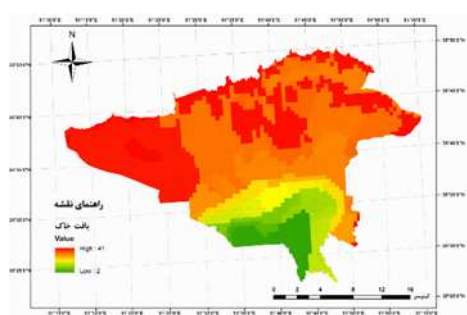
تحلیل لایه‌های مؤثر و تلفیق آنها در چارچوب تصمیم‌گیری چندمعیاره مکانی، الگوی فضایی روشنی از نیاز به توسعه زیرساخت‌های سبز در کلان‌شهر تهران ارائه نمود. در ابتدا، نتایج حاصل از فرآیند تحلیل سلسله مراتبی (AHP) در جدول ۲ ارائه شده است. براساس این نتایج، معیار پتانسیل رواناب با وزن ۰/۳ بیشترین اهمیت و معیار فاصله از مراکز آموزشی با وزن ۰/۰۳ کمترین اهمیت را در اولویت‌بندی فضایی زیرساخت سبز دارند. نرخ ناسازگاری ماتریس مقایسه زوجی برابر ۰/۰۳ محاسبه گردید که کمتر از ۰/۱ بوده و بیانگر پایایی قضاوت‌های انجام شده است.

جدول ۲- وزن نهایی معیارها و رتبه‌بندی آنها حاصل از فرآیند تحلیل سلسله مراتبی (AHP)

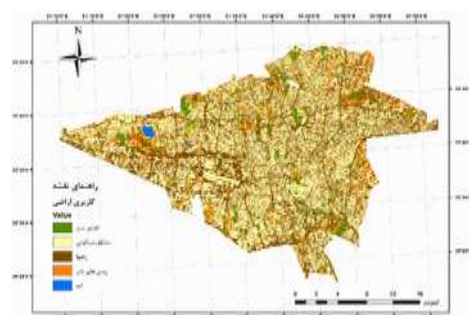
رتبه	معیار	وزن نهایی
۱	پتانسیل رواناب	۰/۳
۲	شیب	۰/۱۸
۳	تراکم جمعیت	۰/۱۲
۴	فاصله از رودخانه	۰/۱۰
۵	فاصله از راه‌های اصلی	۰/۰۸
۶	فاصله از فضای سبز	۰/۰۷
۷	فاصله از مراکز درمانی	۰/۰۷
۸	بافت خاک	۰/۰۵
۹	فاصله از مراکز آموزشی	۰/۰۳

نرخ ناسازگاری (CR) ماتریس مقایسه زوجی برابر ۰/۰۳ محاسبه گردید که کمتر از ۰/۱ بوده و نشان‌دهنده سازگاری قابل قبول قضاوت‌ها است. در شکل ۳، هشت لایه معیار اصلی مورد استفاده در این پژوهش شامل بافت خاک، کاربری اراضی،

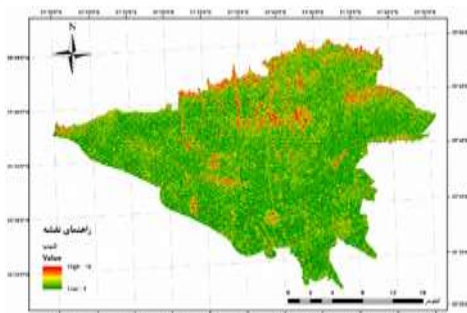
شیب زمین، فاصله از فضای سبز، فاصله از مراکز آموزشی، تراکم جمعیت، فاصله از راه‌ها و فاصله از آبراهه‌ها نمایش داده شده است. این لایه‌ها پس از استانداردسازی و وزن‌دهی، مبنای تلفیق نهایی قرار گرفته‌اند.



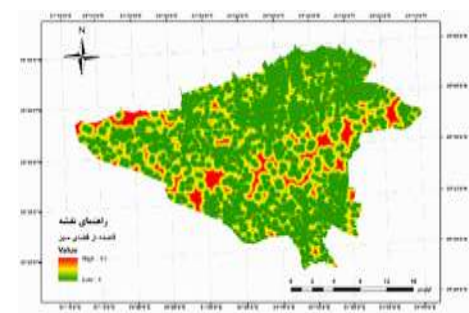
(۱)



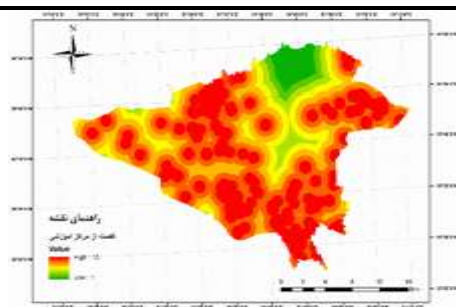
(۲)



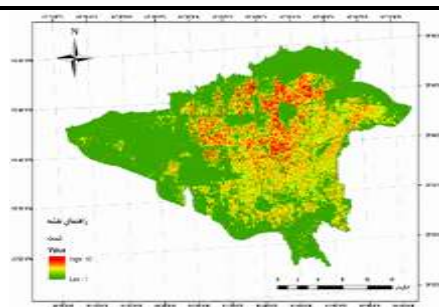
(۳)



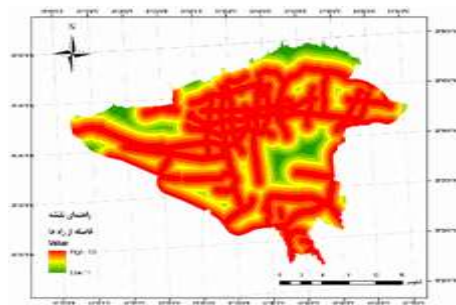
(۴)



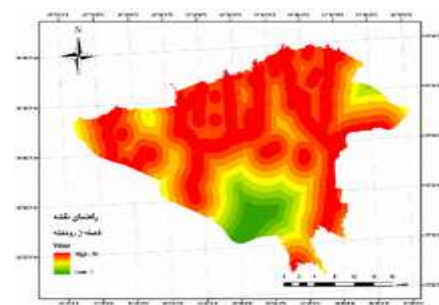
(۵)



(۶)



(۷)



(۸)

شکل ۳- داده‌های مورد استفاده در این تحقیق. ۱: بافت خاک، ۲: کاربری اراضی، ۳: شیب زمین، ۴: فاصله از فضای سبز، ۵: فاصله از مراکز آموزشی، ۶: جمعیت، ۷: فاصله از راه‌ها، ۸: فاصله از آبراهه‌ها

مرکزی، جنوبی و غربی، در کلاس‌های پتانسیل بالا تا بسیار بالا قرار دارد. این پهنه‌بندی حاکی از آن است که سطوح وسیعی از شهر دارای ویژگی‌هایی هستند که منجر به افزایش ضریب رواناب و کاهش نرخ نفوذ آب به داخل خاک می‌شوند. توزیع مکانی پتانسیل رواناب نشان می‌دهد که پهنه‌های با پتانسیل بالا عمدتاً با مناطق دارای تراکم ساختمانی بالای ۷۰ درصد و سطوح نفوذناپذیر بیش از ۸۵ درصد همپوشانی دارند. از نظر آماری، حدود ۶۲ درصد از مساحت مناطق ۱۰، ۱۱ و ۱۲ در کلاس پتانسیل رواناب بسیار بالا قرار می‌گیرند که این میزان برای منطقه ۱ شمالی تنها ۸ درصد است. این تفاوت چشمگیر، ضرورت مداخله متمرکز در بافت مرکزی و جنوبی شهر را از منظر هیدرولوژیکی توجیه می‌کند. نواحی با پتانسیل رواناب پایین تا بسیار پایین عمدتاً در ارتفاعات شمالی، شرقی و شمال غربی شهر متمرکز شده‌اند که ناشی از وجود پوشش گیاهی متراکم، نفوذپذیری بالای خاک و توپوگرافی مناسب برای نفوذ است [۱۴]. توزیع فضایی جمعیت شهر

نقشه کاربری اراضی تولیدشده با استفاده از تصاویر سنتینل-۲ و الگوریتم جنگل تصادفی در پلتفرم گوگل ارث انجین، حاکی از سلطه کمی سطوح نفوذناپذیر در ساختار فضایی تهران است. براساس این نقشه، سطوح نفوذناپذیر (شامل سازه‌ها و عرصه‌های فاقد پوشش گیاهی) با مجموعاً بیش از هشتاد درصد از مساحت منطقه، ساختار اصلی فضای شهری را تشکیل می‌دهند. در مقابل، سهم پوشش گیاهی از کل مساحت محدوده، رقمی در حدود کمتر از ده درصد را نشان می‌دهد. الگوی پراکنش فضایی کاربری‌های مصنوعی از تمرکز قابل توجهی در بخش‌های مرکزی، جنوبی و غربی برخوردار است، درحالی‌که بخش شمالی محدوده که با دامنه‌های کوهستانی البرز هم‌پوشانی دارد، به‌عنوان عرصه اصلی با تراکم ساخت‌وساز پایین و پوشش گیاهی غالب عمل می‌کند [۶].

تلفیق نقشه کاربری اراضی با ضرایب رواناب استاندارد، منجر به تولید لایه پتانسیل رواناب گردید. بخش عمده‌ای از عرصه شهر تهران، به‌ویژه در نواحی

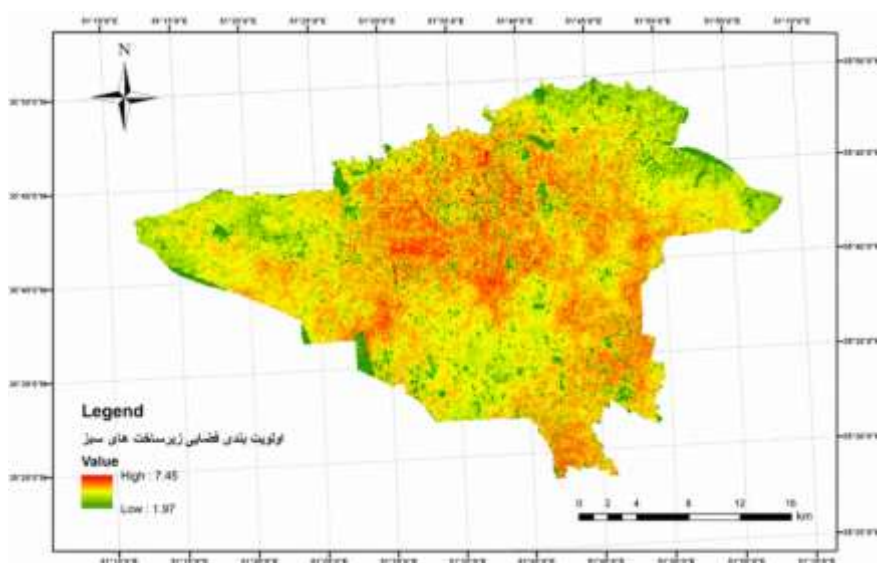
تهران در سال ۲۰۲۳ الگوی دوگانه‌ای از پراکنش جمعیت را آشکار می‌سازد. کانون‌های پرتراکم جمعیت به‌طور مشخص با مناطق دارای کاربری ساختمانی متراکم همپوشانی دارند و از منظر هیدرولوژیکی، پیوند معناداری بین تراکم جمعیت و پتانسیل رواناب مشاهده می‌شود؛ به گونه‌ای که مناطق پرتراکم جمعیت عمدتاً در مناطق با پتانسیل رواناب بالا قرار گرفته‌اند. تحلیل لایه شیب نشان می‌دهد که شیب‌های تند (بیش از ۱۵ درصد) عمدتاً در نواحی شمالی و دامنه‌های البرز متمرکز شده‌اند، درحالی‌که مناطق مرکزی و جنوبی دارای شیب ملایم (کمتر از ۵ درصد) هستند. اگرچه شیب‌های تند به‌طور طبیعی سرعت رواناب را افزایش می‌دهند، اما به‌دلیل پوشش گیاهی نسبتاً مطلوب در این مناطق و تراکم پایین ساخت‌وساز، اولویت نهایی این مناطق در مدل ترکیبی کاهش یافته است. در مقابل، مناطق با شیب ملایم در مرکز و جنوب شهر، به‌دلیل ترکیب با سطوح نفوذناپذیر گسترده و تراکم جمعیتی بالا، اولویت بسیار بالایی پیدا کرده‌اند. لایه بافت خاک نشان می‌دهد که خاک‌های با درصد رس بالا (بافت رسی) عمدتاً در بخش‌های جنوبی و جنوب غربی تهران پراکنده شده‌اند که نفوذپذیری بسیار پایینی دارند و بنابراین پتانسیل رواناب بالایی از خود نشان می‌دهند. در مقابل، خاک‌های شنی و لومی با نفوذپذیری بالاتر بیشتر در نواحی شمالی و شرقی شهر یافت می‌شوند. لایه فاصله از فضای سبز موجود نشان می‌دهد که مناطق مرکزی و جنوبی شهر (مناطق ۱۰، ۱۱، ۱۲، ۱۵، ۱۶، ۱۷ و ۲۰) دارای بیشترین فاصله از فضاهای سبز هستند و عملاً از خدمات اکوسیستمی بی‌بهره‌اند. این در حالی است که مناطق شمالی شهر (مناطق ۱، ۲، ۳ و ۲۲) به‌دلیل وجود پارک‌های بزرگ و پوشش گیاهی طبیعی البرز، کمترین فاصله را از فضای سبز دارند. لایه فاصله از رودخانه‌ها نشان می‌دهد که مناطق غربی و شمال غربی شهر (به‌دلیل وجود رود دره‌های فرحزاد، درکه و

کن) و همچنین مناطق دارای مسیل‌های جنوبی (مانند سرخه حصار و فیروزآباد) فاصله کمتری از آبراهه‌ها دارند. با این حال، به‌دلیل وزن نسبتاً بالای این معیار (۰.۱۰)، مناطقی که در حریم رودخانه‌ها قرار دارند، علی‌رغم وجود پتانسیل سیل‌گیری، اولویت متوسطی پیدا کرده‌اند. لایه فاصله از راه‌های اصلی نشان می‌دهد که مناطق مرکزی و جنوبی شهر به‌دلیل تراکم بالای شبکه معابر، فاصله بسیار کمی از راه‌ها دارند (به‌طور متوسط کمتر از ۱۰۰ متر). این موضوع از یک سو نشان‌دهنده دسترسی مناسب است، اما از سوی دیگر بیانگر سطح بالای نفوذناپذیری ناشی از آسفالت معابر است. لایه فاصله از مراکز آموزشی نشان می‌دهد که مناطق شمالی شهر دسترسی بهتری به مراکز آموزشی دارند (میانگین فاصله کمتر از ۵۰۰ متر)، درحالی‌که مناطق جنوبی و مرکزی با وجود تراکم جمعیتی بالا، از دسترسی ضعیف‌تری برخوردارند (میانگین فاصله بین ۸۰۰ تا ۱۵۰۰ متر). الگوی مشابهی برای لایه فاصله از مراکز درمانی مشاهده می‌شود، با این تفاوت که شکاف دسترسی بین شمال و جنوب عمیق‌تر است.

تلفیق وزنی کلیه لایه‌ها براساس وزن‌های به‌دست‌آمده از روش فرآیند تحلیل سلسله مراتبی (جدول ۲)، منجر به تولید نقشه نهایی پهنه‌بندی اولویت توسعه زیرساخت‌های سبز گردید (شکل ۴). براساس این نقشه، پهنه‌های با اولویت بسیار بالا عمدتاً در جنوب و مرکز تهران (مناطق ۱۰، ۱۱، ۱۲، ۱۵، ۱۶، ۱۷ و بخش‌هایی از منطقه ۲۰) واقع شده‌اند که با ویژگی‌هایی شامل تراکم ساختمانی و جمعیتی شدید، نفوذپذیری اندک خاک، دمای سطحی بالا، آلودگی شدید هوا و فاصله زیاد از فضاهای سبز شناسایی می‌شوند. پهنه‌های با اولویت بالا در بخش‌هایی از مناطق شرقی و غربی میانی شهر (مناطق ۷، ۸، ۹، ۱۸ و شمال منطقه ۵) قرار دارند که اگرچه از نظر تراکم جمعیت و کیفیت محیطی شرایط نسبتاً بهتری دارند، اما از پیوستگی اکولوژیکی ضعیف

به فضاهای سبز بزرگ، تهویه طبیعی مناسب و نفوذپذیری قابل قبول خاک برخوردارند. پهنه‌های با اولویت بسیار پایین شامل ارتفاعات شمالی، حریم رودخانه‌ها و عرصه‌های طبیعی با پوشش گیاهی متراکم است که نقش حیاتی در تولید هوای پاک، تنظیم حرارت و ذخیره رواناب طبیعی ایفا می‌کنند [۱۷].

و نفوذپذیری کم خاک رنج می‌برند. پهنه‌های با اولویت متوسط (بخش‌هایی از مناطق ۶، ۷، ۸، ۱۳ و ۱۴) از توازن نسبی میان تراکم جمعیت، زیرساخت‌های خدماتی و فضاهای سبز برخوردارند، اما ارتباط اکولوژیکی میان لکه‌های سبز ناکافی است. پهنه‌های با اولویت پایین شامل نواحی شمالی و مرتفع تهران (مناطق ۱، ۲، ۳، ۵ شمالی و ۲۲) هستند که از تراکم ساخت پایین، دسترسی مطلوب



شکل ۴- نقشه نهایی اولویت‌بندی فضایی زیرساخت‌های سبز شهر تهران

(تراکم جمعیت) قرار دارد و تغییر در وزن معیارهای کم‌تأثیر مانند فاصله از مراکز آموزشی، تغییر محسوسی در خروجی نهایی ایجاد نمی‌کند. این ویژگی مدل از یک سو نشان‌دهنده تمرکز صحیح آن بر مهم‌ترین عوامل مؤثر بر مدیریت رواناب است و از سوی دیگر بیانگر آن است که تصمیم‌گیرندگان می‌توانند با اطمینان نسبتاً بالایی بر خروجی مدل تکیه کنند.

بحث و نتیجه‌گیری

یافته‌های این پژوهش، چارچوبی علمی و مبتنی بر مکان را برای اولویت‌بندی توسعه زیرساخت‌های سبز در کلان‌شهر تهران با محوریت مدیریت رواناب ارائه می‌دهد. نقشه نهایی اولویت‌بندی یک گرادیان فضایی

تحلیل حساسیت مدل با ایجاد ۱۸ سناریوی مختلف وزنی و مقایسه هر یک با نقشه مرجع (سناریوی پایه) از طریق ضریب کاپا انجام شد. مقادیر ضریب کاپا در تمامی سناریوها بالاتر از ۰/۸۲ بوده که نشان‌دهنده پایداری و قابلیت اطمینان بسیار بالای مدل پایه می‌باشد [۲۳]. براساس دامنه تغییرات ضریب کاپا در سناریوهای مختلف، معیار پتانسیل رواناب با ضریب کاپا بین ۰/۸۴۵ تا ۰/۸۹۲ و معیار تراکم جمعیت با ضریب کاپا بین ۰/۸۲۳ تا ۰/۸۷۸ به‌عنوان حساسترین معیارهای مدل شناسایی شدند. در مقابل، معیارهای فاصله از مراکز آموزشی و بافت خاک کمترین حساسیت را نشان دادند. این یافته تأیید می‌کند که نتایج مدل عمدتاً تحت تأثیر پارامترهای هیدرولوژیکی (پتانسیل رواناب) و انسانی

قوی با جهت‌گیری جنوبی-شمالی را نشان می‌دهد، به‌طوری‌که پهنه‌های با اولویت بسیار بالا و بالا عمدتاً در بخش‌های جنوبی، مرکزی و غربی تهران متمرکز شده‌اند. این الگو بازتابی مستقیم از تاریخچه توسعه شهری تهران، ساختار کالبدی-اجتماعی کنونی و اختلال شدید در چرخه هیدرولوژیکی طبیعی است [۱۹]. تمرکز اولویت‌های بالا در مناطق مرکزی و جنوبی با یافته‌های خدابخشی و همکاران در مشهد [۱۱] و عزیزاده و همکاران در شیراز [۱] همسوست که تراکم جمعیتی بالا و کمبود سرانه فضای سبز را به‌عنوان عوامل اصلی اولویت‌دهی شناسایی کردند. تمرکز مناطق پراولویت در هسته مرکزی و جنوبی تهران، که عمدتاً با بافت‌های فرسوده و متراکم همراه است، نیاز به راهبردهای خلاقانه و سازگار با محدودیت فضایی را پررنگ می‌سازد. در چنین بافت‌هایی، توسعه زیرساخت‌های سبز عمودی و خردمقیاس (مانند بام‌ها و دیوارهای سبز، باغچه‌های باران) از کف‌سازی‌های نفوذپذیر عملی‌تر و مؤثرتر است [۲۰]. از سوی دیگر، تخصیص اولویت پایین به مناطق شمالی تهران، که عمدتاً با پوشش گیاهی انبوه، نفوذپذیری بالای خاک و تراکم جمعیتی کمتر شناخته می‌شوند، منطبق بر اصل تخصیص کارایی منابع است [۱۷]. این نتیجه بر ضرورت اتخاذ سیاست‌های حفاظتی شدید و جلوگیری از تغییر کاربری در این ذخیره‌گاه‌های زیست‌محیطی تأکید می‌کند. فرضیات پژوهش تأیید شدند. فرضیه اول مبنی بر اولویت بیشتر مناطق مرکزی و پرجمعیت نسبت به مناطق حاشیه‌ای، به‌طور کامل تأیید می‌شود. مناطق ۱۰، ۱۱، ۱۲، ۱۵، ۱۶، ۱۷ و ۲۰ که در دسته اولویت‌های بسیار بالا و بالا قرار گرفتند، دقیقاً منطبق بر هسته تاریخی، پرتراکم و کم‌برخوردار از فضای سبز تهران هستند. فرضیه دوم مبنی بر متفاوت بودن تأثیر لایه‌های شناسایی شده، به وضوح تأیید می‌گردد. نتایج تحلیل حساسیت نشان داد که معیارهای پتانسیل رواناب و تراکم جمعیت بیشترین تأثیر را در

شکل‌دهی به خروجی نهایی داشته‌اند. فرضیه سوم مبنی بر امکان تولید نقشه‌ای دقیق و معتبر، نیز تأیید می‌شود. مقادیر بالای ضریب کاپا در سناریوهای مختلف تغییر وزن، حاکی از قابلیت اطمینان بالای این نقشه به‌عنوان یک ابزار پشتیبانی تصمیم است [۲۳]. از منظر عملی و برای مدیریت شهری، خروجی این پژوهش فراتر از یک نقشه پژوهشی و به منزله یک ابزار پشتیبانی تصمیم مکانی‌مند است. پیامدهای عملی اصلی عبارتند از: (۱) هدایت تخصیص بهینه بودجه و منابع به شهرداری‌های مناطق پراولویت (به‌ویژه مناطق مرکزی و جنوبی)؛ (۲) تمایز در راهبردهای اجرایی به گونه‌ای که در پهنه‌های با اولویت بسیار بالا بر راهکارهای خردمقیاس و عمودی (بام‌های سبز، دیوارهای سبز، باغچه‌های باران) تمرکز شود و در پهنه‌های با اولویت پایین (شمال شهر)، سیاست حفاظت و صیانت اکولوژیک راهبرد اصلی باشد؛ (۳) احیای رودخانه‌های شمالی-جنوبی به‌عنوان کریدورهای سبز و احداث پارک‌های سیلابی چندمنظوره در زمین‌های با پتانسیل رواناب بالا. پیشنهادات برای تحقیقات آینده شامل موارد زیر است: (۱) وارد کردن لایه «نوع بافت شهری» (شامل بافت فرسوده، میانی، جدید، ویلایی، صنعتی و تجاری-اداری فشرده) به‌عنوان معیار مستقل در مدل، به‌دلیل نیاز به راهکارهای خردمقیاس در بافت‌های فشرده. (۲) ادغام لایه «شبکه زهکشی مصنوعی» با تأکید بر ظرفیت هیدرولیکی و کارایی آن، زیرا مناطقی با شبکه زهکشی دچار کمبود ظرفیت یا گرفتگی، اولویت بسیار بالاتری برای زیرساخت سبز دارند. (۳) استفاده از داده‌های لیدار (LiDAR) با قدرت تفکیک مکانی بالا برای استخراج دقیق بافت و زهکشی. (۴) تلفیق رویکرد مکانی این پژوهش با مدل‌های هیدرولوژیکی-هیدرولیکی مانند HEC-HMS، HEC-RAS و SWMM برای کمی‌سازی دقیق کاهش رواناب و شناسایی پهنه‌های بحرانی دوگانه (مناطق که هم نیاز فوری به زیرساخت سبز

برنامه‌ریزی فضا-مبنا و مبتنی بر شواهد، می‌تواند پل ارتباطی مؤثری بین پژوهش دانشگاهی و مدیریت عملی شهری باشد. نقشه اولویت‌بندی ارائه‌شده می‌تواند مبنای علمی برای گام نهادن تهران به سمت تبدیل شدن به شهری تاب‌آورتر، عادلانه‌تر و پایدارتر در مواجهه با چالش‌های هیدرولوژیکی و زیست‌محیطی قرن حاضر باشد.

دارند و هم در معرض خطر سیلاب قرار دارند. (۵)
طراحی سیستم‌های زهکشی مبتنی بر چارچوب آبخیزداری شهری شامل حوضچه‌های تأخیری و نگهداشت چندمنظوره، تبدیل کانال‌های زهکش روباز به کانال‌های سبز و طراحی زهکش‌های دومنظوره. (۶)
در نهایت، تعمیم‌پذیری این چارچوب روش‌شناختی در سایر کلان‌شهرهای نیمه‌خشک ایران و منطقه. این مطالعه نشان می‌دهد که رویکرد

References

- [1]. Abulibdeh, A. (2021). Urban water management in arid and semi-arid regions: A review of challenges and solutions. *Water Resources Management*, 35(2), 455-478. <https://doi.org/10.1007/s11269-020-02749-0>
- [2]. Benedict, M. A., & McMahon, E. T. (2006). *Green infrastructure: Linking landscapes and communities*. Island Press.
- [3]. Davis, A. P., Hunt, W. F., Traver, R. G., & Clar, M. (2009). Bioretention technology: Overview of current practice and future needs. *Journal of Environmental Engineering*, 135(3), 109-117. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)0733-9372\(2009\)135:3\(109\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)0733-9372(2009)135:3(109))
- [4]. 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>
- [5]. Fletcher, T. D., Andrieu, H., & Hamel, P. (2013). Understanding, management and modelling of urban hydrology and its consequences for receiving waters: A state of the art. *Advances in Water Resources*, 51, 261-279. <https://doi.org/10.1016/j.advwatres.2012.09.001>
- [6]. Gorelick, N., Hancher, M., Dixon, M., Ilyushchenko, S., Thau, D., & Moore, R. (2017). Google Earth Engine: Planetary-scale geospatial analysis for everyone. *Remote Sensing of Environment*, 202, 18-27. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2017.06.031>
- [7]. Grimm, N. B., Faeth, S. H., Golubiewski, N. E., Redman, C. L., Wu, J., Bai, X., & Briggs, J. M. (2008). Global change and the ecology of cities. *Science*, 319(5864), 756-760. <https://doi.org/10.1126/science.1150195>
- [8]. Jamali, J., Rasouli, A., & Karimi, H. (2021). A comprehensive and systematic framework for identifying priority development sites in semi-arid cities. *Arid Regions Geographical Studies*, 11(43), 1-20. [in Farsi]
- [9]. Jamshidi, B., & Sahraei Nejad, N. (2024). Redesigning the urban landscape of dense urban areas with green infrastructure approach (Case study: Sheikh Hadi neighborhood, District 11 of Tehran Municipality). *Passive Defense*, 15(4), 113-130. [in Farsi]
- [10]. Jia, Z., Tang, S., Luo, W., & Li, S. (2012). A review of green roof performance towards management of roof runoff. *Water Science and Technology*, 66(5), 939-948. <https://doi.org/10.2166/wst.2012.224>

- [11]. Khodabakhshi, K., Ghadami, N., & Ahmadi, M. (2021). Prioritization of zones for urban park construction using AHP and ANP methods (Case study: Mashhad). *Applied Geography Research*, 19(54), 75-92. [in Farsi]
- [12]. Kuller, M., Bach, P. M., Roberts, S., Browne, D., & Deletic, A. (2019). A planning-support tool for spatial suitability assessment of green urban stormwater infrastructure. *Science of the Total Environment*, 686, 856-868. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2019.06.040>
- [13]. Li, C., Liu, M., Hu, Y., Shi, T., Qu, X., & Walter, M. T. (2017). Spatial prioritization for urban green infrastructure development using ecological network analysis. *Cities*, 60, 1-12. <https://doi.org/10.1016/j.cities.2016.07.006>
- [14]. Linsley, R. K., Kohler, M. A., & Paulhus, J. L. H. (1975). *Hydrology for Engineers* (2nd ed.). McGraw-Hill.
- [15]. Malczewski, J. (2006). GIS-based multicriteria decision analysis: A survey of the literature. *International Journal of Geographical Information Science*, 20(7), 703-726. <https://doi.org/10.1080/13658810600661508>
- [16]. MEA (Millennium Ecosystem Assessment). (2005). *Ecosystems and Human Well-being: Synthesis*. Island Press.
- [17]. Meerow, S., & Newell, J. P. (2017). Spatial planning for multifunctional green infrastructure: Growing resilience in Detroit. *Landscape and Urban Planning*, 159, 62-75. <https://doi.org/10.1016/j.landurbplan.2016.10.005>
- [18]. Miller, J. D., Kim, H., Kjeldsen, T. R., Packman, J., Grebby, S., & Dearden, R. (2023). A multi-criteria framework for assessing sustainable drainage systems (SuDS) in semi-arid environments. *Journal of Hydrology*, 617, 128956. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2022.128956>
- [19]. Nazmfar, M., et al. (2020). Analysis of physical expansion pattern and its impact on urban surface runoff (Case study: Tehran metropolis). *Geographical Planning of Space Quarterly*, 10(37), 1-20. [in Farsi]
- [20]. Russo, A., Escobedo, F. J., Cirella, G. T., & Zerbe, S. (2017). Edible green infrastructure: An approach and review of provisioning ecosystem services and disservices in urban environments. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 242, 53-66. <https://doi.org/10.1016/j.agee.2017.03.016>
- [21]. Saaty, T. L. (1980). *The analytic hierarchy process*. McGraw-Hill.
- [22]. Saeidi, A., Shayeghi, K., & Moradi, H. (2022). Evaluation and combination of green infrastructures for urban runoff control using multi-criteria decision making methods (Case study: Tehran). *Journal of Environmental Studies*, 47(4), 589-605. [in Farsi]
- [23]. Saltelli, A., Ratto, M., Andres, T., Campolongo, F., Cariboni, J., Gatelli, D., ... & Tarantola, S. (2008). *Global sensitivity analysis: The primer*. John Wiley & Sons. <https://doi.org/10.1002/9780470725184>
- [24]. Shafique, M., Kim, R., & Lee, D. (2020). The potential of green roof and rain garden to reduce rooftop and road runoff in a urbanized catchment. *Water*, 12(10), 2649. <https://doi.org/10.3390/w12102649>
- [25]. Tehran Disaster Management Organization. (2021). *Flood risk analysis*

- report in Tehran metropolis. Tehran: Author. [in Farsi]
- [26]. Yamamoto, T., Fujita, M., & Kudo, R. (2020). Integrating fuzzy AHP and SWMM for sustainable stormwater management: A case study in Adelaide, Australia. *Urban Water Journal*, 17(6), 523-533.
<https://doi.org/10.1080/1573062X.2020.1760611>

Spatial prioritization of urban green infrastructure in semi-arid regions for runoff management (Study area: Tehran city)

1- Nadia Yalveh, M.Sc. Graduate, Department of Environmental Science and Engineering, Faculty of Natural Resources and Environment, Malayer University, Malayer, Iran.

2- Iman Saeedi*, Assistant Professor, Department of Environmental Science and Engineering, Faculty of Natural Resources and Environment, Malayer University, Malayer, Iran.

isaeedi@malayeru.ac.ir

3- Kamran Shayesteh, Assistant Professor, Department of Environmental Science and Engineering, Faculty of Natural Resources and Environment, Malayer University, Malayer, Iran.

Received: 23 Apr. 2026

Accepted: 25 Jul. 2026

Abstract

Urban runoff management in semi-arid areas is one of the major challenges of urban planning. This study aims to provide a scientific framework for spatial prioritization of urban green infrastructure development with emphasis on runoff management in Tehran metropolis. The research method is based on the integration of geographic information systems and spatial multi-criteria decision-making using the analytic hierarchy process. For this purpose, nine key criteria including runoff potential, slope, population density, soil texture, distance from green space, distance from rivers, distance from educational centers, distance from medical centers, and distance from main roads were identified, weighted, and integrated in the geographic information system environment. The model sensitivity analysis was performed by creating 18 weighted scenarios and calculating the kappa coefficient. The findings showed that impervious surfaces cover more than 80 percent of the city area. The very high priority areas are mainly concentrated in the central, southern and western regions of Tehran (regions 10, 11, 12, 15, 16, 17 and 20), which are associated with high population density, high runoff potential and lack of green space. In contrast, the northern regions of the city have a lower priority due to favorable vegetation cover and lower density. The results of the sensitivity analysis confirmed the high stability of the model (kappa greater than 0.82) and the high sensitivity of the runoff potential and population density criteria. This study provides an operational and evidence-based map as a tool to support urban managers' decision-making in order to optimally allocate resources and increase the hydrological resilience of Tehran.

Keywords: Urban Green Infrastructure, Spatial Prioritization, Surface Runoff, Multi-Criteria Decision Making, Tehran.