

مقاله علمی پژوهشی

آشکارسازی و تحلیل منطقه‌ای تغییرات پوشش سبز شهری در مناطق ۲۲ گانه شهر تهران

مه‌ری روزبهانی^۱، *غلامرضا جانباز قبادی^۲، صدرالدین متوالی^۳، جلال عظیمی آملی^۴

۱. دانشجوی دکتری جغرافیا و برنامه ریزی شهری دانشگاه آزاداسلامی واحد نور.

۲. استادیار گروه جغرافیای دانشگاه آزاداسلامی واحد نور.

۳. دانشیار گروه جغرافیای دانشگاه آزاد اسلامی واحد نور.

۴. دانشیار گروه جغرافیای دانشگاه آزاداسلامی واحد نور.

تاریخ دریافت: ۱۳۹۹/۰۷/۱۷ تاریخ پذیرش: ۱۳۹۹/۱۰/۰۹

Detection and District Analysis of Urban Green Space Changes in The 22 Districts of Tehran

Mehri Roozbahani¹, *Gholamreza Janbaz Ghobadi², Sadroddin Motevalli³, Jalal Azimi Amoli⁴

1. PhD Student of Geography and Urban Planning, Islamic Azad University, Nour Branch.

2. Assistant prof. Department of Geography, Islamic Azad University, Nour Branch.

3. Associate prof. Department of Geography, Islamic Azad University, Nour Branch.

4. Associate prof. Department of Geography, Islamic Azad University, Nour Branch.

Received: 2020/10/08

Accepted: 2020/12/29

Abstract

The main aim of this paper is to detect the ten-year changes in urban green spaces of Tehran metropolis, from 2010 to 2019, using the time series of Landsat 5, 7 and 8 images. The change detection was done in both annual and ten-year scale and the results are analyzed in two spatial scales; City level and municipal district-level. Detection of changes was done by a post-classification approach. The innovation of the study is efforts to reach the best results in the image classification step, for which in addition to optical and thermal bands various features including some vegetation indices, water and built-up index, image texture components, and principal components were used. Three classification methods including maximum likelihood, artificial neural network and support vector machine were implemented. The results indicated that the support vector machine has had the best result with 91.06% mean overall accuracy. The change detection showed a 10.58% decrease in the Tehran green spaces in the period under review. The greatest decrease, about 7.46 Km², occurred in the period 1390-91 and the largest increase was 7.61 Km² in the period 1394-95. Among the 22 municipal districts, regions 1 and 22 with 5.2 and 2.37 Km², respectively, have had the highest decrease in urban green space, and regions 2 and 19 with 0.5 and 0.47 Km², respectively, have had the highest increase.

Keywords

Urban green space, Change detection, Tehran.

چکیده

هدف اصلی این پژوهش آشکارسازی تغییرات ده ساله پوشش سبز کلانشهر تهران از سال ۱۳۸۹ تا ۱۳۹۸ با استفاده از سری زمانی تصاویر ماهواره‌های لندست ۵، ۷ و ۸ می‌باشد. آشکارسازی تغییرات در دو مقیاس زمانی سالانه و ده ساله انجام و تحلیل نتایج، هم در سطح کلانشهر تهران و هم به تفکیک مناطق ۲۲ گانه آن صورت پذیرفت. آشکارسازی تغییرات با رویکرد پس از طبقه‌بندی انجام شد. نوآوری این تحقیق شامل تلاش‌ها برای اخذ بهترین نتیجه در مرحله طبقه‌بندی تصاویر است که در این راستا علاوه بر باندهای اپتیکی و حرارتی، از ویژگی‌های مختلفی شامل شاخص‌های مختلف گیاهی، آب و مناطق ساخته شده، مولفه‌های بافت تصویر و مولفه‌های اصلی استفاده شد. سه روش طبقه‌بندی بیشترین شباهت، شبکه عصبی مصنوعی و ماشین بردار پشتیبان پیاده‌سازی شدند. مقایسه نتایج نشان داد که روش ماشین بردار پشتیبان با میانگین دقت کل ۹۱/۰۶ درصد نتایج بهتری داشته است. آشکارسازی تغییرات حاکی از کاهش ۱۰/۵۸ درصدی پوشش سبز در دوره مورد بررسی است. بیشترین کاهش پوشش سبز به میزان ۷/۴۶ کیلومتر مربع در دوره ۹۱-۱۳۹۰ اتفاق افتاد و بیشترین افزایش در دوره ۹۵-۱۳۹۴ به اندازه ۷/۶۱ کیلومتر مربع بوده است. مناطق یک و ۲۲ به ترتیب با ۵/۲ و ۲/۳۷ کیلومتر مربع بیشترین میزان کاهش و مناطق ۲ و ۱۹ نیز به ترتیب با ۰/۵ و ۰/۴۷ کیلومتر مربع بیشترین افزایش در پوشش سبز شهری را در بین مناطق داشته‌اند.

واژگان کلیدی

پوشش سبز شهری، آشکارسازی تغییرات، تهران

Email: gghobadi@yahoo.com

*Corresponding Author: Gholamreza Janbaz Ghobadi

* نویسنده مسئول: غلامرضا جانباز قبادی

مقدمه

توسعه شهرنشینی در دهه‌های اخیر باعث رشد ناهمگون شهری و ایجاد ناهماهنگی‌هایی در چگونگی استفاده از زمین‌های شهری شده است. از مهمترین آثار عدم استفاده صحیح و مناسب از زمین‌های شهری تخریب و تغییر کاربری فضاها و پوشش سبز شهری است که تاثیر مخربی بر سیما و عملکرد شهر دارد. فضاها و پوشش سبز وظایف مختلفی در عملکرد یک شهر به عهده دارند، به عنوان مثال؛ آنها ریه‌های تنفسی شهر محسوب می‌شوند که با انجام فتوسنتز نقش کلیدی در کاهش آلودگی‌ها و تلطیف هوا دارند. با توجه به همبستگی منفی پوشش گیاهی با حرارت سطح زمین^۱ (LST)، یکی دیگر از عملکردهای مهم فضاها و پوشش سبز نقش کاهنده آن در وسعت و شدت جزایر حرارتی است. همچنین آنها به عنوان یک تفرجگاه نقش بسزایی را در ارتقاء سطح بهداشت روانی شهروندان یک شهر و نیز زیباسازی منظر شهری ایفا می‌نمایند. با توجه به تاثیر این فضاها در کاهش رواناب‌های سطحی، گسترش فضاها سبز همچنین یک راهکار مناسب در مدیریت سیلاب‌های شهری تلقی می‌شود. بنابراین برخورداری هر چه مناسبتر یک شهر از فضاها و پوشش سبز، به عنوان یکی از شاخص‌های زیست محیطی در توسعه پایدار در محیط‌های شهری بسیار حائز اهمیت می‌باشد.

شهر تهران در دهه‌های اخیر شاهد رشد روزافزون جمعیت بوده و به تبع آن توسعه فیزیکی و تغییرات کالبدی اساسی را تجربه کرده است. بسیاری از این تغییرات به دلیل عدم توجه لازم به مفهوم توسعه پایدار، تخریب و اختلال در عملکرد فضاها و پوشش سبز شهری را در پی داشته‌اند. آشکارسازی تغییراتی که در گذر زمان در فضاها و پوشش سبز کلانشهر تهران اتفاق افتاده و نیز تحلیل چگونگی و چرایی آن در سطح شهر و در سطح مناطق ۲۲گانه، اطلاعات ارزشمندی را برای مدیران شهری جهت بررسی دقیق علل و شناسایی عوامل ایجاد این تغییرات نامطلوب فراهم می‌آورد. بدیهی است که این مطالعات گام مهمی در راستای مناسب‌سازی تصمیم‌گیری‌های آتی و مدیریت بهینه شهری خواهد بود. تکنولوژی سنجنش از دور با فراهم آوردن امکانات منحصربفرد از قبیل دید وسیع منطقه‌ای، اخذ تصاویر متناوب زمانی، ارائه تصاویر با تنوع طیفی حتی فرا از محدوده بینایی انسان و در اختیار گذاشتن طیف وسیعی از تکنیک‌های پردازشی، به ابزاری توانمند برای مطالعات مختلف شهری از جمله مطالعه پوشش سبز شهری تبدیل شده است که استفاده از آن در سال‌های اخیر هدف مطالعات متعددی از سوی دانشمندان حوزه مطالعات شهری بوده است.

هدف اصلی پژوهش حاضر آشکارسازی تغییرات ده ساله پوشش سبز کلانشهر تهران از سال ۱۳۸۹ تا سال ۱۳۹۸ می‌باشد. در این راستا از سری زمانی تصاویر ماهواره لندست استفاده می‌گردد. به منظور بررسی دقیق‌تر این تغییرات و فراهم آوردن امکان کشف چرایی اتفاق افتادن آنها، آشکارسازی تغییرات علاوه بر اینکه در مقیاس شهر تهران انجام می‌شود، به تفکیک مناطق ۲۲ گانه شهرداری تهران نیز صورت می‌پذیرد. رویکرد مورد استفاده جهت آشکارسازی تغییرات رویکرد پس از طبقه‌بندی^۲ است و طبقه‌بندی کننده‌های بیشترین شباهت^۳، شبکه عصبی مصنوعی^۴ و ماشین بردار پشتیبان^۵ استفاده و نتایج آنها با هم مقایسه می‌شوند. نوآوری این تحقیق شامل اقداماتی است که برای اخذ بهترین نتیجه در مرحله طبقه‌بندی تصاویر انجام می‌شوند. این اقدامات شامل استفاده از ویژگی‌های مختلفی شامل شاخص‌های مختلف گیاهی، آب و مناطق ساخته شده، مولفه‌های بافت تصویر و مولفه‌های اصلی در کنار باندهای اپتیکی و حرارتی سنجنده‌های ماهواره‌های مورد است. همچنین از دو معیار جفری-ماتوسیتا^۶ و واگرایی تبدیل یافته^۷ جهت پالایش نمونه‌های آموزشی استفاده می‌شود.

مبانی نظری

چارچوب نظری

از زمان ظهور فناوری تصویربرداری فضایی تحقیقات متعددی در زمینه آشکارسازی تغییرات بویژه تغییرات در کاربری اراضی در محیط‌های شهری در مناطق مختلفی از دنیا انجام شده است (Angelici et al., 1977:217; Ellefsen; Peruzzi, 1976: 11; Friedman; Angelici, 1979: 58; Gordon, 1980: 189; Rubec; Thie, 1978: 136; Toll et al., 1981: 1;

1. Land surface temperature
2. Post classification
3. Maximum likelihood
4. Artificial Neural Network
5. Support Vector Machines
6. Jeffri-Matusita
7. Transformed divergence

Wilson et al., 1976: 79). در این راستا تکنیک‌های مختلفی نیز مورد استفاده قرار گرفته‌اند. سینگ^۸ (۱۹۸۹) مروری بر روش‌های آشکارسازی تغییرات ارائه کرده و معایب و مزایای هر یک را بررسی نموده است. روش‌های معرفی شده در این تحقیق را می‌توان به دو رویکرد کلی اختلاف تصاویر و مقایسه پس از طبقه‌بندی دسته‌بندی کرد. در رویکرد اختلاف تصاویر می‌توان از تصاویر اصلی ماهواره‌ای (Al-Dail, 1998: 217; Toll et al., 1981: 1)، تصاویر نسبت‌گیری (Ahmad et al., 2014: 2743; Todd, 1977: 529; Wilson et al., 1976: 79)، تصاویر شاخص‌های مختلف گیاهی (Byrne, Crapper; Mayo, 1980: 1) و تصاویر مولفه‌های اصلی (Angelici et al., 1977:217; Shahabi et al., 2012: 1) (Deng et al., 2019: 1230; Shahabi et al., 2012: 175) جهت محاسبه اختلاف تصاویر استفاده نمود. مسئله اساسی در این رویکرد تعیین محل آستانه تغییر در هیستوگرام تصویر اختلافات است. در مقابل، مزیت رویکرد پس از طبقه‌بندی کاهش مشکل نرمال‌سازی تصاویر به خاطر اثر تفاوت در اتمسفر در تاریخ‌های مورد بررسی و نیز متفاوت بودن سنجنده‌های مورد استفاده است. البته این رویکرد نیز با مشکل دقت طبقه‌بندی مواجه است. بدین ترتیب که در فرایند آشکارسازی تغییرات، خطای موجود در هر یک از طبقه‌بندی‌ها در خطای دیگری ضرب می‌شود. به عنوان مثال اگر معیار دقت کلی در هر یک از دو طبقه‌بندی ۸۰ درصد باشد، نرخ دقت در آشکارسازی تغییرات فقط می‌تواند ۶۴ درصد باشد (Singh 1989: 992-996). راه حل کاهش این مشکل استفاده از ویژگی‌های مناسب و تکنیک‌های طبقه‌بندی پیشرفته جهت افزایش دقت در فرایند طبقه‌بندی است. در ادامه دو رویکرد مذکور معرفی می‌شوند:

رویکرد مقایسه پس از طبقه‌بندی

در این روش به صورت مجزا تصاویر چند زمانه به نقشه‌های موضوعی، طبقه‌بندی می‌شود و سپس روش‌هایی از قبیل مقایسه طبقه‌بندی، تفاضل نقشه و آمار تعیین تغییرات جهت پایش تغییر استفاده می‌گردد. روش مقایسه پس از طبقه‌بندی جزء روش‌های طبقه‌بندی است. ویژگی این روش این است که آثار جوی، سنجنده و زیست محیطی بین تصاویر چند زمانه را به حداقل می‌رساند و یک ماتریس کامل از اطلاعات تغییر را فراهم می‌کند. اما معایب آن این است که نیازمند وقت و تخصص زیاد برای ایجاد طبقه‌بندی می‌باشد (آرخی و همکاران، ۱۳۹۰: ۸۵).

رویکرد تفاضل تصاویر

در این روش بر اساس رابطه (۱) ارزش‌های رقومی تصویر در تاریخ دوم از ارزش‌های رقومی تصویر در تاریخ اول کم می‌شود. این فرآیند به صورت پیکسل به پیکسل است. نتیجه این روش تولید تصویری است که در آن مقادیر مثبت و منفی نشان دهنده مناطق تغییر یافته و مقدار صفر نشان دهنده عدم تغییر بین دو تاریخ است (آرخی و همکاران، ۱۳۹۰: ۸۴).

$$D_x = x(t_2) - x(t_1) + C \quad (1)$$

در رابطه فوق x ارزش پیکسل، t_1 تاریخ اول، t_2 تاریخ دوم و C عدد ثابت است ما در این تحقیق از رویکرد پس از طبقه‌بندی با هدف آشکارسازی تغییرات پوشش سبز شهری شهر تهران استفاده کرده‌ایم.

پیشینه تجربی

نیلکمال^۹ و همکاران (۲۰۲۰) با تلفیق^{۱۰} قدرت تفکیک طیفی بالای تصاویر مودیس^{۱۱} و قدرت تفکیک مکانی بالای لندست در کنار بهره‌گیری از طبقه‌بندی کننده پیشرفته ماشین بردار پشتیبان به آشکارسازی تغییرات فضای سبز شهری در کلانشهر بمبئی هند پرداختند که نتایج حاکی از ۵۰ درصد کاهش فضای سبز شهری از سال ۲۰۰۵ تا ۲۰۱۹ است (Nilkamal et al., 2020: 1). دونگ^{۱۲} و همکاران (۲۰۱۸) با استفاده از تصاویر ماهواره لندست به بررسی تغییرات فضایی و زمانی پوشش سبز شهر چانگچون^{۱۳} چین از سال ۲۰۰۶ تا ۲۰۱۷ پرداختند (Dong et al., 2018: 295). این مطالعه نشان داد کاهش بیش از ۲۷ درصدی در شاخص اختلافات

8. Singh

9. Nilkamal

10. Fusion

11. MODIS

12. Dong

13. Changchun

نرمال شده گیاهی در طی دوره مورد بررسی حاکی از کاهش قابل توجه پوشش سبز در شهر چانگچون است به نحوی که پوشش سبز شهری در سال ۲۰۱۱ به کمترین مقدار رسیده است. در پژوهشی که توسط وان^{۱۴} و همکاران (۲۰۱۷) در شهر نهاترانگ^{۱۵} در مرکز ویتنام انجام گردید با استفاده از تصاویر دو ماهواره لندست و ALOS^{۱۶} و روش طبقه‌بندی بیشترین شباهت طبقه‌بندی مشخص شد فضای سبز شهری طی سال‌های ۲۰۰۷ تا ۲۰۱۷ به طور چشمگیری کاهش یافته است (Van et al., 2017: 1). کوپه‌کا^{۱۷} و همکاران (۲۰۱۷) تصاویر سنتینل-۱^{۱۸} را برای تحلیل فضای سبز شهری در سه شهر براتیسلاوا^{۱۹}، زیلینا^{۲۰} و ترناوا^{۲۱} در کشور اسلواکی به کار گرفتند (Kopecká et al., 2017: 1). روش طبقه‌بندی بیشترین شباهت در این تحقیق استفاده شده است.

در ایران نیز آشکارسازی تغییرات پوشش سبز شهری در شهرهای مختلف کشور هدف مطالعات متعددی بوده است. مرصوصی و رشوند (۱۳۹۶) در پژوهشی با عنوان «تحلیل روند تغییرات دوره‌های فضای سبز شهری زنجان از ۱۳۸۵ تا ۱۳۹۰ و ارائه الگوی مکانیابی بهینه آن» با استفاده از شاخص گیاهی NDVI^{۲۲} محاسبه شده از تصاویر ماهواره لندست روند تغییرات کیفی فضای سبز شهر زنجان از سال ۱۳۸۵ تا ۱۳۹۰ بر اساس مدل LCM^{۲۳} و تغییرات کمی آن با مقایسه دودویی محاسبه شد. نتایج این مطالعه نشان داد که سرانه فضای سبز زنجان در سال ۱۳۸۵ از ۳۴/۶۴ مترمربع به ۱۲/۴۶ مترمربع در سال ۱۳۹۰ کاهش یافته است.

سرودی و جوزی (۱۳۹۵) در تحقیقی با عنوان «بررسی تغییرات کیفی فضای سبز شهر تهران از سال ۱۳۶۹ تا ۱۳۸۵ (مطالعه موردی: منطقه ۵ شهرداری تهران)» با هدف بررسی تغییرات کیفی پوشش گیاهی منطقه ۵ شهرداری تهران، از شاخص NDVI و تصاویر لندست و IRS^{۲۴} متعلق به سال‌های ۱۳۶۹ و ۱۳۸۵ استفاده کرده و نقشه‌های پوشش گیاهی منطقه با درجه سرسبزی ضعیف، متوسط و خوب را تهیه کردند. نتایج به دست آمده نشان داد که در بازه زمانی مورد مطالعه از وسعت اراضی تحت پوشش گیاهان با درجه سرسبزی متوسط و خوب به ترتیب به میزان ۲۷/۶۸ و ۲۲/۳۳ هکتار کاسته و بر وسعت اراضی تحت پوشش گیاهان با درجه سرسبزی ضعیف به میزان ۴۳/۳ هکتار افزوده شده است. همچنین در این بازه زمانی ۴۸/۱۸ و ۹ هکتار از وسعت اراضی بدون پوشش گیاهی به ترتیب به اراضی تحت پوشش با درجه سرسبزی ضعیف و متوسط تبدیل شده است. این در حالی است که به ترتیب ۵۸/۴۲، ۸۶/۱۷ هکتار از اراضی تحت پوشش گیاهی با درجه سرسبزی ضعیف و متوسط به اراضی فاقد پوشش تبدیل شده‌اند (سرودی و جوزی، ۱۳۹۵: ۳۳۵).

در پژوهش امیدوار و همکاران (۱۳۹۴) با عنوان «آشکارسازی تغییرات کاربری اراضی و پوشش گیاهی در شهر یاسوج با استفاده از سنجش از دور» به بررسی تغییرات کاربری اراضی شهر یاسوج از سال ۱۳۶۵ تا سال ۱۳۸۹ پرداختند (امیدوار و همکاران، ۱۳۹۴: ۱۱۱). نتایج این پژوهشگران نشان داد که در سال ۱۳۶۵ مساحت فضای سبز ۲/۱۵ کیلومتر مربع بوده است ولی در سال ۱۳۸۹ به ۰/۶۶ کیلومتر مربع کاهش یافته است.

اسماعیل زاده و شفیع ثابت (۱۳۹۲) در تحقیقی با عنوان «بررسی تغییرات کاربری اراضی و ناپایداری در اکوسیستم شمال تهران (مطالعه موردی: حوضه آبخیز درکه-ولنجک)» به بررسی تغییرات کاربری اراضی و ناپایداری در اکوسیستم شمال تهران حوضه درکه و ولنجک پرداختند (اسماعیل زاده و شفیع ثابت، ۱۳۹۲: ۸۳). نتایج آنها نشان داد که از سال ۱۳۶۶ تا سال ۱۳۸۸، پوشش گیاهی در منطقه مورد مطالعاتی روندی کاهشی داشته و در مقابل بر محدوده‌های ساخته شده، شبکه معابر و اراضی بایر افزوده شده است. نتایج این پژوهشگران دلالت بر آن داشت که در سال ۱۳۶۶ بیش از ۳۷ درصد منطقه به پوشش گیاهی اختصاص داشته و در سال ۱۳۸۸، به ۱۴/۵ درصد کاهش یافته است. این پژوهشگران به منظور تعیین علل تغییرات اتفاق افتاده در منطقه مورد مطالعه با شناسایی سازمان‌های فعال در حوضه اکوسیستم شهری به بررسی قوانین و مقررات و سیاست‌های شهرسازی پرداختند و نتیجه گرفتند که اگر چه غالب قوانین و مقررات بر حفظ منابع طبیعی تاکید دارند، اما در برخی موارد وجود آیین‌نامه‌هایی از جمله کمیسیون ماده ۱۰۰ شهرداری‌ها می‌تواند تخریب گسترده اکوسیستم‌ها را به دنبال داشته باشد.

14. Van

15. Nha Trang

16. Advanced Land Observation Satellite

17. Kopecká

18. Sentinel-2

19. Bratislava

20. Žilina

21. Trnava

22. Normalized Difference Vegetation Index

23. Land Change Modeler

24. Indian Remote Sensing Satellites

شهابی و همکاران (۲۰۱۲) در تحقیقی با عنوان «کاربرد تصاویر ماهواره‌ای و سیستم اطلاعات جغرافیایی در ارزیابی توزیع فضای سبز در محیط شهری (مطالعه موردی: شهر بوکان)» سه روش مختلف آشکارسازی تغییرات شامل مقایسه شاخص اختلافات نرمال شده گیاهی، آنالیز مولفه‌های اصلی و پس از طبقه‌بندی را برای بررسی تغییرات پوشش سبز شهر بوکان به کار گرفتند. روش مورد استفاده جهت طبقه‌بندی تصاویر تکنیک بیشترین شباهت و تصاویر مورد استفاده نیز مربوط به ماهواره لندست بود. در این بررسی نشان داده شده فضای سبز شهری در شهر بوکان از ۴۹۰ هکتار در سال ۱۹۹۱ به ۲۱۶/۳ هکتار در سال ۲۰۰۳ کاهش یافته است (Shahabi et al., 2012: 1).

رافعی و همکاران (۲۰۰۹) در تحقیقی با عنوان «ارزیابی تغییرات فضای سبز شهری مشهد با استفاده از تصاویر ماهواره‌ای» از رویکرد پس از طبقه‌بندی با طبقه‌بندی کننده بیشترین شباهت برای آشکارسازی تغییرات فضاهای سبز شهری شهر مشهد در طول سال‌های ۱۹۸۷ تا ۲۰۰۶ استفاده کردند. تصاویر به کار گرفته شده در این تحقیق شامل تصاویر ماهواره‌های لندست و آی آر اس بود. نتایج تحقیق بیانگر کاهش چشمگیر و همزمان چندپارگی در فضاهای سبز شهر مشهد در دوره مورد بررسی بود (Rafiee et al., 2009: 431).

نظم‌فر و همکاران (۱۳۸۷) در پژوهشی با عنوان «کاربرد داده‌های سنجش از دور در آشکارسازی تغییرات کاربری‌های اراضی شهری (مطالعه موردی فضای سبز شهر تبریز)» با استفاده از طبقه‌بندی تصاویر ماهواره‌ای لندست و اسپات با استفاده از یک روش شیء‌گرا به آشکارسازی تغییرات کاربری اراضی شهری در شهر تبریز پرداختند که نتایج حاکی از کاهش ۴۶ درصدی فضاهای سبز شهری در طی دوره ۱۶ ساله ۱۳۶۸ تا ۱۳۸۴ است (نظم‌فر و همکاران، ۱۳۸۷: ۱۷).

روش انجام پژوهش

این پژوهش از نوع کاربردی است و روش آن به صورت تحلیلی می‌باشد که در آن از سری زمانی تصاویر ماهواره لندست برای آشکارسازی تغییرات ده ساله پوشش سبز کلانشهر تهران از سال ۱۳۸۹ تا ۱۳۹۸ استفاده شده است. به منظور آشکارسازی تغییرات از رویکرد پس از طبقه‌بندی استفاده شد. مراحل پیاده‌سازی روش پیشنهادی جهت آشکارسازی تغییرات پوشش گیاهی شهری بدین ترتیب است که ابتدا پس از انجام پیش پردازش‌ها شامل کالیبراسیون، تصحیحات اتمسفری، کاهش نویز تصاویر و حذف خطای SLC-off، تصاویر برای انجام طبقه‌بندی آماده شدند. برای رسیدن به بهترین نتایج طبقه‌بندی علاوه بر باندهای اپتیکی از تصاویر حرارتی ماهواره لندست و نیز از ویژگی‌های مختلفی شامل شاخص‌های مختلف گیاهی، آب و مناطق ساخته شده، مولفه‌های بافت تصویر و مولفه‌های اصلی استفاده شد. به منظور ارتقاء کیفیت نمونه‌های آموزشی که در فرآیند آموزش طبقه‌بندی کننده مورد استفاده قرار می‌گیرند، تفکیک‌پذیری طیفی نمونه‌ها توسط دو معیار جفری-ماتوسیتا و واگرایی تبدیل یافته بررسی و در نهایت نمونه‌های آموزشی بکار گرفته شده پالایش شدند.

پس از تهیه ویژگی‌های ورودی طبقه‌بندی و آماده‌سازی نمونه‌های آموزشی نهایی، سه روش طبقه‌بندی بیشترین شباهت، شبکه عصبی مصنوعی و ماشین بردار پشتیبان پیاده‌سازی شدند. با انجام ارزیابی دقت نتایج این سه روش، نقشه خروجی روشی که بالاترین دقت را ارائه داده مشخص و برای آشکارسازی تغییرات مورد استفاده قرار گرفت. بدین صورت که نقشه‌های طبقه‌بندی شده زمان اولیه و زمان ثانویه با تکنیک جدول تقابل^{۲۵} پیکسل به پیکسل با هم مقایسه شده و پیکسل‌هایی که در طول این دوره زمانی دچار تغییر در کلاسی پوشش اراضی شده‌اند، مشخص شدند.

پیش پردازش‌ها

پس از دانلود و انتخاب مناسبترین تصاویر نسبت به انجام پیش پردازش‌های لازم شامل کالیبراسیون، تصحیحات اتمسفری و کاهش نویز تصاویر اقدام شد. برای پر کردن فضاهای خالی دندان‌های شکل ناشی از خطای^{۲۶} SLC-off از بسته نرم‌افزاری SLC corrector استفاده گردید. از آنجا که به روی تولیدات نوع Level IT تصاویر لندست بارگزاری شده در سایت USGS، تصحیحات هندسی انجام شده است، تصحیح هندسی بیشتری در این مطالعه صورت نپذیرفت. کالیبراسیون تصاویر با استفاده از ضرایب کالیبراسیون موجود در هدر فایل تصاویر و در محیط نرم‌افزار ENVI 5.3 انجام شد. با انجام این فرآیند تصویر رادیانس برای باندهای نوری و تصویر دمای روشنایی برای باندهای حرارتی حاصل شدند. تصاویر دمای روشنایی مستقیماً به عنوان یکی از ویژگی‌های ورودی وارد مرحله طبقه‌بندی شد. در مورد باندهای نوری، با انجام تصحیحات اتمسفری به روی تصویر رادیانس حاصل از کالیبراسیون، اثرات اتمسفر حذف و تصویر بازتابندگی زمینی بدست آمد.

25. Cross tabulation

26. Scan Line Corrector failure

تصحیحات اتمسفری با استفاده از ماژول FLAASH²⁷ در محیط نرم‌افزار ENVI 5.3 انجام گردید. در این پژوهش از روش مبتنی بر تبدیل PCA²⁸ برای حذف یا کاهش نویز موجود در تصاویر استفاده شد. در این روش ابتدا تصاویر با استفاده از تبدیل PCA به فضای مولفه‌های اصلی منتقل شده، سپس آخرین مولفه اصلی که حاوی نویز تصاویر است حذف و بقیه مولفه‌های اصلی با استفاده از معکوس تبدیل PCA مجدداً به فضای تصویر منتقل شدند.

تولید ویژگی

تولید ویژگی به هدف رسیدن به بهترین نتایج در طبقه‌بندی انجام پذیرفت. ویژگی‌های تولید شده در این بخش در کنار تصویر دمای روشنایی و تصاویر بازتابندگی زمینی حذف نویز شده وارد مرحله طبقه‌بندی شدند. با در نظر گرفتن مشخصات محیط‌های شهری و با تاکید بر خصوصیات فضاها و پوشش سبز شهری، پنج دسته ویژگی شامل شاخص‌های گیاهی، شاخص آب، شاخص مناطق ساخته شده، مولفه‌های تبدیل PCA و مولفه‌های بافت تصویر شامل میانگین، واریانس، همگنی، کنتراست و عدم شباهت مورد نظر بودند. شاخص گیاهی مورد استفاده در این تحقیق عبارت از شاخص اختلافات نرمال شده گیاهی (NDVI)، شاخص پوشش گیاهی بارزسازی شده²⁹ (EVI) شاخص پوشش گیاهی درصد مادون قرمز³⁰ (IPVI) شاخص سطح برگ³¹ (LAI)، شاخص پوشش گیاهی تعدیل شده برحسب خاک بهینه شده³² (OSAVI) و شاخص پوشش گیاهی مثلی اصلاح شده - بهبود یافته³³ (MTVI2) هستند. همچنین شاخص اختلاف نرمال شده آب بهبود یافته³⁴ (MNDWI) به عنوان شاخص آب و شاخص اختلاف نرمال شده مناطق ساخته شده³⁵ (NDBI) به عنوان شاخص مناطق ساخته شده استفاده شدند.

طبقه‌بندی تصاویر

پس از تهیه ویژگی‌های مورد نظر، گام بعدی طبقه‌بندی تصاویر بود. برای این منظور سه روش طبقه‌بندی بیشترین شباهت، ماشین بردار پشتیبان و شبکه عصبی مصنوعی به کار گرفته شده و نتایج آنها با هم مقایسه شدند. در طبقه‌بندی پنج کلاس پوشش گیاهی، مناطق ساختمان، جاده، خاک لخت و بنده‌های آبی که تشکیل دهنده عمده عناصر شهری هستند، مد نظر قرار گرفتند. نمونه‌های آموزشی اولیه برای آموزش طبقه‌بندی کننده‌های مورد استفاده بر اساس دستورالعمل معرفی شده در (Foody et al., 2006: 12) به تعداد ۱۰ تا ۳۰ برابر تعداد کلاس‌ها × تعداد ویژگی‌ها و توسط روش نمونه‌گیری تصادفی طبقه‌ای متناسب³⁶ از روی مجموعه داده واقعیت زمینی برداشت شدند. مزیت این روش بکار گرفته شده برای نمونه‌برداری تصادفی در این بود که نمونه‌های انتخاب شده در کل منطقه بطور یکنواخت پراکنده شدند و نیز تعداد نمونه‌های هر کلاس متناسب با وسعت آن کلاس در منطقه مورد بررسی بود. در ادامه تفکیک‌پذیری طیفی این نمونه‌های اولیه توسط دو معیار جفری-ماتوسیتا (J-M³⁷) و واگرایی تبدیل یافته³⁸ اندازه‌گیری شد. سپس با استفاده از ابزار n-D Visualizer در نرم‌افزار ENVI 5.3 نسبت به پالایش نمونه‌های آموزشی اولیه تا رسیدن به تفکیک‌پذیری مناسب، اقدام شد.

ارزیابی نتایج طبقه‌بندی

ارزیابی نتایج طبقه‌بندی از طریق مقایسه نقشه طبقه‌بندی شده با نقشه واقعیت زمینی و با تشکیل ماتریس ابهام انجام شد. معیارهای دقت کلی³⁹، ضریب کاپا⁴⁰، دقت تولیدکننده⁴¹ و دقت کاربر⁴² مد نظر بودند. داده‌های واقعیت زمینی بصورت دستی و با بهره‌گیری از نقشه‌های کاربری موجود از شهر تهران، تفسیر بصری تصاویر ماهواره‌ای و انجام بازدیدهای میدانی تهیه شدند. در این راستا از تصاویر ترکیب رنگی

27. Fast Line-of-sight Atmospheric Analysis of Spectral Hypercubes

28. Principal Component Analysis

29. Enhanced Vegetation Index

30. Infrared Percentage Vegetation Index

31. Leaf Area Index

32. Optimized Soil Adjusted Vegetation Index

33. Modified Triangular Vegetation Index - Improved

34. Modified Normalized Difference Water Index

35. Normalized Difference Build-up Index

36. Proportionate stratified random sampling

37. Jeffri-Matusita

38. Transformed divergence

39. Overall accuracy

40. Kappa coefficient

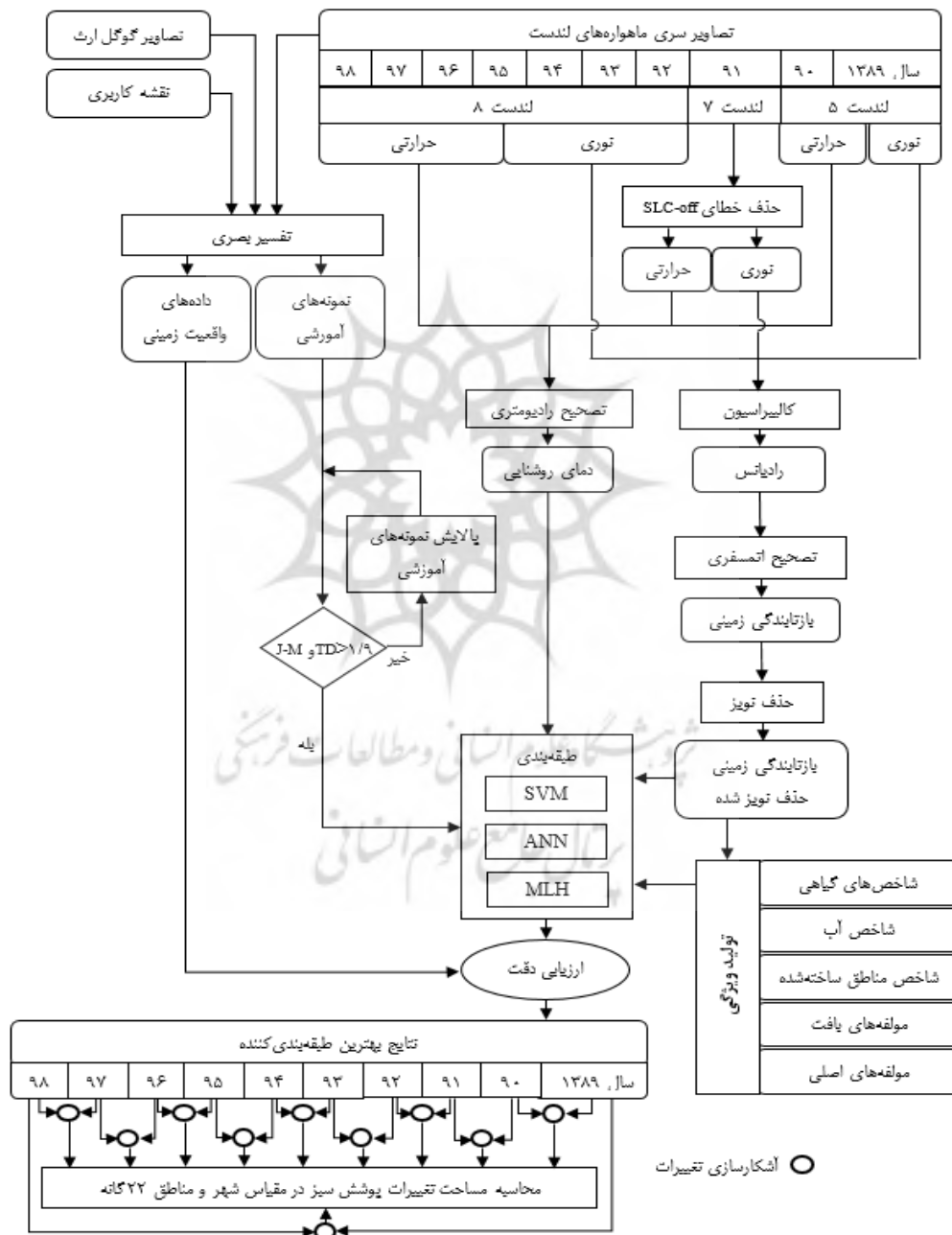
41. Producer accuracy

42. User accuracy

واقعی (RGB)، ترکیب رنگی کاذب مادون قرمز (NIR-R-G) که برای تشخیص پوشش گیاهی کارایی بالایی دارد، تصاویر پانکروماتیک^{۴۳} لندست با اندازه پیکسل ۱۵ متر و تصاویر ماهواره‌ای با قدرت تفکیک مکانی بالا موجود در آرشیو زمانی نرم‌افزار گوگل ارث^{۴۴} استفاده گردید.

آشکارسازی تغییرات

آشکارسازی تغییرات با رویکرد پس از طبقه‌بندی و با تکنیک جدول تقابل انجام شد. پس از مشخص شدن پیسکل‌های تغییر یافته از/ به کلاس پوشش سبز توسط تکنیک جدول تقابل با در نظر گرفتن اندازه پیکسل تصاویر، مساحت تغییرات رخ داده در این کلاس محاسبه شد. فلوجارت فرایند اجرای تحقیق در شکل ۱ آورده شده است.



شکل ۱. فلوجارت فرایند اجرای تحقیق

43. Panchromatic

44. Google earth

داده‌های مورد استفاده در این تحقیق شامل تصاویر ماهواره لندست، تصاویر ماهواره‌ای موجود در آرشیو زمانی نرم‌افزار گوگل ارث، نقشه‌های کاربری موجود برای شهر تهران و نقشه مرز شهر و مناطق ۲۲ گانه آن بودند. به منظور پوشش زمانی ده ساله (۱۳۸۹-۱۳۹۸) از سری زمانی تصاویر سری ماهواره‌های لندست شامل لندست ۵، لندست ۷ و لندست ۸ استفاده شده است. علت این انتخاب توان تفکیک مکانی متوسط (اندازه پیکسل ۳۰متر)، توان تفکیک زمانی ۱۶ روزه و توان تفکیک طیفی مناسب سنجنده‌های این سری ماهواره است که آنها را برای شناسایی محدوده‌های پوشش گیاهی در پهنه‌ای به وسعت کلانشهر تهران مناسب می‌سازد. بعلاوه تصاویر این ماهواره‌ها به طور رایگان در اختیار کاربران قرار دارد که کاهش چشمگیر هزینه‌های این گونه بررسی‌ها را به همراه دارد. بدیهی است که این امر به ویژه در انجام طرح‌های عملیاتی بسیار حائز اهمیت است.

در انتخاب تصاویر نهایی که به عنوان ورودی وارد مرحله پردازش می‌شوند، ملاحظات از قبیل فصل رویش گیاهی، پوشش ابر، بازه زمانی مأموریت ماهواره‌های مذکور و شرایط عملکردی آنها مد نظر بوده‌اند، که در ادامه توضیحاتی در این ارتباط ارائه می‌شود. با آنکه در شروع بازه زمانی مورد مطالعه در پژوهش حاضر ماهواره لندست ۷ مشغول به تصویربرداری بوده ولی به دلیل بروز خطای SLC-off از ۱۰ خرداد ۱۳۸۱ در تصاویر آن، در تحقیق حاضر تا سال ۱۳۹۰ از تصاویر لندست ۵ استفاده شد. با توجه به اینکه ماهواره لندست ۵ در سال ۱۳۹۱ با نقص عملکرد در چند زیرسیستم خود مواجه شد، در این سال به ناچار تصویر ماهواره لندست ۷ به کار گرفته شد. برای سال -های پس از آن یعنی از سال ۱۳۹۲ تا ۱۳۹۸ با عنایت به پرتاب ماهواره لندست ۸ در ۲۳ بهمن ۱۳۹۱، از تصاویر این ماهواره استفاده شد. از آنجا که هدف اصلی پژوهش مطالعه تغییرات رخ داده در پوشش سبز شهری است، توجه به فصل رویش در اخذ تصاویر اهمیت دارد و لازم است تصاویر مربوط به تاریخ‌هایی که درختان دارای برگ هستند، به کار گرفته شوند. لذا ابتدا تمام تصاویر ماهواره‌ای موجود در نیمه اول سال برای بازه زمانی ده ساله مورد مطالعه از سایت سازمان زمین شناسی آمریکا (USGS⁴⁵) دانلود شدند. در ادامه با در نظر گرفتن پوشش ابر، بهترین تصویر که فاقد پوشش ابر یا کمترین میزان آن بود، در ماه‌های تیر یا مرداد، برای هر سال انتخاب شد. در جدول ۱ تاریخ تصویربرداری، ماهواره و سنجنده برداشت کننده تصاویر منتخب آورده شده‌اند. ویژگی‌های مربوط به سنجنده‌های مورد استفاده در جدول ۲ ارائه شده است.

جدول ۱. تاریخ برداشت، ماهواره و سنجنده تصاویر مورد استفاده لندست

| شماره | تاریخ | ماهواره | سنجنده |
|-------|---------------|---------|---------------------------------------|
| ۱ | ۳۱ تیر ۱۳۸۹ | لندست ۵ | TM ⁴⁶ |
| ۲ | ۱۸ تیر ۱۳۹۰ | لندست ۵ | TM |
| ۳ | ۲۹ تیر ۱۳۹۱ | لندست ۷ | ETM ⁴⁷ |
| ۴ | ۲۳ تیر ۱۳۹۲ | لندست ۸ | OLI ⁴⁸ /TIRS ⁴⁹ |
| ۵ | ۱۱ مرداد ۱۳۹۳ | لندست ۸ | OLI/ TIRS |
| ۶ | ۱۴ مرداد ۱۳۹۴ | لندست ۸ | OLI/ TIRS |
| ۷ | ۱ مرداد ۱۳۹۵ | لندست ۸ | OLI/ TIRS |
| ۸ | ۳ مرداد ۱۳۹۶ | لندست ۸ | OLI/ TIRS |
| ۹ | ۶ مرداد ۱۳۹۷ | لندست ۸ | OLI/ TIRS |
| ۱۰ | ۹ مرداد ۱۳۹۸ | لندست ۸ | OLI/ TIRS |

45. United States Geological Survey

46. Thematic Mapper

47. Enhanced Thematic Mapper Plus

48. Operational Land Imager

49. Thermal Infrared Scanner

از تصاویر ماهواره‌ای موجود در آرشیو زمانی نرم‌افزار گوگل ارث و نقشه‌های کاربری موجود شهر تهران برای تهیه داده‌های واقعیت زمینی جهت ارزیابی نتایج طبقه‌بندی و نیز جمع‌آوری نمونه‌های آموزشی استفاده شد. محدوده مکانی مورد مطالعه در پژوهش، یعنی مرز کلانشهر تهران، و نیز مرز مناطق ۲۲گانه آن با استفاده از جدیدترین نقشه موجود در سایت شهرداری تهران استخراج گردید.

جدول ۲. ویژگی‌های سنجنده‌های سری ماهواره‌های لندست

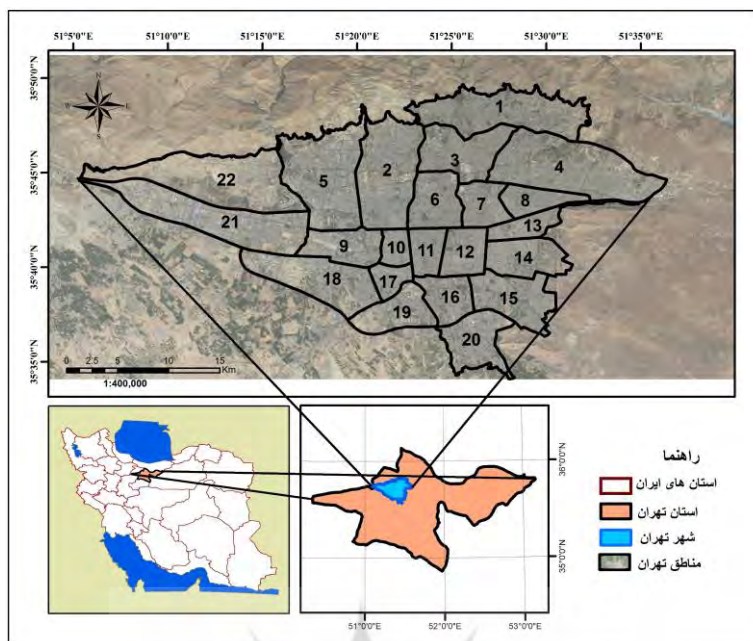
| اندازه پیکسل (m) | طول موج (میکرومتر) | محدوده طیف | باند | سنجنده | سال پرتاب | سری ماهواره |
|------------------|--------------------|----------------------|------|------------------|-----------|-------------|
| ۳۰ | ۰/۴۵ تا ۰/۵۲ | Blue | ۱ | TM | ۱۹۸۲ | لندست ۵ |
| ۳۰ | ۰/۶۰ تا ۰/۵۲ | Green | ۲ | | | |
| ۳۰ | ۰/۶۹ تا ۰/۶۰ | Red | ۳ | | | |
| ۳۰ | ۰/۹۰ تا ۰/۷۶ | NIR ⁵⁰ | ۴ | | | |
| ۳۰ | ۱/۷۵ تا ۱/۵۵ | SWIR ⁵¹ I | ۵ | | | |
| ۱۲۰ | ۱۰/۴ تا ۱۲/۳ | Thermal | ۶ | | | |
| ۳۰ | ۲/۳۵ تا ۲/۰۸ | SWIR II | ۷ | | | |
| ۳۰ | ۰/۴۵ تا ۰/۵۲ | Blue | ۱ | ETM ⁺ | ۱۹۹۹ | لندست ۷ |
| ۳۰ | ۰/۶۰ تا ۰/۵۲ | Green | ۲ | | | |
| ۳۰ | ۰/۶۹ تا ۰/۶۰ | Red | ۳ | | | |
| ۳۰ | ۰/۹۰ تا ۰/۷۶ | NIR | ۴ | | | |
| ۳۰ | ۱/۷۵ تا ۱/۵۵ | SWIR I | ۵ | | | |
| ۶۰ | ۱۰/۴ تا ۱۲/۳ | Thermal | ۶ | | | |
| ۳۰ | ۲/۳۵ تا ۲/۰۸ | SWIR II | ۷ | | | |
| ۱۵ | ۰/۹۰ تا ۰/۵۲ | Panchromatic | ۸ | OLI | ۲۰۱۳ | لندست ۸ |
| ۳۰ | ۰/۴۳۳ تا ۰/۴۳۵ | Costal aerosol | ۱ | | | |
| ۳۰ | ۰/۴۵۰ تا ۰/۵۱۵ | Blue | ۲ | | | |
| ۳۰ | ۰/۵۲۵ تا ۰/۶۰۰ | Green | ۳ | | | |
| ۳۰ | ۰/۶۳۰ تا ۰/۶۸۰ | Red | ۴ | | | |
| ۳۰ | ۰/۸۴۵ تا ۰/۸۸۵ | NIR | ۵ | | | |
| ۳۰ | ۱/۵۶ تا ۱/۶۶ | SWIR I | ۶ | | | |
| ۶۰ | ۲/۱۰ تا ۲/۳۰ | SWIR II | ۷ | | | |
| ۱۵ | ۰/۵۰ تا ۰/۶۸ | Panchromatic | ۸ | | | |
| ۳۰ | ۱/۳۶ تا ۱/۳۹ | Cirrus | ۹ | | | |
| ۱۰۰ | ۱۰/۳ تا ۱۱/۳ | Thermal I | ۱۰ | TIRS | | |
| ۱۰۰ | ۱۱/۵ تا ۱۲/۵ | Thermal II | ۱۱ | | | |

محدوده مورد مطالعه

شهر تهران، مرکز استان تهران و پایتخت ایران از لحاظ جغرافیایی در ۵۱ درجه و ۴ دقیقه تا ۵۱ درجه و ۳۳ دقیقه طول شرقی و ۳۵ درجه و ۳۵ دقیقه تا ۳۵ درجه و ۵۰ دقیقه عرض شمالی واقع شده است و ۷۳۰ کیلومتر مربع مساحت دارد. شهر تهران در ارتفاع حدود ۹۰۰ تا ۱۸۰۰ متری از سطح دریا قرار دارد. ارتفاع در میدان تجریش در شمال تهران حدود ۱۳۰۰ متر و در میدان راه‌آهن در جنوب شهر که با آن ۱۵ کیلومتر فاصله دارد، ۱۱۰۰ متر می‌باشد که به‌ازای هر کیلومتر مساحت ۱۳/۵ متر افت شیب ملاحظه می‌شود. شهر تهران از اطراف توسط ارتفاعاتی احاطه شده است. این ارتفاعات به مثابه دیواری بر روی جریان‌های اتمسفری و اقلیم محلی این شهر موثر واقع شده است. تهران دارای اقلیم نیمه‌خشک است. در بیشتر سال‌ها، فصل زمستان نیمی از کل بارش‌های سالانه‌ی تهران را تامین می‌کند و تابستان نیز کم باران‌ترین فصل در تهران است. از نظر اداری، تهران به ۲۲ منطقه و ۱۲۲ ناحیه‌ی شهری تقسیم شده است و بر اساس سرشماری عمومی نفوس و مسکن ۱۳۹۵، جمعیت شهر تهران در مناطق ۲۲گانه ۸۶۹۳۷۰۶ نفر است (درگاه ملی آمار، ۱۳۹۵). پراکندگی جمعیت براساس حوزه‌های آماري نشان‌دهنده بیشترین جمعیت در منطقه ۴ و کمترین جمعیت در منطقه ۹ است. موقعیت جغرافیایی شهر تهران و مناطق ۲۲گانه آن در شکل ۲ نشان داده شده است.

50. Near Infrared

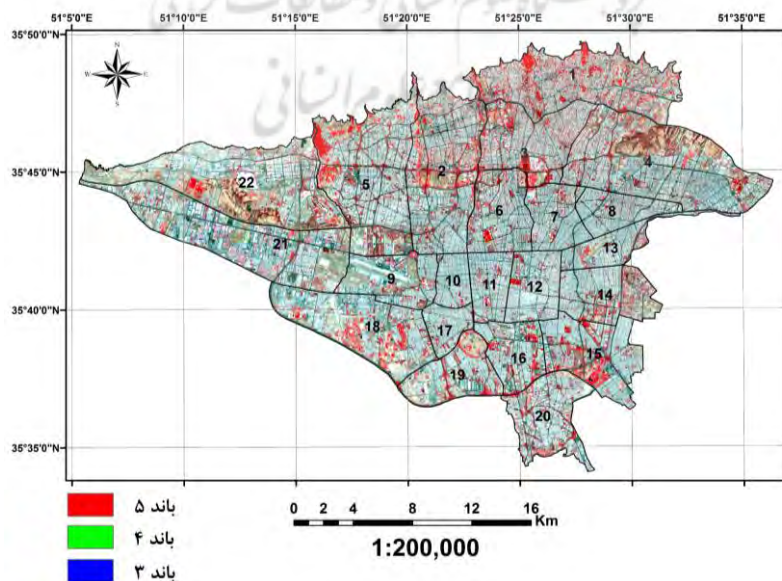
51. Short wave Infrared



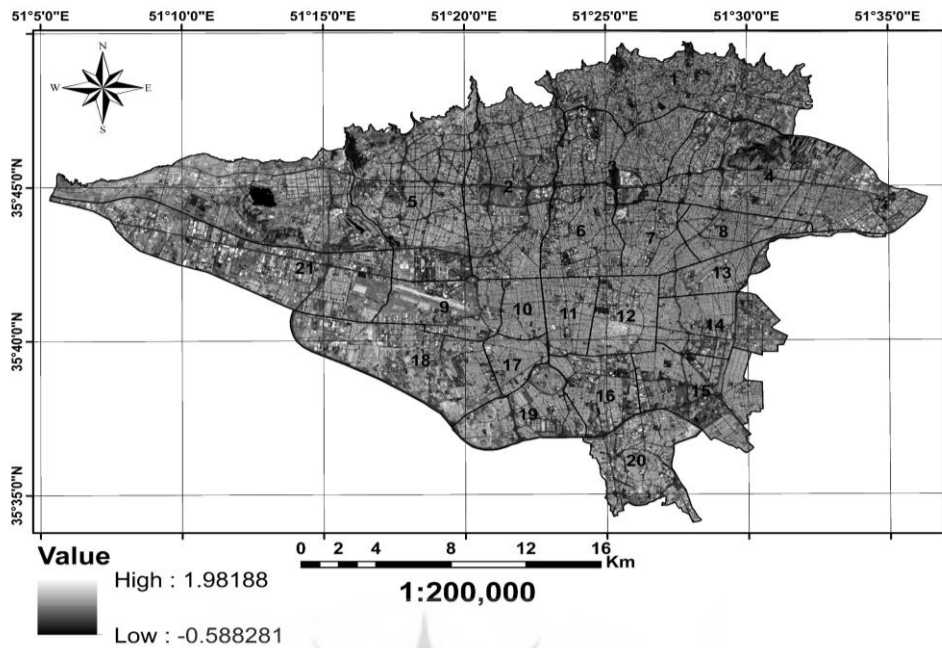
شکل ۲. نقشه موقعیت مناطق ۲۲ گانه شهر تهران

یافته‌ها

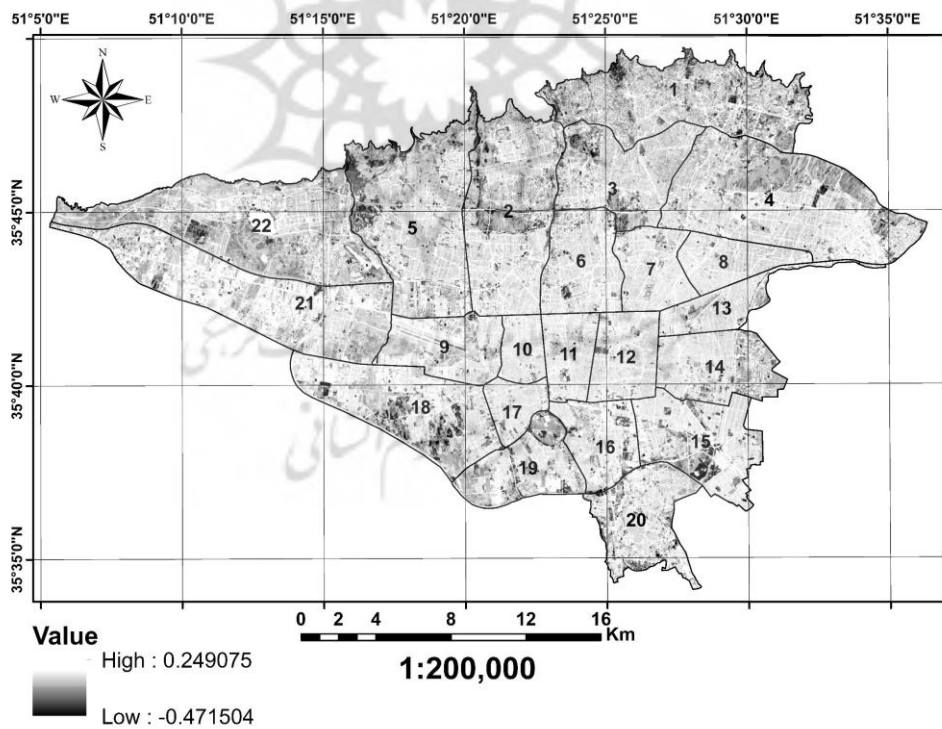
در انجام تصحیحات اتمسفری توسط ماژول FLAASH در محیط نرم‌افزار ENVI 5.3 با توجه به شهری بودن منطقه مورد مطالعه از مدل شهری جهت مدلسازی هواویز استفاده شد. همچنین نظر به اینکه تصاویر فصل تابستان مورد استفاده قرار گرفته‌اند و نیز موقعیت عرض جغرافیایی شهر تهران از مدل تابستان عرض‌های میانه^{۵۲} جهت مدلسازی بخار آب اتمسفر استفاده گردید. به عنوان نمونه ترکیب رنگی کاذب مادون قرمز تصویر بازتابندگی زمینی حذف نویز شده سال ۱۳۹۸ در شکل ۳ آورده شده است. در این پژوهش از مولفه‌های اصلی اول و دوم نیز به عنوان ویژگی‌های ورودی به طبقه‌بندی استفاده شد. پنج ویژگی بافت تصویر شامل میانگین، واریانس، همگنی، کنتراست و عدم شباهت مورد استفاده قرار گرفتند. ویژگی‌های فوق با استفاده از یک پنجره ۳×۳ روی باندهای سبز، NIR و SWIR II یعنی باندهای ۲ و ۴ و ۷ برای لندست‌های ۵ و ۷، و باندهای ۳ و ۵ و ۷ برای لندست ۸ و نیز شاخص‌های NDVI و NDBI اعمال شدند. تصاویر مولفه‌های اصلی اول و دوم برای سال ۱۳۹۸ در شکل ۴ الف و ۴ ب، نشان داده شده‌اند.



شکل ۳. تصویر ترکیب رنگی کاذب مادون قرمز تصویر بازتابندگی زمینی پس از حذف نویز سال ۱۳۹۸



شکل ۴ الف. تصویر مولفه اصلی اول سال ۱۳۹۸



شکل ۴ ب. تصویر مولفه‌های اصلی دوم

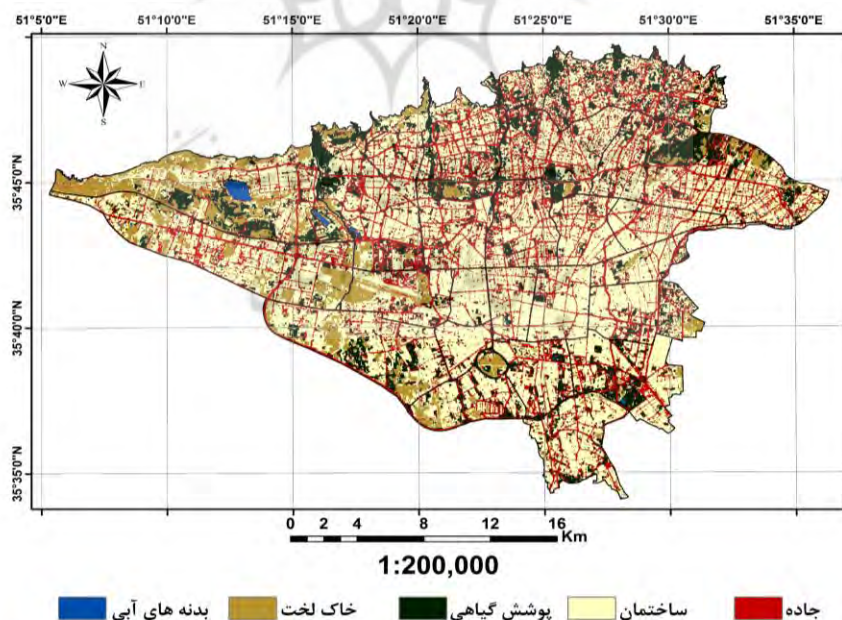
با توجه به حساسیت روش پس از طبقه‌بندی به نتایج حاصل از طبقه‌بندی، به‌کارگیری ویژگی‌های فوق که با تاکید بر هدف آشکارسازی تغییرات یعنی پوشش سبز شهری انتخاب شده‌اند، با هدف بهبود نتایج و رسیدن به بهترین دقت طبقه‌بندی بوده است. در این راستا همچنین برای دستیابی به بهترین ترکیب نمونه‌های آموزشی تلاش شده است. برای این منظور نمونه‌های آموزشی که دارای تشابه طیفی بودند حذف شدند تا

زمانیکه معیارهای تفکیک‌پذیری طیفی جفری-ماتوسیتا و واگرایی تبدیل یافته به مقدار بیشتر از ۱/۹ رسیدند. تعداد نمونه‌های آموزشی اولیه و نهایی در سال‌های مختلف برای کلاس‌های مورد بررسی، و نیز تعداد نمونه‌های واقعیت زمینی در جدول ۳ آورده شده‌اند.

جدول ۳. تعداد نمونه‌های آموزشی اولیه، نهایی و واقعیت زمینی

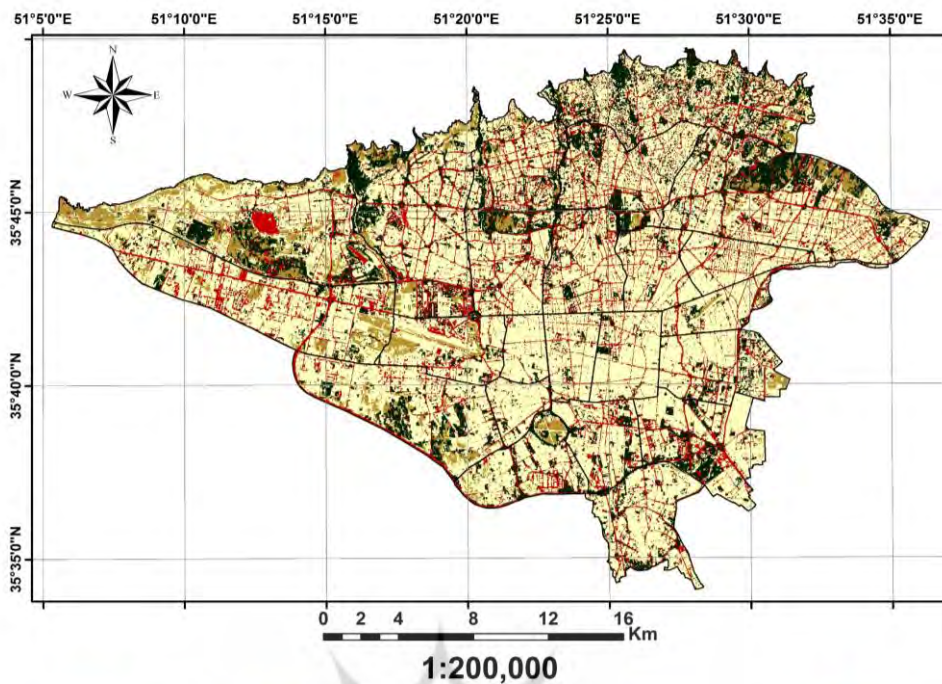
| تعداد نمونه‌های آموزشی نهایی | | | | | | | | | | تعداد نمونه‌های واقعیت زمینی | تعداد نمونه‌های آموزشی اولیه | |
|------------------------------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------------------------------|------------------------------|---------|
| ۱۳۹۸ | ۱۳۹۷ | ۱۳۹۶ | ۱۳۹۵ | ۱۳۹۴ | ۱۳۹۳ | ۱۳۹۲ | ۱۳۹۱ | ۱۳۹۰ | ۱۳۸۹ | ۱۰۵۶ | ۲۹۲۶۰ | گیاه |
| ۱۰۲۶ | ۱۰۰۹ | ۱۰۴۳ | ۱۰۳۲ | ۱۰۴۸ | ۱۰۳۶ | ۱۰۳۱ | ۱۰۴۳ | ۱۰۲۸ | ۱۰۲۸ | ۳۰۹۱ | ۸۵۶۸۷ | ساختمان |
| ۲۷۸۳ | ۲۵۹۹ | ۳۰۵۶ | ۲۹۱۷ | ۳۰۷۲ | ۳۰۷۴ | ۳۰۸۰ | ۳۰۸۰ | ۲۹۶۳ | ۲۹۶۳ | ۱۴۰۶ | ۳۸۹۶۴ | جاده |
| ۱۳۰۸ | ۱۲۸۴ | ۱۳۷۴ | ۱۳۲۹ | ۱۳۷۸ | ۱۳۷۳ | ۱۳۶۸ | ۱۳۷۳ | ۱۳۱۶ | ۱۳۱۶ | ۴۳۲ | ۱۱۹۶۲ | خاک |
| ۴۰۰ | ۳۴۸ | ۴۲۹ | ۴۰۰ | ۴۳۰ | ۴۲۴ | ۴۱۳ | ۴۲۶ | ۴۰۴ | ۴۰۴ | ۱۶ | ۴۴۴ | آب |
| ۱۶ | ۱۶ | ۱۶ | ۱۵ | ۱۵ | ۱۶ | ۱۶ | ۱۴ | ۱۳ | ۱۳ | | | |
| ۵۵۳۳ | ۵۲۵۶ | ۵۹۱۸ | ۵۶۹۳ | ۵۹۴۳ | ۵۹۲۳ | ۵۹۰۸ | ۵۹۳۶ | ۵۷۲۴ | ۵۷۲۴ | ۶۰۰۱ | ۱۶۶۳۱۷ | مجموع |

در این پژوهش سه طبقه‌بندی کننده بیشترین شباهت، شبکه عصبی مصنوعی و ماشین بردار پشتیبان پیاده‌سازی و نتایج آنها با هم مقایسه شدند. به منظور اجرای روش طبقه‌بندی بیشترین شباهت، آستانه‌ای برای احتمال در نظر گرفته نشده است. بدین ترتیب هر پیکسل به یکی از کلاس‌ها اختصاص داده شد و پیکسلی به صورت طبقه‌بندی نشده باقی نماند. در خصوص طبقه‌بندی کننده شبکه عصبی مصنوعی با انجام سعی و خطا بهترین ساختار شبکه بر پایه معیارهای دقت کلی و ضریب کاپا مشخص شد. بر این اساس، شبکه‌ای با یک لایه پنهان و تعداد تکرار ۱۰۰۰ و نرخ یادگیری ۰/۲ به عنوان بهترین شبکه در نظر گرفته شد. در نهایت برای انجام طبقه‌بندی به روش ماشین بردار پشتیبان ابتدا همه ویژگی‌های مورد استفاده به دامنه صفر تا یک تغییر مقیاس داده شدند. هدف از این کار جلوگیری از غلبه کردن داده‌های با دامنه مقادیر بزرگتر بر داده‌های با دامنه مقادیر کوچک‌تر است. برای انجام طبقه‌بندی چندکلاسه در این تحقیق از استراتژی یکی در مقابل یکی استفاده شد. همچنین کرنل RBF^{53} برای انتقال به فضا با بعد بزرگتر استفاده بکار گرفته شد. به منظور تعیین مقادیر بهینه پارامتر عرض تابع گوسی در کرنل RBF (g) و نیز پارامتر جریمه C^{54} ، روش جست‌وجوی شبکه‌ای 55 با استفاده از ۵ بار ارزیابی متقابل 56 به‌کار گرفته شد. نقشه‌های طبقه‌بندی شده حاصل از سه روش مذکور برای سال ۱۳۹۸ به همراه نقشه واقعیت زمینی در شکل ۵ (الف، ب، ج و د)، نشان داده شده‌اند. داده‌های واقعیت زمینی در حدود ۳۰ درصد کل مساحت منطقه مورد مطالعه را پوشش می‌دهد.



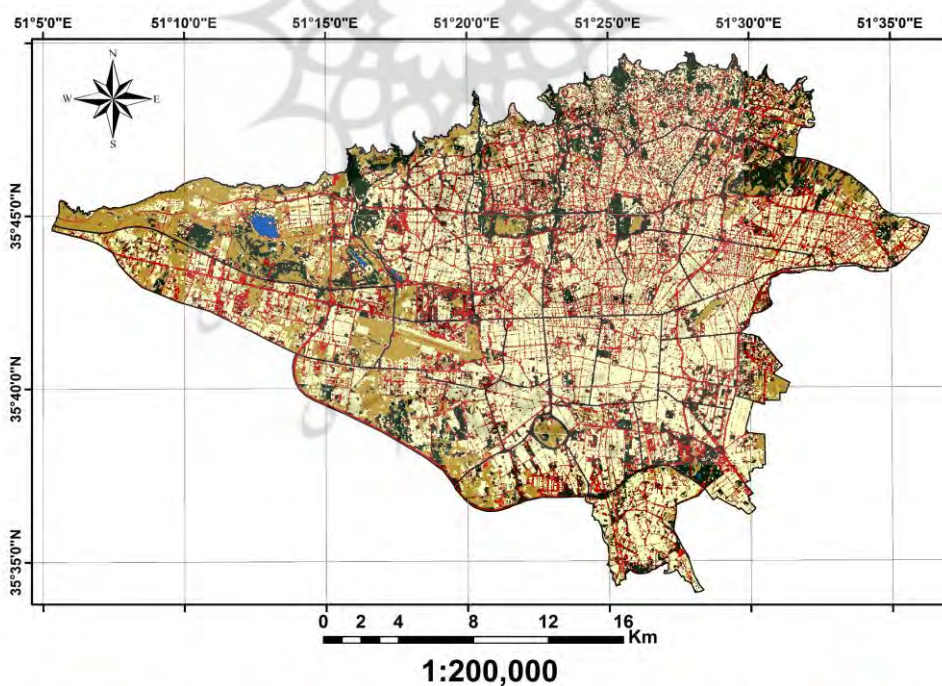
شکل ۵ الف. نقشه طبقه بندی شده به روش ماشین بردار پشتیبان سال ۱۳۹۸

53. Radial basis function
 54. Penalty parameter
 55. Grid-search
 56. 5-fold cross-validation



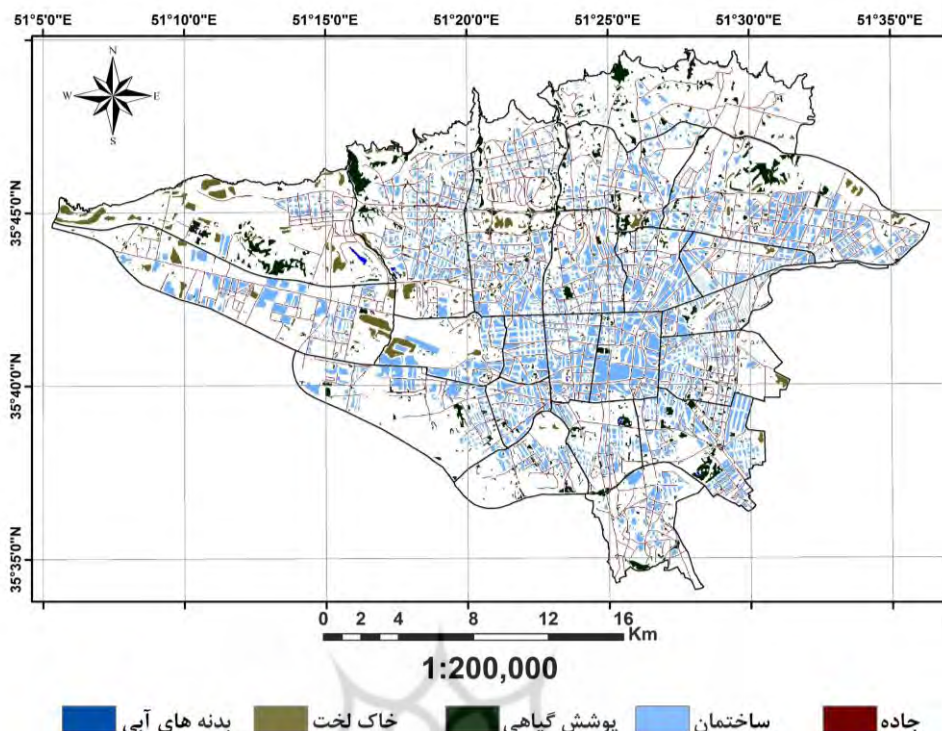
جاده ساختمان پوشش گیاهی خاک لخت بدنه های آبی

شکل ۵ ب. نقشه طبقه بندی شده به روش شبکه عصبی مصنوعی سال ۱۳۹۸



جاده ساختمان پوشش گیاهی خاک لخت بدنه های آبی

شکل ۵ ج. نقشه طبقه بندی شده به روش بیشترین شباهت سال ۱۳۹۸



شکل ۵. نقشه‌های طبقه‌بندی شده سال ۱۳۹۸ و نقشه واقعیت زمینی

مقادیر معیارهای ارزیابی دقت شامل ضریب کاپا که میزان دقت را بر اساس تمامی پیکسل‌هایی که درست و غلط طبقه‌بندی شده‌اند محاسبه می‌نماید، دقت کلی طبقه‌بندی و نیز دقت پردازنده و دقت کاربر، برای کلاس پوشش گیاهی برای روش‌های مذکور در جدول ۴ ارائه شده است. همانطور که در این جدول مشاهده می‌شود روش ماشین بردار پشتیبان در همه معیارهای مذکور بهترین نتایج را ارائه داده است، بنابر این از خروجی این روش برای آشکارسازی تغییرات استفاده شد.

جدول ۴. معیارهای ارزیابی نتایج روش‌های طبقه‌بندی

| سال | ضریب کاپا | | | دقت کلی (%) | | | دقت تولید کننده (%) | | | دقت کاربر (%) | | |
|---------|-----------|--------|--------|-------------|-------|-------|---------------------|-------|-------|---------------|-------|-------|
| | MLH | ANN | SVM | MLH | ANN | SVM | MLH | ANN | SVM | MLH | ANN | SVM |
| ۱۳۸۹ | ۰/۸۴ | -۰/۷۹ | -۰/۷۸ | ۸۵/۵۵ | ۸۶/۵۷ | ۹۰/۰۶ | ۹۳/۵۰ | ۹۰/۱۱ | ۹۳/۴۰ | ۹۲/۷۶ | ۹۳/۲۱ | ۸۹/۰۷ |
| ۱۳۹۰ | ۰/۸۴ | -۰/۷۴ | -۰/۷۲ | ۸۰/۸۳ | ۸۳/۳۴ | ۸۹/۹۲ | ۹۱/۲۸ | ۸۹/۵۱ | ۹۰/۱۲ | ۹۲/۵۶ | ۹۳/۲۶ | ۹۱/۸۷ |
| ۱۳۹۱ | ۰/۷۸ | -۰/۶۴ | -۰/۷۲ | ۸۱/۸۲ | ۷۷/۹۰ | ۸۵/۹۵ | ۸۸/۷۵ | ۸۷/۰۰ | ۹۱/۱۲ | ۹۱/۲۴ | ۹۱/۲۴ | ۸۲/۹۷ |
| ۱۳۹۲ | ۰/۸۷ | -۰/۷۶ | -۰/۷۹ | ۸۵/۸۳ | ۸۴/۷۶ | ۹۱/۶۸ | ۹۴/۹۴ | ۹۳/۶۳ | ۹۳/۵۰ | ۹۱/۱۶ | ۹۵/۱۷ | ۹۲/۲۳ |
| ۱۳۹۳ | ۰/۸۸ | -۰/۷۳ | -۰/۸۰ | ۸۶/۷۱ | ۸۳/۲۸ | ۹۲/۱۸ | ۹۴/۹۵ | ۹۴/۳۳ | ۹۴/۱۶ | ۹۰/۷۸ | ۹۵/۴۹ | ۹۱/۱۴ |
| ۱۳۹۴ | ۰/۸۹ | -۰/۷۷ | -۰/۸۲ | ۸۸/۳۶ | ۸۵/۳۷ | ۹۲/۸۸ | ۹۵/۸۰ | ۹۱/۵۳ | ۹۴/۰۷ | ۹۱/۲۰ | ۹۵/۷۹ | ۹۱/۳۴ |
| ۱۳۹۵ | ۰/۸۸ | -۰/۷۷ | -۰/۸۲ | ۸۸/۶۹ | ۸۵/۴۶ | ۹۲/۳۷ | ۹۵/۶۳ | ۹۴/۰۹ | ۹۳/۰۳ | ۹۱/۵۷ | ۹۴/۶۹ | ۹۲/۴۸ |
| ۱۳۹۶ | ۰/۸۷ | -۰/۷۵ | -۰/۸۰ | ۸۶/۸۶ | ۸۴/۰۷ | ۹۱/۹۸ | ۹۵/۰۵ | ۹۴/۴۸ | ۸۸/۰۳ | ۸۸/۳۷ | ۹۴/۷۸ | ۹۲/۷۹ |
| ۱۳۹۷ | ۰/۸۸ | -۰/۷۵ | -۰/۷۳ | ۸۱/۸۶ | ۸۴/۳۸ | ۹۲/۰۹ | ۹۴/۹۸ | ۹۱/۰۴ | ۸۷/۹۰ | ۹۲/۷۶ | ۹۴/۸۲ | ۹۴/۱۷ |
| ۱۳۹۸ | ۰/۸۷ | -۰/۷۴ | -۰/۸۱ | ۸۷/۴۱ | ۸۳/۶۰ | ۹۱/۵۱ | ۹۴/۳۷ | ۹۲/۶۱ | ۹۲/۶۲ | ۸۹/۷۸ | ۹۳/۹۳ | ۹۰/۷۱ |
| میانگین | ۰/۸۶ | -۰/۷۴۴ | -۰/۷۷۹ | ۸۵/۳۹ | ۸۳/۸۷ | ۹۱/۰۶ | ۹۳/۹۲ | ۹۱/۸۳ | ۹۱/۷۹ | ۹۱/۰۰ | ۹۲/۳۳ | ۹۰/۹۷ |

دلیل پایین‌تر بودن مقادیر معیارهای ارزیابی دقت برای هر سه روش طبقه‌بندی در سال ۱۳۹۱ نسبت به بقیه سال‌های می‌تواند به استفاده از تصویر لندست ۷ در این سال مربوط باشد. در این تصویر علیرغم بکارگیری روش پر کردن فضاهای خالی دندانه شکل ناشی از خطای SLC off، به دلیل از دست رفتن اطلاعات اصلی پیکسل‌ها، نتایج طبقه‌بندی در این سال ضعیف‌تر از سال‌های دیگر که در آنها تصاویر مورد استفاده فاقد خطای مذکور هستند، بوده است.

به منظور بررسی دقیق‌تر تغییرات اتفاق داده در کلاس پوشش سبز، آشکارسازی تغییرات در دو مقیاس زمانی و دو مقیاس مکانی پیاده-سازی شدند. از نظر زمانی آشکارسازی تغییرات هم بصورت سالانه و هم بصورت ده ساله انجام شد. در مقیاس سالانه نقشه‌های طبقه‌بندی

شده هر دو سال متوالی وارد مرحله آشکارسازی تغییرات شدند. در مقیاس ده ساله فقط نقشه‌های طبقه‌بندی شده سال اول (۱۳۸۹) و سال آخر (۱۳۹۸) وارد مرحله آشکارسازی تغییرات شدند. از نظر مکانی آشکارسازی تغییرات در مقیاس شهر تهران و نیز به تفکیک مناطق ۲۲ گانه شهرداری تهران صورت پذیرفت. برای بررسی تغییرات در مقیاس منطقه، نقشه‌های طبقه‌بندی شده با مرز مناطق شهرداری برش داده شده و نقشه‌های هر منطقه به طور جداگانه وارد مرحله آشکارسازی تغییرات شدند. انجام این کار امکان بررسی دقیق‌تر تغییرات رخ داده و کشف چرایی اتفاق افتادن آنها را فراهم آورد.

نتایج آشکارسازی تغییرات پوشش سبز شهری در سطح تهران در نمودار شکل ۶ آورده شده است. همانطور که در این نمودار مشاهده می‌شود در طی دوره زمانی مورد بررسی بالغ بر ۱۰/۸۶ کیلومتر مربع از مساحت پوشش سبز شهری یعنی در حدود ۱۰/۵۸ درصد آن کاهش یافته است. بررسی روند تغییرات در مقیاس سالانه نشان داد که در همه دوره یک ساله، غیر از دوره ۹۵-۱۳۹۴ و ۹۷-۱۳۹۶ پوشش سبز دارای کاهش بوده و تقریباً هر سال میزان این کاهش بیشتر نیز شده است. کاهش مشهود در دوره ۹۱-۱۳۹۰ مشاهده شد که البته به دلیل پایین‌تر بودن دقت طبقه‌بندی در سال ۱۳۹۱، میزان اعتماد به این نتیجه کمتر از سایر دوره‌ها است. جدول ۵ میزان تغییرات از سایر کلاس‌ها به پوشش سبز و از پوشش سبز به سایر کلاس‌ها را در مقیاس‌های زمانی سالانه و ده ساله (سطر آخر) در سطح شهر تهران، ارائه می‌دهد. همانطور که در سطر آخر این جدول مشاهده می‌شود در طول این دوره ده ساله ترتیب ۱/۸۶، ۱/۸، ۰/۴۶ و ۶/۷ کیلومتر مربع از کلاس پوشش سبز به کلاس‌های خاک لخت، ساختمان، بدنه‌های آبی و جاده تبدیل شده است. دلیل سهم چشمگیر کلاس جاده را می‌توان به نامناسب بودن قدرت تفکیک مکانی سنجنده‌های لندست در نمایش مطلوب عوارض موجود در این کلاس مربوط دانست.

بدیهی است که در تصاویر لندست با اندازه پیکسل ۳۰ متر، بسیاری از معابر شامل کوچه‌ها و خیابان‌ها به صورت پیکسل‌های مخلوط با عوارض مجاورشان که عمدتاً ساختمان‌ها هستند، دیده می‌شوند. بنابراین بروز تداخل طیفی در این دو کلاس (ساختمان و جاده) بسیار محتمل است. علاوه بر این ویژگی مورد استفاده برای بارزسازی عوارض ساخت دست بشر یعنی NDBI هر دوی این کلاس‌ها را برجسته می‌کند. دلایل فوق باعث طبقه‌بندی‌های اشتباه بین این دو کلاس می‌شود.

در ارزیابی دقت نتایج طبقه‌بندی نیز بیشترین خطاهای Commission و Omission و به تبع آن کمترین مقدار برای دقت کاربر و دقت تولیدکننده برای کلاس جاده به ثبت رسیده است. لذا با توجه به قدرت تفکیک مکانی سنجنده مورد استفاده منطقی‌تر این است که دو کلاس مذکور با هم ادغام شده و در قالب یک کلاس کلی‌تر تحت عنوان عوارض ساخته‌شده در نظر گرفته شوند. با این توضیح با اعتماد بیشتری می‌توان گفت که در بررسی صورت پذیرفته در پژوهش حاضر در طول دوره ده ساله مورد مطالعه، به میزان ۸/۵ کیلومتر مربع از کلاس پوشش سبز شهری به عوارض ساخته شده (ساختمان و جاده) تبدیل شده است. تغییرات از/به پوشش سبز بصورت سالانه نیز در جدول ۵ آورده شده است. همانطور که مشاهده می‌شود در دوره ۹۵-۱۳۹۴ به میزان ۷/۶۱ کیلومتر مربع و در دوره ۹۷-۱۳۹۶ به میزان ۴/۷۹ کیلومتر مربع بر مساحت پوشش سبز شهری تهران افزوده شده است.



شکل ۶. تغییرات سالانه و ده ساله پوشش سبز در سطح شهر تهران

جدول ۵. تغییرات سالانه و ده ساله از/به پوشش سبز شهری در سطح شهر تهران

| مجموع | جاده | آب | ساختمان | خاک لخت | | |
|--------|--------|--------|---------|---------|---------------|---------|
| ۱۲/۹۰۱ | ۶/۲۰۷ | -۰/۰۲ | ۴/۴۹۹ | ۲/۱۹۳ | از پوشش گیاهی | |
| ۱۲/۰۷۹ | ۵/۱۴۵ | -۰/۰۵۴ | ۵/۹۹۸ | -۰/۸۸۲ | به پوشش گیاهی | ۱۳۸۹-۹۰ |
| -۰/۸۲ | -۱/۰۶۲ | -۰/۰۵۲ | ۱/۴۹۹ | -۱/۳۱۱ | مجموع | |
| ۳۰/۹۱ | ۱۳/۵۷ | -۰/۰۳ | ۱۲/۸۵ | ۴/۴۷ | از پوشش گیاهی | |
| ۲۳/۴۴ | ۹/۷۷ | -۰/۰۴ | ۹/۷۶ | ۳/۸۷ | به پوشش گیاهی | ۱۳۹۰-۹۱ |
| -۷/۴۷ | -۳/۸ | -۰/۰۱ | -۳/۰۹ | -۰/۶ | مجموع | |
| ۲۲/۱۲ | ۱۰/۱۶ | -۰/۱۱ | ۸/۸۶ | ۲/۹۹ | از پوشش گیاهی | |
| ۱۹/۹۱ | ۹/۴۳ | -۰/۰۱ | ۸/۰۱ | ۲/۴۶ | به پوشش گیاهی | ۱۳۹۱-۹۲ |
| -۲/۲۱ | -۰/۷۳ | -۰/۰۱ | -۰/۸۵ | -۰/۵۳ | مجموع | |
| ۱۴/۱۲ | ۸/۴۶ | -۰/۰۱ | ۳/۱۹ | ۲/۴۶ | از پوشش گیاهی | |
| ۱۱/۵۱ | ۵/۳ | -۰/۰۴ | ۴/۶۴ | ۱/۵۲ | به پوشش گیاهی | ۱۳۹۲-۹۳ |
| -۲/۶۱ | -۳/۱۶ | -۰/۰۳ | ۱/۴۵ | -۰/۹۳ | مجموع | |
| ۱۲/۹۱ | ۷/۰۹ | -۰/۰۱ | ۳/۶۱ | ۲/۲ | از پوشش گیاهی | |
| ۹/۹۵ | ۵/۹۶ | -۰/۰۱ | ۲/۲۴ | ۱/۷۴ | به پوشش گیاهی | ۱۳۹۳-۹۴ |
| -۲/۹۶ | -۱/۱۳ | ۰ | -۱/۳۷ | -۰/۴۶ | مجموع | |
| ۷/۹۶ | ۳/۸ | ۰ | ۲/۲۳ | ۱/۹۳ | از پوشش گیاهی | |
| ۱۵/۵۷ | ۹/۶۱ | -۰/۰۲ | ۴/۱۶ | ۱/۷۸ | به پوشش گیاهی | ۱۳۹۴-۹۵ |
| ۷/۶۱ | ۵/۸۱ | -۰/۰۲ | ۱/۹۳ | -۰/۱۵ | مجموع | |
| ۱۲/۵۷ | ۷/۲۷ | -۰/۰۱ | ۳/۱ | ۲/۱۹ | از پوشش گیاهی | |
| ۱۰/۰۷ | ۵/۱۱ | ۰ | ۲/۲۶ | ۱/۳۶ | به پوشش گیاهی | ۱۳۹۵-۹۶ |
| -۲/۵ | -۲/۱۶ | -۰/۰۱ | ۰/۵ | -۰/۸۳ | مجموع | |
| ۹/۷۹ | ۵/۶۵ | ۰ | ۲/۴ | ۱/۷۴ | از پوشش گیاهی | |
| ۱۴/۵۸ | ۸/۴۹ | ۰ | ۴/۱۶ | ۱/۹۳ | به پوشش گیاهی | ۱۳۹۶-۹۷ |
| ۴/۷۹ | ۲/۸۴ | ۰ | ۱/۷۶ | -۰/۱۹ | مجموع | |
| ۱۶/۲۹ | ۸/۷۶ | -۰/۱۵ | ۵/۷۴ | ۱/۶۴ | از پوشش گیاهی | |
| ۱۱/۵۹ | ۶/۱۳ | ۰ | ۲/۵۳ | ۲/۹۳ | به پوشش گیاهی | ۱۳۹۷-۹۸ |
| -۴/۷ | -۲/۶۳ | -۰/۱۵ | -۳/۲۱ | ۱/۲۹ | مجموع | |
| ۳۱/۶۷ | ۱۳/۴۴ | -۰/۴۹ | ۱۱/۳ | ۶/۴۳ | از پوشش گیاهی | |
| ۲۰/۸۱ | ۶/۷۴ | ۰ | ۹/۵ | ۴/۵۷ | به پوشش گیاهی | ۱۳۸۹-۹۸ |
| -۱۰/۸۶ | -۶/۷ | -۰/۴۹ | -۱/۸ | -۱/۸۶ | مجموع | |

تغییرات سالانه و ده ساله (ستون آخر) پوشش سبز شهر تهران به تفکیک مناطق ۲۲ گانه شهرداری در جدول ۶ ارائه شده‌اند. بیشترین کاهش پوشش سبز در دوره ده ساله مورد بررسی در منطقه یک و به میزان ۵/۲ کیلومتر مربع اتفاق افتاده است. قرارگیری این منطقه در

کوهپایه و به تبع آن پوشش گیاهی نسبتاً متراکم آن در ابتدا دوره از یک سو و از سوی دیگر قیمت زمین و وجود برخی قوانین و آیین‌نامه‌های سازمان‌ها و ادارات ذی‌ربط نظیر کمیسیون ماده صد شهرداری که به موجب آن برخی تخلفات ساخت و ساز در ازای پرداخت جریمه نقدی نادیده گرفته می‌شوند، منجر به ثبت این کاهش در پوشش سبز شهری این منطقه شده‌اند. بیشترین میزان کاهش پوشش سبز در این منطقه در دوره‌های ۱۳۹۰-۹۱ به اندازه ۳.۴۲ و ۱۳۹۷-۹۸ به اندازه ۲/۹۲ کیلومترمربع تعیین شده است. پس از آن مناطق ۴/۲۲ و ۱۸ به ترتیب با ثبت کاهش به میزان ۲/۳۷، ۱/۷ و ۱/۵۹ کیلومترمربع در رتبه‌های بعدی کاهش مساحت پوشش سبز قرار دارند. البته لازم به ذکر است که مناطق ۲، ۱۹، ۲۱ و ۵ به ترتیب با ۰/۵، ۰/۴۷، ۰/۳۸ و ۰/۳۶ کیلومترمربع افزایش در جایگاه‌های اول تا چهارم گسترش پوشش سبز شهری هستند. آغاز به کار بوستان ولایت در سال ۱۳۹۱ در منطقه نوزده از عوامل افزایش پوشش سبز در این منطقه می‌باشد.

جدول ۶. تغییرات سالانه و ده ساله پوشش سبز مناطق ۲۲گانه

| دوره | ۱۳۸۹-۹۰ | ۱۳۹۰-۹۱ | ۱۳۹۱-۹۲ | ۱۳۹۲-۹۳ | ۱۳۹۳-۹۴ | ۱۳۹۴-۹۵ | ۱۳۹۵-۹۶ | ۱۳۹۶-۹۷ | ۱۳۹۷-۹۸ | ۱۳۸۹-۹۸ |
|-------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|
| منطقه | | | | | | | | | | |
| ۱ | -۱/۰۹ | -۳/۴۲ | -۰/۰۸ | -۱/۲۵ | -۱/۱۳ | ۳/۷۳ | -۱/۱۳ | ۲/۰۹ | -۲/۹۲ | -۵/۲ |
| ۲ | -۰/۱ | -۰/۳۲ | -۰/۱۸ | -۰/۰۶ | -۰/۱ | -۰/۶ | -۰/۴ | -۰/۸۲ | -۰/۱۶ | -۰/۵ |
| ۳ | -۰/۳۳ | -۰/۱۳ | -۰/۶۵ | -۰/۲۳ | -۰/۲ | -۰/۷۴ | -۰/۱۴ | -۰/۴۴ | -۰/۶۵ | -۱/۱۵ |
| ۴ | -۰/۴۹ | -۰/۷ | -۰/۶۲ | -۰/۲۹ | -۰/۸۱ | ۱/۶۷ | -۰/۶۷ | ۱/۱۶ | -۰/۹۵ | -۱/۷ |
| ۵ | ۰/۱۱ | -۰/۱۴ | -۰/۲۷ | -۰/۲۲ | -۰/۰۶ | -۰/۴۵ | -۰/۱۱ | -۰/۰۹ | ۰/۱۱ | -۰/۳۶ |
| ۶ | -۰/۰۴ | -۰/۴۵ | -۰/۲ | -۰/۴ | -۰/۰۹ | -۰/۰۹ | -۰/۰۱ | -۰/۱۲ | -۰/۰۸ | -۰/۳ |
| ۷ | ۰/۰۱ | -۰/۲۲ | -۰/۲ | ۰/۰۷ | -۰/۰۱ | -۰/۰۷ | -۰/۰۴ | ۰/۰۴ | -۰/۰۲ | -۰/۰۸ |
| ۸ | ۰/۰۷ | -۰/۰۷ | -۰/۱ | ۰/۰۸ | -۰/۰۱ | ۰/۰۱ | ۰/۰۱ | ۰/۰۱ | -۰/۰۴ | -۰/۱ |
| ۹ | ۰ | -۰/۳۲ | -۰/۰۳ | -۰/۱ | ۰/۰۵ | -۰/۱۶ | -۰/۰۴ | -۰/۰۹ | ۰/۱۸ | -۰/۳۷ |
| ۱۰ | -۰/۰۲ | ۰ | ۰ | -۰/۰۴ | -۰/۰۱ | ۰/۰۱ | ۰/۰۱ | -۰/۰۲ | -۰/۰۱ | -۰/۰۴ |
| ۱۱ | -۰/۰۱ | -۰/۰۵ | -۰/۰۱ | -۰/۰۵ | -۰/۰۷ | ۰/۰۴ | -۰/۰۳ | ۰/۰۵ | ۰/۰۲ | ۰/۰۹ |
| ۱۲ | ۰/۰۱ | -۰/۰۶ | -۰/۰۱ | -۰/۰۶ | ۰/۰۲ | -۰/۰۷ | -۰/۰۷ | -۰/۰۲ | ۰/۰۱ | -۰/۰۳ |
| ۱۳ | -۰/۰۱ | -۰/۰۹ | -۰/۰۱ | -۰/۰۶ | -۰/۱ | -۰/۰۳ | -۰/۰۶ | -۰/۰۶ | -۰/۰۲ | -۰/۱۳ |
| ۱۴ | -۰/۰۳ | -۰/۲۴ | -۰/۱۴ | ۰/۱۱ | -۰/۳۶ | -۰/۲۲ | -۰/۰۴ | ۰/۲ | -۰/۱۶ | -۰/۰۸ |
| ۱۵ | -۰/۰۴ | -۰/۰۷ | -۰/۰۲ | -۰/۰۹ | -۰/۱۳ | -۰/۲۶ | -۰/۱۴ | -۰/۰۱ | -۰/۱۳ | -۰/۰۹ |
| ۱۶ | -۰/۰۵ | -۰/۱ | -۰/۰۵ | -۰/۰۴ | -۰/۰۳ | -۰/۱۴ | -۰/۰۸ | -۰/۰۶ | -۰/۰۱ | -۰/۱۸ |
| ۱۷ | -۰/۰۴ | -۰/۰۱ | -۰/۰۱ | -۰/۰۴ | -۰/۰۳ | -۰/۰۱ | -۰/۰۱ | ۰ | -۰/۰۲ | -۰/۰۳ |
| ۱۸ | -۰/۳ | -۰/۳۵ | -۰/۷۳ | -۰/۵۲ | -۰/۲۳ | -۰/۳۵ | -۰/۵ | -۰/۰۸ | ۰/۲۵ | -۱/۵۹ |
| ۱۹ | ۰/۳۴ | -۰/۰۴ | ۰/۲ | ۰/۰۴ | -۰/۱۶ | ۰/۰۷ | ۰/۰۹ | ۰/۰۵ | -۰/۱۲ | -۰/۴۷ |
| ۲۰ | -۰/۰۱ | -۰/۶۷ | -۰/۰۳ | -۰/۳۲ | -۰/۱۶ | -۰/۲۲ | -۰/۰۶ | ۰/۲ | -۰/۰۵ | -۰/۸۸ |
| ۲۱ | ۰/۰۶ | -۰/۵۳ | -۰/۳۸ | ۰/۴۲ | -۰/۰۲ | ۰/۱۲ | -۰/۰۸ | -۰/۲۸ | ۰/۲۵ | -۰/۳۸ |
| ۲۲ | ۰/۲۶ | -۱/۶۸ | -۰/۱۶ | -۰/۶۵ | -۰/۲۷ | -۰/۰۲ | ۰/۱۴ | -۰/۱۹ | -۰/۱۶ | -۲/۳۷ |
| مجموع | -۰/۸۲ | -۷/۴۷ | -۲/۲۱ | -۲/۶۱ | -۲/۹۶ | ۷/۶۱ | -۲/۵ | ۴/۷۹ | -۴/۷ | -۱۰/۸۶ |

اطلاعات جدول ۶، نشان می‌دهد که بیشترین میزان کاهش در پوشش سبز در دوره‌های ۱۳۹۰-۹۱ و ۱۳۹۷-۹۸ به ترتیب با ۷/۴۷ و ۴/۷ کیلومتر مربع بوده که در آنها به ترتیب ۱۵ و ۱۶ منطقه از ۲۲ منطقه دارای کاهش در این پوشش بوده‌اند. همچنین علیرغم کاهش

پوشش سبز در اغلب دوره‌های یک ساله، در دو دوره ۹۵-۱۳۹۴ و ۹۷-۱۳۹۶ به ترتیب ۱۷ و ۱۶ منطقه از ۲۲ منطقه افزایش مساحت این پوشش را داشته‌اند.

بحث و نتیجه‌گیری

در این پژوهش از رویکرد پس از طبقه‌بندی برای آشکارسازی تغییرات پوشش سبز شهری کلانشهر تهران در بازه ده ساله ۱۳۸۹ تا ۱۳۹۸ استفاده شده است. برای این منظور از سری زمانی تصاویر ماهواره‌های لندست ۵، ۷ و ۸ استفاده شده است. مطالعات پیشین ضمن تاکید بر قابلیت‌ها و مزایای رویکرد پس از طبقه‌بندی برای آشکارسازی تغییرات، به حساسیت این روش به نتایج حاصل از روش طبقه‌بندی به‌کار گرفته شده اشاره کرده‌اند. بنابراین تلاش برای اخذ بهترین نتایج طبقه‌بندی در به‌کارگیری این رویکرد بسیار ضروری می‌باشد. از آنجاکه یک معیار تاثیرگذار بر نتایج طبقه‌بندی، کیفیت نمونه‌های آموزشی مورد استفاده است، در این پژوهش دو معیار بررسی تفکیک‌پذیری طیفی برای پالایش و بهینه‌سازی نمونه‌های آموزشی استفاده شده‌اند. همچنین در راستای تلاش جهت اخذ بهترین نتایج طبقه‌بندی، سه روش طبقه‌بندی بیشترین شباهت، شبکه عصبی مصنوعی و ماشین بردار پشتیبان پیاده‌سازی و نتایج آنها با هم مقایسه شدند که از این بین روش ماشین بردار پشتیبان با میانگین دقت کلی ۹۱/۰۶ درصد نتایج بهتری را در پی داشت. در پژوهش حاضر با به‌کارگیری ویژگی‌های مناسب با هدف آشکارسازی تغییرات یعنی پوشش سبز شهری شامل شاخص‌های مختلف گیاهی و شاخص مناطق ساخته شده و نیز استفاده از ویژگی‌های بافت که منجر به تفکیک بهتر کلاس‌های شهری می‌شوند همچنین برای اخذ نتایج بهتر بویژه در کلاس پوشش گیاهی تلاش شده است. این امر منجر به دستیابی به مقادیر میانگین ۹۳/۹۲ و ۹۴/۲۳ درصد به ترتیب برای دقت کاربر و دقت تولید کننده در کلاس پوشش گیاهی شده است. در این تحقیق از سری زمانی تصاویر لندست جهت آشکارسازی تغییرات پوشش سبز استفاده شده است که دلیل آن پوشش و قدرت تفکیک زمانی مناسب، قدرت تفکیک مکانی نسبتاً مناسب و ارائه رایگان تصاویر این ماهواره است. با این حال به نظر می‌رسد این تصاویر توان لازم برای جداسازی مطلوب کلاس معابر شهری شامل کوچه‌ها و بسیاری از خیابان‌ها را نداشته باشد. بنابراین پیشنهاد می‌شود کلاس مذکور و ساختمان‌ها تجمیع شوند و بصورت یک کلاس کلی با عنوان عوارض ساخته شده در نظر گرفته شوند. همچنین پیشنهاد می‌شود از ادغام تصاویر با قدرت تفکیک مکانی بالا با تصاویر با قدرت تفکیک طیفی بالا برای حل این مشکل استفاده شود. به منظور بررسی دقیق‌تر تغییرات رخ داده در پوشش سبز شهری، در این پژوهش تغییرات در دو مقیاس زمانی سالانه و ده ساله، و نیز در دو مقیاس مکانی در سطح شهر تهران و در سطح مناطق ۲۲ گانه شهرداری انجام شدند. این بررسی این امکان را فراهم می‌آورد که توزیع مکانی و زمانی تغییرات مشخص شوند. بدیهی است چنین اطلاعاتی در برنامه‌ریزی‌های آتی جهت مقابله با مشکل کاهش فضا/پوشش سبز شهری بسیار ضروری است. نتایج حاکی از کاهش ۱۰/۵۸ درصدی پوشش سبز شهری در دوره مورد بررسی است. بیشترین میزان کاهش در دوره ۹۱-۱۳۹۰ اتفاق افتاده و طی این ده سال در دو دوره ۹۵-۱۳۹۴ و ۹۷-۱۳۹۶ به ترتیب به میزان ۷/۶۱ و ۴/۷۹ کیلومتر مربع بر مساحت پوشش سبز شهری تهران نیز افزوده شده است. همچنین مناطق یک و ۲۲ به ترتیب با ۵/۲ و ۲/۳۷ کیلومتر مربع بیشترین میزان کاهش را در بین مناطق داشته‌اند. کاهش پوشش سبز در حوضه درکه و ولنجک از ۳۷ درصد در سال ۱۳۶۶ به ۱۴/۵ درصد در سال ۱۳۸۸ که در تحقیق اسماعیل زاده و شفیعی ثابت (۱۳۹۲) گزارش شده است نیز بر روند کاهشی پوشش سبز در منطقه یک تهران دلالت دارد که با نتایج اخذ شده در پژوهش حاضر همخوان است. مناطق ۲ و ۱۹ نیز به ترتیب با ۰/۵ و ۰/۴۷ کیلومتر مربع بیشترین افزایش در پوشش سبز شهری را در بین مناطق داشته‌اند. در تحقیق سرودی و جوزی (۱۳۹۵) که طی سال‌های ۱۳۶۹ تا ۱۳۸۵ در منطقه ۵ تهران انجام شده، گزارش شده که اگر چه پوشش گیاهی با درجه سبزی خوب و متوسط کاهش داشته‌اند ولی پوشش گیاهی ضعیف روند افزایشی داشته است. به نظر می‌رسد با در نظر گرفتن رشد این نوع پوشش طی سال‌های بعد، نتایج تحقیق سرودی و جوزی (۱۳۹۵) نیز با نتایج اخذ شده در پژوهش حاضر که افزایش پوشش سبز را در منطقه پنج تهران نشان می‌دهد، سازگاری دارد.

راهکارها

- با توجه به یافته‌های تحقیق، راهکارهای عملی و مدیریتی زیر پیشنهاد می‌گردد:
- ✓ تدوین طرح جامع فضای سبز شهری در کلانشهر تهران.
- ✓ جنگل کاری در تپه‌های تهران که دارای ارزش عملکردی و درونی بالایی هستند و موجب پیوستگی نواحی طبیعی شرق و غرب می‌شوند.
- ✓ کاربرد منطقی و پایدار اصول اکولوژی سیمای سرزمین در برنامه ریزی فضای سبز شهری در شهر تهران.
- ✓ انتقال صنایع مزاحم (مخصوصاً در نواحی جنوبی تهران) و آزاد سازی فضا برای ایجاد و توسعه فضای سبز در سطح شهر تهران.

- ✓ ساخت مخازن جمع آوری آبهای سطحی و فصلی در سطح مناطق شهرداری تهران جهت بهره برداری در فضای سبز شهری با رویکرد کاهش استفاده از منابع آبهای زیر زمینی.
- ✓ شناسایی اراضی دارای توان برای احیاء و گسترش فضای سبز شهری و ایجاد اتصال بین قطعات کوچکتر فضای سبز.
- ✓ ایجاد تناسب بین فضاهای سبز شهری با فضاهای ساخت و ساز از طریق جلوگیری از پدیده خرددانه‌گی (ریز دانه شدن) فضاهای سبز شهری در سطح شهر تهران.
- ✓ حفاظت و توسعه فضاهای سبز با وسعت زیاد و اتصال این قطعات بزرگ به وسیله قطعات کوچکتر با کریدورهای طبیعی.
- ✓ ایجاد بانک ذخیره اراضی مستعد در درون اراضی ذخیره توسعه شهر تهران منحصراً با کاربری توسعه فضای سبز شهری در کلانشهر تهران.

منابع

۱. اسماعیل‌زاده، حسن و شفیع‌ی ثابت، ناصر (۱۳۹۲)، بررسی تغییرات کاربری اراضی و ناپایداری در اکوسیستم شمال تهران (مطالعه موردی: حوضه آبخیز درکه-ولنجک)، پژوهش‌های دانش زمین، ۱۵: ۱۰۲-۸۳.
۲. امیدوار، کمال؛ نارنگی‌فرد، مهدی و عباسی، حجت اله (۱۳۹۴)، آشکارسازی تغییرات کاربری اراضی و پوشش گیاهی در شهر یاسوج با استفاده از سنجش از دور، جغرافیا و آمایش شهری منطقه‌ای، ۵: ۱۱۱-۱۲۶.
۳. درگاه ملی آمار (۱۳۹۵)، نتایج سرشماری عمومی نفوس و مسکن، اطلاعات جمعیتی مناطق ۲۲ گانه تهران.
۴. سرودی، منا و جوزی، سیدعلی (۱۳۹۵)، بررسی تغییرات کیفی فضای سبز شهر تهران از سال ۱۳۶۹ تا ۱۳۸۵ (مطالعه موردی: منطقه ۵ شهرداری تهران)، فصلنامه علوم و تکنولوژی محیط زیست، ۱۸: ۳۳۵-۳۴۴.
۵. مرصوصی، نفیسه و رشوند، صالح (۱۳۹۶)، تحلیل روند تغییرات دوره‌های فضای سبز شهری زنجان از ۱۳۸۵ تا ۱۳۹۰ و ارائه الگوی مکانیابی بهینه آن، دو فصلنامه علمی-پژوهشی پژوهش‌های بوم‌شناسی شهری، ۱۶: ۱۰۱-۱۱۸.
۶. نظم‌فر، حسین؛ جعفری، فیروز و فیضی‌زاده، بختیار (۱۳۸۷)، کاربرد داده‌های سنجش از دور در آشکارسازی تغییرات کاربری اراضی شهری (مطالعه موردی فضای سبز شهر تبریز)، هنرهای زیبا، ۳۴: ۲۴-۱۷.
۷. آرخی، صالح؛ نیازی، یعقوب و ارزانی، حسین (۱۳۹۰)، مقایسه تکنیک‌های مختلف پایش تغییر کاربری اراضی / پوشش گیاهی با استفاده از GIS & RS (مطالعه موردی حوزه دره شهر- استان ایلام)، علوم محیطی، سال ۸، شماره ۳، ۸۱-۹۶.
8. Ahmad, A., Aboobaidar, B. M., Isa, M. S. a. M., Hashim, N. M., Rosul, M., Muhamad, S., & Man, S. (2014). *Temporal changes in urban green space based on normalized difference vegetation index*. Applied Mathematical Sciences, 8(55):2743-2751.
9. Al-Dail, M. A. (1998). *Change Detection in Urban Areas using Satellite Data*. Journal of King Saud University. Engineering Sciences, 10(2): 217-227.
10. Angelici, G., Bryant, N., Friedman, S. (1977). *Techniques for land use change detection using Landsat imagery*. Proceedings of the 43rd Annual Meeting of the American Society of Photogrammetry and Joint Symposium on Land Data Systems, Falls Church, VA, USA: 217-228.
11. Byrne, G., Crapper, P., Mayo, K. (1980). *Monitoring land-cover change by principal component analysis of multitemporal Landsat data*. Remote sensing of environment, 10(3): 175-184.
12. Deng, J., Huang, Y., Chen, B., Tong, C., Liu, P., Wang, H., & Hong, Y. (2019). *A methodology to monitor urban expansion and green space change using a time series of multi-sensor SPOT and Sentinel-2A images*. Remote Sensing, 11(10): 1230.

13. Dong, L., Jiang, H., Yang, L. (2018). *Spatio-Temporal Change of Vegetation Coverage and its Driving Forces Based on Landsat Images: a Case Study of Changchun City*. International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences, 42, 3: 295–298.
14. Ellefsen, R., Peruzzi, D. (1976). *Land-use change detection from Landsat and Skylab satellites*. In International Society for Photogrammetry, 13th. Int. Congress for Photogrammetry, 11-23.
15. Foody, G. M., Mathur, A., Sanchez-Hernandez, C., Boyd, D. S. (2006). *Training set size requirements for the classification of a specific class*. Remote Sensing of Environment, 104(1): 1-14.
16. Friedman, S. Z., Angelici, G. (1979). *The detection of urban expansion from Landsat imagery*. Remote Sensing Quarterly, 1: 58–79.
17. Gordon, Steven I (1980). *Utilizing Landsat imagery to monitor land-use change: A case study in Ohio*. Remote Sensing of Environment, 9(3): 189-196.
18. Kopecká, M., Szatmári, D., Rosina, K. (2017). *Analysis of urban green spaces based on Sentinel-2A: Case studies from Slovakia*. Land, 6(2), 25: 1-17.
19. Nilkamal, P, M., Nikam, V., Banerjee, B. J. (2020). *Machine learning on high performance computing for urban greenspace change detection: satellite image data fusion approach*. International Journal of Image and Data Fusion, 1-15.
20. Rafiee, R., Mahiny, A. S., Khorasani, N. J. (2009). *Assessment of changes in urban green spaces of Mashhad city using satellite data*. International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation, 11(6): 431-438.
21. Rubec, C., Thie, J. (1978). *Land use monitoring with Landsat digital data in southwestern Manitoba*. Paper presented at the 5th Canadian Symp. Remote Sensing of Environment, 136–149.
22. Shahabi, H., Zabihian, H., Shikhi, A. (2012). *Application of satellite images and GIS in evaluation of green space destruction in urban area (Case study: Boukan City)*. International Journal of Eng., 1(7): 1–6.
23. Singh, Ashbindu (1989). *Review article digital change detection techniques using remotely-sensed data*. International Journal of remote sensing, 10(6): 989-1003.
24. Todd, William J (1977). *Urban and regional land use change detected by using Landsat data*. Journal of Research of the US Geological Survey, 5(5): 529-534.
25. Toll, D., Royal, J., Davis, J. (1981). *Urban area update procedures using Landsat data*. American Society of Photogrammetry, Falls Church, RS-EI-17.
26. USGS website: /<https://earthexplorer.usgs.gov>.
27. Van, T. T., Tran, N. D., Bao, H. D., Phuong, D. T., Hoa, P. K., Han, T. T (2017). *Optical remote sensing method for detecting urban green space as indicator serving city sustainable development*. In Multidisciplinary Digital Publishing Institute Proceedings, Vol. 2, No. 3, p. 140: 1-6.
28. Wilson, J., Blackman, C., Spann, G. (1976). *Land use change detection using Landsat data*. Proceedings of the fifth annual remote sensing of earth resources conference, 79-91.