

ارزیابی تغییرات فضایی-زمانی زیرساخت سبز شهری مبتنی بر الگوریتم درخت تصمیم‌گیری فرآیندهای فضایی

مطالعه موردی: سیمای سرزمین تهران

بهروز نارویی^۱

شهین دخت برق جلوه^۲

حسن اسماعیل‌زاده^۳

لعبت زبردست^۴

تاریخ دریافت مقاله: ۱۴۰۰/۰۸/۰۸

تاریخ پذیرش مقاله: ۱۴۰۱/۰۲/۱۳

چکیده

گسترش سریع شهرنشینی به‌همراه تغییرات بی‌رویه در کاربری/پوشش اراضی سیستم سیمای سرزمین تهران باعث اختلال در الگوی ترکیب و توزیع زیرساخت سبز شهری شده است. هدف از تحقیق حاضر تحلیل تغییرات فضایی-زمانی الگوی زیرساخت سبز شهری تهران متأثر از فرآیندهای فضایی سیمای سرزمین در بازه زمانی ۲۰۳۰-۱۹۹۰ (۴ دوره ۱۰ساله) می‌باشد. رویکرد پژوهش حاضر، شناسایی: (۱) تأثیر انواع فرآیندهای فضایی در تغییر الگوی ساخت سیمای سرزمین و (۲) روابط فیما بین الگوی ساخت فضایی سیمای سرزمین و فرآیندهای بوم‌شناختی در شکل‌گیری ظرفیت‌ها و محدودیت‌های سرزمین شهری است. برای این مقصود از الگوریتم درخت تصمیم‌گیری در راستای شناسایی فرآیندهای فضایی و از سنجه‌های سیمای سرزمین در تحلیل تأثیر فرآیندهای فضایی بر تغییر الگوی ترکیب و توزیع سیمای سرزمین تهران بهره گرفته شد. داده‌های کاربری/پوشش اراضی مورد نیاز، از تصاویر ماهواره‌ای لندست (۱۹۹۰ تا ۲۰۲۰) به‌دست آمد. به‌منظور پیش‌بینی تغییرات کاربری/پوشش اراضی برای سال ۲۰۳۰ از مدل CA-Markov استفاده شد. کمی کردن سنجه‌های سیمای سرزمین در دو سطح کلاس و سیمای سرزمین در ۴ دوره زمانی مورد نظر انجام گرفت. یافته‌ها نشان می‌دهند در سطح کلاس و در بازه زمانی بین سال‌های ۱۹۹۰ تا ۲۰۲۰، فرآیندهای فضایی "حذف" و "قطعه‌قطعه‌شدن" به‌ترتیب سبب کاهش تعداد و مساحت اراضی سبز و باز در الگوی ترکیب و هم‌چنین کاهش پیوستگی و پراکنش نامتعادل آن‌ها در الگوی توزیع زیرساخت سبز سیمای سرزمین تهران شده است. همین‌طور در تمامی دوره‌های زمانی، فرآیند فضایی "تجمع" در لکه‌های ساخت و ساز تکرار شده است. داده‌های پیش‌بینی برای سال ۲۰۳۰ نیز بیانگر تأثیر فرآیند فضایی "حذف" بر هر دو کاربری/پوشش اراضی سبز و باز زیرساخت سبز سیمای سرزمین تهران می‌باشد. در سطح سیمای سرزمین نیز در بازه زمانی مورد بررسی شاهد ساده‌تر شدن بستر سیمای سرزمین در نتیجه غلبه کاربری‌های ساخت و ساز هستیم. نتایج حاصل برای تعیین نقشه راه برنامه‌ریزی الگوی فضایی زیرساخت سبز شهری کاربرد دارند.

واژه‌های کلیدی: تغییرات کاربری اراضی، زیرساخت سبز، فرآیند فضایی، الگوی ترکیب و توزیع.

۱- دانشجوی دکتری آمایش محیط زیست، پژوهشکده علوم محیطی، دانشگاه شهید بهشتی، مری گروه مهندسی فضای سبز دانشگاه سیستان و بلوچستان sbu.ac.ir@b_naroei

۲- دانشیار گروه برنامه‌ریزی و طراحی محیط، پژوهشکده علوم محیطی، دانشگاه شهید بهشتی، ایران (نویسنده مسئول) sbu.ac.ir@barghjelveh

۳- استادیار گروه برنامه‌ریزی و طراحی محیط، پژوهشکده علوم محیطی، دانشگاه شهید بهشتی، ایران h-esmaeilzadeh@sbu.ac.ir

۴- استادیار گروه برنامه‌ریزی مدیریت و آموزش محیط زیست، دانشکده محیط زیست، پردیس دانشکده‌های فنی، دانشگاه تهران، ایران lzebardast@ut.ac.ir

۱- مقدمه

در این راستا ارزیابی و تحلیل تغییرات فضایی - زمانی زیرساخت‌های سبز در مقیاس سیمای سرزمین شهری^۲ از طریق به‌کارگیری همزمان تخصص‌هایی چون سنجش از دور، سیستم اطلاعات جغرافیایی و دانش بوم‌شناسی سیمای سرزمین به‌منظور ارائه راهبردهای مدیریتی و برنامه‌ریزی بوم‌شناختی در شهرها اهمیت می‌یابند.

در این ارتباط پژوهش‌های متعددی در نقاط مختلف دنیا صورت گرفته است که بیانگر پتانسیل‌ها و محدودیت‌های بوم‌شناختی الگوی فضایی سیمای سرزمین شهری می‌باشند (Liang et al., 2017; Du et al., 2017; Huang et al., 2018; Gherraz et al., 2020; Woldesemayat & Genovese, 2021).

در ایران نیز مطالعات مشابهی در زمینه تحلیل وضعیت زیرساخت‌های سبز شهری از طریق پایش تغییرات کاربری اراضی انجام شده است. از آن جمله می‌توان به مطالعه گومه و همکاران (۱۳۹۳) در ارتباط با گسترش کاربری اراضی شهری کرج و تأثیر آن بر فضاهای سبز شهری، مطالعه یوسفی و همکاران (۱۳۹۳) در ارتباط با تحلیل الگوی توزیع زیرساخت‌های سبز شهر بیرجند و همچنین مطالعه داز و همکاران (۱۳۹۹) در خصوص پایش تغییرات کاربری اراضی شهر گرگان و بررسی وضعیت مناطق جنگلی و اراضی کشاورزی پیرامون شهر اشاره کرد. همچنین در خصوص کلان‌شهر تهران نیز مطالعات مهمی در ارتباط با شناخت بستر طبیعی و وضعیت بوم‌شناختی شهر صورت گرفته که از مهم‌ترین آن‌ها می‌توان به تجزیه و تحلیل ساختار سیمای سرزمین با تأکید بر شبکه موزاییک - لکه به‌منظور ارائه پیشنهاداتی برای بهبود کیفیت محیط زیست شهری (Yavari et al., 2007)، تحلیل شبکه‌های بوم‌شناختی تهران به‌منظور بهبود آن‌ها (فتوحی و برق جلوه، ۱۳۹۷)، آسیب‌شناسی ساختار بوم‌شناختی تهران به‌منظور اقدامات اصلاحی فرآیندهای مرتبط با آب و هوا (پریور و همکاران، ۱۳۸۸)، تحلیل الگوی رشد شهر تهران با رویکرد

شهرها از مهم‌ترین فرآیندهای توسعه‌ای قرن حاضر در سراسر جهان به‌شمار می‌روند. در حال حاضر حدود ۵۵ درصد از جمعیت جهان در مناطق شهری زندگی می‌کنند (Arnold et al., 2018) و براساس پیش‌بینی سازمان ملل متحد تا سال ۲۰۵۰ این رقم به بیش از ۶۸ درصد افزایش می‌یابد (United Nations, 2019: 21). این امر موجب ایجاد اثرات برگشت‌ناپذیری در محیط‌زیست و اکوسیستم‌های طبیعی سرزمین شهری شده است (Aburas et al., 2018) که پیامدهایی چون کاهش فرآیندهای بوم‌شناختی، زوال تنوع زیستی و تضعیف خدمات اکوسیستمی را در مناطق شهری به همراه داشته است. در چنین شرایطی برنامه‌ریزی و ارتقاء زیرساخت‌های سبز^۱ در الگوی فضایی شهرها می‌تواند باعث بهبود ساختار و عملکرد بوم‌شناختی آن‌ها شود (Woldesemayat & Genovese, 2021) مفهوم زیرساخت سبز به شبکه برنامه‌ریزی شده‌ای متشکل از انواع مناطق طبیعی و نیمه‌طبیعی (اعم از مناطق سبز، باز و فضاهای آبی) با سایر ویژگی‌های محیطی اطلاق می‌شود که به‌منظور حمایت از تنوع زیستی و ارائه طیف گسترده‌ای از خدمات اکوسیستمی در مناطق شهری طراحی و مدیریت می‌شوند (Monteiro et al., 2020) و به‌عنوان سیستم‌های بوم‌شناختی لازم برای حیات پایدار شهری اهمیت می‌یابند (Benedict and McMahon, 2006).

طرح‌ریزی شبکه زیرساخت سبز شهری مبتنی بر رویکرد بوم‌شناسی سیمای سرزمین (مطالعه روابط میان الگوهای فضایی و فرآیندهای بوم‌شناختی) می‌تواند در جهت رفع چالش‌های مرتبط با پویایی شار مواد و انرژی، بهبود تنوع زیستی و ارتقاء خدمات اکوسیستمی در الگوی فضایی شهرها مؤثر واقع شود (Laforteza et al, 2013; Di Marino & Lapintie, 2017). برای دستیابی به این مقصود نیازمند شناسایی اولویت‌های حفاظت و توسعه عناصر طبیعی سبز و باز در شهرها هستیم.

۲- سیمای سرزمین شهری به‌عنوان بخشی از سیمای سرزمین کل، از چهار مؤلفه فیزیکی، زیستی، انسان‌ساخت و اجتماعی تشکیل شده است (Cadenasso & Pickett, 2008: 5).

جدول ۱: توصیف فرآیندهای فضایی تغییر بر اساس مفاهیم بوم‌شناسی سیمای سرزمین (Bogaert et al., 2004: 64)

Land transformation	تغییرات الگو	Spatial processes	فرآیندهای فضایی
	موقعیت مکانی لکه‌ها در حال تغییر است	Shift	تغییر جهت
	مساحت و محیط لکه‌ها در حال کاهش بوده ولی تعداد لکه‌ها ثابت است	Shrinkage	کاهش اندازه
	تعداد لکه‌ها در حال کاهش بوده ولی مساحت آن‌ها ثابت باقی مانده یا افزایش می‌یابد	Aggregation	تجمع
	تعداد و مساحت لکه‌ها در حال کاهش است	Attrition	حذف
	تعداد لکه‌ها و مساحت آن‌ها در حال افزایش است	Creation	ایجاد
	شکل و فرم لکه‌ها در حال تغییر هستند	Deformation	تغییر شکل
	تعداد لکه‌ها افزایش یافته در حالی که مساحت آن‌ها کاهش می‌یابد	Dissection	چند تکه شدن
	تعداد لکه‌ها ثابت بوده ولی مساحت آن‌ها در حال افزایش است	Enlargement	توسعه
	تعداد لکه‌ها افزایش و مساحت شدیداً کاهش می‌یابد	Fragmentation	قطعه قطعه شدن
	تعداد لکه‌ها ثابت بوده ولی مساحت آن‌ها در حال کاهش است	Perforation	سوراخ شدگی

است و این امر می‌تواند در راستای تفسیر بهتر محرک‌های تغییر و ویژگی‌های تغییرات ایجاد شده در الگوی فضایی زیرساخت‌های سبز شهری تهران اهمیت یابد. برای این منظور در پژوهش حاضر از الگوریتم درخت تصمیم‌گیری به منظور تعیین فرآیندهای فضایی تغییر سیمای سرزمین^۲ تهران استفاده شده است (نگاره ۱).

از سوی دیگر فرآیندهای فضایی تغییر الگوی سیمای سرزمین با تأثیر بر روابط بین الگوی فضایی و فرآیندهای بوم‌شناختی سیمای سرزمین در شکل‌گیری ظرفیت‌ها و محدودیت‌های سرزمین شهری نقش مهمی را ایفا می‌کنند. از این رو انواع مختلف کاربری‌های طبیعی و سبز در شهرها از نظر کیفیت از یکدیگر متمایز هستند. این تفاوت‌ها در ارتباط با سطحی از عرضه عملکردهای بوم‌شناختی-جامعه‌شناختی اهمیت می‌یابد که بدون تردید متأثر از ساختار فضایی آن‌ها است. ویژگی‌های مربوط به الگوی ترکیب و توزیع زیرساخت‌های سبز نقش مهمی در تعریف فرآیندهای بوم‌شناختی سیمای سرزمین شهری بر عهده

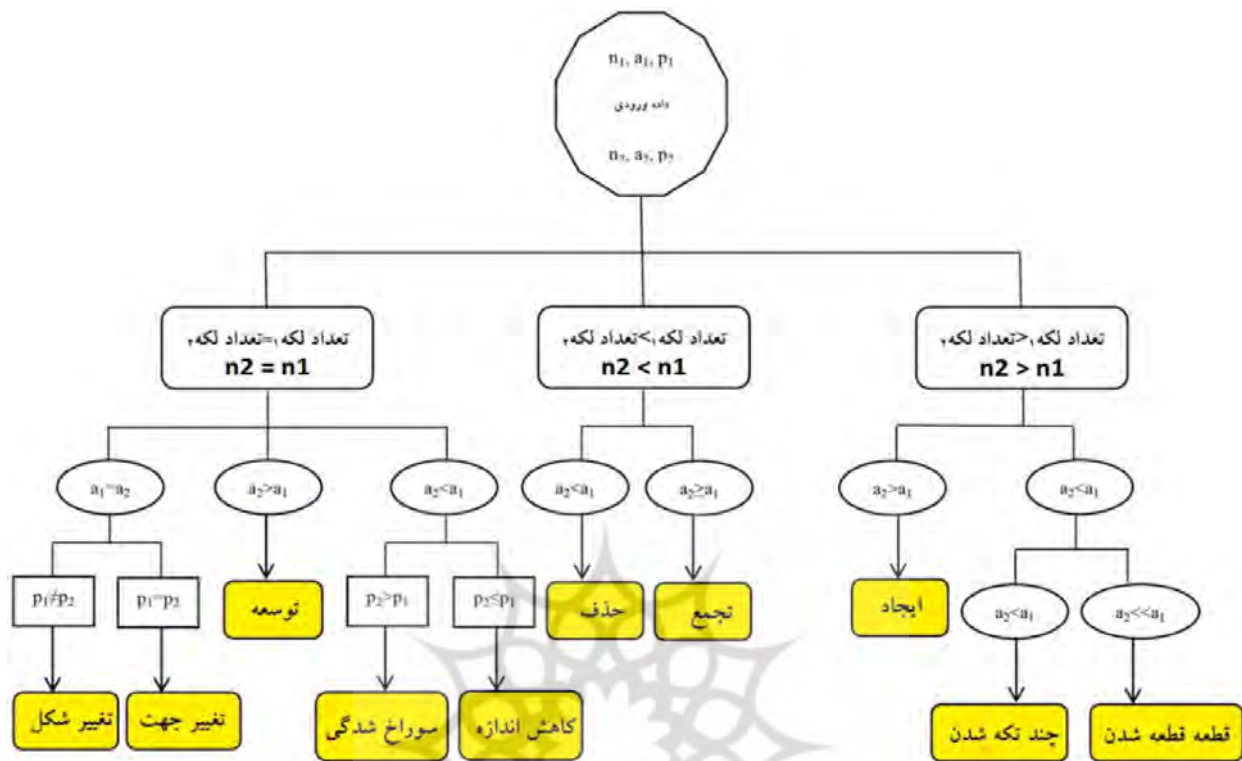
دارند (Botequilha & Ahern, 2002: 75; Lee et al., 2009)

بوم‌شناسی سیمای سرزمین (کاوینی و همکاران، ۱۳۹۴) و همچنین مطالعه زیرساخت سبز شهری تهران برای اصلاح تدریجی آن‌ها (یزدان پناه و همکاران، ۱۳۹۴) اشاره کرد که بیانگر وضعیت ساختار بوم‌شناختی سیمای سرزمین تهران هستند و اطلاعات ارزشمندی را در این خصوص ارائه می‌دهند. اما مسلماً الگوی فضایی زیرساخت سبز شهری تهران به عنوان شبکه‌ای شامل مناطق طبیعی و نیمه‌طبیعی (اعم از مناطق سبز، باز و فضا‌های آبی) متأثر از فرآیندهای فضایی تغییر سیمای سرزمین^۱ در طی زمان شکل گرفته است. فرآیندهای فضایی تغییر سیمای سرزمین بیانگر ماهیت تغییر در هر کلاس از کاربری اراضی در بازه مشخصی از زمان می‌باشند. انواع فرآیندهای فضایی تغییر سیمای سرزمین در ۱۰ نوع از مفاهیم مطرح در دانش بوم‌شناسی سیمای سرزمین قابل بررسی هستند (Bogaert et al., 2004: 64) (جدول ۱).

از این رو به منظور درک بهتر تغییرات فضایی - زمانی زیرساخت‌های سبز شهری نیازمند شناسایی فرآیندهای فضایی تغییر سیمای سرزمین تهران هستیم. این موضوع در تحقیقات اشاره شده مورد توجه چندانی قرار نگرفته

2- Decision Tree Algorithm for Detection of Spatial Processes in Landscape Transformation

1- Spatial processes of landscape change



نگاره ۱: الگوریتم درخت تصمیم‌گیری برای ارزیابی فرآیندهای فضایی تغییر سیمای سرزمین ($n =$ تعداد لکه‌ها در هر کلاس از کاربری، $a =$ مساحت هر کلاس از کاربری، $p =$ محیط هر کلاس از کاربری، $1 =$ سال قبل از تغییر، $2 =$ سال بعد از تغییر) از (Bogaert et al., 2004: 65).

و تنوع آن‌ها بر کاهش جزایر حرارتی شهری (Jaganmohan et al., 2016) بهبود تصفیه و پاکسازی هوا (Vos et al., 2013) کاهش خطر رواناب‌های سطحی (Yang & Li, 2013) و هم‌چنین افزایش زیستگاه‌های طبیعی شهری (Threlfall et al., 2017) اشاره کرد. از سویی دیگر در ارتباط با ویژگی الگوی "توزیع" فضاهای سبز و طبیعی در ساختار سیمای سرزمین شهری برخی از مطالعات نشان‌دهنده تأثیر قطعه‌قطعه شدن فضاهای سبز شهری بر افزایش دمای سطح زمین (Pramanik & Punia, 2019) افزایش آلودگی صوتی (Sakieh et al., 2017) کاهش خدمت اکوسیستمی تنظیمی ترسیب کربن (در قطعات کوچک و پراکنده فضای سبز) و خدمت اکوسیستمی گرده افشانی می‌باشند (Grafius et al., 2018). هم‌چنین لکه‌های فضای سبز شهری با درجه انزوای پایین و

اصطلاح «ترکیب» به انواع و فراوانی نسبی از انواع لکه‌های سبز و باز در سیمای سرزمین شهری اشاره دارد که با استفاده از ویژگی‌هایی چون نسبت (مساحت)، تعداد و تنوع لکه‌ها تعیین می‌شوند، در حالی که واژه «توزیع» بیانگر خصوصیات فضایی لکه‌های سبز و باز شهری از جمله ترتیب قرارگیری، موقعیت یا پیچیدگی هندسی یا طرح آن‌ها است که توسط ویژگی‌های فضایی چون اندازه، شکل، میزان لبه، مجاورت، ضریب سرایت و نفوذ لکه‌ها قابل تشخیص هستند (Woldesemayat & Genovese, 2021: 2; Botequilha & Ahern, 2002: 73). مطالعات متعددی بیانگر اهمیت الگوی "ترکیب" لکه‌های طبیعی و سبز در ساختار سیمای سرزمین شهری می‌باشند که از آن جمله می‌توان به تأثیر ترکیب لکه‌های فضای سبز شهری در ارتباط با افزایش مساحت

درخت تصمیم‌گیری به تشخیص فرایندهای فضایی تغییر در الگوی سیمای سرزمین تهران پرداخته شود و پس از آن به کمک سنج‌های سیمای سرزمین، ارزیابی جامعی از تغییرات فضایی-زمانی زیرساخت‌های سبز شهری در ارتباط با چگونگی تأثیر فرایندهای فضایی بر آن‌ها صورت گیرد. در واقع بررسی تأثیر فرایندهای فضایی تغییر بر الگوی سیمای سرزمین تهران زمینه‌ای را برای درک درستی از ظرفیت‌ها و محدودیت‌های بوم‌شناختی سیمای سرزمین شهری فراهم می‌آورد که می‌تواند بیان‌گر ارتباط میان الگوی فضایی زیرساخت‌های سبز و فرایندهای بوم‌شناختی حاصل باشد.

۲- مواد و روش‌ها

۲-۱- منطقه مورد مطالعه

در این تحقیق سیمای سرزمین تهران مطابق با مناطق ۲۲گانه شهرداری به‌عنوان منطقه مطالعاتی مورد بررسی قرار گرفته است. شهر تهران در دامنه جنوبی کوه‌های البرز و حاشیه شمالی کویر مرکزی ایران در دشتی به نسبت هموار با مساحت ۷۳۰ کیلومتر مربع و جمعیتی معادل ۸۶۹۳۷۰۶ نفر (مرکز آمار ایران، ۱۳۹۵) واقع شده است. بستر طبیعی تهران بین ۳۵ تا ۳۶ درجه عرض شمالی و ۵۰ تا ۵۳ درجه طول شرقی از نصف‌النهار گرینویچ قرار گرفته است. این شهر از شمال به سلسله جبال البرز، از شرق به لواسانات، از غرب به کرج و از جنوب به ورامین محدود شده است (صمدی و همکاران، ۱۳۹۸).

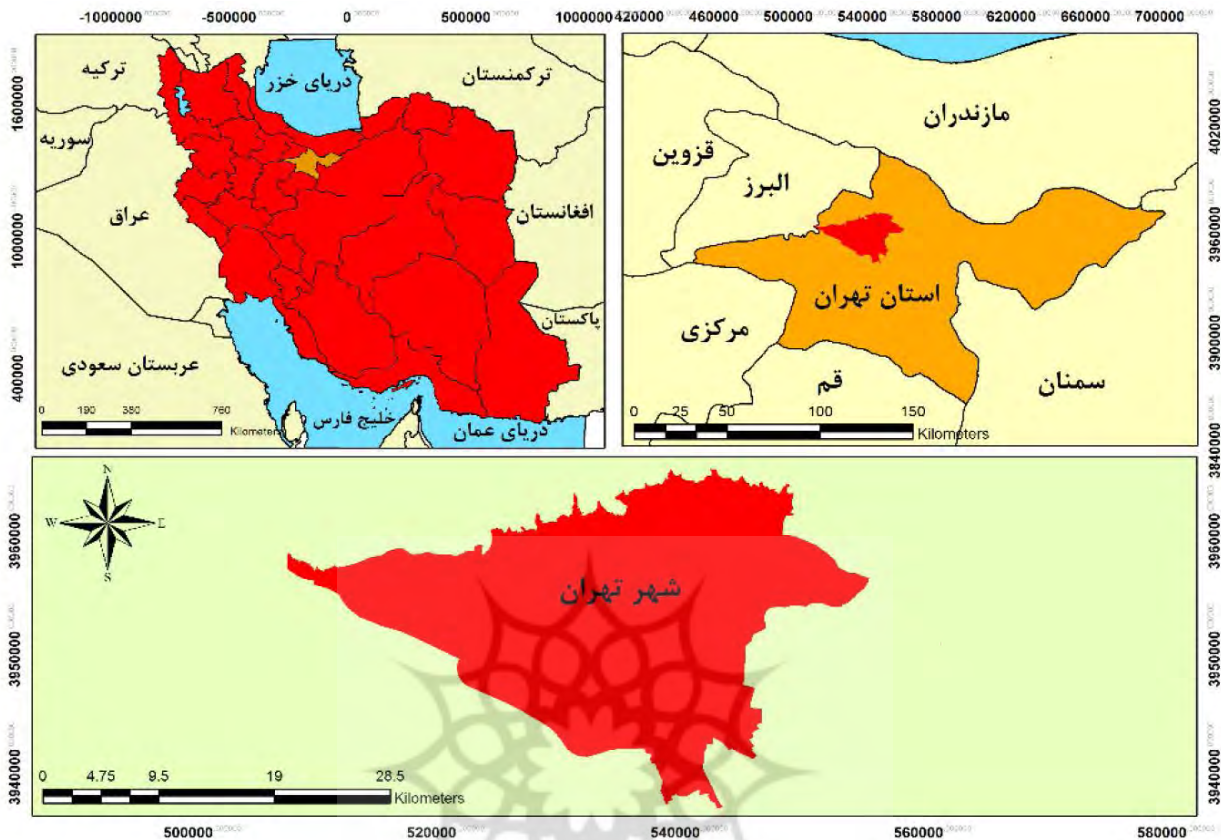
به‌طور کلی آب و هوای شهر تهران دارای شرایط نیمه‌کوبیری با بارندگی کم (کمتر از ۲۵۰ میلی‌متر در سال) است. میانگین دمای سالیانه بین ۱۵ تا ۲۰ درجه سانتی‌گراد می‌باشد. جهت کلی شیب در شهر تهران از شمال به جنوب است. این شهر به وسیله دو رود اصلی جاجرود در شرق و رود کرج در غرب همراه با رودهای فصلی مانند جعفرآباد، درکه، کن که همگی از شمال به جنوب جریان دارند مشروب می‌شود (پریور و همکاران، ۱۳۸۸: ۴۷).

آمیختگی بیشتر با دیگر لکه‌های باز و طبیعی، نقش مهمی در جابه‌جایی و پرورش گونه‌های جانوری و پرندگان را دارند (Andersson et al., 2020).

بر این اساس شناخت و ارزیابی تأثیر فرایندهای فضایی تغییر سیمای سرزمین بر مؤلفه‌های ساختاری "ترکیب و توزیع" زیرساخت‌های سبز شهری در عرصه ارتقاء برنامه‌ریزی فضایی و مدیریت بوم‌شناختی شهری موضوع قابل توجهی است. بوتکویلا و اهرن (۲۰۰۲) سه عامل اصلی، ساده‌سازی ساختار سیمای سرزمین (کاهش تنوع یا ناهمگنی لکه‌های طبیعی و سبز)، قطعه‌قطعه‌شدن سرزمین (کاهش پیوستگی میان لکه‌های طبیعی و زیستگاهی) و افزایش آشفتگی در پراکنش لکه‌های سبز و طبیعی در الگوی فضایی سیمای سرزمین را در کاهش فرایندهای بوم‌شناختی^۱ (جریان انرژی و مواد از طریق اجزای زنده و غیر زنده یک اکوسیستم) مؤثر می‌دانند (Botequilha & Ahern, 2002: 75). در این راستا شناخت و بررسی میزان ناهمگنی لکه‌های طبیعی و سبز سیمای سرزمین شهری در ارتباط با الگوی فضایی ترکیب و همچنین میزان پیوستگی و پراکنش لکه‌های طبیعی و مناطق سبز در ارتباط با الگوی فضایی توزیع زیرساخت سبز اهمیت می‌یابد (Grafius et al., 2018; Gherraz et al., 2020).

سنج‌های سیمای سرزمین در ارتباط با کمی کردن و سنجش الگوهای فضایی سیمای سرزمین در یک زمان مشخص کاربرد دارند و در مقیاس‌های مختلفی از جمله سطح لکه، سطح کلاس و سطح سیمای سرزمین قابل بررسی هستند (Yu et al., 2019). کاربرد سنج‌های سیمای سرزمین برای تحلیل الگوی ترکیب و توزیع زیرساخت سبز شهری، درک بهتری از ساختارهای بوم‌شناختی را در مقیاس سیمای سرزمین شهری برای برنامه‌ریزان و سیاست‌گذاران امر فراهم می‌آورند (Paudel & Yuan, 2012).

بنابراین در پژوهش حاضر سعی بر آن است تا در بازه زمانی سال‌های ۲۰۳۰-۱۹۹۰ میلادی با استفاده از الگوریتم



نگاره ۲: محدوده مورد مطالعه

۲-۲- روش تحقیق

پژوهش حاضر به لحاظ هدف گذاری کاربردی و از نظر روش شناختی توصیفی- تحلیلی می باشد. در این تحقیق پس از جمع آوری اطلاعات از طریق مرور منابع و اسناد کتابخانه‌ای، به مطالعه و بررسی داده‌های حاصل از سنجش از دور در منطقه مورد پژوهش در طی چهار مرحله پرداخته شده است که عبارتند از:

۳) تعیین فرآیندهای فضایی تغییر الگوی سیمای سرزمین توسط الگوریتم درخت تصمیم‌گیری،
 ۴) محاسبه و تحلیل سنجه‌های سیمای سرزمین در سه وضعیت گذشته، حال و آینده توسط نرم‌افزار Fragstate 4.2 (نگاره ۳).

۲-۲-۱- استخراج کلاس‌های کاربری پوشش اراضی در بازه زمانی مورد مطالعه

به منظور آماده‌سازی نقشه کاربری/پوشش زمین شهر تهران در بازه زمانی مورد مطالعه (۱۹۹۰-۲۰۰۰-۲۰۱۰-۲۰۲۰)، از تصاویر سنجنده‌های TM (۱۹۹۰-۲۰۰۰)، ETM+ (۲۰۱۰) و OLI (۲۰۲۰) ماهواره لندست استفاده شده است. این تصاویر از سایت سازمان زمین‌شناسی ایالات متحده (USGS)^۲ تهیه و دانلود شد. مشخصات تصاویر مورد استفاده در جدول ۲ ارائه شده است.

۱) استخراج کلاس‌های کاربری اراضی سیمای سرزمین شهری با استفاده از تصاویر ماهواره‌ای لندست در دوره‌های زمانی ۱۹۹۰، ۲۰۰۰، ۲۰۱۰ و ۲۰۲۰ (توسط نرم‌افزارهای Arc GIS 10.2 و Google Earth، Envi 5.3).

۲) مدل‌سازی تغییر کاربری اراضی ۲۰۳۰ با استفاده از مدل تلفیقی زنجیره مارکوف و سلول‌های خودکار (CA-MARKOV) در محیط نرم‌افزار ادریسی ترست^۱،

2- The official website of US Geological Survey (USGS) (<http://glovis.usgs.gov>)

1- IDRISI-TerrSet Geospatial Monitoring and Modeling software

فصلنامه علمی - پژوهشی اطلاعات جغرافیایی (مجله)

ارزیابی تغییرات فضایی-زمانی زیرساخت سبز شهری مبتنی بر الگوریتم ... / ۱۷۳

ارزیابی صحت شامل بررسی مقادیر تحلیل دقت کل (OA)^۶ و ضریب کاپا (KC)^۷ است (Talebi Khiavi & Mostafazadeh, 2021). مقادیر ضریب کاپا بالای ۸۰ درصد، نشان‌دهنده این است که به‌طور کلی تطابق خوبی بین طبقه‌بندی و انواع طبقات کاربری موجود در زمین وجود دارد (Teferi et al. 2010).

۲-۲-۲- مدل‌سازی تغییر کاربری/ پوشش اراضی

مدل‌سازی تغییرات کاربری اراضی اطلاعات ارزشمندی را برای ادراک بهتر فرآیند تغییر و پیش‌بینی مناطق در معرض تغییر فراهم می‌آورد. در حال حاضر مدل‌های متعددی به‌منظور مطالعه و پیش‌بینی تغییرات کاربری زمین توسعه یافته‌اند، از جمله این مدل‌ها می‌توان به مدل شبکه عصبی مصنوعی (Tayyebi et al., 2011)، مدل‌های رگرسیون آماری مانند رگرسیون لجستیک (Hu & lo, 2007)، مدل‌های مبتنی بر عامل (Matthews et al., 2007)، مدل زنجیره مارکوف (Myint & Wang, 2006) و مدل سلول‌های خودکار (Yang et al., 2008) اشاره کرد. در این میان مدل زنجیره مارکوف (MC) و مدل سلول‌های خودکار (CA)، از قابلیت بالایی برای بررسی و پیش‌بینی تغییرات فضایی-زمانی کاربری اراضی مناطق شهری و غیرشهری برخوردار می‌باشند (Lu & Weng, 2007).

• مدل زنجیره مارکوف

مدل زنجیره مارکوف به‌منظور تعیین احتمال تغییر هر طبقه کاربری به طبقات کاربری دیگر (یا بدون تغییر ماندن آن) مورد استفاده قرار می‌گیرد. در این مدل همواره از دو نقشه رستری استفاده می‌شود که ورودی‌های مدل می‌باشند. علاوه بر این دو نقشه، فاصله زمانی بین دو تصویر و فاصله زمانی پیش‌بینی نیز در مدل در نظر گرفته می‌شود. خروجی این مدل نیز شامل ماتریس احتمالات تبدیل وضعیت، ماتریس مساحت‌های تبدیل شده هر کلاس و در نهایت تصاویر احتمالی شرطی برای تبدیل کاربری‌های

جدول ۲: مشخصات تصاویر ماهواره‌ای مورد استفاده

تاریخ	تفکیک مکانی	گذر/ردیف	سنجنه	مشخصات ماهواره
July 31, 1990	۳۰	۱۶۴/۳۵	TM	Landsat 4-5
July 26, 2000	۳۰	۱۶۴/۳۵	TM	Landsat 4-5
July 14, 2010	۳۰	۱۶۴/۳۵	ETM+	Landsat 7
July 17, 2020	۳۰	۱۶۴/۳۵	OLI	Landsat 8

سپس در مرحله پیش‌پردازش در محیط نرم‌افزار ENVI 5.3 بر روی تصاویر ماهواره‌ای تصحیحات هندسی و رایومتریک صورت گرفت. این تصحیحات برای رفع برخی از خطاهای موجود در تصاویر از نقطه نظرهای تفکیک فضایی، زمانی و طیفی ضرورت می‌یابد (Teferi et al., 2010; 2418).

در گام بعدی طبقه‌بندی نظارت‌نشده برای درک کلی از کلاس‌های کاربری/پوشش زمین موجود در منطقه مورد مطالعه انجام شده است. برای افزایش دقت فرآیند طبقه‌بندی در این مطالعه، طبقه‌بندی مبتنی بر شاخص با استفاده از شاخص تفاضل نرمال‌شده پوشش گیاهی (NDVI)^۱، شاخص بهبودیافته تفاضل نرمال‌شده آب (MNDWI)^۲ و شاخص تفاضل نرمال ساخت‌وساز (NDBI)^۳ برای استخراج مناطق موردنظر (ROIs)^۴ از مؤلفه‌های ساختاری انجام شده است.

با استفاده از ROIs های تهیه‌شده براساس الگوریتم ماشین بردار پشتیبان (SVMs)^۵ در محیط نرم‌افزار ENVI 5.3 طبقه‌بندی نظارت‌شده صورت پذیرفت. در این مرحله چهار کاربری سطوح ساخته‌شده (منطقه شهری)، اراضی بایر، فضاهای سبز و سطوح آبی در سیمای سرزمین تهران شناسایی شدند. سپس با استفاده از تصاویر Google Earth، نقاط GPS و نقشه‌های موجود از کاربری زمین (مقیاس) منطقه مورد مطالعه، صحت طبقه‌بندی تصاویر مورد بررسی قرار گرفت.

- 1- Normalized Difference Vegetation Index (NDVI)
- 2- Modified Normalized Difference Water Index (MNDWI)
- 3- Normalized Difference Built-up Index (NDBI)
- 4- Regions of Interest (ROIs)
- 5- Support Vector Machines (SVMs)

6- Overall Accuracy (OA)

7- Kappa Coefficient (KC)

مختلف می‌باشد (کریمی فیروزجائی و همکاران، ۱۳۹۷).

۲-۳- تعیین فرآیندهای فضایی تغییر الگوی سیمای سرزمین تهران

در این قسمت با استفاده از الگوریتم درخت تصمیم‌گیری به تشخیص فرآیندهای فضایی تغییر الگوی سیمای سرزمین شهری تهران در ۴ دوره زمانی ۱۰ ساله ۲۰۳۰-۱۹۹۰ میلادی پرداخته شده است (Bogaert et al., 2004: 65).

به‌طور کلی ارزیابی فرآیندهای فضایی تغییر الگوی سیمای سرزمین براساس سه داده (فضایی-زمانی) ورودی الگوریتم درخت تصمیم‌گیری صورت می‌گیرد: تعداد لکه‌ها در هر کلاس از کاربری (n)، مساحت هر کلاس از کاربری (a) و محیط هر کلاس از کاربری (p).

داده‌های ورودی به الگوریتم درخت تصمیم‌گیری قبل از تغییر الگوی سیمای سرزمین به‌عنوان $a1$ و $p1$ نشان داده می‌شوند، همچنین در پایان دوره زمانی در نظر گرفته شده در آن تغییر الگوی سیمای سرزمین صورت می‌گیرد به‌عنوان $a2$ و $p2$ ثبت شده و در الگوریتم درخت تصمیم‌گیری به‌عنوان عناصر کلیدی تشخیص فرآیندهای فضایی تغییر سیمای سرزمین کاربرد دارند (Bogaert et al., 2004: 65). بنابراین از الگوریتم درخت تصمیم‌گیری در تشخیص فرآیندهای فضایی مؤثر در تغییر کلاس‌های کاربری اراضی (سبز، باز و ساخت و ساز) در سیمای سرزمین تهران استفاده شد.

۲-۴- کمی‌کردن و تحلیل سنجه‌های منتخب سیمای سرزمین

در این مرحله، به‌منظور کمی‌کردن ساختار و الگوی سیمای سرزمین شهری از نرم‌افزار Fragstats4.2 استفاده شده است. با توجه به بررسی‌های انجام شده در این زمینه و مرور منابع متعدد، تعداد ۷ سنجه در سطح کلاس شامل COHESION, IJI, ENN-MN, LSI, PLAND, LPI, NP و ۶ سنجه در سطح سیمای سرزمین شامل ED, LSI, PD, NP, SIDI, IJI، برای تحلیل الگوی ترکیب و توزیع زیرساخت سبز سیمای سرزمین تهران در دسته‌بندی سه مؤلفه میزان ناهمگنی، پیوستگی و پراکنش لکه‌های طبیعی و سبز (Botequilha & Ahern, 2002: 75) انتخاب شدند (جدول ۳).

• مدل سلول‌های خودکار (CA)

مدل سلول‌های خودکار، سیستمی دینامیک است. در این مدل فضا به صورت یک شبکه تعریف می‌شود که به هر خانه آن یک سلول (با اشکال منظم یا نامنظم) گفته می‌شود. زمان در این مدل به دوره‌های ناپیوسته تقسیم می‌شود، هر یک از سلول‌ها دارای یک وضعیت است. حالت هر سلول در زمان $t+1$ به وسیله حالت سلول‌های همسایگی در زمان t و مطابق قوانین از پیش تعریف شده تعیین می‌شود (کریمی فیروزجائی و همکاران، ۱۳۹۷: ۳۹). مطالعات متعددی نشان داده‌اند که مدل اتوماتای سلولی، توانایی مدل‌سازی فرآیند پیچیده فضایی و زمانی کاربری‌های سیمای سرزمین شهری را دارا است (Sang et al., 2011: 940).

• مدل تلفیقی زنجیره مارکوف و سلول‌های خودکار (CA-MARKOV)

مدل تلفیقی زنجیره مارکوف و سلول‌های خودکار (CA-Markov) ترکیبی از مدل زنجیره مارکوف (از دسته مدل‌های تخمین تجربی) و مدل سلول‌های خودکار (از دسته مدل‌های شبیه‌سازی پویا) می‌باشد. در مدل زنجیره‌های مارکوف اگر چه احتمالات انتقال در هر کاربری دقت زیادی دارد، اما اطلاعاتی از توزیع فضایی مربوط به کاربری‌ها وجود ندارد. بنابراین مدل تصادفی مارکوف فاقد هر گونه اطلاعات وابستگی فضایی است. به همین دلیل از مدل CA برای اضافه کردن مشخصه فضایی به مدل استفاده می‌شود. در این مدل تلفیقی از فیلتر CA برای توسعه یک فاکتور وزن‌دهی مجاورت فضایی برای تغییر وضعیت سلول‌ها براساس وضعیت همسایه‌اش استفاده خواهد شد. بنابراین در مدل CA-Markov استفاده از ماتریس مساحت انتقال، نقشه کاربری اراضی در محیط نرم‌افزار ادریسی ترست^۱ برای آینده پیش‌بینی می‌شود (کریمی فیروزجائی و همکاران، ۱۳۹۷: ۳۹).

1- IDRISI-TerrSet Geospatial Monitoring and Modeling software

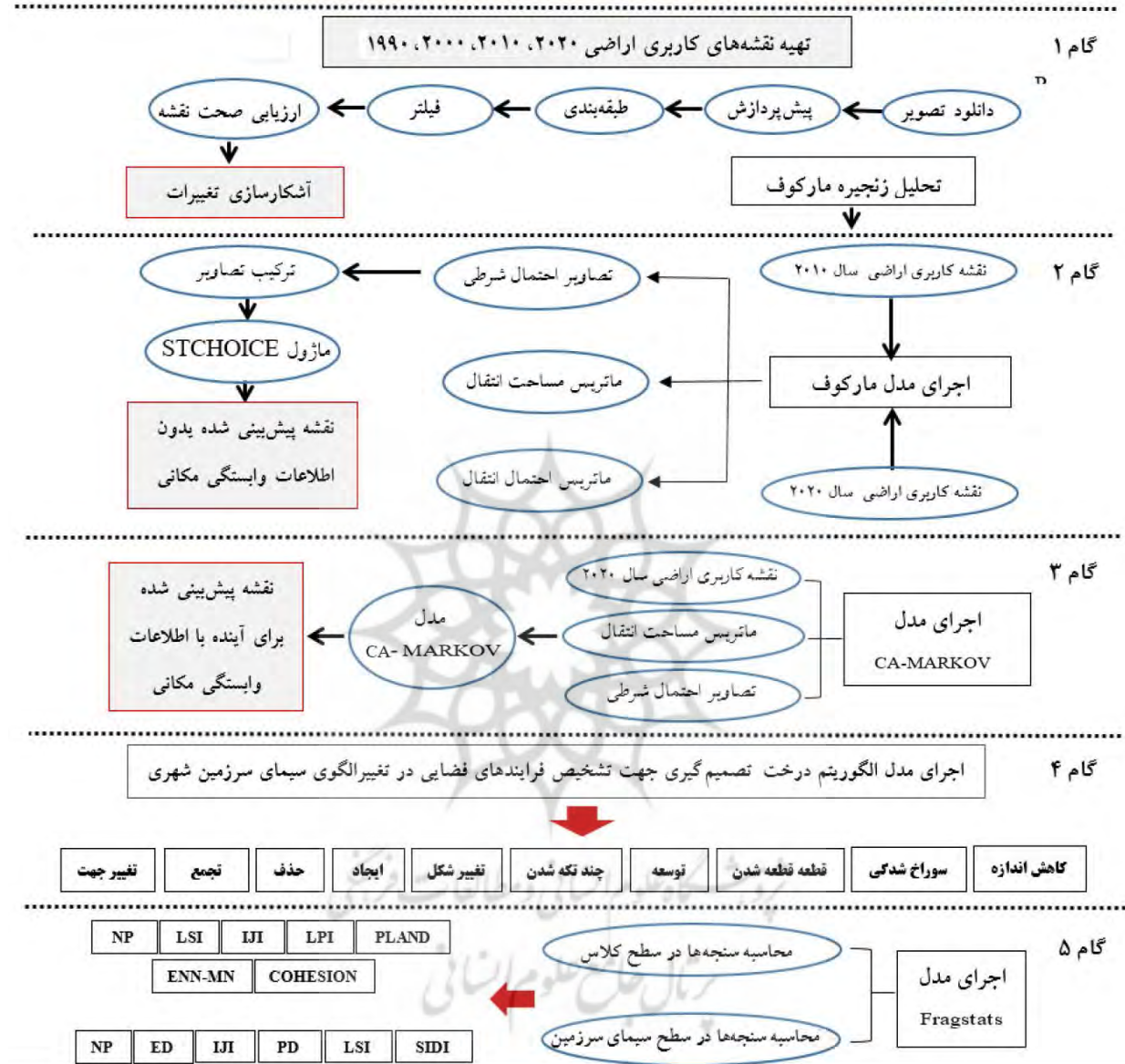
فصلنامه علمی - پژوهشی اطلاعات جغرافیایی (سبز)

ارزیابی تغییرات فضایی-زمانی زیرساخت سبز شهری مبتنی بر الگوریتم ... / ۱۷۵

جدول ۳: سنجه‌های منتخب جهت کمی کردن الگوی فضایی ترکیب و توزیع زیرساخت‌های سبز شهری

منبع	فرآیند فضایی مرتبط با میزان سنجه	مقیاس مطالعه	واحد	نام انگلیسی	نام سنجه	مؤلفه‌های مؤثر بر فرآیندهای بوم شناختی سیمای سرزمین	معیارهای مهم در الگوی فضایی زیرساخت سبز
Chen et al., 2014; Liu et al., 2018; Yu et al., 2019; Gherraz et al., 2020; Moarrab et al., 2021	حذف، تجمع، ایجاد، چندتکه شدن، قطعه قطعه شدن	کلاس / سیمای سرزمین	ندارد	Number of patches (NP)	تعداد لکه	ناهمگنی لکه‌های طبیعی (سبز و باز) (Botequilha & Ahern, 2002: 75)	ترکیب
Liu et al., 2016; Inkoom et al., 2018; Woldeamayay & Genovese, 2021	چند تکه شدن، قطعه قطعه شدن، حذف	سیمای سرزمین	تعداد در ۱۰۰ هکتار	Patch Density (PD)	تراکم لکه		
Chen et al., 2014; Vanderhaegen and Canters, 2017	تجمع، توسعه، حذف، کاهش اندازه	کلاس	درصد	Percentage of Landscape (PLAND)	درصد پوشش سیمای سرزمین		
Inkoom et al., 2018; Liu et al., 2018; Gherraz et al., 2020	کاهش اندازه، تجمع، توسعه	کلاس	درصد	Largest Patch Index (LPI)	شاخص بزرگ‌ترین لکه		
Walz et al., 2016; Chen et al., 2014	ایجاد، تجمع، حذف	سیمای سرزمین	ندارد	Simpson's Diversity Index (SIDI)	شاخص تنوع سیمپسون		
Liu et al., 2016; Gherraz et al., 2020; Park & Guldmann, 2020	تغییر شکل، تجمع، حذف، چند تکه شدن، قطعه قطعه شدن	کلاس / سیمای سرزمین	ندارد	Landscape Shape Index (LSI)	شکل سیمای سرزمین	پیوستگی لکه‌های طبیعی و زیستگاهی (Botequilha & Ahern, 2002: 75)	توزیع
Liu et al., 2016; Liang et al., 2017; Miller and Brewer, 2018	تجمع، سوراخ‌شدگی، چند تکه شدن، قطعه قطعه شدن	کلاس	ندارد	Patch Cohesion Index (COHESION)	شاخص پیوستگی لکه		
Miller and Brewer, 2018; Li et al., 2019; Chen et al., 2014	چند تکه شدن، قطعه قطعه شدن	سیمای سرزمین	متر در هکتار	Edge Density (ED)	تراکم حاشیه		
Liang et al., 2017; Huang et al., 2018; Woldeamayay & Genovese, 2021; Park & Guldmann, 2020	قطعه قطعه شدن، تجمع، توسعه، حذف، چندتکه شدن، ایجاد	کلاس	متر	Mean Euclidean Nearest-Neighbor Distance (ENN_MN)	میانگین فاصله نزدیک‌ترین همسایه اقلیدسی		
Liu et al., 2016; Inkoom et al., 2018; Liu et al., 2018; Yu et al., 2019	چند تکه شدن، قطعه قطعه شدن، تغییر شکل، ایجاد	کلاس / سیمای سرزمین	درصد	Interspersion juxtaposition index (IJI)	شاخص همبستگی و آمیختگی		

ارزیابی و تحلیل تغییرات فضایی- زمانی زیرساخت‌های سبز شهری



نگاره ۳: چارچوب اجرائی تحقیق

تصاویر براساس الگوریتم ماشین بردار پشتیبان نشان داد که چهار نوع کاربری از جمله مناطق ساخت و ساز، فضای سبز، بایر (بدون پوشش) و آبی در سیمای سرزمین تهران قابل تشخیص است. در جدول (۴) میزان مساحت هر یک از کاربری‌ها در سال‌های مورد مطالعه بررسی شده است. هم‌چنین در ادامه نقشه‌های کاربری اراضی در دوره‌های مختلف ارائه شده است (نگاره ۴).

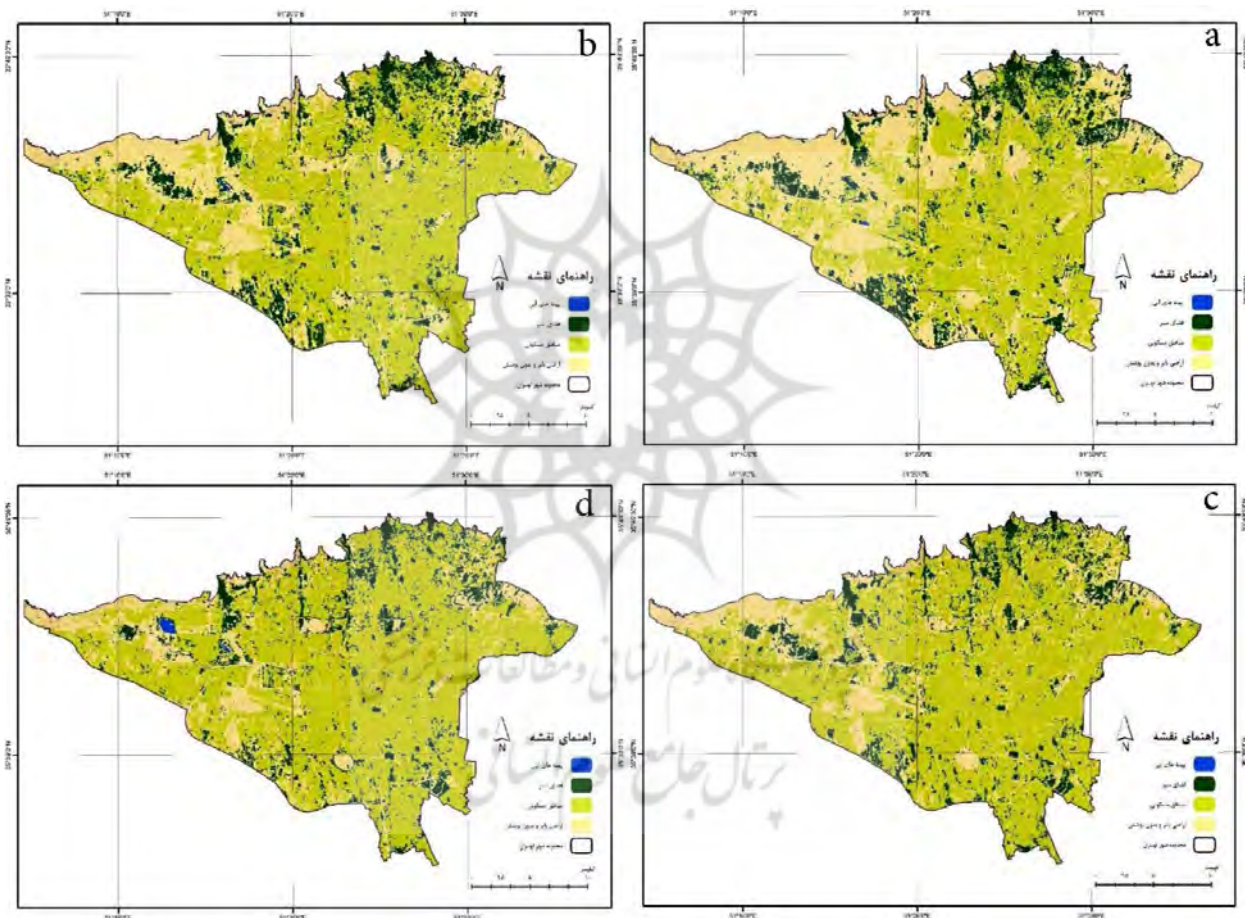
۳- نتایج تحقیق

نتایج حاصل از صحت‌سنجی طبقه‌بندی تصاویر نشان می‌دهد که مقدار صحت دقت کلی حاصل از طبقه‌بندی برای سال‌های ۱۹۹۰، ۲۰۰۰، ۲۰۱۰، ۲۰۲۰ به ترتیب (۹۴/۸۳، ۹۵/۴۲، ۹۸/۸۰، ۹۷/۳۸) و مقدار ضریب کاپا برای هر ۴ دوره به ترتیب برابر با (۰/۹۲۳، ۰/۹۳۱، ۰/۹۸۲، ۰/۹۵۸) می‌باشد که این میزان صحت در سطح قابل قبولی است. طبقه‌بندی

فصلنامه علمی - پژوهشی اطلاعات جغرافیایی (ساز) /
 ارزیابی تغییرات فضایی-زمانی زیرساخت سبز شهری مبتنی بر الگوریتم ... / ۱۷۷

جدول ۴: مساحت کاربری/ پوشش اراضی شهری (بر حسب هکتار)

سال ۲۰۲۰		سال ۲۰۱۰		سال ۲۰۰۰		سال ۱۹۹۰		کاربری/پوشش اراضی شهری
درصد	هکتار	درصد	هکتار	درصد	هکتار	درصد	هکتار	
۰/۲۷	۱۶۸/۷۵	۰/۰۷	۴۳/۹۲	۰/۱۷	۱۰۴/۸۵	۰/۱۴	۸۹/۵۵	پهنه‌های آبی
۱۱/۸۶	۷۲۸۱/۵۴	۱۱/۸۹	۷۲۹۵/۵۸	۱۳/۰۷	۸۰۱۲/۱۶	۱۴/۱۹	۸۷۰۶/۰۶	فضای سبز
۶۴/۷۸	۳۹۷۲۶/۲۷	۵۷/۸۹	۳۵۵۱۷/۷۸	۴۹/۹۹	۳۰۶۶۸/۳۱	۳۷/۳۴	۲۲۹۰۷/۴۳	ساخت و ساز
۲۳/۰۹	۱۴۱۶۹/۴۲	۳۰/۱۵	۱۸۴۸۸/۷۰	۳۶/۷۷	۲۲۵۶۰/۶۶	۴۸/۳۳	۲۹۶۴۲/۸۵	بایر/بدون پوشش
۱۰۰	۶۱۳۴۵/۹۸	۱۰۰	۶۱۳۴۵/۹۸	۱۰۰	۶۱۳۴۵/۹۸	۱۰۰	۶۱۳۴۵/۹۸	جمع کل



نگاره ۴: نقشه کاربری اراضی سیمای سرزمین تهران در سال‌های (a). ۱۹۹۰، (b). ۲۰۰۰، (c). ۲۰۱۰، (d). ۲۰۲۰.

مورد مطالعه انجام شده است. در پیش‌بینی سال ۲۰۳۰ در گام نخست از زنجیره مارکوف استفاده شد، به این ترتیب که ابتدا تصویر طبقه‌بندی شده سال ۲۰۰۰ و بعد تصویر طبقه‌بندی شده سال ۲۰۱۰ به مدل معرفی شد و از این طریق ماتریس تبدیل‌ها به‌دست آمد، همچنین برای پیش‌بینی

۱-۳- مدل‌سازی تغییرات کاربری/پوشش اراضی بوسیله مدل تلفیقی زنجیره مارکوف و سلول‌های خودکار در سال ۲۰۳۰ پس از تهیه نقشه‌های کاربری اراضی، بررسی و آشکارسازی تغییرات شکل گرفته در طی چهار دوره زمانی

سال ۲۰۳۰ پس از این مرحله، تصویر سال ۲۰۲۰ به همراه ماتریس تبدیل‌های به‌دست آمده از دوره قبل به مدل معرفی شد و پیش‌بینی سال ۲۰۳۰ انجام گرفت (نگاره ۵). مساحت هر یک از کاربری‌ها در نقشه پیش‌بینی سال ۲۰۳۰، در جدول ۵ محاسبه شده است.

سال ۲۰۳۰ میلادی، مساحت کاربری ساخت و ساز از میزان ۳۷/۳۴ به ۶۵/۲۶ درصد افزایش یافته است. در ارتباط با سایر کاربری‌ها در ۴ دوره ۱۰ ساله فرآیندهای فضایی تغییر در نوع کاربری‌ها متفاوت است. به‌عنوان مثال در بازه زمانی ۲۰۰۰ - ۱۹۹۰، فرآیندهای فضایی حذف در ارتباط با کاربری سبز، قطعه‌قطعه شدن در ارتباط با کاربری بایر و همچنین فرآیند فضایی ایجاد در ارتباط با مناطق آبی رخ داده است. بارزترین تغییر در این دوره در کاربری بایر با کاهش شدید مساحت ۱۱/۵۶ درصدی و افزایش تعداد لکه در نتیجه فرآیند فضایی قطعه‌قطعه شدگی در سیمای سرزمین تهران مشاهده می‌شود. در بازه زمانی ۲۰۱۰ - ۲۰۰۰ در کاربری اراضی سبز در نتیجه فرآیند فضایی قطعه‌قطعه شدن با افزایش تعداد لکه و کاهش مساحت ۱/۱۸ درصدی مواجه شده است (جدول ۴). در این زمان نیز مجدداً بارزترین تغییر در اراضی بایر در نتیجه فرآیند فضایی حذف با کاهش ۶/۶۲ درصدی دیده می‌شود. همچنین بر روی مناطق آبی نیز فرآیند فضایی حذف صورت گرفته است. پس از آن در بازه زمانی ۲۰۲۰ - ۲۰۱۰ نیز فرآیند فضایی حذف در اراضی سبز شکل گرفته و مساحت اراضی سبز در حدود ۰/۰۳ درصد تقلیل می‌یابد (جدول ۵). همچنین فرآیند فضایی قطعه‌قطعه شدن در کاربری بایر و فرآیند فضایی تجمع در پهنه‌های آبی رخ داده است. اما نکته حائز اهمیت در پیش‌بینی سال ۲۰۳۰ این است که فرآیند فضایی حذف برای هر دو کاربری فضای سبز و بایر رخ می‌دهد و فرآیند فضایی تجمع در مناطق آبی شکل می‌گیرد.

سال ۲۰۳۰ پس از این مرحله، تصویر سال ۲۰۲۰ به همراه ماتریس تبدیل‌های به‌دست آمده از دوره قبل به مدل معرفی شد و پیش‌بینی سال ۲۰۳۰ انجام گرفت (نگاره ۵). مساحت هر یک از کاربری‌ها در نقشه پیش‌بینی سال ۲۰۳۰، در جدول ۵ محاسبه شده است.

جدول ۵: مساحت کاربری/ پوشش اراضی شهری

کاربری/پوشش اراضی شهری	سال ۲۰۳۰	
	هکتار	درصد
پهنه‌های آبی	۱۸۲/۲۵	۰/۲۹
فضای سبز	۷۲۱۵/۹۳	۱۱/۷۶
ساخت و ساز	۴۰۰۲۴/۹۸	۶۵/۲۶
بایر/بدون پوشش	۱۳۹۲۲/۸۲	۲۲/۶۹
جمع کل	۶۱۳۴۵/۹۸	۱۰۰



نگاره ۵: نقشه پیش‌بینی کاربری اراضی سیمای سرزمین شهر تهران در سال ۲۰۳۰

۳-۳- بررسی روند تغییرات الگوی فضایی ترکیب و توزیع زیرساخت سبز تهران

در این مرحله تغییرات فضایی- زمانی الگوی سیمای سرزمین تهران در سه کاربری اراضی سبز، اراضی بایر و اراضی ساخت و ساز توسط سنج‌های سیمای سرزمین مورد بررسی قرار گرفته است. با توجه به اینکه سهم تشکیل لکه‌های آبی (که عمدتاً شامل استخرهای آبی عمومی،

۲-۳- پایش فرآیندهای فضایی تغییر سیمای سرزمین تهران یافته‌های حاصل از خروجی الگوریتم درخت تصمیم‌گیری نشان می‌دهد (جدول ۶) که در طی چهار دوره زمانی مذکور کاهش تعداد لکه‌های ساخت و ساز به موازات افزایش مساحت کل این نوع کاربری، بیانگر فرآیند فضایی تجمع لکه‌های انسان‌ساخت می‌باشد. در بازه زمانی ۱۹۹۰ تا

فصلنامه علمی - پژوهشی اطلاعات جغرافیایی (سپهر)

ارزیابی تغییرات فضایی-زمانی زیرساخت سبز شهری مبتنی بر الگوریتم ... / ۱۷۹

جدول ۶: بررسی فرآیندهای فضایی مؤثر در تغییر سیمای سرزمین تهران براساس داده‌های حاصل از درخت تصمیم‌گیری

دوره زمانی	کاربری‌ها	فرآیند فضایی تغییر	NP تعداد لکه‌ها	PA مساحت لکه‌ها (km ²)	PP محیط لکه‌ها (km)
۱۹۹۰-۲۰۰۰	مناطق سبز	حذف	۱۷۹۹-۲۱۱۸	۸۰/۱۲ - ۸۷/۰۶	۲۴۰۱/۴۸ - ۲۷۱۲/۰۹
	مناطق بایر	قطعه‌قطعه شدن	۲۹۷۶ - ۲۴۴۰	۲۲۵/۶۰ - ۲۹۶/۴۲	۴۰۲۹/۲۰ - ۳۲۹۷/۴۱
	مناطق ساخت و ساز	تجمع	۱۷۳۳ - ۲۶۲۳	۳۰۶/۶۸ - ۲۲۹/۰۷	۲۴۴۱/۶۲ - ۳۸۸۷/۵۴
۲۰۰۰-۲۰۱۰	مناطق آبی	ایجاد	۵۵ - ۲۰	۱/۰۴۸۵ - ۰/۸۹۵۵	۶۴/۱۸۷ - ۲۹/۳۱۰
	مناطق سبز	قطعه‌قطعه شدن	۲۵۹۲ - ۱۷۹۹	۷۲/۹۵ - ۸۰/۱۲	۳۲۴۲/۸۵ - ۲۴۰۱/۴۸
	مناطق بایر	حذف	۲۸۹۳ - ۲۹۷۶	۱۸۴/۸۸ - ۲۲۵/۶۰	۴۰۲۹/۶۲ - ۴۰۴۹/۲۰
۲۰۱۰-۲۰۲۰	مناطق ساخت و ساز	تجمع	۱۵۷۵ - ۱۷۳۳	۳۵۵/۱۷ - ۳۰۶/۶۸	۲۳۲۴/۲۲ - ۲۴۴۱/۶۲
	مناطق آبی	حذف	۲۸ - ۵۵	۰/۴۳۹۲ - ۱/۰۴۸۵	۳۰/۶۴۲۴/۱۸۷
	مناطق سبز	حذف	۲۱۶۹ - ۲۵۹۲	۷۲/۸۱ - ۷۲/۹۵	۲۹۲۴/۲۴ - ۳۲۴۲/۸۵
۲۰۲۰-۲۰۳۰	مناطق بایر	قطعه‌قطعه شدن	۳۵۸۲ - ۲۸۹۳	۱۴۱/۶۹ - ۱۸۴/۸۸	۵۰۱۳/۷۲ - ۴۰۲۹/۶۲
	مناطق ساخت و ساز	تجمع	۸۵۲ - ۱۵۷۵	۳۹۷/۲۶ - ۳۵۵/۱۷	۱۳۲۹/۳۷ - ۲۳۲۴/۲۲
	مناطق آبی	تجمع	۲۵ - ۲۸	۱/۶۸۷۵ - ۰/۴۳۹۲	۳۰/۲۱۷ - ۳۰/۴۲۴
۲۰۲۰-۲۰۳۰	مناطق سبز	حذف	۲۰۵۵ - ۲۱۶۹	۷۲/۱۵ - ۷۲/۸۱	۲۷۰۶/۸۴ - ۲۹۲۴/۲۴
	مناطق بایر	حذف	۲۹۶۷ - ۳۵۸۲	۱۳۹/۲۲ - ۱۴۱/۶۹	۴۱۲۳/۵۳ - ۵۰۱۳/۷۲
	مناطق ساخت و ساز	تجمع	۷۰۵ - ۸۵۲	۴۰۰/۲۴ - ۳۹۷/۲۶	۱۰۹۰/۲۸ - ۱۳۲۹/۳۷
	مناطق آبی	تجمع	۲۳ - ۲۵	۱/۸۲۲۵ - ۱/۶۸۷۵	۲۷/۴۵۷ - ۳۰/۲۱۷

آبنماها و دریاچه‌های مصنوعی است) از کل سیمای سرزمین شهری تهران سهمی ناچیز است و در سال‌های اخیر به سبب ساخت دریاچه مصنوعی خلیج فارس در کنار دریاچه مصنوعی آزادی روندی افزایشی را طی کرده است در این تحقیق از بحث در مورد آن صرف‌نظر می‌شود.

۲۰۲۰ و به ۷۰۵ لکه در سال ۲۰۳۰ کاهش می‌یابد. میزان سنجه تعداد لکه برای اراضی سبز و بایر در دوره‌های زمانی مختلف بسته به تأثیر فرآیند فضایی حذف کاهش و بسته به فرآیند فضایی قطعه‌قطعه شدن (خرداندگی لکه‌ها) افزایش را نشان می‌دهد (جدول ۷). مقایسه درصد پوشش سیمای سرزمین (PLAND) در سطح کلاس نشان می‌دهد که مساحت اراضی انسان ساخت از ۳۷/۳۴ درصد در سال ۱۹۹۰ به میزان ۶۴/۷۵ درصد در سال ۲۰۲۰ افزایش یافته و در مقابل مساحت اراضی بایر از ۴۸/۳۲ درصد در سال ۱۹۹۰ به ۲۳/۰۹ درصد در سال ۲۰۲۰ کاهش یافته است که براساس پیش‌بینی سال ۲۰۳۰ به میزان ۲۲/۶۹ درصد می‌رسد. همچنین سهم اراضی فضای سبز نیز از میزان ۱۴/۱۹ درصد در سال ۱۹۹۰ به میزان ۱۱/۸۶ درصد در سال ۲۰۲۰ کاهش یافته و این روند در سال ۲۰۳۰ نیز ادامه دارد. همچنین افزایش میزان سنجه بزرگ‌ترین لکه (LPI) برای کاربری انسان ساخت از ۱/۴۳ درصد در سال ۱۹۹۰

• تحلیل تغییرات سنجه‌ها در سطح کلاس
بررسی روند تغییرات سنجه‌ها در سطح کلاس به‌طور مشخص در دسته‌بندی سنجه‌ها در الگوی ترکیب و همچنین الگوی توزیع سیمای سرزمین تهران صورت گرفت که به شرح (جدول ۷) می‌باشد. وضعیت طبقات براساس الگوی "ترکیب" سیمای سرزمین تهران در سطح کلاس (جدول ۷) نشان می‌دهد که در مورد سنجه تعداد لکه (NP)، بیشترین تغییر در طول این بازه زمانی در تعداد لکه‌های مربوط به کلاس انسان ساخت دیده می‌شود که متأثر از فرآیند فضایی تجمع از ۲۶۲۳ لکه در سال ۱۹۹۰ به ۸۵۲ لکه در سال

جدول ۷: نتایج محاسبه سنجه‌ها در الگوی ترکیب و توزیع سیمای سرزمین تهران در سطح کلاس

توزیع			ترکیب				سنجه کاربری	سال
COHESION	IJI	ENN_MN	LSI	LPI	PLAND	NP		
۹۶/۸۹	۶۳/۸۶	۱۳۶/۹۲	۵۵/۸۷	۲/۵۶	۱۴/۱۹	۲۱۱۸	اراضی سبز	۱۹۹۰
۹۹/۸۶	۵۱/۴۰	۸۱/۴۰	۷۵/۹۷	۴۲/۶۶	۴۸/۳۳	۲۴۴۰	اراضی بایر	
۹۷/۶۱	۴۳/۴۳	۸۷/۲۶	۷۷/۵۰	۱/۴۳	۳۷/۳۴	۲۶۲۳	اراضی ساخت و ساز	
۹۵/۸۱	۶۲/۲۹	۱۵۱/۸۱	۵۴/۰۴	۱/۶۳	۱۳/۰۷	۱۷۹۹	اراضی سبز	۲۰۰۰
۹۹/۷۶	۵۰/۸۸	۸۳/۸۳	۸۰/۰۸	۲۹/۹۷	۳۶/۷۷	۲۹۷۶	اراضی بایر	
۹۹/۵۹	۴۵/۲۱	۹۰/۱۵	۶۳/۶۷	۲۵/۷۶	۴۹/۹۹	۱۷۳۳	اراضی ساخت و ساز	
۹۲/۴۶	۶۴/۲۰	۱۳۰/۵۹	۵۸/۲۲	۰/۴۶	۱۱/۸۹	۲۵۹۲	اراضی سبز	۲۰۱۰
۹۹/۶۶	۴۵/۹۷	۸۴/۵۲	۸۷/۵۷	۲۱/۷۸	۳۰/۱۵	۲۸۹۳	اراضی بایر	
۹۹/۲۵	۴۸/۴۴	۸۴/۳۹	۶۳/۹۸	۱۱/۴۱	۵۷/۸۹	۱۵۷۵	اراضی ساخت و ساز	
۹۲/۴۶	۶۴/۱۶	۱۳۷/۶۲	۶۱/۵۲	۰/۴۱	۱۱/۸۶	۲۱۶۹	اراضی سبز	۲۰۲۰
۹۹/۴۰	۴۹/۶۲	۸۳/۲۳	۸۷/۷۸	۱۴/۱۳	۲۳/۰۹	۳۵۸۲	اراضی بایر	
۹۹/۶۹	۵۳/۸۷	۸۵/۶۲	۵۴/۹۹	۳۱/۳۴	۶۴/۷۸	۸۵۲	اراضی ساخت و ساز	
۹۲/۲۹	۶۳/۹۱	۱۴۴/۲۱	۵۷/۱۳	۰/۴۱	۱۱/۷۶	۲۰۵۵	اراضی سبز	۲۰۳۰
۹۹/۴۳	۴۸/۹۱	۸۶/۳۰	۷۷/۴۲	۱۴/۳۴	۲۲/۶۹	۲۹۶۷	اراضی بایر	
۹۹/۷۴	۵۵/۷۹	۹۱/۴۹	۴۹/۵۴	۳۴/۵۰	۶۵/۲۶	۷۰۵	اراضی ساخت و ساز	

بر اساس پیش‌بینی سال ۲۰۳۰، این شاخص برای هر سه کاربری کاهش می‌یابد. سنجه میانگین فاصله نزدیک‌ترین همسایه اقلیدسی (ENN-MN) بیانگر فاصله یک لکه از کاربری خاص از نزدیک‌ترین لکه مشابه خودش می‌باشد. بررسی این سنجه بیشترین میزان کاهش را برای کاربری ساخت و ساز از میزان ۸۷/۲۶ متر در سال ۱۹۹۰ به ۸۵/۶۲ در سال ۲۰۲۰ نشان می‌دهد که حاکی از پیوستگی بیشتر لکه‌های انسان‌ساخت در سیمای سرزمین تهران در طول سه دهه گذشته است. میزان این سنجه برای کاربری بایر و همچنین فضاهای سبز روندی افزایشی را نشان می‌دهد که بیانگر از هم گسیختگی و خرددانه‌گی بیشتر این کاربری‌ها در بازه زمانی مورد مطالعه است و در سال ۲۰۳۰ نیز تشدید می‌یابد (جدول ۷). شاخص هم‌بستگی و آمیختگی (IJI) بیانگر پراکندگی نسبی لکه‌های هر کلاس در سطح سیمای سرزمین است (نصیری و درویش‌صفت، ۱۳۹۷: ۵). کاهش مقادیر این سنجه بیانگر توزیع لکه‌ها با حالت کپه‌ای است و افزایش مقادیر

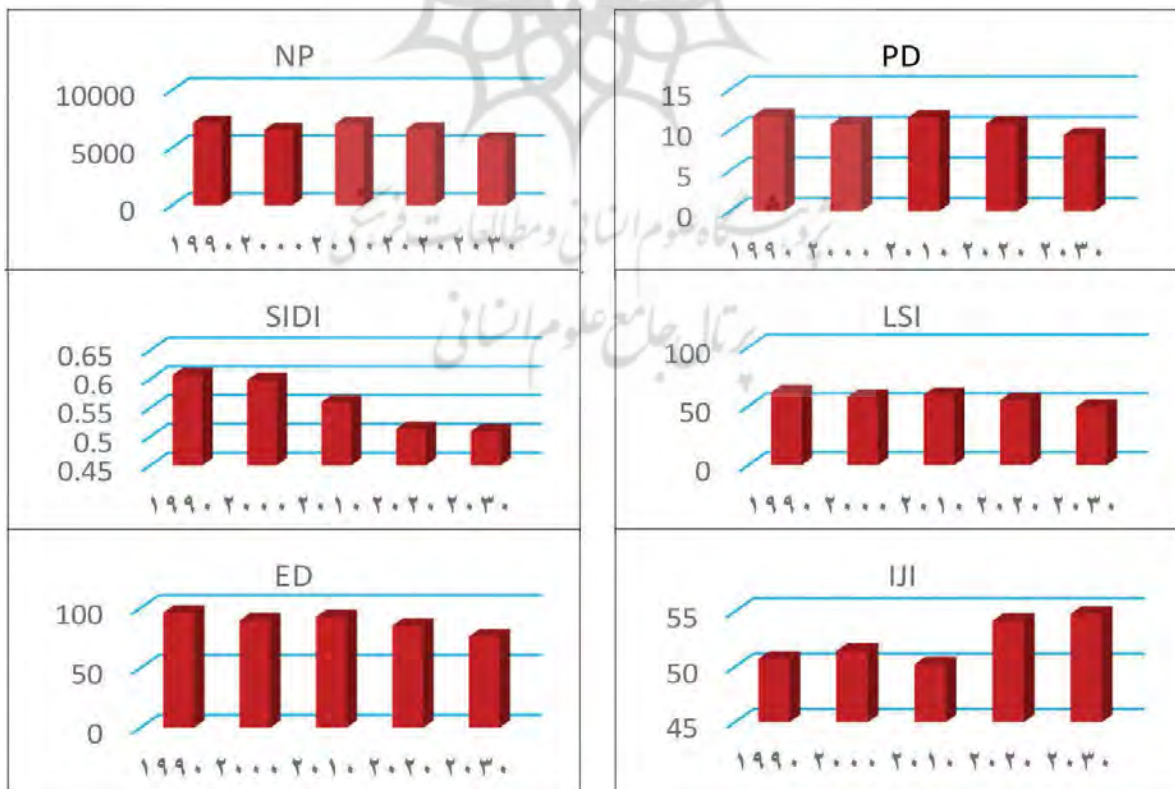
به ۳۱/۳۴ در سال ۲۰۲۰، نشان از هم‌گرایی و گسترش لکه‌های ساخت و ساز و کاهش ناهمگنی عناصر سبز و باز در نتیجه از بین رفتن لکه‌های طبیعی و سبز بینابینی سیمای سرزمین تهران دارد. همچنین بررسی وضعیت طبقات بر اساس الگوی "توزیع" سیمای سرزمین تهران در سطح کلاس (جدول ۷) نشان می‌دهد که در ارتباط با سنجه شاخص شکل سیمای سرزمین (LSI)، بیشترین تغییر در ارتباط با کاربری انسان‌ساخت اتفاق افتاده و از میزان ۷۷/۵۰ واحد در سال ۱۹۹۰ به میزان ۵۴/۹۹ واحد در سال ۲۰۲۰ تقلیل یافته است. کاهش قابل توجه این سنجه نشان از منظم‌تر شدن شکل سیمای سرزمین در این نوع کاربری دارد که متأثر از فرآیند فضایی تجمع در بازه زمانی مذکور شکل گرفته است. میزان این شاخص برای کاربری بایر و سپس برای کاربری فضای سبز افزایشی است و نشان از نامنظم‌تر شدن شکل سیمای سرزمین در نتیجه فرآیند فضایی قطعه‌قطعه شدن در این کاربری‌ها می‌باشد.

• تحلیل تغییرات سنجه‌ها در سطح سیمای سرزمین نتایج روند تغییرات در سطح سیمای سرزمین با استفاده از سنجه‌های تعداد لکه (NP)، تراکم لکه (PD)، شاخص تنوع سیمپسون (SIDI)، شکل سیمای سرزمین (LSI)، تراکم حاشیه (PE) و سنجه همبستگی و آمیختگی (IJI) به شرح ذیل به دست آمد (نگاره ۶).

در ارتباط با الگوی "ترکیب" سیمای سرزمین تهران در سطح سیمای سرزمین، کاهش مقادیر سنجه‌های تعداد کل (NP) و تراکم لکه (PD) (بیانگر تراکم تعداد لکه‌های شهری در ۱۰۰ هکتار) در سال ۲۰۲۰ نشان‌دهنده پیوستگی بیشتر لکه‌های انسان ساخت و ساده‌سازی ساختار سیمای سرزمین تهران در نتیجه حذف لکه‌های سبز و بایر می‌باشد. همچنین نتایج پیش‌بینی سال ۲۰۳۰ هم بیانگر تداوم روند کاهش بوده که قابل تأمل است.

در ارتباط با شاخص تنوع سیمپسون (SIDI)، مقادیر این سنجه برای سیمای سرزمین تهران در بازه زمانی ۱۹۹۰

این سنجه نشان‌دهنده مجاورت و اختلاط بیشتر لکه‌های متفاوت سیمای سرزمین می‌باشد (جورابیان شوشتری و همکاران، ۱۳۹۶: ۷۴). ارزیابی این شاخص نشان می‌دهد که بیشترین افزایش در بازه زمانی مورد مطالعه مربوط به کاربری ساخت و ساز است و این روند در پیش‌بینی ۲۰۳۰ نیز تداوم دارد که نشانگر رشد گسترده و شتابان شهر تهران می‌باشد. از سال ۱۹۹۰ تا سال ۲۰۲۰ میزان این شاخص برای کاربری بایر در نتیجه فرآیند فضایی قطعه‌قطعه شدن افزایشی و برای کاربری فضای سبز کاهش یافته است که متأثر از فرآیند فضایی حذف می‌باشد و طبق پیش‌بینی ۲۰۳۰ میزان این شاخص برای این دو کاربری متأثر از فرآیند فضایی حذف کاهش یافته است (جدول ۷). در ارتباط با شاخص پیوستگی (COHESION)، اراضی فضای سبز با بیشترین میزان کاهش پیوستگی متأثر از فرآیند فضایی حذف و قطعه‌قطعه‌شدگی در بازه زمانی ۱۹۹۰-۲۰۲۰ مواجه شده‌اند و این روند براساس پیش‌بینی سال ۲۰۳۰ نیز ادامه می‌یابد.



نگاره ۶: نمودارهای تشریح‌کننده تغییرات سنجه‌ها در سطح سیمای سرزمین

تا ۲۰۲۰ روندی نزولی دارد. همچنین براساس پیش‌بینی

سال ۲۰۳۰، کاهش میزان این سنجه تداوم می‌یابد. این امر بیانگر ساده‌سازی و کاهش ناهمگنی سیمای سرزمین تهران در دوره زمانی مذکور است.

بررسی الگوی "توزیع" سیمای سرزمین تهران در سطح سیمای سرزمین در ارتباط با شاخص شکل (LSI) بیانگر تداوم روند کاهش در بازه زمانی مورد مطالعه است که نشان از ساده‌تر شدن و منظم‌تر شدن شکل سیمای سرزمین در نتیجه پیوستگی و یکپارچگی کاربری ساخت و ساز و حذف و قطعه‌قطعه شدن زیرساخت‌های سبز در دوره زمانی مورد مطالعه می‌باشد. براساس پیش‌بینی سال ۲۰۳۰ روند کاهش تداوم دارد. شاخص تراکم حاشیه (ED) به صورت متر در هکتار بیان می‌شود. این شاخص نسبت محیط به مساحت را نشان می‌دهد. مقادیر این سنجه در بازه زمانی ۲۰۰۰-۱۹۹۰ با روند کاهش و پس از آن در سال‌های ۲۰۱۰-۲۰۰۰ افزایش می‌یابد و مجدداً در سال‌های ۲۰۲۰-۲۰۱۰ و پیش‌بینی ۲۰۳۰ کاهش یافته است. افزایش میزان سنجه تراکم حاشیه نشان می‌دهد که تغییر شکل لکه‌ها و قطعه‌قطعه‌شدگی آن‌ها در نتیجه رشد شهری شتابان و پراکنده در حال افزایش می‌باشد. اما کاهش این شاخص در سیمای سرزمین تهران حاکی از آن است که لکه‌ها پایداری بیشتری دارند و این موضوع به این دلیل است که مناطق ساخته‌شده که بیشترین تأثیر را در تغییر شکل منطقه داشته‌اند رشد حداکثری کرده‌اند و دیگر نمی‌توانند رشد بیشتری را برای منطقه متصور بود. همچنین با توجه به روند تغییرات سنجه هم‌بستگی و آمیختگی لکه‌ها (III) در سطح سیمای سرزمین، افزایش میزان این شاخص در دو دوره ۲۰۲۰-۲۰۱۰، ۲۰۰۰-۱۹۹۰ در مقیاس سیمای سرزمین تهران نشان‌دهنده تشدید آشفته‌گی در پراکنش و خرددانگی لکه‌ها در کلیت سیمای سرزمین شهری تهران می‌باشد و براساس پیش‌بینی سال ۲۰۳۰ این روند تداوم می‌یابد که بیانگر ازهم گسیختگی زیرساخت سبز تهران است (جدول ۷).

۴- بحث

به‌کارگیری الگوریتم درخت تصمیم‌گیری فرآیندهای فضایی در تحلیل تغییرات سنجه‌های سیمای سرزمین، نشان‌دهنده چگونگی تأثیر انواع فرآیندهای فضایی در تغییر الگوی سیمای سرزمین و متعاقباً روابط بین الگوی فضایی و فرآیندهای بوم‌شناختی در شکل‌گیری ظرفیت‌ها و محدودیت‌های سرزمین شهری می‌باشد.

یافته‌های حاصل از بررسی تغییرات فضایی- زمانی زیرساخت‌های سبز سیمای سرزمین تهران براساس رویکرد مذکور نشان می‌دهد که در سطح کلاس در الگوی "ترکیب" زیرساخت‌های سبز تهران شاهد کاهش ناهمگنی عناصر سبز و باز در نتیجه تداوم روند تغییرات کاربری اراضی سبز و بایر به لکه‌های ساخت و ساز هستیم به‌گونه‌ای که میزان دو سنجه PLAND برای اراضی بایر در نتیجه تأثیر فرآیند فضایی حذف و LPI برای کاربری اراضی سبز متأثر از فرآیند فضایی قطعه‌قطعه شدن کاهش یافته است و این روند در پیش‌بینی سال ۲۰۳۰ نیز تداوم می‌یابد (جدول ۶ و ۷).

پیامدهای این شرایط توسط نتایج پژوهش بیرجندی و همکاران مبنی بر کاهش تاب‌آوری سیمای سرزمین شهر تهران نسبت به جذب آلودگی هوا (Birjandi et al., 2019) و همچنین مطالعه صادقی نیا و همکاران در ارتباط با گسترش جزایر حرارتی در مناطق مختلف شهری (تقویت خوشه‌های حرارتی داغ در مناطق غرب و جنوب‌غرب و تضعیف خوشه‌های حرارتی سرد در مناطق شمالی شهر) نیز قابل تأیید است (صادقی‌نیا و همکاران، ۱۳۹۲). همچنین براساس داده‌های حاصل از کاهش سنجه‌های NP به موازات افزایش PLAND و LPI برای لکه‌های ساخت و ساز باعث تشدید ساده‌سازی ساختار سیمای سرزمین تهران شده است. این نتایج حاکی از تأثیر فرآیند فضایی تجمع بر اراضی ساخت و ساز (بلند مرتبه‌سازی) و هم‌گرایی آن‌ها در مناطق شمالی (مانند منطقه ۱) و غربی شهر (مانند منطقه ۲۲ تهران) است که بر طبق مطالعه صالحی و همکاران سبب تشدید اختلال

از طرفی افزایش سنجه III در سطح سیمای سرزمین در سال ۲۰۲۰ و ۲۰۳۰ نیز بیانگر افزایش اختلاط لکه‌های انسان‌ساخت با لکه‌های باز و سبز در کلیت سیمای سرزمین شهری تهران می‌باشد که در نتیجه فرآیند فضایی حذف و قطعه‌قطعه‌شدن اراضی بایر و سبز تشدید می‌شود (جدول ۶). بر این اساس رویکرد تلفیقی فوق در پایش تغییرات فضایی-زمانی زیرساخت‌های سبز تهران در بازه زمانی ۱۹۹۰ تا ۲۰۲۰ نشان می‌دهد که برنامه‌ریزی حفاظت و توسعه عناصر تشکیل‌دهنده زیرساخت سبز مطلوب نیست و گسترش بی‌رویه شهر در طی سه دهه اخیر موجب کاهش مساحت و ناهمگنی فضایی زیرساخت‌های سبز (فضای سبز و باز) تهران شده که عدم تعادل ارتباط-انزوای لکه‌های ساخت و ساز با لکه‌های سبز طبیعی، باغ‌ها، دالان‌های آبی، تپه ماهورها و سایر فضاهای باز را در سیمای سرزمین تهران موجب می‌شود. نتایج پیش‌بینی سال ۲۰۳۰ نیز بیانگر تشدید این شرایط در الگوی زیرساخت‌های سبز شهری تهران می‌باشد. نتایج این مطالعه با تعدادی از مطالعات موجود در زمینه تأثیر گسترش بی‌رویه و پراکنده‌کاری اراضی شهری بر تنزیل کیفیت فرآیندهای بوم‌شناختی شهری به‌واسطه حذف و قطعه‌قطعه‌شدن لکه‌های سبز و باز تطابق دارد (Liang et al., 2018; Arnold et al., 2018; Aburas et al., 2018; Woldesemayat & Genovese, 2021; Xiao et al., 2018)

با توجه به یافته‌های حاصل از بررسی انجام شده در مقاله حاضر در صورت عدم برنامه‌ریزی و سیاست‌گذاری صحیح و مناسب برای شهر تهران و همچنین با توجه به گسترش و توسعه شهر به سمت شمال‌شرق، غرب و همچنین در سمت جنوب و جنوب‌غربی شهر، در آینده‌ای نه چندان دور شاهد نابودی لکه‌های سبز طبیعی باقی‌مانده در مناطق شمال شرقی، غرب و همچنین باغات و اراضی کشاورزی در منطقه جنوبی شهر و تبدیل آن‌ها به کاربری ساخت و ساز و مسکونی خواهیم بود. در این راستا برخی از راهبردها در رابطه با مدیریت تغییرات الگوی فضایی ترکیب و توزیع زیرساخت‌های سبز تهران قابل توجه است

در جریان حرکت باد و تصفیه هوا در شهر تهران شده است (صالحی و همکاران، ۱۳۹۵).

در ارتباط با بررسی الگوی "توزیع" زیرساخت‌های سبز در سطح کلاس، یافته‌های پژوهش نشان می‌دهد که میزان سنجه‌های LSI و III برای لکه‌های سبز و باز در بازه زمانی مورد مطالعه متأثر از فرآیند فضایی حذف کاهش یافته است و بالعکس در نتیجه فرآیند فضایی قطعه‌قطعه‌شدن افزایش میزان را نشان می‌دهند که این امر منجر به افزایش از هم گسیختگی لکه‌های سبز و باز در سیمای سرزمین تهران شده است (جدول ۶ و ۷). همچنین افزایش میزان ENN-MN به موازات کاهش میزان PLAND برای لکه‌های سبز و باز نیز در دو بازه زمانی ۱۹۹۰-۲۰۰۰ و ۲۰۲۰-۲۰۱۰ متأثر از فرآیند فضایی حذف، بیانگر کاهش پیوستگی آن‌ها در طول زمان است. این روند در پیش‌بینی سال ۲۰۳۰ هم تداوم دارد. در مقابل میزان سنجه COHESION لکه‌های سبز و باز در ارتباط با هر دو فرآیند فضایی حذف و قطعه‌قطعه‌شدن زیرساخت‌های سبز در سطح کلاس کاهش می‌یابد. نتایج مطالعه محقق و همکاران نیز تأییدکننده تأثیر کاهش میزان پیوستگی لکه‌های سبز و بایر در مناطق شمالی، شمال شرقی و غرب تهران بر میزان ترسیب کربن می‌باشد (محقق و همکاران، ۱۳۹۹).

در سطح سیمای سرزمین هم روند کاهش سنجه SIDI در طی بازه زمانی ۱۹۹۰ تا ۲۰۳۰، نشان از ساده‌سازی و کاهش ناهمگنی الگوی "ترکیب" سرزمین تهران می‌باشد. همچنین کاهش سنجه‌های NP و PD متأثر از فرآیند فضایی حذف لکه‌های سبز و باز در الگوی ترکیب سیمای سرزمین تهران در سطح سیمای سرزمین در بازه زمانی ۱۹۹۰-۲۰۰۰ و ۲۰۲۰-۲۰۱۰ باعث کاهش میزان سنجه‌های LSI و ED در الگوی توزیع سیمای سرزمین شهری شده است که حاکی از کاهش ناهمگنی لکه‌های طبیعی و ساده‌سازی ساختار سیمای سرزمین شهری تهران در این زمان است (جدول ۷). همچنین در ارتباط با پیش‌بینی سال ۲۰۳۰ میزان سنجه‌های LSI و ED روند کاهشی را نشان می‌دهند.

که عبارتند از:

۵- نتیجه گیری

گسترش کالبدی بی‌رویه در چند دهه اخیر منجر به کاهش سرزمین‌هایی با قابلیت بوم‌شناختی بالا در الگوی فضایی سیمای سرزمین تهران شده است که این امر پیامدهایی چون کاهش کیفیت زیستی شهری، زوال تنوع زیستی و خدمات اکوسیستمی لازم را به دنبال داشته است. در چنین شرایطی برنامه‌ریزی برای ارتقاء شبکه زیرساخت سبز تهران می‌تواند موجب ارتقاء شرایط زیست‌پذیری و بهبود ساختار و عملکرد بوم‌شناختی اکوسیستم شهری بشود. برای دستیابی به این مقصود، پایش و ارزیابی تغییرات فضایی- زمانی زیرساخت سبز سیمای سرزمین شهری اهمیت می‌یابد.

بر این اساس در تحقیق حاضر با استفاده از نقشه‌های پوشش/کاربری زمین به‌دست آمده از تصاویر ماهواره‌ای (سال‌های ۱۹۹۰، ۲۰۰۰، ۲۰۱۰ و ۲۰۲۰)، داده‌های فیزیکی و مدل CA-Markov که تلفیقی از آنالیز زنجیره مارکوف و مدل‌های CA است، گسترش شهری و تغییرات پوشش/کاربری سیمای سرزمین تهران در سال ۲۰۳۰، شبیه‌سازی شد. در ادامه ارزیابی از الگوی ترکیب و توزیع زیرساخت سبز سیمای سرزمین تهران در سطح کلاس و سیمای سرزمین به‌واسطه به‌کارگیری الگوریتم درخت تصمیم‌گیری فرآیندهای فضایی تغییر و هم‌چنین سنجه‌های سیمای سرزمین انجام گرفت.

نتایج این مطالعه نشان می‌دهد که افزایش مساحت ۲۷/۴۴ درصدی کاربری ساخت و ساز در سیمای سرزمین تهران در یک بازه زمانی ۳۰ ساله (۲۰۲۰-۱۹۹۰) در نتیجه فرآیند فضایی تجمع باعث کاهش مساحت ۲۵/۲۴ درصدی از لکه‌های بایر و هم‌چنین کاهش ۲/۳۳ درصدی لکه‌های سبز در ترکیب الگوی فضایی سیمای سرزمین شهری شده است، این امر متأثر از دو فرآیند فضایی حذف و قطعه‌قطعه شدن در طول ۳ دهه در فضاهای سبز و باز رخ داده است (جدول ۶) و به کاهش ناهمگنی لکه‌های سبز و باز و ساده‌سازی الگوی سیمای سرزمین شهری منجر شده است. هم‌چنین براساس پیش‌بینی ۲۰۳۰ مساحت هر دو کاربری

• حفاظت و احیای لکه‌های طبیعی بزرگ (لکه‌های سبز جنگلی و فضاهای بایر) در محیط شهری و محیط پیرامون شهر تهران (مانند اراضی کشاورزی موجود و لکه‌های باغی در بخش جنوبی و جنگل دست کاشت در سمت غربی شهر) برای جلوگیری از تشدید فرآیند فضایی قطعه‌قطعه شدن زیرساخت‌های سبز.

• افزایش انواع و فراوانی لکه‌های سبز شهری در بحث ترکیب ساختاری سیمای سرزمین تهران مانند ایجاد بام سبز، دیوار سبز، نماهای سبز، فضای سبز حیاط منازل و باغ‌ها و هم‌چنین ایجاد و ترمیم فضاهای سبز (افزایش مساحت لکه‌های سبز و طبیعی) در فضاهای شهری و بینابینی به‌منظور بهبود شبکه‌های اکولوژیک و فرآیندهای اکولوژیکی شهری در راستای تقویت فرآیند فضایی ایجاد و توسعه لکه‌های سبز.

• افزایش پیوستگی لکه‌های طبیعی و باز در الگوی توزیع سیمای سرزمین تهران از طریق ارتباط دالان‌ها و لکه‌های اصلی طبیعی مانند رود دره‌ها، سبز راه‌ها، کمربند سبز، فضاهای سبز حاشیه اتوبان‌ها در داخل و خارج از شهر، و بهبود شبکه‌های اکولوژیک در سطح شهر و کمک به یکپارچگی سیستم‌های طبیعی و کاربری‌های انسان‌ساخت در نتیجه ارتقاء فرآیند فضایی ایجاد و توسعه زیرساخت‌های سبز.

• افزایش پیوستگی ماتریس طبیعی بالادست سیمای سرزمین تهران (فضاهای سبز و باز کوهپایه‌ای و تپه ماهورها) و نفوذ آن به درون شهر با استفاده از احیای پوشش سبز رود کناری رود دره‌ها و تپه ماهورهای موجود در نتیجه توجه به فرآیند فضایی ایجاد، تجمع و توسعه لکه‌های سبز و بایر.

• تدوین طرح جامع توسعه فضاهای سبز سیمای سرزمین تهران براساس اصول بوم‌شناسی سیمای سرزمین و مدیریت یکپارچه بوم‌شناختی شهری در راستای ارتقاء فرآیند فضایی ایجاد و توسعه لکه‌های سبز و باز.

فصلنامه علمی - پژوهشی اطلاعات جغرافیایی (۳۳)

ارزیابی تغییرات فضایی-زمانی زیرساخت سبز شهری مبتنی بر الگوریتم ... / ۱۸۵

۵- صادق‌نیا، علیجانی، ضیائیان، خالدی؛ علیرضا، بهلول، پرویز، شهریار (۱۳۹۲). کاربرد تکنیک‌های خودهمبستگی فضایی در تحلیل جزیره حرارتی شهر تهران، تحقیقات کاربردی علوم جغرافیایی، سال سیزدهم، شماره ۳۰، ۶۷-۹۰.
۶- صالحی، یاور، وکیلی، پریور؛ اسماعیل، احمدرضا، فرزانه، پرستو (۱۳۹۵). ارزیابی اثر بلندمرتبه‌سازی بر عملکرد جریان باد شهری، پژوهش موردی: منطقه ۲۲ کلانشهر تهران، بوم‌شناسی شهری، سال هفتم، شماره ۱، پیاپی ۱۳، ۶۷-۸۰.

۷- صمدی، موسوی، ازکیا؛ علی، سیدیعقوب، مصطفی (۱۳۹۸). تحلیل جامعه‌شناختی-کالبدی فضاهای عمومی شهری مطالعه موردی: کلان‌شهر تهران، شهر پایدار، دوره ۲، شماره ۴، ۱۰۱-۱۱۴.

۸- فتوحی، برق جلوه؛ امید، شهیندخت (۱۳۹۷). بررسی شبکه‌های بوم‌شناختی سیمای سرزمین شهری (نمونه مطالعاتی: شهر تهران)، محیط‌شناسی، دوره ۴۴، شماره ۲، ۲۷۷-۲۹۵.

۹- کاویانی، فرهودی، رجبی؛ آزاده، رحمت‌الله، آزیاتا (۱۳۹۴). تحلیل الگوی رشد شهر تهران با رویکرد بوم‌شناسی سیمای سرزمین، پژوهش‌های جغرافیایی برنامه‌ریزی شهری، دوره ۳، ۴۰۷-۴۲۹.

۱۰- کریمی فیروزجایی، کیاورز، کلانتری؛ محمد، مجید، محسن (۱۳۹۷). پایش و پیش‌بینی تغییرات کاربری اراضی و گسترش فیزیکی شهر بابل در دوره زمانی ۱۴۱۹-۱۳۶۴ با استفاده از تصاویر چند زمانه لندست، برنامه‌ریزی توسعه کالبدی، سال سوم، شماره ۷، ۳۲-۵۷.

۱۱- گومه، رنگزن، نظری سامانی، قدوسی؛ علی‌اکبر، زینت، کاظم، جمال (۱۳۹۳). بررسی روند تغییرات کمی فضای سبز کلان‌شهر کرج با استفاده از داده‌های سنجش از دور و سنجش‌های سیمای سرزمین، محیط زیست طبیعی، منابع طبیعی ایران، دوره ۶۷، شماره ۳، ۳۲۳-۳۳۱.

۱۲- محقق، مبرقعی‌دینان، وفائی‌نژاد، سبحان اردکانی، منوری؛ میرسعید، نغمه، علیرضا، سهیل، سید مسعود

فضای سبز و فضای باز در نتیجه فرآیند فضایی حذف کاهش می‌یابند (جدول ۶). از سوی دیگر این امر موجب کاهش پیوستگی و یکپارچگی ساختارهای سبز و باز شهری و آشفتگی در الگوی توزیع آن‌ها نیز شده است و این روند براساس نتایج پیش‌بینی سال ۲۰۳۰ تشدید خواهد شد.

بدون تردید بهبود ظرفیت‌های بوم‌شناختی سیمای سرزمین شهری از طریق ارتقاء زیرساخت‌های سبز در ارتباط با ترکیب و توزیع مناسب آن‌ها امکان‌پذیر می‌باشد. به عبارتی دیگر تدوین برنامه‌های مدیریتی براساس اصول بوم‌شناسی سیمای سرزمین و ارتقاء کیفیت (ساختاری و عملکردی) زیرساخت‌های سبز شهری، می‌تواند از راهکارهای برون رفت بحران‌های محیطی و بوم‌شناختی در سیمای سرزمین تهران باشد.

منابع و مآخذ

۱- پریور، یاور، فریادی، ستوده؛ پرستو، احمدرضا، شهرزاد، احد (۱۳۸۸). تحلیل ساختار اکولوژیک سیمای سرزمین شهر تهران برای تدوین راهکارهای ارتقای کیفیت محیط زیست. محیط‌شناسی، دوره ۳۵، شماره ۳ (پیاپی ۵۱)، ۴۵-۵۶.

۲- جورابیان شوشتری، شایسته، غلامعلی‌فرد، آذری، لویز-مورنو؛ شریف، کامران، مهدی، محمود، خوان ایگناسیو (۱۳۹۶). نقش سنجش‌های سیمای سرزمین و فرآیندهای مکانی تغییر در ارزیابی کارایی مدل ژئومد (مطالعه موردی: حوضه آبخیز نکارود)، جغرافیا و پایداری محیط، شماره ۲۴، ۶۳-۸۰.

۳- حلییان، سلطانیان؛ امیرحسین، محمود (۱۳۹۵). ارزیابی و پیش‌بینی تغییرات بیابان‌زایی در شرق و جنوب اصفهان با مدل CA-Markov، تحلیل فضایی مخاطرات محیطی، سال سوم، شماره ۴، ۷۱-۸۸.

۴- داز، غفاری گیلانده، عزیزی؛ بی‌بی‌سازا، عطا، علی (۱۳۹۹). تحلیل تغییرات فضای سبز شهر گرگان با استفاده از متریک‌های سیمای سرزمین، علوم و تکنولوژی محیط زیست، دوره ۲۲، شماره ۵، ۱۶۹-۱۸۱.

Analysis and zoning of air pollution in urban landscape using different models of spatial analysis (Case study: Tehran). *Advances in Environmental Technology*, 3, 185-191.

22- Bogaert, J., Ceulemans, R., & Salvador-Van Eysenrode, D. (2004). Decision Tree Algorithm for Detection of Spatial Processes in Landscape Transformation. *Environmental Management*, 33(1), 62-73.

23- Botequilha L. A., Ahern, J. (2002). Applying Landscape Ecological Concepts and Metrics in Sustainable Landscape Planning. *Landscape and Urban Planning*, 59, 65-93.

24- Cadenasso, M. L., Pickett, S. T. A. (2008). Urban Principles for Ecological Landscape Design and Maintenance: Scientific Fundamentals, Cities and the Environment. Vol. 1: Iss. 2, Article 4. 1-16.

25- Chen, A., Yao, L., Sun, R., Chen, L. (2014). How many metrics are required to identify the effects of the landscape pattern on land surface temperature? *Ecological indicators*, 45, 423- 424.

26- Di Marino, M., Lapintie, K. (2017). Exploring the concept of green infrastructure in urban landscape. Experiences from Italy, Canada and Finland. *Landscape Research*, 43 (1), 139-149.

27- Du, H., Cai, W., Xu, Y., Wang, Z., Wang, Y., Cai, Y. (2017). Quantifying the cool island effects of urban green spaces using remote sensing Data. *Urban Forestry and Urban Greening*, 27, 24-31.

28- Gherraz, H., Guechi, I., Alkama, D. (2020). Quantifying the effects of spatial patterns of green spaces on urban climate and urban heat island in a semi-arid climate, *Bulletin de la Société Royale des Sciences de Liège [En ligne]*, Volume 89 - Année 2020, Articles, 164-185.

29- Grafius, D.R., Corstanje, R., Harris, J.A. (2018). Linking ecosystem services, urban form and green space configuration using multivariate landscape metric analysis. *Landscape ecology*, 33, 557-573.

30- Huang, C., Yang, J., & Jiang, P. (2018). Assessing Impacts of Urban Form on Landscape Structure of Urban Green Spaces in China Using Landsat Images Based on Google Earth Engine. *Remote Sensing*, 10(10): 1569, 1-14.

(۱۳۹۹). بررسی تغییرات بوم‌سازگان با استفاده از سنجش‌های سیمای‌سرزمین و ترسیب کربن شهر تهران، محیط‌شناسی، دوره ۴۶، شماره ۱، ۱-۱۸.

۱۳- مرکز آمار ایران (۱۳۹۵). ویژگی‌های جمعیتی، اجتماعی و اقتصادی مناطق ۲۲گانه تهران در سرشماری سال‌های ۱۳۹۰ و ۱۳۹۵، ریاست جمهوری، سازمان برنامه و بودجه کشور.

۱۴- نصیری، درویش‌صفت؛ وحید، علی اصغر (۱۳۹۷). آشکارسازی و تحلیل تغییرات کاربری اراضی منطقه ارسباران با استفاده از بوم‌شناسی منظر، پژوهش‌های علوم و فناوری چوب و جنگل، جلد ۲۵، شماره ۴، ۱-۱۷.

۱۵- یزدان‌پناه، یآوری، زبردست، آل‌محمد؛ مهسا، احمدرضا، لعبت، سیده (۱۳۹۴). ارزیابی زیرساخت‌های سبز شهری به منظور اصلاح تدریجی آن‌ها در سیمای‌سرزمین تهران، محیط‌شناسی، دوره ۴۱، شماره ۳، ۶۱۳-۶۲۵.

۱۶- یوسفی، صالحی، قسامی، جهانی شکیب؛ الهام، اسماعیل، فاطمه، فاطمه (۱۳۹۳). تحلیل وضعیت اکولوژیکی فضای سبز شهر بیرجند براساس متریک‌های سیمای‌سرزمین (با تأکید بر وضعیت پارک‌های محله‌ای و منطقه‌ای)، فضای جغرافیایی، سال چهاردهم، شماره ۴۶، ۷۱-۸۷.

17- Aburas, M. M., Ho, Y. M., Ramli, M. F., & Ash'aari, Z. H. (2018). Monitoring and assessment of urban growth patterns using spatio-temporal built-up area analysis. *Environmental Monitoring and Assessment*, 190(3). doi:10.1007/s10661-018-6522-9.

18- Andersson, E., Hasse, D., Scheuer, S., Wellmann, T. (2020). Neighbourhood character affects the spatial extent and magnitude of the functional footprint of urban green infrastructure. *Landscape ecology*, 35, 1605-1618.

19- Arnold, J., Kleemann, J., Fürst, C. (2018). A Differentiated Spatial Assessment of Urban Ecosystem Services Based on Land Use Data in Halle, Germany. *Land*, 7(3), 101. <https://doi.org/10.3390/land7030101>.

20- Benedict, M. A., McMahon, E. T. (2006). Green infrastructure: Linking landscapes and communities. Washington, DC: Island Press.

21- Birjandi, N., Ghobadi, M., Ahmadi, M. (2019).

- 42- Miller, J. D., Brewer, T. (2018). Refining flood estimation in urbanized catchments using landscape metrics. *Landscape and Urban Planning*, 175, 34-49.
- 23- Moarrab, Y., Salehi, E., Amiri, M., Hovidi, H. (2021). Spatial-temporal assessment and modeling of ecological security based on land-use/cover changes (case study: Lavasanat watershed). *International Journal of Environmental Science and Technology*. 10.1007/s13762-021-03534-5.
- 44- Monteiro, R., Ferreira, J.C., Antunes P. (2020). Green Infrastructure Planning Principles: An Integrated Literature Review. *Land*, 9(12): 525, 1-19.
- 45- Myint, S. W., & Wang, L. (2006). Multicriteria decision approach for land use land cover change using Markov chain analysis and a cellular automata approach. *Canadian Journal of Remote Sensing*, 32(6), 390-404.
- 46- Park, Y., Guldmann, J.M. (2020). Measuring continuous landscape patterns with Gray-Level Co-Occurrence Matrix (GLCM) indices: An alternative to patch metrics? *Ecological Indicators*, Volume 109, 105802. 1-18.
- 47- Paudel, S., & Yuan, F. (2012). Assessing landscape changes and dynamics using patch analysis and GIS modeling. *International Journal of Applied Earth Observations and Geoinformation*, Volume 16, 66-76.
- 48- Pramanik, S., & Punia, M. (2019). Assessment of green space cooling effects in dense urban landscape: A case study of Delhi, India. *Modeling Earth Systems and Environment*, 5, 867-884.
- 49- Sakieh, Y., Jaafari, S., Ahmadi, M., Danekar, A. (2017). Green and calm: Modeling the relationships between noise pollution propagation and spatial patterns of urban structures and green covers. *Urban Forestry & Urban Greening*, 24, 195-211.
- 50- Sang, L., Zhang, C., Yang, J., Zhu, D. and Yun, W., (2011). Simulation of land use spatial pattern of towns and villages based on CA-Markov model. *Mathematical and Computer Modelling*, 54(3-4), 938-943.
- 51- Talebi Khiavi, H., & Mostafazadeh, R. (2021). Land use change dynamics assessment in the Khiavchai region, the hillside of Sabalan mountainous area. *Arabian Journal of Geosciences*, 14, 2257, 1-15.
- 31- Hu, Z., & Lo, C. P. (2007). Modeling urban growth in Atlanta using logistic regression. *Computers, Environment and Urban Systems*, 31(6), 667-688.
- 32- Inkoom, J.N., Frank, S., Greve, K., Walz, U., Christine, F. (2018). Suitability of different landscape metrics for the assessments of patchy landscapes in West Africa. *Ecological Indicators*, 85, 117-127.
- 33- Jaganmohan, M., Knapp, S., Schwarz, N. (2016). The bigger, the better? The influence of urban green space design on cooling effects for residential areas. *Journal of Environmental Quality*, 45, 134-145.
- 34- Laforteza, R., Davies, C., Sanesi, G., Konijnendijk, C.C. (2013). Green Infrastructure as a tool to support spatial planning in European urban regions. *IForest*, 6: 102-108.
- 35- Lee, S. W., Hwang, S. J., Lee, S. B., Hwang, H. S., Sung, H. C. (2009). Landscape ecological approach to the relationships of land use patterns in watersheds to water quality characteristics. *Landscape and Urban Planning*, 92, 80-89.
- 36- Liang, H., Chen, D., & Zhang, Q. (2017). Assessing urban green space distribution in a compact megacity by landscape metrics. *Journal of Environmental Engineering and Landscape Management*, 25(1), 64-74.
- 37- Liu, Y., Wei, X., Li, P., Li, Q., (2016). Sensitivity of correlation structure of class- and landscape-level metrics in three diverse regions. *Ecological Indicators*, 64, 9-19.
- 38- Liu, Y., Peng, J., Wang, Y. (2018). Efficiency of landscape metrics characterizing urban land surface Temperature. *Landscape and Urban Planning*, 180, 36-53.
- 39- Lu, D., & Weng, Q. (2007). A survey of image classification methods and techniques for improving classification performance. *International journal of Remote sensing*, 28(5), 823-870.
- 40- Maheng, D., Pathirana, A., Zevenbergen, C. A. (2021). Preliminary Study on the Impact of Landscape Pattern Changes Due to Urbanization: Case Study of Jakarta, Indonesia. *Land* 10, 218. 1-27.
- 41- Matthews, R. B., Gilbert, N. G., Roach, A., Polhill, J. G., & Gotts, N. M. (2007). Agent-based land-use models: a review of applications. *Landscape Ecology*, 22(10), 1447-1459.

- for simulating land use changes based on support vector machines. *Computers & geosciences*, 34(6), 592-602.
- 63- Yu, M., Huang, Y., Cheng, X., Tian, J. (2019). An ArcMap plug-in for calculating landscape metrics of vector data. *Ecological Informatics*, 50, 207-219.
- 52- Tayyebi, A., Pijanowski, B. C., & Tayyebi, A. H. (2011). An urban growth boundary model using neural networks, GIS and radial parameterization: An application to Tehran, Iran. *Landscape and Urban Planning*, 100(1-2), 35-44.
- 53- Teferi, E., Uhlenbrook, S., Bewket, W., Wenninger, J. and Simane, B. (2010). The use of remote sensing to quantify wetland loss in the Choke Mountain range, Upper Blue Nile basin, Ethiopia. *Hydrology and Earth System Sciences*, 14(12), 2415-2428.
- 54- Threlfall, C. G., Mata, L., Mackie, J. A., Hahs, A. K., Stork, N. E., Williams, N. S. G., & Livesley, S. J. (2017). Increasing biodiversity in urban green spaces through simple vegetation interventions. *Journal of Applied Ecology*, 54, 1874-1883.
- 55- United Nations, Department of Economic and Social Affairs, Population Division. (2019). *World Urbanization Prospects: The 2018 Revision (ST/ESA/SER.A/420)*. New York: United Nations.
- 56- Vanderhaegen, S., & Canters, F. (2017). Mapping urban form and function at city block level using spatial metrics. *Landscape and Urban Planning*, 167, 399-409.
- 57- Vos, P. E., Maiheu, B., Vankerkom, J., Janssen, S. (2013). Improving local air quality in cities: to tree or not to tree? *Environmental pollution*, 183, 113-122.
- 58- Walz, U., Hoehstetter, S., Drăguș, L., Blaschke, T., (2016). Integrating time and the third spatial dimension in landscape structure analysis. *Landscape Research*, 41(3), 279-293.
- 59- Wang, R., Zhao, J., Meitner, M.J., Xu, X. (2019). Characteristics of urban green spaces in relation to aesthetic preference and stress recovery. *Urban Forestry & Urban Greening*, 41, 6-13.
- 60- Woldesemayat, E. M., & Genovese, P. V. (2021). Urban green space composition and configuration in functional land use areas in addis ababa, ethiopia, and their relationship with urban form. *Land*, 10(1), 1-21.
- 61- Yang, B., Li, S. (2013). Green Infrastructure Design for Stormwater Runoff and Water Quality: Empirical Evidence from Large Watershed-Scale Community Developments. *Water*, 5(4): 2038-2057.
- 62- Yang, Q., Li, X., & Shi, X. (2008). Cellular automata