



طرح ریزی راهبردی شبکه اکولوژیک پیوسته و عادلانه با بهره‌گیری از اصول بوم‌شناسی سیمای سرزمین (کلانشهر تهران)

سیده آل محمد^{۱*}، حسین خسروی^۲

۱- گروه نوآوری و پایداری، دانشکده حکمرانی، دانشگاه تهران، تهران، ایران

۲- گروه طراحی شهری، دانشکده معماری و شهرسازی، دانشگاه هنر، تهران، ایران

نوع مقاله:	چکیده
پژوهشی	مقدمه: کلانشهر تهران در دهه‌های اخیر با تکه‌تکه شدن فضای سبز و تضعیف شبکه‌های اکولوژیک مواجه شده که به اختلال در خدمات اکوسیستمی و کاهش عدالت فضایی منجر شده است. ساختار ناهمگون شهر (شامل بافت‌های متراکم، رود-دره‌ها و بزرگراه‌ها)، پراکنش نامتوازن فضای سبز را به گونه‌ای رقم زده است که سرانه فضای سبز در شمال شهر بیش از ۳۰ مترمربع و در جنوب کمتر از ۵ مترمربع است. پژوهش‌های پیشین غالباً محدود به تحلیل‌های توصیفی و سنجش تراکم و سرانه بوده و به شبکه‌ای بودن و انسجام فضایی کمتر پرداخته‌اند. همچنین یک چارچوب راهبردی مبتنی بر مکان برای تحلیل پیوستگی فضای سبز و تقویت پیوندهای شبکه اکولوژیک شهر وجود ندارد. پژوهش حاضر با بهره‌گیری از اصول بوم‌شناسی سیمای سرزمین، چارچوبی نوین برای سنجش پیوستگی فضای سبز و مدیریت راهبردی شبکه اکولوژیک تهران ارائه می‌دهد.
تاریخچه مقاله:	مواد و روش‌ها: با استفاده از تصاویر ماهواره‌ای Sentinel-2 (خرداد ۱۴۰۳)، نقشه فضای سبز تهیه و شاخص NDVI با آستانه ۰/۱۷ برای استخراج پوشش گیاهی به کار رفت. سپس تحلیل پیوستگی ساختاری با FRAGSTATS و ArcGIS و روش پنجره متحرک انجام گرفت و نمایه‌ای تلفیقی بر اساس سه اصل اول بوم‌شناسی سیمای سرزمین تدوین شد. داده‌های ارتفاع، رود-دره‌ها و شبکه دسترسی نیز به‌صورت جداگانه در تحلیل وارد شدند. روش پنجره متحرک نسبت به روش‌های سنتی، با توانایی و دقت بیشتری جزئیات پیوستگی پوشش گیاهی در پیرامون را بازتاب می‌دهد و برای شناسایی مناطق بحرانی و اولویت‌دار کاربرد دارد. محدوده مطالعه ۲۰۰۰ متر فراتر از مرز کالبدی شهر را نیز در بر گرفت تا اثرات حاشیه‌ای لحاظ شود. تحلیل آماری با آزمون کولموگروف-اسمیرنوف (برای بررسی نرمال بودن) و سپس آزمون ANOVA (برای بررسی معناداری) صورت گرفت و هسته‌های اکولوژیک، قدمگاه‌های انتقالی و دالان‌ها شناسایی و ترسیم شدند.
کلمات کلیدی:	نتایج: شهر تهران به سه کمر بند ارتفاعی تقسیم شد: بالابند (۱۳۳۰ تا ۲۳۵۷ متر)، میان‌بند (۱۱۳۰ تا ۱۳۳۰ متر) و پایین‌بند (۱۰۳۰ تا ۱۱۳۰ متر). بالابند با لکه‌های سبز بزرگ و رود-دره‌های متعدد، بالاترین پیوستگی فضایی و اولویت حفاظتی دارد. در این کمر بند، نزدیکی لکه‌ها به یکدیگر و پیوند طبیعی آن‌ها با رود-دره‌ها، موجب شکل‌گیری یک ساختار پیوسته‌تر شده است. میان‌بند به دلیل تراکم بالای ساخت‌وساز و جمعیت، دارای گسستگی شدید فضای سبز و کمترین کارکرد اکولوژیک است، اما بیشترین پتانسیل احیاء را دارا است. پایین‌بند شرایط بینابینی دارد و امکان تقویت پیوندهای اکولوژیک در آن ملموس‌تر است. در مجموع، ۱۵ هسته اکولوژیک به همراه شبکه‌ای از دالان‌ها و قدمگاه‌های انتقالی شناسایی شد.
شبکه اکولوژیک، بوم‌شناسی سیمای سرزمین، پیوستگی، کمر بند ارتفاعی، عدالت فضایی	بحث: طرح مدیریت راهبردی پیشنهادی بر سه محور استوار است: ۱) تقویت پیوستگی در میان‌بند و پایین‌بند با

توسعه فضای سبز در قدمگاه‌های انتقالی و ایجاد دالان‌های جدید هم‌راستا با شبکه دسترسی، ۲) حفاظت و احیای رود- دره‌ها با تعیین بافر ۱۰۰ متری و جلوگیری از تغییر کاربری و ۳) تقویت هسته‌های اکولوژیک و ارتقاء عدالت فضایی از طریق تخصیص بودجه در مناطق کم‌برخوردار. هم‌راستایی دالان‌های پیشنهادی با شبکه دسترسی، سبب جلوگیری از تداخل با کاربری‌های شهری، کاهش تعارضات مالکیت و کاهش هزینه‌های اجرایی می‌شود. نوآوری‌های پژوهش شامل معرفی نمایه‌ای جدید برای ارزیابی پیوستگی فضای سبز، شناسایی مناطق میانی به‌عنوان کمربند واسط با ظرفیت ایجاد قدمگاه‌های انتقالی و همچنین توجه به نابرابری‌های فضایی با وجهه‌ای بوم‌شناختی- اجتماعی است. در نهایت حفاظت از هسته‌های اکولوژیک، احیای رود- دره‌ها، تقویت قدمگاه‌های انتقالی و ایجاد دالان‌های جدید به منظور ارتقاء پیوستگی و زیست‌پذیری شهر ضرورت دارد.

مقدمه

کلان‌شهرها، به عنوان کانون‌های اصلی سکونت و توسعه، با چالش‌های فزاینده‌ای در پایداری اکولوژیک مواجه هستند که از جمله مهم‌ترین آن‌ها، تکه‌تکه شدن فضاهای سبز و در نتیجه اختلال در جریان مواد، انرژی، تبادل اطلاعات ژنتیکی و همچنین افت زیست‌پذیری است. خدمات اکوسیستمی متأثر از گسستگی فضاهای سبز، بسیار متنوع (شامل ذخیره کربن، کاهش ریزگردها، کاهش اثر جزایر حرارتی، تغذیه آب زیرزمینی، کنترل سیلاب شهری، کاهش فرسایش خاک، بقای تنوع زیستی از طریق حمایت جابه جایی، تغذیه و تامین پناهگاه گونه‌ها، حفظ سلامت شهروندان و ارتقاء کیفیت بصری فضا) است (Albalawi, 2025; Moran et al., 2025). پیوستگی ساختاری فضاهای سبز (قابلیت اتصال لکه‌های سبز و دالان‌های سبز)، نقش محوری در حفظ کارکردهای اکولوژیک دارد. کاهش انسجام ساختار اکولوژیک می‌تواند به افت تاب‌آوری شهر بر اثر کاهش کارکردهای اکولوژیک منجر شود (Alemohammad & Khosravi, 2025; Bennett & Mulder, 2019; UNEP-WCMC, 2020). در این شرایط، بازاندیشی به ارتقاء پیوستگی فضای سبز و جلوگیری از جدایی زیستگاه‌ها به منظور بهبود وضعیت عدالت فضایی در مناطق مختلف شهری، ضروری و هوشمندانه است.

در پاسخ به چالش بهبود توزیع و ارتباطات فضاهای سبز، مفهوم شبکه اکولوژیک^۱ به عنوان رویکردی راهبردی در نقطه عطف طرح‌ریزی و مدیریت شهری با دیدی پسامدرن مطرح شده است. شبکه اکولوژیک با سه عنصر (هسته‌های اکولوژیک^۲، دالان‌ها^۳ و قدمگاه‌های انتقالی^۴)

تعریف می‌شود و تعامل این عناصر ساحتاری تضمین‌کننده تداوم فرآیندهای بوم‌شناختی سیمای سرزمین است. این چارچوب نظری، دقیقاً همان چیزی است که در بوم‌شناسی سیمای سرزمین از آن به عنوان تاثیر ساختار بر کارکرد یاد می‌شود (Zhao & Chen, 2017; Meerow & Newell, 2025). از این رهگذر با استفاده از ابزارهای مدل‌سازی جریان‌های اکولوژیک و ابزارهای تحلیل ساختار سیمای سرزمین، به بهینه‌سازی ساختار فضایی و در نتیجه بهبود کارکرد اکوسیستم‌های شهری کمک می‌کند (Zhou et al., 2023; Liu et al., 2021; Huang et al., 2022; Gao et al., 2018). برای تحلیل شرایط موجود سیمای سرزمین شهری و بازطراحی شبکه‌های اکولوژیک آن، حداقل باید هشت اصل از مهم‌ترین اصول بنیادین بوم‌شناسی سیمای سرزمین (به شرح زیر)، مورد توجه، ملاک تصمیم و پشتیبان اقدام قرار گیرد:

۱- لکه‌های سبز بزرگ، با نقش کلیدی در حفظ کارکردهای اکولوژیک، به عنوان مراکز ثقل شبکه اکولوژیک شناخته می‌شوند (Forman, 1995).

۲- اتصال و مجاورت فضایی بین لکه‌های سبز و دالان‌های سبز، برای حفظ جریان‌های اکولوژیک حیاتی مانند حرکت آب در رو و زیر زمین، جریان باد، جابه‌جایی گونه‌ها، پراکنش بذر و تبادل اطلاعات ژنتیکی اهمیت دارد (Popescu, 2022).

۳- شکل هندسی لکه‌ها و دالان‌ها باید تا حد امکان دارای نسبت محیط به مساحت پایین باشد تا از اثرات حاشیه‌ای کاسته و بر پایداری اکولوژیک افزوده شود (Battisti, 2013).

¹ Ecological Network

² Ecological Cores

³ Corridors

⁴ Stepping Stones

استفاده شده است که سبب نمایش گرادیان افقی تغییرات پیوستگی ساختاری شده است. این روش، تولید نقشه‌های رستری شبه نقشه‌های نقاط داغ^۷ را ممکن می‌سازد و با نمایش شدت وقوع ویژگی، پشتیبانی تصمیم‌گیری هستند.

۸- همسوسازی و هم‌افزایی فضاهای سبز شهری و شبکه دسترسی شهری با یکدیگر، برای تحقق عدالت فضایی و کارایی پایدار ضروری است (Cook et al., 2024; Fan et al., 2021). بر اساس مرور مطالعات، پیوند و تلفیق سبزه‌ها و پارک‌ها با معابر پیاده، دوچرخه و خیابان‌ها و بزرگراه‌ها، به‌عنوان راهبردی کلیدی برای تسهیل کاهش آلودگی، حرکت آسان شهروندان و ارتقاء زیست‌پذیری شهری شناخته شده است (Norouzi & Sozanchi, 2022; Ma et al., 2024; Liu et al., 2020; Wang et al., 2024). در ایران و به ویژه تهران، پژوهش‌ها نشان داده‌اند که گسستگی میان فضاهای سبز و شبکه دسترسی شهری، محدودیت‌های قابل‌توجهی در کارکردهای اکولوژیک و اجتماعی ایجاد کرده است (Rafizadeh et al., 2021; Morassafar, 2024).

در ایران گرچه توجه به حفاظت از فضای سبز افزایش یافته است، اغلب پژوهش‌ها، محدود به تحلیل‌های توصیفی، سنجش توزیع فضای سبز بر اساس تراکم و سرانه و همچنین ارزیابی کیفی زیباشناختی بوده‌اند و به شبکه‌ای بودن و انسجام فضاهای سبز، کمتر پرداخته شده است (Alemohammad & Ramezani, 2025; Roodsari, 2022; Naroie et al., 2022; Omidpour et al., 2020; Saboonchi et al., 2018; Shahhosseini et al., 2023). بی‌توجهی به اتصال لکه‌ها و دالان‌ها باعث شده است که سیاست‌های فضایی بر لکه‌های سبز پراکنده تمرکز کنند، بدون آن‌که ساختار منسجم و کارکرد شبکه‌ای را تقویت کنند.

در کلان‌شهر تهران، شواهد ماهواره‌ای نشان می‌دهد که طی نیم قرن اخیر روند تکه‌تکه شدن پوشش گیاهی و پراکندگی زیرساخت‌های سبز ادامه‌دار بوده و هست (Allahyari & Salehi, 2020; Yazdanpanah et al., 2015; Fotoohi & Bargh Jelveh, 2018; Nasehi et al., 2023). تلاش‌های پراکنده این سال‌ها، همچون توسعه فازهای مختلف کمربند سبز پیرامونی، تملک باغ‌ها و اراضی سبز درون‌شهری، بیشتر به‌مثابه واکنشی به

۴- وجود قدمگاه‌های انتقالی در میان هسته‌های اکولوژیک یا زیستگاه‌های بزرگتر، بهتر از نبودن آن‌ها است. این لکه‌های طبیعی کوچکتر به عنوان پلکان ارتباطی برای کاهش اثرات تکه‌تکه شدن سیمای سرزمین عمل می‌کنند (Zhang et al., 2023). از آن‌جا که وجود این لکه‌های میانجی در فضای شهری می‌تواند با کاربری فراغتی و زیباسازی فضا هم‌راستا شود، اهمیت آن‌ها دوچندان می‌شود (Sun et al., 2024).

۵- رود- دره‌ها و کوهپایه‌ها به دلیل ساختار انحندار طبیعی خود، نقش اکوتون دارند و نسبت به ساختارهای شطرنجی ساخته دست بشر، تفاوت ساختاری چشمگیر و تمایز کارکردی اساسی ایجاد می‌کنند (Bezubik et al., 2018; Li, 2022).

۶- حفاظت از لکه‌ها و دالان‌های با ارزش حفاظتی، مستلزم در نظر گرفتن پهنه بافر پیرامونی به‌منظور کاهش تأثیرات منفی ناشی از تخریب سیمای سرزمین و آلودگی است (Czochański & Wiśniewski, 2018; Popescu, 2022). بافر ۸۰ تا ۱۲۰ متری در هر سوی رودخانه‌های شهری، حداقل عرض لازم برای کارکرد اکولوژیک پایدار آن‌ها دانسته شده است (EPA, 2017; Tockner et al., 2010). درباره رود- دره‌های تهران، برآورده شده است که حفظ بافر ۱۰۰ متری می‌تواند دمای محیط پیرامون را تا ۳ درجه کاهش دهد، ۶۰ درصد از تنوع زیستی حاشیه آبراهه‌ها را صیانت کند و نفوذپذیری خاک را ۴۰ درصد افزایش دهد (Salehi et al., 2019).

۷- هر مکان تحت تأثیر ارتباطات افقی در شعاع‌های معین پیرامون خود قرار دارد که توجه به آن سبب تسهیل جریان خدمات اکوسیستمی در مقیاس دسترسی‌های محلی می‌شود (Gonzalez, 2017). بر اساس مرور مطالعات، روش پنجره متحرک^۵ نسبت به روش‌های سنتی مانند بافر یا گریده^۶ با توانایی و دقت بیشتری، جزییات پیوستگی پوشش گیاهی در پیرامون را بازتاب می‌دهد. کاربرد این روش در شناسایی مناطق بحرانی و اولویت‌دار برای حفظ یا بازآفرینی فضای سبز اهمیت دارد (Gandhi et al., 2020; Mahfoudhi et al., 2024). در پژوهش حاضر نیز به منظور ملاک عمل قرار دادن همسایگی‌ها و ارتباطات افقی، از روش پنجره متحرک

⁵- Moving Window

⁶- Buffer or Grid

⁷- HotSpot Map

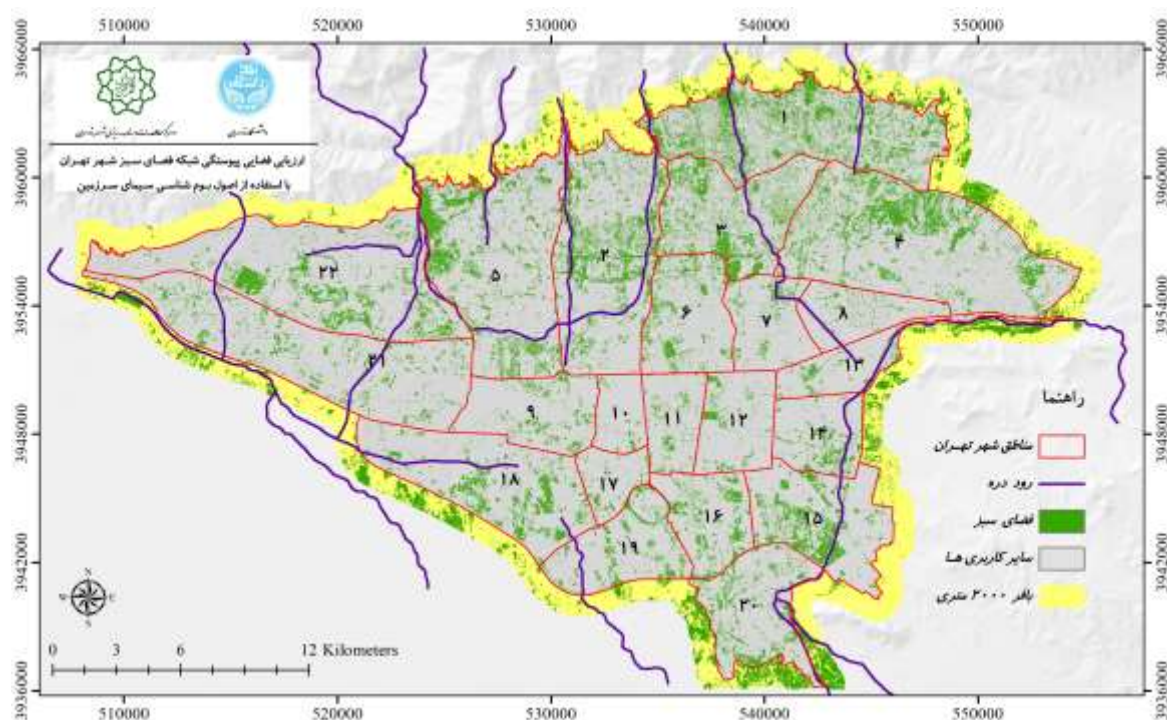
پرسش اصلی را دنبال می‌کند: (۱) وضعیت پیوستگی ساختاری فضای سبز شهر تهران در بستر مهمترین ویژگی ژئومورفولوژیک (ارتفاع) چگونه است؟ (۲) بر اساس وضعیت موجود، کدام هسته‌های اکولوژیک، قدمگاه‌های انتقالی و دالان‌ها برای حفظ، تقویت و توسعه پیوستگی فضایی شبکه اکولوژیک شهر اهمیت دارند؟ (۳) در هر پهنه‌ای از سرزمین، چه راهبردهای مدیریتی باید اتخاذ شود و بینش‌های حاصل چیست؟ این رویکرد با این نوید که هر پهنه این سرزمین نیازمند راهبردی ویژه است، نه تنها تصویری نظام‌مند از وضعیت پیوستگی فضای سبز تهران ارائه می‌دهد، بلکه امکان مداخله هدفمند برای ارتقاء عدالت فضایی از طریق پیوسته‌تر نمودن شبکه اکولوژیک شهر را فراهم می‌آورد.

مواد و روش‌ها

منطقه مورد بررسی: کلانشهر تهران، پایتخت پرجمعیت ایران، در مختصات جغرافیایی $35^{\circ}34'$ تا $35^{\circ}50'$ عرض شمالی و $51^{\circ}04'$ تا $51^{\circ}34'$ طول شرقی گسترده شده است. وسعت محدوده قانونی شهر تهران در حدود ۷۳۰ کیلومتر مربع است. اقلیم تهران نیمه‌خشک و قاره‌ای است اما خرد اقلیم‌های متنوعی از شمال شهر خشک‌تر و پرباران‌تر تا جنوب شهر خشک‌تر و گرم‌تر وجود دارد. ساختار ناهمگون تهران با بافت‌های متراکم، ویلاها، رود-دره‌ها، بزرگراه‌ها و موانع طبیعی، پراکنش نامتوازن فضای سبز را رقم زده است. موقعیت جغرافیایی خاص تهران در دامنه جنوبی رشته‌کوه البرز و الگوی ارتفاعی پلکانی آن، از بیش از ۲۳۰۰ متر تا حدود ۱۰۰۰ متر است. شکل ۱، پوشش فضای سبز مناطق بیست و دو گانه شهر تهران را نشان می‌دهد. فضای سبز شهر تهران شامل مساحتی بیش از ۱۰۴۶۲ هکتار است.

بحران‌های محیط‌زیستی و فشارهای ناشی از کمبود دسترسی به فضاهای سبز بوده است تا بخشی از یک طرح‌ریزی شبکه اکولوژیک منسجم (Nasr et al., 2025; Nasrabadi et al., 2023; Hassanpour et al., 2020). در مقایسه با اهمیت روند جاری منجر به تضعیف پایداری بوم‌شناختی در سیمای سرزمین تهران، پژوهش‌ها ناکافی بوده و منتج به پیشنهاد ملموس مبتنی بر مکان نبوده‌اند. مهمترین و جدیدترین مطالعات موجود (Alavi et al., 2024; Ramezani Mehrian, 2022; Naghibi et al., 2024)، با وجود ارزش‌هایشان یا در مقیاس محله، ناحیه و منطقه انجام شده‌اند، یا صرفاً به تحلیل ناهمگنی و نابرابری فضای سبز پرداخته‌اند، بدون آن‌که پیوستگی ساختاری فضای سبز و عدالت فضایی را با نمایه‌ای دقیق‌تر و دیدی وسیع‌تر (مثلاً با تحلیل مقایسه‌ای مبتنی بر ارتفاع) تحلیل کنند. همچنین نتیجه کارشان، هرگز در قالب ارائه نقشه عناصر شبکه اکولوژیک نبوده است. پس با وجود پژوهش‌های متعدد در زمینه فضای سبز تهران، یک فقدان در ارائه چارچوبی راهبردی، هدایتگر و مبتنی بر مکان برای تحلیل پیوستگی فضای سبز و تقویت پیوندهای شبکه اکولوژیک شهر وجود دارد.

پژوهش حاضر به دنبال تدوین چارچوبی نوین برای سنجش وضعیت موجود پیوستگی فضای سبز و همچنین طراحی و مدیریت راهبردی شبکه اکولوژیک کلان‌شهر تهران بر اساس اصول بوم‌شناسی سیمای سرزمین است. اهداف عبارت است از: (۱) شناسایی و تحلیل الگوی فضایی پیوستگی فضاهای سبز در کمربندهای ارتفاعی، (۲) شناسایی، پیشنهاد و ترسیم عناصر شبکه اکولوژیک به منظور تقویت پیوندهای آن و (۳) ارائه بینش‌های کلیدی و راهبردهای مدیریتی برای حفظ، تقویت و توسعه پیوستگی شبکه اکولوژیک برای زیست‌پذیری بیشتر و ارتقاء عدالت فضایی. بر این اساس، پژوهش حاضر سه



شکل ۱- محدوده مورد مطالعه با نمایش توزیع فضای سبز در منطقه بندی مشخص (۱۴۰۳)

میبینیم تا از "بی‌اعتبار شدن محاسبات" در مرز شهر که در اغلب مطالعات رخ می‌دهد، جلوگیری نماییم. **روش کار:** در پژوهش حاضر، ابتدا با بهره‌گیری از داده‌های سنجش از دور و تحلیل ساختار سیمای سرزمین، یک نمایه تلفیقی بر اساس سه اصل اول بوم‌شناسی سیمای سرزمین تدوین می‌شود که امکان تحلیل دقیق مبتنی بر مکان پیوستگی فضای سبز را فراهم می‌آورد. این رویکرد امکان شناسایی نقاط ضعف و قوت پیوستگی فضای سبز را فراهم می‌کند و مبنایی برای مداخلات هدفمند به وجود می‌آورد. همچنین شناخت سیمای سرزمین در بستر کمربندهای ارتفاعی، یک چارچوب تحلیلی نظام مند به منظور بازطراحی شبکه اکولوژیک فراهم می‌آورد. بر همین اساس و با توجه به سایر اصول بوم‌شناسی سیمای سرزمین، هسته‌های اکولوژیک، دالان‌ها و قدمگاه‌های انتقالی، شناسایی، پیشنهاد و ترسیم می‌شود. شکل ۲ چارچوب فرآیند پژوهش را نشان می‌دهد که قابلیت استفاده در مطالعات مشابه در مقیاس شهر و کلان‌شهر را دارد.

توزیع فضای سبز به گونه‌ای است که در مناطق شمالی تهران، سرانه فضای سبز به‌طور متوسط بیش از ۳۰ مترمربع است، در حالی که در مناطق جنوبی، این میزان به کمتر از ۵ مترمربع هم می‌رسد (Hosseini et al., 2012; Laghai & Bahmanpour, 2019). بر اساس مطالعات جدیدتر و دقیق‌تر که مبتنی بر محاسبه سرانه فضای سبز بر اساس شاخص سبزی‌نگی (و نه بر اساس وسعت مرز قراردادی پارک‌های شهری مملو از سطوح سیمانی) بوده‌اند، سرانه فضای سبز از حدود ۱/۳ در منطقه ۱۰ تا حدود ۵۰/۵ در منطقه ۲۲، متغیر بوده است (Alemohammad & Ramezani Mehrrian, 2025). گستره محدود مورد مطالعه، محدوده‌ای به وسعت ۲۰۰۰ متر فراتر از مرز کالبدی و قانونی شهر را نیز در بر می‌گیرد. این تصمیم مهم، با هدف در نظر گرفتن مجاورت‌ها و اثرات حاشیه‌ای حیاتی بین بوم‌سازگان‌های شهری و پیرامون آن در محاسبات، اتخاذ شده است، زیرا فرآیندهای اکولوژیک، به مرزهای قراردادی شهر محدود نمی‌شوند. در چنین گستره‌ای، می‌توانیم پیوستگی ساختاری فضاهای سبز را در ارتباط با مناطق پیرامونی



شکل ۲- سلسله مراحل چارچوب روش‌شناسی پژوهش

NDVI و ویژگی‌های طیفی استفاده شد. برای ارزیابی صحت طبقه‌بندی (دو نوع طبقه فضای سبز و سایر کاربری‌ها)، از نقاط تصادفی کنترل زمینی (به صورت پراکنده در مناطق غیرصعب‌العبور) با حضور میدانی و تصاویر Google Earth استفاده شد. با محاسبه پارامتر دقت کلی (۸۹/۰۹ درصد) و ضریب کاپا (۸۴ درصد)، اطمینان از صحت طبقه‌بندی فراهم شد.

تحلیل پیوستگی سیمای سرزمین با تدوین نمایه مناسب: برای سنجش پیوستگی ساختاری فضای سبز، از نرم‌افزار Fragstats و سه سنجه کلیدی مبتنی بر سه اصل اول، استفاده شد. اول PLAND^۸ (درصد سطح اشغال شده توسط لکه‌های سبز که نماینده کمیت حضور فضای سبز است)، دوم PROX^۹ (مجاورت و اتصال فضایی که نماینده ارتباط اکولوژیک است) و سوم LSI^{۱۰} (پیچیدگی و کیفیت شکل هندسی که نماینده کارکرد اکولوژیک است). به‌منظور ایجاد یک نمایه تلفیقی، هر سه سنجه در یک چارچوب محاسباتی یکسان و هماهنگ قرار گرفتند. پس در نرم‌افزار Arc GIS، مقادیر این سنجه‌ها در بازه ۰ تا ۱ نرمال‌سازی و بر اساس نظر کارشناسان و نرم‌افزار Expert Choise وزن‌دهی شدند. در نهایت، نمایه

داده‌ها و پیش‌پردازش: برای استخراج فضای سبز، از تصاویر ماهواره‌ای Sentinel-2 با قدرت تفکیک ۱۰ متر مربوط به خرداد ماه سال ۱۴۰۳ استفاده شد. داده‌ها پس از دریافت، تصحیحات رادیومتریک و اتمسفری را پشت سر گذاشتند. در ادامه، شاخص NDVI محاسبه گردید و به‌عنوان مبنای تمایز سطوح سبز از سایر کاربری‌ها مورد استفاده قرار گرفت. این شاخص برای استخراج نقشه فضای سبز، نسبت مشخصی از باندهای مادون قرمز نزدیک و قرمز مرئی را مورد بررسی قرار می‌دهد. این دو باند توسط گیاهان، به مقدار بسیار زیاد جذب و منعکس می‌شوند. پس NDVI، برای تشخیص پوشش گیاهی دارای کیفیت بالا، مناسب است. مقادیر NDVI از ۱- تا ۱+ متغیر است. در این پژوهش آستانه تعیین کننده فضای سبز به روش آزمون و خطا، مقدار ۰/۱۷ تعیین شد. بر این اساس سگمنت‌هایی که میانگین شاخص NDVI در پیکسل‌های تشکیل دهنده آن‌ها برابر یا بیشتر از این مقدار باشد به عنوان فضای سبز در نظر گرفته شدند.

استخراج فضای سبز و ارزیابی دقت: فرآیند طبقه‌بندی به روش شی‌گرا در نرم‌افزار Ecognition Developer اجرا شد. ابتدا سگمنت‌های تصویر بر اساس شکل، بافت و فشردگی مشخص شد و سپس قواعد تصمیم‌گیری برای شناسایی سطوح سبز با بهره‌گیری از

^۸ Percentage of Landscape

^۹ Proximity

^{۱۰} Landscape Shape Index

پیوستگی^{۱۱} (CI)، در پنجره متحرک با شعاع ۵۰۰ متر، محاسبه گردید. انتخاب این اندازه برای شعاع پنجره دایره‌ای، از چند جهت پیشنهاد می‌شود: اول، با درک روزمره مردم محلی از پیاده‌روی در محدوده همسایگی (حدود ۵ تا ۷ دقیقه) هم‌راستا است. دوم، با ساختار بسیار ناهمگون سیمای سرزمین شهرهایی چون تهران هماهنگ است. سوم، تعادلی میان دقت در مقیاس خرد محلی و قابلیت تعمیم به مقیاس درشت ایجاد کرده تا از جزئی‌نمایی و کلی‌نمایی پرهیز شود (Alemohammad et al, 2022; Zhang et al, 2022; Li et al, 2021; WHO, 2017). مطابق معادله ۱، روی هم‌اندازی سه سنجه توسط این عملیات جبری در Arc GIS و با حرکت پنجره به ازای همه پیکسل‌های سیمای سرزمین، انجام شده است. مقدار صفر نشان‌دهنده حداقل پیوستگی و مقدار یک نمایانگر بیشترین پیوستگی فضای سبز است.

معادله ۱- روش محاسبه نمایه پیوستگی فضای سبز:

Connectivity Index_{local}

$$\left(0.52 \times \frac{PLAND}{100}\right) + \left(0.3 \times \frac{PROX_{Mean}}{PROX_{max}}\right) + \left(0.18 \times \left(1 - \frac{LSI}{LSI_{max}}\right)\right)$$

در انتخاب سنجه‌های سیمای سرزمین برای ارزیابی پیوستگی، ملاک‌های زیر مورد نظر قرار گرفت (Umer et al., 2023; Alemohammad et al., 2022; Nowosad & Stepinski, 2019; Zatelli et al., 2019): (۱) سادگی، دقت و تفسیرپذیری بالا، (۲) اجتناب از هم‌پوشانی مفهومی بین سنجه‌ها به منظور حفظ جلوگیری از نتایج تکراری یا افزونگی، (۳) سازگاری کامل با روش پنجره متحرک، همسایگی و مقیاس خرد محلی، (۴) قابلیت تعمیم‌پذیری در مقیاس درشت و (۵) انطباق با مفهوم پیوستگی ساختاری از طریق پوشش سه ویژگی فراوانی، مجاورت و شکل لکه‌ها که بر ارائه خدمات بوم‌سازگانی اثرگذارند. سنجه‌های انتخاب شده، این ویژگی‌ها را به صورت توأمان دارا هستند و کارآمدی بالاتری نسبت به سایر سنجه‌ها دارند. برخی از دیگر سنجه‌ها به دلیل همپوشانی با این سنجه و جلوگیری از ایجاد افزونگی محاسباتی، کنار گذاشته شده است و برخی هم به دلیل ماهیت کلان محاسباتی و ناسازگاری با تحلیل پنجره متحرک.

تحلیل الگوی فضایی پیوستگی فضاهای سبز در کمربندهای ارتفاعی: برای تحلیل پیوستگی ساختاری فضاهای سبز در بستر توپوگرافی متنوع کلان‌شهر تهران (درک بهتر تأثیر پیوستار ارتفاعی بر الگوی پیوستگی)، مدل رقومی ارتفاع^{۱۲} (DEM) برای تقسیم‌بندی ارتفاعی کل عرصه مطالعه مورد توجه قرار گرفت. ابتدا، با رویت و ارزیابی بصری همزمان دو لایه CI و خطوط تراز ارتفاعی، خطوط شکست^{۱۳} به عنوان آستانه‌های ارتفاعی که در آن‌ها تغییرات ناگهانی و چشمگیر در الگوی پیوستگی فضاهای سبز مشاهده می‌شد، شناسایی گردید. این روش مبتنی بر تفسیر کارشناسانه و بینش‌مندانه بود که امکان تعیین خطوط تراز را فراهم آورد با بیشترین تمایز در پیوستگی ساختاری فضای سبز. پس از تقسیم‌بندی کمربندهای ارتفاعی، در هر یک از این کمربندها، میانگین و انحراف معیار CI به صورت مستقل محاسبه گردید. این بخش ضمن ایجاد امکان تحلیل مقایسه‌ای فضا (درک چگونگی تأثیر ژئومورفولوژی بر پیوستگی ساختاری فضای سبز)، در نهایت به ارائه بینش‌های فضایی و مدیریت راهبردی مبتنی بر مکان کمک می‌نماید. در تحلیل آماری پیوستگی ساختاری فضای سبز کمربندهای ارتفاعی، از آزمون‌های کولموگروف-اسمیرنوف (برای بررسی نرمال بودن) و سپس آزمون ANOVA (برای بررسی معناداری) استفاده شده است.

شناسایی هسته‌های اکولوژیک، قدمگاه‌های انتقالی و دالان‌ها: برای شناسایی هسته‌ها و دالان‌ها، ابتدا توزیع مقادیر CI بررسی شد. بر اساس روش مجزاسازی طبیعی کل عرصه مورد مطالعه در پنج طبقه از "پیوستگی بسیار زیاد" تا "پیوستگی بسیار کم" با آستانه‌هایی مشخص طبقه‌بندی شد. این روش برای نمایش بهتر توزیع داده‌ها، انحراف معیار درون هر طبقه را اندکی کاهش و انحراف معیار میان طبقات را اندکی افزایش می‌دهد. لکه‌های دارای مقادیر بسیار زیاد و زیاد (دارای بزرگی و یا مجاورت زیاد با یکدیگر)، به عنوان هسته‌های شبکه اکولوژیک شناخته و ترسیم شدند. لکه‌های کوچکتر میانجی که دارای مقادیر بسیار زیاد و زیاد بودند (و در بین این هسته‌های بزرگ قرار داشتند)، به عنوان قدمگاه‌های انتقالی مشخص شدند. به این ترتیب لازم است دالان‌هایی

¹²- Digital Elevation Model

¹³- Breaklines

¹¹- Connectivity Index

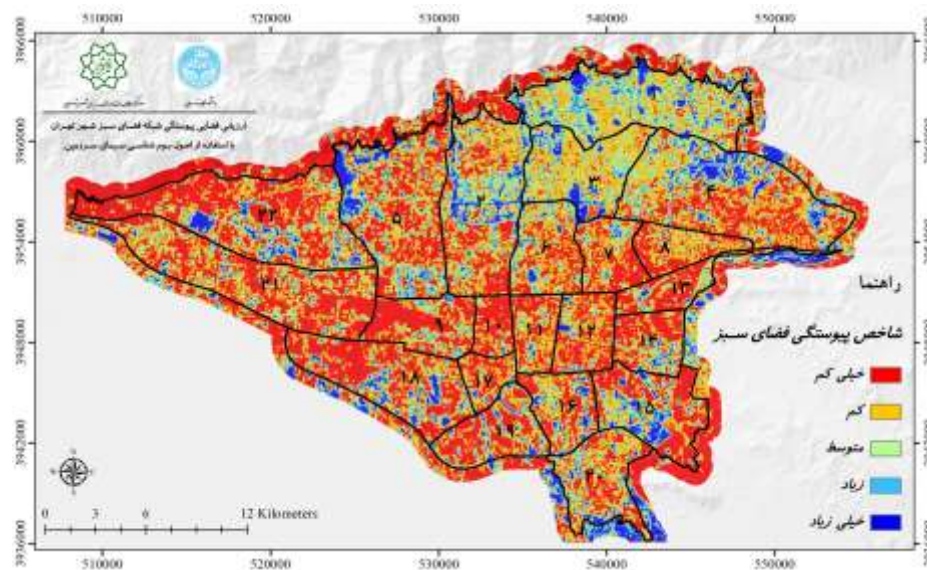
دسترسی شهری به عنوان نماینده مهم محیط انسان‌ساخت، مورد بررسی قرار گرفت. در نهایت، شبکه اکولوژیک معرفی شد و مجموعه‌ای از بینش‌های فضایی و محورهای اولویت‌دار برای حفظ، تقویت و توسعه پیوستگی فضاهای سبز پیشنهاد گردید که مسیر مداخلات و تخصیص منابع را به صورت مبتنی بر مکان روشن می‌سازد.

نتایج

تحلیل الگوی فضایی پیوستگی شبکه اکولوژیک بر اساس نمایه تلفیقی: شکل ۳، CI را نمایش می‌دهد که به ۵ طبقه تقسیم شده است. آستانه‌های این طبقات شامل ۰ تا ۰/۰۰۱۷۱، ۰/۰۰۱۷۱ تا ۰/۲۱۲۷۸، ۰/۲۱۲۷۸ تا ۰/۵۰۴۸ و ۰/۵۰۴۸ تا ۰/۳۴۲۹۵، ۰/۳۴۲۹۵ تا ۰/۸۹۸۸۱ بوده است.

باشد که بیشترین اتصال را بین قدمگاه‌ها با یکدیگر و با هسته‌ها برقرار می‌نمودند. برای افزایش امکان‌پذیری اجرایی دالان‌های پیشنهادی، لایه شبکه دسترسی (خیابانها و بزرگراه‌ها) مورد توجه قرار گرفت. دالان‌های پیشنهادی به نحوی ترسیم شد که با شبکه دسترسی هماهنگ باشد و در عین حال ارتباط میان هسته‌های اکولوژیک و قدمگاه‌های انتقالی را برقرار نماید. همچنین بافر ۱۰۰ متر از هر دو سو، هم برای رود-دره‌ها و هم برای دالان‌های پیشنهاد شده، در نظر گرفته شده است که حفظ، تقویت یا توسعه پیوسته فضای سبز باید مورد نظر باشد.

ارائه بینش‌های فضایی و محورهای اولویت‌دار برای مدیریت راهبردی: در این پژوهش، الگوی فضایی پیوستگی فضای سبز شهری در پیوند با ویژگی‌های کالبدی (توپوگرافی به عنوان مبنای اصلی شکل زمین، رود-دره‌ها به عنوان ستون فقرات محیط طبیعی و شبکه



شکل ۳- توزیع نمایه طبقه‌بندی شده پیوستگی فضای سبز برای کلانشهر تهران

به نظر می‌رسد شمال شهر از بیشترین پیوستگی فضایی برخوردار است، در حالی که عرصه‌های مرکزی و شرقی و سپس بخش‌هایی از غرب و جنوب با گسستگی فضایی شدید و ریزدانه‌تر شدن مواجه‌اند. همچنین بدترین وضعیت به ترتیب به مناطق ۱۰، ۹، ۸، ۲۱، ۱۲، ۱۷، ۱۱، ۷، ۱۳، ۱۴، ۲۲، ۱۸، ۱۹، ۶، ۱۶، ۲۰، ۱۵، ۵، ۴، ۲، ۳ و ۱ تعلق دارد. منطقه ۱ در شمالی‌ترین بخش تهران بهترین وضعیت (عدد پیوستگی برابر با ۰/۲۷) را دارد و منطقه ۱۰ در

عرصه‌هایی که دارای رنگ آبی تیره هستند دارای بالاترین پیوستگی در فضای سبز هستند. عرصه‌های آبی متوسط و آبی کم‌رنگ در اطراف عرصه‌های آبی تیره هستند. سپس عرصه‌های دارای رنگ زرد در مرتبه بعدی قرار دارد. عرصه‌های قرمز رنگ کمترین پیوستگی فضای سبز دارند. این ۵ طبقه به ترتیب، ۴۰٪، ۳۱٪، ۱۴٪، ۹٪ و ۶٪ از سطح منطقه مورد مطالعه را پوشش می‌دهند.

میانی ترین بخش تهران، بدترین وضعیت را (عدد پیوستگی برابر با ۰/۷) دارد.

تحلیل الگوی فضایی پیوستگی فضای سبز بر اساس رود- دره ها و طبقات ارتفاعی: مطابق جدول ۱، میانگین بیانگر سطح متوسط کلی پیوستگی ساختاری در هر کمر بند است و انحراف معیار، پراکندگی فضایی و ناهمگونی را نشان می دهد. به منظور آزمون آماری تفاوت های پیوستگی ساختاری بین کمر بند های ارتفاعی، از آزمون تحلیل واریانس ANOVA استفاده شد. پیش از اجرای آزمون، فرض نرمال بودن توزیع داده ها (با آزمون کولموگروف-اسمیرنوف) مورد بررسی و تایید قرار گرفت. نتایج، تفاوت آماری بسیار معنی داری را بین میانگین نمایه در سه کمر بند ارتفاعی نشان داد:

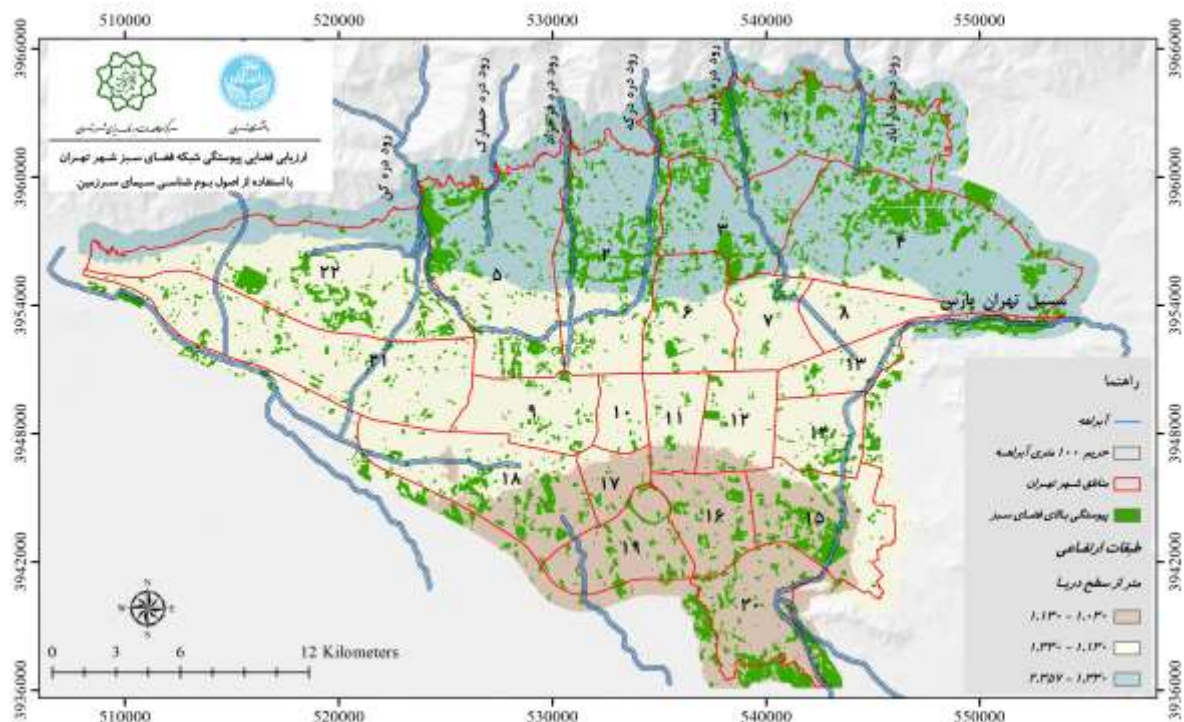
$(F(2, 295249) = 6350.66, p < .001)$. در اینجا درجه آزادی صورت (۲) از "تعداد گروه ها منهای یک" (۳-۱) و درجه آزادی مخرج (۲۹۵۲۴۹) از "تعداد مشاهدات منهای تعداد گروه ها" (۳-۲۹۵۲۵۲) محاسبه شد. مشاهدات در این جا، همان پیکسل ها هستند. این شواهد کمی به صورت قاطع تری تأیید می کند که بالابند با بیشترین میانگین پیوستگی، اولویت واضحی برای اعمال سیاست های حفاظتی دارد. میان بند که کمترین میزان پیوستگی را دارا است، به عنوان کانون بحرانی و در عین حال پرضرفیت برای مداخلات فعال، شناسایی می شود. پایین بند نیز با پیوستگی متوسط اما ناهمگونی بالا، مستلزم راهبردهای مدیریتی منعطف و زمینه محور است.

جدول ۱- محاسبات آماری نمایه پیوستگی در کمر بند های ارتفاعی و کلانشهر تهران

بالابند	میان بند	پایین بند	کل تهران
۰/۱۹۵۲	۰/۱۲۰۲	۰/۱۷۸۲	۰/۱۵۹۳
انحراف معیار نمایه پیوستگی	۰/۱۷۹۸	۰/۱۴۹۷	۰/۱۷۲۵

در شکل ۴، کمر بند های ارتفاعی، رود- دره ها و مناطق با فضای سبز دارای پیوستگی بسیار زیاد و زیاد مشخص است. این تحلیل ارتفاع محور کمک می کند تا درک عمیق تری از چگونگی ترکیب و پیوند لکه های سبز با مهمترین دالان های طبیعی (رود- دره ها) داشت. مسیر

رود- دره های اصلی تهران در شمال و سپس جنوب، به طور قابل توجهی با مناطق دارای پیوستگی غنی فضای سبز، هم پوشانی دارند. پس، فرصت ها و چالش های امکان پذیری حفظ، تقویت و توسعه شبکه بوم شناختی در هر کمر بند ارتفاعی بهتر نمایان است.



شکل ۴- الگوی فضایی پیوستگی شبکه اکولوژیک در بستر پایه سرزمین

پایین‌بند: ارتقاء کیفیت و اتصال لکه‌های متوسط و بهره‌گیری از ظرفیت رود-دره‌ها.

در مناطق با ارتفاع ۱۰۳۰ متر تا ۱۱۳۰ متر از سطح دریا، عمدتاً اراضی دشتی و مناطق هموارتر جنوبی شهر قرار دارد که در ادامه منتهی به فضاهای باز و اراضی کشاورزی خارجی جنوب تهران می‌شود. در این کمربند، شرایط بینابینی به لحاظ پیوستگی فضای سبز مشاهده می‌شود. هرچند، لکه‌های سبز به‌اندازه بالابند بزرگ و پیوسته نیستند، اما وجود برخی رود-دره‌ها (کن و ادامه حصارک)، لکه‌های سبز متوسط و پارک‌های بزرگ شهری باعث شده که پیوستگی نسبی در فضای سبز ایجاد شود و امکان تقویت پیوندهای اکولوژیک ملموس، در مقایسه یا میان‌بند به سادگی فراهم باشد.

میان‌بند: تقویت دالان‌های واسط پیوند دهنده دو کمربند دیگر با استفاده از قدمگاه‌های انتقالی

در مناطق با ارتفاع ۱۱۳۰ تا ۱۳۳۰ متر از سطح دریا، گذر از دشت به دامنه کوهستان رخ میدهد و شاهد تغییرات فضایی پیچیده‌تر هستیم. کمربند میانی (به دلیل تراکم بالای ساخت‌وساز، بالاترین تراکم جمعیتی، کمبود اراضی باز، تسلط انواع مختلف کاربری‌های اراضی مصنوع، تغییرات شتابان پوشش اراضی)، شاهد گسستگی شدید در

به لحاظ فضایی، هر کمربند ارتفاعی شهر، وضعیتی متفاوت دارد و نیازمند رویکرد متفاوتی به شرح زیر است:

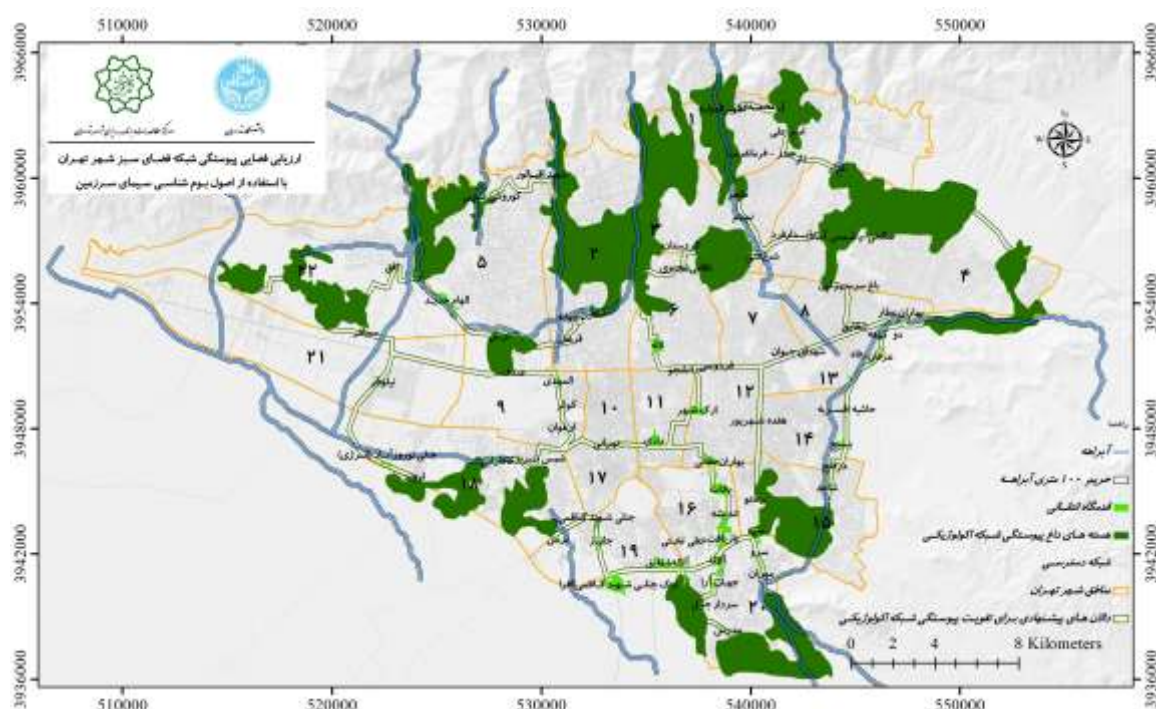
بالابند: حفاظت از لکه‌های بزرگ و رود-دره‌ها.

در مناطق با ارتفاع ۱۳۳۰ متر تا ۲۳۵۷ متر از سطح دریا، اراضی کوهستانی، کوهپایه‌ای و شمالی شهر با شیب‌های تندتر و حضور مشهودتر اراضی طبیعی و باغ‌های سنتی وجود دارد. این کمربند از بالاترین سطح پیوستگی فضایی برخوردار است. لکه‌های سبز با وسعت و تراکم بالاتر پراکنده شده‌اند و ظرفیت بیشتری برای ارائه خدمات اکوسیستمی دارند. نزدیکی این لکه‌ها به یکدیگر و پیوند طبیعی آنها با رود-دره‌ها (مانند دربند، درکه، ولنجک، گلابدره و دارآباد)، موجب شکل‌گیری یک ساختار پیوسته‌تر شده است. حضور لکه‌های دارای شکل هندسی متراکم‌تر، سبب مقاومت بیشتری در برابر اثرات حاشیه‌ای ناشی از توسعه شهری شده است. بیشترین تاب‌آوری اکولوژیک تهران، به سبب لکه‌های بزرگ بالابند و رود-دره‌های آن دارد که مرهون موقعیت با ارزش حفاظتی (ارتفاع بالا و محدودیت ناشی از شیب)، حضور پوشش طبیعی و مرزهای منحنی کوهستانی و تراکم نسبی کمتر ساخت و ساز در واحد سطح است.

فضای سبز و متعاقبا دارای کمترین کارکردهای اکولوژیک و بیشترین آسیب پذیری است. لکه های فضای سبز بیشتر به صورت قطعات کوچک، با شکل هندسی بسیار نامنظم، فاقد مجاورت با یکدیگر و بدون اتصال کارکردی با رود- دره ها و سایر زیرساخت های سبز هستند. این کمربند، نقش خود را به عنوان منطقه میانجی، ایفا نمی کند، اما همین کمربند، بیشترین پتانسیل اکولوژیک را برای احیای این نقش از دست رفته دارد (البته در صورتی که قدمگاه های انتقالی با دالان های جدید تقویت شوند). وجود شبکه معابر و خیابان های اصلی، فرصت مناسبی برای طراحی بهینه دالان های جدید فراهم می کند تا قدمگاه های انتقالی به هسته های اکولوژیک شهر متصل شود.

طرح مدیریت راهبردی پیوستگی فضایی شبکه اکولوژیک شهر تهران: شکل ۵، نمایانگر طرح مدیریت راهبردی پیوستگی فضایی شبکه اکولوژیک شهر تهران است که در آن ۱۵ هسته های اکولوژیک به همراه قدمگاه های انتقالی و دالان هایی برای حفظ، تقویت و توسعه پیوستگی فضای سبز وجود دارد. هسته ها (پلیگون های سبز پر رنگ)، مناطقی از کلانشهر هستند که فضای سبزشان به دلیل وسعت، مجاورت ها و شکل مناسب تر، نقشی محوری در پیوستگی کارکردهای شبکه

اکولوژیک دارد. سپس رود- دره های کهن (که بیشتر در بالابند و سپس پایین بند هستند)، به رنگ آبی مشخص شده است. در صورت آسیب بیشتر به این دالان های طبیعی، اصلاح کارکردهای مختل شده شبکه، در آینده بسیار پرهزینه و حتی غیرممکن خواهد بود. قدمگاه های انتقالی (لکه های متوسط دارای پیوستگی بالا و خارج از محدوده هسته ها) شناسایی شدند و با رنگ سبز کم رنگ مشخص شدند. این قدمگاه ها که بیشتر در همپوشانی با کمربند میانی و کمربند جنوبی هستند، لازم است از طریق دالان هایی جدید به یکدیگر و به هسته های اکولوژیک متصل شوند تا زیست پذیری در قلب مناطق پر تراکم شهری افزایش یابد. با توجه به ظرفیت های واقعی کالبد مصنوع شهر به ویژه محدودیت های توسعه کمی فضای سبز در میان بند، آنچه طراحی شبکه را معنادار و هوشمندانه می سازد. هم راستایی دالان های پیشنهاد شده با شبکه دسترسی است. این امر سبب جلوگیری از تداخل با کاربری های گوناگون شهری، کاهش چالش های حقوقی، کاهش تعارضات مالکیت اراضی و کاهش هزینه های فنی- اجرایی می شود. برای تمامی دالان ها (چه رود- دره ها و چه دالان های پیشنهاد شده)، بافر ۱۰۰ متری از هر دو سو در نظر گرفته شده است.



شکل ۵- طرح مدیریت راهبردی فضا به منظور حفظ، تقویت و توسعه پیوستگی شبکه اکولوژیک تهران

به این ترتیب، با تبدیل شبکه از وضعیت منفصل به ساختاری پیوسته و زنده، نه تنها کمبودهای کمر بند میانی جبران می‌شود، بلکه حلقه‌های واسط مفقوده شبکه اکولوژیک شهر ساخته و بازساخته می‌شود. این رویکرد سبب می‌شود میان عناصر پراکنده و ناهمگون ساختار شبکه اکولوژیک از شمال تا جنوب تهران، پیوستگی

افزایش یابد. مطابق جدول ۲، این طرح بر سه محور راهبردی و اقدام‌های اجرایی متناظر آنها استوار است تا هم‌زمان تثبیت پیوستگی شبکه در عرصه‌های آسیب‌پذیرتر، احیای رود- دره‌ها و حفاظت از هسته‌های اکولوژیک را محقق سازد.

جدول ۲- محورهای راهبردی و اقدام‌های پیشنهادی به منظور حفظ، تقویت و توسعه شبکه اکولوژیک تهران

محور راهبردی	اقدام‌های پیشنهادی
تقویت پیوستگی میان بند و پایین بند با تمرکز بر عدالت فضایی	۱- تقویت و توسعه فضای سبز در قدمگاه‌های انتقالی موجود در کمر بند میانی.
	۲- توسعه پارک‌ها، بوستان‌ها و سبزه‌های کنار گذر پیاده‌روها، خیابان‌ها و بزرگراه‌ها در امتداد درون و برون دالان‌های پیشنهاد شده
	۳- تقویت پیوستگی لکه‌های سبز بزرگ جنوب تهران در اتصال با سایر لکه‌ها و دالان‌ها
	۴- بهره‌گیری از ظرفیت رود- دره‌های جنوب در اتصال با سایر مسیل‌های طبیعی احتمالی باقیمانده برای ارتقاء کارکرد اکولوژیک.
	۵- تقویت فضای سبز بومی و مقاوم در لکه‌های سبز پراکنده و اراضی باز و سبزه‌ها.
احیای رود- دره‌ها و نظارت بر حریم آن‌ها	۶- بازسازی پوشش گیاهی بومی با تأکید بر گونه‌های مقاوم به کم‌آبی.
	۷- نظارت و کنترل برای جلوگیری از تغییر کاربری و بلندمرتبه‌سازی در حریم رود- دره‌ها.
	۸- پاکسازی حریم رود- دره‌ها از پسماندها و پایش و کنترل فاضلاب.
	۹- احیای رود- دره کن در امتداد شمال- جنوب تا بهارستان و حریم راه‌آهن جنوب
	۱۰- احیای رود- دره‌های درکه و دربند از ارتفاعات کوهستانی تا محدوده تجریش.
	۱۱- بازسازی و حفاظت رود- دره فرحزاد در شمال تهران
	۱۲- احیای رود- دره دارآباد و پیوند آن به پارک نیاوران برای تکمیل پیوستگی شمال شرق
	۱۳- توسعه فضای سبز در اطراف رود- دره حصارک در شمال غرب تهران.
حفظ هسته‌های اکولوژیک	۱۴- بازسازی پوشش گیاهی حاشیه مسیل باختر و رودخانه منوچهری منتهی به جاجرود
	۱۵- تدوین ضوابط سختگیرانه بر تخریب فضای سبز در حریم رود- دره‌ها
	۱۶- پهنه‌بندی حفاظت و گردشگری در پارک‌های چیتگر، پردیسان، جنگل لویزان و ارتفاعات دربند.
	۱۷- پایش منظم کیفیت هسته‌های اکولوژیک و وضعیت سلامت گونه‌های گیاهی.
	۱۸- اتصال پارک چیتگر به پارک پردیسان و اتصال پارک لویزان به پارک پلیس.

بحث

تحلیل پیوستگی فضای سبز با دیدی فراتر و در دل شبکه اکولوژیک نشان می‌دهد که علیرغم وجود زیرساختارهای طبیعی بنیادین (هسته‌های اکولوژیک و رود- دره‌ها) در کلانشهر تهران، گسستگی عمیق فضای سبز در کمر بند میانی شهر، کارکرد این شبکه را تضعیف کرده است. تشدید احتمالی این گسستگی در آینده، تهران را در برابر آلودگی هوا، ریزگردها، سیلاب‌ها و تغییر اقلیم آسیب‌پذیرتر خواهد کرد. شبکه اکولوژیک برای ایفای

نقش مؤثر خود، نیازمند اتخاذ رویکردی راهبردی مبتنی بر اصول بوم‌شناسی سیمای سرزمین است تا زمینه تعادل پایدار میان توسعه کالبدی و حفاظت بستر طبیعی شهر فراهم آید. ترکیب میانگین پایین و انحراف معیار کم در میان‌بند نشان می‌دهد که این کمر بند به‌طور یکنواخت در سطحی ضعیف از پیوستگی قرار دارد. این وضعیت، همراه با بالاترین میزان گسستگی فضایی و فشار توسعه، میان‌بند را به شکننده‌ترین و در عین حال کلیدی‌ترین بخش شهر برای بازآفرینی شبکه اکولوژیک تبدیل کرده است. از این رو

بیشترین سرمایه‌گذاری باید در این کمربند انجام شود، به‌ویژه از طریق ایجاد دالان‌های سبز که بتوانند قدمگاه‌های انتقالی را به هسته‌ها متصل کنند. در مقابل، بالابند با میانگین بالاتر اما ناهمگونی فضایی بیشتر، معرف حضور هسته‌های قوی در کنار بخش‌های آسیب‌پذیر است. حفاظت از این هسته‌ها و رود-دره‌ها و پهنه‌بندی مدیریتی متناسب (از حفاظت، گردشگری و سایر استفاده‌ها) اهمیت حیاتی دارد. پایین‌بند نیز با میانگین نسبتاً مناسب اما بیشترین ناهمگونی، شرایط متنوع پیوستگی را نشان می‌دهد که در آن می‌توان با بهره‌گیری از رود-دره‌ها و قدمگاه‌های انتقالی، فرصت‌هایی برای تقویت پیوستگی ساختاری و اتصال کارکردی شبکه اکولوژیک به دست آورد. این تمایزات بیانگر آن است که هر کمربند ارتفاعی به مداخلات مدیریتی خاص خود نیاز دارد و نگاه یکپارچه اما تفکیک‌شده نسب به آن‌ها ضروری است.

یافته‌های این پژوهش، به‌صورت کلی با طیفی از مطالعات پیشین که در زمینه فضای سبز شهری کلانشهر تهران انجام شده، هم‌راستا و قابل تطبیق است. بررسی‌های متعدد گذشته، به این نتیجه رسیده‌اند که شرایط فضای سبز در تهران، نه از نظر کفایت کمی و نه از نظر توزیع عادلانه، در سطح قابل قبول قرار ندارد. در قیاس‌هایی که در چارچوب آن مطالعات صورت گرفته، مشخص شده که تعدادی از مناطق شهری در موقعیت بهتری نسبت به سایر مناطق قرار دارند. در برخی مطالعات، تأکید شده است که توزیع جغرافیایی فضای سبز در تهران حالتی خوشه‌ای، پراکنده و بعضاً بدون جهت‌گیری برنامه‌ریزی‌شده دارد. این الگوها حاکی از فقدان یک خط‌مشی هماهنگ و هدفمند در تخصیص فضاهای سبز در بستر شهری است. به نحوی که گسترش کاربری‌های انسان‌ساخت منجر به تضعیف پیوستگی بستر طبیعی سیمای سرزمین شهری شده است (Alavi et al, 2024; Nasri Roodsari & Hoseini, 2022; Ghasemi & Saeedi, 2021; Roozbahani et al, 2022; Naroei et al, 2020; Mohammadi Hamidi et al, 2020). تحلیل‌های فضایی در این پژوهش‌ها، اگرچه بسیاری از واقعیت‌های فضایی موجود را آشکار می‌سازد، اما در راستای بهینه‌سازی پیوستگی زیرساخت‌های سبز، همچنان خلاء پژوهشی جدی است.

بینش‌های فضایی: شرایط اکولوژیک هر سرزمینی با استفاده از اصول بوم‌شناسی سیمای سرزمین قابل تحلیل و تفسیر است، بینش‌های فضایی حاصل از این پژوهش که بر اساس همین اصول استوار هستند، به شرح زیر است:

۱- حفاظت و احیای رود-دره‌ها

رود-دره‌ها، مطابق اصل چهارم بوم‌شناسی سیمای سرزمین، به سبب پیروی از الگوهای طبیعی و دارا بودن مرزهای منحنی و ساختار شاخه‌ای، کارایی بوم‌شناختی بیشتری نسبت به عناصر انسان‌ساخت دارند. بر پایه اصل پنجم بوم‌شناسی سیمای سرزمین، صیانت از رود-دره‌ها تنها در گرو حفاظت بستر اصلی آن‌ها نیست، بلکه نیازمند پیش‌بینی پهنه‌های بافر در پیرامون آن‌ها است تا اثرات تخریبی و آلودگی را کاهش می‌دهد. به منظور حفظ حقوق نسل‌های آینده، این امر نیازمند پایش است.

۲- تقویت هسته‌های اکولوژیک

لکه‌های سبز بزرگ، مطابق اصل نخست بوم‌شناسی سیمای سرزمین، نسبت به لکه‌های کوچک‌تر ظرفیت بالاتری برای ایفای کارکردهای اکولوژیک دارند و در صورت اتصال با لکه‌های پیرامونی، به هسته‌های شبکه اکولوژیک بدل می‌شوند. مدیریت آن‌ها باید مبتنی بر پهنه‌بندی حفاظت و گردشگری، تقویت مشارکت مردمی و نظارت باشد.

۳- برقراری عدالت فضایی از طریق تقویت قدمگاه‌های انتقالی و دالان‌های پیونددهنده

کمربندهای ارتفاعی که از کمترین پیوستگی فضای سبز برخوردارند، باید در تخصیص بودجه و اجرای پروژه‌ها در اولویت باشند. بر اساس اصل دوم بوم‌شناسی سیمای سرزمین، طراحی دالان‌های سبز، استفاده از مسیرهای باقیمانده و ایجاد پارک‌ها و سبزه‌ها می‌تواند لکه‌های سبز میانجی را به هسته‌های اکولوژیک متصل کند. توجه به مناطق کم برخوردار میانی، موجب ارتقاء زیست‌پذیری در محل سکونت شهروندان این مناطق می‌شود.

۴- طراحی اکولوژیک و شکل‌دهی فضاهای سبز

مطابق اصل سوم بوم‌شناسی سیمای سرزمین، لکه‌های سبز کشیده با حاشیه‌های نامنظم آسیب‌پذیر هستند. طراحی و مدیریت فضای سبز در آینده، علاوه بر توجه به شکل لکه‌ها و دالان‌ها، باید بر فرم طبیعی زمین، شیب و نفوذپذیری خاک توجه داشته باشد و با حداقل استفاده از

سازه‌های نفوذناپذیر بر اصول طراحی اکولوژیک پایبند باشد.

۵- هماهنگی هوشمندانه فضای سبز با شبکه دسترسی شهری

سازگاری مسیر دالان‌های پیشنهادی با شبکه دسترسی موجود، تضادهای حقوقی و اجرایی را کاهش می‌دهد، هزینه‌ها را بهینه می‌کند، امکان دسترسی عادلانه‌تر شهروندان به فضای سبز و قابلیت استفاده بیشتر آن‌ها از این فضاها را فراهم می‌سازد. این رویکرد، شرایط پیوستگی ساختاری فضای سبز را از وضعیتی شکننده به شبکه‌ای ارتقاء می‌دهد که اتصال ساختاری و کارکردی عناصر آن، حتی در متراکم‌ترین بخش‌های ساخته‌شده شهر حفظ شود.

۶- الزامات اجرایی، قوانین و ابعاد حکمرانی برای تقویت پیوستگی شبکه اکولوژیک

تحقق این نقشه راه نیازمند طراحی تفصیلی، بازنگری در برخی ضوابط قانونی، کنترل بر اجرا، تقویت نظام پایش و بودجه‌ریزی مشخص است. در این مسیر، تقویت مدیریت تعاملی و همکاری سازنده نهادهای شهرداری تهران، سازمان بوستانها و فضای سبز تهران، سازمان امور اراضی کشور، وزارت راه و شهرسازی، سازمان حفاظت محیط زیست، در کنار جلب مشارکت مردم و سایر ذی‌نفعان ضروری است.

محدودیت‌ها و پژوهش‌های آتی: تحلیل جامع ابعاد اجتماعی-اقتصادی و مشارکت مردمی در این مطالعه به طور کامل پوشش داده نشده است. محدودیت‌های داده‌ای و اجرایی کشور ایران نیز مزید بر این موارد است. پژوهش‌های آتی می‌توانند بر ارزیابی کارکردی پیوستگی شبکه اکولوژیک با استفاده از مدل‌سازی و داده‌های میدانی تمرکز کنند. به ویژه بررسی تاب‌آوری شبکه اکولوژیک شهر در برابر تغییرات اقلیمی و سیلاب‌ها، از دیگر محورهای مهم پیشنهادی برای تحقیقات آینده است.

نتیجه‌گیری: گسستگی در شبکه اکولوژیک شهری، دلیل اصلی اختلال در جریان خدمات اکوسیستمی به ویژه در کلانشهرها است. نواحی شمالی شهر تهران از پیوستگی بیشتری برخوردارند، اما در مناطق مرکزی و میانی، ریزدانه‌شدن لکه‌ها و عدم اتصال، مشکلات جدی ایجاد کرده است. این مسئله، که بر کارکردهای طبیعی شهر

تأثیر می‌گذارد، نشان‌دهنده نیاز به رویکردهایی است که نه تنها کمیت زیرساخت‌های سبز را افزایش دهند، بلکه پیوستگی ساختاری آن را نیز تقویت کند. با توجه به این یافته‌ها، طرح‌ریزی مدیری راهبردی پیوستگی شبکه اکولوژیک تهران ضروری به نظر می‌رسد. تمرکز بر حفاظت از عناصر طبیعی اصلی مانند رود-دره‌ها و هسته‌های اکولوژیک، که نقش حیاتی در فرایندهای بوم‌شناختی دارند و ایجاد دالان‌های جدید برای ارتقاء پیوستگی در عرصه‌های فقیر، می‌تواند تعادل را برقرار کند.

توسعه شبکه اکولوژیک نباید صرفاً یک مداخله کالبدی باشد، بلکه باید بر مبنای علم بوم‌شناسی سیمای سرزمین، در تطابق با ویژگی‌های طبیعی و در هماهنگی با شبکه دسترسی شهری استوار باشد. درهمین راستا اقدام‌ها باید براساس نیازهای خاص هر کمر بند ارتقاعی و هر منطقه شهری، متناسب باشد. اجرای شبکه اکولوژیک پیشنهادی می‌تواند پیوستگی ساختاری فضای سبز را افزایش دهد و تاب‌آوری شهر را تقویت کند. این پژوهش، تهران را به عنوان کلانشهری با چالش‌های ساختاری اما دارای پتانسیل برای بهبود پیوستگی فضای سبز معرفی می‌کند. با توجه به تفاوت‌های موجود در بخش‌های مختلف کلانشهر، حفاظت از هسته‌های اکولوژیک و دالان‌های تاریخی، تقویت قدمگاه‌های انتقالی و ایجاد دالان‌های جدید، می‌تواند با صرف توجه و سرمایه‌گذاری، دستیابی به اهداف حفظ، تقویت و توسعه فضای سبز ممکن نیست. پژوهش حاضر از چند جهت دارای تمایز و نوآوری‌های نسبت به مطالعات پیشین است که آنرا از سطح توصیفی فراتر برده و به پژوهشی کاربردی برای تصمیم‌گیری فضای شهری بدل ساخته است:

۱) انتخاب آگاهانه سنجه‌های خاص، ادغام متناسب آنها و اجتناب از اثر افزونگی سبب شده با فورمولی ساده، دقیق و تعمیم‌پذیر به سایر شهرها و کلانشهرها، نقشه‌ای تفسیرپذیر با نمایه‌ای جدید برای ارزیابی پیوستگی فضای سبز فراهم شود، ۲) با تلفیق هم‌زمان داده‌های مکاندار فضای سبز، ارتفاع، رود-دره‌ها و شبکه دسترسی، چارچوبی یکپارچه برای تحلیل و طراحی شبکه اکولوژیک کلانشهر تهران فراهم آمده که صرفاً به سنجش ساختار سیمای سرزمین محدود نمی‌شود، بلکه بعد اجرایی، سیاستی و مدیریتی (از تعریف حریم حفاظتی رود-دره‌ها

- on Identifying Priority Management Zones. Geography and Environmental Sustainability, (), -. doi: 10.22126/ges.2025.12417.2890
4. **Alemohammad, S. and Ramezani Mehrian, M., 2025.** Need Assessment of Urban Zones to Strengthen and Expand Green Space with Emphasis on Spatial Justice (Case Study: Tehran Metropolitan). (e226092). Strategy, (), e226092 doi: 10.22034/rahbord.2025.515861.1802
 5. **Alemohammad, S., Yavari, A.R., Malek-Mohammadi, B. and Amiri, M.J., 2022.** Landscape conservation and protected areas (case of Dena, Iran). Environmental Monitoring and Assessment, 194(54), 1-11. <https://doi.org/10.1007/s10661-021-09696-6>.
 6. **Allahyari, H. and Salehi, E., 2020.** Presentation of a suitable approach for green programming of urban ways through integrative method CA-Markov: Case study—Azadi Street of Tehran, Iran. Modeling Earth Systems and Environment, 6, 373-382. <https://doi.org/10.1007/s40808-019-00685-w>
 7. **Battisti, C., 2013.** Ecological network planning bases conservation actions on a strong theoretical skeleton offered by disciplines such as population and landscape ecology. Journal of Land Use Science, 8(4), 371-379. <https://doi.org/10.1080/1747423X.2011.639098>
 8. **Bennett, A.F. and Mulder, C.P.H., 2019.** Enhancing landscape connectivity through multifunctional green infrastructure planning. Science of the Total Environment, 654, 1023-1034. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2018.11.123>
 9. **Bezubik, R., et al., 2018.** River valleys as ecological corridors – structure, function and importance in conservation. Environmental Quality, 21(4), 78-86. <https://apcz.umk.pl/EQ/article/download/EQ.2018.006/14736>
 10. **Cook, L.M., Hahs, A.K. and Kendal, D., 2024.** Towards the intentional multifunctionality of urban green infrastructure: A review. npj Urban Sustainability, 4(1), 18. <https://doi.org/10.1038/s42949-024-00145-0>
 11. **Czochański, J. and Wiśniewski, P., 2018.** River valleys as ecological corridors—Structure, function and importance in the conservation of natural resources. Ecological Questions, 29(1), 77-87. <https://doi.org/10.12775/EQ.2018.006>
 12. **EPA., 2017.** Stream corridor restoration: Principles, processes, and practices. EPA 841-R-17-001.
 13. **Fan, P., Xu, L., Yue, W. and Chen, J., 2021.** Accessibility of urban green space in an urbanizing city: A case study of Shenzhen, China. Ecological Indicators, 132, 108281. <https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2021.108281>
 14. **Forman, R.T.T., 1995.** Land mosaics: The ecology of landscapes and regions. Cambridge University Press.
 15. **Fotoohi, O. and Bargh Jelveh, S., 2018.** The

و طراحی دالان‌های سبز تا اقدام‌های مدیریتی اولویت‌دار و بینش‌های فضایی) را نیز پوشش می‌دهد، (۳) کل کلانشهر بررسی شده که این برخلاف اغلب پژوهش‌های دیگر است که متمرکز بر مناطقی خاص از شهر بوده‌اند، (۴) نقش مناطق میانی شهر به‌عنوان کمر بند واسط میانجی با ظرفیت بالقوه برای ایجاد قدمگاه‌های انتقالی آشکار شده و از این تهدید، فرصتی راهبردی برای ارتقاء پیوستگی شبکه اکولوژیک کشف شده است، (۵) توجه به نابرابری‌های فضایی در ساختار سیمای سرزمین (که بر بهره‌مندی شهروندان از خدمات اکوسیستمی تأثیر می‌گذارند)، به این پژوهش وجهه‌ای اکولوژیک-اجتماعی بخشیده که در ادبیات جغرافیای شهر تهران، کمتر مورد توجه قرار گرفته است. خلاصه، پژوهش حاضر نه تنها با روشی نوین و نوآورانه، تصویری واضح از وضعیت پیوستگی فضای سبز را ارائه داده است، بلکه نقشه پایه چگونگی بهبود پیوستگی شبکه اکولوژیک تهران را روشن نموده است.

تشکر و قدردانی

این پژوهش با حمایت مالی مرکز مطالعات و برنامه‌ریزی شهر تهران، از محل قرارداد شماره ۱۳۷/۱۰۷۰۹۹۲ با معاونت پژوهش و فناوری دانشگاه تهران با عنوان "ارزیابی فضایی پیوستگی شبکه فضای سبز شهر تهران با استفاده از اصول بوم‌شناسی سیمای سرزمین" انجام شده است. در این زمینه از آقای دکتر یوسف رفیعی راهبر محترم پروژه بسیار سپاسگزاریم.

منابع

1. **Alavi, S.A., Esfandi, S., Khavarian-Garmsir, A.R., Tayebi, S., Shamsipour, A. and Sharifi, A., 2024.** Assessing the connectivity of urban green spaces for enhanced environmental justice and ecosystem service flow: A study of Tehran using graph theory and least-cost analysis. Urban Science, 8(1), 14. <https://doi.org/10.3390/urbansci8010014>
2. **Albalawi, B.F.A., 2025.** Urbanization and habitat loss: An overview of rapidly growing cities in Saudi Arabia. Sustainable Cities and Society, 68, 1636228. <https://doi.org/10.3389/frsc.2025.1636228>
3. **Alemohammad, S. and Khosravi, H., 2025.** Strategic Assessment of Vegetation Cover Connectivity in Tehran Metropolitan with Emphasis

27. **Ma, Y., Guo, D., Li, W. and Liu, Y., 2024.** How to coordinate urban ecological networks and street green space: A multi-scale perspective. *Land*, 14(1), 26. <https://doi.org/10.3390/land14010026>
28. **Mahfoudhi, M., Abdallah, H.B. and Chouari, W., 2024.** Spatial-temporal dynamics of urban green spaces in response to urban expansion in Tunis, Tunisia. *Land*, 13(1), 98. <https://doi.org/10.3390/land13010098>
29. **Maron, M., Simmonds, J.S. and Watson, J.E.M., 2025.** Urban rewilding to combat global biodiversity decline. *BioScience*, 75(7), 545-557. <https://doi.org/10.1093/biosci/biab140>
30. **Meerow, S. and 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>
31. **Morassafar, H., 2024.** Equity in access to urban green spaces in Tehran: Analyzing spatial distribution and accessibility. *Cities*, 136, 104223. <https://doi.org/10.1016/j.cities.2023.104223>
32. **Naghibi, M., Khansefid, M. and Meshkini, A., 2024.** Perceptions and management of small urban green spaces in Tehran. *PLOS ONE*, 19(3), e0299422. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0299422>
33. **Naroei, B., Barghjelveh, S., Esmailzadeh, H. and Zebardast, L., 2022.** Evaluating spatial-temporal changes of urban green infrastructure using decision tree algorithm of spatial processes - Case study: Tehran Landscape System. *Scientific-Research Quarterly of Geographical Data (SEPEHR)*, 31(122), 167-188. <http://doi.org/10.22131/sepehr.2022.254788>
34. **Nasehi, S., Alemohammad, S., Ramezani Mehrrian, M. and Mobarghei Dinan, N., 2023.** Formulating Sustainability Strategies for Urban Green Infrastructures by using the Landscape Changes Assessment (Tehran Metropolitan District 2). *Geography and Environmental Sustainability*, 13(2), 95-114. <http://doi.org/10.22126/ges.2023.8640.2614>
35. **Nasr, T., Jafarpour Ghalehtemouri, K., Khedmatzadeh, A., Mousavi, M.N. and Rajabi, A., 2025.** Predicting urban green infrastructures of ecosystem services in Tehran metropolitan area sprawl with Landsat satellite time-series data. *Journal of Architectural/Planning Research and Studies*, 22(1), Article 268554. Retrieved from <https://aassjournal.com/article-1-259-en.pdf>
36. **Nasrabadi, M.T., Morassafar, S., Pourzakarya, M. and Dunning, R., 2023.** Investigating the impacts of green spaces planning on social sustainability improvement in Tehran, Iran: A SWOT-AHP analysis. *Local Environment*. Advance online publication. <https://doi.org/10.1080/13549839.2023.2178493>
37. **Norouzi, M. and Suzanchi, K., 2022.** Study of the Role of Urban Infrastructure in Urban Green Network Formation. *Armanshahr Architecture & Urban Development*, 15(40), 221-242. doi: 10.22034/aud.2022.269053.2429.
- planning process of an urban landscape system's ecological networks (case study: The city of the Tehran). *Journal of Environmental Studies*, 44(2), 277-297. <http://doi.org/10.22059/jes.2018.243435.1007520>
16. **Gandhi, G.M., Ramalingam, M. and Porchelvan, P., 2020.** Moving window method: An effective approach to measure surrounding greenness. *Journal of the Indian Society of Remote Sensing*, 48(7), 1079-1087. <https://doi.org/10.1007/s12524-020-01180-x>
17. **Gao, L. and Li, H., 2024.** The effects of landscape patterns on ecosystem services of urban green spaces. *Ecological Indicators*, 160, 113456. <https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2024.113456>
18. **Gonzalez, A., Rayfield, B. and Lindo, Z., 2017.** The disentangled bank: How loss of habitat fragments and disassembles ecological networks. *Ecology Letters*, 20(6), 659-672. <https://doi.org/10.1111/ele.12767>
19. **Hassanpour, P., Sayyahnia, R. and Esmailzadeh, H., 2020.** Ecological structure assessment of urban green space using the landscape approach (Case study: Tehran's 22nd district). *Environmental Sciences*, 18(1), 187-202. <https://doi.org/10.29252/envs.18.1.187>
20. **Heymans, A., 2019.** Ecological urban planning and design: A systematic literature review. *Sustainability*, 11(13), 3723. <https://doi.org/10.3390/su11133723>
21. **Hosseini, S.M., Gohari, M. and Amini, M., 2019.** Ecological structure assessment of urban green space using the landscape approach (case study: Tehran's 22nd district). *Environmental Sciences*, 18(1), 187-202. <https://doi.org/10.29252/envs.18.1.187>
22. **Huang, B.X., Chiou, S.C. and Li, W.Y., 2021.** Landscape pattern and ecological network structure in urban green space planning: A case study of Fuzhou city. *Land*, 10(8), 769.
23. **Laghai, H.A. and Bahmanpour, H., 2012.** GIS application in urban green space per capita evaluation: Case study city of Tehran. *Annals of Biological Research*, 3(5), 2439-2446. Retrieved from <https://www.scholarsresearchlibrary.com/articles/gis-application-in-urban-green-space-per-capita-evaluation-case-study-city-of-tehran.pdf>
24. **Li, H., Liu, X. and Peng, J., 2022.** A dynamic evaluation method of urban ecological network based on graph theory and landscape connectivity. *Land*, 11(12), 2297. <https://doi.org/10.3390/land11122297>
25. **Liu, Y., Huang, T.T. and Zheng, X., 2022.** A method of linking functional and structural connectivity analysis in urban green infrastructure network construction. *Urban Ecosystems*, 25(3), 909-925.
26. **Liu, Z., Xiu, C. and Ye, C., 2020.** Improving urban resilience through green infrastructure: An integrated approach for connectivity conservation. *Hindawi*, 2020, Article 1653493. <https://doi.org/10.1155/2020/1653493>

- enhance ecological connectivity: A spatial network analysis approach. *Ecological Indicators*, 161, Article 112545. <https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2024.112545>
48. **Tockner, K., Pusch, M., Borchardt, D. and Lorang, M.S., 2010.** Multiple stressors in coupled river-floodplain ecosystems. *Freshwater Biology*, 55(1), 135-151.
 49. **UNEP-WCMC., 2020.** Connecting nature in a fragmented world: The importance of conserving ecological connectivity in the next decade. UNEP-WCMC. <https://www.unep-wcmc.org/en/news/connecting-nature-in-a-fragmented-world-the-importance-of-conserving-ecological-connectivity-in-the-next-decade>
 50. **Wang, D., Liu, Y. and Chen, X., 2024.** Urban green infrastructure: Bridging biodiversity conservation and sustainable urban development through adaptive management. *Frontiers in Ecology and Evolution*, 12, 1440477. <https://doi.org/10.3389/fevo.2024.1440477>
 51. **WHO. 2017.** Urban Green Space Interventions and Health. World Health Organization.
 52. **Yazdanpanah, M., Yavari, A., Zebardast, L. and Alemohammad, S., 2015.** Urban Green Infrastructure Assessment for Their Regeneration in Tehran Landscape. *Journal of Environmental Studies*, 41(3), 613-625. <http://doi/10.22059/jes.2015.55900>.
 53. **Zhang, C., Wang, X., Wang, J. and Zhao, T., 2023.** The role of stepping stones in enhancing urban landscape connectivity and biodiversity conservation. *Landscape and Urban Planning*, 233, Article 104732. <https://doi.org/10.1016/j.landurbplan.2023.104732>
 54. **Zhang, J., Wang, L. and Liu, S., 2022.** Multiscale spatiotemporal dynamics analysis of urban green space: Implications for green space planning in the rapid urbanizing Hefei City, China. *Frontiers in Ecology and Evolution*, 10, 998111. <https://doi.org/10.3389/fevo.2022.998111>
 55. **Zhao, Q. and Chen, F., 2025.** Integrating graph theory and spatial analysis for urban ecological network design. *Sustainable Cities and Society*, 71, 103-115. <https://doi.org/10.1016/j.scs.2022.103115>
 56. **Zhou, Y., Yao, J., Chen, M. and Tang, M., 2023.** Optimizing an urban green space ecological network by coupling structural and functional connectivity: A case for biodiversity conservation planning. *Sustainability*, 15(22), 15818.
 38. **Omidpour, M., Sayahnia, R. and Rezaei, Y., 2020.** The Impact of Urban Growth and Development Trend on Ecological Network Structure with Resilience and Landscape Approach (Case study of Hamedan). *Iranian Journal of Remote Sensing & GIS*, 12(2), 19-32. <http://doi/10.52547/gisj.12.2.19>.
 39. **Popescu, O.C., 2022.** Methodology for identifying ecological corridors: A spatial approach. *Land*, 11(7), 1013. <https://doi.org/10.3390/land11071013>
 40. **Rafizadeh, S., Souri, A. and Shahmoradi, B., 2021.** Assessing the spatial integration of urban green spaces and accessibility networks in Tehran. *Urban Forestry & Urban Greening*, 61, 127123. <https://doi.org/10.1016/j.ufug.2021.127123>
 41. **Ramezani Mehrian, M., 2022.** Assessing the structural quality of the green space framework in District 6 of Tehran using GIS and AHP. *Journal of Urban Geography (Tehran)*, 14(2), 55-72. https://jurbangeo.ut.ac.ir/article_85696.html
 42. **Roodsari, E.N. and Hoseini, P., 2022.** An assessment of the correlation between urban green space supply and socio-economic disparities in Tehran, Iran. *Environment, Development and Sustainability*, 24, 12867-12882. <https://doi.org/10.1007/s10668-021-01970-4>
 43. **Roosbahani, M., Janbaz ghubadi, G., Motevalli, S. and Azimi amoli, J., 2022.** Detection and District Analysis of Urban Green Space Changes in The 22 Districts of Tehran. *Journal of Urban Ecology Researches*, 12(25), 37-58. <http://doi/10.30473/grup.2022.8708>.
 44. **Saboonchi, P., Abarghouyi, H. and Motedayen, H., 2018.** Green Landscape Networks; The role of articulation in the integrity of green space in landscapes of contemporary cities of Iran. *The Monthly Scientific Journal of Bagh-e Nazar*, 15(62), 5-16. <http://doi/10.22034/bagh.2018.66280>
 45. **Salehi, A., Zebardast, L. and Yavari, A.R., 2019.** Ecological assessment of Tehran's river-valleys buffer zones. *Environmental Studies*, 45(2), 231-245.
 46. **Shahhosseini, A., Monavari, M. and Karbassi, A., 2023.** Landscape ecological evaluation of green spaces for sustainable urban planning in Iran. *Urban Forestry & Urban Greening*, 84, 127985. <https://doi.org/10.1016/j.ufug.2023.127985>
 47. **Sun, Y., Li, X., Liu, Y. and Chen, Y., 2024.** Optimizing urban green stepping stones to



Strategic Planning of a Continuous and Equitable Ecological Network Based on Landscape Ecology Principles (Tehran Metropolitan Area)

Sayedeh Alemohammad ^{*1}, Hossein Khosravi ²

1*- Department of Innovation and Sustainability, Faculty of Governance, University of Tehran, Tehran, Iran

2- Department of Urban Planning, Faculty of Architecture and Urban Planning, Art University, Tehran, Iran

Original Article

Received:
2025.09.16

Accepted:
2025.10.13

Keywords:
Ecological
Network,
Landscape
Ecology,
Connectivity,
Elevational Belt,
Spatial Justice

Abstract

Introduction: In recent decades, the Tehran metropolitan area has faced the fragmentation of green spaces and the weakening of ecological networks, leading to disruptions in ecosystem services and a decline in spatial justice. The city's heterogeneous structure—comprising dense built-up fabrics, river-valleys, and highways—has resulted in an unbalanced distribution of green space, such that per capita green space in the northern parts of the city exceeds 30 m², while in the southern parts it falls below 5 m². Previous studies have often been limited to descriptive analyses and assessments of density and per capita green space, paying less attention to the networked nature and spatial cohesion of green spaces. Furthermore, a place-based strategic framework for analyzing green space connectivity and strengthening the linkages of the city's ecological network is lacking. Drawing on landscape ecology principles, the present study provides a novel framework for assessing green space connectivity and the strategic management of Tehran's ecological network.

Materials and Methods: Using Sentinel-2 satellite imagery (June 2024), a green space map was produced, and the NDVI index with a threshold of 0.17 was employed to extract vegetation cover. Structural connectivity analysis was then performed using FRAGSTATS, ArcGIS, and the moving window method, and a composite index was developed based on the first three principles of landscape ecology. Elevation data, river-valleys, and the transportation network were also incorporated separately into the analysis. Compared with traditional methods, the moving window method reflects the details of vegetation connectivity in the surroundings with greater capability and accuracy and is applicable for identifying critical and priority areas. The study area also encompassed a zone extending 2,000 meters beyond the physical boundary of the city to account for edge effects. Statistical analysis was conducted using the Kolmogorov–Smirnov test (to assess normality) and subsequently ANOVA (to assess significance), and ecological cores, stepping stones, and corridors were identified and mapped.

Results: Tehran was divided into three elevational belts: the upland belt (1,330–2,357 m), the midland belt (1,130–1,330 m), and the lowland belt (1,030–1,130 m). The upland belt, with large green patches and numerous river-valleys, possesses the highest spatial connectivity and is a conservation priority. In this belt, the proximity

of patches to one another and their natural linkage with river-valleys have given rise to a more continuous structure. The midland belt, due to high construction density and population, exhibits severe green space fragmentation and the lowest ecological function, yet it holds the greatest potential for restoration. The lowland belt occupies an intermediate condition, and the possibility of strengthening ecological linkages therein is more tangible. In total, 15 ecological cores were identified, along with a network of corridors and stepping stones.

Discussion: The proposed strategic management plan rests on three pillars: 1) strengthening connectivity in the midland and lowland belts by developing green space at stepping stones and establishing new corridors aligned with the transportation network; 2) protecting and restoring river-valleys by designating a 100-meter buffer and preventing land-use change; and 3) reinforcing ecological cores and promoting spatial justice through budget allocation in less-privileged areas. The alignment of the proposed corridors with the transportation network prevents conflicts with urban land uses, reduces ownership disputes, and lowers implementation costs. The study's innovations include introducing a new index for assessing green space connectivity, identifying the midland areas as an intermediary belt with the capacity to create stepping stones, and attending to spatial inequalities with an ecological-social perspective. Ultimately, the protection of ecological cores, the restoration of river-valleys, the reinforcement of stepping stones, and the creation of new corridors are essential for enhancing the city's connectivity and livability.