

An Analysis of the Trend of Changes in the Regulatory Services Related to Carbon Sequestration in Tehran City affected by the Spatial Processes of Landscape Mosaic

Behrooz Naroei¹, Shahindokht Barghjelveh^{2*}, Hassan Esmaeilzadeh³, Lobat Zebardast⁴

- 1. PhD Student in environmental planning, Environmental Sciences Research Institute, Shahid Beheshti University, Tehran, Iran*
- 2. Associate Professor, Department of Environmental Planning and Design, Environmental Sciences Research Institute, Shahid Beheshti University, Tehran, Iran*
- 3. Assistant Professor, Department of Environmental Planning and Design, Environmental Sciences Research Institute, Shahid Beheshti University, Tehran, Iran*
- 4. Assistant Professor, Department of Environmental Planning, Management, and Education, School of Environment, College of Engineering, University of Tehran, Tehran, Iran*

(Received: January 31, 2022; Accepted: April 11, 2022)

Abstract

In order to explain the ecological-sociological strategy of Tehran land use network/ land cover, the present study was tried to identify the spatial process of the change in the landscape mosaic pattern and its effect on carbon sequestration over the course of 3 decades from 1990 to 2020. In this study, the role of landscape measures in the identification of landscape mosaic spatial pattern changes and its combination with data obtained from ecosystem service modeling was shown. To this end, after examining the process of structural-functional changes in landscape mosaic using decision tree algorithm and InVEST model, the complexity of the relationship between landscape spatial pattern and the quantity of carbon sequestration regulatory services at the two levels of class and landscape was addressed using the measures and data obtained from InVEST model. The findings indicated that the volume of carbon sequestration regulatory services in all periods had reduced due to the effects of the spatial process of “accumulation” in construction strains. Moreover, in the 1990-2020 period, the highest rate of carbon storage loss (291656 tones, 9.58%) occurred due to the effects of the spatial processes of “deletion” in green lands and “fragmentation” in barren lands. In the 2000-2010 and 2010-2020 periods, the volume of carbon storage reduction were 182209 (6.62%) and 159688 (6.22%) tones, respectively. Pertaining to this discussion was the finding that the effect of the change in the index of strain numbers in green and barren lands for all periods was accompanied by increased fineness, which indicates its reverse relationship with carbon sequestration rate. On the other hand, the reduction of other measures in green and barren lands reveals the existence of a direct relationship with the loss of a volume of carbon sequestration in the foregoing period. At the landscape level, the reduction of heterogeneity and simplification of the landscape mosaic spatial pattern led to the reduction of carbon sequestration. From this perspective, it is necessary to prioritize the identification of the spatial processes effective on the landscape structure model in the completion of the processes of the evaluation of the urban development effects on the carbon sequestration service current.

Keywords

land use changes, spatial processes of landscape, carbon sequestration, Tehran.

* Corresponding Author, Email: s-barghjelveh@sbu.ac.ir

تحلیل روند تغییر خدمت تنظیمی ترسیب کربن شهر تهران، متأثر از فرایندهای فضایی موزایک سیمای سرزمین

بهروز نارویی^۱، شهین دخت برق جلوه^{۲*}، حسن اسماعیل زاده^۳، لعبت زبردست^۴

۱. دانشجوی دکتری آمایش محیط زیست، پژوهشکده علوم محیطی، دانشگاه شهید بهشتی، مریبی گروه

مهندسی فضای سبز دانشگاه سیستان و بلوچستان

۲. دانشیار گروه برنامه‌ریزی و طراحی محیط، پژوهشکده علوم محیطی، دانشگاه شهید بهشتی، ایران

۳. استادیار گروه برنامه‌ریزی و طراحی محیط، پژوهشکده علوم محیطی، دانشگاه شهید بهشتی، ایران

۴. استادیار گروه برنامه‌ریزی مدیریت و آموزش محیط زیست، دانشکده محیط زیست، پردیس دانشکده‌های

فنی، دانشگاه تهران

(تاریخ دریافت: ۱۴۰۰/۱۱/۱۱ - تاریخ پذیرش: ۱۴۰۱/۰۱/۲۲)

چکیده

مطالعه حاضر، با هدف تبیین راهبرد بوم‌شناختی- جامعه‌شناختی شبکه کاربری/ پوشش اراضی شهر تهران، سعی در شناخت فرایندهای فضایی تغییر الگوی موزایک سیمای سرزمین و چگونگی تأثیر آن بر عملکرد ترسیب کربن طی سه دهه بین ۱۹۹۰ - ۲۰۲۰ دارد. در این مطالعه، نقش سنجهای سیمای سرزمین در شناسایی تغییرات الگوی فضایی موزایک سیمای سرزمین و تلفیق آن با داده‌های حاصل از مدل‌سازی خدمات اکوسیستمی اهمیت می‌یابد. در این زمینه، پس از بررسی روند تغییرات ساختاری- عملکردی موزایک سیمای سرزمین با استفاده از مدل الگوریتم درخت تصمیم‌گیری و مدل InVEST به تحلیل پیچیدگی ارتباط بین الگوی فضایی سیمای سرزمین و کمیت خدمت تنظیمی ترسیب کربن در دو سطح کلاس و سیمای سرزمین با استفاده از سنجهای و داده‌های حاصل از مدل InVEST پرداخته شد. یافته‌ها نشان می‌دهند میزان خدمت تنظیمی ترسیب کربن در همه دوره‌ها متأثر از فرایند فضایی «تجمع» در لکه‌های ساخت‌وساز روند کاهشی داشته است. همچنین در بازه زمانی ۱۹۹۰ - ۲۰۰۰ بیشترین میزان از دست رفتن ذخیره کربن، به مقدار ۲۹۱۶۵۶ تن (۹/۵۸٪)، به واسطه تأثیر فرایندهای فضایی «حذف» در اراضی سبز و «قطعه‌قطعه‌شدگی» در اراضی بایر رخ داده است. در فاصله ۲۰۰۰ - ۲۰۱۰ و ۲۰۱۰ - ۲۰۲۰ نیز کاهش مقدار ذخیره کربن برابر با میزان ۱۸۲۲۰۹ (۶/۶۲٪) و ۱۵۹۶۸۸ (۶/۲۲٪) تن بوده است. در این زمینه، تأثیر تغییر شاخص تعداد لکه در اراضی سبز و بایر برای همه دوره‌ها با افزایش ریزدانه‌گی همراه بوده است که بیانگر وجود رابطه‌ای معکوس با میزان ترسیب کربن است. از سوی دیگر، کاهش سایر سنجهای در خصوص اراضی سبز و بایر از وجود رابطه‌ای مستقیم با از دست رفتن میزان ترسیب کربن در بازه زمانی یادشده نشان دارد. در سطح سیمای سرزمین نیز کاهش ناهمگنی و ساده‌سازی الگوی فضایی موزایک سیمای سرزمین منجر به کاهش میزان ترسیب کربن شده است. از این منظر، لازم است شناخت فرایندهای فضایی مؤثر بر الگوی ساخت سیمای سرزمین در اولویت تکمیل فرایند ارزیابی تأثیرات توسعه شهری بر جریان خدمات تنظیمی ترسیب کربن قرار گیرد.

کلیدواژگان

ترسیب کربن، تغییرات کاربری اراضی، تهران، فرایندهای فضایی سیمای سرزمین.

مقدمه

در حال حاضر پدیده شهرنشینی در جهان رو به افزایش است و حدود ۵۵ درصد از جمعیت دنیا در مناطق شهری زندگی می‌کنند (Arnold et al. 2018). رشد سریع شهرها در دهه‌های اخیر سبب شده تغییرات قابل توجهی در پوشش/ کاربری اراضی سرزمین مناطق شهری در نتیجه پراکنش جمعیت انسانی، پیچیدگی ساخت‌وسازها، توسعه شبکه‌های حمل‌ونقل، و فعالیت‌های صنعتی شکل گیرد (Sadat et al. 2020: 2). تغییرات حاصل منجر به دگرگونی و تخریب نواحی قابل توجهی از اکوسیستم‌های طبیعی و زیرساخت‌های سبز در ماتریس سیماهای سرزمین شهرها شده است (Muñoz-Vallés et al. 2013: 451). این امر موجب شده شاهد برهم خوردن تعادل بوم‌شناختی و به تبع آن جامعه‌شناختی در مناطق شهری در نتیجه تغییر ساختار و به دنبال آن تغییر عملکرد سیماهای سرزمین شهری باشیم (Kindu et al. 2016: 138). از مهم‌ترین چالش‌های موجود در ارتباط با تغییرات ساختاری سیمای سرزمین‌های شهری می‌توان به تشدید تغییرات اقلیمی ناشی از انتشار دی‌اکسید کربن در اتمسفر اشاره کرد (Edmondson et al. 2014; Solomon et al. 2018; Zhang et al. 2020). در واقع روند حذف دی‌اکسید کربن اتمسفر به واسطه ذخیره این گاز در قالب زیست توده گیاهی و وارد کردن کربن آلی به خاک مناطق شهری در روند افزایش همگنی الگوی فضایی سطوح نفوذناپذیر و تخریب فضاهای سبز سیستم سیمای سرزمین کاهش می‌یابد (Linden et al. 2020: 1; Sadat et al. 2020: 2). در چنین شرایطی پایداری محیط زیستی شهرها در معرض تهدید قرار گرفته است (Li et al. 2019: 595). بنابراین جهت نیل به پایداری روندهای بوم‌شناختی و جامعه‌شناختی شهرها مدیران و متخصصان امر همواره به دنبال روشی مناسب برای برنامه‌ریزی شهری با هدف تنظیم ساختار و حمایت از ثبات عملکرد بوم‌شناختی اکوسیستم شهری هستند (Zhang et al. 2020: 2).

برای این مقصود، در ارتباط با برنامه‌ریزی بوم‌شناختی ساختار سیماهای سرزمین شهری، شناخت تغییرات فضایی- زمانی کاربری اراضی شهر متأثر از فرایندهای فضایی تغییر موزاییک سیمای سرزمین اهمیت می‌یابد. فرایندهای فضایی تغییر موزاییک سیمای سرزمین^۱ بیانگر ماهیت

تغییر در هر کلاس از کاربری/ پوشش اراضی در یک بازه زمانی مشخص هستند. با استفاده از مبانی بوم‌شناسی سیمای سرزمین^۱ انواع فرایندهای تغییر از جمله تغییر جهت^۲، کاهش اندازه^۳، تجمع^۴، حذف^۵، ایجاد^۶، تغییر شکل^۷، چند تکه شدن^۸، توسعه^۹، قطعه‌قطعه شدن^{۱۰}، و سوراخ‌شدگی^{۱۱} الگوی فضایی سیستم سیمای سرزمین قابل بررسی هستند (Bogaert et al. 2004: 64). در واقع هر یک از این مفاهیم تعیین‌کننده روابط بین الگوی فضایی و فرایندهای بوم‌شناختی در شکل‌گیری ظرفیت‌ها و محدودیت‌های عملکرد اکوسیستم‌اند. در این ارتباط ارزیابی و تحلیل عملکرد بوم‌شناختی ترسیب کربن به دنبال تغییرات ناشی از فرایندهای فضایی در الگوی ساخت سیمای سرزمین شهری اهمیت می‌یابد. بنابراین، جهت درک بهتر تغییرات عملکرد تنظیمی ترسیب کربن در شهرها گردآوری اطلاعات مبتنی بر نقشه‌سازی تغییرات پوشش/ کاربری اراضی (Linden et al. 2020: 1; Zhang et al. 2020: 2)، پایش فرایندهای فضایی تغییر الگوی ساخت سیمای سرزمین (Bogaert et al. 2004: 63)، و مدل‌سازی و تحلیل تغییرات خدمت اکوسیستمی ترسیب کربن مبتنی بر فرایندهای تغییر فضایی سیستم سیمای سرزمین در بازه زمانی مشخص می‌تواند در جهت برنامه‌ریزی و تعیین سیاست‌های مدیریتی مبتنی بر بهبود عملکرد بوم‌شناختی سیماهای سرزمین شهری تعیین‌کننده باشد.

توسعه سریع شهرنشینی در کلان‌شهر تهران به واسطه تمرکز زیاد جمعیت و نحوه پراکنش آن در چند دهه اخیر منجر به شتاب تغییرات کاربری/ پوشش اراضی موجود شده است. این تغییرات متأثر از فرایندهای فضایی تغییر سیمای سرزمین طی زمان شکل گرفته است و بدون تردید بر میزان عملکرد اکوسیستمی ترسیب کربن تأثیرگذار بوده است. از این رو هدف از پژوهش حاضر

-
1. landscape ecology
 2. shift
 3. shrinkage
 4. aggregation
 5. attrition
 6. creation
 7. deformation
 8. dissection
 9. enlargement
 10. fragmentation
 11. perforation

درک چگونگی تأثیر انواع فرایندهای فضایی در تغییر الگوی ساخت سیمای سرزمین تهران و تأثیر آن بر میزان عملکرد تنظیمی ترسیب کربن در بازه زمانی سالهای ۱۹۹۰ - ۲۰۲۰ میلادی (۳ دوره ده‌ساله) است. بنابراین مهم‌ترین سؤالاتی که در این پژوهش سعی بر آن است به آن‌ها پاسخ داده شود عبارت‌اند از: روند تغییرات فضایی- زمانی الگوی کاربری/ پوشش اراضی سیمای سرزمین تهران چگونه است؟ فرایندهای فضایی مؤثر در تغییر الگوی ساختاری سیمای سرزمین تهران چگونه است؟ تأثیر فرایندهای فضایی در تغییر الگوی ساخت سیمای سرزمین چگونه بر میزان عملکرد تنظیمی ترسیب کربن شهر تهران تأثیرگذار است؟

پیشینه تجربی پژوهش

مطالعات متعدد خارجی و داخلی در ارتباط با تأثیر تغییرات کاربری/ پوشش اراضی سیمای سرزمین بر میزان ترسیب و ذخیره کربن صورت گرفته است. چون^۱ و همکارانش (۲۰۱۹) به بررسی تغییرات کاربری اراضی و میزان ترسیب کربن در بازه زمانی ۱۹۸۹ - ۲۰۰۹ در یک محدوده در حال توسعه در نزدیکی شهر واسیون در ایالت یانگی کره جنوبی پرداختند. در این مطالعه از مدل InVEST^۲ جهت مدل‌سازی و تحلیل تغییرات میزان ترسیب کربن استفاده شد. نتایج تحقیق نشان داد طی بیست سال کل ذخایر کربن منطقه مورد مطالعه در حدود ۰/۰۷ میلیارد تن کاهش یافته است. ژانگ^۳ و همکارانش (۲۰۲۰) به ارزیابی تغییرات فضایی- زمانی ترسیب کربن متأثر از رشد سریع شهر شانگهای چین در بازه زمانی ۱۹۹۰ - ۲۰۱۵ پرداختند. یافته‌های پژوهش نشان می‌دهد در نتیجه تغییرات کاربری اراضی شهری کل ذخایر کربن به میزان ۷/۳۱۹۰۰۰ تن در بازه زمانی یادشده کاهش یافته است. بر اساس تصاویر سنجش از دور بیشترین تغییر کاربری/ پوشش اراضی در این شهر مرتبط با تبدیل ۱۴۷۶/۶۷ کیلومتر مربع (بیش از ۳۰٪) از زمین‌های زیر کشت به مناطق ساخته‌شده بوده است. دامفا^۴ (۲۰۲۱) مطالعه‌ای در ارتباط با ارزیابی تغییرات کاربری/ پوشش زمین در منطقه جنوب غربی کشور گامبیا در بازه زمانی ۱۹۸۵ - ۲۰۲۰ با استفاده

-
1. Chun
 2. integrated valuation of ecosystem services and trade offs
 3. Zhang
 4. Dampha

از مدل InVEST انجام داد. یافته‌های پژوهش بیانگر کاهش ۱۸ درصد از مساحت مناطق جنگلی در نتیجه تبدیل به مناطق شهری و صنعتی است که به انتشار ۲۱۸۲۴ تن کربن کمک کرده است. علاوه بر آن مطالعات متعددی نیز در سایر نقاط دنیا صورت گرفته که بیانگر از دست رفتن میزان کربن در مقیاس منطقه‌ای و ملی در نتیجه گسترش کالبدی شهرهاست (Hutrya et al. 2011; Zhang et al. 2012; He et al. 2016; Daba & Dejene 2018). در ایران نیز مطالعات مشابهی در این زمینه صورت گرفته است. سادات و همکارانش (۲۰۲۰) در پژوهشی به مدل‌سازی و پیش‌بینی ترسیب و ذخیر کربن در شهرستان قائم‌شهر استان مازندران در بازه زمانی ۲۰۰۱ - ۲۰۲۷ پرداختند. نتایج تحقیق بیانگر کاهش میزان کربن ذخیره‌شده به میزان ۱۰۶۴۳۶/۶۲ مگاگرم در منطقه در بازه زمانی یادشده در نتیجه پدیده جنگل‌زدایی و تخریب مراتع به واسطه گسترش مناطق ساخت‌وساز در پیرامون قائم‌شهر است (Sadat et al. 2020). سجادی قائم‌مقامی و همکارانش (۱۴۰۰) در پژوهشی دیگر به ارزشیابی پیامدهای رشد شهری بر خدمت اکوسیستمی ذخیره کربن در زیرحوزه‌های آبریز شهر کرج (زیرحوزه استان البرز، کرج، هشتگرد، اشتهارد) پرداختند. یافته‌های این مطالعه نشان می‌دهد افزایش ۱۱ درصدی مناطق انسان‌ساخت در منطقه یادشده در بازه زمانی ۱۹۸۸ - ۲۰۱۸ شکل گرفته است. برآورد اقتصادی میزان ترسیب و ذخیره کربن در منطقه از حدود ۱۴۱۶۳ میلیارد ریال در تن بر هکتار در سال ۱۹۸۸ به میزان ۱۳۱۶۳ میلیارد ریال در سال ۲۰۱۸ کاهش یافته است. همچنین محقق و همکارانش (۱۳۹۹) در مطالعه‌ای به بررسی تغییرات بوم‌سازگان با استفاده از سنج‌های سیمای سرزمین و ترسیب کربن شهر تهران در بازه زمانی ۱۹۸۶ - ۲۰۱۶ پرداختند. در این مطالعه شهر تهران بر اساس روش آنالیز گرادیان از مرکز شهر به ۱۱ بافر سه‌کیلومتری تقسیم شده است. یافته‌های پژوهش نشان می‌دهد افزایش مساحت فضای سبز و پیوستگی لکه‌های این کاربری در زون‌های ۵ و ۶ و ۷ بیشترین تأثیر را بر میزان ترسیب کربن در بازه زمانی مورد مطالعه داشته است و برعکس در زون ۳ کمترین میزان ترسیب کربن رخ داده است.

اما مطالعه حاضر در جهت تبیین راهبرد بوم‌شناختی - جامعه‌شناختی برنامه‌ریزی کاربری / پوشش اراضی سرزمین شهری سعی بر شناخت فرایندهای فضایی تغییر الگوی موزاییک سیمای

سرزمین شهر تهران و چگونگی تأثیر آن بر میزان عملکرد ترسیب کربن طی سه دهه گذشته در بازه زمانی ۱۹۹۰ - ۲۰۲۰ دارد.

مبانی نظری پژوهش

خدمات اکوسیستمی به مزایای حاصل از فرایندهای زیستی جریان انرژی و مواد از طریق اجزای زنده و غیرزنده یک اکوسیستم نسبت داده می‌شوند که در جهت حمایت از زندگی و رفاه جوامع انسانی اهمیت می‌یابند (Ongsomwang et al. 2019: 43). این خدمات در چهار گروه از انواع تأمین‌کننده، تنظیمی، پشتیبانی، و فرهنگی دسته‌بندی می‌شوند (MEA 2005). ذخیره‌سازی و ترسیب کربن^۱ یکی از شناخته‌شده‌ترین خدمات اکوسیستمی تنظیم‌کننده اقلیم به شمار می‌رود (Costanza 2008; Solomon et al. 2018). ترسیب کربن در اکوسیستم‌های طبیعی شامل توانایی زیست توده گیاهی و خاک تحت آن برای جذب دی‌اکسید کربن اتمسفر و ذخیره بلندمدت آن به صورت کربن در خود است (محمودی و همکاران ۱۳۹۲: ۱۰۲). با ذخیره کربن در چوب، انواع زیست توده و خاک اکوسیستم‌های Co₂ را خارج از جو زمین نگه می‌دارند و از تغییر اقلیم ممانعت می‌کنند. یافته‌های بسیاری از مطالعات در زمینه بوم‌شناسی شهری در یک دهه گذشته نشان می‌دهند که اکوسیستم‌های شهری می‌توانند بخش قابل توجهی از ذخیره‌سازی کربن زمینی (خشکی) را در مقیاس‌های محلی و منطقه‌ای عهده‌دار باشند (Yan et al. 2016; Edmondson et al. 2012; Davies et al. 2011; Nowak & Crane 2002). در این ارتباط نقش دو عنصر خاک و فضاهای سبز در ذخیره‌سازی کربن در شکل کربن آلی در اکوسیستم‌های شهری اهمیت می‌یابند (Edmondson et al. 2012: 1). در حال حاضر ۰/۲۲ درصد از کل ذخیره کربن خاک در مقیاس جهانی به خاک‌های مناطق شهری نسبت داده می‌شود. همچنین سهم پوشش گیاهی شهرها از کل کربن ذخیره‌شده در زیست توده گیاهی در سطح جهان حدود ۰/۴ درصد است (Churkina 2016: 7). به طور قطع این مقادیر از ذخیره کربن شهرها در سطح جهان با توجه به سیاست‌های توسعه‌ای آینده، از جمله الگوهای ساخت شهری و میزان حذف و قطعه‌قطعه شدن فضاهای طبیعی سبز و باز و استراتژی‌های مدیریتی، قابل تغییر است (Ariluoma et al. 2021; Churkina 2016). سهم

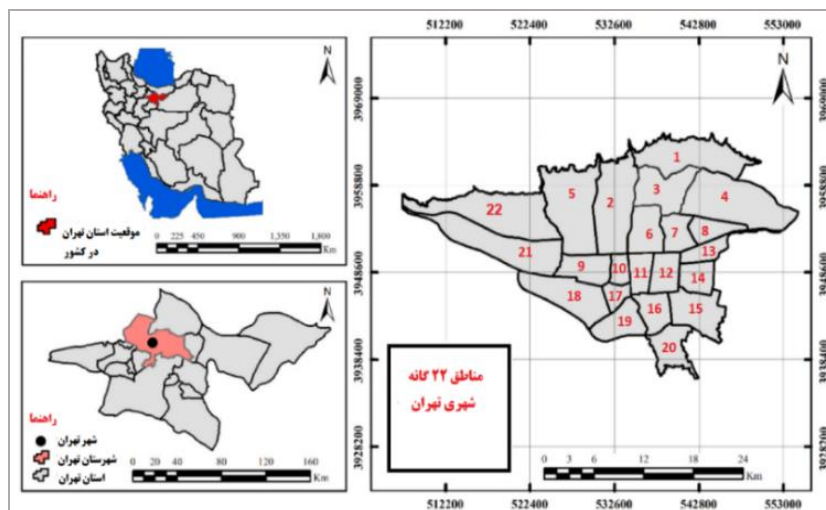
انتشار سالیانه کربن در نتیجه توسعه شهرها در سطح جهان رقمی معادل با ۵ درصد (معادل با ۰/۹ گیگاتن) از کل کربن انتشار یافته در اتمسفر در هر سال برآورد شده است (Churkina 2016: 6). در حال حاضر بسیاری از کشورهای دنیا هم سو با سیاست‌های کاهش انتشار گازهای گلخانه‌ای به دنبال توسعه شهرهای کم کربن در قالب ایده «بوم شهر»^۱ هستند (Paloheimo & Salmi 2013: 233). در این خصوص، حفاظت و توسعه زیرساخت‌های سبز به عنوان مهم‌ترین عناصر شبکه‌های بوم‌شناختی در شهرها از اوایل قرن حاضر مورد توجه کارشناسان و برنامه‌ریزان شهری قرار گرفته است (Staddon et al. 2018; Wang & Mell 2019). بدون تردید تغییرات فضایی-زمانی الگوی زیرساخت سبز شهری (اعم از مناطق طبیعی و نیمه‌طبیعی) متأثر از فرایندهای فضایی تغییر موزایک سیمای سرزمین شکل می‌گیرد و این امر در میزان خدمت اکوسیستمی ترسیب کربن تعیین‌کننده است. از این رو شناخت فرایندهای فضایی مؤثر بر الگوی موزایک ساخت سیمای سرزمین شهری می‌تواند در جهت تکمیل فرایند ارزیابی تأثیرات توسعه شهری بر خدمات اکوسیستمی ترسیب کربن در اولویت اهمیت پژوهش قرار گیرد.

جمع‌آوری داده‌های الگوی فضایی و مدل‌سازی خدمت اکوسیستمی ترسیب کربن در شهرها می‌تواند کمکی مطلوب برای مدیران و برنامه‌ریزان حوزه شهری سیمای سرزمین باشد تا بهتر بتوانند اولویت‌های مکانی حفاظت و توسعه ساختارهای طبیعی شبکه‌های بوم‌شناختی سیمای سرزمین شهری را تشخیص دهند؛ به نحوی که تدارک این خدمت توسط اکوسیستم سرزمین شهری استمرار یابد. در این خصوص مدل InVEST از متداول‌ترین مدل‌های برآورد ترسیب کربن است که بر اساس داده‌های حاصل از دورسنجی (تصاویر ماهواره‌ای لندست) و سیستم اطلاعات جغرافیایی و جداول بیوفیزیک به کار گرفته می‌شود (Daily et al. 2009; Bagstad et al. 2013; Ruckelshaus et al. 2015; Honeck et al. 2020). در این میان نقش سنجه‌های سیمای سرزمین نیز در جهت درک ساختار سیمای سرزمین و شناسایی تغییرات الگوی فضایی موزایک سیمای سرزمین در تلفیق با داده‌های حاصل از مدل‌سازی خدمات اکوسیستمی اهمیت می‌یابد (Moarab et al. 2021).

مواد و روش‌ها

منطقه مورد مطالعه

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 سلسله‌جبال البرز، از شرق به لواسانات، از غرب به کرج، و از جنوب به ورامین محدود شده است (صمدی و همکاران ۱۳۹۸). در این پژوهش سیمای سرزمین تهران منطبق با مناطق ۲۲ گانه شهرداری به عنوان منطقه مطالعاتی مورد بررسی قرار گرفته است (شکل ۱).



شکل ۱. منطقه مورد مطالعه

روش تحقیق

پژوهش حاضر از نظر روش‌شناختی توصیفی-تحلیلی است. در این مطالعه ابتدا استخراج کلاس‌های کاربری/پوشش اراضی سیمای سرزمین شهری با استفاده از تصاویر ماهواره‌ای لندست در دوره‌های زمانی ۱۹۹۰، ۲۰۰۰، ۲۰۱۰، ۲۰۲۰ (توسط نرم‌افزارهای Google Earth، Envi 5.3، Arc GIS 10.2) انجام شد و در ادامه وضعیت ساختار و عملکرد بوم‌شناختی-جامعه‌شناختی

سیمای سرزمین تهران با استفاده از الگوریتم درخت تصمیم‌گیری فرایندهای فضایی موزاییک سیمای سرزمین و مدل InVEST 3.7.0 مورد بررسی قرار گرفت. در نهایت با توجه به داده‌های خروجی از مدل InVEST و سنجش سنجده‌های منتخب سیمای سرزمین (به کمک نرم‌افزار FRAGSTATS 4.2.1) به تحلیل روند تغییرات فضایی- زمانی موزاییک سیمای سرزمین شهری در دو سطح کلاس و سیمای سرزمین و خدمت تنظیمی ترسیب کربن آن پرداخته شد (شکل ۲).

آماده‌سازی نقشه کاربری / پوشش اراضی

به منظور تهیه نقشه کاربری / پوشش زمین شهر تهران در بازه زمانی مورد مطالعه (۱۹۹۰ - ۲۰۰۰ - ۲۰۱۰ - ۲۰۲۰) از تصاویر سنجنده‌های TM (۱۹۹۰ - ۲۰۰۰)، ETM+ (۲۰۱۰)، OLI (۲۰۲۰) ماهواره لندست استفاده شد. این تصاویر از سایت سازمان زمین‌شناسی ایالات متحده^۱ (USGS) تهیه و دانلود شد (جدول ۱). سپس در مرحله پیش‌پردازش در محیط نرم‌افزار ENVI 5.3 روی تصاویر ماهواره‌ای تصحیحات هندسی و رایومتریکی صورت گرفت (Teferi et al. 2010: 2418). در گام بعدی طبقه‌بندی نظارت‌نشده برای درک کلی کلاس‌های کاربری / پوشش زمین موجود در منطقه مورد مطالعه انجام شد. برای افزایش دقت فرایند طبقه‌بندی در این مطالعه طبقه‌بندی مبتنی بر شاخص با استفاده از شاخص تفاضل نرمال‌شده پوشش گیاهی^۲ (NDVI)، شاخص بهبودیافته تفاضل نرمال‌شده آب^۳ (MNDWI)، و شاخص تفاضل نرمال ساخت‌وساز^۴ (NDBI) برای استخراج مناطق مورد نظر^۵ (ROIs) از مؤلفه‌های ساختاری انجام شد. با استفاده از ROIs های تهیه‌شده بر اساس الگوریتم ماشین بردار پشتیبان^۶ (SVMs) در محیط نرم‌افزار ENVI 5.3 طبقه‌بندی نظارت‌شده صورت پذیرفت. در این مرحله چهار کاربری اراضی ساخته‌شده (انسان‌ساخت)، اراضی بایر، اراضی سبز، و اراضی آبی در سیمای سرزمین شهر تهران شناسایی شد. سپس با استفاده از تصاویر Google Earth، نقاط GPS، و نقشه‌های موجود از کاربری / پوشش زمین مقیاس

1. the official website of us geological survey (<http://glovis.usgs.gov>)

2. normalized difference vegetation index

3. modified normalized difference water index

4. normalized difference built-up index

5. regions of interest

6. support vector machines

منطقه مورد مطالعه صحت طبقه‌بندی تصاویر مورد بررسی قرار گرفت. ارزیابی صحت شامل بررسی مقادیر تحلیل دقت کل^۱ (OA) و ضریب کاپا^۲ (KC) است. مقادیر ضریب کاپا بالای ۸۰ درصد نشان‌دهنده این است که به طور کلی تطابق خوبی بین طبقه‌بندی و انواع طبقات کاربری/ پوشش موجود در زمین وجود دارد (Teferi et al. 2010).

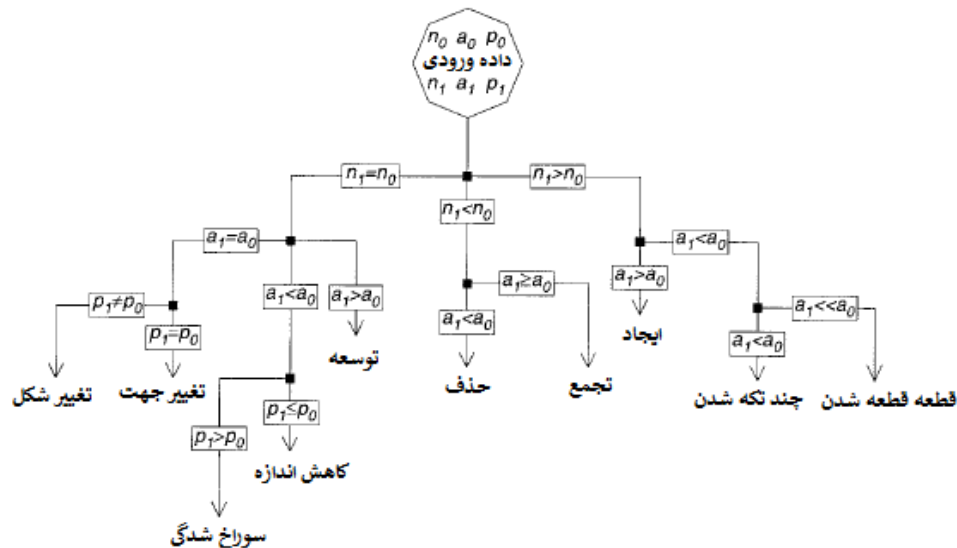
جدول ۱. مشخصات تصاویر ماهواره‌ای مورد استفاده

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

تعیین فرایندهای فضایی تغییر موزاییک سیمای سرزمین تهران

بررسی فرایندهای فضایی تغییر الگوی سیمای سرزمین زمینه‌ای را برای درک درستی از ظرفیت‌ها و محدودیت‌های بوم‌شناختی سیمای سرزمین شهری فراهم می‌آورد که می‌تواند بازگوکننده ارتباط میان الگوی فضایی و فرایندهای بوم‌شناختی حاصل باشد. ارزیابی فرایندهای فضایی تغییر موزاییک سیمای سرزمین بر اساس سه داده (فضایی- زمانی) ورودی الگوریتم درخت تصمیم‌گیری صورت می‌گیرد: تعداد لکه‌ها در هر کلاس از کاربری/ پوشش (n)، مساحت هر کلاس از کاربری/ پوشش (a)، محیط هر کلاس از کاربری/ پوشش (p). داده‌های ورودی به الگوریتم درخت تصمیم‌گیری قبل از تغییر الگوی سیمای سرزمین به عنوان n0 و a0 و p0 نشان داده می‌شوند. همچنین در پایان دوره زمانی در نظر گرفته شده که در آن تغییر الگوی فضایی سیمای سرزمین صورت می‌گیرد به عنوان n1 و a1 و p1 ثبت می‌شوند و در الگوریتم درخت تصمیم‌گیری به عنوان عناصر کلیدی تشخیص فرایندهای فضایی تغییر موزاییک سیمای سرزمین کاربرد دارند (Bogaert et al. 2004: 65). بنابراین از الگوریتم درخت تصمیم‌گیری در تشخیص فرایندهای فضایی مؤثر در تغییر کلاس‌های کاربری/ پوشش اراضی (سبز، بایر، ساخت‌وساز، آبی) در سه دوره زمانی ۱۰ ساله از ۱۹۹۰ - ۲۰۲۰ میلادی موزاییک سیمای سرزمین تهران استفاده شد (شکل ۲).

1. overall accuracy
2. kappa coefficient



شکل ۲. الگوریتم درخت تصمیم‌گیری جهت ارزیابی فرایندهای فضایی تغییر موزاییک سیمای سرزمین (Bogaert et al. 2004: 65)

مدل‌سازی خدمت اکوسیستمی ترسیب کربن با استفاده از مدل InVEST

در این مرحله از مجموعه نرم‌افزاری InVEST 3.7.0 استفاده شد. با استفاده از مدل InVEST می‌توان اثر تغییر کاربری بر ذخیره و ترسیب کربن را به شکل فضایی و در مقیاس سیمای سرزمین شهری تخمین زد. در واقع این مدل مجموع مقدار کربن ذخیره‌شده در چهار مخزن اعم از زیست توده بالازمینی (برگ و شاخه و تنه درخت)، زیست توده زیرزمینی (ریشه گیاهان)، خاک (کربن آلی خاک در افق معدنی^۱ (SOC))، و ماده آلی مرده (لاش برگ گیاهی و شاخ و برگ چوبی مرده درختان) را در هر واحد سرزمین محاسبه می‌کند (Zhang et al. 2020). این مدل با استفاده از نقشه‌های پوشش/ کاربری اراضی و مقدار کربن ذخیره‌شده در این مخازن مقدار خالص کربن ذخیره‌شده در هر محدوده زمین را در طول زمان برآورد می‌کند. در واقع مقدار کربن ذخیره‌شده در این مخازن جهت استفاده در مدل یادشده با استناد به مرور منابع و پیشینه موضوع در جدول ۲ آورده شده است (Sun et al. 2014; Sadat et al. 2020؛ محقق و همکاران ۱۳۹۹). خروجی‌های مدل به صورت مگاگرم کربن در شبکه‌های سلولی یا همان پیکسل‌ها بیان می‌شود. در این مدل،

1. soil organic carbon

میزان ذخیره کربن خشکی با رابطه ۱ به دست می‌آید. در این رابطه C_{xt} کربن ذخیره‌شده در پیکسل مورد بررسی در زمان t است که برابر با مجموع کربن ذخیره‌شده در منابع ذخیره کربن C_{aj} (خاک)، C_{bj} (زی توده زیرزمینی)، C_{aj} (زی توده روزمینی)، و C_{oj} (ماده آلی مرده) به تفکیک کاربری اراضی هستند. به طوری که J نشان‌دهنده انواع کاربری اراضی موجود در منطقه مورد مطالعه است و A_{xjt} مساحت کاربری اراضی در پیکسل x در زمان t است (فدائی و همکاران ۱۳۹۹: ۱۵۹). در واقع C_{pxt} ذخیره کربن در مخزن انتخابی پنجم در مدل است و مرتبط با تولیدات ساخته‌شده با چوب- از قبیل الوار، اسباب و اثاثیه، کاغذ، زغال چوب، و ... است که از اتمسفر دور نگه داشته می‌شوند و در این مطالعه در تخمین میزان کلی کربن ذخیره‌شده در نظر گرفته نمی‌شود (Zhang et al. 2020).

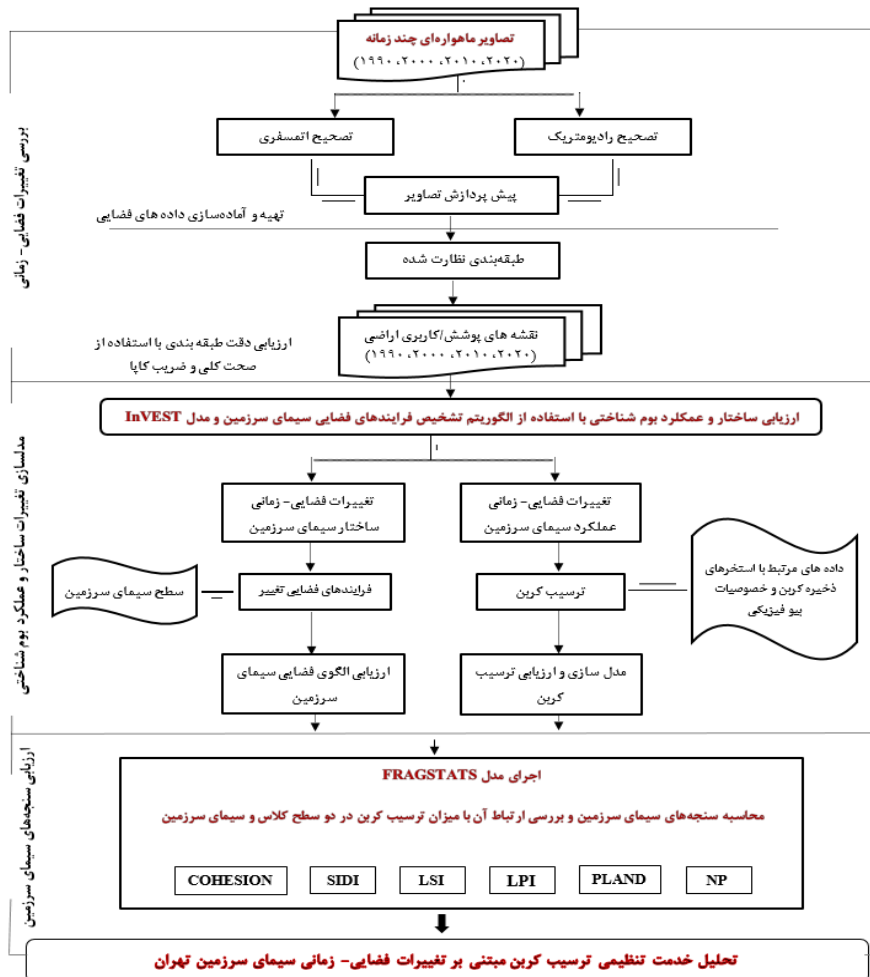
جدول ۲. مخزن‌های ذخیره کربن برای کاربری‌های مختلف شهری (واحد مگاگرم بر هکتار معادل تن بر هکتار)

نوع کاربری / پوشش اراضی	کربن روی زمین	کربن زیر زمین	کربن خاک	کربن مرده
آب	۰	۵	۰	۰
فضای سبز	۱۰	۲	۶۲	۱,۱
انسان‌ساخت	۴	۵	۱۵	۱
بایر	۰,۴	۰,۸۳	۶۰	۰

$$C_{xt} = C_{pxt} + \sum_{j=1}^J 1^A_{xjt} (c_{aj} + c_{bj} + c_{oj} + c_{oj}) \quad (1)$$

$$\Delta C_{xtT} = C_{xT} - C_{xt} \quad (2)$$

با توجه به رابطه ۲، ترسیب کربن زمانی رخ می‌دهد که ذخیره کربن در طول زمان افزایش یابد. بر این اساس اگر تغییر ذخیره کربن در رابطه ΔC_{xtT} مثبت باشد، یعنی از زمان t تا T در پیکسل مورد بررسی ترسیب کربن اتفاق افتاده است و اگر منفی باشد، کربن بین دو بازه زمانی t و T از دست رفته است (محقق و همکاران ۱۳۹۹: ۸).



شکل ۳. چارچوب اجرایی تحقیق

سنجش‌های سیمای سرزمین

در این پژوهش سنجش‌های سیمای سرزمین با توجه به مفهوم پیچیدگی الگوی فضایی موزاییک سیمای سرزمین تعیین شدند. پیچیدگی موزاییک سیمای سرزمین در نتیجه تغییرات فضایی در الگوی ترکیب^۱ و پیکربندی^۲ لکه‌های بستر سیمای سرزمین شکل می‌گیرد. با توجه به مطالعات

1. composition
2. configuration

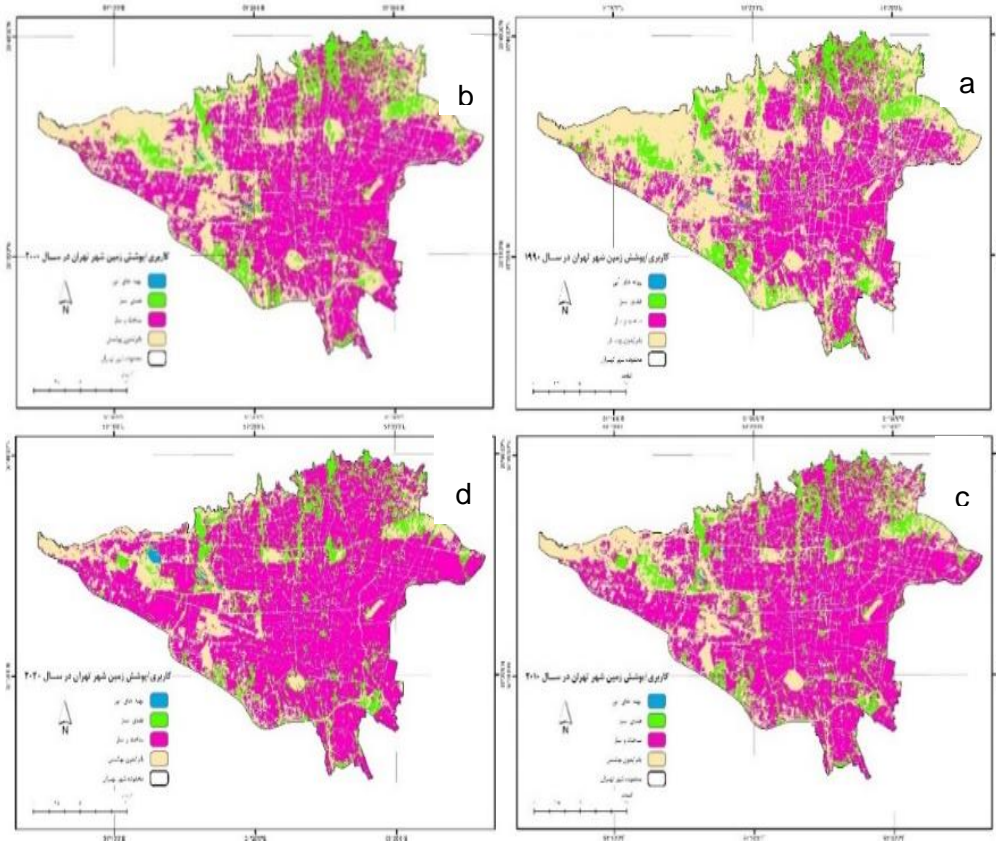
انجام شده و اهداف تحقیق و با در نظر گرفتن هم‌پوشانی بین برخی از سنجه‌ها در سطح کلاس ۴ سنجه از جمله شاخص‌های تعداد لکه (NP)، درصد لکه (PLAND)، بزرگ‌ترین لکه (LPI)، و پیوستگی لکه (COHESION) انتخاب شده است. همچنین تعداد ۲ سنجه شامل شاخص‌های شکل سیمای سرزمین (LSI) و تنوع سیمپسون (SIDI) در سطح سیمای سرزمین مورد استفاده قرار گرفتند. محاسبه شاخص‌های سیمای سرزمین با نرم‌افزار FRAGSTATS 4.2.1 (McGarigal et al. 2012) روی نقشه‌های کاربری/ پوشش اراضی انجام شد.

نتایج و بحث

وضعیت کاربری/ پوشش اراضی سیمای سرزمین تهران

طبقه‌بندی تصاویر بر اساس الگوریتم ماشین بردار پشتیبان نشان داد که چهار نوع کاربری از جمله اراضی‌های ساخت‌وساز، سبز، بایر (بدون پوشش)، و آبی در سیمای سرزمین تهران قابل تشخیص است. در جدول ۳ میزان مساحت هر یک از کاربری‌ها و همچنین نتایج حاصل از صحت‌سنجی طبقه‌بندی تصاویر در سال‌های ۱۹۹۰، ۲۰۰۰، ۲۰۱۰، ۲۰۲۰ نشان داده شده است. نقشه‌های پوشش/ کاربری اراضی شکل ۴ و داده‌های جدول ۳ بیانگر افزایش مساحت اراضی انسان‌ساخت از میزان ۳۷/۳۴ درصد در سال ۱۹۹۰ به رقم ۶۴/۷۸ درصد در سال ۲۰۲۰ است. در مقابل مساحت اراضی بایر از ۴۸/۳۲ درصد در سال ۱۹۹۰ به ۲۳/۰۹ درصد در سال ۲۰۲۰ کاهش یافته است. همچنین کاهش سهم اراضی فضای سبز نیز از رقم ۱۴/۱۹ درصد در سال ۱۹۹۰ به میزان ۱۱/۸۶ درصد در سال ۲۰۲۰ قابل توجه است. در واقع هم‌گرایی و گسترش لکه‌های ساخت‌وساز در قسمت‌های مرکزی و شمالی و غربی شهر در بازه زمانی مورد مطالعه سبب کاهش ناهمگنی عناصر سبز و بایر بینابینی سیمای سرزمین تهران شده است.

بر اساس داده‌های جدول ۳ می‌توان گفت افزایش مساحت کاربری انسان‌ساخت به دلیل افزایش جمعیت و تقاضا برای زمین در نتیجه رشد شهرنشینی در فاصله بین سال‌های ۱۹۹۰ تا ۲۰۰۰ بیشترین روند رو به رشد را داشته است و در این زمان کاهش شدید مناطق بایر و تبدیل آن به مناطق مسکونی مشهود است (جدول ۳).



شکل ۴. نقشه کاربری/ پوشش اراضی سرزمین تهران در سال‌های (a) ۱۹۹۰، (b) ۲۰۰۰، (c) ۲۰۱۰، (d) ۲۰۲۰

جدول ۳. مساحت و تغییرات کاربری/ پوشش اراضی منطقه مورد مطالعه

کاربری / پوشش اراضی شهری	سال ۱۹۹۰		سال ۲۰۰۰		سال ۲۰۱۰		سال ۲۰۲۰	
	هکتار	درصد	هکتار	درصد	هکتار	درصد	هکتار	درصد
پهنه‌های آبی	۸۹/۵۵	۰/۱۴	۱۰۴/۸۵	۰/۱۷	۴۳/۹۲	۰/۰۷	۱۶۸/۷۵	۰/۲۷
فضای سبز	۸۷۰۶/۰۶	۱۴/۱۹	۸۰۱۲/۱۶	۱۳/۰۷	۷۲۹۵/۵۸	۱۱/۸۹	۷۲۸۱/۵۴	۱۱/۸۶
ساخت‌وساز	۲۲۹۰۷/۴۳	۳۷/۳۴	۳۰۶۶۸/۳۱	۴۹/۹۹	۳۵۵۱۷/۷۸	۵۷/۸۹	۳۹۷۲۶/۲۷	۶۴/۷۸
بایر	۲۹۶۴۲/۸۵	۴۸/۳۳	۲۲۵۶۰/۶۶	۳۶/۷۷	۱۸۴۸۸/۷۰	۳۰/۱۵	۱۴۱۶۹/۴۲	۲۳/۰۹
دقت کلی	۹۴/۸۳		۹۵/۴۲		۹۸/۸۰		۹۷/۳۸	
ضریب کاپا	۰/۹۲۳		۰/۹۳۱		۰/۹۸۲		۰/۹۵۸	

وضعیت ساخت و عملکرد موزاییک سیمای سرزمین تهران متأثر از فرایندهای فضایی

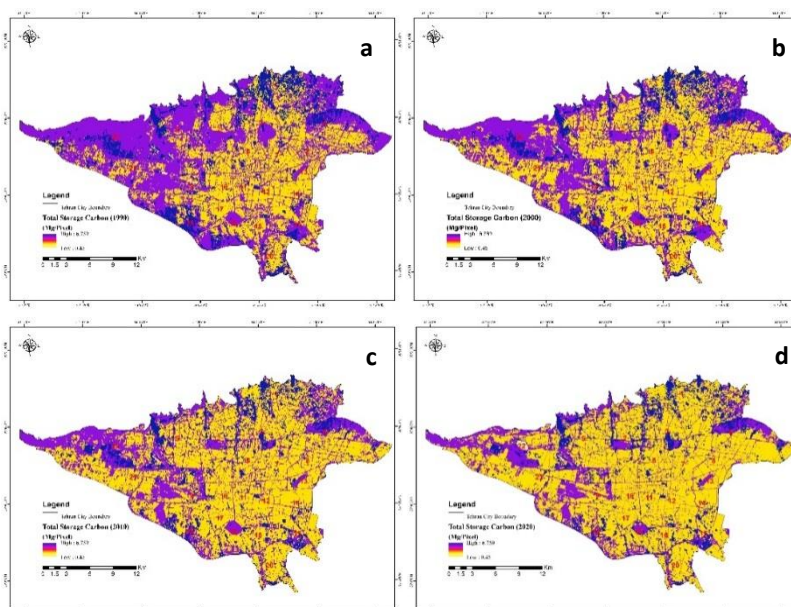
در ارتباط با ساختار سیمای سرزمین تهران، یافته‌های حاصل از خروجی الگوریتم درخت تصمیم‌گیری نشان می‌دهد طی سه دوره زمانی یادشده در نتیجه فرایند فضایی نوع تجمع (تعداد لکه‌ها کاهش و مساحت آن‌ها افزایش می‌یابد) در کلاس انسان‌ساخت تعداد لکه‌های انسان‌ساخت کاهش و مساحت آن‌ها از میزان $37/34$ به $64/78$ درصد افزایش یافته است (جدول ۴). همچنین در بازه زمانی ۱۹۹۰ - ۲۰۰۰، فرایندهای فضایی انواع حذف در ارتباط با اراضی سبز (تعداد و مساحت لکه‌ها در حال کاهش است)، قطعه‌قطعه شدن در ارتباط با اراضی بایر (تعداد لکه‌ها افزایش و مساحت شدیداً کاهش می‌یابد) و ایجاد در ارتباط با اراضی آبی (تعداد لکه‌ها و مساحت آن‌ها در حال افزایش است) رخ داده است. در این دوره میزان ترسیب کربن در سال ۱۹۹۰ از میزان 3041990 تن به میزان 2750334 تن ($9/58$ درصد) کاهش یافته است (جدول ۵). در واقع در این دوره زمانی فرایند فضایی قطعه‌قطعه شدن در اراضی بایر (کاهش مساحت $11/56$ درصدی) و همچنین فرایند فضایی حذف در اراضی سبز (کاهش مساحت $1/12$ درصدی) به ترتیب بیشترین تأثیر را در میزان از دست رفتن ذخیره کربن آلی خاک و ترسیب کربن داشته‌اند. پس از آن در بازه زمانی ۲۰۰۰ - ۲۰۱۰ مجدداً آشکارترین تغییر در اراضی بایر، در نتیجه فرایند فضایی حذف، با کاهش $6/62$ درصدی مشاهده می‌شود. علاوه بر آن، در اثر فرایند فضایی قطعه‌قطعه شدن، اراضی سبز در این دوره با افزایش تعداد لکه و کاهش مساحت $1/18$ درصدی مواجه شده است که به ترتیب بیشترین تأثیر را در میزان از دست رفتن کربن آلی ذخیره در خاک و ترسیب آن داشته است (جدول ۳). در این بازه زمانی میزان ترسیب کربن از 2750334 تن در سال ۲۰۰۰ به 2568125 تن ($6/62$ ٪) در سال ۲۰۱۰ کاهش یافته است. در نهایت در بازه زمانی ۲۰۱۰ - ۲۰۲۰ نیز فرایند فضایی حذف در اراضی سبز شکل گرفته و مساحت اراضی سبز در حدود $0/03$ درصد تقلیل یافته است و همچنین فرایند فضایی قطعه‌قطعه شدن در اراضی بایر باعث کاهش $7/06$ درصدی مساحت این کاربری شده است که در نتیجه این فرایندهای فضایی موزاییک سیمای سرزمین میزان ترسیب کربن در سال ۲۰۱۰ از میزان 2568125 تن به میزان 2408437 تن ($6/22$ ٪) در سال ۲۰۲۰ تقلیل یافته است.

جدول ۴. فرایندهای فضایی مؤثر بر ساختار و عملکرد ترسیب کربن در موزاییک سیمای سرزمین تهران (y1 = سال آغاز دوره زمانی مطالعه، y2 = سال پایان دوره زمانی مورد مطالعه)

میزان تغییرات کربن (تن)	میزان تغییرات کربن		تعداد لکه‌ها NP	فرایند فضایی تغییر	کاربری‌ها	دوره زمانی
	محیط لکه‌ها (km) PP	مساحت لکه‌ها (km ²) PA				
	y2 - y1	y2 - y1	y2 - y1			
	- ۲۷۱۲/۰۹	۸۰/۱۲ - ۸۷/۰۶	- ۲۱۱۸	حذف	مناطق سبز	
	۲۴۰۱/۴۸		۱۷۹۹			
-۲۹۱۶۵۶	- ۳۲۹۷/۴۱	۲۲۵/۶۰ - ۲۹۶/۴۲	- ۲۴۴۰	قطعه‌قطعه شدن	مناطق بایر	۱۹۹۰ تا
	۴۰۲۹/۲۰		۲۹۷۶			
	- ۳۸۸۷/۵۴	۳۰۶/۶۸ - ۲۲۹/۰۷	- ۲۶۲۳	تجمع	مناطق ساخت‌وساز	۲۰۰۰
	۲۴۴۱/۶۲		۱۷۳۳			
	۶۴/۱۸۷ - ۲۹/۳۱۰	۱/۰۴۸۵ - ۰/۸۹۵۵	۵۵ - ۲۰	ایجاد	مناطق آبی	
	- ۲۴۰۱/۴۸	۷۲/۹۵ - ۸۰/۱۲	- ۱۷۹۹	قطعه‌قطعه شدن	مناطق سبز	
	- ۴۰۴۹/۲۰	۱۸۴/۸۸ - ۲۲۵/۶۰	- ۲۹۷۶	حذف	مناطق بایر	۲۰۰۰ تا
	۴۰۲۹/۶۲		۲۸۹۳			
-۱۸۲۲۰۹	- ۲۴۴۱/۶۲	۳۵۵/۱۷ - ۳۰۶/۶۸	- ۱۷۳۳	تجمع	مناطق ساخت‌وساز	۲۰۱۰
	۲۳۲۴/۲۲		۱۵۷۵			
	۳۰/۴۲۴ - ۶۴/۱۸۷	۰/۴۳۹۲ - ۱/۰۴۸۵	۲۸ - ۵۵	حذف	مناطق آبی	
	- ۳۲۴۲/۸۵	۷۲/۸۱ - ۷۲/۹۵	- ۲۵۹۲	حذف	مناطق سبز	
	۲۹۲۴/۲۴		۲۱۶۹			
	- ۴۰۲۹/۶۲	۱۴۱/۶۹ - ۱۸۴/۸۸	- ۲۸۹۳	قطعه‌قطعه شدن	مناطق بایر	۲۰۱۰ تا
-۱۵۹۶۸۸	۵۰۱۳/۷۲		۳۵۸۲			
	- ۲۳۲۴/۲۲	۳۹۷/۲۶ - ۳۵۵/۱۷	۸۵۲ - ۱۵۷۵	تجمع	مناطق ساخت‌وساز	۲۰۲۰
	۱۳۲۹/۳۷					
	۳۰/۲۱۷ - ۳۰/۴۲۴	۱/۶۸۱۷۵ - ۰/۴۳۹۲	۲۵ - ۲۸	تجمع	مناطق آبی	

جدول ۵. میزان برآورد ذخیره کربن بر اساس مشخصات تصاویر حاصل از طبقه‌بندی نظارت‌شده

سال	تعداد پیکسل	حداقل کربن ذخیره (تن در سلول)	حداکثر کربن ذخیره (تن در سلول)	کل کربن ذخیره (تن)
۱۹۹۰	۶۸۱۶۲۱	۰٫۴۵	۶٫۷۵۹	۳۰۴۱۹۹۰
۲۰۰۰	-	-	-	۲۷۵۰۳۳۴
۲۰۱۰	-	-	-	۲۵۶۸۱۲۵
۲۰۲۰	-	-	-	۲۴۰۸۴۳۷



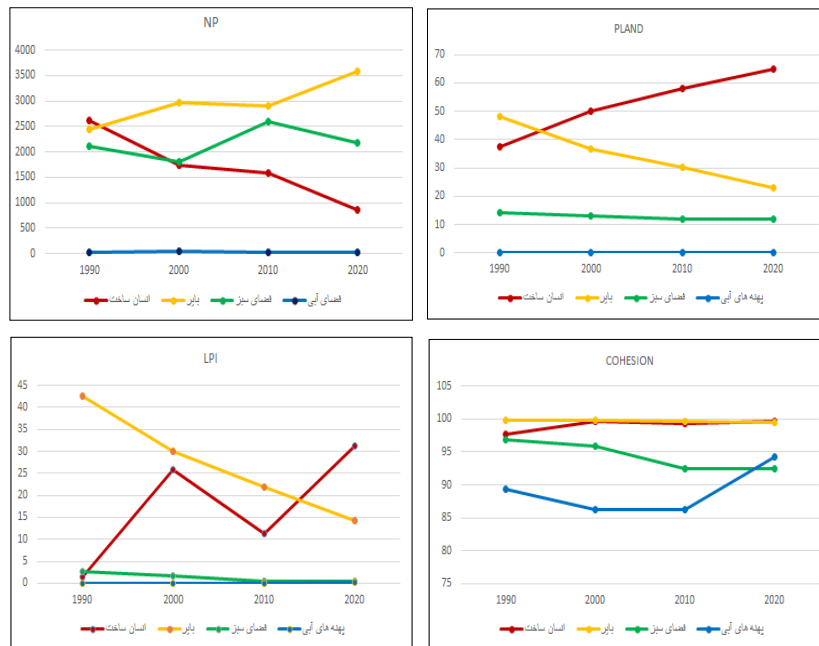
شکل ۵. نقشه میزان ترسیب کربن در موزاییک سیمای سرزمین تهران در سال‌های (a) ۱۹۹۰، (b) ۲۰۰۰، (c) ۲۰۱۰، (d) ۲۰۲۰

ارتباط پیچیدگی الگوی فضایی موزاییک سیمای سرزمین تهران با میزان عملکرد ترسیب کربن با توجه به نقشه‌های ذخیره کربن در بخش‌های مرکزی و شمالی موزاییک سیمای سرزمین تهران در سال‌های ۱۹۹۰ - ۲۰۰۰، شاهد رشد سریع کاربری/ پوشش‌های انسان‌ساخت هستیم که سبب شده ذخیره کربن در نتیجه افزایش سطوح سخت و حذف فضاهای سبز و مناطق بایر به شدت کاهش یابد. پس از آن در سال‌های ۲۰۰۰ تا ۲۰۲۰ با به بن‌بست رسیدن گسترش شهر در جهت

شمال و شمال شرق و شرق و برخورد با موانع طبیعی رشد شهر در این قسمت‌ها محدود شده و توسعه شهر به سمت جنوب (زمین‌های حاصلخیز کشاورزی)، شمال غرب، و غرب (زمین‌های بایر) هدایت شده است (واحدیان‌بیکی و همکاران ۱۳۹۰: ۳۷). روند کلی میزان ذخیره و ترسیب کربن در موزاییک سیمای سرزمین تهران در بازه زمانی مورد نظر رو به کاهش است و از مقدار ۳۰۴۱۹۹۰ تن در سال ۱۹۹۰ به رقم ۲۴۰۸۴۳۷ تن در سال ۲۰۲۰ رسیده است (جدول ۵). نتایج تحقیق نشان می‌دهد در سطح کلاس در الگوی فضایی ترکیب موزاییک سیمای سرزمین تهران در نتیجه فرایندهای فضایی حذف و قطعه‌قطعه شدن اراضی سبز، به طور متناوب، در بازه‌های زمانی سال‌های ۱۹۹۰، ۲۰۰۰، ۲۰۱۰، ۲۰۲۰ تعداد لکه‌های سبز به ترتیب برابر با ۲۱۱۸، ۱۷۹۹، ۲۵۹۲، و ۲۰۵۵ لکه تغییر یافته است. این امر سبب شده طی این بازه زمانی میزان مساحت اراضی سبز از ۸۷۰۶/۰۶ هکتار در سال ۱۹۹۰ به میزان ۷۲۸۱/۵۴ هکتار در سال ۲۰۲۰ کاهش یابد که به طور مستقیم با کاهش میزان ترسیب کربن (جدول ۳) همبستگی دارد. همچنین تعداد لکه (NP) برای اراضی بایر از ۲۴۴۰ در سال ۱۹۹۰ به میزان ۳۵۸۲ لکه در سال ۲۰۲۰ افزایش می‌یابد که این موضوع حاکی از خردانگی بیشتر اراضی بایر در دوره‌های زمانی یادشده متأثر از فرایند فضایی قطعه‌قطعه شدن بوده است که منجر به کاهش شدید مساحت اراضی بایر از میزان ۳۲۹۳۶۵ هکتار در سال ۱۹۹۰ به میزان ۱۵۷۴۳۸ هکتار در سال ۲۰۲۰ شده است که می‌تواند توجیهی مستدل بر میزان از دست رفتن بخش قابل توجهی از کربن آلی خاک در سیمای سرزمین تهران در این بازه زمانی باشد (جدول ۶).

نمودار مرتبط با PLAND نیز بیانگر کاهش درصد مساحت‌های اراضی سبز و بایر و برعکس افزایش سریع مساحت مناطق انسان‌ساخت در سیمای سرزمین تهران در بازه زمانی یادشده است (شکل ۶). در واقع اراضی بایر با مساحتی معادل ۴۸/۳۳ درصد از کل سطح سیمای سرزمین تهران در سال ۱۹۹۰ در جایگاه اول اهمیت به لحاظ استخر ذخیره کربن آلی خاک قرار داشته است. اما در دهه‌های بعد، با افزایش ساخت‌وسازها و کاهش ناهمگنی در اراضی سبز و بایر سیمای سرزمین تهران، مساحت اراضی بایر به میزان ۲۳/۰۹ درصد در سال ۲۰۲۰ کاهش یافته است (جدول ۳) و

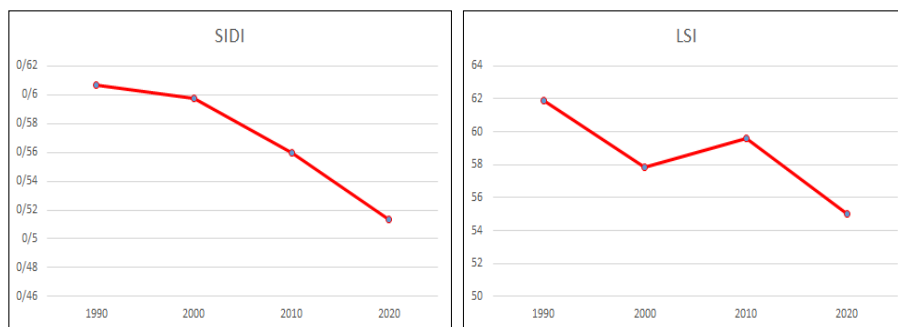
این موضوع سبب شده میزان ذخیره کربن آلی خاک از ۱۴۷۰۱۹۳/۷۶۷ تن در سال ۱۹۹۰ به میزان ۵۵۶۱۰۸/۱۰۳ تن در سال ۲۰۲۰ تقلیل یابد (جدول ۶).



شکل ۶. تغییرات سنجه‌ها در سطح کلاس (در نمودارهای فوق محور X بیانگر دوره‌های زمانی و محور Y به ترتیب در نمودارهای NP، PLAND، LPI، COHESION نشان‌دهنده تعداد لکه، درصد پوشش سیمای سرزمین، درصد بزرگ‌ترین لکه، میزان عددی پیوستگی سیمای سرزمین است).

همچنین در الگوی فضایی ترکیب موزاییک سیمای سرزمین تهران در سطح کلاس، شاخص بزرگ‌ترین لکه (LPI) برای اراضی انسان‌ساخت در بازه زمانی یادشده افزایش یافته است که بیانگر کاهش ناهمگنی برای اراضی طبیعی سبز و باز و گسترش سطوح نفوذناپذیر از مناطق مرکزی به قسمت‌های غربی، جنوب غربی، و شمالی شهر است. این شاخص برای اراضی سبز و بایر کاهش یافته است که نشان‌دهنده از دست رفتن پتانسیل جذب و ذخیره کربن در موزاییک سیمای سرزمین تهران است (جدول ۶). از سوی دیگر، در الگوی فضایی توزیع موزاییک سیمای سرزمین تهران در سطح کلاس، شاخص پیوستگی لکه (COHESION) برای اراضی سبز و بایر در بازه

زمانی مورد مطالعه روندی نزولی دارد (نمودار ۶) که حاکی از کاهش مساحت لکه‌ها و از دست رفتن پتانسیل ترسیب و میزان ذخیره کربن در سیمای سرزمین شهر تهران است (جدول ۶). این شاخص برای مناطق انسان‌ساخت افزایش یافته است که نشان از کاهش ناهمگنی و ساده‌سازی الگوی فضایی سیمای سرزمین تهران دارد. با توجه به اینکه سهم تشکیل لکه‌های آبی (که عمدتاً شامل استخرهای آبی عمومی و آب‌نماها و دریاچه‌های مصنوعی است) از کل موزایک سیمای سرزمین شهری تهران ناچیز است و در سال‌های اخیر به سبب ساخت دریاچه مصنوعی خلیج فارس در کنار دریاچه مصنوعی آزادی روندی افزایشی را شاهد بوده است، هر چهار شاخص در این کاربری روندی رو به رشد را نشان می‌دهند.



شکل ۷. تغییرات سنجه‌ها در سطح سیمای سرزمین (در نمودارهای فوق محور x بیانگر بازه زمانی و محور y در نمودارهای SIDI و LSI به ترتیب نمایانگر میزان عددی شاخص‌های شکل و تنوع سیمای سرزمین است).

در سطح سیمای سرزمین نیز شاخص تنوع سیمپسون (SIDI) سیمای سرزمین تهران بیانگر روندی نزولی در طی سه دهه قبل است که نشان از افزایش همگنی فضایی سرزمین شهری در نتیجه تجمع لکه‌های انسان‌ساخت و کاهش ناهمگنی از اراضی طبیعی سبز و باز دارد که بر میزان روند کلی ترسیب کربن تأثیر منفی گذاشته است (جدول ۵). این شاخص بیانگر ساده‌سازی الگوی فضایی ترکیب موزایک سیمای سرزمین شهری تهران است (شکل ۷). همچنین وضعیت شاخص شکل (LSI) در سطح سیمای سرزمین بیانگر تداوم روند کاهشی در بازه زمانی مورد مطالعه است که نشان از ساده‌تر شدن و منظم‌تر شدن موزایک سیمای سرزمین در نتیجه پیوستگی و یکپارچگی اراضی ساخت‌وساز در جهت فرایندهای فضایی حذف و قطعه‌قطعه شدن زیرساخت‌های سبز و

باز در الگوی توزیع فضایی موزاییک سیمای سرزمین تهران در دوره زمانی مورد مطالعه دارد (شکل ۷).

جدول ۶. میزان ذخیره کربن در کلاس‌های کاربری اراضی سیمای سرزمین تهران در سال‌های مختلف

طبقات کاربری اراضی	سال	تعداد پیکسل	مساحت کاربری / پوشش	کل کربن ذخیره (تن)
اراضی سبز	۱۹۹۰	۹۶۷۳۴	۸۷۰۶/۰۶	۴۳۱۶۵۸/۳۸۱
	۲۰۰۰	۸۹۰۲۴	۸۰۱۲/۱۶	۳۵۹۴۶۸/۶۵۳
	۲۰۱۰	۸۱۰۶۲	۷۲۹۵/۵۸	۳۰۵۳۵۰/۰۶۲
	۲۰۲۰	۸۰۹۰۶	۷۲۸۱/۵۴	۲۸۵۶۴/۶۲۸۲
اراضی بایر	۱۹۹۰	۳۲۹۳۶۵	۲۹۶۴۲/۸۵	۱۴۷۰۱۹۳/۷۶۷
	۲۰۰۰	۲۵۰۶۷۴	۲۲۵۶۰/۶۶	۱۰۱۱۲۹۷/۸۱۱
	۲۰۱۰	۲۰۵۴۳۰	۱۸۴۸۸/۷۰	۷۷۴۲۸۹/۶۸۷
	۲۰۲۰	۱۵۷۴۳۸	۱۴۱۶۹/۴۲	۵۵۶۱۰۸/۱۰۳
اراضی انسان‌ساخت	۱۹۹۰	۲۵۴۵۲۷	۲۲۹۰۷/۴۳	۱۱۳۵۸۷۹/۰۶۶
	۲۰۰۰	۳۴۰۷۵۹	۳۰۶۶۸/۳۱	۱۳۷۴۸۹۱/۹۶۶
	۲۰۱۰	۳۹۴۶۴۲	۳۵۵۱۷/۷۸	۱۴۸۶۶۸۷/۵۶۲
	۲۰۲۰	۴۴۱۴۰۳	۳۹۷۲۶/۲۷	۱۵۶۰۱۸۵/۴۸۸
اراضی آبی	۱۹۹۰	۹۹۵	۸۹/۵۵	۴۲۵۸/۷۸۶
	۲۰۰۰	۱۱۶۵	۱۰۴/۸۵	۴۶۷۵/۵۶۷
	۲۰۱۰	۴۸۸	۴۳/۹۲	۱۷۹۷/۶۸۷
	۲۰۲۰	۱۸۷۵	۱۶۸/۷۵	۶۵۰۲/۷۷۹

نتایج حاصل از مدل‌سازی در دهه‌های مختلف در ارتباط با خدمات ترسیب کربن در موزاییک سیمای سرزمین تهران نشان داد میزان ترسیب و ذخیره‌سازی کربن به علت تغییرات کاربری / پوشش اراضی در نتیجه فرایندهای فضایی تجمع اراضی ساخت‌وساز و حذف و قطعه‌قطعه شدن اراضی سبز و باز در حال کاهش است. حجم ترسیب کربن در بازه زمانی ۱۹۹۰ - ۲۰۲۰ کاهش ۲۰/۸۳ درصدی داشته است. این نتایج با تعداد زیادی از مطالعات دیگر که تأکید می‌کند

فعالیت‌های انسانی و توسعه اراضی ساخته شده بر افزایش میزان از دست رفتن پتانسیل ترسیب کربن و کاهش ذخیره‌سازی آن به شکل کربن آلی در خاک تأثیرگذار است تطابق دارد (Edmondson et al. 2012; Davies et al. 2011; Churkina 2016; Zhang et al. 2020; Ariluoma et al. 2021).

نتایج پژوهش حاضر در قیاس با مطالعات موجود در زمینه ارزیابی روند تغییرات فضایی-زمانی خدمت تنظیمی ترسیب کربن (Hutyra et al. 2011; Zhang et al. 2012; He et al. 2016; Daba & Dejene 2018)، علاوه بر کمی‌سازی آن، بر نقش فرایندهای فضایی در تغییر الگوی ساخت سیمای سرزمین شهری و به دنبال آن تأثیر بر عملکرد ترسیب کربن طی بازه زمانی مشخص تأکید دارد. در واقع روش‌شناسی مطالعه حاضر بیان می‌دارد که چگونه الگوی پیچیده ساخت سیمای سرزمین شهری، که در نتیجه تأثیر یک سری از فرایندهای فضایی طی زمان شکل گرفته است، بر فرایند بوم‌شناختی جذب کربن در موزایک سیمای سرزمین تأثیر می‌گذارد. این در حالی است که در سایر مطالعات مشابه تنها به تحلیل انواع تغییر کاربری اراضی در شهرها و به دنبال آن برآورد کمی میزان ترسیب کربن توسط مدل InVEST بسنده شده است. مثلاً ژانگ و همکارانش (۲۰۲۰) در تحقیقی که به بررسی روند تغییرات میزان ترسیب کربن در شهر شانگهای چین در بازه زمانی ۱۹۹۰ - ۲۰۱۵ پرداختند صرفاً تخمینی از میزان کربن ازدست‌رفته (رقم ۷۳۱۹۰۰۰ تن) سیمای سرزمین شهری در نتیجه تغییرات کاربری اراضی کشاورزی و مرتع و جنگل به کاربری ساخت‌وساز به دست آوردند. در واقع روش‌شناسی این پژوهش تنها بر چگونگی به‌کارگیری تکنیک و متدولوژی برآورد ترسیب کربن متمرکز بوده است. همچنین نتایج مطالعه دامفا (۲۰۲۱) بیانگر تأثیر توسعه پراکنده مناطق شهری و صنعتی در منطقه جنوب غربی کشور گامبیا در بازه زمانی ۲۰۰۳ - ۲۰۲۰ نیز اشاره به میزان از دست رفتن قابلیت ترسیب کربن منطقه به مقدار ۲۱۸۲۴ تن کربن بوده است. اما تحقیق حاضر یک گام از مطالعات مشابه فراتر نهاده و علاوه بر کمی‌سازی میزان ترسیب کربن در بازه زمانی ۱۹۹۰ - ۲۰۲۰ به بررسی فرایندهای فضایی تغییر الگوی ساخت سیمای سرزمین به عنوان علل مؤثر بر تنزل کیفیت فرایند بوم‌شناختی جذب کربن در سیمای سرزمین تهران پرداخته است. بر اساس نتایج این تحقیق می‌توان گفت

بیشترین میزان از دست رفتن قابلیت ترسیب کربن در سیمای سرزمین تهران در بازه زمانی ۱۹۹۰ - ۲۰۰۰ بر اثر فرایندهای فضایی قطعه‌قطعه شدن در اراضی بایر و همچنین حذف در اراضی سبز (عمدتاً از نوع باغی و درختی) در مناطق شمالی و شرقی سیمای سرزمین تهران به میزان ۲۹۱۶۵۶ تن کربن شکل گرفته است (شکل ۵ و جدول ۶).

بدون تردید توجه به رویکرد بوم‌شناختی - جامعه‌شناختی مدیریت سیستم فضایی سیمای سرزمین، مدیریت فرایندهای فضایی ایجاد (تعداد لکه‌ها و مساحت آن‌ها در حال افزایش است) و توسعه^۱ (تعداد لکه‌ها ثابت ولی مساحت آن‌ها در حال افزایش است) (Bogaert et al. 2004: 64) در زیرساخت‌های طبیعی سبز و باز شبکه‌های بوم‌شناختی موزایک سیمای سرزمین تهران را می‌طلبد که می‌تواند در ارتباط با ارتقای ویژگی عملکردی ترسیب کربن سرزمین آن مؤثر واقع شود. افزایش مساحت اراضی سبز و بایر در اکوسیستم‌های شهری همبستگی مثبتی با بهبود عملکرد بوم‌شناختی ترسیب و ذخیره‌سازی کربن در الگوی موزایک سیمای سرزمین شهری دارد که توسط نتایج بسیاری از مطالعات قابل تأیید است (Churkina 2016; Staddon et al. 2018; Ariluoma et al. 2021). اما آنچه در مطالعه حاضر می‌تواند در ارتباط با پایداری سیمای سرزمین شهری تعیین‌کننده باشد تأکید بر نوع و چگونگی فرایند فضایی توسعه در زیرساخت‌های طبیعی و ساخت‌وساز شهری است. زیرا با توجه به مبانی بوم‌شناختی - جامعه‌شناختی سیمای سرزمین شهری نوع و میزان پیوستگی در الگوی فضایی موزایک سیمای سرزمین مشتمل بر ترکیب اراضی طبیعی - زیستگاهی و ساخت‌وساز سرزمین شهری می‌تواند ضمن جلوگیری از افزایش میزان آشفستگی در پراکنش لکه‌های سبز و باز ساخت فضایی سیمای سرزمین در ارتقای خدمت اکوسیستمی ترسیب کربن سرزمین شهری اهمیت یابد.

نتیجه

تغییرات کاربری / پوشش اراضی سیمای سرزمین تهران طی سه دهه گذشته (۱۹۹۰ - ۲۰۲۰) نشان‌دهنده جایگزین شدن عرصه‌های سبز و بایر با اراضی انسان‌ساخت است؛ به گونه‌ای که افزایش مساحت ۲۷/۴۴ درصدی (از میزان ۳۷/۳۴ درصد به رقم ۶۴/۷۸ درصد) کاربری

ساخت‌وساز در موزاییک سیمای سرزمین تهران در یک بازه زمانی سی ساله (۱۹۹۰ - ۲۰۲۰) در نتیجه فرایند فضایی تجمع شکل گرفته و باعث کاهش مساحت ۲۵/۲۴ درصدی اراضی بایر و همچنین کاهش ۲/۳۳ درصدی اراضی سبز در ترکیب الگوی فضایی موزاییک سیمای سرزمین شهری شده است. این امر متأثر از فرایندهای فضایی حذف و قطعه‌قطعه شدن در طول سه دهه در عرصه‌های سبز و بایر سرزمین شهری رخ داده است (جدول ۴) و به کاهش ناهمگنی‌ها در ارتباط با اراضی سبز و باز و ساده‌سازی الگوی فضایی موزاییک سیمای سرزمین شهری (کاهش سنجه‌های LSI و SIDI) منجر شده است. همچنین تعداد لکه‌های NP اراضی سبز و باز نیز طی بازه زمانی مورد مطالعه افزایش یافته است (جدول ۴) که بیانگر ریزدانگی و پراکندگی بیشتر لکه‌های سبز و باز در الگوی فضایی موزاییک سیمای سرزمین تهران است. بر این اساس مساحت لکه‌های سبز (PLAND) از میزان ۱۴/۱۹ درصد در سال ۱۹۹۰ به رقم ۱۱/۸۶ درصد در سال ۲۰۲۰ و همچنین مساحت لکه‌های باز از رقم ۴۸/۳۳ درصد در سال ۱۹۹۰ به عدد ۲۳/۰۹ درصد در سال ۲۰۲۰ کاهش یافته است. این در حالی است که مساحت عرصه‌های آبی در بازه زمانی یادشده افزایش ۰/۱۳ درصدی را نشان می‌دهد. همه این داده‌ها نشان از کاهش مساحت عرصه‌های سبز و باز در نتیجه توسعه سریع عرصه‌های انسان‌ساخت موزاییک سیمای سرزمین تهران است که به کاهش عملکرد بوم‌شناختی ترسیب و ذخیره کربن از میزان ۳۰۴۱۹۹۰ تن در سال ۱۹۹۰ به رقم ۲۴۰۸۴۳۷ تن در سال ۲۰۲۰ منجر شده است.

علاوه بر آن بررسی روند تغییرات میزان کربن ذخیره‌شده موزاییک سیمای سرزمین تهران نشان می‌دهد بین سال‌های ۱۹۹۰ - ۲۰۰۰ بیشترین میزان از دست رفتن ذخیره کربن در نتیجه تأثیر فرایندهای فضایی حذف مناطق سبز و قطعه‌قطعه شدن اراضی بایر رخ داده است. در واقع در این بازه زمانی میزان کربن ذخیره‌شده در موزاییک سیمای سرزمین تهران ۹/۵۸ درصد کاهش یافته است و از رقم ۳۰۴۱۹۹۰ تن به میزان ۲۷۵۰۳۳۴ تن رسیده است. پس از آن در رتبه دوم در بازه زمانی بین سال‌های ۲۰۰۰ - ۲۰۱۰ میزان تغییرات و از دست رفتن ذخیره کربن موزاییک سیمای سرزمین تهران برابر با ۶/۶۲ درصد بر اساس مدل InVEST برآورد شده است که از میزان ۲۷۵۰۳۳۴ تن به رقم ۲۵۶۸۱۲۵ تن رسیده است. در واقع در این بازه زمانی فرایند فضایی

قطعه‌قطعه شدن سبب افزایش تعداد و کاهش مساحت اراضی سبز (مرتبط با سنجه‌های NP، LPI، PLAND، COHESION) شده است. همچنین در این دوره فرایند فضایی حذف سبب کاهش ۶/۶۲ درصدی اراضی باز شده است. بر اساس نقشه‌های کاربری موجود، قطعه‌قطعه شدن زمین‌های کشاورزی در مناطق جنوبی و حذف اراضی باز در مناطق شمال غربی و غرب شهر در این زمان سبب کاهش میزان ترسیب کربن شده است.

در دوره سوم، یعنی بازه زمانی ۲۰۱۰ - ۲۰۲۰ تغییر ۶/۲۱ درصدی کاهش میزان ترسیب کربن (۱۵۹۶۸۸-) برآورد شده است. بر اساس یافته‌های حاصل از الگوریتم درخت تصمیم‌گیری، در این بازه زمانی فرایندهای فضایی حذف اراضی سبز و قطعه‌قطعه شدن اراضی باز سبب تغییرات فضایی در الگوی موزاییک سیمای سرزمین تهران شده است (جدول ۴). این امر موجب شده میزان ترسیب کربن از رقم ۲۵۶۸۱۲۵ به مقدار ۲۴۰۸۴۳۷ تن کاهش یابد.

به طور کلی مدیران و برنامه‌ریزان شهری در جهت تدوین سیاست‌های مدیریتی ارتقای کیفیت بوم‌شناختی شهرها همواره به دنبال تغییر الگوی فضایی سیمای سرزمین در دستیابی به اهدافی خاص، از جمله بهبود خدمات اکوسیستمی (شامل عملکرد ترسیب کربن)، هستند. زیرا فرض غالب بر این اساس استوار است که آرایش فضایی عناصر در موزاییک سیمای سرزمین شهری می‌تواند در جهت بهبود فرایندهای بوم‌شناختی نقش مهمی ایفا کند. در این میان تغییر الگوی فضایی زیرساخت‌های سبز شهری به عنوان یک ابزار برنامه‌ریزی در جهت بهبود و ارتقای شبکه‌های بوم‌شناختی سرزمین شهری اهمیت می‌یابد. در این رابطه بر اساس هفت دسته از فرایندهای فضایی (شامل: تغییر جهت، کاهش اندازه، حذف، تغییر شکل، چند تکه شدن، قطعه‌قطعه شدن، سوراخ‌شدگی)، که سبب دگرگونی الگوی فضایی در زیرساخت‌های طبیعی و انسان‌ساخت سیمای سرزمین شهری می‌شوند، سه نوع از فرایندهای فضایی، شامل تجمع و ایجاد و توسعه، به دنبال شکل‌گیری الگوهای جدید پوشش / کاربری اراضی هستند که می‌توان از این فرایندها در جهت بهبود وضعیت ساختاری شبکه زیرساخت‌های طبیعی و ساخت‌وساز و به تبع آن عملکرد تنظیمی ترسیب کربن سرزمین شهری بهره جست. در واقع هر سه این فرایندها در جهت افزایش مساحت و سرانه‌های فضای طبیعی شهری به کار گرفته می‌شوند. اما موضوعی که می‌تواند نقش آن‌ها را در

پایداری سیمای سرزمین شهری و بهبود فرایند بوم‌شناختی ترسیب کربن پراهمیت‌تر جلوه دهد به‌کارگیری صحیح سیاست‌های اجرایی مرتبط با این فرایندها در طرح‌ها و برنامه‌های آمایش سرزمین شهری است. مثلاً با هدف بهبود فرایند بوم‌شناختی جذب کربن سیمای سرزمین تهران مدیریت فرایند فضایی ایجاد (افزایش تعداد لکه‌های سبز و افزایش مساحت آن‌ها) در رابطه با افزایش عرصه‌های سبز، از جمله احداث پارک‌های شهری و فضاهای سبز لکه‌ای، کاربرد دارد. اما استفاده از فرایند فضایی توسعه (ثابت بودن تعداد لکه‌ها ولی افزایش مساحت آن‌ها) شبکه زیرساخت سبز می‌تواند در جهت احیا و گسترش فضاهای سبز خطی مربوط به دالان‌های انسان‌ساخت و روددره‌های طبیعی شهر تهران در جهت افزایش پیوستگی و یکپارچگی لکه‌های طبیعی شبکه‌های بوم‌شناختی به کار گرفته شود. از سوی دیگر فرایند فضایی تجمع (کاهش تعداد لکه‌ها حین ثبات یا افزایش مساحت آن‌ها) نیز با هدف احیا و جلوگیری از قطعه‌قطعه شدن اراضی جنگلی در مناطق شمال شرقی (عرصه‌های پارک جنگلی لویزان و سرخه‌حصار)، مناطق شمال غربی (پارک جنگلی چیتگر و فضاهای سبز منطقه ۲۲)، و اراضی کشاورزی حاشیه جنوبی شهر در طرح‌های جامع شهری گنجانده شود. بنابراین، روش‌شناسی پژوهش می‌تواند با هدف افزایش عملکرد عرصه‌های طبیعی و لحاظ کردن عملکرد تنظیمی ترسیب کربن، از طریق مدیریت فرایندهای فضایی ایجاد و توسعه و تجمع زیرساخت‌های طبیعی و انسان‌ساخت طرح‌های توسعه شهری، تعیین‌کننده اصلی باشد. در این زمینه موارد ذیل مورد توجه قرار می‌گیرند:

بررسی تأثیر الگوهای کاشت ساختارهای سبز و به‌کارگیری گونه‌بندی مناسب از انواع گونه‌های گیاهی (اعم از درختی، درختچه‌ای، بوته‌ای، علفی) در ارتقای خدمت تنظیمی ترسیب کربن در بستر سیمای سرزمین شهری؛

مدیریت طرح‌های جامعه‌شناختی توسعه شهری و پیش‌بینی تأثیر آن‌ها بر ساختار و عملکرد بوم‌شناختی شبکه زیرساخت طبیعی شهری؛

ارزیابی سناریوهای برنامه‌ریزی فضایی توسعه زیرساخت‌های طبیعی شهری بر اساس مدل‌سازی مکانی در محیط سامانه‌های اطلاعات جغرافیایی و بهره‌گیری از اصول بوم‌شناسی سیمای سرزمین.

منابع

- سجادی قائم مقامی، ساره السادات؛ رومینا سیاح‌نیا؛ نغمه مبرقی دینان؛ مجید مخدوم‌فرخنده (۱۴۰۰). «ارزشیابی پیامدهای رشد شهری بر خدمت اکوسیستمی ذخیره کربن (مطالعه موردی: زیرحوزه‌های آبریز شهر کرج)»، *سنجش از دور و سامانه اطلاعات جغرافیایی در منابع طبیعی*، ۱۲(۱)، ص ۲۰ - ۳۷.
- صمدی، علی؛ سید یعقوب موسوی؛ مصطفی ازکیا (۱۳۹۸). «تحلیل جامعه‌شناختی- کالبدی فضاهاى عمومی شهری (مطالعه موردی: کلان‌شهر تهران)»، *شهر پایدار*، ۲(۴)، ص ۱۰۱ - ۱۱۴.
- فدائی، انسیه؛ میرمهرداد میرسنجری؛ محمدجواد امیری (۱۳۹۹). «مدل‌سازی خدمات اکوسیستمی مبتنی بر تغییرات پوشش و کاربری سیمای سرزمین با به‌کارگیری نرم‌افزار InVEST در منطقه حفاظت‌شده جهان‌نما (مورد مطالعه: خدمت اکوسیستمی ترسیب کربن)»، *آمایش سرزمین*، ۱۲(۱)، ص ۱۵۳ - ۱۷۳.
- محقق، میرسعید؛ نغمه مبرقی دینان؛ علی‌رضا وفائی‌نژاد؛ سهیل سبحان‌اردکانی؛ سید مسعود منوری (۱۳۹۹). «بررسی تغییرات بوم‌سازگان با استفاده از سنجه‌های سیمای سرزمین و ترسیب کربن شهر تهران»، *محیط‌شناسی*، ۴۶(۱)، ص ۱ - ۱۸.
- محمودی، ابراهیم؛ محمد مهدوی؛ محمدرضا جوادی (۱۳۹۲). «توان ترسیب کربن خاک در انواع کاربری اراضی اکوسیستم (مطالعه موردی: حوزه آبخیز میدان اسفراین)»، *اکوسیستم‌های طبیعی ایران*، ۳(۳)، ص ۱۰۰ - ۱۱۳.
- مرکز آمار ایران (۱۳۹۵). ویژگی‌های جمعیتی، اجتماعی و اقتصادی مناطق ۲۲ گانه تهران در سرشماری سال‌های ۱۳۹۰ و ۱۳۹۵، ریاست‌جمهوری، سازمان برنامه و بودجه کشور.
- واحدیان‌بیکی، لیلیا؛ احمد پوراحمد؛ فرانک سیفال‌الدینی (۱۳۹۰). «اثر توسعه فیزیکی شهر تهران بر تغییر کاربری اراضی منطقه ۵»، *نگرش‌های نو در جغرافیای انسانی*، ۴(۱)، ص ۲۹ - ۴۶.

References

- Ariluoma, M., Ottelin, J., Hautamäki, R., Tuhkanen, E. M., & Mänttari, M. (2021). "Carbon sequestration and storage potential of urban green in residential yards: A case study from Helsinki", *Urban Forestry and Urban Greening*, p. 57 [126939].
- 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), p. 101.

- Bagstad K, J., Semmens D, J., Waage, S. (2013). "A comparative assessment of decision-support tools for ecosystem services quantification and valuation", *Ecosystem Services*, 5, pp. 27-39.
- Bogaert, J., Ceulemans, R., & Salvador-Van Eysenrode, D. (2004). "Decision Tree Algorithm for Detection of Spatial Processes in Landscape Transformation", *Environmental Management*, 33(1), pp. 62-73.
- Churkina, G. (2016). "The Role of Urbanization in the Global Carbon Cycle", *Frontiers in Ecology and Evolution*, 3, p. 144.
- Chun, J., Kim, C. K., Kang, W., Park, H., Kim, G., Lee, W. K. (2019). "Sustainable Management of Carbon Sequestration Service in Areas with High Development Pressure: Considering Land Use Changes and Carbon Costs", *Sustainability*, 11(18), p. 5116.
- Costanza, R. (2008). "Ecosystem services: multiple classification systems are needed", *Biological Conservation*, 141, pp. 350-352.
- Daba, M. H., & Dejene, S. W. (2018). "The role of biodiversity and ecosystem services in carbon sequestration and its implication for climate change mitigation", *Environmental Sciences and Natural Resources*, 11(2), pp. 1-10.
- Daily, G., Polasky, S., Goldstein, J., Kareiva, P., Mooney, H., Pejchar, L., Ricketts, T., Salzman, J., Shallenberger, R. (2009). "Ecosystem services in decision making: time to deliver", *Frontiers in Ecology and the Environment*, 7, pp. 21-28.
- Dampha, N. K. (2021). "Change detection (1985-2020): Projections on land-use land cover, carbon storage, sequestration, and valuation in Southwestern Gambia", *Sustainable Environment*, 7(1), p. 1875556.
- Davies, Z., Edmondson, J., Heinemeyer, A., Leake, J., Gaston, K. (2011). "Mapping an urban ecosystem service: Quantifying above-ground carbon storage at a city-wide scale", *Journal of Applied Ecology*, 48, pp. 1125-1134.
- Edmondson J.L., Davies, Z.G., McHugh, N., Gaston KJ, Leake J.R. (2012). "Organic carbon hidden in urban ecosystems", *Scientific Reports*, 2, p. 963.
- Edmondson, J.L., Davies, Z.G., McCormack, S.A., Gaston, K.J., Leake, J.R. (2014). "Land-cover effects on soil organic carbon stocks in a European city", *Science of the Total Environment*, 472, pp. 444-453.
- Fadaei, E., Mirsanjari, M., Amiri, M. (2020). "Modeling of ecosystem services based on land cover change and land use using InVEST software in Jahannama conservation area (Case: carbon sequestration ecosystem service)", *Town and Country Planning*, 12(1), pp. 153-173. (In Persian).
- Honeck, E., Sanguet, A., Schlaepfer, M.A., Wyler, N., Lehmann, A. (2020). "Methods for identifying green infrastructure", *SN Applied Sciences*, 2, 1916, pp. 1-25.
- He, C., Zhang, D., Huang, Q., & Zhao, Y. (2016). "Assessing the potential impacts of urban expansion on regional carbon storage by linking the LUSD-urban and InVEST models", *Environmental Modelling and Software*, 75, pp. 44-58.
- Hutyra, L.R., Yoon, B., Hepinstall-Cymerman, J., & Alberti, M. (2011). "Carbon consequences of land cover change and expansion of urban lands: A case study in the Seattle metropolitan region", *Landscape and Urban Planning*, 103(1), pp. 83-93.
- Kindu, M., Schneider, T., Teketay, D., Knoke, T. (2016). "Changes of ecosystem service

- values in response to land use/land cover dynamics in Munessa–Shashemene landscape of the Ethiopian highlands[J]", *Science of the Total Environment*, 547, pp. 137-147.
- Li, Z.T., Yuan, M.J., Hu, M.M., Wang, Y.F., Xia, B.C. (2019). "Evaluation of ecological security and influencing factors analysis based on robustness analysis and the BP-DEMALTE model: A case study of the Pearl River Delta urban agglomeration", *Ecological Indicators*, 101, pp. 595–602.
- Lindén, L., Riikonen, A., Setälä, H., Yli-Pelkonen, V. (2020). "Quantifying carbon stocks in urban parks under cold climate conditions", *urban forestry and Urban Greening*, Vol 49. P. 126633.
- Mahmoudi, E., & Mahdavi, M., & Javadi, M. (2013). "Soil carbon sequestration potential of land use types of the ecosystem (Case study: Maydan Watershed, Esfarayen, Northern Khorasan)". *Natural Ecosystems of Iran*, 3(3), pp. 100-113. (In Persian).
- McGarigal K, Cushman SA, Ene E. (2012). FRAGSTATS v4: spatial pattern analysis program for categorical and continuous maps. University of Massachusetts, Amherst.
- MEA [Millennium Ecosystem Assessment]. (2005). *Ecosystems and Human Well-being: Synthesis*. Island Press, Washington, DC.
- 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.
- Mohaqqeq, M., Mobarghei Dinan, N., Vafaeinejad, A., sobhan ardakani, S., Monavvari, S. (2020). "Investigating the changes of the sazandan canopy ecosystems using the landmarks and carbon mapping of Tehran", *Journal of Environmental Studies*, 46(1), pp. 1-18. (In Persian).
- Muñoz-Vallés, S., Cambrollé, J., Figueroa-Luque, E., Luque, T. Luque, Niell, F.X., Figueroa, M. E (2013). "An approach to the evaluation and management of natural carbon sinks: From plant species to urban green systems", *Urban forestry & urban greening*, 12, pp. 450-453.
- Nowak, D.J., Crane, D.E. (2002). "Carbon storage and sequestration by urban trees in the USA", *Environmental Pollution*, 116(3), pp. 381-389.
- Ongsomwang, S., Pattanakiat, S., Srisuwan, A. (2019). "Impact of Land Use and Land Cover Change on Ecosystem Service Values: A Case Study of Khon Kaen City, Thailand", *Environment and Natural Resources Journal*, 17, pp. 43-58.
- Paloheimo, E., Salmi, O. (2013). "Evaluating the Carbon Emissions of the Low Carbon City: A Novel Approach for Consumer Based Allocation", *Cities*, 30, pp. 233–239.
- Ruckelshaus, M., McKenzie, E., Tallis, H. (2015). "Notes from the field: lessons learned from using ecosystem service approaches to inform real-world decisions", *Ecological Economics*, 115, pp. 2-11.
- Sadat, M., Zoghi, M., Malekmohammadi, B. (2020). "Spatiotemporal modelling of urban land cover changes and carbon storage ecosystem services: case study in Qaem Shahr County, Iran", *Environment, Development and Sustainability*, 22, pp. 8135-8158.
- Sajjadi Ghaemmaghami, S., Sayahnia, R., Mobarghei Dinan, N., Makhdom Farkhondeh, M. (2021). "Evaluating the implications of urban growth on carbon fixation ecosystem services (Case study: Karaj Subcatchments)", *Journal of RS and GIS for Natural*

- Resources*, 12(1), pp. 20-37. (In Persian).
- Samadi, A., Mousavi, Y., Azkia, M. (2020). "Sociological and Physical Analysis of Urban Public Spaces (Case Study: Tehran City) ", *Sustainable city*, 2(4), pp. 101-114. (In Persian).
- Solomon, N., Pabi, O., Annang, T., Asante, I. K., & Birhane, E. (2018). "The effects of land cover change on carbon stock dynamics in a dry Afromontane forest in northern Ethiopia", *Carbon Balance Manage*, 13, p. 14.
- Staddon, C., Ward, S., De Vito, L., Zuniga-Teran, A., Gerlak, A. K., Schoeman, y., Hart, A., Booth, G. (2018). "Contributions of green infrastructure to enhancing urban resilience", *Environment Systems and Decisions*, 38, pp. 330–338.
- Statistics Center of Iran (2015). Demographic, social and economic characteristics of the 22 districts of Tehran in the 2011 and 2016 censuses, the presidency, the country's program and budget organization. (In Persian).
- Sun X, X., Yang G, S., Ou W, X., Xu X, B. (2014). "Impacts of Cropland Change on Ecosystem Services in the Taihu Lake Basin", *Journal of Natural Resources*, 29, pp. 1675-1685.
- Teferi, E., Uhlenbrook, S., Bewket, W., Wenninger, J., 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), pp. 2415-2428.
- Vahedian Beiki, L., Pourahmad, A., Seifolddini, F. (2012). "Effect of physical development of Tehran city in chance of land use in region 5", *Journal of human Geography*, 4(1), PP. 29-46. (In Persian).
- Wang, X., Mell, I. (2019). "Evaluating the challenges of eco-city development in China: a comparison of Tianjin and Dongtan eco-cities", *International Development Planning Review*, 41(2), PP. 215-242.
- Yan, Y., Zhang, C., Hu, Y., Kuang, W. (2016). "Urban Land-Cover Change and Its Impact on the Ecosystem Carbon Storage in a Dryland City", *Remote Sensing*. 8(1):6, PP. 1-18.
- Zhang, C., Tian, H., Chen, G., Chappelka, A., Xu, X., Ren, W., et al. (2012). "Impacts of urbanization on carbon balance in terrestrial ecosystems of the Southern United States". *Environmental Pollution*, 164, PP. 89–101.
- Zhang, F., Xu, N., Wang, C., Wu, F., Chu, X. (2020). "Effects of land use and land cover change on carbon sequestration and adaptive management in Shanghai, China". *Physics and Chemistry of the Earth*, 120, p.102948.