



ORIGINAL RESEARCH PAPER

Assessment and analysis of urban expansion in Parand over the past two decades using Sentinel-2 and Landsat-7 satellite imagery

F. Rabiee, S. Adibzadeh, A. Sharifi*, S. Sadeghian

Department of Geoinformation and Geomatics Engineering, Faculty of Civil, Water and Environmental Engineering, Shahid Beheshti University, Tehran, Iran

ABSTRACT

Received: 20 October 2025
Reviewed: 30 November 2025
Revised: 13 February 2026
Accepted: 16 June 2026

KEYWORDS:

Urban Development
Remote Sensing
Land Cover
Random Forest* Corresponding author
✉ a_sharifii@sbu.ac.ir
☎ (+9821) 73932477

Background and Objectives: Rapid urbanization has made land use change studies essential for urban planning. Parand, a new town near Tehran, has undergone significant development over the past two decades. This study aims to quantitatively monitor land use changes, focusing on the expansion of built-up areas and reduction of barren land, compare land use maps for two periods, assess classification accuracy, and analyze the spatial pattern of Parand's urban growth and its implications.

Methods: A multi-sensor approach was applied to analyze urban development, using Landsat-7 (2000) as the baseline and Sentinel-2 (2024) as the contemporary dataset, with Sentinel-1 radar data to improve urban texture separation. Data processing was performed in Google Earth Engine. Four classes—vegetation, built-up, barren land, and roads—were classified using Random Forest. Training samples were derived from visual interpretation and ancillary data. Validation involved an error matrix, overall accuracy, and the kappa coefficient. Outputs included binary built-up maps, classified land use maps, and statistical tables for both periods.

Findings: The results of the analyses indicated that the area of built-up land in Parand increased substantially during the study period. In 2000 the built-up area was approximately 3.66 square kilometers, whereas in 2024 it exceeded 14.31 square kilometers. This growth represents an increase of more than fourfold over two decades. At the same time, barren land, which covered 146.66 square kilometers in 2000, decreased to 134.50 square kilometers in 2024, indicating the conversion of a large portion of these lands into urban areas. Spatial analysis of the changes showed that urban growth was mainly concentrated in the eastern and southern sectors of Parand, shifting from an initially dispersed pattern to a more cohesive and organized structure. Comparison of classification performance also showed that the 2024 map, with an overall accuracy of 95.97 percent and a kappa coefficient of 0.9444, had higher quality than the 2000 map, which had an overall accuracy of 89.06 percent and a kappa of 0.8201. This difference is attributed to the higher spatial resolution of the newer data and the fusion of optical and radar sources. Vegetation and roads showed little change, and their relative stability is consistent with the more permanent nature of these classes.

Conclusion: Findings show that combining optical and radar data with machine learning in a cloud environment is effective for long-term urban monitoring. Rapid built-up expansion, especially in eastern and southern Parand, highlights the need for revised land use policies, infrastructure development, and agricultural land protection. This approach supports sustainable urban planning and investment prioritization, though challenges such as radar noise, limited field data, and class separability remain.



NUMBER OF REFERENCES

32



NUMBER OF FIGURES

5



NUMBER OF TABLES

5

مقاله پژوهشی

ارزیابی و تحلیل روند توسعه شهر پرنده در دو دهه اخیر با استفاده از داده‌ها و تصاویر ماهواره Sentinel2 و Landsat-7

فاطمه ربیعی، سینا ادیب زاده، علیرضا شریفی*، سعید صادقیان

گروه مهندسی نقشه برداری، دانشکده عمران، آب و محیط زیست، دانشگاه شهید بهشتی، تهران، ایران

چکیده

پیشینه و اهداف: روند رو به رشد شهرنشینی و گسترش سریع سکونت‌گاه‌ها در دهه‌های اخیر، اهمیت مطالعه تغییرات کاربری اراضی را در برنامه‌ریزی شهری دوچندان کرده است. شهر جدید پرنده، به‌عنوان یکی از نمونه‌های مهم شهرهای جدید کشور و واقع در مجاورت تهران، طی دو دهه گذشته دچار تغییرات قابل توجهی شده است. این شهر که در ابتدا تنها بخش کوچکی از محدوده مطالعه را دربر می‌گرفت، با افزایش جمعیت و تقاضای مسکن، رشد سریع و ملاحظه‌ای داشته است. هدف اصلی این مطالعه، پایش کمی تغییرات کاربری اراضی با تمرکز بر گسترش مناطق ساخته‌شده و کاهش اراضی بایر، مقایسه نقشه‌های کاربری اراضی در دو دوره زمانی، ارزیابی دقت طبقه‌بندی و تحلیل الگوی فضایی توسعه شهری پرنده و پیامدهای آن است.

تاریخ دریافت: ۲۸ مهر ۱۴۰۴
تاریخ داوری: ۰۹ آذر ۱۴۰۴
تاریخ اصلاح: ۲۴ بهمن ۱۴۰۴
تاریخ پذیرش: ۲۶ خرداد ۱۴۰۵

واژگان کلیدی:

توسعه شهری
سنجش از دور
کاربری اراضی
Random Forest

روش‌ها: برای تحلیل توسعه شهری، رویکردی مبتنی بر ادغام چندحسگر به کار گرفته شد. تصاویر ماهواره‌ای Landsat-7 مربوط به سال ۲۰۰۰ به‌عنوان داده پایه و تصاویر ماهواره‌ای Sentinel-2 مربوط به سال ۲۰۲۴ به‌عنوان داده معاصر استفاده شدند. همچنین داده‌های راداری Sentinel-1 برای بهبود تفکیک بافت‌های شهری به تحلیل اضافه شد. تمامی مراحل پردازش داده‌ها در محیط ابری Google Earth Engine انجام گرفت که امکان پردازش سریع و مدیریت داده‌های حجیم را فراهم می‌کند. چهار کلاس اصلی شامل گیاهان، مناطق ساخته‌شده، اراضی بایر و جاده‌ها با استفاده از الگوریتم جنگل تصادفی (Random Forest) طبقه‌بندی شدند. نمونه‌های آموزشی از طریق تفسیر بصری تصاویر و داده‌های کمکی آماده شدند. برای اعتبارسنجی، ماتریس خطا تهیه شد و دقت کلی و ضریب کاپا محاسبه گردید. خروجی‌های مطالعه شامل نقشه‌های باینری مناطق ساخته‌شده، نقشه‌های طبقه‌بندی‌شده کاربری اراضی و جداول آماری مساحت کلاس‌ها برای هر دو بازه زمانی بود.

* نویسنده مسئول
a_sharifi@sbu.ac.ir
021-72922477

یافته‌ها: نتایج نشان داد که مساحت مناطق ساخته‌شده در پرنده طی دوره مطالعه به‌طور چشمگیری افزایش یافته است؛ از حدود ۳.۶۶ کیلومتر مربع در سال ۲۰۰۰ به بیش از ۱۴.۳۱ کیلومتر مربع در سال ۲۰۲۴ رسیده است، که نشان‌دهنده افزایش بیش از چهاربرابری است. در همین دوره، اراضی بایر از ۱۴۶.۶۶ کیلومتر مربع به ۱۳۴.۵۰ کیلومتر مربع کاهش یافته است که نشان‌دهنده تبدیل بخش قابل توجهی از این اراضی به مناطق شهری است. تحلیل فضایی تغییرات نشان داد که رشد شهری عمدتاً در بخش‌های شرقی و جنوبی پرنده متمرکز بوده و الگوی پراکندگی اولیه به ساختاری منسجم‌تر و سازمان‌یافته‌تر تغییر کرده است. مقایسه کیفیت طبقه‌بندی نشان داد که نقشه سال ۲۰۲۴ با دقت کلی ۹۵.۹۷٪ و ضریب کاپا ۰.۹۴۴۴، کیفیت بالاتری نسبت به نقشه سال ۲۰۰۰ با دقت کلی ۸۹.۰۶٪ و ضریب کاپا ۰.۸۲۰۱ دارد؛ این تفاوت عمدتاً به وضوح بالاتر داده‌های جدید و ادغام داده‌های اپتیک و راداری بازمی‌گردد. کلاس‌های گیاهان و جاده‌ها تغییرات اندکی داشته‌اند که با ماهیت پایدارتر این کلاس‌ها همخوانی دارد.

نتیجه‌گیری: نتایج نشان می‌دهد که ترکیب داده‌های نوری و راداری با الگوریتم‌های یادگیری ماشین در محیط ابری، روشی مؤثر و تکرارپذیر برای پایش بلندمدت توسعه شهری است. گسترش سریع مناطق ساخته‌شده، به‌ویژه در بخش‌های شرقی و جنوبی پرنده، نیازمند بازنگری در سیاست‌های کاربری اراضی، توسعه زیرساخت‌های حمل‌ونقل و خدمات عمومی و حفاظت از اراضی کشاورزی است. این رویکرد می‌تواند مبنای مناسبی برای برنامه‌ریزی شهری پایدار، مدیریت جمعیت و اولویت‌بندی سرمایه‌گذاری فراهم کند. با این حال، محدودیت‌هایی مانند نویز داده‌های راداری، کمبود داده‌های میدانی و تفکیک‌پذیری محدود برخی کلاس‌ها همچنان باقی است.

مقدمه

و طبق پیش‌بینی‌ها این روند به‌طور مستمر در حال افزایش است. طبق آمارهای رسمی، در سال ۲۰۱۳ جمعیت کره زمین حدود ۷ میلیارد نفر بوده است که این آمار در سال ۲۰۲۳ افزایش حدود یک‌میلیاردی داشته

در دهه‌های گذشته، به‌دلیل پیشرفت‌های علمی و رفاهی ایجادشده در جوامع بشری، جمعیت کره زمین با افزایش چشمگیری مواجه شده است

در سطح بین‌المللی نیز مطالعات زیادی در این زمینه انجام شده است. در مقاله منتشر شده توسط Betsy Mison، با تحلیل تصاویر ماهواره‌ای Landsat در بازه ۴۰ ساله، روند توسعه کلان‌شهرهایی مانند پکن و لاس‌وگاس بررسی شد و نشان داده شد رابطه معناداری میان رشد افقی شهرها و تخریب پوشش طبیعی زمین وجود دارد. ژانگ [۱۲] پژوهشی انجام داده که با بهره‌گیری از تصاویر Sentinel-۲ از شهر پکن، تفکیک داده‌های طبیعی را با مدل Random Forest انجام داده و نشان داده است که دقت طبقه‌بندی افزایش زیادی می‌یابد؛ همچنین طبقه‌بندی چندکلاس پوششی مختلف مانند ساختمان، درخت، جاده و آب مشخص شد. Binhov در پژوهش خود با مطالعه روی داده‌های شهری و ترکیب تصاویر Sentinel-۲ با داده‌های راداری Sentinel-۱ به دقت بهتری رسید و نشان داد ترکیب این داده‌ها موجب ارتقای قابل توجه دقت طبقه‌بندی پوشش شهری می‌شود. به‌طور کلی، یافته‌های این پژوهش‌ها نشان می‌دهد تصاویر ماهواره‌ای در شناسایی و تحلیل روند توسعه شهری بسیار موثر هستند و استفاده از منابع چندزمانه با وضوح مکانی و دقت طیفی متفاوت و تلفیق آن‌ها با یکدیگر، می‌تواند نتایج بسیار مثبتی در مطالعه و کلاس‌بندی تحولات فضایی شهرها داشته باشد.

یکی از نمونه‌های شهرسازی در کشور ایران، ساخت‌وسازهای منطقه پرند است که به‌عنوان یک شهر جدید در ایران شناخته می‌شود. در این مطالعه، با استفاده از تصاویر Landsat-۷ و Sentinel-۲، تغییرات حاصل شده در توسعه این شهر از سال ۲۰۰۰ تا سال ۲۰۲۴ مورد بررسی قرار گرفت. از تصاویر Landsat-۷ برای بررسی شرایط منطقه قبل از شهرسازی و از تصاویر Sentinel-۲ برای بررسی وضعیت کنونی استفاده شد. همچنین از تصاویر ماهواره Sentinel-۱ نیز برای استفاده از داده‌های راداری آن، به‌منظور افزایش دقت شناسایی، استفاده شده است. برای تشخیص تغییرات ایجاد شده در منطقه شهری از شاخص NDBI استفاده شده است و محاسبات برای هر دو سال با آستانه مشخص انجام شده است. برای تحلیل دقیق تغییرات، میزان رشد مناطق شهری محاسبه شده است. طبقه‌بندی کاربری اراضی نیز با استفاده از الگوریتم Random Forest مشخص گردیده و با استفاده از ماتریس خطا، مقادیر دقت کلی و ضریب کاپا ارزیابی شده است تا تغییرات کاربری اراضی طی دو دهه اخیر مشخص شود و تصویری دقیق از میزان رشد شهرنشینی در این منطقه ارائه دهد. هدف اصلی این پژوهش، پایش روند تحولات شهری در یک بازه بلندمدت با بهره‌گیری از تصاویر ماهواره‌ای بوده است و از نتایج به‌دست‌آمده می‌توان برای برنامه‌ریزی توسعه پایدار شهری استفاده کرد.

پژوهش حاضر، با وجود اتکا بر چارچوب‌های رایج در پایش توسعه شهری، از چند جهت نسبت به مطالعات مشابه متمایز است: (۱) طراحی و پیاده‌سازی کامل زنجیره پردازش در محیط ابری Google Earth Engine با هدف افزایش تکرارپذیری؛ (۲) تلفیق داده‌های اپتیکی Sentinel-۲ و راداری Sentinel-۱ به‌منظور بهبود تفکیک مناطق ساخته‌شده و کاهش وابستگی به محدودیت‌های جوی و ابرناکی؛ (۳)

و جمعیت جهان به ۸ میلیارد نفر رسیده است [۱]. همچنین پیش‌بینی شده است که تا سال ۲۰۵۰ این رقم به حدود ۱۰ میلیارد نفر برسد [۲]. یکی از موضوعاتی که در کنار افزایش جمعیت جهان، خود افزایش چشمگیری داشته و مورد توجه کارشناسان قرار گرفته است، رشد فزاینده جمعیت مناطق شهری است. پیش‌بینی می‌شود که حدود ۶۸ درصد از جمعیت کره زمین در سال ۲۰۵۰ در مناطق شهری سکونت پیدا کنند که نشان‌دهنده پیشرفت ۱۳ درصدی نسبت به سال ۲۰۲۵ می‌باشد [۳]. کشور ایران نیز نسبت به این تغییرات جمعیتی مستثنی نیست؛ طبق داده‌های آماری، جمعیت ۷۵ میلیون نفری کشور در سال ۱۴۰۴ افزایش ۱۱ میلیون نفری داشته و به ۸۵ میلیون نفر رسیده است [۴]. همچنین طبق آمار به‌دست‌آمده، در سال ۱۳۳۵ جمعیت شهری ۳۱ درصد بوده است که با افزایش ۴۳ درصدی در سال ۱۳۹۵ به ۷۴ درصد رسیده است [۵] که این نشان‌دهنده افزایش شهرنشینی در کشور ایران، مانند دیگر مناطق جهان، است. افزایش جمعیت شهری، پرسش‌هایی را مبنی بر اینکه تأثیرات انسانی چگونه ممکن است بر اکوسیستم‌های شهری اثر بگذارد، مطرح می‌کند. این تأثیرات می‌تواند باعث بروز مشکلاتی مانند گرانی مسکن [۶]، ترافیک یا کمبود مواد غذایی و... شوند. به همین دلیل، لزوم توسعه پایدار شهری باید مورد توجه قرار گیرد تا کیفیت زندگی شهری حفظ و بهبود یابد.

یکی از ابزارهای نوین و کارآمدی که در زمینه مطالعه و پایش توسعه شهری استفاده می‌شود، بهره‌گیری از فناوری سنجش‌از‌دور با استفاده از تصاویر ماهواره‌ای است که امکان بررسی تغییرات کاربری اراضی و برخی اثرات زیست‌محیطی توسعه شهری را فراهم می‌آورد. در سطح ملی و جهانی، مطالعات متعددی به بررسی توسعه شهری با استفاده از تصاویر ماهواره‌ای پرداخته‌اند. عبداللهی [۷] در مقاله‌ای نقش و اهمیت تصاویر ماهواره‌ای چندزمانه را در پایش شهرها بررسی کرده و نشان می‌دهد داده‌های حاصل از سنجنده‌های Landsat-۷ و Sentinel-۲ به‌دلیل پوشش گسترده و تداوم زمانی، ابزار مناسبی برای مطالعه تغییرات بلندمدت در نواحی شهری هستند. در همین راستا، شیخ‌انلو [۸] در مطالعه‌ای موردی، توسعه شهر کاشمر را با استفاده از مدل CA-Markov بررسی کرده است که نتایج آن نشان داد الگوی منظمی در توسعه این شهر وجود نداشته و گسترش شهر به‌صورت پراکنده بوده است. از سوی دیگر، رجبی و مومنی [۹] با بهره‌گیری از تصاویر ماهواره‌ای با وضوح بالا، موفق به تهیه نقشه‌های دقیقی از بافت شهری شدند که نشان داد افزایش دقت تصاویر، کمک شایانی در شناسایی تغییرات دارد. همچنین در فصلنامه پژوهش‌های جغرافیایی و برنامه‌ریزی شهری [۱۰]، در مقاله‌ای با تمرکز بر تصاویر Sentinel-۲، نقش این داده‌ها را در طبقه‌بندی پوشش شهری بررسی کرده است. در این پژوهش از روش‌های طبقه‌بندی مانند Random Forest و SVM استفاده شد، پوشش شهری تفکیک و تحلیل شد و نشان داده شد که توان طیفی بالای تصاویر Sentinel-۲ می‌تواند به‌خوبی تغییرات پوشش زمین را در مناطق شهری تشخیص دهد.



شکل ۲: تصویر ماهواره ای منطقه پرنده در سال ۲۰۲۴
Fig. 2: Satellite image of the Parand area in 2024.

بر اساس آمار رسمی مرکز آمار ایران، جمعیت شهرهای جدید کشور در طول دو دهه اخیر با روندی صعودی همراه بوده است و پرنده نیز از این قاعده مستثنی نیست [۱۸]. محدوده مورد مطالعه در این تحقیق، حدود ۳۵ کیلومتر مربع را شامل می‌شود که علاوه بر هسته اصلی شهر، نواحی پیرامونی و اراضی بایر و کشاورزی اطراف را دربر می‌گیرد. انتخاب این محدوده به گونه‌ای انجام شده است که بتواند تمامی تغییرات کاربری اراضی ناشی از رشد شهری طی سال‌های ۲۰۰۰ تا ۲۰۲۴ میلادی را به‌طور کامل پوشش دهد. از آن‌جا که پرنده به‌عنوان یک شهر جدید با سرعت بالای توسعه کالبدی در حال رشد است، مطالعه تغییرات آن می‌تواند اطلاعات ارزشمندی برای برنامه‌ریزان و مدیران شهری فراهم آورد. بررسی روند تغییرات کاربری اراضی در این شهر، نمونه‌ای قابل‌تعمیم به سایر شهرهای جدید کشور نیز محسوب می‌شود [۱۹].

داده‌های مورد استفاده

در این پژوهش، به‌منظور بررسی تغییرات کاربری اراضی و پایش توسعه شهری در شهر جدید پرنده، از داده‌های چندزمانه و چندسنجنده استفاده شده است. انتخاب این داده‌ها بر اساس دسترسی آزاد، تداوم زمانی و قدرت تفکیک مکانی و طیفی مناسب برای تحلیل پوشش‌های مختلف سطح زمین صورت گرفت. تمامی داده‌ها از طریق بستر پردازش ابری Google Earth Engine (GEE) فراخوانی و پیش‌پردازش شدند.

به‌عنوان وضعیت پایه، تصاویر Landsat-7 Enhanced Thematic Mapper Plus (ETM+) مربوط به سال ۲۰۰۰ انتخاب شدند. این سنجنده با قدرت تفکیک مکانی ۳۰ متر و پوشش طیفی وسیع در

ارائه خروجی‌های کمی و قابل‌مقایسه شامل مساحت کلاس‌ها، شاخص‌های دقت طبقه‌بندی و نقشه‌های رشد/کاهش شهری در بازه زمانی مطالعه را فراهم می‌کند.

منطقه مورد مطالعه

منطقه مورد مطالعه در این پژوهش، شهر جدید پرنده است که در جنوب‌غربی استان تهران و در محدوده شهرستان رباط‌کریم واقع شده است. این شهر در فاصله حدود ۳۵ کیلومتری از تهران و در مختصات جغرافیایی تقریبی $35^{\circ}29'$ تا $35^{\circ}33'$ عرض شمالی و $50^{\circ}54'$ تا $50^{\circ}59'$ طول شرقی قرار دارد [۱۴]. پرنده یکی از مهم‌ترین نمونه‌های شهرهای جدید ایران است که با هدف جذب سرریز جمعیت کلان‌شهر تهران و سامان‌دهی الگوی سکونت شهری از اوایل دهه هفتاد خورشیدی طراحی و اجرا شد [۱۵]. این شهر بر اساس برنامه‌ریزی‌های ملی، ظرفیت اسکان جمعیت قابل‌توجهی را دارد و به‌عنوان یکی از قطب‌های مسکن‌سازی کشور شناخته می‌شود.

در شکل‌های (۱) و (۲)، با استفاده از تصاویر ماهواره‌ای که در سال‌های ۱۹۸۴ میلادی و ۲۰۲۴ میلادی گرفته شده‌اند، به‌وضوح می‌توان پیشرفت شهرسازی در این منطقه را مشاهده کرد. از نظر توپوگرافی، محدوده مورد مطالعه عمدتاً بر روی دشت‌های هموار و با شیب ملایم قرار دارد. این ویژگی باعث شده است که توسعه افقی شهر با محدودیت‌های کمتری روبه‌رو باشد و اراضی بایر و کشاورزی پیرامونی به‌تدریج به کاربری‌های شهری تبدیل شوند [۱۶]. همچنین، نزدیکی به زیرساخت‌های اصلی حمل‌ونقل از جمله آزادراه تهران-ساوه و دسترسی سریع به فرودگاه بین‌المللی امام خمینی (ره) نقش مهمی در جذابیت سرمایه‌گذاری و رشد کالبدی این شهر داشته است [۱۷].



شکل ۱: تصویر ماهواره ای منطقه پرنده در سال ۱۹۸۴
Fig. 1: Satellite image of the Parand area in 1984.

طیفی/بافت هر کلاس را پوشش دهند. مجموعه نمونه‌های آزمون به صورت مستقل از مجموعه آموزشی و با رعایت تفکیک مکانی انتخاب شد تا ارزیابی دقت تحت تاثیر همپوشانی نمونه‌های آموزشی قرار نگیرد. در ادامه، دقت طبقه‌بندی با استفاده از ماتریس خطا و شاخص‌های Overall Accuracy و Kappa محاسبه و گزارش گردید.

روش پیشنهادی و فرآیند این پژوهش

به منظور پایش تغییرات کاربری اراضی و تحلیل رشد شهری در منطقه مورد مطالعه، یک رویکرد سیستماتیک و مرحله‌ای در محیط Google Earth Engine (GEE) پیاده‌سازی گردید. این روش با هدف کاهش خطاهای طبقه‌بندی، افزایش دقت نتایج و ارتقای قابلیت تکرارپذیری طراحی شده است. فرآیند کلی در شش گام اصلی انجام شد که در ادامه تشریح می‌شود.

در گام نخست، برای پیش‌پردازش داده‌ها، ابتدا محدوده مطالعاتی به عنوان یک Feature Collection تعریف شد. برای اطمینان از کیفیت داده‌ها، فیلتر پوشش ابری کمتر از ۱۰٪ اعمال گردید و بازه زمانی ۱ مه تا ۳۰ ژوئیه انتخاب شد تا اثرات تغییرات فصلی کاهش یابد. سپس با استفاده از توابع آماری GEE نظیر median() و mosaic()، تصاویر منتخب ترکیب شدند تا نویز زمانی کاهش یافته و یک تصویر نماینده برای هر دوره ایجاد شود [۲۵]. در گام دوم، به منظور استخراج شاخص‌ها و برجسته‌سازی مناطق ساخته‌شده، از شاخص Normalized Difference Built-up Index (NDBI) استفاده شد که بر اساس باندهای SWIR و NIR محاسبه می‌شود. فرمول این شاخص در رابطه‌ی (۱) نشان داده شده است.

$$NDBI = \frac{(SWIR - NIR)}{(SWIR + NIR)} \quad (1)$$

باندهای NIR (نزدیک به فروسرخ) به دلیل بازتاب بالای پوشش گیاهی و باندهای SWIR (فروسرخ کوتاه‌موج) به دلیل حساسیت به مصالح ساختمانی و رطوبت سطحی انتخاب شدند تا تضاد طیفی میان مناطق شهری و غیرشهری به حداکثر برسد [۲۶]. علاوه بر این، داده‌های راداری Sentinel-1 با قطبش‌های VV و VH وارد تحلیل شدند. یک شاخص ترکیبی از این داده‌ها بر اساس رابطه‌ی (۲) تولید شد که به تشخیص بهتر ساختارهای شهری و کاهش خطاهای ناشی از سایه یا پوشش ابری کمک می‌کند [۲۷].

$$\frac{(VV - VH)}{(VV + VH)} \quad (2)$$

در گام سوم (آستانه‌گذاری)، پس از تولید لایه‌ی NDBI برای هر دوره، یک آستانه‌ی تجربی معادل ۰,۰۱ تعیین شد. پیکسل‌هایی که مقادیر آن‌ها از این آستانه بالاتر بود، به عنوان «مناطق شهری» و مقادیر کمتر، به عنوان «مناطق غیرشهری» شناخته شدند [۲۸]. این فرآیند منجر به تولید نقشه‌های دودویی برای سال‌های ۲۰۰۰ و ۲۰۲۴ شد که در مراحل بعدی برای تحلیل تغییرات مورد استفاده قرار گرفتند.

باندهای مرئی، مادون قرمز نزدیک (NIR) و فروسرخ کوتاه‌موج (SWIR)، یکی از منابع اصلی در مطالعات تغییرات کاربری اراضی محسوب می‌شود [۲۰]. این داده‌ها از زمان راه‌اندازی تاکنون آرشیوی بلندمدت ارائه کرده‌اند که برای مطالعات پایش تغییرات بلندمدت بسیار ارزشمند است [۲۱]. برای وضعیت کنونی منطقه، داده‌های Sentinel-2 Multispectral Instrument (MSI) مربوط به سال ۲۰۲۴ استفاده گردید. این سنجنده با قدرت تفکیک مکانی ۱۰ متر در باندهای کلیدی مرئی، مادون قرمز نزدیک و فروسرخ کوتاه‌موج، امکان استخراج دقیق‌تر جزئیات شهری و تفکیک کلاس‌های مختلف را فراهم می‌کند [۲۲]. توان طیفی بالا و بازه زمانی تکرار کوتاه (۵ روزه)، این داده‌ها را برای مطالعات تغییرات کاربری اراضی شهری ایده‌آل کرده است [۲۳].

به منظور افزایش دقت تفکیک بافت‌های شهری و استفاده از داده‌هایی مستقل از شرایط نوری و پوشش ابری، داده‌های راداری Sentinel-1 Ground Range Detected (GRD) با قطبش‌های VV و VH به عنوان لایه‌های کمکی وارد فرآیند شدند. داده‌های راداری توانایی بالایی در آشکارسازی ساختارهای شهری و مصالح ساختمانی دارند و در ترکیب با داده‌های اپتیکی، سبب بهبود نتایج طبقه‌بندی می‌شوند [۲۴].

برای هر سنجنده، تصاویر در بازه زمانی اول مه تا ۳۰ ژوئیه انتخاب شدند تا شرایط فصلی مشابهی برقرار باشد و اثرات تغییرات گیاهی فصلی به حداقل برسد. همچنین شرط پوشش ابری کمتر از ۱۰٪ برای هر دو دوره اعمال شد تا کیفیت داده‌ها افزایش یابد. پس از فراخوانی، تصاویر با استفاده از توابع آماری مانند median() در GEE ترکیب شدند تا نویز زمانی کاهش یافته و یک تصویر نماینده برای هر دوره تولید شود. در جدول (۱)، سنجنده‌ها و باندهای مورد استفاده آن‌ها برای این پژوهش نشان داده شده‌اند.

جدول ۱: داده‌های مورد استفاده

Table 1: Information of the used data

سنجنده	منبع	نوع داده	باندهای کلیدی	قدرت تفکیک مکانی	سال
Sensor	Source	Data type	Key bands	Spatial resolution	Year
Landsat 7 ETM+	USGS (GEE)	اپتیکی Optical	NIR, SWIR, VIS	30 متر	2000
Sentinel-2 MSI	ESA (GEE)	اپتیکی Optical	NIR, SWIR, VIS	10 متر	2024
Sentinel-1 GRD	ESA (GEE)	راداری Radar	VV, VH	10 متر	2024

نمونه‌های مرجع برای کلاس‌های [پوشش گیاهی، شهری، بایر، جاده] با تفسیر بصری تصاویر با وضوح بالا (Google Earth) و با استفاده از لایه‌های کمکی تهیه شد. به منظور کاهش سوگیری مکانی و افزایش نمایندگی نمونه‌ها، انتخاب نقاط/پلیگون‌ها به گونه‌ای انجام گرفت که پراکندگی مناسبی در سطح محدوده مطالعه داشته باشند و تنوع شرایط

تمامی لایه‌های تولیدشده شامل NDBI، نقشه‌های دودویی و نقشه‌های طبقه‌بندی، در قالب فایل‌های GeoTIFF و جداول کمکی استخراج شدند. این خروجی‌ها امکان استفاده در نرم‌افزارهای GIS مانند ArcGIS و QGIS را فراهم می‌سازند. در شکل (۳)، روند کلی پردازش در این پژوهش نشان داده شده است.

به دلیل اختلاف تفکیک مکانی بین Sentinel-2(10m) و Landsat-7(30m) نتایج تغییرات بین دوره‌ای می‌تواند تحت تاثیر تفاوت سنجده قرار گیرد. در این پژوهش، برآورد مساحت تغییرات و تحلیل‌های مقایسه‌ای با مقیاس [۳۰ متر] انجام شد تا حد امکان خروجی‌های کمی بر پایه مقیاس مشترک قابل مقایسه شوند.

معرفی نرم افزار و سخت افزار

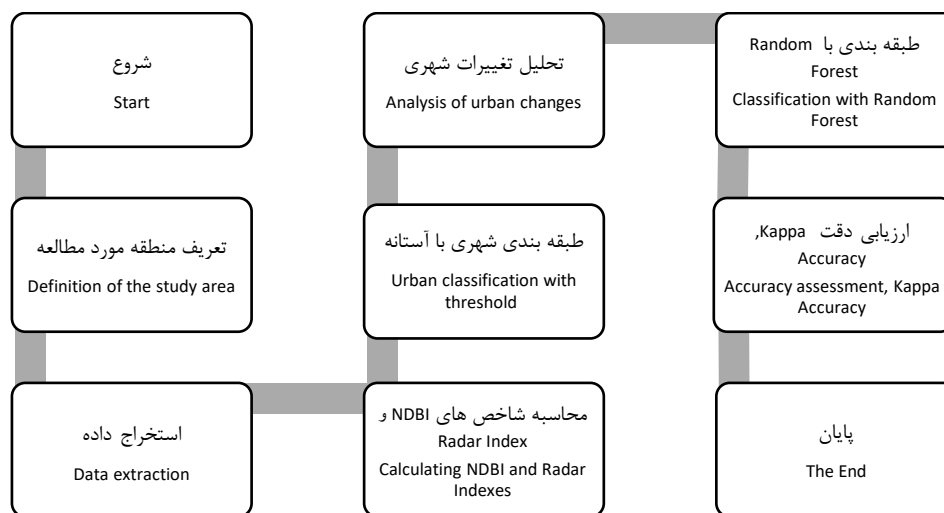
برای اجرای این پژوهش، از ترکیب توان پردازشی محیط‌های ابری و نرم‌افزارهای پردازش مکانی استفاده شده است Google Earth Engine (GEE) به عنوان بستر اصلی پردازش داده‌ها انتخاب شد؛ زیرا این محیط با دسترسی مستقیم به آرشیو عظیمی از داده‌های ماهواره‌ای و ابزارهای تحلیلی از پیش آماده، فرآیند تحلیل داده‌های چندزمانه را به طور چشمگیری تسهیل می‌کند. کلیه مراحل پیش‌پردازش تصاویر، شامل تصحیح اتمسفری، هم‌مرجع‌سازی تصاویر (Image Registration) و محاسبه شاخص‌های طیفی مانند NDBI، در این محیط انجام شد. برای پردازش‌های تکمیلی، تلفیق داده‌ها و تحلیل‌های آماری از نرم‌افزار Microsoft Excel استفاده گردید. سپس خروجی‌ها ذخیره شده و مورد پردازش و نمایش قرار گرفتند. در زمینه سخت‌افزاری، برای مدیریت داده‌ها و آماده‌سازی نقشه‌های خروجی از یک رایانه شخصی و حافظه ابری استفاده شد.

به منظور تعیین آستانه تفکیک مناطق شهری از غیرشهری، ابتدا توزیع مقادیر NDBI در محدوده مطالعه برای تصویر سال ۲۰۰۰ با استفاده از هیستوگرام بررسی شد. سپس چند مقدار آستانه در اطراف مقدار پیشنهادی به صورت آزمایشی ارزیابی گردید و اثر آن بر استخراج مناطق ساخته شده با نمونه‌های مرجع مقایسه شد. در نهایت، مقدار ۰.۰۱ به عنوان آستانه منتخب به دلیل سازگاری بهتر با نمونه‌های مرجع و پایداری نتایج انتخاب شد.

در گام چهارم (آماده‌سازی داده‌ها برای طبقه‌بندی)، پس از مرحله آستانه‌گذاری، مقادیر طیفی و راداری هر پیکسل استخراج و به عنوان ویژگی‌های ورودی الگوریتم طبقه‌بندی در نظر گرفته شدند. برای آموزش مدل، نمونه‌های آموزشی (Samples) از چهار کلاس اصلی تعیین گردید. این کلاس‌ها شامل مناطق ساخته شده، پوشش گیاهی، اراضی بایر و جاده‌ها و زیرساخت‌ها هستند. این نمونه‌ها با استفاده از ترکیب تفسیر بصری تصاویر و اطلاعات کمکی موجود جمع‌آوری و به محیط پردازش وارد شدند.

در گام پنجم طبقه‌بندی برای طبقه‌بندی داده‌ها از الگوریتم Random Forest استفاده شد که یکی از روش‌های یادگیری ماشین با دقت بالا در سنجش‌ازدور است [۲۹]. این الگوریتم با ایجاد تعداد زیادی درخت تصمیم و ترکیب نتایج آن‌ها، امکان تفکیک بهتر کلاس‌های پیچیده و کاهش بیش‌برازش را فراهم می‌کند. در این پژوهش، تعداد ۵۰ درخت تصمیم به عنوان پارامتر اصلی انتخاب شد که بر اساس آزمایش‌های اولیه و تجربیات سایر پژوهش‌ها، دقت مدل بهینه‌سازی گردید [۳۰].

در گام ششم (آماده‌سازی داده‌ها برای تحلیل تغییرات)، پس از اجرای طبقه‌بندی، نقشه‌های نهایی برای هر دوره تولید شدند. این نقشه‌ها شامل اطلاعات پیکسلی طبقه‌بندی شده برای هر کلاس بودند و به عنوان ورودی برای مرحله تحلیل تغییرات در بخش نتایج مورد استفاده قرار گرفتند.



شکل ۳: نمودار جریان مراحل تحقیق

Fig. 3: Flowchart of the research stages.

تحلیل‌ها و نتایج

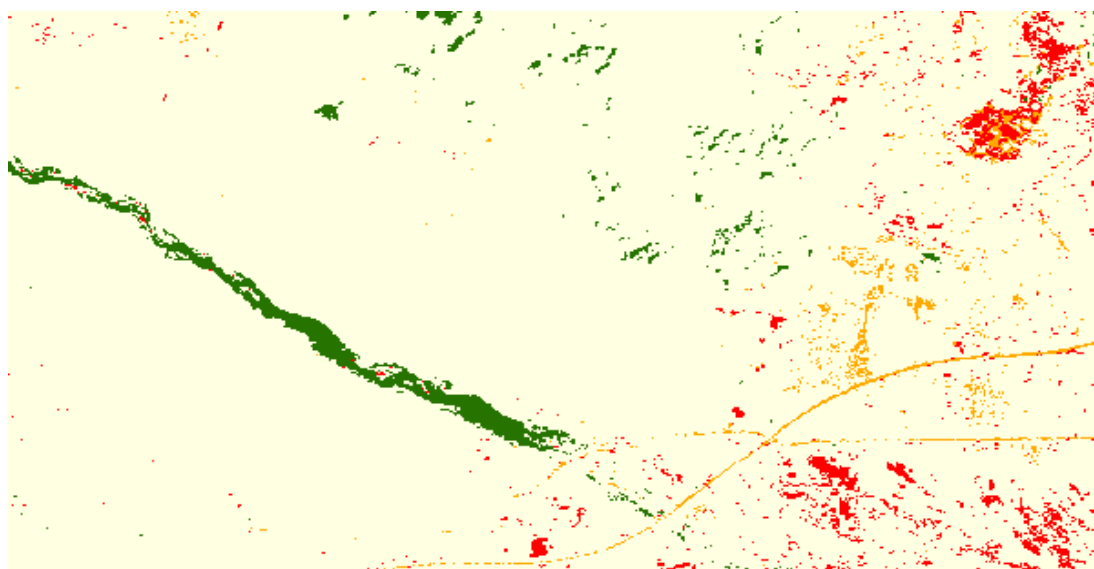
داده‌اند. الگوی پراکنش مناطق ساخته‌شده در این دوره، عمدتاً به صورت لکه‌های کوچک و پراکنده در اطراف محورهای ارتباطی مشاهده می‌شود. شکل (۵)، نقشه‌ی طبقه‌بندی‌شده‌ی سال ۲۰۲۴ حاصل از داده‌های Sentinel-2 و لایه‌های راداری Sentinel-1 را نمایش می‌دهد. مقایسه‌ی این نقشه با نقشه‌ی سال ۲۰۰۰ نشان می‌دهد که محدوده‌ی مناطق ساخته‌شده به‌طور چشمگیری گسترش یافته و بخش قابل‌توجهی از اراضی بایر به بافت شهری تبدیل شده‌اند. توزیع مناطق ساخته‌شده در این نقشه منظم‌تر و متمرکزتر به‌نظر می‌رسد که نشان‌دهنده‌ی توسعه‌ی برنامه‌ریزی‌شده‌ی شهری طی دو دهه‌ی اخیر است. همان‌طور که مشاهده می‌شود، بیشتر تغییرات به‌صورت رشد شهری در جهات شرقی و جنوبی منطقه‌ی پرند بوده است. این نتایج با روند کلی توسعه‌ی شهرهای جدید در ایران هم‌خوانی دارد.

در این بخش در جدول (۲) نتایج طبقه‌بندی تصاویر ماهواره‌ای برای سال‌های ۲۰۰۰ و ۲۰۲۴ و همچنین مقایسه تغییرات مساحت کلاس‌های کاربری زمین ارائه می‌شود. برای این پژوهش چهار کلاس اصلی تعریف شده است. که این کلاس‌ها شامل پوشش گیاهی، مناطق ساخته شده شهری، اراضی بایر و جاده‌ها و سطوح دست‌ساز هستند. در ادامه، نقشه‌های طبقه‌بندی‌شده‌ی سال‌های ۲۰۰۰ و ۲۰۲۴ نشان داده شده‌اند. شکل (۴)، نقشه‌ی طبقه‌بندی‌شده‌ی سال ۲۰۰۰ حاصل از داده‌های Landsat-7 را نمایش می‌دهد. همان‌طور که مشاهده می‌شود، مساحت مناطق ساخته‌شده (کلاس ۱) در این دوره بسیار محدود بوده و بخش اعظم محدوده‌ی مطالعاتی را اراضی بایر (کلاس ۲) تشکیل

جدول ۲: کلاس بندی انجام شده و مساحت کلاس‌ها

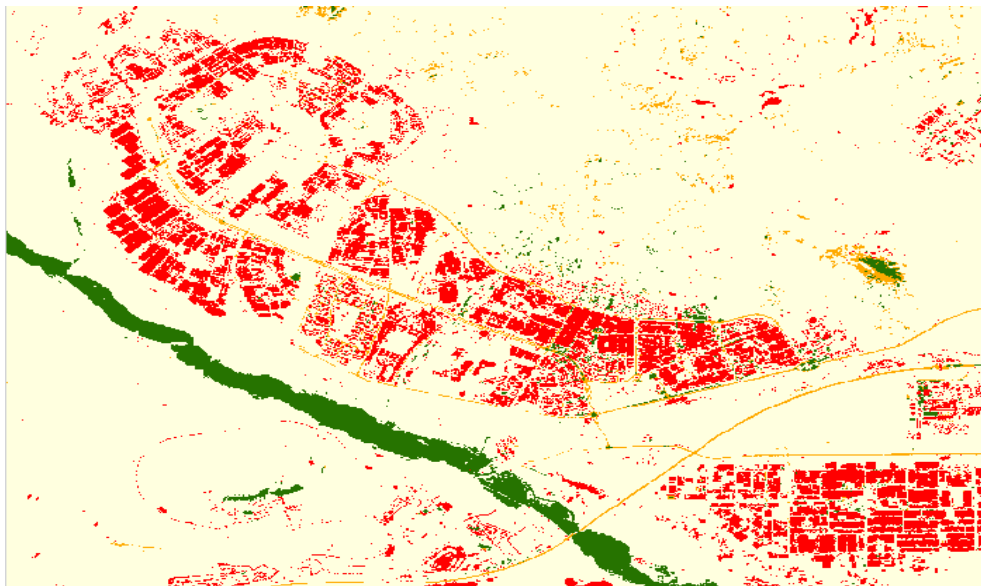
Table 2: Performed classification and the area of each class.

system:index	#	area_km2	#	class	source	.geo
1_0		4.598413617	0	Sentinel-2		{"type":"MultiPoint","coordinates":[]}
1_1		14.31459973	1	Sentinel-2		{"type":"MultiPoint","coordinates":[]}
1_2		134.5064213	2	Sentinel-2		{"type":"MultiPoint","coordinates":[]}
1_3		1.958240458	3	Sentinel-2		{"type":"MultiPoint","coordinates":[]}
2_0		3.098934937	0	Landsat7		{"type":"MultiPoint","coordinates":[]}
2_1		3.663526084	1	Landsat7		{"type":"MultiPoint","coordinates":[]}
2_2		146.6676423	2	Landsat7		{"type":"MultiPoint","coordinates":[]}
2_3		1.946616892	3	Landsat7		{"type":"MultiPoint","coordinates":[]}



شکل ۴: کلاس بندی تصاویر سال ۲۰۰۰

Fig. 4: Classification of the 2000 images



شکل ۵: کلاس بندی تصاویر سال ۲۰۲۴

Fig. 5: Classification of the 2024 images.

برای ارزیابی صحت نتایج طبقه‌بندی، از روش ماتریس خطا (Confusion Matrix) استفاده شد. نمونه‌های مرجع از طریق تفسیر بصری تصاویر و داده‌های کمکی برداشت شدند و مقایسه‌ی پیکسل‌های طبقه‌بندی‌شده با این نمونه‌ها انجام گرفت. دو شاخص اصلی برای سنجش عملکرد الگوریتم گزارش شده‌اند که شامل Overall Accuracy (درصد پیکسل‌هایی که به درستی طبقه‌بندی شده‌اند) و Kappa Coefficient (میزان توافق بین طبقه‌بندی و داده‌های مرجع فراتر از شانس تصادفی) می‌باشند. نتایج حاصل در جدول (۴) ارائه شده‌اند.

جدول ۴: نتایج ارزیابی دقت طبقه بندی

Table 4: Results of the accuracy assessment for the performed land cover classification.

Overall Accuracy	Kappa Coefficient	سال Year	سنجنده Sensor
0.8906 (≈ 89.06%)	0.8201	2000	Landsat 7 ETM+
0.9597 (≈ 95.97%)	0.9444	2024	Sentinel-2 & Sentinel-1

همان‌طور که جدول (۴) نشان می‌دهد، نقشه طبقه‌بندی‌شده سال ۲۰۲۴ که با ترکیب داده‌های Sentinel-۲ و Sentinel-۱ تهیه شده است، با دقت کلی ۹۵٫۹۷٪ و ضریب کاپا ۰٫۹۴۴۴ عملکرد بسیار بهتری نسبت به نقشه سال ۲۰۰۰ (دقت کلی ۸۹٫۰۶٪ و ضریب کاپا ۰٫۸۲۰۱) داشته است. این تفاوت به دلیل وضوح مکانی بالاتر (۱۰ متر در مقابل ۳۰ متر)، تنوع طیفی غنی‌تر و اضافه‌شدن داده‌های راداری است که توانسته مرز بین کلاس‌ها را با دقت بیشتری تفکیک کند [۳۱]. از این اطلاعات می‌توان به چند نتیجه مهم دست یافت. نخست، تفکیک مناطق شهری بهبود چشمگیری یافته است؛ زیرا ترکیب داده‌های اپتیکی و راداری موجب کاهش خطاهای ناشی از سایه و پوشش ابری شده و قابلیت تشخیص سطوح ساخته‌شده را افزایش داده است. همچنین می‌توان

نتایج محاسبه‌ی مساحت هر کلاس در هر دوره در جدول (۳) ارائه شده است. مقایسه‌ی مقادیر نشان می‌دهد که مساحت مناطق ساخته‌شده (کلاس ۱) از ۳٫۶۶ کیلومتر مربع در سال ۲۰۰۰ به ۱۴٫۳۱ کیلومتر مربع در سال ۲۰۲۴ رسیده است. در مقابل، مساحت اراضی بایر (کلاس ۲) از ۱۴۶٫۶۶ کیلومتر مربع به ۱۳۴٫۵۰ کیلومتر مربع کاهش یافته است. این کاهش بیانگر تبدیل بخشی از اراضی بایر به مناطق شهری و سایر کاربری‌های فعال است. مساحت پوشش گیاهی (کلاس ۰) و جاده‌ها (کلاس ۳) تغییرات اندکی داشته‌اند که می‌تواند ناشی از ثبات نسبی این کاربری‌ها یا دقت محدود تصاویر در این مقیاس باشد.

جدول ۳: مساحت کلاس‌های کاربری زمین در سال‌های ۲۰۰۰ و ۲۰۲۴

Table 3: Spatial extent of land use classes in 2000 and 2024

کلاس Class	تفسیر Interpretation	مساحت (km ²) در ۲۰۰۰	مساحت (km ²) در ۲۰۲۴
0	پوشش گیاهی Vegetation	3.09	4.59
1	مناطق ساخته شده Built-up areas	3.66	14.31
2	اراضی بایر Wasteland	146.67	134.50
3	جاده‌ها / سطوح خاص Roads/Special Surfaces	1.94	1.95

همان‌طور که از جدول مشاهده می‌شود، بیشترین تغییرات مربوط به افزایش مناطق ساخته‌شده و کاهش اراضی بایر است. این روند تأییدکننده‌ی توسعه‌ی سریع کالبدی شهر پرنده طی بازه‌ی زمانی ۲۰۰۰ تا ۲۰۲۴ می‌باشد که تحت تأثیر سیاست‌های توسعه‌ی مسکن و ایجاد زیرساخت‌های جدید شکل گرفته است.

زمانی داده‌ها اشاره کرد؛ زیرا هرچند داده‌های Sentinel-1 کمک زیادی به بهبود دقت کردند، اما وجود نویز اسپکل در تصاویر راداری ممکن است در برخی نواحی باعث ایجاد عدم قطعیت شود. همچنین، برای طبقه‌بندی جزئی‌تر و دقیق‌تر، به داده‌های با قدرت تفکیک مکانی و طیفی بالاتر نیاز است.

در مجموع، روش استفاده‌شده در این پژوهش با بهره‌گیری از توان پردازش ابری، داده‌های چندمنبعه و الگوریتم Random Forest توانست با دقت بالا تغییرات کاربری اراضی در شهر جدید پرند را طی دو دهه پیش کند. با این حال، در توسعه‌های آتی می‌توان با استفاده از داده‌های با وضوح بالاتر، بهبود تکنیک‌های پیش‌پردازش راداری و جمع‌آوری داده‌های مرجع دقیق‌تر، کیفیت نتایج را بیش‌ازپیش افزایش داد.

در این پژوهش، تحلیل تغییرات علاوه بر مقایسه مساحت کلاس‌ها، به‌صورت آشکارسازی تغییر دودویی مناطق ساخته‌شده نیز انجام شد؛ به‌گونه‌ای که پهنه‌های رشد و کاهش شهری بین دو دوره استخراج و مساحت آن‌ها محاسبه گردید. بدیهی است به‌کارگیری ماتریس تغییرات چندکلاسه و شاخص‌های فضایی توسعه می‌تواند در مطالعات آینده به درک دقیق‌تر سازوکار تغییرات کمک کند.

نتیجه‌گیری

رشد سریع جمعیت و گسترش کالبدی شهرها در دهه‌های اخیر به یکی از چالش‌های اصلی برنامه‌ریزی شهری تبدیل شده است. مطالعات متعددی در سطح ملی و بین‌المللی به بررسی روند توسعه شهری با استفاده از داده‌های سنجش‌از‌دور پرداخته‌اند. ترکیب داده‌های اپتیکی و راداری به‌عنوان رویکردی نوین برای افزایش دقت طبقه‌بندی معرفی شده است. در این چارچوب، شهر جدید پرند به‌عنوان یکی از نمونه‌های شاخص توسعه شهری در ایران انتخاب گردید تا روند تغییرات آن طی بازه زمانی ۲۰۰۰ تا ۲۰۲۴ بررسی شود.

روش اجرای این پژوهش بدین‌صورت بود که داده‌های چندزمانه Landsat-7 ETM+ (سال ۲۰۰۰) و Sentinel-2 MSI همراه با داده‌های راداری Sentinel-1 GRD (سال ۲۰۲۴) از طریق بستر پردازش ابری Google Earth Engine (GEE) فراخوانی و پردازش شدند. شاخص NDBI برای برجسته‌سازی مناطق ساخته‌شده محاسبه و نقشه‌های دودویی برای دو دوره استخراج گردید. سپس با استفاده از الگوریتم Random Forest، نقشه‌های طبقه‌بندی برای چهار کلاس اصلی شامل پوشش گیاهی، مناطق ساخته‌شده، اراضی بایر و جاده‌ها تولید شدند. برای ارزیابی دقت، از ماتریس خطا (Confusion Matrix) استفاده شد و شاخص‌های Overall Accuracy و Kappa Coefficient محاسبه گردید. خروجی‌ها شامل نقشه‌های طبقه‌بندی‌شده، لایه‌های تغییرات و جداول مساحت کلاس‌ها در دو دوره بودند.

نتایج این پژوهش نشان داد که مساحت مناطق ساخته‌شده از حدود ۳،۶۶ کیلومتر مربع در سال ۲۰۰۰ به بیش از ۱۴،۳۱ کیلومتر مربع در سال ۲۰۲۴ افزایش یافته است. این تغییرات عمدتاً با کاهش اراضی بایر

دریافت که کلاس‌های دیگر ثابت قابل‌قبولی داشته‌اند؛ به‌گونه‌ای که کلاس‌های پوشش گیاهی و جاده‌ها در هر دو دوره با میزان خطای اندک شناسایی شده‌اند که نشان‌دهنده پایداری این کاربری‌هاست. ضریب کاپای بالا (۰،۹۴) در سال ۲۰۲۴ نشان‌دهنده سطح توافق بسیار خوب میان نقشه طبقه‌بندی‌شده و داده‌های مرجع است. بر اساس معیارهای متداول، مقادیر کاپا بین ۰،۸۱ تا ۱،۰۰ بیانگر نتایج بسیار عالی هستند [۳۲].

نتایج به‌دست‌آمده از این پژوهش نشان می‌دهد که رویکرد انتخاب‌شده، یعنی ترکیب داده‌های اپتیکی و راداری در محیط پردازش ابری Google Earth Engine (GEE) و استفاده از الگوریتم Random Forest، عملکرد بسیار مناسبی در شناسایی تغییرات کاربری اراضی و پیش‌رشد شهری داشته است. با این حال، هر رویکردی نقاط قوت و ضعف خاص خود را دارد که در ادامه به‌صورت جامع بررسی می‌شود. از مزایای این روش می‌توان به عواملی مانند قابلیت پردازش ابری و سرعت بالا اشاره کرد. استفاده از Google Earth Engine باعث شد حجم عظیمی از داده‌های ماهواره‌ای بدون نیاز به ذخیره‌سازی محلی و صرف زمان طولانی برای دانلود، پردازش شوند. این مزیت به‌ویژه برای مطالعات چندزمانه که به داده‌های بلندمدت نیاز دارند، بسیار حائز اهمیت است. یکی دیگر از مزیت‌های این روش، استفاده از ترکیب داده‌های اپتیکی و راداری است. ادغام داده‌های Sentinel-1 و Sentinel-2 سبب شد ضعف‌های ذاتی هر کدام پوشش داده شود. داده‌های اپتیکی به شرایط نوری و پوشش ابری حساس‌اند، در حالی که داده‌های راداری مستقل از شرایط جوی هستند. این ترکیب، تفکیک مناطق ساخته‌شده از سایر کلاس‌ها را به میزان چشمگیری بهبود بخشید. همچنین، استفاده از این روش دقت طبقه‌بندی کلاس‌ها را افزایش داد و بهره‌گیری از الگوریتم Random Forest موجب شد که با وجود پیچیدگی طیفی داده‌ها، نتایج با دقت کلی بیش از ۹۵٪ و ضریب کاپای بیش از ۰،۹۴ حاصل شود. این الگوریتم در مدیریت داده‌های چندمنبعه و غیرخطی عملکرد بسیار خوبی دارد. در نهایت، می‌توان به این نکته اشاره کرد که تمامی مراحل در قالب کد در محیط GEE پیاده‌سازی شده و این کد قابلیت استفاده برای سایر مناطق یا دوره‌های زمانی را نیز دارد. این ویژگی، پژوهش حاضر را از نظر قابلیت تکرار و توسعه در آینده برجسته می‌سازد.

در روش‌های سنتی، پردازش تصاویر ماهواره‌ای معمولاً به‌صورت آفلاین و در محیط‌های نرم‌افزاری محلی انجام می‌شود. این فرایند نیازمند دانلود داده‌ها، پیش‌پردازش در رایانه‌های با توان بالا و صرف زمان و منابع قابل توجه است. روش پیشنهادی این پژوهش، با انتقال بار پردازش به محیط ابری و استفاده از داده‌های چندمنبعه، دقت بالاتر و سهولت بیشتری را نسبت به روش‌های سنتی فراهم کرده است. علاوه بر این، استفاده از شاخص NDBI و داده‌های VV/VH سبب شد نقاط ضعف روش‌های مبتنی بر داده تک‌سنجنده کاهش یابد. با این حال، محدودیت‌هایی نیز در این روش وجود دارد. از جمله این محدودیت‌ها می‌توان به تأثیر نویز راداری، محدودیت در تفکیک کلاس‌ها و محدودیت

تعارض منافع

«هیچ گونه تعارض منافع توسط نویسندگان بیان نشده است.»

منابع و مآخذ

[1] United Nations, Department of Economic and Social Affairs, Population Division. World population ageing 2013. New York: United Nations; 2013. Report No.: ST/ESA/SER.A/348.

[2] United Nations, Department of Economic and Social Affairs. World population projected to reach 9.8 billion in 2050 and 11.2 billion in 2100 [Internet]. New York: United Nations; 2017 [cited 2025 Jul 25].

[3] United Nations, Department of Economic and Social Affairs. 68% of the world population projected to live in urban areas by 2050, says UN [Internet]. New York: United Nations; 2018 [cited 2025 Jul 25].

[4] Statistical Center of Iran. Statistical information [Internet]. Tehran: Statistical Center of Iran; [cited 2025 Jul 25].

[5] Ziari K, Yousefi S. A comparative study of population growth indicators in Iranian cities and their geographical neighbors [in Persian]. Urban Economics. 2024;8(2):45–62. doi:10.22108/ue.2024.142370.1292.

[6] Moshfeghi V, Haghghat Naini G, Habibi M. Investigation of the relationship between land use changes and land price in Tehran with emphasis on the approvals of the Article Five Commission [In Persian].

[7] Abdollahi H. A review of the application of satellite images in studying the spatial expansion of cities [in Persian]. The 2nd Conference on Urban Management, Urban Planning and Architecture with an Approach to Urban Economy and Development, Tabriz; 2020.

[8] Hajizadeh Sheikhanlou A, Khavari H, Ramezani M. Analysis of the pattern of urban development, growth, and dispersion using satellite images (Case study: Kashmar city) 2022. [In Persian] <https://doi.org/10.22067/geoh.2022.76794.1231>

[9] Arafteh A, Serajian Maralan M. Improving SVM classification in urban areas using optimal feature selection in GeoEye-1 imagery. The 2nd National Conference on Spatial Information Technology Engineering, Tehran; 2016. [In Persian]

[10] Asgari O, Attarchi S, Nissani Samani N. Evaluation of the efficiency of volunteered geographic information in classifying Sentinel-2 images to identify urban land use changes (Case study: Qazvin city). Journal of Urban Planning Geography Research. 2020; 8(4):889–905. [In Persian] doi:10.22059/jurbangeo.2021.314285.1411

[11] NASA, Scientific Visualization Studio. Urban growth seen from space [Internet]. Greenbelt (MD): NASA Goddard Space Flight Center; 2000 Feb 21 [cited 2025 Jul 25].

[12] Zhang, T., Su, J., Xu, Z., Luo, Y., & Li, J. (2021). Sentinel-2 Satellite Imagery for Urban Land Cover Classification by

از ۱۴۶,۶۶ کیلومتر مربع به ۱۳۴,۵۰ کیلومتر مربع همراه بوده که بیانگر توسعه گسترده شهری طی دو دهه اخیر است. نقشه دامنه تغییرات نیز نشان داد بیشترین رشد شهری در بخش‌های شرقی و جنوبی محدوده پرنده رخ داده است. از نظر ارزیابی دقت، نقشه طبقه‌بندی شده سال ۲۰۲۴ با دقت کلی ۹۵,۹۷٪ و ضریب کاپا ۰,۹۴۴۴، نسبت به نقشه سال ۲۰۰۰ (دقت کلی ۸۹,۰۶٪ و ضریب کاپا ۰,۸۲) عملکرد بسیار بهتری داشته است. این نتایج صحت بالای روش پیشنهادی را تایید می‌کند. این پژوهش نشان داد که استفاده از داده‌های چندزمانه و ترکیب داده‌های اپتیکی و راداری در کنار الگوریتم‌های یادگیری ماشین مانند Random Forest می‌تواند ابزاری کارآمد برای پیش و تحلیل تغییرات کاربری اراضی باشد. به‌کارگیری محیط پردازش ابری Google Earth Engine نیز موجب شد پردازش‌ها با سرعت بالا و بدون محدودیت ذخیره‌سازی انجام شوند. نتایج به‌دست‌آمده حاکی از توسعه قابل‌توجه مناطق ساخته‌شده در شهر جدید پرنده است که با سیاست‌های توسعه مسکن و زیرساخت‌های ملی هم‌خوانی دارد. این یافته‌ها می‌توانند به‌عنوان ورودی ارزشمند در برنامه‌ریزی‌های شهری و مدیریت توسعه پایدار مورد استفاده قرار گیرند.

تفاوت سنجنده‌ای (رزولوشن و پاسخ طیفی) یکی از منابع عدم قطعیت در تحلیل تغییرات است. هرچند محاسبات مساحتی بر روی مقیاس مشترک انجام شد، اما به‌ویژه در کلاس‌های باریک مانند جاده‌ها و مرزهای شهری، اثر رزولوشن می‌تواند باعث بیش‌برآورد/کم‌برآورد شود؛ بنابراین در تفسیر نتایج مربوط به کلاس‌های حساس به رزولوشن، به‌ویژه جاده‌ها و نواحی مرزی، احتیاط لازم رعایت می‌شود.

پیشنهادات

برای انجام تحقیقاتی مشابه این پژوهش، پیشنهاد می‌شود از داده‌های بیشتر و متنوع‌تر استفاده شود. بهره‌گیری از داده‌های ماهواره‌ای با قدرت تفکیک مکانی بالا مانند QuickBird یا WorldView برای تفکیک بهتر کلاس‌های جزئی‌تر مناسب است و می‌تواند دقت طبقه‌بندی را افزایش دهد.

همچنین، با گردآوری داده‌های زمینی دقیق‌تر و به‌روزتر می‌توان کیفیت ارزیابی دقت را بهبود داد؛ چراکه داده‌های مرجع دقیق‌تر تاثیر مثبتی بر افزایش صحت نهایی نتایج خواهند داشت.

این پژوهش را می‌توان در بازه‌های زمانی کوتاه‌تر نیز بررسی کرد تا الگوهای جزئی‌تری از نحوه رشد شهر پرنده مشخص شود. علاوه‌براین، استفاده از الگوریتم‌های دیگر مانند SVM یا ترکیب چند مدل می‌تواند به مقایسه عملکرد و انتخاب مدل بهینه کمک کند.

مشارکت نویسندگان

در این مقاله نویسندگان به نسبت برابر مشارکت داشته‌اند.

تشکر و قدردانی

نویسندگان مقاله از تمامی عزیزانی که در این تحقیق همکاری داشته‌اند کمال قدردانی و سپاس خود را اعلام می‌نمایند.

estimations from scatterometer data. *IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing*, 11(10), 3668-3679.

<http://dx.doi.org/10.1109/JSTARS.2018.2865185>

[25] Zhao, Q., Yu, L., Li, X., Peng, D., Zhang, Y., & Gong, P. (2021). Progress and trends in the application of Google Earth and Google Earth Engine. *Remote Sensing*, 13(18), 3778. <https://doi.org/10.3390/rs13183778>

[26] Zheng, Y., Tang, L., & Wang, H. (2021). An improved approach for monitoring urban built-up areas by combining NPP-VIIRS nighttime light, NDVI, NDWI, and NDBI. *Journal of cleaner production*, 328, 129488. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2021.129488>

[27] Geudtner, D., Torres, R., Snoeij, P., Davidson, M., & Rommen, B. (2014, July). Sentinel-1 system capabilities and applications. In 2014 IEEE geoscience and remote sensing symposium (pp. 1457-1460). IEEE. <http://dx.doi.org/10.1109/IGARSS.2014.6946711>

[28] Haas, J., & Ban, Y. (2017). Sentinel-1A SAR and sentinel-2A MSI data fusion for urban ecosystem service mapping. *Remote Sensing Applications: Society and Environment*, 8, 41-53. <http://dx.doi.org/10.1016/j.rsase.2017.07.006>

[29] Parmar A, Katariya R, Patel V. A review on random forest: An ensemble classifier. In International conference on intelligent data communication technologies and internet of things 2018 Aug 7 (pp. 758-763). Cham: Springer International Publishing. http://dx.doi.org/10.1007/978-3-030-03146-6_86

[30] Random Forest Algorithm Overview (H. A. Salman, A. Kalakech, & A. Steiti, Trans.). (2024). *Babylonian Journal of Machine Learning*, 2024, 69-79. <https://doi.org/10.58496/BJML/2024/007>

[31] Gašparović, M., & Jogun, T. (2018). The effect of fusing Sentinel-2 bands on land-cover classification. *International journal of remote sensing*, 39(3), 822-841. <http://dx.doi.org/10.1080/01431161.2017.1392640>

[32] Rwanga, S. S., & Ndambuki, J. M. (2017). Accuracy assessment of land use/land cover classification using remote sensing and GIS. *International Journal of Geosciences*, 8(04), 611. <http://dx.doi.org/10.4236/ijg.2017.84033>

معرفی نویسندگان

AUTHOR(S) BIOSKETCHES



فاطمه ربیعی دارای مدرک کارشناسی مهندسی نقشه برداری بوده . هم اکنون دانشجوی کارشناسی ارشد رشته مهندسی نقشه برداری گرایش فنوگرامتری در دانشکده مهندسی عمران ، آب و محیط زیست دانشگاه شهیدبهشتی شهر تهران ورودی سال ۱۴۰۳ می باشد. ایشان در حوزه پوشش گیاهی دارای چندین مقاله کنفرانسی داخلی بوده است.

Optimized Random Forest Classifier. *Applied Sciences*, 11(2), 543. <https://doi.org/10.3390/app11020543>

[13] Hu, B., Xu, Y., Huang, X., Cheng, Q., Ding, Q., Bai, L., & Li, Y. (2021). Improving Urban Land Cover Classification with Combined Use of Sentinel-2 and Sentinel-1 Imagery. *ISPRS International Journal of Geo-Information*, 10(8), 533. <https://doi.org/10.3390/ijgi10080533>

[14] Shamaei S, Shahsavari S. Evaluation of quality of life in new towns (Case study: the new town of Parand). *Geographical Sarzamin*. 2017 Jun 22;14(54):1-16. [In Persian]

[15] Rezaei M, Mouzan S, Nafar N. Analysis of satisfaction with environmental quality indicators in new towns (Case study: the new town of Parand) [in Persian]. *Journal of Urban Planning Geography Research*. 2014 Apr 21;2(1):31-47. <https://doi.org/10.22059/jurbangeo.2014.51481>

[16] Maryam Soufi, Fatemeh Aziz Abadi Farahani, Ebrahim Hajiani, Sayed Reza Salehi Amiri, Designing a Framework for an Optimal Urban Identity Case Study: Parand New City, *Journal of Management and Development Process*, 2021; 34(1): 141-162.

[17] Kamyar M, Taghvaei A. Urban social crisis management through suitable housing design: Case study of Parand, Tehran [In Persian]. *Crisis Management Journal*. 2012;1(1):45-49.

[18] Mansourian A, Khazaei H, Shariatpanahi S, Moshfegh P. Factors affecting the increase of megacity populations from the perspective of experts: Case study of Tehran [in Persian]. *Interdisciplinary Studies in the Humanities Quarterly*. 2015 May 22;8(1):21-44. <https://doi.org/10.7508/isih.2016.29.002>

[19] Khalaji S, Saba A. Effects of land use change on land use planning. *Journal of Space and Place Research*. 2021;19(1):5-18. [In Persian]

[20] Goward, S. N., Masek, J. G., Williams, D. L., Irons, J. R., & Thompson, R. J. (2001). The Landsat 7 mission: Terrestrial research and applications for the 21st century. *Remote Sensing of Environment*, 78(1-2), 3-12. [https://doi.org/10.1016/S0034-4257\(01\)00262-0](https://doi.org/10.1016/S0034-4257(01)00262-0)

[21] Roy, D. P., Kovalskyy, V., Zhang, H. K., Vermote, E. F., Yan, L., Kumar, S. S., & Egorov, A. (2016). Characterization of Landsat-7 to Landsat-8 reflective wavelength and normalized difference vegetation index continuity. *Remote sensing of Environment*, 185, 57-70. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2015.12.024>

[22] Frantz, D. (2019). FORCE—Landsat+ Sentinel-2 analysis ready data and beyond. *Remote Sensing*, 11(9), 1124. <https://doi.org/10.3390/rs11091124>

[23] Lefebvre, A., Sannier, C., & Corpetti, T. (2016). Monitoring urban areas with Sentinel-2A data: Application to the update of the Copernicus high resolution layer imperviousness degree. *Remote Sensing*, 8(7), 606. <https://doi.org/10.3390/rs8070606>

[24] Greifeneder, F., Notarnicola, C., Hahn, S., Vreugdenhil, M., Reimer, C., Santi, E., ... & Wagner, W. (2018). The added value of the VH/VV polarization-ratio for global soil moisture

می‌باشد. در حال حاضر ایشان بیش از ۱۰۰ مقاله علمی در مجلات و کنفرانس‌های علمی ارائه نموده‌اند و همچنین در کمیته علمی و داوری بیش از ۴۰ مجله و کنفرانس علمی ملی و بین‌المللی فعالیت داشته‌اند. زمینه‌های تخصصی ایشان عبارتند از: پردازش تصاویر فراطیفی و راداری، هوش مصنوعی در اطلاعات مکانی، توسعه کاربردهای سنجش از دور.

Sharifi, A. Associate Professor at the Department of Geoinformation and Geomatics Engineering, Faculty of Civil, Water and Environmental Engineering, Shahid Beheshti University, Tehran, Iran

✉ a_sharifli@sbu.ac.ir



سعید صادقیان دانشیار دانشکده مهندسی عمران، آب و محیط زیست دانشگاه شهید بهشتی دارای مدرک دکتری از دانشگاه تهران در رشته مهندسی نقشه برداری گرایش فتوگرامتری وی علاوه بر تدریس دانشگاه دارای سوابق علمی و اجرایی بسیاری است او به عنوان عضو هیات تحریریه نشریه علمی پژوهش‌های سنجش از دور و اطلاعات مکانی و تجربه ریاست آموزشکده نقشه برداری سازمان نقشه برداری کشور رانیز دارند جوایز و افتخارات ایشان شامل پژوهشگر برگزیده کشوری و دریافت لوح تقدیر وزیر علوم، تحقیقات و فناوری در سال‌های ۱۳۸۸، ۱۳۸۳، ۱۳۸۱ است.

Sadeghian, S. Associate Professor at the Department of Geoinformation and Geomatics Engineering, Faculty of Civil, Water and Environmental Engineering, Shahid Beheshti University, Tehran, Iran

✉ sa_sadeghian@sbu.ac.ir

Rabiee, F. Department of Geoinformation and Geomatics Engineering, Faculty of Civil, Water and Environmental Engineering, Shahid Beheshti University, Tehran, Iran

✉ fat.rabiee@sbu.ac.ir



سینا ادیب‌زاده دارای مدرک کارشناسی مهندسی نقشه برداری بوده و هم‌اکنون دانشجوی کارشناسی ارشد رشته مهندسی نقشه‌برداری گرایش فتوگرامتری در دانشکده مهندسی عمران، آب و محیط زیست دانشگاه شهیدبهشتی شهر تهران ورودی سال ۱۴۰۳ می‌باشد. ایشان در حوزه میراث فرهنگی و حفاظت از آثار تاریخی دارای چندین مقاله کنفرانسی داخلی بوده است.

Adibzadeh, S. Department of Geoinformation and Geomatics Engineering, Faculty of Civil, Water and Environmental Engineering, Shahid Beheshti University, Tehran, Iran

✉ s.adibzadeh@sbu.ac.ir



علیرضا شریفی دانشیار گروه مهندسی نقشه‌برداری در دانشکده مهندسی عمران دانشگاه شهید بهشتی می‌باشند. ایشان مدرک کارشناسی ارشد و دکتری خود را در رشته مهندسی نقشه‌برداری-سنجش از دور بترتیب در سال‌های ۱۳۸۷ و ۱۳۹۴ از دانشگاه تهران دریافت نمودند. فعالیت‌های

پژوهشی اخیر وی در حوزه کاربرد یادگیری عمیق در پردازش تصویر فراطیفی و همچنین کاربردهای سنجش از دور در پایش تغییرات اقلیمی، کشاورزی، مدیریت جنگل‌ها، مدیریت کاربری و پوشش اراضی و مدل‌سازی محیطی با استفاده از کلان داده‌های سنجش از دور

Citation (Vancouver): Rabiee F, Adibzadeh S, Sharifi A, Sadeghian S. [Assessment and analysis of urban expansion in Parand over the past two decades using Sentinel-2 and Landsat-7 satellite imagery]. *J. RS. GEOINF. RES.* 2026; 4(1): 71-82

doi <https://doi.org/10.22061/jrsgr.2026.12623.1115>



COPYRIGHTS

© 2026 The Author(s). This is an open-access article distributed under the terms and conditions of the Creative Attribution-NonCommercial 4.0 International (CC BY-NC 4.0) (<https://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/>)

