

دو فصلنامه علمی نشریه پژوهش های سنجش از دور و اطلاعات مکانی



دوره ۳، شماره ۲، تابستان و پاییز ۱۴۰۴

نشریه پژوهش های سنجش از دور و اطلاعات مکانی

دوره ۳ شماره ۲، تابستان و پاییز ۱۴۰۴

Journal of Remote Sensing and Geoinformation Research



Volume 3, Issue 2, Summer & Autumn 2025

نشریه علمی پژوهش‌های سنجش از دور و اطلاعات مکانی

دوره ۳، شماره ۲، تابستان و پاییز ۱۴۰۴

صاحب امتیاز:	دانشگاه تربیت دبیر شهید رجائی
مدیر مسئول:	دکتر علیرضا شریفی
سر دبیر:	پروفسور موسی مظلوم
مدیر اجرایی:	دکتر فرهاد حسینیعلی
ویراستار فارسی:	دکتر صادق حامدی نسب
ویراستار انگلیسی:	دکتر صادق حامدی نسب
مدیر داخلی و مدیر پایگاه:	دکتر فرهاد حسینیعلی

هیأت تحریریه:

پروفسور عباس علیمحمدی	دانشکده مهندسی ژئودزی و ژئوماتیک، دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی
پروفسور جلال امینی	دانشکده مهندسی نقشه برداری و اطلاعات مکانی، دانشگاه تهران
پروفسور محمد طالعی	دانشکده مهندسی ژئودزی و ژئوماتیک، دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی
پروفسور موسی محمودی صاحبی	دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه تربیت دبیر شهید رجائی
دکتر محمد شریفی کیا	دانشکده علوم انسانی، دانشگاه تربیت مدرس
دکتر علیرضا وفائی نژاد	دانشکده مهندسی عمران، آب و محیط زیست، دانشگاه شهید بهشتی
دکتر فرهاد حسینیعلی	دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه تربیت دبیر شهید رجائی

لیتوگرافی و چاپ: دانشگاه تربیت دبیر شهید رجائی

ناشر: انتشارات دانشگاه تربیت دبیر شهید رجائی

طرح جلد: محمد معتمدی نژاد

صفحه آرا: نیره فیروزی

نشانی: تهران- لویزان- خیابان شهید شعبانلو- دانشگاه تربیت دبیر شهید رجائی

صندوق پستی: ۱۶۷۸۵-۱۶۳ کد پستی: ۱۵۸۱۱-۱۶۷۸۸

تلفن: ۲۲۹۷۰۰۶۰-۹ داخلی ۲۵۹۸ فکس: ۲۲۹۷۰۰۷۰

وب سایت: www.sru.ac.ir

وب سایت اختصاصی: <http://jrsg.sru.ac.ir>

پست الکترونیکی: jrsg@sru.ac.ir

نشریه پژوهش‌های سنجش از دور و اطلاعات مکانی با صاحب امتیازی دانشگاه تربیت دبیر شهید رجائی بر اساس آیین‌نامه نشریات علمی مصوب ۱۳۹۸/۰۲/۰۹ در ارزیابی سال ۱۴۰۲، موفق به کسب رتبه (ب) شده است.

نشریه علمی پژوهش‌های نقش از دور و اطلاعات مکانی

دوره ۳، شماره ۲، تابستان و پاییز ۱۴۰۴

۲۰۱-۲۱۸	ارزیابی دقت توجیه مستقیم تصاویر گوشی‌های هوشمند در روش ویدئوگرامتری مهران شفیعی، اصغر میلان، علیرضا وفائی‌نژاد
۲۱۹-۲۳۴	استخراج نقشه دوبعدی فضاهاى داخلی ساختمان با روش‌های یادگیری عمیق از ابرنقاط لیزر اسکندرهای همراه مرتضی حیدری مظفر، زهرا دالوند
۲۳۵-۲۵۶	مروری نظام‌مند بر روش‌های یادگیری ماشین در شناسایی تغییرات تصاویر راداری و اپتیکی با تمرکز بر یادگیری عمیق محمد رضا زرگر، امیر آقابالائی، صفا خزائی، علی مهدی
۲۵۷-۲۷۰	بهینه سازی چند هدفه جانمایی دوربین مدار بسته با استفاده از الگوریتم‌های هوش مصنوعی حسن صانعی آرانی، مهدی اسماعیلی، محمد علی افشار کاظمی
۲۷۱-۲۸۶	مدلسازی سه بعدی شیرقلعه شهرمیرزا با استفاده از فتوگرامتری پهپاد مبنای رویکرد مستندسازی، حفاظت، مرمت و تعیین حریم میراث فرهنگی ابوالفضل شهباسواری بابوکانی، سعید صادقیان، علیرضا وفائی‌نژاد، داود صدیق پور
۲۸۷-۲۹۵	تغییرات کاربری اراضی با استفاده از پردازش تصاویر ماهواره ای و سامانه‌های اطلاعات جغرافیایی در استان گیلان، ایران شیلان فعله‌گری، کامران مروج، علیرضا شریفی، احمد گلچین، پرویز کرمی
۲۹۷-۳۰۶	طراحی و توسعه سامانه اطلاعات مکانی تحت وب برای انتخاب هوشمند شعبه بانک با استفاده از الگوریتم‌های تصمیم‌گیری چندمعیاره آرمین پوربیک، جواد صابریان، سید محمد سینا سید محسنی
۳۰۷-۳۲۰	مطالعه و بررسی پیاده سازی معماری سرویس گرا برای زیر ساخت داده های مکانی در مدیریت شهری حسین بازعلی پور، غلامرضا فلاحی

۳۲۱-۳۲۲	تحلیل و پایش فرونشست زمین در نواحی شرقی شیراز با استفاده از تکنیک DInSAR پرستو برزآبادی، افسانه رزاقپور، مهدی اصلانی، علیرضا شریفی
۳۴۴-۳۳۳	پایش انتشار متان در ایران با استفاده از داده‌های ماهواره Sentinel-P5: تحلیل روند انتشار و شناسایی منابع بحرانی (۲۰۲۳-۲۰۱۹) بهناز بابائی، رضا دوستی، اسلام جوادنیا، سینا کیائی، امیرحسین عبدی، حشمت کرمی
۳۴۵-۳۶۲	طراحی و توسعه سیستم هوشمند پشتیبان تصمیم‌گیری مکانی مبتنی بر وب برای بهینه‌سازی تخصیص مراکز توزیع محلی پاسخ به بلایا امیر پروینی، علی اصغر آل شیخ
۳۶۳-۳۷۸	آشکارسازی تغییرات سه‌بعدی در مناطق شهری با استفاده از مدل UNet++ علیرضا ابراهیمی، مهدی حسنلو



ORIGINAL RESEARCH PAPER

Accuracy assessment of direct georeferencing of smartphone's images in videogrammetry method

M. Shafiei, A. Milan*, A. Vafaeinejad

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

ABSTRACT

Received: 13 February 2025
 Reviewed: 21 May 2025
 Revised: 03 July 2025
 Accepted: 20 August 2025

KEYWORDS:

Smart Phone
 Direct Georeferencing
 Close Range Photogrammetry
 Structure From Motion

* Corresponding author

✉ a_milan@sbu.ac.ir

☎ (+9821) 73932456

Background and Objectives: The integration of imaging technologies with geolocation sensors such as GPS, accelerometers, gyroscopes, and compasses enables precise determination of the camera's position and orientation during image capture. This capability plays a crucial role in simplifying the georeferencing process of 3D models, particularly in mobile mapping systems and short-range terrestrial applications. In this context, smartphones, equipped with these geolocation sensors, have gained significant prominence as imaging devices. This study examines the feasibility of direct georeferencing of 3D models generated through Structure-from-Motion (SFM) photogrammetry using camera position and orientation data simultaneously recorded by the sensors embedded in a smartphone.

Methods: The research data comprises ground control points collected using a Leica TS09 R1000 total station in reflector less mode, along with data obtained from an iPhone 13 Pro smartphone. In the proposed method, the relative orientation parameters estimated by the Structure-from-Motion algorithm were refined using orientation parameters directly measured by the smartphone's motion sensors. Image acquisition was conducted under static conditions; therefore, the estimated and measured angles at each station should remain constant and, in the absence of errors, should be identical. The final model was oriented using the average of the measured angles at each station. The measured distance was then used to establish the model scale, and the average coordinates obtained at each station were employed to transform the model into the UTM coordinate system. Additionally, an alternative model was generated using the precise positions of the imaging stations via indirect georeferencing. The RMSE of the check points was used as the accuracy assessment metric for the proposed method.

Findings: The studied stockpile was approximately 150 meters in length and 25 meters in height, oriented roughly from south to north. In this study, five 3D models were generated based on the collected data. The first model was constructed solely using images, positional data, and angles recorded by the smartphone's sensors. Subsequently, coded targets were incrementally added as control points, with one, two, and three control points being incorporated into the equations. The fifth model was generated using the same images but with the precise coordinates of twelve imaging stations measured by a total station. In the first model, the positioning error remained at the accuracy level of the iOS single-point positioning system (approximately 2 meters in planimetric accuracy and 11 meters in height). In the model with a single control point, aligning the model with the low-accuracy GPS coordinates from the smartphone resulted in an azimuth calculation error, leading to model rotation. Although the model was correctly transferred, the azimuth error caused a misalignment with the reference system, resulting in an error of approximately 0.40 meters. With the addition of two and three control points, accuracy improved, reaching 0.004 meters, which matched the accuracy achieved using precise camera center coordinates. In the fifth case, where the exact coordinates of the imaging stations were used, an accuracy of 0.0007 meters was obtained.

Conclusion: As observed, GPS accuracy remains the most challenging aspect of this system. Most smartphones do not provide raw GNSS data or high-quality raw positioning data; instead, they only offer the final processed position determined by the operating system. Given the hardware and environmental limitations, the following considerations are recommended for future studies:

- a) Development of a handheld mobile mapping system by integrating survey-grade GPS with a smartphone camera.
- b) Since the study area consists of earthwork features with irregular shapes, when applying this method to structured objects such as buildings, it is recommended to refine the relative exterior orientation parameters of images using constraints derived from prominent vertical and horizontal features in the scene and incorporating them into the bundle adjustment process.



NUMBER OF REFERENCES

43



NUMBER OF FIGURES

8



NUMBER OF TABLES

5

مقاله پژوهشی

ارزیابی دقت توجیه مستقیم تصاویر گوشی‌های هوشمند در روش ویدئوگرامتری

مهران شفيعی، اصغر میلان*، علیرضا وفائی‌نژاد

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

چکیده

پیشینه و اهداف: ادغام فناوری‌های تصویربرداری با حسگرهای مکان‌نگاری نظیر GPS، شتاب‌سنج، ژيروسکوپ و قطب‌نما، امکان تعیین دقیق وضعیت و موقعیت دوربین در هنگام تصویربرداری را فراهم کرده است. این قابلیت، به‌ویژه در سامانه‌های نقشه‌برداری سیار و کاربردهای برد کوتاه زمینی، نقش کلیدی در ساده‌سازی فرآیند ارجاع جغرافیایی مدل‌های سه‌بعدی ایفا می‌کند. در این میان، تلفن‌های هوشمند به‌عنوان دوربین‌هایی مجهز به این حسگرهای مکان‌نگار، جایگاهی ویژه پیدا کرده‌اند. در این مطالعه، قابلیت ارجاع جغرافیایی مستقیم مدل سه‌بعدی حاصل از روش فتوگرامتری ساختار ناشی از حرکت با استفاده از داده‌های موقعیت و وضعیت دوربین که به‌صورت همزمان توسط حسگرهای موجود در گوشی هوشمند اندازه‌گیری شده‌اند، بررسی شده است.

روش‌ها: داده‌های پژوهش شامل نقاط برداشت شده با استفاده از توتال‌استیشن Leica TS09 R1000 در حالت بدون منشور، همراه با داده‌های جمع‌آوری شده به‌وسیله تلفن هوشمند iPhone 13 Pro است. در روش پیشنهادی، پارامترهای جهت‌گیری نسبی که در الگوریتم ساختار ناشی از حرکت تخمین زده شده‌اند، با استفاده از پارامترهای جهت‌گیری که مستقیماً از طریق حسگرهای حرکتی تلفن هوشمند اندازه‌گیری شده‌اند، اصلاح گردید. عکسبرداری در شرایط ایستای انجام شد، بنابراین زوایای تخمینی و اندازه‌گیری شده در هر ایستگاه باید دارای مقداری ثابت و در صورت عدم وجود خطاها با هم برابر باشند. برای جهت دهی مدل نهایی، از میانگین زوایای اندازه‌گیری شده در هر ایستگاه استفاده شد. سپس، طول اندازه‌گیری شده با متر برای تعیین مقیاس مدل و میانگین مختصات به‌دست آمده در هر ایستگاه جهت انتقال مدل به سیستم مختصات UTM به‌کار رفت. همچنین یک مدل با استفاده از موقعیت دقیق ایستگاه‌های عکسبرداری به روش ارجاع جغرافیایی غیرمستقیم تولید و RMSE نقاط چک مبنای ارزیابی دقت روش پیشنهادی قرار گرفت.

یافته‌ها: دپو مورد مطالعه حدود ۱۵۰ متر طول و ۲۵ متر ارتفاع داشت و جهت آن تقریباً جنوب به شمال بود. در این مطالعه پنج مدل سه‌بعدی بر اساس داده‌های جمع‌آوری شده تولید گردید. مدل اول صرفاً با استفاده از تصاویر، داده‌های موقعیتی، و زوایای ثبت شده توسط حسگرهای تلفن هوشمند ساخته شد و در ادامه به‌ترتیب ۱، ۲ و ۳ نشانگر کددار به‌عنوان نقطه کنترل به معادلات اضافه شد. مدل پنجم بر پایه همان تصاویر اما با مختصات دقیق دوازده ایستگاه عکسبرداری که با توتال‌استیشن اندازه‌گیری شده بودند تولید گردید. در مدل اول میزان خطا همچنان در حد دقت تعیین موقعیت تک نقطه‌ای سیستم iOS (حدود ۲ متر مسطحاتی و ۱۱ متر ارتفاعی) باقی ماند. در مدل با استفاده از یک نقطه کنترل، تطبیق مدل با مختصات کم‌دقت GPS گوشی هوشمند باعث ایجاد خطا در محاسبه ژیزمان و در نتیجه چرخش مدل گردید. اگرچه انتقال مدل به‌درستی انجام شد، اما به‌دلیل چرخش ناشی از خطای ژیزمان، مدل نسبت به سیستم مرجع زاویه دار شده و تطابق کامل حاصل نشد و خطای حدود ۰/۴۰ متر ایجاد کرد. در ادامه با افزایش تعداد نقاط کنترل

تاریخ دریافت: ۲۵ بهمن ۱۴۰۳
تاریخ داوری: ۳۱ اردیبهشت ۱۴۰۴
تاریخ اصلاح: ۱۲ تیر ۱۴۰۴
تاریخ پذیرش: ۲۹ مرداد ۱۴۰۴

واژگان کلیدی:

تلفن هوشمند
ارجاع جغرافیایی مستقیم
فتوگرامتری برد کوتاه
ساختار ناشی از حرکت

* نویسنده مسئول

a_milan@sbu.ac.ir
۰۲۱-۷۳۹۳۲۴۵۶

به ۲ و ۳ دقت نیز افزایش و به ۰/۰۰۴ متر و برابر با حالت استفاده از مختصات دقیق مراکز دوربین رسید. همچنین در حالت پنجم یعنی استفاده از مختصات دقیق مراکز ایستگاه‌ها دقت ۰/۰۰۷ متر حاصل شد.

نتیجه‌گیری: همانطور که مشاهده شد، دقت GPS همچنان چالش برانگیزترین بخش این سیستم است. بیشتر تلفن‌های هوشمند، به جای ارائه داده‌های خام یا داده‌های خام با کیفیت GNSS، تنها موقعیت نهایی پردازش شده توسط سیستم عامل را در اختیار کاربر قرار می‌دهند. با توجه به محدودیت‌های سخت‌افزاری و محیطی مطالعه پیشنهاد می‌شود، توسعه یک سیستم نقشه‌برداری متحرک دستی از طریق ادغام GPS نقشه‌برداری و دوربین تلفن هوشمند در مطالعات بعدی مورد توجه قرار گیرد همچنین با توجه به اینکه در مطالعه عملیات خاکی عوارض با اشکال منظم وجود ندارد اما هنگام استفاده از این روش در مواجهه با عوارض با اشکال هندسی منظم مانند ساختمان‌ها پیشنهاد می‌شود، اصلاح پارامترهای جهت‌گیری خارجی نسبی تصاویر با استفاده از محدودیت‌های ویژگی‌های موجود در صحنه (ویژگی‌های عمودی و افقی بارز) و تلفیق آن در باندل‌اجستمنت مورد مطالعه قرار گیرد.

مقدمه

پیشرفت فناوری در دهه گذشته، شیوه گردآوری و نمایش داده‌ها را به‌طور چشم‌گیری متحول کرده و منجر به انقلابی در علم نقشه‌برداری شده است [۲،۱]. روش‌های نقشه‌برداری رقومی با بهره‌گیری از انواع تصاویر و مدل‌های ارتفاعی رقومی، بستری را برای تفسیر ویژگی‌های زمین در مقیاس بزرگ فراهم کرده‌اند. توسعه روش‌های فتوگرامتری امکان ساخت مدل‌های سه‌بعدی واقع‌گرایانه با وضوح بالا از توپوگرافی زمین را به‌سادگی ایجاد کرده و تصاویری بی‌سابقه از سطح زمین ارائه می‌دهد [۳]. در واقع، وضوح مدل در درجه اول توسط فاصله نمونه‌برداری زمینی تصاویر تعیین می‌شود، در حالی که دقت آن به روش ارجاع جغرافیایی وابسته است. با این حال، همخوانی این مدل‌ها از نظر هندسی و ارجاع جغرافیایی با زمین طبیعی برای متمر ثمر بودن در جوامع علمی و مهندسی ضروری است.

دستیابی به این مهم نیازمند اندازه‌گیری و یا برآورد دقیق پارامترهای توجیه داخلی و خارجی دوربین است. فتوگرامتری ساختار ناشی از حرکت مبتنی بر بینایی کامپیوتر به‌صورت خودکار و هم‌زمان پارامترهای توجیه داخلی و خارجی دوربین را از طریق خودکالیبراسیون و هندسه صحنه، با استفاده از فرآیند تطبیق تصویر و باندل‌اجستمنت در چارچوب مرجع مدل برآورد می‌نماید. الگوریتم SIFT با تغییر رویکرد تشخیص نقاط گرهی، امکان تطبیق تصاویر با مقیاس و دوران‌های مختلف را فراهم کرده و باعث انعطاف‌پذیری بیشتر در جمع‌آوری داده‌ها شده است [۴،۵]. باندل‌اجستمنت در فتوگرامتری ساختار ناشی از حرکت بر اساس معادلات شرط هم‌خطی و به‌صورت هم‌زمان با استفاده از همه تصاویر انجام و منجر به برآورد موقعیت سه‌بعدی نقاط تصویر، پارامترهای توجیه داخلی و خارجی دوربین در چارچوب مرجع مدل می‌شود. انتقال نقاط از چارچوب مرجع مدل به مرجع محلی یا جهانی از طریق یک تبدیل هندسی شامل دوران، مقیاس و انتقال با دو روش ارجاع غیر مستقیم (استفاده از نقاط کنترل زمینی، نقاطی که موقعیت آنها از طریق روش‌های ژئودتیک به‌دقت تعیین شده است و یا استفاده از یک سطح مرجع انجام می‌پذیرد [۶،۷]) و ارجاع مستقیم (استفاده از پارامترهای توجیه خارجی دوربین، شامل موقعیت و وضعیت دوربین در لحظه عکسبرداری [۸]) انجام می‌شود. در روش اول نوع، تراکم، توزیع

و دقت تعیین موقعیت نقاط کنترل زمینی به‌شدت بر کیفیت مدل نهایی اثرگذار است [۹-۱۱]. از این رو بسیاری از مطالعات پیشین به بهینه‌سازی شبکه نقاط کنترل از طریق تغییر تراکم و توزیع مکانی آنها و بهینه‌سازی مسیری و پیکربندی شبکه تصویربرداری پرداخته‌اند [۱۲،۱۳]. در عمل نشانه‌گذاری و تعیین موقعیت یک شبکه نقاط کنترل زمینی و شناسایی آنها بر روی تصاویر فرآیندی سخت، پرهزینه و زمان‌بر است [۱۴].

در روش دوم موقعیت دوربین در لحظه تصویربرداری معمولاً با استفاده از ابزارهای نقشه‌برداری ژئودتیک تعیین می‌شود در حالی که اطلاعات مربوط به وضعیت دوربین می‌تواند توسط یک واحد اندازه‌گیری اینرسی فراهم و یا از طریق نقاط گرهی در باندل‌اجستمنت تخمین زده شود. ترکیب این دو نوع حسگر ارجاع جغرافیایی مستقیم را از طریق اندازه‌گیری موقعیت و وضعیت دوربین در زمان اخذ تصویر امکان‌پذیر ساخته است [۱۵]. این روش در سال‌های اخیر به لطف در دسترس بودن گیرنده‌های GNSS با دقت بالا (چند فرکانسه با قیمت مناسب) و حسگرهای اندازه‌گیری اینرسی به کرات در فتوگرامتری با پهپاد آزمایش، توسعه و بهبود یافته است. اساساً، دقت این روش به مشخصات فنی حسگرهای به‌کار رفته در سیستم پهپاد مانند دوربین‌های رقومی، گیرنده‌های سامانه‌های ناوبری جهانی، اجزای واحد اندازه‌گیری اینرسی و نیز روش‌های اندازه‌گیری بستگی دارد [۱۶،۱۷]. روش‌های کینماتیک آنی، شبکه کینماتیک آنی، یا کینماتیک پس پردازش برای ارجاع جغرافیایی مستقیم داده‌ها می‌تواند مورد استفاده قرار گیرد، هر سه این روش‌ها به‌صورت نظری امکان دستیابی به دقت سانتی‌متر را فراهم می‌کنند و مطالعات متعددی در زمینه کاربرد این روش‌ها در حوزه فتوگرامتری پهپاد و برد کوتاه زمینی انجام شده است [۱۸-۲۰]. امروزه بسیاری از ابزارهای حرفه‌ای نقشه‌برداری و فتوگرامتری، مانند دوربین رقومی، گیرنده GPS/GNSS، حسگرهای اینرسی ژيروسکوپ‌ها، شتاب‌سنج‌ها و مغناطیس‌سنج‌ها در تلفن‌های هوشمند نیز گنجانده شده است. اما این حسگرها در مقایسه با ابزارهای تخصصی دارای محدودیت‌های فنی مشخصی هستند که دقت و پایداری اندازه‌گیری‌ها را تحت تأثیر قرار می‌دهد. گیرنده‌های GPS/GNSS مورد استفاده در اکثر گوشی‌های هوشمند فعلی مانند آیفون، سامسونگ و HTC دقت

نائف الصوبائی و همکارانش در سال ۲۰۱۷ به بررسی بهبود دقت ارجاع جغرافیایی مستقیم مدل سه بعدی حاصل از فتوگرامتری تلفن هوشمند از طریق ادغام جهت گیری نسبی تصاویر، اندازه گیری های حسگر حرکتی و قیود صحنه در فرآیند باندل اجستمنت پرداختند [۲۴]. در این مطالعه از تلفن iPhone 6 و اندازه گیری های حسگر حرکتی مربوطه برای جمع آوری یک شبکه تصویری متشکل از هجده عکس و بیست و پنج نقطه کنترل با توزیع مناسب بر روی نمای یک ساختمان کوچک در یک منطقه شهری چالش برانگیز برای GPS از نظر وجود ساختمان های بلند و وجود اجسام فلزی استفاده شده است. زوایای توجیه خارجی با دقت ۳۰ ثانیه کمانی و مختصات ۲۵ نقطه مسطحاتی با دقت ۱ سانتی متر، جمع آوری شده به وسیله توتال استیشن، مبنای کنترل دقت این مطالعه بوده است. در روش پیشنهادی آنها زوایای توجیه خارجی اندازه گیری شده به وسیله حسگر تلفن هوشمند، بر اساس جهت گیری نسبی استخراجی از الگوریتم ساختار ناشی از حرکت اصلاح شده و برای حل مسئله مقیاس، از یک طول مشخص که با اندازه گیری های شتاب سنج و به کمک الگوریتم تشخیص گام به دست آمده استفاده شده است. همچنین از میانگین وزن دار مختصات مراکز تصاویر که توسط GPS تلفن هوشمند اندازه گیری شده بود، برای انتقال به سیستم مختصات جهانی استفاده شده است. در نهایت، زوایای توجیه خارجی اصلاح شده با قیود خطی صحنه ترکیب و در یک باندل اجستمنت پالایش شده اند که نتایج مدل سه بعدی نهایی نشان دهنده دقت مسطحاتی ۳ تا ۵ متر و ارتفاعی ۱۰ تا ۱۵ متر بوده است.

استفانو تاوانی و همکارانش در سال ۲۰۲۰ قابلیت حسگرهای تلفن هوشمند، برای ساخت مدل سه بعدی با ارجاع مستقیم از طریق مطالعه روی صخره ای به طول ۴۰۰ متر را مورد بررسی قرار دادند [۲۵]. آنها در این تحقیق از تلفن هوشمند شیائومی مدل MiA1 مجهز به گیرنده GNSS تک فرکانس برای اندازه گیری موقعیت استفاده کرده اند و وضعیت دوربین در لحظه عکسبرداری نیز توسط حسگرهای تلفن اندازه گیری و ثبت شده است. آنها در مجموع ۳۵ عکس از فاصله ۳۵۰ متری با خطای موقعیت یابی ۳/۲ تا ۴/۵ متر (ارائه شده توسط گوشی هوشمند) اخذ کرده اند و برای صحت سنجی نتایج از مدل ارتفاعی رقومی تهیه شده به وسیله لیدار هوایی با فاصله نمونه برداری ۱/۵ متر و دقت ارتفاعی ۰/۶۰ متر استفاده کرده اند. همچنین با محاسبه اختلاف بین موقعیت اندازه گیری شده و تخمین زده شده، از طریق تکرار ساخت مدل، تصاویر دارای اعوجاج و خطای موقعیتی بالا را شناسایی و حذف کرده اند. در پایان آنها به خطای موقعیت حدود ۴ متر و حداکثر خطای مقیاس دهی ۲٪ و خطای زاویه ای ۱/۴ درجه حول محور عمودی دست یافته اند.

ماریون جاد و همکارانش سال ۲۰۲۰ قابلیت های دوربین رقومی و تلفن هوشمند را در مدل سازی سه بعدی با ارجاع جغرافیایی مستقیم از طریق مطالعه موردی روی صخره های ساحلی شهر پورسمیلین کشور فرانسه مورد بررسی قرار دادند [۲۶]. در این مطالعه از دوربین رقومی Nikon D800 Reflex، تلفن هوشمند Huawei Y5، گیرنده ژئودیتیک

موقعیت یابی محدودی دارند. علاوه بر این، حسگرهای میکرو الکترومکانیکی، به ویژه ژيروسکوپها، به دلیل نسبت سیگنال به نویز بالا، تغییرات موقعیتی را در بازه های زمانی کوتاه جمع آوری می کنند. همچنین، مغناطیس سنج ها به راحتی تحت تأثیر اجسام فلزی در نزدیکی خود قرار می گیرند. اگرچه این حسگرها توانایی به دست آوردن داده های ارجاع جغرافیایی مستقیم را فراهم می کنند، اما اندازه گیری های سطح پایین این حسگرها می تواند منجر به تعیین نادرست پارامترهای جهت گیری خارجی شود و در نتیجه دقت سیستم نقشه برداری را کاهش دهد.

در مطالعات پیشین، کارایی دوربین تلفن هوشمند و دقت هندسی مدل حاصل برای برآورد احجام عملیات خاکی در مقایسه با روش های نقشه برداری زمینی مورد بررسی قرار گرفته و نتایج موفقیت آمیزی حاصل شده است [۲۱، ۲۲]. با توجه به نتایج تحقیقات گذشته در این پژوهش، امکان استفاده از تصاویر گوشی های هوشمند، همراه با حسگرهای GNSS، مغناطیس سنج و ژيروسکوپ داخلی آنها برای تولید مدل سه بعدی با ارجاع جغرافیایی مستقیم مورد بررسی قرار گرفته است. مقایسه میان دوربین گوشی های هوشمند و دوربین های تک لنز رقومی بازتابی نشان می دهد که دوربین گوشی های هوشمند، با لنزهایی با قطر کوتاه تر و حسگرهایی با ابعاد کوچک تر طراحی شده اند که توانایی کمتری در جمع آوری نور داشته و دامنه ای ISO پایین تری ارائه می دهند. از نظر تئوری، این ویژگی ها می توانند موجب کاهش کیفیت تصویر شوند، همچنین مدل سازی اعوجاج لنز نیز به دلیل فاصله کانونی کوتاه، چالش برانگیزتر است. با این حال نسل جدید گوشی های هوشمند با بهره گیری از دوربین های چندگانه، اتصال آنها به حسگر یکپارچه و استفاده از فیلترهای پیشرفته پردازش تصویر توانسته اند بر بسیاری از این محدودیت ها غلبه کنند، تا جایی که کیفیت تصاویر ارائه شده توسط آنها قابل مقایسه با دوربین های رقومی فول فریم است [۲۳]. از سوی دیگر حسگرهای مکان نگاری گوشی های هوشمند نیز به سرعت در حال توسعه هستند. این گوشی ها علاوه بر GPS، مجهز به واحد اندازه گیری اینرسی مبتنی بر حسگرهای میکرو الکترومکانیکی (شتاب سنج ها، ژيروسکوپ ها، مغناطیس سنج ها، فشارسنج) هستند و با توجه به کاربردهای متعدد آنها در بسیاری از برنامه های ژئوماتیک برای تعیین مختصات سه بعدی، طول، زوایا، مساحت و سایر داده های مکانی استفاده می شوند. اگرچه دقت حسگرهای گوشی های هوشمند به سطح تجهیزات حرفه ای نمی رسد، اما همچنان می توان از آنها برای جمع آوری و تخمین داده ها استفاده کرد. به علاوه، این ابزار به طور گسترده در آموزش ژئوماتیک مورد استفاده قرار می گیرند. چهار حوزه اصلی که برنامه های موبایلی در آنها کاربرد دارند شامل سنجش از دور، GPS، سیستم های اطلاعات جغرافیایی و آموزش ژئوماتیک است. اخیراً محققان امکان استفاده از این حسگرها را به عنوان جایگزینی برای نقاط کنترل زمینی در جهت توجیه، ارجاع جغرافیایی و ارزیابی کیفیت مدل ها بررسی کرده اند. در ادامه، به نتایج و یافته های این مطالعات اشاره خواهد شد.

اختلاف بین ۰ تا ۵ میلی‌متر در بازسازی برای مدل ویدئویی و ۰ تا ۲ میلی‌متر برای مدل عکسی نسبت به مدل مرجع دست یافته‌اند. علی‌رغم تعداد کمتر عکس‌ها در مدل عکسی، این مدل دقت بهتری از نظر بازسازی داشته است. بیشترین خطای جهت‌گیری نسبت به مدل مرجع ۰/۳۴ درجه حول محور عمودی و چرخش ۰/۳۸- و ۱/۰۰ درجه به ترتیب حول محورهای X و Y بوده که نشان‌دهنده ناهماهنگی بین مدل‌های عکس و ویدئو است.

بسیار و همکاران سال ۲۰۲۳ در مطالعه‌ای برای بررسی میزان ریزش دیواره صخره ساحلی ناواجیو کشور یونان از روش ساختار ناشی از حرکت مبتنی بر تلفن هوشمند و قایق در حال حرکت، پهپاد فتوگرامتری DJI Phantom 4 Pro با روش تعیین موقعیت کینماتیک آنی و تصاویر ماهواره Pléiades استفاده و در پایان سه مدل تولید شده را از جنبه‌های مختلف مورد بررسی و مقایسه قرار دادند [۲۸]. طول محدوده ۱۱۲۰۰ متر خط ساحلی با ارتفاع ۴۰۰ متر بوده و عکسبرداری روی قایق از دو فاصله ۵۰ تا ۲۰۰ متر (مسیر رفت) و ۴۰۰ تا ۵۰۰ متر (در مسیر برگشت) با استفاده از سه گوشی هوشمند Xiaomi A2, Samsung G930F, Wiko V680 با پوشش طولی ۸۰٪ انجام شده است. تمام تصاویر در نرم‌افزار Agisoft Metashape® به‌صورت یکپارچه در یک بخش (Chunk) پردازش شده‌اند و تنها از داده‌های مکانی تصاویر ثبت شده با گوشی Wiko استفاده شده است. آنها از مقایسه سه مدل نتیجه گرفتند که تراکم نقاط مدل تولید شده با گوشی هوشمند تقریباً برابر با تراکم مدل تولید شده با پهپاد و حدود ۲۰۰ برابر مدل حاصل از تصاویر ماهواره‌ای بوده است. اما به دلیل عدم استفاده از نقاط کنترل زمینی مدل گوشی هوشمند دارای اختلاف ۲ متر در جهت X و ۶ تا ۸ متر در جهت Z با مدل حاصل از پهپاد بوده است.

تپاتی لوزه و همکارانش سال ۲۰۲۳ با هدف امکان سنجی زمین مرجع کردن مستقیم مدل حاصل از فتوگرامتری زمینی برد کوتاه، مطالعه‌ای روی ساختمان مرکزی پارک و یک حمام تاریخی در شهر Ragusa ایتالیا انجام دادند [۲۹]. در این تحقیق از دوربین Sony α7R III با لنز ۲۴ میلی‌متری و ابزار جانبی 3D Image Vector نصب شده روی آن، و پهپاد DJI Matrice 300 مجهز به دوربین Zenmuse برای جمع‌آوری هم‌زمان داده‌ها جهت مقایسه دقت استفاده و از نرم‌افزار Agisoft پردازش داده‌ها بهره برده‌اند. برای جمع‌آوری داده‌های ساختمان پارک، از فاصله ۱۰ متری و با پوشش طولی ۸۰٪، ۶۵ عکس با ابعاد پیکسل ۱/۲ میلی‌متر گرفته شد، و برای حمام تاریخی، ۱۸۹ عکس با ابعاد پیکسل ۱/۱ میلی‌متر تهیه شده است. همچنین، به‌وسیله پهپاد و در طی سه پرواز در ارتفاع ۳۰ متری، ۵۵۶ عکس با ابعاد پیکسل زمینی ۴/۶۵ میلی‌متر از ساختمان پارک در پرواز اول و ۳۶۷ عکس با ابعاد پیکسل زمینی ۷/۳ میلی‌متر از حمام تاریخی در دو پرواز بعدی اخذ کرده‌اند. آن‌ها ارزیابی دقت روش زمینی را از طریق ۲۹ نقطه کنترل با موقعیت معلوم برای ساختمان پارک و ۱۳ نقطه کنترل برای حمام انجام داده‌اند و یکی از نقاط را به‌عنوان نقطه کنترل و مابقی به‌عنوان نقاط چک

Topcon®HiPer V و نرم‌افزار Agisoft استفاده و داده‌های جمع‌آوری شده به‌وسیله لیزر اسکن زمینی مبنای ارزیابی نتایج بوده است. آن‌ها یک قاب چوبی برای نگه‌داشتن دوربین و گیرنده GNSS طراحی کرده و آن را بر روی یک سه‌پایه نصب کرده‌اند. فاصله بین مرکز فاز گیرنده تا مرکز دوربین رقومی و دوربین تلفن هوشمند اندازه‌گیری، و از روش کینماتیک آنی با استقرار یک گیرنده روی ایستگاه مرجع و نرخ جمع‌آوری داده سی ثانیه برای تعیین همزمان موقعیت مراکز تصاویر استفاده کرده‌اند. جمع‌آوری داده‌ها طی دو مرحله، با استفاده از دوربین رقومی و تلفن هوشمند از فاصله ۵۰ متری صخره ساحلی در ۱۰ ایستگاه با فاصله ۱۰ متر از یکدیگر انجام که در هر کدام ۹ عکس اخذ کرده‌اند. هنگام عکسبرداری با تلفن هوشمند، علاوه بر استفاده از گیرنده ژئودتیک، موقعیت مراکز تصاویر با استفاده از گیرنده GNSS داخلی تلفن هوشمند نیز برداشت شده است. دو پردازش برای بررسی نتایج دوربین گوشی هوشمند یکی با استفاده از فایل موقعیت مراکز دوربین که از طریق اندازه‌گیری کینماتیک آنی GNSS به‌دست آمده و دیگری با استفاده از موقعیت اندازه‌گیری شده توسط GNSS داخلی تلفن هوشمند انجام شده است. نتایج نشان دهنده میانگین خطای ۰/۳ سانتی‌متر و انحراف معیار ۴/۷ سانتی‌متر برای دوربین Nikon D800 Reflex و میانگین خطای ۰/۲ سانتی‌متر و انحراف استاندارد ۳/۸ سانتی‌متر برای دوربین گوشی هوشمند Huawei Y5 (بدون استفاده از نقاط کنترل زمینی) بسیار رضایت بخش بوده است. با این حال ابر نقطه تولید شده با استفاده از گیرنده GNSS داخلی تلفن هوشمند دارای خطای ۲/۱۳ متر و انحراف استاندارد ۱/۲۲ متر در مقایسه با داده‌های لیزر اسکن زمینی بوده است.

آمریگو کورداتی و همکارانش سال ۲۰۲۱ به بررسی قابلیت‌های تلفن هوشمند در تولید مدل سه بعدی با ارجاع جغرافیایی مستقیم از طریق مطالعه رخنمون یک گسل فعال در آونتین ایتالیا پرداختند [۲۷]. در این مطالعه از تلفن هوشمند Xiaomi 9T pro و گیسمال دستی برای تثبیت تلفن هوشمند در راستای افقی استفاده شده است. هدف از این کار، افزایش کیفیت تصاویر از طریق محدود کردن لرزش و کاهش تاری ناشی از حرکت و همچنین تثبیت تلفن در امتداد محور طولی بوده است، به‌طوری که تمامی تصاویر در یک صفحه افقی جهت‌گیری شوند. مدل موجود که در سال ۲۰۱۶ با استفاده از ۶۴۰ تصویر اخذ شده به‌وسیله دوربین Canon EOS 450D تولید شده، مبنای مقایسه دقت بوده است. آن‌ها دو مدل یکی با ۲۰۰ عکس و دیگری با ۵۲۸ فریم استخراج شده از فایل ویدئویی ۲۵۷ ثانیه‌ای تولید کردند. در هر دو مورد تصویربرداری از فاصله ۳۰ سانتی‌متری انجام و مدل سه‌بعدی با وضوح بالا موجود از رخنمون مورد مطالعه مبنای مقایسه دقت نتایج بوده است. مسئله مقیاس از طریق اندازه‌گیری فاصله بین دو نقطه با متر نواری حل و مدل با زاویه اندازه‌گیری شده به‌وسیله قطب نما در سیستم مختصات محلی توجیه زاویه‌ای شده است. به لطف استفاده از گیسمال صحنه بازسازی شده منطبق بر صفحه افقی در قاب دنیای واقعی است. در پایان آن‌ها به

محیط، نوع گوشی، و تکنیک پس‌پردازش بوده است. اگرچه گوشی دوفرکانسه سامسونگ گلکسی S10+ عملکرد بهتری نسبت به گوشی تک فرکانسه نشان داد، ولی نتایج به‌وضوح نشان داده است که تلفن‌های همراه نمی‌توانند از نظر دقت و صحت تعیین موقعیت و همچنین نرخ جمع‌آوری داده‌ها با گیرنده‌های GNSS ژئودتیک رقابت کنند.

شان و همکاران سال ۲۰۲۳ در مقاله‌ای بالاترین کیفیت ممکن برای فتوگرامتری با گوشی هوشمند و پهپاد معمولی از نقطه نظر دقت تعیین موقعیت و تأثیر نقاط کنترل زمینی و برداشت همزمان مراکز تصویر با استفاده از GPS را بررسی کردند [۳۲]. ساختمان دانشگاه پرودو به ارتفاع ۱۱ متر و مساحت ۵۱۱۰ متر مربع موضوع مطالعه بوده است. مجموعاً ۴۶۶ تصویر در ۲ مرحله از فاصله ۱۸ متری ساختمان (فاصله مراکز تصویر از هم تقریباً ۳ متر) و سپس عکسبرداری در ارتفاع ۴ تا ۵ متری به کمک یک ابزار جانبی با استفاده از گوشی iPhone7 انجام شده است. مدل تهیه شده با استفاده از پهپاد فتوگرامتری DJI Matrice 600 و پهپاد معمولی Mavic2Pro مبنای مقایسه بوده‌اند. موقعیت و زوایای دوربین تلفن هوشمند و پهپادها در لحظه عکسبرداری توسط GNSS/IMU داخلی آنها ثبت شده است. در پایان آنها به دقت تعیین موقعیت ۱/۶۵۴ متر برای تصاویر گوشی‌های هوشمند با ارجاع جغرافیایی مستقیم دست یافتند، اما با معرفی داده‌های لیدار هوایی و نیز نقاط زمینی برداشت شده با توتال‌استیشن به‌عنوان نقاط کنترل زمینی، دقت تعیین موقعیت به ترتیب تا ۰/۴۳۳ و ۰/۱۴۵ متر بهبود یافته که برابر با دقت پهپاد معمولی بوده است. ولی آنها با استفاده از پهپاد فتوگرامتری و شرایط یکسان به دقت تعیین موقعیت ۰/۳۷ متر دست یافته‌اند.

فوتیس پاتونیس در سال ۲۰۲۴ قابلیت‌های دوربین تلفن‌های هوشمند را به‌عنوان ابزار جمع‌آوری داده برای اندازه‌گیری‌های سه‌بعدی در فتوگرامتری برد کوتاه ارزیابی کرده است [۳۳]. در این پژوهش، ۱۰ تلفن هوشمند از برندهای مختلف، نرم‌افزار Surveyor-Photogrammetry نسخه ۶/۱ و روش باندل اجستمنت استفاده شده است. ارزیابی دقت در سه بخش انجام گرفته است: ابتدا بر تحلیل اعوجاج تصاویر تمرکز داشته، و سپس دقت محاسبه مختصات واقعی با استفاده از روش فتوگرامتری را ارزیابی کرده است، و در نهایت رابطه میان اعوجاج، دقت، و ویژگی‌های فنی دوربین‌ها را تحلیل کرده است. او نمای یک ساختمان را به‌عنوان موضوع مطالعه انتخاب و با هر تلفن سه عکس همگرا با میانگین فاصله عکسبرداری ۱۱ متر تهیه کرده است. اعوجاج تصاویر دیجیتال ناشی از لنزها را با استفاده از روش کالیبراسیون ژانگ و بر اساس عکاسی از صفحه شطرنجی محاسبه کرده است. مختصات ۲۱ نقطه روی نمای ساختمان با استفاده از توتال‌استیشن و با دقت ۲ میلی‌متر تعیین، و ۱۰ نقطه به‌عنوان نقاط کنترل و ۱۱ نقطه دیگر به‌عنوان نقاط چک استفاده شده است. RMSE بین مختصات نقاط چک برآورد شده با روش توتال‌استیشن در مقایسه با روش فتوگرامتری معیار ارزیابی دقت بوده است. روند برآورد مختصات دو بار برای هر گوشی انجام شده است: بار اول فاصله کانونی و مختصات نقطه اصلی را به‌عنوان پارامترهای مجهول

استفاده شده است. خطای جذر میانگین مربعات نقاط چک ۰/۰۷۴ متر برای ساختمان پارک و ۰/۰۸۰ متر برای حمام تعیین کرده‌اند که با افزایش تعداد نقاط کنترل به ۳ نقطه دقت نیز بهبود یافته و خطای جذر میانگین مربعات به ترتیب ۰/۰۵۶ متر برای ساختمان پارک و ۰/۰۶۹ متر برای حمام برآورد شده است. همچنین در روش پهپاد تمام ۲۹ و ۱۳ نقطه به‌عنوان نقاط چک وارد محاسبات شده‌اند و تنها با استفاده از موقعیت و وضعیت تعیین شده توسط GPS/IMU پهپاد دقت ۰/۰۳۵ برای ساختمان پارک و ۰/۰۱۴ برای حمام تاریخی دست یافته‌اند.

تایلان اوکالان و همکارانش سال ۲۰۲۲ در مطالعه‌ای به ارزیابی عملکرد روش‌های موقعیت‌یابی دقیق نقطه‌ای و موقعیت‌یابی با رفع ابهام با استفاده از داده‌های GNSS کینماتیک به‌دست آمده از پهپاد و مقایسه آنها با روش کینماتیک پس‌پردازش بر اساس موقعیت‌یابی نسبی پرداختند [۳۰]. در این تحقیق از داده‌های پرواز فتوگرامتری با پهپاد بال ثابت C-Astral Bramor ppX UAV مجهز به گیرنده GNSS چند فرکانسه و در تحلیل‌ها، داده‌های کد (P1, P2, C1, C2) و مشاهدات فاز (L1, L2) استفاده شده است. داده‌های GNSS با نرخ ۰/۱ ثانیه (۱۰ هرتز) در طول پروازی از ارتفاع ۱۵۰ متری از سطح زمین و با حداکثر سرعت ۱۶ متر بر ثانیه جمع‌آوری شده است. همچنین در طول پرواز یک گیرنده GNSS NAVSF3040 تقریباً در مرکز منطقه مورد مطالعه به‌عنوان ایستگاه مرجع قرار داده شده بود. استفاده از ترکیب خطی عاری از یونوسفر فرکانس دوگانه برای مشاهدات GNSS، مدل‌سازی خطاهای مبتنی بر ماهواره و موقعیت‌یابی دقیق نقطه‌ای سنتی را تعریف می‌کند. آنها خطای موقعیت‌یابی که نشان دهنده اختلاف نتایج روش‌های موقعیت‌یابی دقیق نقطه‌ای و موقعیت‌یابی با رفع ابهام با روش مرجع یعنی کینماتیک پس‌پردازش می‌باشد را برای هر سه مولفه مختصاتی برآورد و میزان اختلاف روش موقعیت‌یابی دقیق نقطه‌ای با کینماتیک پس‌پردازش برابر با ± 5 سانتی‌متر و اختلاف روش موقعیت‌یابی با رفع ابهام با کینماتیک پس‌پردازش ± 10 سانتی‌متر تعیین کرده‌اند.

مارک هالاج و میکال کاکاماریک سال ۲۰۲۲ در مطالعه‌ای به بررسی دقت تعیین موقعیت گیرنده‌های GNSS تلفن هوشمند در مقایسه با گیرنده‌های ژئودتیک نقشه‌برداری پرداختند [۳۱]. در این پژوهش، از یک تلفن هوشمند Samsung Galaxy S10+ تک فرکانسه و Samsung Galaxy Note10+ دو فرکانسه و یک گیرنده GNSS ژئودتیک در محیط شهری (مسیر آزمایشی به طول ۱/۷۶ کیلومتر) با سرعت عابر پیاده استفاده شده است. هر سه دستگاه بر روی یک شاخص نقشه‌برداری نصب و داده‌ها طی چهار روز جمع‌آوری شده است: دو روز در اوایل تابستان ۲۰۲۱ و دو روز در پاییز ۲۰۲۱، بدون پوشش گیاهی در مسیر تعیین شده و در زمان‌های مختلف روز، تا اثر چینش متفاوت ماهواره‌ها نیز برآورد شود. تعیین موقعیت با دو روش تعیین موقعیت آنی و جمع‌آوری مشاهدات خام در قالب فرمت Rinex و پس‌پردازش با استفاده از روش‌های تفاضلی و تعیین موقعیت دقیق نقطه‌ای انجام شده است. نتایج نشان دهنده دقت یک تا چند ده متری موقعیت‌یابی بسته به

پیشنهادی، تلاش بر بهبود کیفیت تکنیک ارجاع جغرافیایی از طریق چندین رویکرد صورت گرفته است که عبارتند از:

○ کاهش تأثیر خطاهای GPS با میانگین‌گیری موقعیت مراکز تصویربرداری و حذف شتاب خطی اندازه‌گیری شده هنگام حرکت بین دو تصویر متوالی.

○ استفاده از روش عکسبرداری ایستا به منظور جلوگیری از کاهش بیشتر دقت موقعیت‌یابی، ابهام در نرخ به‌روزرسانی موقعیت، عدم همزمانی آن با زمان ثبت تصاویر و همچنین حذف نیاز به تعیین فاصله بین مرکز فاز آنتن گیرنده GNSS، مرکز نوری دوربین و حسگرهای حرکتی.

○ بررسی تأثیر دقت پایین گیرنده GNSS بر تعیین مقیاس مدل در روش ارجاع جغرافیایی مستقیم، به‌ویژه در محدوده‌های کوچک، و ارائه راهکاری مبتنی بر اندازه‌گیری چند طول مشخص برای تخمین مقیاس.

○ توسعه یک روش جدید برای تعیین دقیق‌ترین زاویه جهت‌گیری مطلق دوربین از بین مقادیر اندازه‌گیری‌شده توسط حسگرهای حرکتی تلفن هوشمند، با بهره‌گیری از زوایای جهت‌گیری نسبی تخمین‌زده شده در الگوریتم ساختار ناشی از حرکت، و اصلاح پارامترهای جهت‌گیری نسبی این الگوریتم بر اساس دقیق‌ترین مقدار اندازه‌گیری شده توسط حسگرهای حرکتی تلفن.

روش تحقیق

– منطقه مورد مطالعه و داده‌های تحقیق

یکی از دیوهای شن واقع در محوطه تجهیز کارگاه شرکت مهندسی و ساختمان شمس عمران در شهر بوشهر به‌عنوان موضوع مطالعه انتخاب شد. نمایی از آن در شکل (۱) نمایش داده شده‌است. داده‌های این پژوهش شامل موقعیت نقاط برداشت شده با استفاده از توتال‌استیشن Leica TS09 R1000 در حالت بدون منشور، همراه با داده‌های جمع‌آوری شده به‌وسیله تلفن هوشمند iPhone 13 Pro است. برای ثبت داده‌ها، از نرم‌افزار Geocam AR، که توانایی ضبط همزمان تصاویر، داده‌های GPS و اطلاعات حسگرهای حرکتی را داراست، استفاده شده‌است. مشخصات فنی این دستگاه بر اساس اطلاعات ارائه شده توسط سازنده، در جدول (۱) آورده شده‌است. همچنین برای آزمایش دقت GPS/GNSS تلفن هوشمند، از تعدادی نقاط کنترل یک شبکه ژئودزی که برای یکپارچگی ساخت و سازهای واقع در این محدوده طراحی شده بود، استفاده گردید. موقعیت این نقاط از قبل توسط یک تیم نقشه‌بردار حرفه‌ای هم به‌صورت نسبی و هم در سیستم مختصات UTM، با استفاده از گیرنده‌های GNSS، توتال‌استیشن و ترازیاب الکترونیکی اندازه‌گیری شده‌است. تمام پردازش‌های فتوگرامتری با استفاده از نرم‌افزار Agisoft Metashape نسخه ۱/۲.۱۵۹۲/۰ انجام شد.

و بار دوم ضرایب اعوجاج را به این پارامترها اضافه کرده است. نتایج نشان داده‌اند که میانگین RMSE ۱۰ تلفن هوشمند در محورهای X و Y بدون اضافه کردن پارامترهای اعوجاج بین ۱/۳ تا ۱/۴ سانتی‌متر و در حالت اضافه کردن این پارامترها حدود ۰/۷ سانتی‌متر بوده است. در محور Z، میانگین RMSE بدون پارامترهای اعوجاج ۱/۶ سانتی‌متر و با آن‌ها ۱/۱ سانتی‌متر گزارش شده‌است. در نهایت، میانگین RMSE در مختصات دوبعدی، بدون اعمال پارامترهای اعوجاج ۲ سانتی‌متر و با اعمال آن‌ها ۱/۱ سانتی‌متر برآورد و بهبودی ۴۵ درصدی را نشان داده است.

در مطالعات [۳۴،۳۵] به کیفیت پایین گیرنده‌های GNSS در تلفن‌های هوشمند به‌عنوان یک محدودیت ذاتی که بر دقت موقعیت‌یابی اثر منفی می‌گذارد، اشاره شده‌است. نتونگلانگ و همکاران در مطالعه خود بر مکان‌یابی مرکز فاز آنتن GNSS گوشی هوشمند شیائومی Mi8 به‌منظور بهبود دقت موقعیت‌یابی تمرکز کردند، زیرا موقعیت آن برخلاف موقعیت گیرنده GNSS به‌طور دقیق مشخص نیست [۳۶]. آن‌ها دریافتند که مرکز فاز آنتن در قسمت بالای سمت چپ گوشی هوشمند قرار دارد (به‌ترتیب حدود ۲/۸ سانتی‌متر از سمت چپ و ۰/۹ سانتی‌متر از بالا). بوچکانی و همکاران نیز به بررسی همین موضوع پرداختند، اما سه گوشی هوشمند شیائومی Mi8 را مورد آزمایش قرار دادند [۳۷]. نتایج آن‌ها نشان داد حتی ممکن است در یک مدل خاص از گوشی هوشمند، مرکز فاز آنتن یکجا نباشد. متأسفانه، طراحی فشرده و کوچک‌سازی این دستگاه‌ها، پی‌کربندی گیرنده‌ها را با چالش‌هایی روبرو کرده است [۳۸]. با وجود بهبود قابلیت‌های GPS/GNSS در تلفن‌های هوشمند طی سال‌های اخیر، دقت این دستگاه‌ها همچنان تحت تأثیر عوامل متعددی از جمله آرایش و تعداد ماهواره‌ها در زمان جمع‌آوری داده‌ها، شرایط محیطی، توانایی دریافت سیگنال‌های چندفرکانسه، کیفیت سخت‌افزار گیرنده (مانند تراشه و آنتن)، و نرم‌افزار پردازشگر قرار دارد [۳۹-۴۱]. ساختارهای پیچیده شهری یا مناطق جنگلی می‌توانند با ایجاد انسداد و انعکاس‌های چندگانه، دریافت سیگنال‌های GNSS را مختل کنند، این موضوع به‌طور دقیق توسط [۴۲] بررسی شده‌است. دقت GPS/GNSS ممکن است در هر بار جمع‌آوری داده‌ها متفاوت باشد، اما به‌طور کلی تلفن‌های هوشمند معمولاً در محدوده دقت مورد انتظار عمل می‌کنند [۴۳]. با توجه به تحقیقات صوت گرفته در این مطالعه، تلاش شده است تا با ارائه یک رویکرد جایگزین، هزینه‌های بالای سیستم‌های نقشه‌برداری سیار زمینی کاهش یابد. سیستم‌های نقشه‌برداری سیار موجود دارای ابعاد بزرگ و نیازمند دقت بالا در نصب و یکپارچه‌سازی حسگرهای مختلف هستند. از آنجا که این حسگرها در یک پلتفرم واحد ادغام نشده‌اند، کاربران ناگزیرند در هر بار استفاده، زوایا و فواصل بین مراکز حسگرها را اندازه‌گیری کنند. علاوه بر این، همگام‌سازی زمانی بین حسگرهای مختلف چالشی دیگر در این سیستم‌ها محسوب می‌شود. در روش



شکل ۱: ترانشه موضوع مطالعه

Fig. 1: The Trench Under Study

جدول ۱: مشخصات تلفن هوشمند مورد استفاده

Table 1: Parameter of the device used.

نام دستگاه Device	سیستم تعیین موقعیت Positioning System	حسگر Sensor	وضوح تصویر Image Resolution	پارامترهای لنز Lens Parameters	سال ساخت Production Year
iPhone 13 Pro	GPS+GLONASS+Galileo+QZSS+Beidou	Dual pixel PDAF	2/12 MP	7/5mm f/5/1, 26mm (35 mm equivalent)	2021

استاندارد در ارزیابی دقت، امکان مقایسه موقعیت‌های ثبت شده را با مختصات واقعی نقاط فراهم می‌آورد و به صورت زیر محاسبه می‌شود.

$$RMSE(\delta x) = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (x_i - \bar{x}_i)^2}$$

$$RMSE(\delta y) = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (y_i - \bar{y}_i)^2}$$

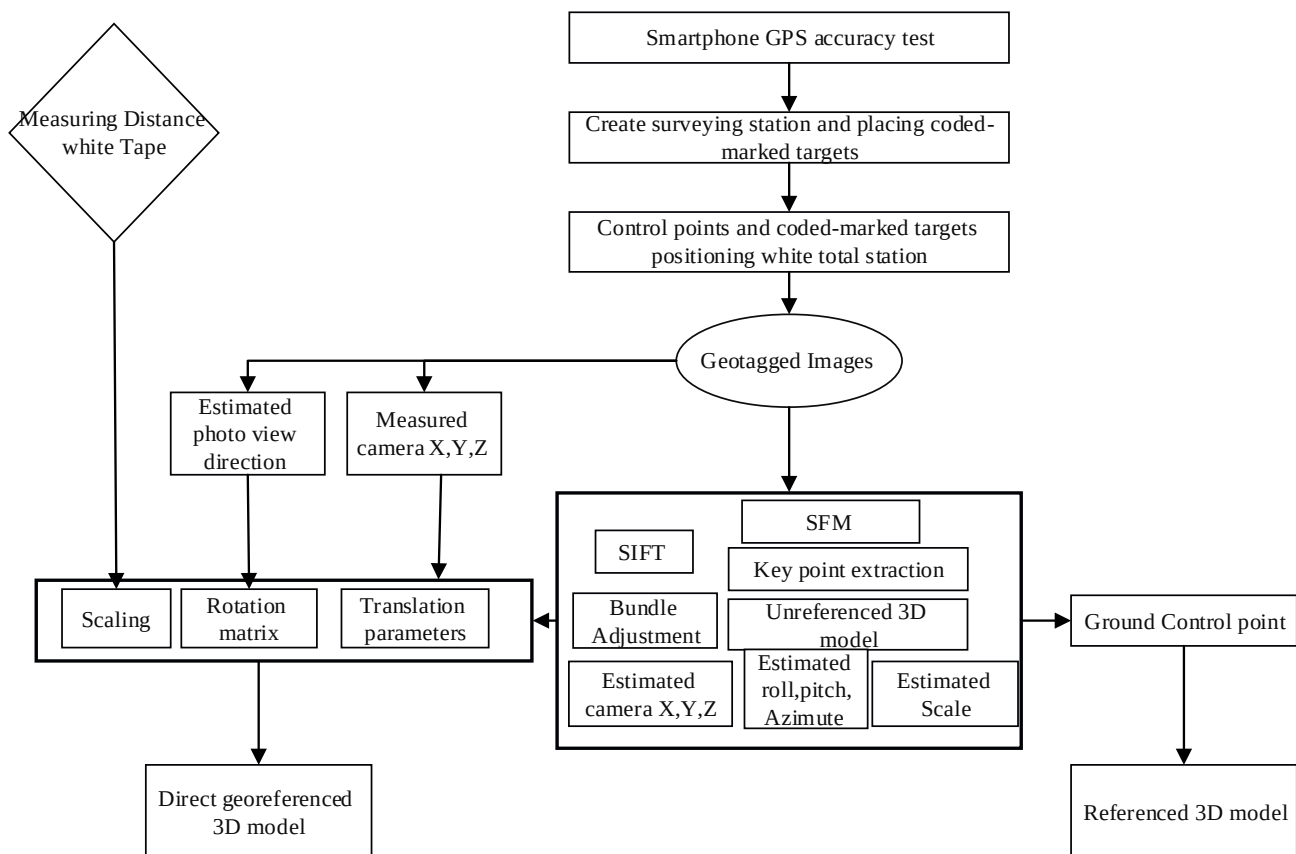
$$RMSE_{Total} = \sqrt{(\delta x)^2 + (\delta y)^2}$$

RMSE خطای جذر میانگین مربعات، N تعداد مشاهدات، x_i, y_i مقدار پیش‌بینی شده، $\bar{x}_i, \bar{y}_i$ مقدار اندازه‌گیری شده، δx خطای جذر میانگین مربعات در راستای محور x، δy خطای جذر میانگین مربعات در راستای محور y

در پروژه‌های فتوگرامتری، دستیابی به دقت‌های مورد نظر مستلزم طراحی دقیق شبکه و پیکربندی مناسب تصویربرداری است. در این راستا، مسائل مرتبط با انتخاب مقیاس تصویربرداری، تعداد ایستگاه‌های دوربین، هندسه نسبی آن‌ها، و همچنین قیود و محدودیت‌های طراحی باید به دقت مورد بررسی قرار گیرند. پس از تکمیل مرحله طراحی شبکه، تعداد ایستگاه‌های عکسبرداری و نقاط کنترل زمینی باید به‌طور دقیق مشخص شوند. در ادامه، سیستم مختصات مناسب تعریف و اندازه‌گیری‌های موقعیتی مرتبط انجام می‌شود تا نتایج از نظر دقت و کارایی بهینه شوند. برای کنترل صحت عملیات و برآورد خطای تعیین موقعیت این ایستگاه‌ها، پیمایش انجام شد. در پیمایش باید هر نقطه، از نقطه قبلی و بعدی قابل رویت باشد.

در این پژوهش امکان ارجاع جغرافیایی مستقیم مدل سه‌بعدی فتوگرامتری با استفاده از داده‌های موقعیت و وضعیت دوربین در لحظه تصویربرداری که توسط حسگرهای تلفن هوشمند اندازه‌گیری شده‌اند، بررسی گردید و علاوه بر ارائه جایگزینی عملی برای نقاط کنترل زمینی به منظور تسهیل در ارجاع جغرافیایی، امکان بهره‌گیری از داده‌های مذکور برای کمّی‌سازی خطاهای مدل سه‌بعدی نهایی نیز ارزیابی شد. مراحل اجرای روش پیشنهادی در شکل (۲) نشان داده شده است. مطابق شکل ۲ در بخش اول این مطالعه، دقت و کارایی حسگرهای تلفن هوشمند مورد تحلیل قرار گرفت. تعیین دقت حسگرها، ارزیابی پایداری آن‌ها و امکان حذف خطاهای سیستماتیک به منظور ارزیابی قابلیت‌های گوشی هوشمند برای حذف اعوجاج تصویر ناشی از خطاهای سیستماتیک لنز و بهینه‌سازی وزن‌دهی در معادلات مشاهده طی باندل اجسمنت، بسیار حائز اهمیت است.

برای آزمایش دقت GPS/GNSS تلفن هوشمند، از تعدادی نقاط کنترل یک شبکه ژئودزی که برای یکپارچگی ساخت و سازه‌های واقع در محدوده‌ای یک هکتاری طراحی شده بود، استفاده گردید. موقعیت این نقاط توسط یک تیم نقشه‌بردار حرفه‌ای هم به صورت نسبی و هم در سیستم مختصات UTM، با استفاده از گیرنده‌های GNSS، توتال‌استیشن و ترازباب الکترونیکی اندازه‌گیری شده است. روش ژئودزی به کار رفته قادر بوده فاصله‌های افقی و اختلاف ارتفاع نقاط را با دقت میلی‌متر و زوایا را با دقت چند ثانیه اندازه‌گیری کند. دقت تعیین موقعیت این نقاط زیر ۵ میلی‌متر گزارش شده است. آزمایش طراحی شده بر اندازه‌گیری خطای مطلق موقعیت‌یابی حسگر GPS/GNSS تلفن هوشمند در مقایسه با مختصات دقیق نقاط کنترل شبکه ژئودزی به عنوان داده‌های مرجع متمرکز بود. برای ارزیابی دقت، از خطای جذر میانگین مربعات افقی به عنوان معیار اصلی استفاده شد. این معیار، به عنوان یک اندازه‌گیری



شکل ۲: روندنمای پیاده‌سازی تحقیق

Fig. 2: The process of paper

زمین، نیازی به اندازه‌گیری ارتفاع دوربین از سطح زمین وجود ندارد. در صورت ثبت چندین عکس از یک ایستگاه، وجود موقعیت‌های متفاوت X,Y,Z برای هر تصویر نامطلوب و غیرقابل مدیریت است. باید توجه داشت که هر خطای سیستماتیک موقعیتیابی GNSS مستقیماً به مدل منتقل می‌شود و تنها با افزودن نقاط کنترل زمینی امکان حذف آن فراهم می‌گردد. ظهور تراشه‌های GNSS با فرکانس دوگانه برای گوشی‌های هوشمند، پیشرفتی در جهت موقعیتیابی با دقت بالاتر است، که نیاز به انجام مشاهدات در زمان طولانی‌تر دارد اما به دلیل کیفیت پایین مشاهدات فاز حامل برای رفع ابهام فاز و تثبیت سیگنال‌ها تأثیر قابل توجهی بر دقت ندارد. در روش پیشنهادی، پارامترهای جهت‌گیری نسبی که در الگوریتم ساختار ناشی از حرکت تخمین زده شده‌اند، با استفاده از پارامترهای جهت‌گیری که مستقیماً از طریق حسگرهای حرکتی تلفن هوشمند اندازه‌گیری شده‌اند، اصلاح گردید. عکسبرداری در شرایط ایستا انجام خواهد شد، بنابراین زوایای تخمینی و اندازه‌گیری شده در هر ایستگاه باید دارای مقداری ثابت و در صورت عدم وجود خطاها با هم برابر باشند. برای جهت دهی مدل نهایی، از میانگین زوایای اندازه‌گیری شده در هر ایستگاه استفاده شد. سپس، طول اندازه‌گیری

برای دقت بیشتر اندازه‌گیری‌ها به روش کوپل انجام و خطاهای باقی‌مانده با استفاده از روابط ریاضی تعدیل و سرشکن گردید. تصویربرداری در حال حرکت و با سرعت باعث کاهش بیشتر دقت موقعیتیابی می‌شود. با توجه به چالش‌های فوق، و نیز عدم تعیین فاصله بین مرکز فاز آنتن گیرنده GNSS، مرکز نوری دوربین و حسگرهای حرکتی، همچنین نامشخص بودن نرخ به‌روزرسانی موقعیت و همزمانی آن با زمان ثبت تصاویر، تصویربرداری در شرایط ایستا انجام شد. با توجه به دقت مورد انتظار از حسگرهای گوشی هوشمند، فرض بر آن است که مرکز فاز آنتن GNSS، مرکز نوری دوربین و حسگرهای حرکتی هم‌راستا و منطبق بر یکدیگر هستند. این فرض نیاز به محاسبه بردار خروج از مرکزیت برای هر تصویر را برطرف می‌کند و در نتیجه نیازی به محاسبه آزیموت افقی بین مرکز فاز آنتن GNSS و مرکز نوری دوربین نیست که باعث ساده شدن فرآیند پیش‌پردازش داده‌ها می‌شود. با نصب تلفن هوشمند روی سه‌پایه و استقرار آن در هر ایستگاه، تصاویر با برچسب جغرافیایی (شامل موقعیت و وضعیت دوربین در لحظه عکسبرداری) به صورت فن شکل (چرخاندن دوربین حول محور عمودی) اخذ شدند. از آنجا که گیرنده GNSS برای تعیین موقعیت دوربین استفاده می‌شود و نه توپوگرافی

امکان محاسبه و کنترل خطای تجمعی اندازه‌گیری‌ها را فراهم می‌نماید. پس از تعدیل و سرشکن خطاها با روش کمترین مربعات، مسیر پیمایش تکمیل و مختصات هر ایستگاه با دقت ۲ میلی‌متر برای طول‌ها و ۳ ثانیه برای زوایا محاسبه شد. مختصات این ایستگاه‌ها سپس با استفاده از دو نقطه کنترل شبکه ژئودزی به سیستم مختصات UTM منتقل گردید و از آن‌ها برای تعیین موقعیت نشانگرهای کددار توزیع شده روی سطح دیو استفاده شد. شانزده نشانگر کددار با توزیع مناسب بر روی دیواره دیو نصب شد. سپس زاویه افقی، عمودی و فاصله شیب‌دار به دقت اندازه‌گیری شدند تا مختصات دقیق نشانگرهای کددار به دست آید. به منظور افزایش دقت و شناسایی خطاهای احتمالی، هر نشانگر از طریق استقرار روی دو نقطه شبکه پیمایش اندازه‌گیری شد. دیو مورد مطالعه حدود ۱۵۰ متر طول و ۲۵ متر ارتفاع داشت و جهت آن تقریباً جنوب به شمال بود. دیواره غربی دیو، که به صورت تقریباً عمودی برش خورده و بر اثر گذر زمان دچار ریزش شده بود، به عنوان محل مطالعه انتخاب گردید. شرایط جوی در روز مطالعه صاف و آفتابی بود که نور یکنواخت و پراکنده‌ای ایجاد کرد. این شرایط برای تصویربرداری از دیواره دیو ایده‌آل بود و اثر سایه‌ها بر تصاویر و صحنه‌های بازسازی شده را به حداقل رساند. به دلیل کوتاه بودن زمان تصویربرداری، تأثیر تغییرات زاویه تابش خورشید بر کیفیت مدل بسیار محدود بود. عکس‌ها با استفاده از نرم‌افزار Geocam Ar برای سیستم عامل IOS گرفته شدند که جهت‌گیری عکس‌ها را با استفاده از حسگرهای مغناطیس‌سنج، شتاب‌سنج وژیروسکوپ تعیین می‌کند. نمایی از نحوه توزیع نشانگرها در شکل (۴) نمایش داده شده است.

تلفن هوشمند با استفاده از سه پایه به ترتیب روی نقاط مستقر شد. قبل از شروع تصویربرداری برای به حداقل رساندن خطای گیرنده GNSS، تقریباً چهار تا پنج دقیقه در هر ایستگاه منتظر ماندیم تا مطمئن شویم، گیرنده زمان کافی برای تثبیت موقعیت را دارد. موقعیت هر ایستگاه از طریق میانگین‌گیری اندازه‌گیری‌ها تعیین شد. پس از اخذ تصاویر با برچسب جغرافیای در هر ایستگاه، تلفن هوشمند و سه پایه بدون نیاز به جداسازی یا قطع ارتباط به ایستگاه بعدی منتقل شدند. تمامی تصاویر به صورت افقی گرفته شدند، این روش نه تنها ساده‌ترین راه برای نصب دوربین بر روی سه پایه را فراهم می‌کند، بلکه پوشش طولی بیشتری نیز ارائه می‌دهد و به بهبود هم‌پوشانی تصاویر کمک می‌نماید. برای پوشش کامل دیو، تجهیزات به هر دوازده ایستگاه منتقل و در هر ایستگاه، بین پنج تا ده عکس به روش تصویربرداری فن شکل (چرخاندن دوربین حول محور عمودی) گرفته شد. روش تصویربرداری فن شکل، امکان انجام سریع‌تر بررسی‌های میدانی را فراهم می‌آورد و در صورت وجود فاصله کافی از دیواره دیو برای تأمین هم‌پوشانی بهینه، نتایج بهتری نسبت به روش تصویربرداری خطی ارائه می‌دهد. از طرف دیگر حفظ فاصله کافی از دیو برای تضمین دریافت مناسب سیگنال GNSS اهمیت دارد. این نرم‌افزار تخمینی از دقت موقعیت‌یابی تلفن ارائه می‌دهد که در این مطالعه برای تمامی عکس‌ها، ۴/۶ متر بود.

شده با متر برای تعیین مقیاس مدل و میانگین مختصات به دست آمده در هر ایستگاه جهت انتقال مدل به سیستم مختصات UTM به کار رفت. علاوه بر این، یک مدل با استفاده از موقعیت دقیق ایستگاه‌های عکسبرداری به روش ارجاع جغرافیایی غیرمستقیم نیز تولید و RMSE نقاط چک مبنای ارزیابی دقت روش پیشنهادی قرار گرفت. تلفن هوشمند با استفاده از میله منشوری به ارتفاع ۱/۵۰ متر و سه پایه‌ای که پایداری، شاقولی و تراز دقیق دستگاه را تضمین می‌کرد، بر روی نقاط شبکه ژئودزی مستقر شد. تنها نقاطی از شبکه ژئودزی موجود انتخاب شدند که در محیط‌های باز و فاقد موانع قرار داشتند. این انتخاب با هدف بهینه‌سازی شرایط دید، افزایش قابلیت اطمینان داده‌های ثبت شده و کاهش اثرات نویزهای محیطی در طول فرآیند اندازه‌گیری انجام شد. به منظور جلوگیری از بازتاب سیگنال‌های منعکس شده از سطح زمین، یک صفحه فولادی به ضخامت ۳ میلی‌متر که ابعاد آن از هر طرف ۲ تا ۳ سانتی‌متر بزرگتر از گوشی هوشمند بود، زیر دستگاه قرار داده شد. با توجه به اینکه موقعیت دقیق مرکز فاز گیرنده گوشی مشخص نبود، مرکز قاب فیزیکی دستگاه به عنوان نقطه مرجع در نظر گرفته شد.

نرم‌افزار GNSS obs برای ثبت موقعیت نقاط استفاده شد. به منظور اطمینان از عملکرد مداوم گیرنده GNSS، گزینه "ضبط مسیر" فعال گردید و موقعیت نقاط به صورت جداگانه از طریق گزینه "افزودن نقطه جدید" ثبت شد. در جلسه جمع‌آوری داده‌ها، سه روش به کار گرفته شد: در روش اول، موقعیت نقاط به صورت آنی ثبت گردید و در روش دوم، موقعیت نقاط با استفاده از میانگین‌گیری ثبت شد. در روش میانگین‌گیری، گوشی هوشمند به مدت یک دقیقه بالای هر نقطه قرار داده شد و موقعیت از میانگین بیست بار اندازه‌گیری به دست آمد. همچنین، یک دوره مشاهده یک ساعته نیز اجرا گردید. به منظور جلوگیری از قطع عملکرد GNSS، گزینه "اجبار اندازه‌گیری‌های کامل GNSS در بخش گزینه "تنظیمات" فعال گردید. داده‌های ثبت شده با استفاده از نرم‌افزارهای ESRI ArcGIS Pro و ArcGIS Field Maps پردازش شدند. دقت موقعیت‌یابی به عنوان فاصله افقی و عمودی بین موقعیت اندازه‌گیری شده و موقعیت واقعی نقطه تعریف گردید. نقاط شبکه ژئودزی بر اساس شناسه نقطه که در هنگام ثبت وارد شده بود، با برداشت‌ها مطابقت داده شدند. برای ایجاد ویژگی‌های خطی بین نقاط متناظر از ابزار "XY to Line" استفاده شد و طول این خطوط نشان دهنده فاصله بین نقطه شبکه ژئودزی و موقعیت GNSS مشاهده شده در سیستم مختصات UTM بود. تصاویر نقاط شبکه ژئودزی و نحوه استقرار تلفن برای جمع‌آوری داده‌های GNSS در شکل (۳) نمایش داده شده است.

در مرحله بعد دوازده نقطه زمینی برای استقرار دوربین در فاصله ۱۵ تا ۲۰ متری از یکدیگر و از دیو ایجاد و مختصات آن‌ها از طریق پیمایش اندازه‌گیری شد. با استقرار توتال‌استیشن در هر ایستگاه، زاویه‌های افقی و عمودی بین ایستگاه‌های قبلی و بعدی برای حذف اثر خطاهای سیستماتیک به صورت کوپل و فاصله افقی اندازه‌گیری گردید. این روش



شکل ۳: تصاویر نقاط شبکه ژئودزی و نحوه استقرار تلفن هوشمند برای جمع‌آوری داده‌های GNSS
Fig. 3: Images of Geodetic Network Points and the Setup of the Smartphone for GNSS Data Collection



شکل ۴: نحوه توزیع نشانگرهای کددار
Fig. 4: Distribution Pattern of Coded Targets

، ρ و موقعیت‌های تخمینی مراکز تصویر در چارچوب مرجع مدل بود. در این مدل، مختصات و زوایای دوران θ ، ρ دوربین، اندازه‌گیری شده در هر ایستگاه، جایگزین مقادیر تخمینی شد و مقدار زاویه ξ برابر با صفر فرض شد. به دلیل ثابت بودن موقعیت دوربین در هر ایستگاه، مختصات تمامی عکس‌های یک ایستگاه، یکسان در نظر گرفته شدند و مختصات اندازه‌گیری شده جایگزین مختصات تخمینی شدند. سپس این فایل به عنوان مقادیر پارامترهای خارجی دوربین در نرم‌افزار بارگذاری شد تا امکان ارجاع جغرافیایی مدل فراهم شود. در این مدل مقیاس با استفاده از دو نقطه که فاصله‌ی بین آن‌ها به صورت دستی و با متر لیزری در محل اندازه‌گیری شده بود، محاسبه گردید.

ب) مدل تلفیقی: در این حالت سه مدل با استفاده از همان مجموعه تصاویر و مشابه روش برچسب جغرافیایی تولید شد. با این تفاوت که مختصات به ترتیب ۱، ۲ و ۳ نشانگر کددار به عنوان نقطه کنترل وارد محاسبات شدند.

ج) مدل پیمایش: مدل دوم از همان تصاویر ساخته شد، اما با استفاده از مختصات دقیق دوازده ایستگاه عکسبرداری که به روش پیمایش اندازه‌گیری شده بودند و به عنوان مدل پیمایش نام‌گذاری گردید. در اولین مرحله پیش‌پردازش، مختصات ایستگاه‌های عکسبرداری به فرمت

مفروضات مطالعه در خصوص جهت‌گیری عکس‌ها به شرح زیر است: محور کوتاه عکس θ به سمت بالا، جهت دید ξ به سمت بیرون و محور طولی عکس ρ به دلیل استقرار تلفن روی سه پایه به صورت موازی با افق تعریف شده است. به دلیل موازی بودن تلفن با راستای افقی نیاز به دوران مدل حول محور ξ نیست. در مجموع هفتاد و هشت عکس در فرمت jpg، با ابعاد 4032×3024 پیکسل و وضوح ۷۲ dpi برای پوشش کامل نمای دپو گرفته شد. مختصات X,Y,Z هر عکس و اطلاعات جهت‌گیری (زوایای roll ، pitch ، yaw) به طور خودکار ثبت شد. با توجه به اینکه دوربین در هر ایستگاه مستقر می‌شد، بنابراین سرعت حرکت صفر و فاصله تا هدف ثابت بود، وضوح فضایی حاصل به $7/2$ میلی‌متر رسید. در این مطالعه، پنج مدل زیر بر پایه داده‌های جمع‌آوری شده ساخته شد و برای ارزیابی دقت ارجاع جغرافیایی مدل‌ها، نشانگرهای کددار به عنوان نقاط چک مورد استفاده قرار گرفتند.

الف) مدل برچسب جغرافیایی: اولین مدل صرفاً بر اساس تصاویر، داده‌های موقعیتی و زوایای ثبت شده توسط حسگرهای تلفن هوشمند ساخته و با عنوان مدل برچسب جغرافیایی نام‌گذاری شد. پس از تولید مدل سه‌بعدی، پارامترهای خارجی دوربین به صورت یک فایل N-View Match (.nvm) استخراج گردید. این فایل حاوی بردارهای زوایای θ ،

در مقایسه با نقاط شبکه ژئودزی، انجام شد. نتایج حاصل در شکل (۵) و جدول (۲) ارائه شده است که دقت موقعیتیابی را در محدوده متر و دسی متر نشان می‌دهد. دقت سه روش موقعیتیابی تقریباً نزدیک به یکدیگر بود و جذر میانگین مربعات خطا موقعیت افقی حسگر در حالت توقف یک ساعته برابر با ۱/۷۵ متر و در مولفه ارتفاعی برابر ۱۰/۶۹- متر تعیین گردید.

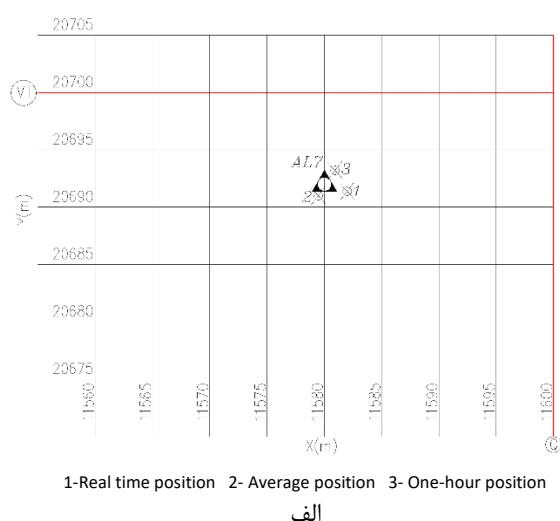
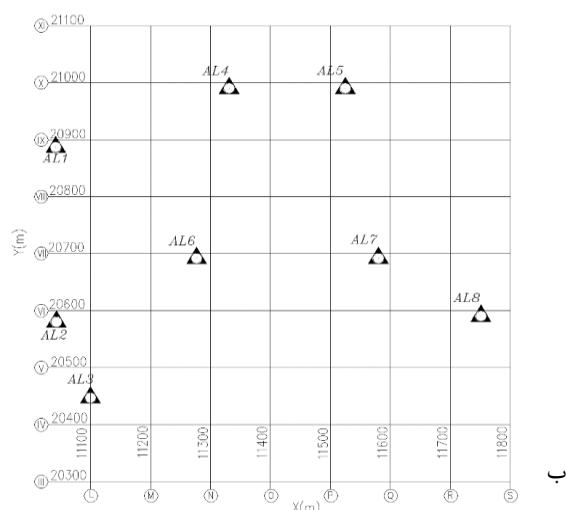
آیفون ۱۳ پرو، به‌طور مستقیم توانایی ضبط داده‌های فاز حامل (Carrier Phase) در فرمت RINEX را ندارد. این دستگاه عمدتاً برای موقعیتیابی عمومی و ناوبری طراحی شده است و برای کاربردهای دقیق ژئودزی یا پردازش داده‌های خام GNSS محدودیت‌هایی دارد. برای تعیین موقعیت دقیق تک نقطه‌ای علاوه بر توانایی جمع‌آوری داده‌های فاز حامل نیاز به اعمال تصحیحات دقیق مانند ساعت و مدار ماهواره، تصحیح خطای چند مسیری، و مدل سازی تأخیرات جوی است. نتایج جدول بالا نشان می‌دهد توقف طولانی مدت روی نقطه تنها با افزایش تصادفی دقت در بعضی نقاط همراه بوده است.

قابل قبول نرم‌افزار تبدیل شد. فایل تولید شده با فرمت .txt. دارای چهار ستون شامل نام هر عکس و مقادیر x ، y و z مرتبط با آن بود. از آنجا که دوربین تلفن هوشمند بر روی سه پایه ثابت قرار گرفته بود، ارتفاع دوربین تا سطح زمین به مختصات ارتفاعی نقطه در شبکه پیمایش اضافه و مختصات تمامی عکس‌ها از یک ایستگاه مشابه یکدیگر در نظر گرفته شدند.

برای هر سه حالت، فرآیند تشخیص و تطبیق نقاط کلیدی و محاسبه پارامترهای خارجی دوربین روی بالاترین تنظیم قرار گرفت تا نرم‌افزار با عکس‌های اندازه اصلی کار کند. همچنین محدودیت‌های نقاط کلیدی و نقاط اتصال روی مقادیر پیش‌فرض تنظیم شدند تا از تأثیر تغییر تنظیمات بر مقایسه بین مجموعه داده‌ها جلوگیری شود. پارامترهای توجه داخلی نیز با روش خودکالیبراسیون برآورد گردید.

نتایج و بحث

آزمایش گیرنده GNSS با ارزیابی خطای مطلق و نسبی موقعیت حسگر،



شکل ۵: الف) نقشه نقاط شبکه ژئودزی، ب) نتایج اندازه‌گیری GNSS تلفن هوشمند در مقایسه با شبکه نقاط ژئودزی

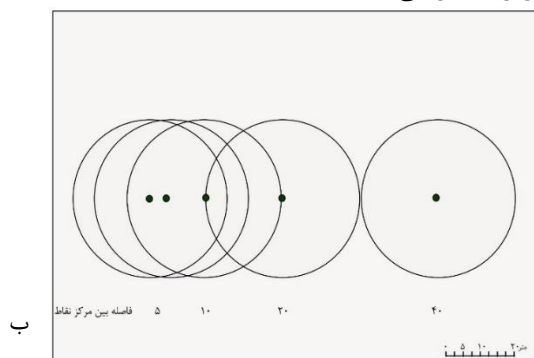
Fig. 4: a) Map of geodetic network points, b) Results of smartphone GNSS measurements compared to the geodetic network points

جدول ۲: اندازه‌گیری خطای مطلق و نسبی موقعیت حسگر تلفن هوشمند در مقایسه با شبکه ژئودزی

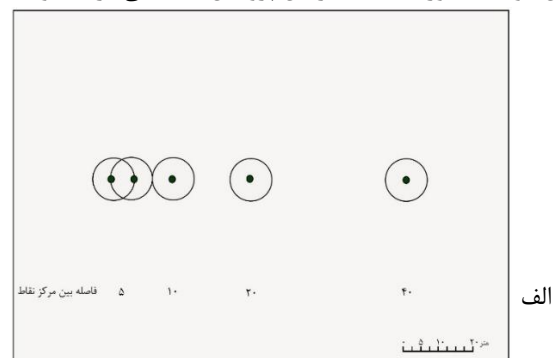
Table 2: Measurement of Absolute and Relative Position Errors of the Smartphone Sensor Compared to Geodetic Network Points

نقاط شبکه ژئودزی Geodetic Network Points	RMSE (meter)								
	موقعیت آنی Real-Time Position			میانگین بیست اندازه‌گیری Average of Twenty Measurements			مشاهده یک ساعته One-Hour Observation		
	X	Y	Z	X	Y	Z	X	Y	Z
AL1	0.83	3.25	-10.50	1.68	2.18	-12.40	-1.17	-2.33	-11.29
AL2	-1.64	2.75	-11.32	0.98	-1.84	-10.50	-	-	-
AL3	2.10	3.86	-13.69	1.77	4.05	-12.91	-	-	-
AL4	-1.08	-1.97	-14.27	0.69	1.36	-15.06	0.50	0.90	-11.16
AL5	3.17	6.05	-15.84	-2.54	-3.25	-11.43	-	-	-
AL6	-3.22	-3.41	-13.97	-3.82	-3.09	-13.46	-	-	-
AL7	1.97	-0.62	-12.05	-0.54	-1.02	-10.83	0.91	0.76	-9.54
RMSE Total	2.17	3.495	-13.20	2.02	2.606	-12.46	0.903	1.50	-10.69

تا ۶ متر در راستای افقی و ۱۰ تا ۱۵ متر در راستای عمودی نشان داد. برای مقیاس‌گذاری صحیح مدل، ضروری است که نسبت میان خطای موقعیت‌یابی GNSS و طول مسیر اکتساب مورد ارزیابی دقیق قرار گیرد. زمانی که خطای افقی تنها چند پیکسل در تصاویر پایه باشد ممکن است بی‌اهمیت به نظر برسد اما، هنگامی که خطاهای این اندازه برای ارجاع مدل در محدوده‌ای کوچک اعمال می‌شود، خطا کسری قابل توجهی از ابعاد مدل را به وجود می‌آورد. این مسئله تأثیر مستقیمی بر دقت مقیاس‌گذاری و صحت مدل ایجاد خواهد کرد. به همین دلیل در پژوهش حاضر مقیاس از طریق اندازه‌گیری چند طول مشخص با متر لیزری برآورد شد. شرایط مشابهی در بحث جهت‌گیری زاویه‌ای مدل نیز مشاهده می‌شود. همان‌طور که در شکل (۷) نشان داده شده‌است، موقعیت واقعی یک نقطه می‌تواند در هر کجای محدوده دایره خطا قرار داشته باشد که این امر باعث بروز خطا در برآورد آزمون امتداد شده و جهت‌گیری مدل را مختل خواهد کرد. با کاهش فاصله میان دو نقطه، درصد خطای جهت‌گیری نیز به‌طور قابل توجهی افزایش می‌یابد. در نهایت خطای موقعیت مدل در انتقال به سیستم مختصات جهانی معادل خطای موقعیت‌یابی GNSS تلفن هوشمند خواهد بود. این موضوع نشان دهنده اهمیت کاهش خطای GNSS و استفاده از روش‌های تکمیلی برای بهبود دقت است. جدول (۳) اختلاف مختصاتی ایستگاه‌های عکسبرداری (مراکز تصاویر) برداشت شده با GNSS تلفن هوشمند و روش توتال استیشن را نمایش می‌دهد.

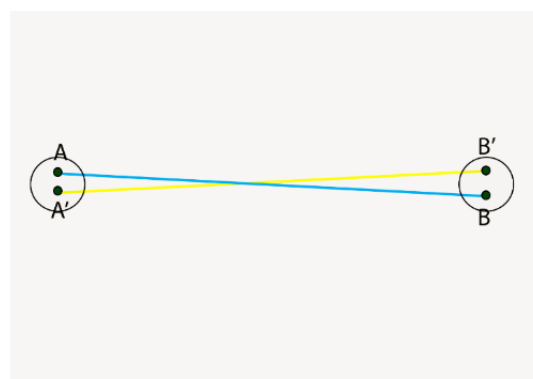


دقت به‌عنوان فاصله خطا تعریف شد، به این معنی که فاصله شامل هر دو بعد افقی و عمودی بین مکان واقعی نقطه و مکان اندازه‌گیری شده است. به‌طور کلی، این پژوهش به تلاشی برای دستیابی به اندازه‌گیری‌هایی نزدیک به مکان واقعی اشاره دارد. اگر یک نقطه اندازه‌گیری GNSS با فاصله خطا در نزدیکی نقطه دیگری قرار گیرد، این دو نقطه نمی‌توانند به‌طور دقیق از یکدیگر تفکیک شوند. بنابراین، تعیین موقعیت مراکز دوربین نیازمند اندازه‌گیری‌هایی است که حداقل فاصله بین مراکز تصویر، دو برابر حداکثر فاصله خطا GNSS باشد. به این ترتیب، حداکثر خطای اندازه‌گیری‌های GNSS در تلفن‌های هوشمند می‌تواند به‌عنوان یک محدودیت برای کاربرد عملی آن در فتوگرامتری محسوب شود. این محدودیت به‌ویژه در شرایطی که ایستگاه‌های عکسبرداری فاصله نزدیکی به یکدیگر دارند، مشکل‌ساز خواهد بود، زیرا این مکان‌ها معمولاً در فاصله‌ای کمتر از حداکثر خطای GNSS قرار می‌گیرند. شکل‌های (۵ الف و ب) نشان دهنده نقاط فرضی شناخته شده‌ای هستند که به‌ترتیب دارای خطای فاصله ۱۰ متر و ۵ متر می‌باشند؛ این امر نشان می‌دهد که برای اطمینان از نسبت‌دهی دقیق داده‌های اندازه‌گیری شده به نقطه صحیح، فاصله نقاط شناخته شده باید حداقل دو برابر خطای فاصله و به ترتیب ۲۰ متر و ۱۰ متر باشند. از سوی دیگر این سطح از خطا تأثیر قابل توجهی بر دقت تعیین مقیاس مدل، به‌ویژه در محدوده‌های کوچک مطالعاتی دارد. به‌طور خاص، GPS تلفن هوشمند مورد استفاده در این پژوهش خطاهایی در محدوده ۰/۶۰



شکل ۶: الف نشان دهنده خطا فاصله ۱۰ متر و ب نشان دهنده خطا فاصله ۵ متر

Fig. 6: (a) indicates an error for a distance of 10 meters, and (b) indicates an error for a distance of 5 meters.



شکل ۷: خطا جهت‌گیری زاویه‌ای

Fig. 7: Angular Orientation Error

جدول ۳: اختلاف مختصاتی ایستگاه‌های عکسبرداری، برداشت شده با توتال‌استیشن و GNSS تلفن هوشمند

Table 3: Coordinate Differences of Photography Stations Measured by Total Station and Smartphone GNSS

Error (Unit mm)							
ایستگاه عکسبرداری	X	Y	Z	ایستگاه عکسبرداری	X	Y	Z
Photography Station				Photography Station			
1	3.62	4	10	7	1.73	-0.64	10.48
2	2.81	2.17	9.38	8	0.28	0.72	9.60
3	0.84	-1.32	10.42	9	0.845	1.73	11.80
4	2.15	-1.68	11.63	10	-1.10	-2.18	14.27
5	-1.52	2.47	13.56	11	0.47	3.15	12.11
6	-3.87	-3.16	10.36	12	3.19	6	13.19

توسط سیستم iOS باقی ماند. همان‌طور که در جدول (۵) مشاهده می‌شود، ضعف سیستم تعیین موقعیت به بروز خطای بیشتر در تخمین ارتفاع منجر شده است. این محدودیت در برآورد ارتفاع می‌تواند به‌ویژه در پروژه‌هایی که به دقت مطلق ارتفاعی بالایی نیاز دارند، چالش برانگیز باشد و باید در تفسیر نتایج سه‌بعدی مدنظر قرار گیرد.

در مدل تلفیقی، استفاده از تنها یک نقطه‌ی کنترل باعث افزایش ۳ تا ۴ برابری دقت جهت‌گیری تصاویر شد و امکان ارجاع جغرافیایی مدل با دقت دسی‌متر را فراهم کرد. این رویکرد نه‌تنها بهبود قابل توجهی در نتایج ایجاد کرد، بلکه حجم کار اجرایی را نیز به حداقل رساند. در پروژه‌های مهندسی و ژئوماتیک که نیاز به انطباق مدل‌های سه‌بعدی با سیستم مختصات جهانی دارند، خطای جهت‌گیری می‌تواند منجر به انحراف قابل توجه در ارزیابی‌های بعدی یا در استخراج ویژگی‌ها از مدل‌های سه‌بعدی شود. همان‌طور که مشاهده شد، در فتوگرامتری تلفن هوشمند نیز استفاده از حداقل سه نقطه کنترل غیر همراستا توانست دقت هندسی را تا سطح میلی‌متر افزایش دهد.

نتیجه اجرای الگوریتم، همان‌طور که در شکل (۸) نمایش داده شده است، منجر به ایجاد مدلی با ساختار هندسی مناسب شد. با این حال، پارامترهای به‌دست آمده در چارچوب مرجع مدل هستند و نیاز به مقیاس‌بندی، چرخش و انتقال به سیستم مختصات UTM مطابق روش پیشنهادی دارند. پس از انتقال مدل به سیستم UTM مطابق با روش پیشنهادی اختلاف موقعیت نشانگرهای کددار تعیین موقعیت شده با توتال‌استیشن و برآورد شده در حالت برچسب جغرافیایی محاسبه و در جدول (۴) نمایش داده شده است.

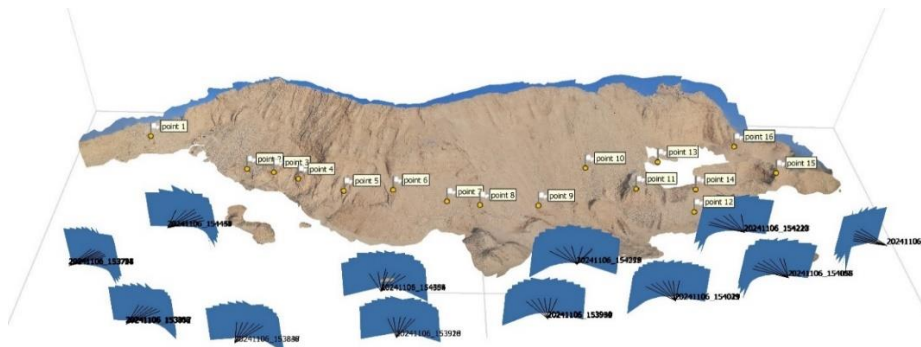
در ادامه بر اساس توضیحات ارائه شده، پنج مدل تولید و دقت تعیین موقعیت مطلق نشانگرها در هر مدل نسبت به داده‌های مرجع ارزیابی و نتایج آن در جدول (۵) آورده شده است.

در روش پیشنهادی، تلاش شد با استفاده از عکسبرداری در حالت ایستا، میانگین‌گیری موقعیت‌های GPS و ترکیب آن با داده‌های وضعیت دوربین و همچنین تعیین دقیق مقیاس، خطاهای سیستماتیک و تصادفی کاهش یابد و شبکه با دقت بیشتری به مرجع مختصات منتقل شود، اما میزان خطا همچنان در حد دقت تعیین موقعیت تک نقطه‌ای ارائه شده

جدول ۴: خطا تعیین موقعیت نشانگرها با روش برچسب جغرافیایی

Table 4: Positional Error of Markers Determined by the Geotagging Method

شماره نشانگر. Target No.	X	Y	Z	مجموع Total
	Error (Unit mm)			
1	-0.710	0.590	9.533	9.587
2	-0.124	2.579	9.814	10.149
3	-1.907	0.585	9.207	9.420
4	0.856	-1.613	11.383	11.528
5	-2.571	-1.267	9.466	9.890
6	0.976	-0.106	10.848	10.893
7	2.421	0.628	11.460	11.730
8	-2.198	2.147	9.209	9.709
9	1.169	1.440	10.243	10.410
10	4.686	-0.890	8.651	9.879
11	-3.131	0.732	8.890	9.453
12	-0.951	-2.408	10.649	10.960
13	1.399	1.104	10.206	10.515
14	-0.132	1.231	9.727	9.806
15	2.730	2.270	11.252	11.799
16	-1.637	-0.035	9.264	9.407
مجموع Total	2.081	1.450	10.026	10.332



شکل ۸: مدل سه‌بعدی تولید شده و موقعیت ایستگاه‌های تصویربرداری
Fig. 8: The produced 3D model and the positions of the imaging stations.

جدول ۵: دقت تعیین موقعیت نشانگرها در هر روش
Table 5: Accuracy of target positioning in each method

مدل Model	تعداد نقاط کنترل Number of control points	تعداد نقاط چک (نشانگرهای کددار) Number of check points (coded target)	میانگین RMSE نقاط کنترل Average RMSE of control points			میانگین RMSE نقاط چک Average RMSE of check points		
			Unit (meter)			Unit (meter)		
			X	Y	Z	X	Y	Z
برچسب جغرافیایی Geotagged Image	0	16	2.891	4.828	1.893	2.081	1.450	10.026
	۱ نشانگر کددار 1 coded target	15	0.002	0.003	0.005	0.384	0.332	0.417
مدل تلفیقی Integrated Model	۲ نشانگر کددار 2 coded targets	14	0.004	0.005	0.009	0.051	0.092	0.356
	۳ نشانگر کددار 3 coded targets	13	0.002	0.002	0.003	0.008	0.009	0.011
مدل پیمایش Traverse model	12	16	0.004	0.003	0.004	0.004	0.006	0.005

نتیجه‌گیری

۰/۵۰۷ متر و برای مؤلفه ارتفاعی به ۰/۴۱۷ متر کاهش یافت. همان‌طور که انتظار می‌رفت، اضافه کردن سه نقطه کنترل غیرهمراستا دقت هندسی مدل را تا سطح میلی‌متری افزایش یافت. همچنین در حالت استفاده از مختصات دقیق مراکز ایستگاه‌ها دقت به ۰/۰۰۰۷ متر رسید. استقلال از توزیع نقاط کنترل زمینی می‌تواند به‌طور مؤثری خطاهای ناشی از تغییرات هندسی در بازسازی مدل‌های سه‌بعدی را که به‌دلیل توزیع نامناسب این نقاط ایجاد می‌شوند، محدود کند. اما با وجود دقت پایین داده‌های موقعیتی تلفن هوشمند، استفاده از مختصات مراکز تصویر به‌عنوان نقاط کنترل زمینی برای حذف اعوجاج روش کارآمدی نبود. این محدودیت نشان می‌دهد که برای دستیابی به بازسازی دقیق‌تر، ترکیب داده‌های GNSS با سایر روش‌های کنترل زمینی یا استفاده از ابزارهای دقیق‌تر ضروری است.

یکی از جنبه‌های مهم دیگر که باید مورد توجه قرار گیرد، تعریف شبکه بهینه تصویربرداری است که باید با در نظر گرفتن محدودیت‌ها و قیود موجود در مرحله جمع‌آوری داده‌ها طراحی شود. تصویربرداری در حین حرکت و با سرعت بالا می‌تواند دقت موقعیتیابی را کاهش دهد. از آنجا که فاصله بین مرکز فاز آنتن گیرنده GNSS، مرکز نوری دوربین و حسگرهای حرکتی تعیین نشده و نرخ به‌روزرسانی موقعیت و همزمانی آن با اخذ تصاویر مشخص نیست، برای کاهش این چالش‌ها، تصویربرداری در شرایط ایستا پیشنهاد می‌شود. نصب تلفن روی سه پایه

در این مطالعه، فرآیند تحقیق در دو بخش انجام شد. در بخش نخست، دقت تعیین موقعیت GNSS تلفن هوشمند از طریق اندازه‌گیری خطای مطلق و نسبی موقعیت حسگر، در مقایسه با نقاط یک شبکه ژئودزی، مورد بررسی قرار گرفت. دقت سه روش موقعیتیابی مورد استفاده تقریباً مشابه بود و جذر میانگین مربعات خطای موقعیت افقی حسگر در روش توقف یک ساعته برابر با ۱/۷۵ متر و در مؤلفه ارتفاعی برابر با ۱۰/۶۹- متر محاسبه شد. این سطح از خطا می‌تواند تأثیر قابل توجهی بر دقت تعیین مقیاس مدل، به‌ویژه در محدوده‌های مطالعاتی کوچک، داشته باشد. به‌طور خاص، GNSS تلفن هوشمند مورد استفاده در این پژوهش خطاهایی در محدوده ۰/۶ تا ۶ متر در راستای افقی و ۱۰ تا ۱۵ متر در راستای عمودی نشان داد. در بخش دوم، روش پیشنهادی روی یک دپو با توزیع مناسب نقاط کنترل پیاده‌سازی شد. در این راستا، پنج مدل مختلف تولید شد و دقت تعیین موقعیت مطلق نشانگرها در هر مدل، نسبت به داده‌های جمع‌آوری شده از طریق توتال‌استیشن، ارزیابی گردید. در حالتی که تنها از تصاویر دارای برچسب جغرافیایی استفاده شد، مقدار RMSE نقاط چک برای مؤلفه افقی برابر با ۲/۲۳۸ متر و برای مؤلفه ارتفاعی برابر با ۱۱/۸۸۳ متر به‌دست آمد. افزودن تنها یک نقطه کنترل باعث بهبود دقت جهت‌گیری تصاویر و افزایش سه تا چهار برابری دقت موقعیتیابی شد، به‌طوری که مقدار RMSE برای مؤلفه افقی به

[5] Lowe DG. Object recognition from local scale invariant features. In: Proceedings of the IEEE International Conference on Computer Vision; 1999; Kerkira, Greece. p. 1150–1157. Available from: <https://doi.org/10.1109/ICCV.1999.790410>.

[6] Oniga VE, Breaban AI, Pfeifer N, Chirila C. Determining the suitable number of ground control points for UAS images georeferencing by varying number and spatial distribution. *Remote Sens.* 2020;12:876. Available from: <https://doi.org/10.3390/rs12050876>.

[7] Fleming ZD, Pavlis TL. An orientation-based correction method for SfM-MVS point clouds: Implications for field geology. *J Struct Geol.* 2018;113:76–89. Available from: <https://doi.org/10.1016/j.jsg.2018.06.005>.

[8] Jaud M, Bertin S, Beauverger M, Augereau E, Delacourt C. RTK GNSS-assisted terrestrial SfM photogrammetry without GCP: Application to coastal morphodynamics monitoring. *Remote Sens.* 2020;12:1889. Available from: <https://doi.org/10.3390/rs12111889>.

[9] Tahar KN. An evaluation on different number of ground control points in unmanned aerial vehicle photogrammetric block. *Int Arch Photogramm Remote Sens Spat Inf Sci.* 2013;40:93–98. Available from: <https://doi.org/10.5194/isprsarchives-XL-1-W2-93-2013>.

[10] Eltner A, Kaiser A, Castillo C, Rock G, Neugirg F, Abellán A. Image-based surface reconstruction in geomorphometry—Merits, limits and developments. *Earth Surf Dyn.* 2016;4:359–389. Available from: <https://doi.org/10.5194/esurf-4-359-2016>.

[11] Jaud M, Grasso F, Le Dantec N, Verney R, Delacourt C, Ammann J, Deloffre J, Grandjean P. Potential of UAVs for monitoring mudflat morphodynamics (Application to the Seine Estuary, France). *ISPRS Int J Geo-Inf.* 2016;5:50. Available from: <https://doi.org/10.3390/ijgi5030050>.

[12] Jaud M, Passot S, Allemand P, Le Dantec N, Grandjean P, Delacourt C. Suggestions to limit geometric distortions in the reconstruction of linear coastal landforms by SfM photogrammetry with PhotoScan® and MicMac® for UAV surveys with restricted GCPs pattern. *Drones.* 2018;3:2. Available from: <https://doi.org/10.3390/drones3010002>.

[13] Manfreda S, Dvořák P, Mullerova J, Herban IS, Vuono P, Arranz JJ, Perks M. Assessing the accuracy of digital surface models derived from optical imagery acquired with unmanned aerial systems. *Drones.* 2019;3:15. Available from: <https://doi.org/10.3390/drones3030015>.

[14] Chudley TR, Christoffersen P, Doyle SH, Abellan A, Snooke N. High-accuracy UAV photogrammetry of ice sheet dynamics with no ground control. *Cryosphere.* 2019;13:955–968. Available from: <https://doi.org/10.5194/tc-13-955-2019>.

[15] Czyża S, Szuniewicz K, Kowalczyk K, Dumalski A, Ogrodniczak M, Zieleniewicz Ł. Assessment of accuracy in unmanned aerial vehicle (UAV) pose estimation with the REAL-time kinematic (RTK) method on the example of DJI Matrice 300 RTK. *Sensors.* 2023;23(4):2092. Available from: <https://doi.org/10.3390/s23042092>.

امکان گرفتن چندین عکس از یک موقعیت با چرخاندن دوربین حول محور عمودی را فراهم می‌کند. شیوه تصویربرداری فن شکل باعث افزایش همپوشانی تصاویر می‌شود که برای استفاده در باندل اجستمنت مفید است.

مفید بودن تصاویر به‌دست‌آمده از گوشی‌های هوشمند موضوع اصلی این پژوهش نبود، زیرا این تصاویر به‌راحتی امکان تولید ابر نقطه و ایجاد مدل‌های سه‌بعدی از اشیاء را فراهم می‌کنند. در مقابل، تمرکز اصلی این مطالعه بر ارائه روشی به‌منظور بهبود دقت ارجاع جغرافیایی مستقیم بود. نتایج حاصل نشان داد که استفاده از تصاویر دارای برچسب جغرافیایی ثبت شده توسط تلفن هوشمند، به‌تنهایی قادر به دستیابی به‌دقت زیر متر در ارجاع جغرافیایی مستقیم نیست.

مشارکت نویسندگان

میزان مشارکت نویسندگان در نگارش این مقاله به شرح زیر است: نویسنده اول مسئولیت گردآوری و آماده‌سازی داده‌ها، انجام محاسبات، تجزیه و تحلیل آماری داده‌ها، تحلیل و تفسیر اطلاعات و نتایج و تهیه پیش‌نویس مقاله را بر عهده داشته است. نویسنده دوم به‌عنوان استاد راهنمای پژوهش، در طراحی پژوهش، نظارت بر مراحل انجام آن، بررسی و کنترل نتایج و همچنین اصلاح، بازبینی و نهایی‌سازی مقاله نقش داشته است. نویسنده سوم نیز در طراحی پژوهش مشارکت داشته و در مطالعه و بازبینی مقاله همکاری کرده است.

تشکر و قدردانی

نویسندگان مقاله از تمامی عزیزانی که در این تحقیق همکاری داشته‌اند، کمال قدردانی و سپاس را دارند.

تعارض منافع

«هیچ‌گونه تعارض منافع توسط نویسندگان بیان نشده است».

منابع و مأخذ

- [1] Pavlis T, Mason K. The new world of 3D geologic mapping. *GSA Today.* 2017;27:4–10. Available from: <https://doi.org/10.1130/GSATG313A.1>.
- [2] Paukkonen N. Ten years of photogrammetry and LiDAR: Digital 3D documentation in Finnish archaeology between 2013–2022. *Fennoscandia Archaeologica.* 2024; XLI:56–69. Available from: <https://doi.org/10.61258/fa.142220>.
- [3] Konsolaki A, Karantanellis E, Vassilakis E, Kotsi E, Lekkas E. Multitemporal monitoring for cliff failure potential using close-range remote sensing techniques at Navagio Beach, Greece. *Remote Sens.* 2024;16(23):4610. Available from: <https://doi.org/10.3390/rs16234610>.
- [4] Lowe DG. Distinctive image features from scale-invariant keypoints. *Int J Comput Vis.* 2004;60:91–110. Available from: <https://doi.org/10.1023/B:VISI.0000029664.99615.94>.

- [27] Corradetti A, Billi A, Tavani S. Virtual outcrops in a pocket: Smartphone as a fully equipped photogrammetric data acquisition tool. *GSA Today*. 2021;31. Available from: <https://doi.org/10.1130/GSATG506A.1>.
- [28] Bessin Z, Jaud M, Letortu P, Vassilakis E, Evelpidou N, Costa S, Delacourt C. Smartphone structure-from-motion photogrammetry from a boat for coastal cliff face monitoring compared with Pléiades tri-stereoscopic imagery and unmanned aerial system imagery. *Remote Sens*. 2023;15(15):3824. Available from: <https://doi.org/10.3390/rs15153824>.
- [29] Teppati Losè L, Chiabrando F, Maschio P. Direct georeferencing approaches for close-range and UAV photogrammetry in the built heritage domain. *ISPRS Arch*. 2023;XLVIII-M-2:1557-1564. Available from: <https://doi.org/10.5194/isprs-archives-XLVIII-M-2-2023-1557-2023>.
- [30] Ocalan T, Turk T, Tunalioglu N, Gurturk M. Investigation of accuracy of PPP and PPP-AR methods for direct georeferencing in UAV photogrammetry. *Earth Sci Inform*. 2022;15:2231-2238. Available from: <https://doi.org/10.1007/s12145-022-00868-7>.
- [31] Halaj M, Kačmářík M. Performance assessment of kinematic GNSS positioning with smartphones based on post-processing of raw observations. *GeoScience Eng*. 2022;25:1-10. Available from: <https://doi.org/10.35180/gse-2022-0080>.
- [32] Shan J, Li Z, Lercel D, Tissue K, Hupy J, Carpenter J. Democratizing photogrammetry: an accuracy perspective. *Geospatial Inf Sci*. 2023;26(2):175-188. <https://doi.org/10.1080/10095020.2023.2178336>
- [33] Patonis P. A comparative study on the use of smartphone cameras in photogrammetry applications. *Sensors*. 2024;24:7311. <https://doi.org/10.3390/s24227311>
- [34] Robustelli U, Baiocchi V, Pugliano G. Assessment of dual frequency GNSS observations from a Xiaomi Mi 8 Android smartphone and positioning performance analysis. *Electronics*. 2019;8(1):91. <https://doi.org/10.3390/electronics8010091>.
- [35] Yun J, Lim C, Park B. Inherent limitations of smartphone GNSS positioning and effective methods to increase the accuracy utilizing dual-frequency measurements. *Sensors*. 2022;22(24):9879. <https://doi.org/10.3390/s22249879>.
- [36] Netthonglang C, Thongtan T, Satirapod C. GNSS precise positioning determinations using smartphones. In: *Proceedings of the 2019 IEEE Asia Pacific Conference on Circuits and Systems (APCCAS): November 11–14, 2019, Bangkok, Thailand*. IEEE; 2019. p. 401–4. <https://doi.org/10.1109/APCCAS2019/475188953132>.
- [37] BOCHKATI M, Sharma H, Lichtenberger CA, Pany T. Demonstration of fused RTK (fixed) + inertial positioning using android smartphone sensors only. In: *2020 IEEE/ION Position, Location and Navigation Symposium (PLANS): April 20–23, 2020, Portland, Oregon, USA*. IEEE; 2020. p. 1140–1154. Available from: <https://doi.org/10.1109/PLANS46316.2020.9109865>
- [16] López RS, Murga RET, Silva-López JO, Rojas-Briceño NB, Fernández DG, Oliva-Cruz M, Taddia Y. Accuracy assessment of direct georeferencing for photogrammetric applications based on UAS-GNSS for high Andean urban environments. *Drones*. 2022;6(12):388. Available from: <https://doi.org/10.3390/drones6120388>.
- [17] Ekaso D, Nex F, Kerle N. Accuracy assessment of real-time kinematics (RTK) measurements on unmanned aerial vehicles (UAV) for direct geo-referencing. *Geo-Spatial Inf Sci*. 2020;23(2):165–181. Available from: <https://doi.org/10.1080/10.2019/10095020.1710437>.
- [18] Morena S. Application of action camera video for fast and low-cost photogrammetric survey of cultural heritage. *ISPRS Arch Photogramm Remote Sens Spatial Inf Sci*. 2022;XLVIII-2/W1-2022:177–184. Available from: <https://doi.org/10.5194/isprs-archives-XLVIII-2-W1-2022-177-2022>.
- [19] Arévalo-Verjel AN, Lerma JL, Prieto JF, Carbonell-Rivera JP, Fernández J. Estimation of the block adjustment error in UAV photogrammetric flights in flat areas. *Remote Sens*. 2022;14(12):2877. Available from: <https://doi.org/10.3390/rs14122877>.
- [20] Liu X, Lian X, Yang W, Wang F, Han Y, Zhang Y. Accuracy assessment of a UAV direct georeferencing method and impact of the configuration of ground control points. *Drones*. 2022;6(2):30. Available from: <https://doi.org/10.3390/drones6020030>.
- [21] Milan A, Shafiei M. Evaluation of the videogrammetry method for calculating the volume of earthworks in comparison with the conventional methods of land surveying. *Journal of Engineering Geology* 2023; 17 (2) :204-227 URL: <http://jeg.khu.ac.ir/article-1-3079-fa.html>.
- [22] Milan A, Shafiei M. Evaluation of the Stability of Internal Camera Parameters of Smartphones in Videogrammetry for Earthwork Volume Calculation.
- [23] DXO. Smartphones versus cameras: Closing the gap on image quality. 2020. Available from: <https://www.dxomark.com/smartphones-vs-cameras-closing-the-gap-on-image-quality/>.
- [24] Alsubaie NM, Youssef AA, El-Sheimy N. Improving the accuracy of direct geo-referencing of smartphone-based mobile mapping systems using relative orientation and scene geometric constraints. *Sensors*. 2017;17(10):2237. Available from: <https://doi.org/10.3390/s17102237>.
- [25] Tavani S, Granado P, Riccardi U, Seers T, Corradetti A. Terrestrial SfM-MVS photogrammetry from smartphone sensors. 2020. <https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2020.107318>
- [26] Jaud M, Bertin S, Beauverger M, Augereau E, Delacourt C. RTK GNSS-assisted terrestrial SfM photogrammetry without GCP: Application to coastal morphodynamics monitoring. *Remote Sens*. 2020;12(11):1889. Available from: <https://doi.org/10.3390/rs12111889>.

ماهواره‌ای راداری و ارزیابی قابلیت‌های تلفن هوشمند به‌عنوان ابزار جمع‌آوری اطلاعات در فتوگرامتری برد کوتاه است.

Shafiei, M., M.Sc. Student in Photogrammetry, Faculty of Civil, Water, and Environmental Engineering, Shahid Beheshti University, Tehran, Iran

✉ meh.shafiei@Mail.sbu.ac.ir



اصغر میلان استادیار گروه مهندسی نقشه‌برداری در دانشکده مهندسی عمران، آب و محیط زیست دانشگاه شهید بهشتی، دارای مدرک دکتری از دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی در رشته مهندسی نقشه‌برداری- فتوگرامتری می باشد. ایشان تا

کنون موفق به چاپ مقالات متعدد در مجلات و کنفرانس‌های داخلی و بین‌المللی معتبر شده‌اند. زمینه‌های تخصصی ایشان عبارتند از : فتوگرامتری، سنجش از دور، کاداستر و پردازش تصاویر می باشد.

Milan, A. Assistant Professor, Faculty of Civil, Water and Environmental Engineering, Shahid Beheshti University, Tehran, Iran

✉ a_milan@sbu.ac.ir



علیرضا وفائی‌نژاد دانشیار مهندسی عمران گروه مهندسی ژئوتکنیک و حمل و نقل، دانشکده مهندسی عمران، آب و محیط زیست دانشگاه شهید بهشتی، دارای مدرک دکتری از دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی، رشته مهندسی عمران گرایش نقشه‌برداری

است. ایشان تا کنون موفق به چاپ مقالات متعدد در مجلات و کنفرانس‌های داخلی و بین‌المللی معتبر شده‌اند. زمینه‌های تخصصی ایشان عبارتند از: سیستم اطلاعات مکانی، سیستم‌های اطلاعات مکانی هوشمند، یادگیری ماشین و کاربردهای سیستم‌های اطلاعات مکانی در مدیریت منابع و محیط زیست است.

Vafaeinejad, A. Associate Professor, Faculty of Civil, Water and Environmental Engineering, Shahid Beheshti University, Tehran, Iran

✉ a_vafaei@sbu.ac.ir

[38] Sharma, Himanshu, Bochkati, Mohamed, Lightenberger, Christian, Pany, Thomas, Darugna, Francesco, and Wubben, Jannes B. "Smartphone-Based GNSS 67 Positioning – Today and Tomorrow." Inside GNSS - Global Navigation Satellite Systems Engineering, Policy, and Design (blog), September 21, 2021. <https://insidengnss.com/smartphone-based-gnss-positioning-today-and-tomorrow/>.

[39] Chaturvedi, Aditya. "Advantages of Dual-Frequency GNSS in Smartphones." Geospatial World (blog), November 7, 2019. <https://www.geospatialworld.net/blogs/advantages-of-dual-frequencygnss-in-smartphones/>.

[40] Merry, Krista, and Pete Bettinger. "Smartphone GPS Accuracy Study in an Urban Environment." PLOS ONE 14, no. 7 (July 18, 2019): e0219890. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0219890>.

[41] Nowak, Maciej M., Katarzyna Dziób, Łukasz Ludwisiak, and Julian Chmiel. "Mobile GIS Applications for Environmental Field Surveys: A State of the Art." Global Ecology and Conservation 23 (September 2020): e01089. <https://doi.org/10.1016/j.gecco.2020.e01089>.

[42] Groves P. (2011). Shadow Matching: A New GNSS Positioning Technique for Urban Canyons, 417–430. <https://doi.org/10.1017/S0373463311000087>.

[43] Tomaščík, Julián, Juliána Chudá, Daniel Tunák, František Chudý, and Miroslav Kardoš. "Advances in Smartphone Positioning in Forests: Dual-Frequency Receivers and Raw GNSS Data." Forestry: An International Journal of Forest Research 94, no. 2 (March 4, 2021): 292–310. <https://doi.org/10.1093/forestry/cpaa032>.

معرفی نویسندگان

AUTHOR(S) BIOSKETCHES



مهران شفیی فارغ‌التحصیل رشته مهندسی نقشه‌برداری از دانشگاه یاسوج در سال ۱۳۹۳ است و در حال حاضر در مقطع کارشناسی ارشد فتوگرامتری در دانشگاه شهید بهشتی مشغول به تحصیل است. وی دارای سوابق پژوهشی در زمینه پایش و اندازه‌گیری تغییرات سطح زمین با استفاده از تصاویر

Citation (Vancouver): Shafiei M, Milan A, Vafaeinejad A. [Accuracy assessment of direct georeferencing of smartphone's images in videogrammetry method]. *J. RS. GEOINF. RES.* 2025; 3(2): 201-218

doi <https://doi.org/10.22061/jrsgr.2025.11753.1096>



COPYRIGHTS

© 2025 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/>)



ORIGINAL RESEARCH PAPER

2D Floorplan Extraction of Indoor Spaces from Mobile Laser Scanner Point Clouds Using Deep Learning Methods

M. Heidarimozaffar^{*,1}, Z. Dalvand²¹ Department of Civil Engineering, Faculty of Engineering, Bu-Ali Sina University, Hamadan, Iran² Department of Computer Science, Faculty of Engineering, Bu-Ali Sina University, Hamedan, Iran

ABSTRACT

Received: 04 May 2025
 Reviewed: 10 June 2025
 Revised: 02 August 2025
 Accepted: 06 September 2025

KEYWORDS:

Floorplan
 Point Clouds
 Density IMAGE
 Deep Learning

* Corresponding author

✉ m.heidarimozaffar@basu.ac.ir

☎ (+98912) 5185925

Background and Objectives: The extraction of 2D floorplans of building interiors plays a vital role in various domains, including architecture, surveying, building information modeling (BIM), robotics, and virtual reality. Mobile laser scanners capture the geometric structure of indoor environments with millimeter-level accuracy and record the results as point cloud data. Point clouds are a rich source of information for generating 2D floorplans of indoor spaces. However, surface reflection noise, occlusions caused by indoor objects, and the non-uniform density of points pose significant challenges for processing such data. Initially, 2D floorplan extraction relied on classical geometric methods. In recent years, however, deep learning-based approaches have gained increasing attention due to their strong ability to understand complex patterns and their robustness to noise. The main objective of this study is to present an effective framework for extracting 2D floorplans of building interiors from point cloud data using deep learning methods and to compare its performance with that of classical techniques.

Methods: In this study, an effective framework is proposed for extracting 2D floorplans of indoor building spaces from point cloud data, consisting of three sequential steps: data preprocessing, model implementation, and final evaluation. This framework enables a direct comparison between classical methods and deep learning approaches within a unified setting. Point cloud data are inherently discrete and unstructured, making direct processing challenging. In the preprocessing step, point clouds were projected onto a 2D space to generate density images, thereby reducing computational complexity. In the second step, two deep learning models, U-Net and Pix2Pix, as well as the classical Hough Transform algorithm, were implemented, with the density images serving as a common input for all methods. In the third step, the proposed framework was evaluated using publicly available datasets, including FloorNet and Structure3D. The input data were split into training, validation, and test sets, and data augmentation techniques were applied to improve model generalization. The performance of the models was assessed using the Dice Score and Intersection over Union (IoU) metrics.

Findings: Deep learning models demonstrated satisfactory performance on samples without occlusions, achieving accuracy levels above 90%. In particular, the U-Net model achieved a Dice Score of 97% on the Structure3D dataset. However, in samples containing occlusions, the models were unable to fully extract the floorplans. In contrast, the Hough Transform algorithm performed reasonably well in line detection but exhibited limitations in generating coherent and topologically valid outputs suitable for indoor map modeling due to its inability to capture topological structure. Moreover, the trial-and-error process required to tune the algorithm's parameters significantly increased its runtime.

Conclusion: The findings of this study indicate that deep learning methods, when provided with complete data, are capable of accurately and structurally extracting 2D floorplans from point clouds. However, under real-world conditions where occlusion is inevitable, developing models that are robust to incomplete data becomes essential. To address this challenge, future research directions include employing hybrid architectures and incorporating complementary data sources such as RGB images or depth maps. The proposed framework in this study serves as an effective step toward the systematic comparison of 2D floorplan extraction methods and provides a foundation for developing more advanced models suitable for real-world applications.



NUMBER OF REFERENCES

31



NUMBER OF FIGURES

14



NUMBER OF TABLES

2

مقاله پژوهشی

استخراج نقشه دوبعدی فضاهای داخلی ساختمان با روش‌های یادگیری عمیق از ابرنقاط لیزر اسکنرهای همراه

مرتضی حیدری مظفر^{۱*}، زهرا دالوند^۲^۱ گروه مهندسی عمران، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه بوعلی سینا، همدان، ایران^۲ گروه کامپیوتر، دانشکده مهندسی، دانشگاه بوعلی سینا، همدان، ایران

چکیده

پیشینه و اهداف: استخراج نقشه دوبعدی فضاهای داخلی ساختمان در حوزه‌های مختلف از جمله معماری، نقشه‌برداری، مدل‌سازی اطلاعات ساختمان (BIM)، رباتیک و واقعیت مجازی نقش حیاتی دارد. اسکنرهای لیزری همراه، ساختار هندسی محیط را با دقت میلی‌متری اندازه‌گیری کرده و نتایج حاصل را به صورت داده‌های ابرنقاط ثبت می‌کنند. داده‌های ابرنقاط، منبع غنی اطلاعات برای استخراج نقشه دوبعدی فضاهای داخلی ساختمان هستند. با این حال، عواملی مانند نویز ناشی از بازتاب‌های سطحی، انسداد دید توسط اجسام درون ساختمان و تراکم غیریکنواخت نقاط، پردازش این نوع داده را با چالش مواجه می‌کنند. در ابتدا استخراج نقشه دوبعدی ساختمان، با تکیه بر روش‌های کلاسیک هندسی انجام می‌شد و در سال‌های اخیر، روش‌های مبتنی بر یادگیری عمیق به دلیل توانایی بالا در درک الگوهای پیچیده و مقاومت در برابر نویز به‌طور فزاینده‌ای مورد توجه قرار گرفته‌اند. هدف این پژوهش، ارائه یک چارچوب موثر برای استخراج نقشه دوبعدی فضاهای داخلی ساختمان از داده‌های ابرنقاط با استفاده از روش‌های یادگیری عمیق و مقایسه عملکرد آن با روش‌های کلاسیک است.

روش‌ها: در این پژوهش، یک چارچوب موثر برای استخراج نقشه دوبعدی فضاهای داخلی ساختمان از داده‌های ابرنقاط پیشنهاد شده است که شامل سه گام متوالی پیش‌پردازش داده‌ها، پیاده‌سازی و ارزیابی نهایی مدل‌ها است. این چارچوب امکان مقایسه مستقیم روش‌های کلاسیک و یادگیری عمیق را در یک بستر مشترک فراهم می‌کند. داده‌های ابرنقاط دارای ساختار گسسته و غیرساخت‌یافته هستند و پردازش مستقیم آن‌ها دشوار است. در گام پیش‌پردازش داده‌ها، ابتدا با نگاشت ابرنقاط به فضای دوبعدی، تصاویر تراکم تولید شد تا پیچیدگی محاسباتی کاهش یابد. در گام دوم، دو مدل یادگیری عمیق U-Net و Pix2Pix و الگوریتم کلاسیک تبدیل هاف پیاده‌سازی شد و تصاویر تراکم به‌عنوان ورودی مشترک این روش‌ها استفاده شد. در گام سوم به منظور ارزیابی عملکرد روش پیشنهادی، آزمایش‌ها روی مجموعه داده‌های در دسترس FloorNet و Structure3D انجام شد. داده‌های ورودی به سه مجموعه داده آموزشی، اعتبارسنجی و آزمون تقسیم شده‌اند و به منظور ارتقای تعمیم‌پذیری، تکنیک‌های داده‌افزایی اعمال شده است. ارزیابی عملکرد مدل‌ها با استفاده از معیارهای Dice Score و IoU انجام شد.

یافته‌ها: مدل‌های یادگیری عمیق در نمونه‌های فاقد انسداد، عملکرد قابل قبولی داشته و دقت بیش از ۹۰٪ نشان دادند. به‌ویژه، مدل U-Net در مجموعه داده Structure3D به دقت ۹۷٪ در معیار Dice Score دست یافت. با این حال، مدل‌ها در نمونه‌هایی که شامل عارضه انسداد بودند، نتوانستند نقشه را به طور کامل استخراج کنند. در مقابل، الگوریتم تبدیل هاف در تشخیص خطوط عملکرد قابل قبول داشت اما به دلیل عدم تشخیص ساختار توپولوژیک، در تولید خروجی‌های منسجم و قابل استفاده برای مدل‌سازی نقشه‌های داخلی محدودیت دارد. همچنین آزمون و خطا برای تنظیم مقادیر پارامترها، باعث افزایش قابل توجه زمان اجرای الگوریتم شد.

نتیجه‌گیری: یافته‌های این پژوهش نشان داد که روش‌های یادگیری عمیق، در صورت وجود داده‌های کامل، قادر به استخراج دقیق و ساخت‌یافته نقشه دوبعدی از داده‌های ابرنقاط هستند اما در شرایط واقعی که عارضه انسداد اجتناب‌ناپذیر است، توسعه مدل‌های مقاوم نسبت به داده ناقص ضروری است. برای این منظور بهره‌گیری از معماری‌های ترکیبی، استفاده از منابع اطلاعاتی مکمل نظیر تصاویر RGB یا داده‌های عمق مسیر پژوهش‌های آینده است. چارچوب

تاریخ دریافت: ۱۴ اردیبهشت ۱۴۰۴
تاریخ داوری: ۲۰ خرداد ۱۴۰۴
تاریخ اصلاح: ۱۱ مرداد ۱۴۰۴
تاریخ پذیرش: ۱۵ شهریور ۱۴۰۴

واژگان کلیدی:

نقشه دوبعدی
ابر نقاط
تصویر تراکم
یادگیری عمیق

* نویسنده مسئول

m.heidarimozaffar@basu.ac.ir

۰۹۱۲-۵۱۸۵۹۲۵

پیشنهادی این پژوهش، گامی مؤثر در جهت مقایسه‌ی نظام‌مند روش‌های استخراج نقشه دوبعدی و ایجاد بستر توسعه برای مدل‌های پیشرفته‌تر در کاربردهای واقعی تلقی می‌شود.

مقدمه

استخراج خودکار نقشه دوبعدی محیط‌های داخلی ساختمان‌ها از داده‌های خام اسکنر لیزری، نقطه عطف بزرگی در تحقیقات نقشه‌برداری است. مجموعه داده‌های فضایی گسسته که به عنوان ابرنقاط شناخته می‌شوند، اغلب پایه‌گذار برنامه‌های تصمیم‌گیری هستند [۱]. در ابرنقاط، هر نقطه دارای مختصات X ، Y و Z است. نکته حائز اهمیت نحوه اندازه‌گیری، پردازش و تولید اطلاعات قابل اطمینان از مجموعه داده‌های جمع‌آوری شده است [۲]. داده‌های ابرنقاط به صورت مستقیم به وسیله پوششگرهای لیزری اندازه‌گیری می‌شوند و یا به صورت غیر مستقیم با روش‌های فتوگرامتری تولید می‌شوند [۳]. برخلاف روش‌های فتوگرامتری، پوششگرهای لیزری به دلیل دقت محدوده لیزری در سطح میلی‌متر و جهت‌گیری دقیق پلتفرم حسگر (LIDAR) که با سیستم تعیین موقعیت و جهت‌گیری یکپارچه (position and orientation system) پشتیبانی می‌شود، بسیار دقیق است [۴].

با توسعه فناوری‌های برداشت سه‌بعدی نظیر اسکنرهای لیزری زمینی (Terrestrial Laser Scanning)، سامانه‌های برداشت متحرک (Mobile Mapping system)، حسگرهای عمق‌سنج RGB-D و سیستم‌های مکان‌یابی و نقشه‌سازی هم‌زمان (Simultaneous Localization and Mapping)، امکان برداشت سریع، دقیق و جامع از محیط‌های داخلی ساختمان به صورت داده‌های ابرنقاط سه‌بعدی فراهم شده است [۵]. استخراج نقشه دوبعدی از این داده‌ها نقش کلیدی در کاربردهایی نظیر نقشه‌برداری، مدل‌سازی شهری و صنعتی [۶]، مدل‌سازی اطلاعات ساختمان (Building Information Model) [۷]، مدیریت بحران و امداد و نجات [۸]، ناوبری رباتیک و تولید واقعیت مجازی [۹]، مستندسازی و حفظ میراث فرهنگی [۱۰]، فیلم‌ها و بازی‌های رایانه‌ای دارد. چالش اصلی، تبدیل داده‌های ابرنقاط به ساختارهای منسجم و قابل تفسیر مانند دیوارها، درها و اتاق‌های بسته است. تفسیر و تبدیل این داده‌ها به نقشه، به دلیل وجود عواملی مانند نویز و نقاط خارج از محدوده، انسداد (occlusion)، تراکم ناکافی و تغییرپذیری وضوح، عدم پیوستگی داده و استانداردسازی همچنان یک مسئله باز و دشوار است [۱۱]. تحقق این هدف مستلزم بهره‌گیری از روش‌هایی دقیق برای تشخیص مرزهای ساختاری، جبران نواحی دچار انسداد و حفظ یکپارچگی و مقیاس هندسی محیط است.

قطعه‌بندی معنایی (Semantic Segmentation) یکی از مهم‌ترین مراحل پردازش برای تبدیل داده‌های ابرنقاط به نقشه‌های قابل استفاده محسوب می‌شود [۱۲]. قطعه‌بندی در ابرنقاط، فرآیندی است که طی آن مجموعه‌ای از نقاط سه‌بعدی به زیرمجموعه‌هایی با ویژگی‌های مشترک تقسیم می‌شوند، به گونه‌ای که هر قطعه نشان‌دهنده یک ناحیه یا ساختار همگن در صحنه باشد. ویژگی‌های مشترک می‌تواند شامل

خصوصیات هندسی (مانند موقعیت، نرمال سطح، انحنا)، ویژگی‌های رادیومتریکی (مانند شدت بازتاب یا رنگ) یا خصوصیات معنایی (مانند تعلق به یک شیء خاص) باشند. هدف از قطعه‌بندی، ساده‌سازی، ساختاردهی و تسهیل درک و تفسیر داده‌های حجیم و غیرساخت‌یافته ابرنقاط است، به طوری که بتوان از آن‌ها برای تحلیل‌های بعدی مانند استخراج نقشه‌های دوبعدی و سه‌بعدی استفاده کرد.

روش‌های ارائه‌شده برای این مسئله را می‌توان به طور کلی در دو رویکرد اصلی طبقه‌بندی کرد: (۱) رویکردهای مبتنی بر قواعد گرامری و (۲) رویکردهای مبتنی بر یادگیری. دسته نخست عمدتاً شامل روش‌های کلاسیک است که پیش از توسعه گسترده الگوریتم‌های یادگیری ماشین مورد استفاده قرار می‌گرفتند. این روش‌ها با تکیه بر مجموعه‌ای از قواعد صریح و الگوهای از پیش تعیین‌شده سعی در استخراج نقشه دوبعدی دارند. با این حال، این دسته از روش‌ها معمولاً به دلیل پیچیدگی در تنظیم دقیق پارامترها، پیش‌پردازش سطح پایین متناسب با نوع داده، و طراحی قواعد منطبق با سبک‌های معماری مختلف، دارای سطح اتوماسیون پایین و نیازمند مداخلات انسانی قابل توجهی هستند [۱۳]. افزون بر آن، وابستگی شدید این الگوریتم‌ها به فرمت نقشه‌های ورودی، انعطاف‌پذیری آن‌ها را در مواجهه با داده‌های متنوع کاهش می‌دهد. در مطالعه‌ای با استفاده از پیش‌فرض‌های هندسی استخراج شده از ابرنقاط محیط‌های داخلی، الگوریتمی مبتنی بر بازسازی از پایین به بالا ارائه داد [۱۴]. همچنین، در پژوهشی دیگر با بهره‌گیری از الگوها و قواعد از پیش تعریف شده، اقدام به تقسیم‌بندی فضایی محیط‌های بسته نمود [۱۵]. این دسته از روش‌ها، هرچند در محیط‌هایی با ساختار هندسی منظم عملکرد مناسبی از خود نشان می‌دهند، اما در فضاهایی با هندسه‌های پیچیده، نامنظم یا طراحی‌های غیرسنتی با محدودیت‌های جدی مواجه‌اند.

رویکردهای مبتنی بر یادگیری به دو دسته روش‌های یادگیری ماشین و یادگیری عمیق تقسیم می‌شود. در روش‌های یادگیری ماشین، الگوریتم‌هایی نظیر خوشه‌بندی آماری، بهینه‌سازی عددی و تکنیک‌های استخراج ویژگی کلاسیک به منظور شناسایی الگوهای ساختاری موجود در داده به کار گرفته می‌شوند [۱۶]. ساختارهای هندسی اتاق‌ها با ترکیبی از الگوریتم‌های یادگیری ماشین نظیر خوشه‌بندی مبتنی بر میانگین، پوشش‌دهی با استفاده از پوسته‌های غیرمقعر و نیز الگوریتم اجماع نمونه‌برداری تصادفی (RANSAC) استخراج شده‌اند [۱۷].

روش‌های یادگیری عمیق با بهره‌گیری از معماری‌های پیشرفته شبکه‌های عصبی، توانایی مدل‌سازی ارتباطات غیرخطی و پیچیده بین داده‌های ورودی و ساختارهای نقشه دوبعدی را دارند. از معماری ترنسفورمر جهت شناسایی گوشه‌ها و استنتاج روابط اتصال میان آن‌ها استفاده شده تا گراف مسطح نقشه به دست آید [۱۸]. با این حال، عدم

ضروری در فرآیندهای پردازش ابرنقاط در حوزه معماری و نقشه‌برداری دیجیتال به‌شمار می‌رود.

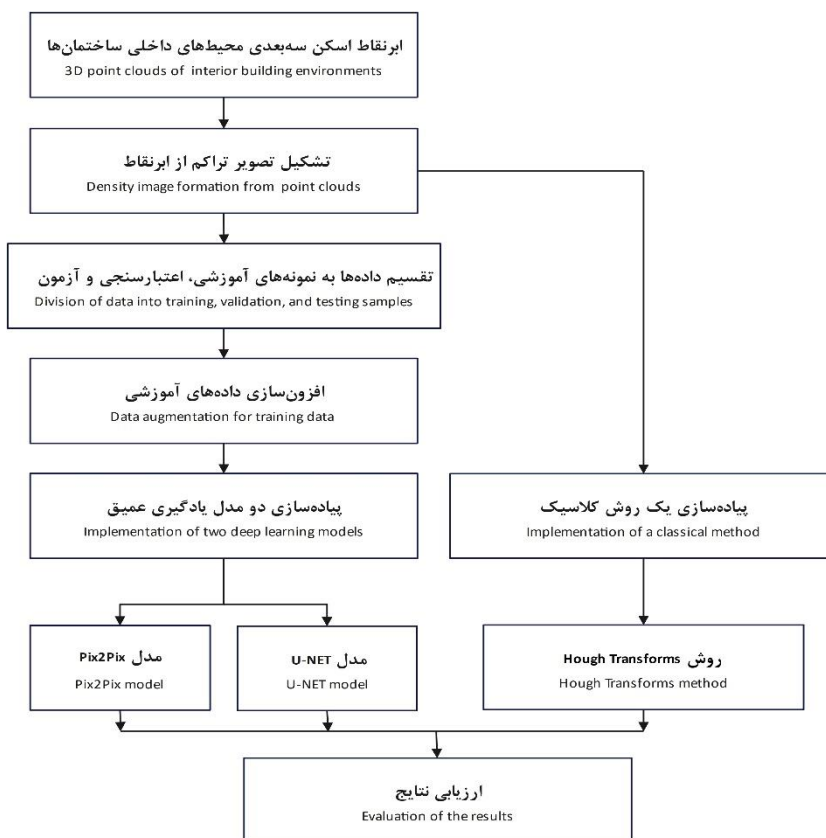
نوآوری این پژوهش، ارائه‌ی یک چارچوب مؤثر برای استخراج نقشه‌ی دوبعدی محیط‌های داخلی ساختمان‌ها از ابرنقاط اسکن لیزری سه‌بعدی است. در شکل (۱) روندنمای فرآیند استخراج نقشه در روش پیشنهادی نشان داده شده است. مراحل انجام کار به صورت زیر است:

- در گام اول، تصویر تراکم مربوط به ابرنقاط ورودی تشکیل می‌شود.
- در گام دوم، استخراج نقشه دوبعدی از تصویر تراکم با یک روش کلاسیک و سپس با استفاده از رویکردهای یادگیری عمیق پیاده‌سازی می‌شود.
- در گام سوم، به ارزیابی نتایج مدل‌های پیاده‌سازی شده خواهیم پرداخت.

اغلب پژوهش‌های پیشین تنها بر یکی از دو رویکرد کلاسیک یا یادگیری عمیق تمرکز داشته‌اند، در این پژوهش یک چارچوب جامع برای مقایسه، تحلیل و ارزیابی متقابل این دو دسته روش ارائه شده است. هدف اصلی این پژوهش، استخراج نقشه دوبعدی فضاهای داخلی ساختمان از داده‌های ابرنقاط اسکن لیزری، از طریق پیاده‌سازی و مقایسه دو رویکرد مستقل شامل روش‌های کلاسیک و یادگیری عمیق است. در ادامه، ابتدا مجموعه داده‌های مورد استفاده معرفی می‌شوند؛ سپس به ارائه جزئیات روش پیشنهادی پرداخته و در نهایت، نتایج حاصل از اجرای این روش‌ها گزارش و مورد بحث قرار می‌گیرند.

شناسایی کامل برخی گوشه‌ها منجر به حذف ناخواسته برخی یال‌ها و در نتیجه، ناقص‌ماندن اتاق‌های حاصل گردید. در پژوهشی دیگر، نمایه‌ای مبتنی بر تقسیم‌بندی پلان به مجموعه‌ای از جعبه‌ها معرفی شد که با استفاده از رگرسیون جعبه‌ای، اطلاعات محلی شکل هر اتاق به‌طور مستقیم استخراج می‌شد [۱۹]. اگرچه این رویکرد قابلیت نمایش صریح هندسه اتاق‌ها را فراهم می‌کرد، اما در نمایش ساختارهای نامنظم با محدودیت مواجه بود. با تعریف دو سطح پرسش و مدل‌سازی نقشه دوبعدی به‌عنوان مجموعه‌ای از چندضلعی‌ها با گوشه‌های مرتب‌شده و طول متغیر، گامی مؤثر در بهبود کیفیت بازسازی برداشت [۲۰]. با این حال، این روش همچنان با چالش‌هایی مانند تولید توالی‌های نامنظم ناشی از چندضلعی‌های اولیه تصادفی و همچنین خطا در بازسازی دقیق چندضلعی‌ها به دلیل حذف یا سوگیری در شناسایی گوشه‌های منفرد روبه‌رو بود.

با وجود پیشرفت‌های اخیر در روش‌های یادگیری عمیق و الگوریتم‌های مبتنی بر شبکه‌های عصبی، اغلب این روش‌ها برای داده‌های ساخت‌یافته یا محیط‌های بیرونی طراحی شده‌اند و عملکرد آن‌ها در محیط‌های بسته با ساختار پیچیده داخلی، به‌ویژه در شرایط برداشت واقعی، با چالش مواجه است. از این رو، توسعه‌ی روشی دقیق و قابل تعمیم برای استخراج خودکار نقشه‌های دوبعدی محیط‌های داخلی از ابرنقاط سه‌بعدی، با تمرکز بر شناسایی مرز دیوارها و بازسازی توپولوژی اتاق‌ها، نیازی



شکل ۱: روش پیشنهادی در این تحقیق برای استخراج نقشه دوبعدی محیط‌های داخلی ساختمان‌ها از ابرنقاط سه‌بعدی

Fig. 1: The proposed method in this study for extracting 2D floorplans of indoor building environments from 3D point clouds

روش تحقیق

مجموعه داده‌ها

جهت بررسی عملکرد روش پیشنهادی و شناخت بهتر قابلیت‌ها و محدودیت‌های آن، از دو دیتاست ابرنقاط استفاده شده که در دسترس عموم قرار دارند. این مجموعه‌ها شامل داده‌های مصنوعی و واقعی از محیط‌های داخلی هستند و هر کدام ویژگی‌ها و چالش‌های خاص خود را دارند:

- مجموعه داده Structured3D، یک مجموعه داده مصنوعی از محیط‌های داخلی است که شامل ۳۵۰۰ برداشت و نقشه‌های مختلف طبقه می‌باشد. داده‌ها دارای برچسب‌گذاری ساختاری سه‌بعدی هستند که برای شبیه‌سازی محیط‌های واقعی طراحی شده‌اند. این مجموعه داده شامل صحنه‌های ساده و پیچیده است [۲۱]. به منظور آموزش شبکه عصبی پیشنهادی، تعداد کل نمونه‌ها به صورت ۳۰۰۰ اسکن برای آموزش، ۲۵۰ اسکن برای اعتبارسنجی و ۲۵۰ اسکن برای ارزیابی تقسیم‌بندی شده است.

- مجموعه داده FloorNet، یک مجموعه داده واقعی از محیط‌های داخلی است که شامل ۱۵۵ برداشت و نقشه‌های مختلف طبقه می‌باشد. داده‌ها دارای برچسب‌گذاری ساختاری سه‌بعدی هستند که به صورت دستی تهیه شده است [۲۲]. به منظور آموزش شبکه عصبی، تعداد کل نمونه‌ها به صورت ۱۳۵ اسکن برای آموزش، ۲۰ اسکن برای اعتبارسنجی و ۲۰ اسکن برای ارزیابی تقسیم‌بندی شده است.

پیش پردازش داده‌ها

تشکیل تصویر تراکم از داده‌های ابرنقاط

به منظور کاهش پیچیدگی محاسباتی از نظر زمان اجرا و میزان مصرف حافظه، ابرنقاط اولیه به تصویر تراکم (Density Image) تبدیل شده و فرآیند استخراج نقشه در فضای دوبعدی تصویر انجام می‌گیرد. تصویر تراکم اطلاعات توزیع نقاط را در صفحه افقی X-Y نمایش دهد و مبنایی

برای مراحل بعدی تحلیل داده است. برای این منظور در ابتدا، مختصات نقاط در صفحه X-Y نرمال‌سازی می‌شوند تا در محدوده تصویر دوبعدی قرار گیرند. این کار با محاسبه کمینه و بیشینه مختصات نقاط و مقیاس‌بندی آن‌ها به اندازه تصویر انجام می‌شود. این فرآیند به صورت رابطه (۱) و (۲) تعریف می‌شود:

$$x' = \frac{x - x_{min}}{x_{max} - x_{min}} * W \quad (1)$$

$$y' = \frac{y - y_{min}}{y_{max} - y_{min}} * H \quad (2)$$

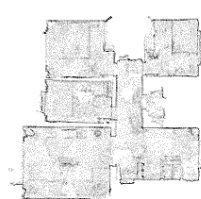
که در آن H و W به ترتیب ارتفاع و عرض تصویر، x' و y' مختصات نرمال شده نقاط در تصویر هستند.

در این روش برای هر پیکسل تصویر دوبعدی، تعداد نقاطی که در آن محدوده قرار می‌گیرند شمارش می‌شود. این شمارش براساس مختصات x و y نقاط انجام شده و تمام نقاط دارای مقدار Z متفاوت که در یک موقعیت (x, y) قرار دارند، جمع می‌شوند. نتیجه این پردازش یک نقشه چگالی است که در آن مقدار هر پیکسل نشان دهنده تراکم نقاط در آن مکان خاص است. نمونه تصاویر تراکم دیتاست‌های ورودی به همراه ماسک واقعیت زمینی آن‌ها در شکل (۲) نشان داده شده است.

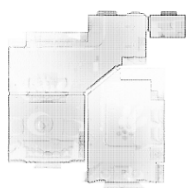
الگوریتم‌های پیشنهادی برای استخراج نقشه دوبعدی

روش کلاسیک Hough Transform

یکی از تکنیک‌های پرکاربرد در پردازش تصویر و بینایی ماشین تبدیل هاف است که برای شناسایی و تحلیل اشکال هندسی مانند خطوط، دایره‌ها و سایر منحنی‌ها در تصاویر مورد استفاده قرار می‌گیرد. در این روش، به‌ویژه برای تشخیص خطوط در نقشه‌های طبقات ساختمان، برای هر نقطه‌ای در فضای تصویر، یک مجموعه از پارامترها در فضای ویژگی ترسیم می‌شود که معرف خطوط قابل ترسیم از آن نقطه هستند [۲۳]. به طور خاص، تبدیل هاف به صورت زیر عمل می‌کند:



الف



ب

شکل ۲: نمونه تصویر تراکم دیتاست ورودی به همراه نقشه دوبعدی مربوطه، الف - دیتاست FloorNet، ب - دیتاست Structured3D

Fig. 2: Sample density images from the input dataset along with their corresponding 2D maps — (a) FloorNet dataset, (b) Structured3D dataset

مدل دارای دو بخش اصلی رمزگذار (Encoder) و رمزگشا (Decoder) است. بخش رمزگذار شامل چندین لایه کانولوشن و لایه‌های کاهش ابعاد (Pooling Layer) است که وظیفه استخراج ویژگی‌ها و کاهش ابعاد تصویر ورودی را به عهده دارد. در این بخش، ویژگی‌های مختلف تصویر به تدریج استخراج می‌شوند و ابعاد تصویر کاهش می‌یابد، بنابراین مدل می‌تواند الگوهای پیچیده در داده‌ها را یاد بگیرد. سپس، بخش رمزگشا با استفاده از لایه‌های افزایش ابعاد (Upsampling) و کانولوشن، ابعاد تصویر را به اندازه اولیه بازمی‌گرداند. هم‌چنین، U-Net از اتصالات مستقیم (Skip Connections) بین بخش‌های رمزگذار و رمزگشا استفاده می‌کند که به مدل اجازه می‌دهد جزئیات دقیق‌تر و اطلاعات محلی را حفظ کند. این ویژگی باعث می‌شود که U-Net در قطعه‌بندی تصاویر، عملکرد بهتری داشته باشد و بتواند لبه‌ها و بافت‌های اصلی را به خوبی شناسایی کند. شکل (۳) معماری شبکه عصبی U-NET را نمایش می‌دهد. توابع فعال‌ساز در شبکه‌های عصبی، پارامتری مهم است. توابع فعال‌ساز، برای شناسایی روابط پیچیده بین داده‌ها استفاده می‌شوند و خروجی غیرخطی ارائه می‌دهند. بدون توابع فعال‌ساز، شبکه‌های عصبی تنها مدل‌های رگرسیون خطی خواهند بود که قادر به نمایش چندجمله‌ای‌های درجه یک هستند [۲۶]. در شبکه‌های عصبی عمیق، هدف اصلی لایه Dropout، کاهش بیش‌برازش (Overfitting) است. بیش‌برازش، زمانی اتفاق می‌افتد که مدل به داده‌های آموزشی به شدت وابسته می‌شود و پارامترها را طوری تنظیم می‌کند که به خوبی روی داده‌های آموزشی عملکرد داشته باشد، اما در داده‌های جدید عملکرد ضعیفی از خود نشان می‌دهد. لایه Dropout در طول آموزش، با خاموش کردن نورون‌های مختلف، هر بار یک زیرمدل متفاوت از شبکه ایجاد می‌کند. این وضعیت شبیه به مجموعه‌ای از مدل‌ها با وزن‌های مختلف است که خود باعث بهبود عمومی الگوی یادگیری می‌شود [۲۷].

نمایش فضای پارامتر: هر خط در فضای تصویر می‌تواند با استفاده از معادله‌ی خط به شکل $y = mx + b$ یا فرم معادله عمومی‌تر $Ax + By + C = 0$ توصیف شود. در این روش، معمولاً از فرم قطبی $r = x \cos(\theta) + y \sin(\theta)$ استفاده می‌شود. که در آن r فاصله از مبدأ و θ زاویه‌ای است که خط نسبت به محور x تشکیل می‌دهد [۲۴].

تبدیل نقاط تصویر به فضای پارامتر: برای هر نقطه‌ای موجود در تصویر، مقدار r و θ محاسبه شده و در فضای پارامتر ثبت می‌شود. بدین ترتیب، هر نقطه‌ای موجود در تصویر به یک منحنی در فضای پارامتر تبدیل می‌شود.

تجمع و شناسایی خطوط: در فضای پارامتر، نقاطی که به یکدیگر نزدیک هستند، نشان‌دهنده وجود یک خط در تصویر اصلی هستند. با استفاده از یک ناحیه‌ی تجمع (accumulator)، تعداد دفعاتی که هر مجموعه از مقادیر r و θ برمی‌گردد، شمارش می‌شود. مقادیر با بیشترین تعداد تجمع، معرف خطوط هستند که در تصویر اصلی وجود دارند.

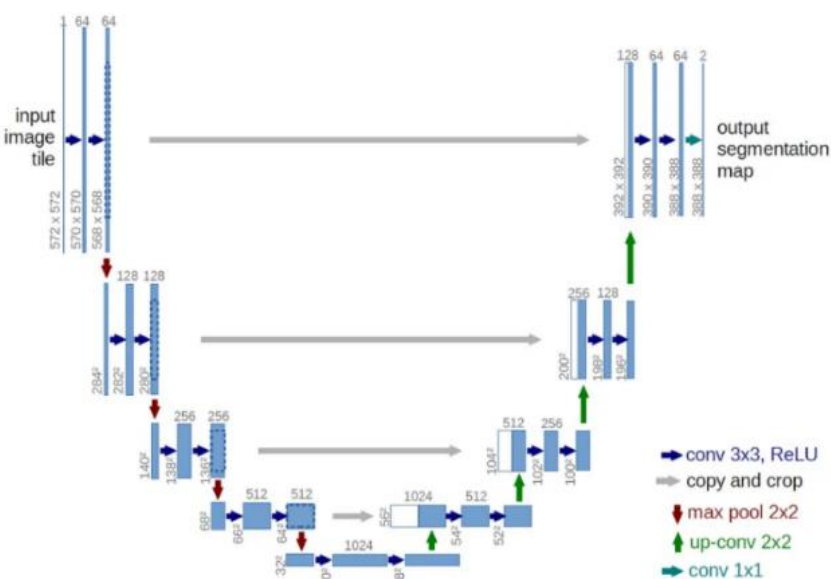
شناسایی و بازسازی خطوط: پس از شناسایی نقاط حداکثر در فضای پارامتر، می‌توان با استفاده از این مقادیر، خطوط شناسایی‌شده را به وضوح در تصویر ورودی بازسازی کرد.

این روش به دلیل قابلیت زیاد آن در شناسایی خطوط به‌ویژه در شناسایی ساختارهای مستطیلی و دیوارها در نقشه‌های طبقات، بسیار مورد توجه قرار گرفته است. با این حال، ضروری است که پارامترهای الگوریتم به درستی تنظیم شوند تا دقت و کارایی آن افزایش یابد.

مدل‌های یادگیری عمیق

U-NET, مد

شبکه عصبی U-Net یک معماری قدرتمند برای پردازش تصاویر است که به طور خاص برای وظایف قطعه‌بندی طراحی شده است [۲۵]. این



شکل ۳: معماری مدل U-NET

مدل Pix2Pix

- زیان بازسازی: برای اطمینان از اینکه خروجی تولیدشده شباهت نزدیکی به تصویر هدف دارد، از زیان L1 بین تصویر تولیدشده و تصویر واقعی استفاده می‌شود. رابطه (۴) نحوه محاسبه زیان بازسازی را نشان می‌دهد.

$$\begin{aligned} Loss_{L1G} &= E_{x,y} [|y \\ &- G(x)|_1] \end{aligned} \quad (4)$$

ترکیب این دو تابع زیان، تابع کلی آموزش مدل را تشکیل می‌دهد. رابطه (۵) نحوه محاسبه زیان کل را نشان می‌دهد.

$$G^* = \arg \min \max_{G,D} L_{CGAN}(G,D) + \lambda Loss_{L1G} \quad (5)$$

که در آن λ یک ضریب وزنی برای کنترل تأثیر زیان بازسازی است و به طور معمول برابر ۱۰۰ در نظر گرفته می‌شود.

معیارهای ارزیابی

به منظور ارزیابی عملکرد الگوریتم‌های قطعه‌بندی پیشنهادی، از معیارهای استاندارد شباهت‌سنجی شامل دو شاخص Dice score و IOU استفاده شد. این شاخص‌ها، هم‌پوشانی بین تصاویر Ground Truth و خروجی الگوریتم قطعه‌بندی پیشنهادی را اندازه‌گیری می‌کنند. تعریف این دو شاخص در رابطه (۶) و (۷) آمده است:

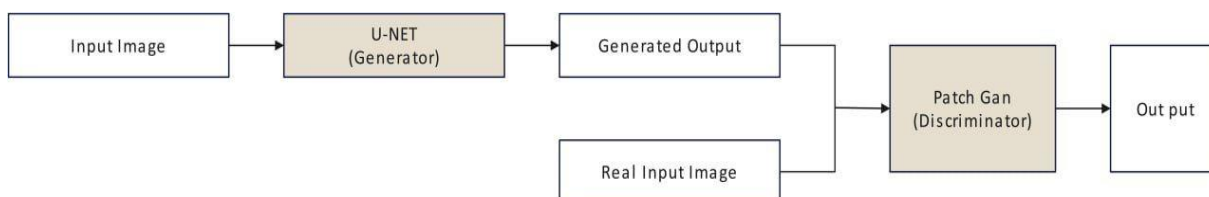
$$Dice\ Score(A,B) = \frac{2|A \cap B|}{|A| + |B|} \quad (6)$$

$$Mean\ IOU = \frac{1}{n} \sum_{k=1}^n \frac{|A_k \cap B_k|}{|A_k \cup B_k|} \quad (7)$$

که در اینجا A و B به ترتیب تصویر Ground Truth و تصویر پیش‌بینی شده توسط مدل است. n تعداد کلاس‌ها و برابر ۲ است. هرچه عدد به دست آمده به مقدار یک نزدیکتر باشد، نشان دهنده هم‌پوشانی بیشتر و عملکرد مطلوب قطعه‌بندی است.

نتایج و بحث

در مرحله پیش‌پردازش، مختصات نقاط در صفحه X-Y نرمال‌سازی شده و یک تصویر تراکم دوبعدی (Density Image) با ابعاد 256×256 تشکیل گردید. این تصویر میزان تراکم نقاط در هر موقعیت را نشان داده و مبنایی برای مراحل بعدی استخراج نقشه محسوب می‌شود. شکل (۵) فرآیند کلی پیش‌پردازش ابرنقاط را به صورت شماتیک نمایش می‌دهد.



شکل ۴: مدل Pix2Pix

Fig. 4: The Pix2Pix Model

مدل Pix2Pix روش ترجمه تصویر به تصویر بر پایه شبکه‌های GAN شرطی است که قابلیت یادگیری نگاشت‌های پیچیده بین تصویر ورودی و تصویر هدف را دارد. برخلاف مدل‌های GAN کلاسیک که به صورت عمومی از داده‌های بدون نظارت استفاده می‌کنند، در Pix2Pix از جفت تصاویر ورودی و هدف برای یادگیری نگاشت‌ها استفاده می‌شود [۲۸]. شکل (۴) مدل Pix2Pix را به صورت شماتیک نمایش می‌دهد.

مدل Pix2Pix از دو شبکه اصلی تشکیل شده است:

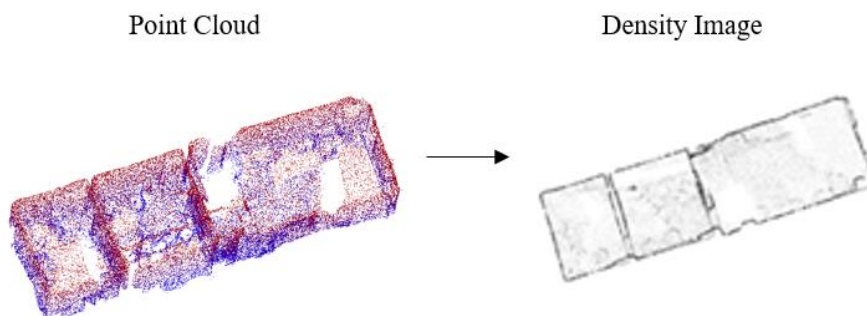
- Generator: شبکه مولد با معماری U-Net طراحی شده است که از یک مسیر نزولی برای استخراج ویژگی‌ها و یک مسیر صعودی برای بازسازی تصویر استفاده می‌کند. در این معماری، اتصالات میان‌بر بین لایه‌های متناظر در دو مسیر، باعث حفظ جزئیات محلی و مرزهای دقیق در خروجی تصویر می‌شود. این ویژگی در ترجمه تصویر به تصویر، به ویژه برای بازسازی دقیق جزئیات و ساختارهای پیچیده بسیار مهم است. مدل مولد تلاش می‌کند که با یادگیری روابط پیچیده بین ورودی و خروجی، تصویری تولید کند که از نظر محتوا و ساختار مشابه تصویر هدف باشد. در اینجا از شبکه‌های کانولوشنی (CNN) و دریافت ویژگی‌های چندمقیاسی برای بهینه‌سازی و افزایش دقت استفاده می‌شود.

- Discriminator: شبکه تمایزدهنده با ساختار PatchGAN طراحی شده است که تصویر تولیدی را به صورت قطعه‌های $N \times N$ بررسی می‌کند. این مدل به جای تشخیص کل تصویر، تمرکز خود را روی صحت محلی تصاویر می‌گذارد، یعنی تمایز را در مقیاس کوچک و محلی بین تصاویر واقعی و تولیدی یاد می‌گیرد. این ویژگی کمک می‌کند تا جزئیات دقیق‌تر و ویژگی‌های ظریف‌تر در تصویر تولیدی با دقت بیشتر حفظ شود.

در مدل Pix2Pix، دو تابع زیان اصلی برای شبکه مولد و تمایزدهنده استفاده می‌شود:

- Conditional GAN Loss: این تابع زیان سعی می‌کند شبکه مولد را به تولید تصاویری ترغیب کند که شبکه تمایزدهنده نتواند آن‌ها را از تصاویر واقعی تشخیص دهد. رابطه (۳) نحوه محاسبه تابع زیان Conditional GAN را نشان می‌دهد.

$$\begin{aligned} L_{CGAN}(G,D) &= E_{x,y} [\log D(x,y)] \\ &+ E_x [\log(1 \\ &- D(x,G(x)))] \end{aligned} \quad (3)$$



شکل ۵: تصویر شماتیک فرآیند کلی پیش‌پردازش ابرنقاط
Fig. 5: Schematic Illustration of the Overall Point Cloud Processing Workflow

نتایج روش Hough Transform

در این پژوهش ابتدا از روش Hough Transform به منظور استخراج نقشه دوبعدی ساختمان استفاده کردیم. پیاده‌سازی این روش با استفاده از تابع cv2.HoughLinesP در کتابخانه OpenCV انجام گرفته است. این تابع قابلیت شناسایی خطوط پیوسته در تصاویر را دارد و با استفاده از پارامترهای مختلف، تنظیمات لازم برای دقت و کارایی شناسایی خطوط را فراهم می‌آورد. پارامترهای کلیدی این تابع به شرح زیر تنظیم شده است:

edges: تصویر لبه‌ها است که معمولاً به واسطه مراحل پیش‌پردازش تصویر، مانند فیلتر Canny، حاصل می‌شود [۲۹]. این تصویر لبه‌ها، شامل اطلاعاتی در مورد موقعیت لبه‌های موجود در تصویر است که شناسایی خطوط بر اساس آن انجام می‌پذیرد.

ρ : وضوح دقت در فضای قطبی را تعیین می‌کند و نشان‌دهنده فاصله بین خطوط در واحد پیکسل است. یک مقدار کوچک‌تر برای ρ دقت بیشتری را در شناسایی خطوط باریک‌تر فراهم می‌آورد. در اینجا از ۱ پیکسل استفاده شده است که تعادل مناسبی بین دقت و زمان پردازش برقرار می‌کند.

θ : تعیین‌کننده وضوح زاویه در فضای قطبی است و به درجه‌های مربوط به هر خط اختصاص داده می‌شود. با اختصاص این مقدار به $\pi/180$ رادیان، به ازای هر درجه کامل، یک مقدار متناوب محاسبه می‌شود که امکان شناسایی خطوط با زوایای دقیق‌تری را فراهم می‌آورد.

Threshold: مقدار آستانه تعیین‌کننده تعداد حداقل رأی‌های لازم برای شناسایی یک خط است. مقدار این پارامتر برابر ۳۰ تنظیم شد. به بیان ساده‌تر، اگر حداقل ۳۰ رأی برای یک خط جمع‌آوری شده باشد، به عنوان یک خط معتبر شناسایی خواهد شد. افزایش این مقدار می‌تواند منجر به کاهش تعداد خطوط شناسایی‌شده و در عوض افزایش دقت آن‌ها شود.

minLineLength: نشان‌دهنده حداقل طول یک خط است که باید برای شناسایی معتبر باشد. مقدار این پارامتر برابر ۶ تنظیم شد. هر خطی که کمتر از ۶ پیکسل طول داشته باشد، نادیده گرفته می‌شود. این پارامتر

تنظیمات پیاده‌سازی

در این پژوهش، به منظور استخراج نقشه دوبعدی فضاهای داخلی ساختمان از داده‌های ابرنقاط، یک روش کلاسیک و دو رویکرد مبتنی بر یادگیری عمیق شامل مدل U-NET و Pix2Pix پیاده‌سازی و ارزیابی شدند. تمام مدل‌ها در چارچوب pytorch پیاده‌سازی شد. تمام آزمایش‌ها بر روی یک GPU Nvidia 4060 با ۸ گیگابایت حافظه انجام شد. در ادامه، تنظیمات پیاده‌سازی و آموزش هر یک از مدل‌ها به تفصیل ارائه می‌شود:

تنظیمات مدل U-NET: مدل U-NET با ساختار کلاسیک شامل مسیرهای رمزگذار و رمزگشا متقارن پیاده‌سازی شد. تابع Adam به عنوان بهینه‌ساز و نرخ یادگیری برابر $1e-4$ تنظیم شد. از تابع هزینه BCEWithLogitsLoss استفاده شد تا تعادل بین دقت و فراخوانی در بخش‌های مختلف نقشه حفظ شود. تعداد دوره‌های آموزشی برابر ۲۰۰ در نظر گرفته شد. برای جلوگیری از بیش‌برازش مدل، نرخ Dropout برابر 0.2 در لایه‌های میانی اعمال شد. تابع فعال‌ساز RELU در تمام لایه‌های کانولوشن به کار گرفته شد، در حالی که از تابع sigmoid در خروجی جهت تولید نقشه استفاده شد. ورودی‌ها به اندازه 256×256 پیکسل تغییر اندازه داده شدند و مقادیر پیکسل‌ها به بازه $[0,1]$ نرمال‌سازی شد.

تنظیمات مدل Pix2Pix: مدل Pix2Pix به عنوان یک شبکه GAN شرطی برای ترجمه تصویر به تصویر پیاده‌سازی شد. ساختار generator بر پایه U-NET با عمق ۸ لایه و discriminator از نوع PatchGAN با پنجره‌های 70×70 طراحی گردید. برای بهینه‌سازی دو شبکه از تابع بهینه‌ساز Adamw با نرخ یادگیری $5e-5$ و پارامتر $\beta = 0.5$ استفاده شد. تابع هزینه generator ترکیبی از Binary Cross-Entropy برای تابع زیان خصمانه و L1 Loss با ضریب $\lambda = 10$ برای حفظ شباهت ساختاری بین تصویر ورودی و خروجی بود. تعداد دوره‌های آموزشی برابر ۲۰۰ تعیین شد. به منظور بهبود هم‌گرایی مدل، نرخ یادگیری در هر ۱۰ دوره به میزان ۱۰٪ کاهش داده شد. اندازه تصاویر ورودی 256×256 پیکسل است و مقادیر پیکسل‌ها به بازه $[0,1]$ نرمال‌سازی شد.

نتایج عددی و کیفی ارائه شده نشان‌دهنده دقت مناسب مدل در تفکیک نواحی ساختاری مختلف نقشه می‌باشد. جدول (۱) و (۲) نتایج ارزیابی مدل پیشنهادی را بر روی داده‌های test نشان می‌دهد.

جدول ۱: نتایج ارزیابی مدل پیشنهادی براساس شاخص Dice Score
Table 1: Evaluation Results of the Proposed Model Based on the Dice Score Metric

Dataset	Dice Score	
	U-NET	Pix2Pix
FloorNet	0.925	0.90
Structured3D	0.971	0.957

جدول ۲: نتایج ارزیابی مدل پیشنهادی براساس شاخص Mean IOU
Table 2: Evaluation Results of the Proposed Model Based on the IOU Metric

Dataset	Mean IOU	
	U-NET	Pix2Pix
FloorNet	0.90	0.87
Structured3D	0.94	0.91

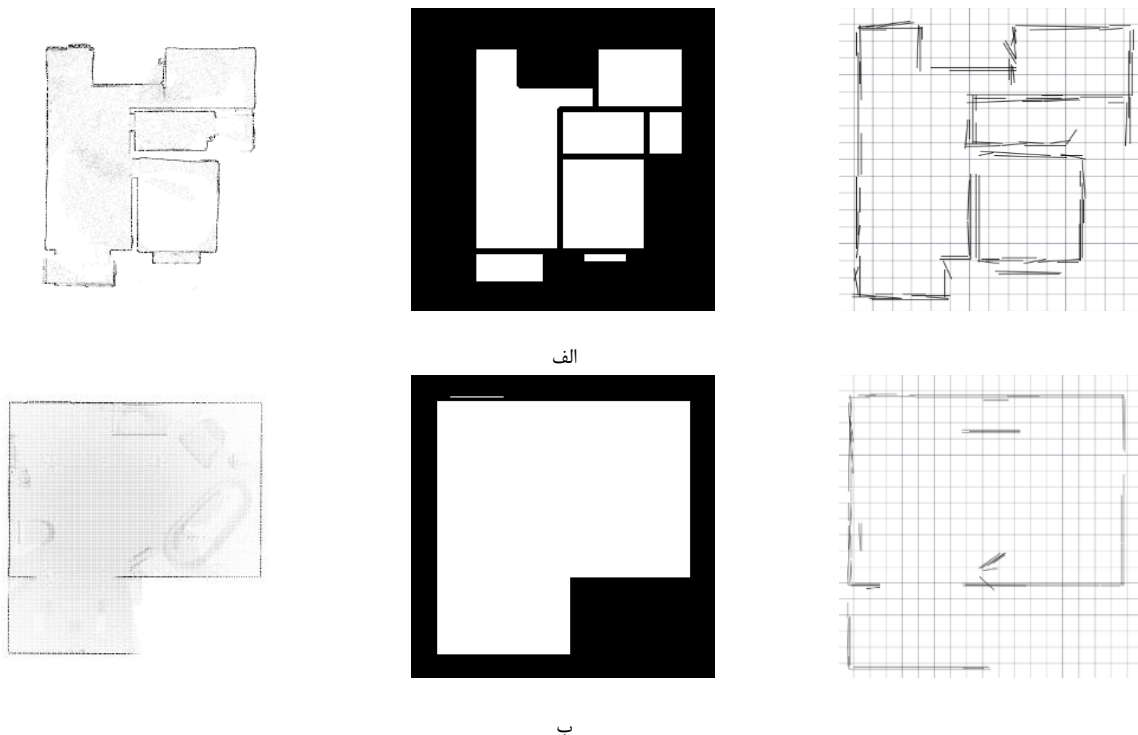
در خصوص ارزیابی مدل‌های یادگیر، ماتریس ابهام اطلاعات جزئی‌تر از نتایج را به ما نشان می‌دهد [۳۰]. شکل ۷ و ۸ confusion matrix مدل پیشنهادی بر روی مجموعه داده‌های ورودی را نشان می‌دهد.

کمک می‌کند تا خطوط کوتاه که ممکن است ناشی از نویز باشند از بین بروند.

maxLineGap: حداکثر فاصله‌ای را که دو نقطه درست برای تشکیل یک خط می‌توانند داشته باشند را، تعیین می‌کند. مقدار این پارامتر برابر ۵ تنظیم شد. اگر فاصله بین دو نقطه به قدری باشد که بیشتر از ۵ پیکسل باشد، این نقاط به عنوان بخشی از یک خط واحد در نظر گرفته نخواهند شد. این ویژگی به تسهیل شناسایی خطوط پیوسته کمک می‌کند. استفاده بهینه از این پارامترها به شناسایی دقیق و مؤثر خطوط در تصویر کمک کرده و موجب بهبود کیفیت استخراج اطلاعات هندسی از نقشه‌های طبقه شده است. شکل (۶) نمونه نتایج این روش بر روی دیتاست‌های مورد مطالعه را نمایش می‌دهد. از اصلی‌ترین معایب تبدیل عمومی هاف، عدم محدودیت فضای پارامتر است که منجر به هزینه پردازشی و زمانی بالا در این روش می‌گردد.

نتایج روش یادگیری عمیق

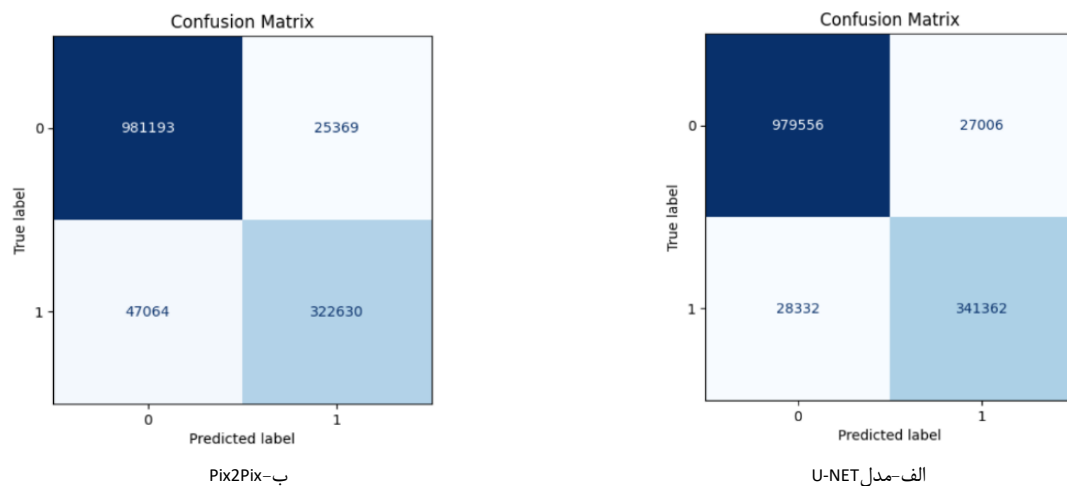
روش پیشنهادی در این پژوهش مبتنی بر بازسازی پیکسلی و بر پایه یادگیری عمیق است. از این‌رو، ارزیابی ما بر مبنای شاخص‌های پیکسلی مانند Dice Score، IOU و همچنین تحلیل کیفی بصری انجام شده است.



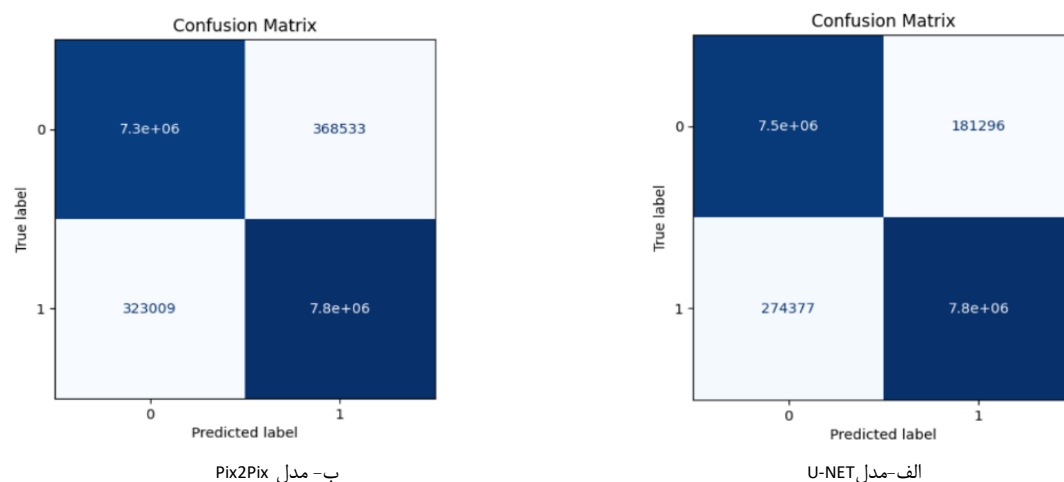
شکل ۶: نمونه نتایج تبدیل هاف (سمت چپ تصویر تراکم، وسط واقعیت زمینی نمونه‌ها و سمت راست خروجی پیش‌بینی شده است)،

الف-نتایج دیتاست FloorNet ب- نتایج دیتاست Structured3D

Fig. 6: Sample results of the Hough transform (left: density image, middle: ground truth samples, right: predicted output);
(a) Results on the FloorNet dataset (b) Results on the Structured3D dataset



شکل ۷: ماتریس ابهام مدل‌های پیشنهادی بر روی دیتاست FloorNet
Fig. 7: Confusion Matrix of the Proposed Models on the FloorNet Dataset



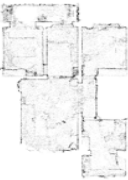
شکل ۸: ماتریس ابهام مدل‌های پیشنهادی بر روی دیتاست Structure3D
Fig. 8: Confusion Matrix of the Proposed Models on the Structured3D Dataset

محدودیت‌ها

اگرچه روش پیشنهادی مبتنی بر یادگیری عمیق با استفاده از مدل‌های U-Net و Pix2Pix عملکرد مطلوبی در استخراج نقشه دوبعدی داشته و به میانگین دقت بیش از ۹۰ درصد بر اساس معیار Dice Score دست یافته است، اما همچنان با برخی محدودیت‌ها مواجه است. نخست، نقشه بازسازی شده به پروجکشن تصاویر دو بعدی از ابرنقاط سه بعدی وابسته است. کیفیت ابرنقاط ورودی و روش پروجکشن تصویر می‌تواند دقت نتایج را به طرز معناداری تحت تأثیر قرار دهد. دوم، مدل‌های یادگیری عمیق پیشنهادی، تصویر ورودی را به صورت پیکسل به پیکسل قطعه‌بندی می‌کند و ممکن است این فرآیند منجر به ترسیم خطوط کج و نامطلوب شود. این نواقص در دقت مرزها، قابلیت کاربردی نتایج را برای مصارف نقشه‌برداری کاهش می‌دهد. سوم، به طور خاص هر دو مدل در نمونه‌هایی که داده ابرنقطه اولیه دارای انسداد (Occlusion) شدید بوده است، عملکرد ضعیف‌تری نشان داده‌اند. عارضه انسداد در نتیجه محدودیت دید حسگر یا نویزهای محیطی رخ می‌دهد.

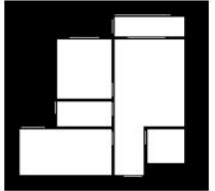
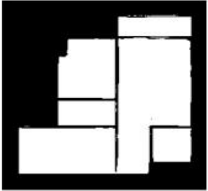
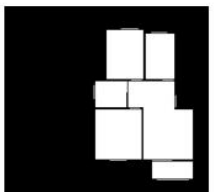
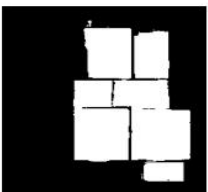
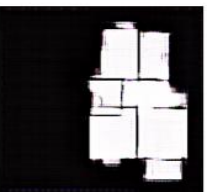
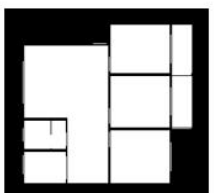
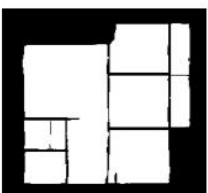
نتایج کیفی حاصل از اجرای روش پیشنهادی، در ادامه ارائه شده است. به منظور ارزیابی بصری عملکرد این مدل‌ها، نمونه‌هایی از نتایج پیش‌بینی شده به همراه تصاویر ورودی و نقشه‌های مرجع (Ground Truth) نمایش داده می‌شوند. این تصاویر، نمایانگر توانایی مدل‌ها در بازسازی مرزهای دقیق فضاهای داخلی ساختمان و تطابق با ساختارهای واقعی هستند. شکل (۹) و (۱۰) نمونه نتایج روش پیشنهادی روی دیتاست FloorNet و Structure3d را نشان می‌دهد.

علاوه بر تحلیل‌های جداگانه فوق، شکل‌های (۱۱) و (۱۲) خروجی سه روش تبدیل هاف، U-Net و Pix2Pix را به صورت مقایسه‌ای روی یک نمونه از هر دیتاست نمایش می‌دهند. مقایسه نتایج نشان می‌دهد که تبدیل هاف صرفاً خطوط منفرد و گسسته تولید می‌کند و قادر به بازسازی ساختارهای توپولوژیک نیست، در حالی که مدل‌های یادگیری عمیق مرزهای پیوسته و چندضلعی‌های بسته را با دقت بازسازی کرده‌اند.

INPUT	Ground Truth	Output (U-Net)	Output (Pix2Pix)
Sample 1			
			
Sample 2			
			
Sample 3			
			

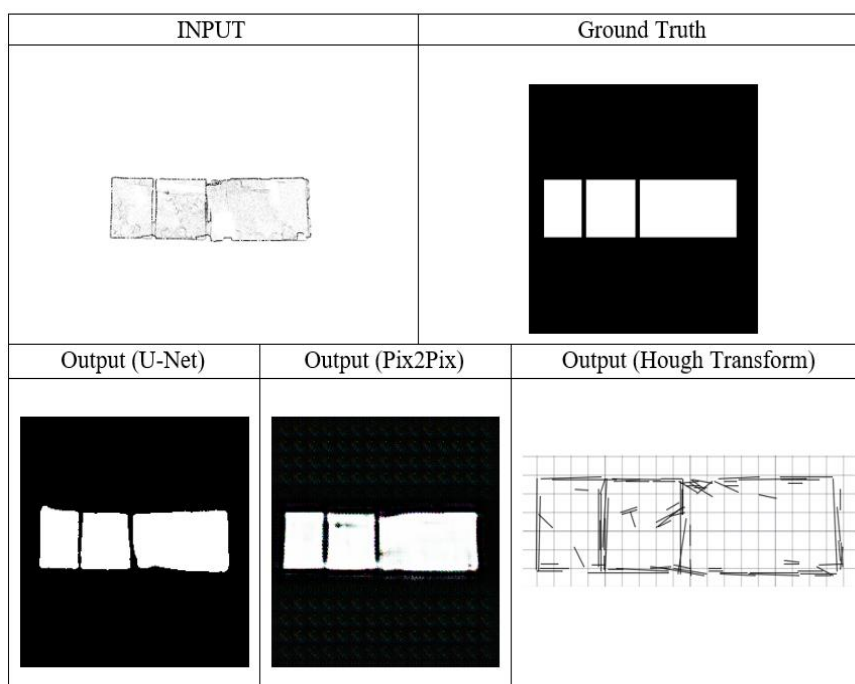
شکل ۹: نتایج روش پیشنهادی بر روی سه نمونه تست از دیتاست FloorNet

Fig. 9: Results of the proposed method on three test samples from the FloorNet dataset

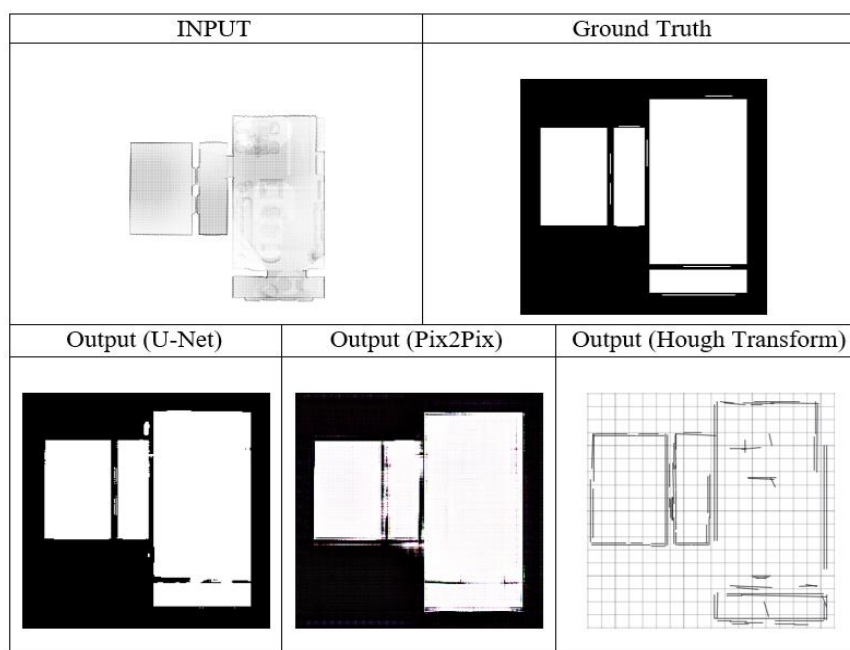
INPUT	Ground Truth	Output (U-Net)	Output (Pix2Pix)
Sample 1			
			
Sample 2			
			
Sample 3			
			

شکل ۱۰: نتایج روش پیشنهادی بر روی سه نمونه تست از دیتاست Structure3D

Fig. 10: Results of the proposed method on three test samples from the Structure3D dataset



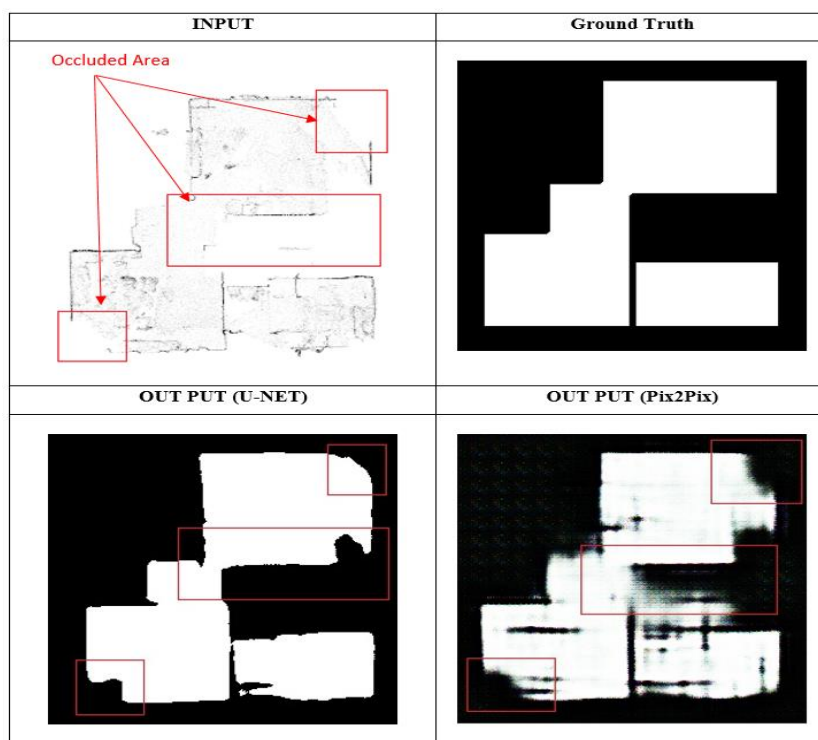
شکل ۱۱: مقایسه نتایج روش کلاسیک و مدل‌های یادگیری عمیق روی دیتاست FloorNet
 Fig. 11: Comparison of the results of the classical method and deep learning models on the FloorNet dataset



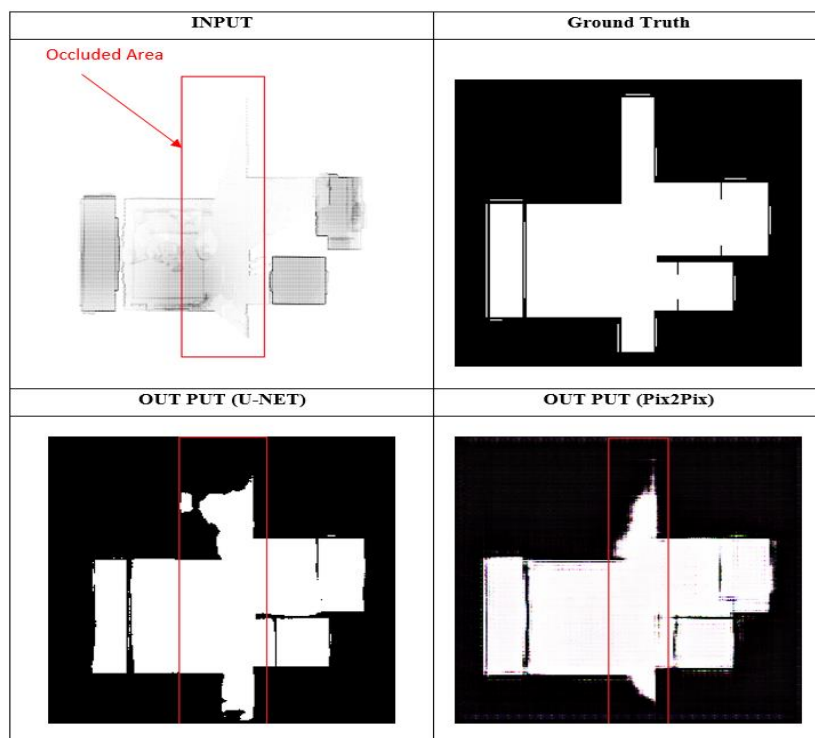
شکل ۱۲: مقایسه نتایج روش کلاسیک و مدل‌های یادگیری عمیق روی دیتاست Structure3D
 Fig. 12: Comparison of the results of the classical method and deep learning models on the Structure3D dataset

(۱۳) و (۱۴) ارائه شده‌اند تا این محدودیت به صورت عینی نمایش داده شود. در این تصاویر، نواحی دارای انسداد با کادر قرمز رنگ نمایش داده شده است. این مسئله نشان می‌دهد که علی‌رغم دقت زیاد مدل‌ها در شرایط داده‌های کامل و بدون نقص، روش پیشنهادی نسبت به داده‌های ناقص یا دارای انسداد، که در کاربردهای واقعی مانند اسکن محیط‌های داخلی بسیار رایج هستند، از پایداری کافی برخوردار نیست.

نواحی دارای انسداد به طور معمول فاقد اطلاعات پیکسلی کافی هستند [۳۱]. در این موارد، تصاویر تراکمی حاصل از ابرنقاط ناقص، فاقد اطلاعات ساختاری کافی برای استنتاج صحیح بخش‌های گمشده بودند. این کمبود اطلاعات باعث شد مدل‌ها نتوانند به درستی بخش‌های حذف شده از تصویر تراکم دوبعدی مانند دیوارها یا گوشه‌ها را بازسازی کنند، و در نتیجه دچار اختلال در پیوستگی خطوط و ناتوانی در پیش‌بینی شکل واقعی مرزها می‌شود. نمونه‌هایی از این موارد شکست در شکل



شکل ۱۳: نتایج بصری مدل‌های پیاده‌سازی شده روی نمونه دارای انسداد در مجموعه داده FloorNet
 Fig. 13: Visual results of the implemented models on an occluded sample from the FloorNet dataset



شکل ۱۴: نتایج بصری مدل‌های پیاده‌سازی شده روی نمونه دارای انسداد در مجموعه داده Structure3d
 Fig. 14: Visual results of the implemented models on an occluded sample from the Structure3D dataset

نتیجه‌گیری

چارچوب شامل پیاده‌سازی و ارزیابی دو رویکرد کلاسیک و مبتنی بر یادگیری عمیق است. روش کلاسیک تبدیل هاف، با وجود قابلیت اولیه در شناسایی خطوط مستقیم در برابر نویز، انسداد و ناپیوستگی‌های

در این پژوهش، یک چارچوب موثر جهت استخراج نقشه دوبعدی فضاهای داخلی ساختمان‌ها از داده‌های ابرنقاط ورودی ارائه شد. این

مشارکت نویسندگان

مرتضی حیدری مظفر ایده اولیه کار را مطرح و با ایجاد شرایط لازم برای انجام کار تحقیقاتی، سرکار خانم زهرا دالوند را در جمع‌آوری داده‌ها، تجزیه و تحلیل، برنامه‌نویسی و پردازش داده‌ها و جمع‌بندی نتایج و نگارش مقاله راهنمایی کردند.

تشکر و قدردانی

مقاله‌ی ارسالی، بخشی از کار پایان‌نامه دکتری است که در دانشگاه بوعلی سینا انجام شده است. از همین رو، از گروه عمران و کامپیوتر دانشکده مهندسی که شرایط را فراهم نمودند، تشکر و قدردانی به عمل می‌آید.

تعارض منافع

«هیچ‌گونه تعارض منافع توسط نویسندگان بیان نشده است.»

منابع و مآخذ

- [1] Poux F. The smart point cloud: Structuring 3D intelligent point data [dissertation]: Universite de Liege (Belgium); 2019. doi:10.13140/RG.2.2.20457.75367.
- [2] Heidari Mozaffar M, Varshosaz M, Saadatseresht M. Combining 2D and 3D Edges for Detecting Occluded Regions in Terrestrial Laser Scanner Point Clouds. *Journal of Soft Computing and Information Technology*. 2015;4(4):64-76.
- [3] Westoby M, Brasington J, Glasser N, Hambrey M, Reynolds M. 'Structure-from-Motion' photogrammetry: A low-cost, effective tool for geoscience applications. *Geomorphology*. 2012;179:300-314. doi:10.1016/j.geomorph.2012.08.021.
- [4] McManamon P. Lidar technologies and Systems. USA: Society of Photo-Optical Instrumentation Engineers (SPIE); 2019. doi:10.1117/3.2518254
- [5] Riveiro B, Lindenbergh R. Laser scanning: an emerging technology in structural engineering. China: CRC Press/Balkema; 2019. doi:10.1201/9781351018869
- [6] Heidari Mozaffar M, Hossein SA. Extracting Façade Points of Urban Buildings from Mobile Laser Scanner Point Clouds. *Remote Sensing and Geospatial Information Research*. 2024;2(2):179-186. doi:10.22061/jrsgr.2023.1990.
- [7] Lu Q, Lee S. A semi-automatic approach to detect structural components from CAD drawings for constructing as-is BIM objects. *Computing in Civil Engineering* 2017. p. 84-91. doi:10.1061/9780784480823.011.
- [8] Kumar A, Masane Y, Dhakhwa S. Disaster management plan for residential-cum-commercial property in Mumbai: a case study. *Environment, Development and Sustainability*. 2021;23(8):12598-12614. doi:10.1007/s10668-020-01129-7.

ساختاری داده‌های واقعی عملکرد قابل اعتمادی ندارد. همچنین، خروجی این روش به صورت مجموعه‌ای از خطوط منفرد و بدون انسجام توپولوژیک بود که بازسازی یک نقشه دقیق و یکپارچه را با دشواری مواجه می‌کند. همچنین، نتایج این روش به شدت به مقادیر پارامترها وابسته است و تنظیم دقیق پارامترها منجر به افزایش قابل توجه هزینه محاسباتی و زمانی می‌گردد.

در مقابل، نتایج حاصل از مدل‌های یادگیری عمیق U-Net و Pix2Pix نشان داد که این روش‌ها قادر به استخراج دقیق نقشه دوبعدی فضاهای داخلی ساختمان‌ها هستند. به ویژه، مدل‌های پیشنهادی توانستند در معیار Dice Score به دقت بیش از ۹۰ درصد و در معیار IoU به دقت بیش از ۸۰ درصد دست یابند، که حاکی از توانایی بالای آن‌ها در بازسازی ساختارهای اصلی محیط مانند دیوارها و گوشه‌ها می‌باشد. افزون بر آن، ارزیابی کیفی از طریق مقایسه بصری خروجی مدل‌ها با نقشه‌های مرجع نیز انجام گرفت. نتایج کیفی به دست آمده که با تصاویر نمونه در متن مقاله آورده شده است، نشان می‌دهد که مدل‌های یادگیری عمیق توانستند خطوط مرزی را با وضوح و انسجام بالاتری بازسازی کنند. به‌طور کلی نتایج کمی و کیفی برتری روش‌های مبتنی بر یادگیری عمیق را نسبت به رویکردهای کلاسیک به خوبی نشان می‌دهد.

با این حال، تحلیل نتایج نشان داد که مدل‌های پیشنهادی در شرایطی که داده‌های ابرنقاط دارای انسداد شدید باشد، با کاهش دقت در پیش‌بینی مواجه می‌شوند. در چنین شرایطی، بخش‌هایی از دیوارها یا ساختارهای مرزی به دلیل فقدان اطلاعات کافی به‌درستی بازسازی نمی‌شوند یا دچار گسستگی و اعوجاج در خروجی نهایی می‌شوند. این موضوع به‌ویژه در فضاهای پیچیده، تأثیر بیشتری بر عملکرد مدل دارد و ضرورت اعمال راهکارهایی برای افزایش مقاومت مدل در برابر نقص داده را آشکار می‌سازد. علاوه بر این، یکی دیگر از محدودیت‌های روش پیشنهادی، ماهیت پیکسلی خروجی مدل‌های یادگیری عمیق است که در آن مرزها و دیوارها به‌صورت ناحیه‌های پیکسلی دودویی (binary masks) بازسازی می‌شوند. خروجی پیکسلی، در کاربردهای عملی مانند تولید نقشه‌های CAD یا سیستم‌های اطلاعات مکانی (GIS)، باید به صورت برداری دقیق (vectorization) بازسازی شود. تبدیل خروجی پیکسلی به مرزهای دقیق برداری بدون از دست دادن جزئیات هندسی یا ایجاد خطاهای ساختاری، همچنان یک چالش باز محسوب می‌شود. در ادامه این پژوهش، تمرکز بر توسعه مدل‌هایی خواهد بود که نه تنها در برابر داده‌های ناقص و دارای انسداد مقاوم باشند، بلکه بتوانند به‌صورت مستقیم یا غیرمستقیم، خروجی‌هایی در قالب بردارهای هندسی تولید کنند. از جمله مسیرهای پیشنهادی می‌توان به طراحی شبکه‌هایی با قابلیت یادگیری ساختارهای برداری، بهره‌گیری از توابع زیان (Loss Functions) مبتنی بر هندسه و استفاده از پس‌پردازش‌های ساختاری مانند گراف‌های توپولوژیک اشاره کرد.

- [22] Liu C, Wu J, Furukawa Y. Floornet: A unified framework for floorplan reconstruction from 3d scans. Proceedings of the European conference on computer vision (ECCV); 2018. Cham: Springer. doi:10.13140/RG.2.2.20457.75367.
- [23] Aggarwal N, Karl W. Line detection in images through regularized Hough transform. IEEE transactions on image processing. 2006;15(3):582-591. doi:10.1109/TIP.2005.863021.
- [24] Yang R, Deng C, Yu K, Li Z, Pan L. A new way for cartesian coordinate transformation and its precision evaluation. Remote Sensing. 2022;14(4):864. doi:10.3390/rs14040864.
- [25] Ronneberger O, Fischer P, Brox T. U-net: Convolutional networks for biomedical image segmentation. Medical image computing and computer-assisted intervention—MICCAI 2015: 18th international conference, Munich, Germany, October 5-9, 2015, proceedings, part III 18; 2015. Cham: Springer. doi:10.1007/978-3-319-24574-4_28.
- [26] Goodfellow I, Bengio Y, Courville A, Bengio Y. Deep learning. USA: MIT press Cambridge; 2016. doi:10.4258/hir.2016.22.4.351
- [27] Srivastava N, Hinton G, Krizhevsky A, Sutskever I, Salakhutdinov R. Dropout: a simple way to prevent neural networks from overfitting. The journal of machine learning research. 2014;15(1):1929-1958. doi:10.5555/2627435.2670313.
- [28] Isola P, Zhu J, Zhou T, Efros A. Image-to-image translation with conditional adversarial networks. Proceedings of the IEEE conference on computer vision and pattern recognition; 2017. doi:10.1109/CVPR.2017.632.
- [29] Nambiyar A, Kannan R. Defective Edge Detection Using Cascaded Ensemble Canny Operator. arXiv preprint arXiv:241114868. 2024. doi:10.48550/arXiv.2411.14868.
- [30] Sathyanarayanan S, Tantri B. Confusion matrix-based performance evaluation metrics. African Journal of Biomedical Research. 2024;4023-4031. doi:10.53555/AJBR.v27i4S.4345.
- [31] Heidari Mozaffar M, Varshosaz M, Saadatseresht M. Occlusion Area as Suitable Guidance for Terrestrial Laser Scanner Localization. ISSGE. 2020;10(2):199-207. doi:10.1001.1.2322102.1399.10.2.15.8.
- [9] Gerstweiler G, Furlan L, Timofeev M, Kaufmann H. Extraction of structural and semantic data from 2D floor plans for interactive and immersive VR real estate exploration. Technologies. 2018;6(4):101. doi:10.3390/technologies6040101.
- [10] Pexman K. Automated Floor Plan and Building Model Creation for Cultural Heritage Buildings from Laser Scanner Data. 2021.
- [11] Guo Y, Wang H, Hu Q, Liu H, Liu L, Bennamoun M. Deep learning for 3d point clouds: A survey. IEEE transactions on pattern analysis and machine intelligence. 2020;43(12):4338-4364. doi:10.1109/TPAMI.2020.3005434.
- [12] Golparvar F, Mohammadzadeh A. Semantic Segmentation of point cloud data acquired from Industrial Sites using Terrestrial Laser Scanner based on Graph Methods. Iran: K. N. Toosi University; 2021.
- [13] Pizarro P, Hitschfeld N, Sipiran I, Saavedra J. Automatic floor plan analysis and recognition. Automation in Construction. 2022;140:104-348. doi:10.1016/j.autcon.2022.104348.
- [14] Cai R, Li H, Xie J, Jin X. Accurate floorplan reconstruction using geometric priors. Computers & Graphics. 2022;102:360-369. doi:10.1016/j.cag.2021.10.011.
- [15] Fang H, Lafarge F, Pan C, Huang H. Floorplan generation from 3D point clouds: A space partitioning approach. ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing. 2021;175:44-55. doi:10.1016/j.isprsjprs.2021.02.012.
- [16] Alpaydin E. Introduction to machine learning. Cambridge, MA: MIT press; 2020. doi:10.7551/mitpress/13811.001.0001
- [17] Kim M, Lee D, Kim T, Oh S, Cho H. Automated extraction of geometric primitives with solid lines from unstructured point clouds for creating digital buildings models. Automation in Construction. 2023;145:104642. doi:10.1016/j.autcon.2022.104642.
- [18] Chen J, Qian Y, Furukawa Y. Heat: Holistic edge attention transformer for structured reconstruction. Proceedings of the IEEE/CVF conference on computer vision and pattern recognition; 2022. doi:10.1109/CVPR52688.2022.00377.
- [19] Su J, Tung K, Peng C, Wonka P, Chu H. Slibo-net: Floorplan reconstruction via slicing box representation with local geometry regularization. Advances in Neural Information Processing Systems. 2023;36:48781-48792.
- [20] Yue Y, Kontogianni T, Schindler K, Engelmann F. Connecting the dots: Floorplan reconstruction using two-level queries. Proceedings of the IEEE/CVF Conference on Computer Vision and Pattern Recognition; 2023.
- [21] Zheng J, Zhang J, Li J, Tang R, Gao S, Zhou Z. Structured3d: A large photo-realistic dataset for structured 3d modeling. Computer Vision—ECCV 2020: 16th European Conference, Glasgow, UK, August 23–28, 2020, Proceedings, Part IX 16; 2020: Springer. doi:10.1007/978-3-030-58545-7_30.

معرفی نویسندگان

AUTHOR(S) BIOSKETCHES



مرتضی حیدری مظفر در سال ۱۳۹۵، دوره دکتری مهندسی عمران - نقشه‌برداری خود را در دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی با موفقیت به اتمام رساند. ایشان از سال ۱۳۹۶ با عنوان استادیار گروه عمران دانشکده مهندسی دانشگاه بوعلی سینا مشغول تدریس و پژوهش هستند. نتایج تحقیقات ایشان در قالب ده‌ها مقاله علمی در نشریات و کنفرانسهای مختلف ارائه شده است.

و پژوهش هستند. نتایج تحقیقات ایشان در قالب ده‌ها مقاله علمی در



خرم‌آباد دریافت کرد. او هم‌اکنون در حال تکمیل دوره دکتری خود در رشته هوش مصنوعی در دانشگاه بوعلی سینا همدان است. علایق او درباره یادگیری عمیق، بینایی ماشین، پردازش تصاویر، پردازش داده‌های لیزر اسکنر، هوش مصنوعی در اطلاعات مکانی و توسعه کاربردهای سنجش از دور است.

Dalvand, Z. Ph.D. Candidate in Computer Engineering, Faculty of Engineering, Bu-Ali Sina University, Hamedan, Iran

✉ z.dalvand@eng.basu.ac.ir

زمینه‌های تخصصی ایشان عبارتند از : فتوگرامتری، سنجش از دور، هوش مصنوعی، کاربردهای سنجش از دور در مدیریت بلایای طبیعی، پردازش داده‌های لیزر اسکنرهای زمینی و همراه، GIS در صنعت آب و برق.

Heidarimozaffar, M. Assistant Professor, Department of Civil Engineering, Faculty of Engineering, Bu-Ali Sina University, Hamadan, Iran

✉ m.heidarimozaffar@basu.ac.ir

زهرا دالوند مدرک کارشناسی مهندسی کامپیوتر خود را از دانشگاه تربیت معلم تهران و کارشناسی ارشد را از دانشگاه آزاد اسلامی واحد

Citation (Vancouver): Heidarimozaffar M, Dalvand Z. [2D Floorplan Extraction of Indoor Spaces from Mobile Laser Scanner Point Clouds Using Deep Learning Methods]. *J. RS. GEOINF. RES.* 2025; 3(2): 219-234

 <https://doi.org/10.22061/jrsgr.2025.12127.1100>



COPYRIGHTS

© 2025 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/>)



REVIEW PAPER

A Systematic Review of Machine Learning Methods for Change Detection in Radar and Optical Images with a Focus on Deep Learning

M.R. Zargar¹, A. Aghabalaee^{*2}, S. Khazai³, A. Mohtadi⁴¹ Department of Photogrammetry and Remote Sensing, School of Surveying and Geospatial Engineering, University of Tehran, Tehran, Iran² Department of Surveying and Spatial Data, Faculty of Civil Engineering, Water and Energy, Imam Hossein Comprehensive University, Tehran, Iran³ Department of Signature engineering, Faculty of Passive Defense, Imam Hossein Comprehensive University, Tehran, Iran⁴ Department of Surveying Engineering, Faculty of Technology and Engineering, Hekmat Higher Educational Institute, Qom, Iran

ABSTRACT

Received: 29 April 2025
 Reviewed: 05 June 2025
 Revised: 22 July 2025
 Accepted: 05 September 2025

KEYWORDS:

Change Detection
 Remote Sensing
 Radar Image
 Deep Learning

* Corresponding author

✉ remotesensing@ihu.ac.ir

☎ (+9821) 77105385

Background and Objectives: With the expansion of radar remote sensing data and increased access to high-resolution imagery through sensors such as Sentinel-1, change detection using deep learning has emerged as a strategic and innovative field in geospatial sciences. Radar imagery, with its capabilities for day-and-night imaging, cloud penetration, and sensitivity to structural characteristics of the Earth's surface, provides rich but complex data requiring advanced machine learning architectures for effective analysis. Accordingly, this study aims to systematically review deep learning-based methods for change detection in radar images, with a focus on comparative analysis of architectures, their strengths and limitations, and future research directions.

Methods: This systematic review covers literature published between 2014 and 2025 and includes 44 selected studies from reputable databases such as IEEE, Elsevier, and MDPI. Inclusion criteria involved the use of SAR data, application of deep learning algorithms, availability of quantitative performance metrics (e.g., accuracy and F1-score), and operational relevance in domains such as urban monitoring, natural resource assessment, and disaster management. The studies were classified based on the type of learning approach (supervised, unsupervised, self-supervised, multi-source) and architecture used (MLP, CNN, U-Net, Autoencoder, LSTM, GAN, MSCDUNet), and were analyzed using comparative tables.

Findings: The results indicate that supervised architectures such as U-Net performed best in urban and disaster-related applications, achieving up to 95% accuracy and F1-scores between 0.85 and 0.93. In unsupervised approaches, combining CNN with fuzzy clustering (FCM) reached accuracy levels up to 99.6%. Autoencoder-based models were successful in denoising and feature compression, while GAN architectures improved network performance through data augmentation. Multi-source models like MSCDUNet, integrating radar and optical data, reported F1-scores of up to 0.93. However, challenges persist, including inconsistent reporting of standard metrics such as F1, limited generalizability of models, and the computational complexity of processing heterogeneous datasets.

Conclusion: Despite significant advancements in the use of deep learning for change detection, ongoing challenges include the scarcity of labeled data, lack of publicly available benchmark multi-source datasets, and the limited availability of lightweight algorithms for real-time applications. Future research should prioritize self-supervised methods such as contrastive learning, the development of noise-resistant and lightweight architectures for UAV and edge deployments, and the creation of standardized open-access datasets with comprehensive metrics. This study, by offering a structured classification and comparative evaluation of algorithms, aims to inform intelligent decision-making in the design of change detection systems for researchers and developers alike.



NUMBER OF REFERENCES

44



NUMBER OF FIGURES

10



NUMBER OF TABLES

3

مقاله مروری

مروری نظام‌مند بر روش‌های یادگیری ماشین در شناسایی تغییرات تصاویر راداری و اپتیکی با تمرکز بر یادگیری عمیق

محمد رضا زرگر^۱، امیر آقابالائی^{۲*}، صفا خزائی^۳، علی مهتدی^۴^۱ گروه فتوگرامتری و سنجش از دور، دانشکده مهندسی نقشه‌برداری و اطلاعات مکانی، دانشگاه تهران، تهران، ایران^۲ گروه نقشه برداری و داده های مکانی، دانشکده عمران، آب و انرژی، دانشگاه جامع امام حسین (ع)، تهران، ایران^۳ گروه مهندسی اثر، دانشکده پدافند غیرعامل، دانشگاه جامع امام حسین (ع)، تهران، ایران^۴ گروه نقشه برداری، دانشکده فنی و مهندسی، موسسه آموزش عالی حکمت، قم، ایران

چکیده

پیشینه و اهداف: با گسترش داده‌های سنجش از دور راداری و افزایش دسترسی به تصاویر باکیفیت از طریق سنجنده‌هایی مانند سنتینل-۱، تحلیل تغییرات در سطح زمین از طریق یادگیری عمیق به یکی از حوزه‌های راهبردی و نوظهور در علوم مکانی تبدیل شده است. تصاویر راداری با قابلیت تصویربرداری شبانه‌روزی، نفوذ در ابر، و حساسیت به ویژگی‌های ساختاری زمین، اطلاعات غنی اما پیچیده‌ای فراهم می‌کنند که تحلیل آن‌ها نیازمند بهره‌گیری از معماری‌های هوشمند یادگیری ماشین است. در این راستا، مقاله حاضر با هدف مرور نظام‌مند روش‌های مبتنی بر یادگیری عمیق در شناسایی تغییرات در تصاویر راداری، با تمرکز بر تحلیل تطبیقی معماری‌ها، نقاط قوت و ضعف آن‌ها و چشم‌اندازهای آینده طراحی شده است.

روش‌ها: این مرور بر اساس رویکرد مرور نظام‌مند در بازه زمانی ۲۰۱۴ تا ۲۰۲۵، شامل ۴۴ مقاله منتخب از پایگاه‌های معتبر مانند IEEE، Elsevier، و MDPI است. معیارهای انتخاب شامل استفاده از داده‌های SAR، بهره‌گیری از الگوریتم‌های یادگیری عمیق، گزارش معیارهای کمی مانند دقت و F1-score و کاربردهای عملیاتی در حوزه‌هایی چون پایش شهری، منابع طبیعی و بلایای طبیعی بوده است. مقالات بر اساس نوع یادگیری (نظارتی، بدون نظارت، خودنظارتی، چندمنبعی) و نوع معماری (CNN، MLP، U-Net، Autoencoder، LSTM، GAN و MSCDUNet) طبقه‌بندی شده‌اند و در قالب جداول مقایسه‌ای تحلیل شده‌اند.

یافته‌ها: نتایج نشان می‌دهد معماری‌های نظارت‌شده نظیر U-Net با دقت تا ۹۵٪ و F1 در بازه ۰/۸۵ تا ۰/۹۳، به‌ویژه در کاربردهای شهری و ارزیابی خسارات بلایای طبیعی، بهترین عملکرد را داشته‌اند. در حوزه بدون نظارت، ترکیب CNN با خوشه‌بندی فازی (FCM) به دقتی تا ۹۹/۶٪ دست یافته است. مدل‌های مبتنی بر Autoencoder در کاهش نویز و فشرده‌سازی اطلاعات موفق عمل کرده‌اند و معماری‌های GAN با داده‌افزایی، عملکرد شبکه‌ها را بهبود بخشیده‌اند. مدل‌های چندمنبعی مانند MSCDUNet که داده‌های راداری و نوری را تلفیق می‌کنند، F1 معادل ۰/۹۳ را گزارش کرده‌اند. با این حال، کمبود گزارش‌های کمی استاندارد مانند F1، ضعف تعمیم‌پذیری مدل‌ها، و پیچیدگی پردازش داده‌های ناهمگن، از چالش‌های موجود محسوب می‌شود.

نتیجه‌گیری: با وجود پیشرفت‌های چشمگیر در کاربرد یادگیری عمیق در شناسایی تغییرات، چالش‌هایی مانند کمبود داده‌های برچسب‌خورده، عدم دسترسی به مجموعه داده‌های مرجع چندمنبعی، و ضعف الگوریتم‌های سبک برای کاربردهای بلادرنگ همچنان پابرجاست. توسعه الگوریتم‌های خودنظارتی مانند یادگیری تضادمحور، طراحی معماری‌های مقاوم به نویز و سبک برای UAVها و سامانه‌های لبه‌ای، و تدوین پایگاه‌های داده باز و معیارمحور از جمله اولویت‌های آتی این حوزه است. مطالعه حاضر با ارائه طبقه‌بندی ساختاریافته و تحلیل تطبیقی عملکرد الگوریتم‌ها، تلاش دارد زمینه تصمیم‌سازی هوشمند در طراحی سامانه‌های تحلیل تغییرات را برای پژوهشگران و توسعه‌دهندگان مهیا سازد.

تاریخ دریافت: ۰۹ اردیبهشت ۱۴۰۴
تاریخ داوری: ۱۵ خرداد ۱۴۰۴
تاریخ اصلاح: ۳۱ تیر ۱۴۰۴
تاریخ پذیرش: ۱۴ شهریور ۱۴۰۴

واژگان کلیدی:

شناسایی تغییرات
سنجش از دور
تصویر راداری
یادگیری عمیق

* نویسنده مسئول

remotesensing@ihu.ac.ir

۰۲۱-۷۷۱۰۵۳۸۵

مقدمه

مطالعه حاضر با هدف ارائه یک مرور نظام‌مند و ساختاریافته از روش‌های یادگیری ماشین با تأکید بر یادگیری عمیق در شناسایی تغییرات تصاویر راداری و اپتیکی، می‌کوشد با بررسی مطالعات انجام‌شده در بازه زمانی ۲۰۱۴ تا ۲۰۲۵، تصویری جامع از وضعیت موجود، شکاف‌های علمی و مسیرهای آینده این حوزه ترسیم نماید.

تحلیل/انتقادی پیشینه و خلأهای پژوهشی

مرور ادبیات انجام‌شده در زمینه شناسایی تغییرات در تصاویر سنجش از دور راداری با بهره‌گیری از یادگیری عمیق نشان می‌دهد که اگرچه در سال‌های اخیر مطالعات متعددی در این حوزه منتشر شده‌اند، اما اغلب آن‌ها با کاستی‌های مفهومی و ساختاری مواجه‌اند که ضرورت یک بازنگری جامع و تحلیلی را برجسته می‌سازد. تحلیل انتقادی این متون، چهار محور اصلی از خلأهای پژوهشی را آشکار می‌سازد:

نخست، اغلب مرورهای پیشین فاقد دسته‌بندی دقیق، منسجم و سلسله‌مراتبی از معماری‌های یادگیری عمیق هستند. در حالی که در حوزه‌هایی مانند بینایی ماشین یا پردازش زبان طبیعی، الگوریتم‌ها بر اساس ساختارهای استاندارد مانند CNN، RNN، Transformer و غیره طبقه‌بندی می‌شوند، بسیاری از مرورهای حوزه سنجش از دور راداری صرفاً به تمایز ساده میان روش‌های «نظارتی» و «بدون نظارت» بسنده کرده‌اند، بی‌آن‌که تحلیلی عمیق از انواع معماری‌های عصبی مانند U-Net، Autoencoder، GAN، یا شبکه‌های ترکیبی ارائه شود. پژوهش حاضر با طراحی یک چارچوب طبقه‌بندی چندمحوری، تلاش کرده است این کمبود را جبران کرده و تصویری نظام‌مند از معماری‌ها و کاربردهای آن‌ها ارائه دهد.

دوم، ضعف در ارائه تحلیل کمی و مقایسه‌پذیر عملکرد الگوریتم‌ها یکی دیگر از چالش‌های جدی مرورهای گذشته است. در حالی که ارزیابی کمی با شاخص‌هایی مانند دقت، F1-score و حساسیت، پایه‌ای برای قضاوت علمی در مورد اثربخشی مدل‌هاست، بسیاری از مطالعات صرفاً به بیان کیفی مزایا و معایب روش‌ها اکتفا کرده‌اند. حتی در مواردی که تحلیل عددی انجام شده، عدم یکسانی در نوع داده‌ها، سناریوهای آزمایشی، و شاخص‌های ارزیابی، امکان استنتاج تطبیقی را محدود ساخته است. مقاله حاضر با استخراج و تجمیع داده‌های کمی از مطالعات معتبر و ارائه آن‌ها در قالب جداول مقایسه‌ای، گامی در جهت استانداردسازی تحلیل‌ها برداشته است. با این حال، همچنان خلأ اجرای آزمایشات میدانی بر روی یک مجموعه‌داده مرجع باقی است که پژوهش‌های آینده باید به آن بپردازند.

سوم، بررسی‌ها نشان می‌دهد که بسیاری از معماری‌های نوظهور یادگیری عمیق، به‌ویژه مدل‌هایی مانند شبکه‌های مولد تخصصی (GAN)، خودرمزگذارها، شبکه‌های سیامی، و تبدیل‌گرهای مکانی-زمانی (Spatio-Temporal Transformers)، یا در مرورهای پیشین غایب بوده‌اند یا صرفاً به‌صورت سطحی معرفی شده‌اند. با توجه به اثرگذاری بالای این معماری‌ها از سال ۲۰۲۰ به بعد، در حل چالش‌هایی چون نویز، داده‌های ناقص یا برچسب‌نخورده، و تلفیق اطلاعات چندمنبعی،

شناسایی تغییرات یکی از بنیادی‌ترین وظایف در حوزه سنجش از دور به‌شمار می‌رود که نقشی اساسی در پایش پویایی‌های زمین، درک روندهای توسعه پدیده‌های طبیعی و انسانی، و تحلیل تعاملات میان آن‌ها ایفا می‌کند. این فرآیند، ناظر به استخراج تفاوت‌های ساختاری یا طیفی میان دو یا چند تصویر ثبت‌شده از یک منطقه در زمان‌های مختلف است که معمولاً به شناسایی پیکسل‌های دارای تغییرات معنادار ختم می‌شود [۱]. با وجود پیشینه طولانی این مسئله، چالش‌هایی نظیر تغییر شرایط نوری، تفاوت در زاویه برداشت، تنوع فصلی، و وجود نویز در تصاویر، همچنان بر دقت فرایند شناسایی تغییرات تأثیرگذارند [۲].

در دهه‌های اخیر، گسترش فناوری‌های سنجش از دور، موجب افزایش کم‌سابقه در دسترسی به داده‌های ماهواره‌ای شده است. در این میان، سنجنده‌های فعال راداری به دلیل قابلیت تصویربرداری در شرایط نامساعد جوی، نفوذ در پوشش ابری، دریافت اطلاعات در شب و روز، و حساسیت به ویژگی‌های ساختاری سطح زمین، به ابزارهایی کارآمد برای پایش تغییرات بدل شده‌اند. با این حال، وجود نویزهای لکه‌ای (Speckle) همچنان از موانع جدی در تحلیل دقیق تصاویر راداری به‌شمار می‌رود [۳].

هم‌زمان با پیشرفت الگوریتم‌های یادگیری ماشین، استفاده از روش‌های هوشمند در تحلیل داده‌های سنجش از دور، به‌ویژه در شناسایی تغییرات، گسترش یافته است. ترکیب قدرت استنتاجی یادگیری ماشین با داده‌های غنی سنجش از دور، امکان تحلیل خودکار و مقیاس‌پذیر پدیده‌ها را فراهم کرده و افق‌های تازه‌ای در حوزه‌هایی چون کشاورزی، منابع طبیعی، مدیریت بحران، مطالعات اقلیمی، و برنامه‌ریزی شهری گشوده است. هدف اصلی از به‌کارگیری یادگیری ماشین در این زمینه، افزایش دقت، کاهش وابستگی به داده‌های برچسب‌خورده و ارتقاء توان تفسیرپذیری مدل‌ها در شرایط داده‌ای متنوع و پرنویز است.

تا پیش از سال ۲۰۱۴، داده‌های راداری به میزان کافی برای توسعه مدل‌های مبتنی بر یادگیری عمیق در دسترس نبودند. اما با ظهور سنسورهای جدید و رشد پایگاه‌های داده باز، زمینه برای بهره‌گیری از یادگیری عمیق در شناسایی تغییرات راداری فراهم شد. در میان معماری‌های یادگیری عمیق، شبکه‌های عصبی پیچشی (CNN) و ساختارهای رمزگذار-رمزگشا (مانند U-Net)، نقش محوری در تحلیل خودکار تغییرات ایفا کرده‌اند. این معماری‌ها به سبب قابلیت یادگیری ویژگی‌های مکانی و طیفی، در تشخیص دقیق تغییرات ساختاری در داده‌های راداری و اپتیکی کارآمد ظاهر شده‌اند. همچنین، شبکه‌های بازگشتی، خودرمزگذارها، مدل‌های مبتنی بر توجه و شبکه‌های مولد، افق‌های جدیدی برای توسعه مدل‌های هوشمند در این حوزه گشوده‌اند.

با این حال، مرورهای پیشین عمدتاً با محدود به داده‌های اپتیکی بوده‌اند، یا تمرکز خود را بر روش‌های سنتی و یادگیری ماشین کلاسیک قرار داده‌اند. همچنین، بسیاری از مطالعات فاقد ساختار تحلیلی و مقایسه‌پذیر در ارائه مزایا و محدودیت‌های معماری‌ها بوده‌اند. از این‌رو،

پوشش این طیف از الگوریتم‌ها در این مقاله، تلاشی برای پر کردن یکی از خلأهای جدی ادبیات موجود به شمار می‌آید.

چهارم، موضوع تلفیق داده‌های چندمنبعی، به‌ویژه ادغام تصاویر راداری و اپتیکی، که در بسیاری از مطالعات تجربی به‌عنوان راهکاری برای افزایش دقت و پایداری شناسایی تغییرات مطرح شده، در اغلب مرورهای پیشین جایگاهی شایسته نیافته است. مقاله حاضر با بررسی معماری‌هایی نظیر MSCDUNet و تحلیل توانمندی‌های آن‌ها در همگام‌سازی طیفی، مکانی و زمانی داده‌ها، سهم مهمی در تبیین مزایا، چالش‌ها و مسیرهای نوین این حوزه ارائه کرده است.

در مجموع، مرورهای پیشین در حوزه شناسایی تغییرات راداری با چالش‌هایی نظیر طبقه‌بندی ضعیف، تحلیل عددی ناکافی، پوشش محدود الگوریتم‌های نوین، و غفلت از رویکردهای چندمنبعی مواجه‌اند. پژوهش حاضر با هدف رفع این کاستی‌ها و طراحی چارچوبی جامع برای تحلیل تطبیقی روش‌های یادگیری عمیق، گامی مؤثر در جهت ارتقاء دانش موجود و تدوین نقشه‌راهی برای پژوهشگران و توسعه‌دهندگان در این حوزه برداشته است. با این حال، تکمیل این چارچوب با ارائه الگوهای پیشنهادی و تحلیل تجربی بر روی داده‌های عملیاتی، از جمله توصیه‌های کلیدی برای مطالعات آتی به‌شمار می‌رود. برای جمع‌بندی خلأهای پژوهشی شناسایی‌شده در مرورهای پیشین و اقدامات اصلاحی انجام‌شده در مطالعه حاضر، جدول ۱ ارائه شده است که به‌صورت تطبیقی این تفاوت‌ها را نشان می‌دهد.

روش تحقیق

این مرور با هدف بررسی جامع روش‌های شناسایی تغییرات در تصاویر سنجش از دور راداری با استفاده از الگوریتم‌های یادگیری عمیق انجام شد.

- پایگاه داده و استراتژی جست‌وجو

برای جمع‌آوری منابع، جست‌وجویی سیستماتیک در پایگاه اطلاعاتی گوگل اسکولار، که مجموعه گسترده‌ای از مقالات علمی، کتاب‌ها، مجموعه مقالات کنفرانس و پایان‌نامه‌ها را پوشش می‌دهد، صورت گرفت. کلیدواژه‌های اصلی شامل Radar، SAR، Change Detection و Deep Learning بودند. برای اطمینان از جامعیت، ترکیب‌های مختلفی از این کلیدواژه‌ها مانند SAR Change Detection Deep Learning استفاده شد. بازه زمانی جست‌وجو از سال ۲۰۱۴ تا ۲۰۲۵ تعیین شد، زیرا روش‌های یادگیری عمیق در شناسایی تغییرات راداری از حدود سال ۲۰۱۴ به بعد به‌طور گسترده مورد توجه قرار گرفتند.

- معیارهای انتخاب و فرایند طبقه‌بندی

معیارهای انتخاب مقالات به‌گونه‌ای تنظیم شدند که تنها منابعی بررسی شوند که به‌طور خاص از الگوریتم‌های یادگیری عمیق برای شناسایی تغییرات در تصاویر راداری استفاده کرده باشند. مقالات ژورنال، مجموعه مقالات کنفرانس و پایان‌نامه‌های معتبر به زبان انگلیسی در اولویت قرار گرفتند. معیارهای خروج شامل مقالاتی بودند که صرفاً به روش‌های سنتی (غیر یادگیری عمیق) پرداخته یا بر تصاویر غیرراداری (مانند تصاویر نوری به‌تنهایی) تمرکز داشتند. همچنین، مقالاتی که فاقد تحلیل کافی یا داده‌های تجربی بودند، کنار گذاشته شدند. این فرآیند منجر به انتخاب مجموعه‌ای از مقالات شد که روش‌های نظارت‌شده، بدون نظارت و شبه‌نظارت‌شده را پوشش می‌دادند.

پس از جمع‌آوری مقالات، فرآیند تحلیل در سه مرحله انجام شد. ابتدا، مقالات بر اساس نوع روش یادگیری عمیق (نظارت‌شده یا بدون نظارت) دسته‌بندی شدند.

جدول ۱: شناسایی خلأهای کلیدی مرورهای موجود و راهکارهای پیشنهادی در این مطالعه

Table 1: Key Gaps Identified in Previous Reviews and Corresponding Solutions Addressed in This Study

محور ضعف مرورهای پیشین Axis of weakness of previous reviews	نمونه ضعف‌ها Examples of weaknesses	اقدام اصلاحی در مقاله حاضر Corrective action in this paper
فقدان طبقه‌بندی ساخت‌یافته معماری‌ها Lack of structured classification of architectures	دسته‌بندی‌های ساده به نظارتی/غیربرچسب‌دار؛ فقدان تحلیل تفصیلی ساختارهای CNN، U-Net، GAN و ... Simple classifications into supervised/unlabeled; lack of detailed analysis of CNN, U-Net, GAN, etc. structures	تدوین طبقه‌بندی سلسله‌مراتبی بر مبنای نوع یادگیری، معماری، هدف و کاربرد Develop a hierarchical classification based on learning type, architecture, purpose, and application
ضعف در تحلیل عددی و مقایسه‌پذیر عملکردها Weakness in numerical and comparable analysis of performances	نبود جداول عددی از دقت و F1؛ مقایسه در شرایط غیرهم‌تراز No numerical tables of accuracy and F1; comparison in non-aligned conditions	ارائه جدول عددی مقایسه‌ای با داده‌های کمی از ۴۴ مقاله معتبر و هم‌ترازسازی نسبی معیارها Provide a comparative numerical table with quantitative data from 44 authoritative papers and relative alignment of criteria
بی‌توجهی به روش‌های نوظهور پس از ۲۰۲۰ Ignoring emerging methods after 2020	حذف GAN، Autoencoder، شبکه سیامی، تبدیل‌کننده‌های مکانی و زمانی Eliminate GAN, Autoencoder, Siamese network, spatial and temporal transforms	پوشش معماری‌های نوین در بازه ۲۰۱۴ تا ۲۰۲۵ با تمرکز ویژه بر مطالعات پنج‌ساله اخیر Coverage of new architectures in the period 2014-2025 with special focus on recent five-year studies
غفلت از مدل‌های چندمنبعی (راداری - اپتیکی) Neglecting multi-source models (radar-optical)	تمرکز صرف بر یک منبع داده؛ نادیده گرفتن مزایای ادغام منابع ناهمگن Focus solely on one data source; ignore the benefits of heterogeneous sources fusion	تحلیل ساختار مدل‌هایی مانند MSCDUNet، تبیین ظرفیت تلفیق داده‌های چندمنبعی و چالش‌های آن Analyze the structure of models such as MSCDUNet, explain the capacity of multi-source data fusion and its challenges

اقدام اصلاحی در مقاله حاضر Corrective action in this paper	نمونه ضعف‌ها Examples of weaknesses	محور ضعف مرورهای پیشین Axis of weakness of previous reviews
پیشنهاد توسعه الگوریتم‌های خودنظارتی، مدل‌های سبک و استفاده از شبکه‌های کاهش‌دهنده نویز مانند DnCNN Propose the development of self-supervising algorithms, lightweight models, and the use of noise reduction networks such as DnCNN	نادیده‌گرفتن مشکل نویز، فقدان داده‌های برچسب‌دار، هزینه محاسباتی بالا Ignore the problem of noise, lack of labeled data, high computational cost	کم‌توجهی به چالش‌های داده‌ای و اجراپذیری Insufficient attention to data and feasibility challenges

معماری‌های یادگیری عمیق مورد استفاده مبنای طبقه‌بندی قرار گرفتند. این معماری‌ها شامل شبکه‌های پرسپترون چندلایه (MLP)، شبکه‌های عصبی پیچشی (CNN)، معماری U-Net و انواع مشتق‌شده از آن، شبکه‌های بازگشتی (RNN)، رمزگذارهای خودکار (Autoencoder)، شبکه‌های مولد متخاصم (GAN)، و ساختارهای ترکیبی هستند. در سطح سوم نیز، برای هر مطالعه، معیارهای تحلیلی همچون نوع داده ورودی تصاویر راداری تک‌زمانه یا چندزمانه، یا ترکیب داده‌های راداری و نوری، روش‌های پیش‌پردازش، و شاخص‌های ارزیابی عملکرد از جمله F1-score، Overall Accuracy، ضریب کاپا و زمان محاسباتی مورد توجه قرار گرفتند. این ساختار لایه‌ای، امکان تحلیل تطبیقی دقیق عملکرد معماری‌های مختلف را در زمینه‌های متنوع کاربردی همچون پایش شهری، رصد تغییرات زیست‌محیطی، شناسایی تغییرات در مناطق جنگلی یا در شرایط وقوع بلایای طبیعی فراهم می‌سازد.

در راستای تدوین این چارچوب، روش‌های یادگیری عمیق مورد استفاده در حوزه آشکارسازی تغییرات در تصاویر راداری به سه دسته اصلی تقسیم شدند: (۱) روش‌های نظارت‌شده، که مبتنی بر استفاده از داده‌های برچسب‌خورده هستند و شامل معماری‌هایی مانند MLP، CNN، U-Net و RNN می‌شوند؛ (۲) روش‌های بدون نظارت، که با هدف کاهش وابستگی به داده‌های دستی برچسب‌دار، از ترکیب تکنیک‌هایی نظیر خوشه‌بندی فازی (FCM)، رمزگذارهای خودکار (Autoencoder)، شبکه‌های مولد (GAN)، و ساختارهای End-to-End بهره می‌برند مانند Autoencoder+FCM، GAN+FCM و CWNN+FCM و (۳) یک دسته مستقل و پیشرفته که به معماری چندمقیاسی اختصاصی MSCDUNet تعلق دارد. این مدل با طراحی دوگانه، ساختار رمزگذاری چندسطحی، و توانایی استخراج ویژگی‌های هم‌زمان محلی و جهانی، عملکرد بسیار دقیقی در آشکارسازی تغییرات راداری از خود نشان داده است و به دلیل تفاوت بنیادی در ساختار و دقت، به‌صورت جداگانه در تحلیل‌ها مدنظر قرار گرفته است.

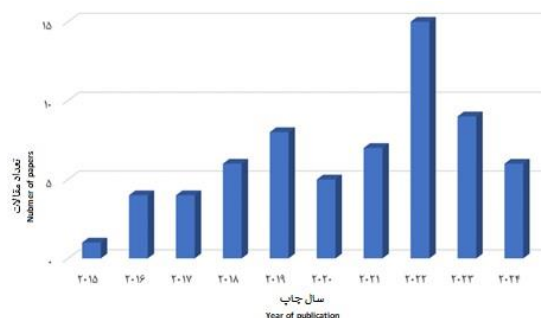
سپس، برای هر دسته، معماری‌های پرکاربرد (مانند U-Net، شبکه عصبی پیچشی و FCM)، نقاط قوت (مانند دقت بالا یا انعطاف‌پذیری)، و ضعف‌ها (مانند نیاز به داده‌های برچسب‌دار یا حساسیت به نویز) شناسایی شدند. در نهایت، چالش‌های مشترک، مانند کمبود داده‌های آموزشی و نویز لکه‌ای، و راهکارهای پیشنهادی در مقالات (مانند استفاده از شبکه مولد متخاصمی یا روش‌های شبه‌نظارت‌شده) بررسی شدند. این تحلیل ساختار یافته امکان مقایسه روش‌ها و استخراج یافته‌های کلیدی را فراهم کرد.

- روند زمانی انتشار مقالات

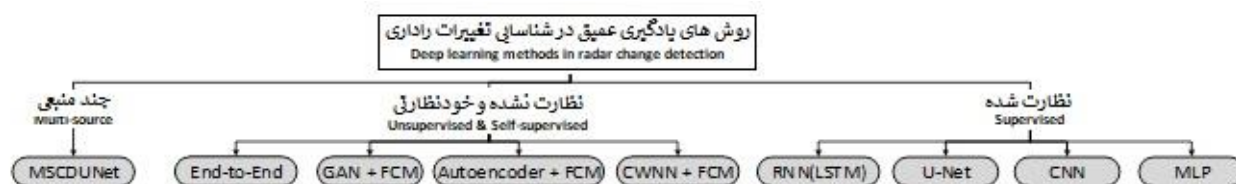
شکل ۱ روند تعداد مقالات منتشرشده در حوزه شناسایی تغییرات راداری طی دهه گذشته یعنی سال ۲۰۱۴ تا ۲۰۲۴ را نشان می‌دهد. افزایش قابل‌توجه مقالات از سال ۲۰۱۶ به بعد، هم‌زمان با پیشرفت‌های یادگیری عمیق و دسترسی گسترده‌تر به داده‌های راداری از ماهواره‌هایی مانند سنتینل-۱ حاکی از رشد توجه علمی به این حوزه است. این روند نشان‌دهنده پتانسیل بالای یادگیری عمیق در رفع چالش‌های سنتی شناسایی تغییرات، مانند نویز لکه‌ای و ناهمگنی داده‌ها، و همچنین افزایش علاقه به کاربردهای عملی مانند پایش بلایای طبیعی و تغییرات شهری است.

- ساختار دسته‌بندی

در این مطالعه، به‌منظور حفظ انسجام ساختاری و فراهم‌سازی امکان مقایسه دقیق عملکرد روش‌های گوناگون آشکارسازی تغییرات، مقالات منتخب بر اساس یک چارچوب مفهومی چندسطحی دسته‌بندی شده‌اند. در سطح نخست، مبنای دسته‌بندی بر نوع یادگیری به‌کاررفته در هر مطالعه استوار است و به سه گروه اصلی «یادگیری نظارت‌شده (Supervised)» و «بدون نظارت و خودنظارتی (Unsupervised)» و چندمنبعی تقسیم شده‌اند. در سطح دوم، درون هر یک از این دو دسته،



شکل ۱: نمودار تعداد مقالات شناسایی تغییرات در تصاویر راداری برگرفته از جست‌وجو در پایگاه اطلاعاتی اسکولار
Fig. 1: Chart of number of change detection articles in radar images obtained from the search in the Scholar database



شکل ۲: ساختار دسته‌بندی روش‌های یادگیری عمیق در شناسایی تغییرات تصاویر راداری
Fig. 2: Classification structure of deep learning methods for change detection in radar imagery

این قطعه‌ها یا به اصطلاح اشیاء، ویژگی‌های مختلف را استخراج می‌کنند. در نهایت با استخراج شدن هفت ویژگی داده‌ها وارد شبکه‌ی عصبی آموزش دیده می‌شوند. تیاگو و همکارانش توانستند بر روی داده‌های تست خود کاپای ۶۶ درصد را کسب و نسبت به دیگر طبقه‌بندها مانند طبقه‌بند بیزی، KNN و J48 نتایج بهتری بدست آورند.

در همان سال، لیو و همکارانش [۸] نیز به منظور پایش توسعه شهری از شبکه‌های عصبی پرسپترون چند لایه برای شناسایی تغییرات استفاده کردند. با این تفاوت که شبکه می‌تواند با تعداد داده آموزشی کمی فرایند یادگیری را طی کند. آن‌ها ابتدا با توجه به دو تصویر راداری خود که در زمان‌های مختلف از یک منطقه اخذ شده بود، با روش تفاوت لگاریتمی، تصویر تفاوت را محاسبه و سپس انتظار داشتند شبکه‌ی عصبی آن‌ها از این تصویر به پیکسل‌های تغییر یافته و تغییر نیافته دست یابد. شبکه‌ی عصبی طراحی شده توسط آن‌ها در واقع سلسله از ماشین‌های بولتزمن محدود بودند که پیکسل‌های تصویر تفاوت را به عنوان ورودی در نظر می‌گرفتند. این روش توانست به راحتی بر دیگر روش‌های سنتی موجود غالب شود.

تحلیل عملکرد فنی

در این پژوهش، به‌منظور آشکارسازی تغییرات در تصاویر سنجش از دور، از یک شبکه عصبی مصنوعی (Artificial Neural Network) بهره گرفته شده است که ورودی آن بر پایه تصویر تفاضلی بین دو تاریخ تصویربرداری طراحی شده است (شکل ۳). فرآیند کار به این صورت است که برای هر پیکسل از تصویر تفاضلی، یک پنجره محلی با ابعاد ثابت (مانند 3×3 یا 5×5) تعریف می‌شود که شامل مقادیر خاکستری مربوط به ناحیه همسایگی آن پیکسل مرکزی است (شکل ۳ قسمت الف)، و سپس این داده به ساختار شبکه عصبی چندلایه با لایه‌های پنهان منتقل می‌شود (شکل ۳ قسمت ب). شبکه عصبی طراحی شده دارای یک لایه ورودی، چندین لایه پنهان (Hidden Layers) و یک لایه خروجی است. در لایه ورودی، هر نورون متناظر با یکی از پیکسل‌های پنجره ورودی است و مقدار آن برابر با شدت خاکستری (تفاوت طیفی) همان پیکسل در تصویر تفاضلی است. این مقادیر از طریق وزن‌های اتصال، به نورون‌های موجود در لایه‌های پنهان منتقل شده و با استفاده از توابع فعال‌سازی (نظیر سیگموئید یا ReLU) پردازش می‌شوند تا ویژگی‌های مکانی و طیفی استخراج گردند. در نهایت، لایه خروجی شامل یک نورون است که وظیفه آن دسته‌بندی پیکسل مرکزی پنجره

انواع معماری‌های یادگیری عمیق برای آشکارسازی تغییرات

با گسترش الگوریتم‌ها و معماری‌های یادگیری عمیق، حوزه‌ی شناسایی تغییرات در تصاویر سنجش از دور راداری نیز دستخوش تحولی اساسی شده است. مدل‌های سنتی مبتنی بر تحلیل پیکسلی، ویژگی‌های آماری یا آستانه‌گذاری، به تدریج جای خود را به مدل‌های یادگیرنده‌ای داده‌اند که توانایی استخراج الگوهای پیچیده و غیرخطی از داده‌های حجیم و متنوع را دارند.

در این بخش، بر اساس ساختار لایه‌ای ترسیم شده در بخش پیشین، انواع روش‌های مورد استفاده در ادبیات موضوع، در قالب دو رویکرد اصلی «نظارت شده»، «بدون نظارت و خودنظارتی» و «چندمنبعی» تحلیل می‌شوند. در هر رویکرد، معماری‌های پرکاربرد یادگیری عمیق، نحوه پردازش داده‌ها، مزایا، محدودیت‌ها و کاربردهای رایج به‌صورت دسته‌بندی شده و تطبیقی بررسی خواهد شد تا تصویری ساختاریافته از چشم‌انداز کنونی این حوزه ارائه گردد.

○ روش‌های نظارت شده

اگر چه بیشتر روش‌های موجود در این بخش قرار می‌گیرند. با این حال، اکثر محققین در این حوزه، به دلیل کمبود داده‌های آموزشی و مشکلاتی که در تهیه‌ی آن‌ها وجود دارد، تمایل بسیاری دارند تا با استفاده از روش‌های شبه نظارت شده [۵] و یا نظارت شده ضعیف [۶] نیاز روش مورد استفاده خود را به داده‌های آموزشی به حداقل ممکن برسانند.

شبکه‌ی عصبی پرسپترون چند لایه (MLP)

معرفی معماری و کاربرد اصلی

شبکه‌های عصبی پرسپترون چند لایه از اولین شبکه‌های توسعه یافته در زمینه یادگیری و شبکه‌های عصبی بودند و معمولاً نیاز به استخراج جداگانه ویژگی‌های مناسب در مراحل پیش‌پردازش هستند. لذا استفاده از این روش‌ها در سال‌های اولیه استفاده از روش‌های یادگیری عمیق در حوزه شناسایی تغییرات برمی‌گردد.

در سال ۲۰۱۶، تیاگو و همکارانش [۷] با هدف نظارت بر جنگل‌ها و شناسایی علائم جنگل‌زدایی که دروازه فعالیت‌های غیرقانونی مانند رشد بی‌رویه شهری و چرای مراتع است، از یک شبکه عصبی پرسپترون چند لایه استفاده کردند. در واقع آن‌ها ابتدا با استفاده از روش قطعه‌بندی ساده، خطی و تکراری (SLIC) تصاویر راداری خود را قطعه‌بندی و بر روی

با استفاده از MLP به سمت شبه نظارتی شدن حرکت کند. به این معنا که سعی شده است با استفاده از روش‌های گوناگون یا شبکه نیاز به داده کمتر داشته باشد و یا بر اساس داده‌های ورودی، داده‌های بیشتری برای یادگیری تشخیص داده شوند. برای مثال در شاناک و همکارانش [۹] یک روش نظارت شده ضعیف و نینگ و همکارانش [۱۰] یک روش شبه نظارت شده با استفاده از شبکه‌های عصبی پرسپترون چند لایه پیشنهاد دادند. تقریباً هر دوی آن‌ها از رمزگذارهای خودکار و روش‌های خوشه‌بندی فازی چون الگوریتم خوشه‌بندی C میانگین فازی (FCM) برای تقویت داده‌های خود استفاده کردند. در این پژوهش، به منظور آشکارسازی تغییرات در تصاویر سنجش از دور، از چارچوبی مبتنی بر یادگیری عمیق استفاده شده است که ساختار کلی آن در شکل ۴ نمایش داده شده است. در مرحله نخست، مجموعه‌ای از ویژگی‌های تصویری اولیه شامل تصویر لگاریتمی تفاوت، نسبت میانگین و نگاشت نویزی پواسون از تصاویر دو زمانه استخراج می‌شود تا اطلاعات طیفی و آماری اولیه پیرامون تغییرات تقویت شود. این ویژگی‌ها به صورت پنجره‌ای از تصویر به عنوان نمونه‌های آموزشی وارد مدل می‌شوند.

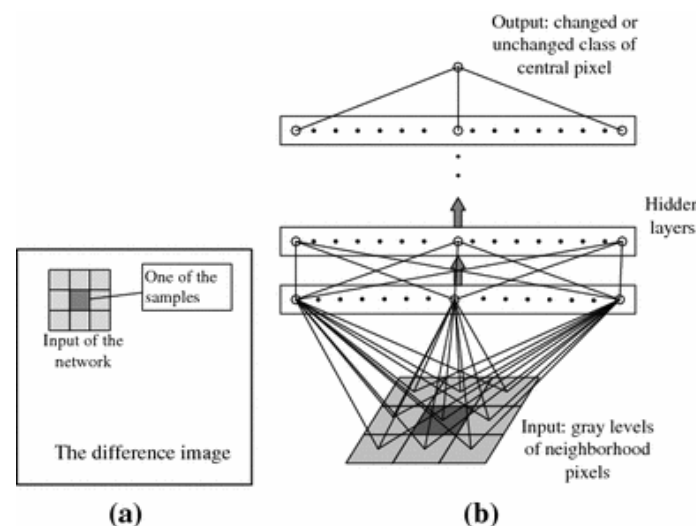
به یکی از دو کلاس «تغییر یافته» یا «تغییر نیافته» است. مقدار خروجی به صورت یک برچسب دودویی (۰ یا ۱) بازنمایی می‌شود و بیانگر وضعیت تغییر در پیکسل مرکزی می‌باشد. این شبکه با استفاده از داده‌های آموزش دارای برچسب (Labelled Samples) و با الگوریتم‌هایی نظیر پس‌انتشار خطا (Backpropagation) آموزش داده می‌شود تا بتواند الگوهای تغییر را به درستی یاد بگیرد و به سایر بخش‌های تصویر تعمیم دهد.

مزایا

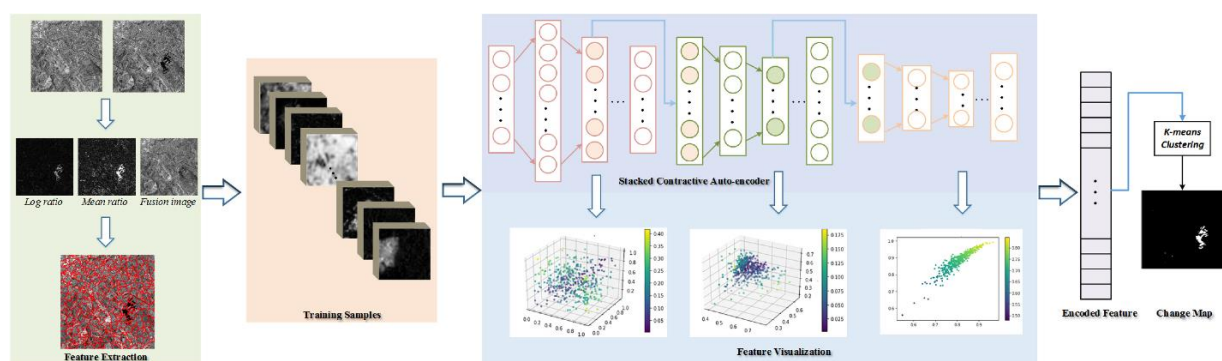
این روش مبتنی بر یادگیری عمیق، با در نظر گرفتن اطلاعات بافتی- مکانی در کنار اطلاعات طیفی، نسبت به روش‌های کلاسیک آشکارسازی تغییرات از دقت بالاتری برخوردار بوده و توانایی بالایی در تفکیک تغییرات واقعی از نویزهای ناشی از شرایط متفاوت تصویربرداری دارد.

چالش‌ها و محدودیت‌ها

کمبود داده آموزشی کافی باعث شد دیگر روش‌های شناسایی تغییرات



شکل ۳: ساختار کلی روش پیشنهادی لیو و همکاران در به کارگیری ماشین‌های بولتزمن محدود [۸]
Fig. 3: The overall architecture of the method proposed by Liu et al. for employing Restricted Boltzmann Machines [8]



شکل ۴: نمای کلی از روش پیشنهادی شبه‌نظارتی ارائه‌شده توسط نینگ و همکاران برای آشکارسازی تغییرات [۱۰].

Fig. 4: Overall framework of the semi-supervised change detection method proposed by Ning et al [10].

پیش‌پردازش داده‌های راداری به کار رفت. در مطالعه‌ای دیگر، ونگ و همکارانش [۱۴] شبکه‌ای بر پایه PCA-Net [۱۵] طراحی کردند تا ویژگی‌های موثر را مستقیماً از تصاویر SAR استخراج و از آن‌ها برای تولید نقشه تفاوت استفاده کنند. همچنین، گائو و همکارانش [۱۶] با بهره‌گیری از معماری سیامی و مازول ادغام تطبیقی (AF) الگویی کارآمد برای آشکارسازی تغییرات ارائه دادند. با رشد سریع داده‌ها و نیاز به مقیاس‌پذیری، جین و همکارانش [۱۷] نیز معماری ترکیبی CNN با تحلیل معنایی را برای آشکارسازی تغییرات در مقیاس‌های بزرگ طراحی کردند.

تحلیل عملکرد فنی

ساختار FFDNet شامل تقسیم تصویر ورودی به زیرتصاویر کوچک‌تر است که همراه با نقشه شدت نویز به شبکه کانولوشنی چندلایه وارد می‌شوند. لایه‌های کانولوشن، توابع فعال‌سازی ReLU و نرمال‌سازی دسته‌ای، فرآیند کاهش نویز را به صورت محلی و دقیق انجام می‌دهند و سپس تصویر پاک‌سازی شده بازسازی می‌شود [۱۳] (شکل ۵).

در مطالعه [۱۴] مبتنی بر PCA-Net، هدف کاهش نویز لکه‌ای و استخراج ویژگی‌های عمیق بدون یادگیری وزن‌ها بود. اما استخراج همبستگی بین سطوح مختلف ویژگی‌ها با دشواری مواجه بود. برای رفع این چالش، گائو و همکاران [۱۶] معماری سیامی با سه سطح کانولوشن (پایین، میانی، بالا) و مازول ادغام تطبیقی طراحی کردند. در این ساختار، خروجی دو شاخه موازی به صورت بردارهای ویژگی سطح بالا (Fv1 و Fv2) استخراج و از طریق معیار شباهت L_2 به لایه Fully Connected ارسال شده و نقشه تغییر نهایی تولید می‌شود (شکل ۶).

در سال ۲۰۲۲، جین و همکاران [۱۷] با تلفیق تحلیل معنایی و شبکه‌های عصبی پیچشی، ساختاری برای کاهش بار محاسباتی در محیط‌های دارای داده حجیم ارائه دادند و با استفاده از محاسبات موازی، قابلیت استفاده از شبکه‌های عصبی پیچشی را در کاربردهای بلادرنگ تقویت کردند.

مزایا

مطالعات متعدد نشان داده‌اند که شبکه‌های عصبی پیچشی به‌ویژه در استخراج خودکار و چندلایه‌ای ویژگی‌های مکانی و طیفی از تصاویر راداری عملکردی بهتر از مدل‌های سنتی مانند MLP دارند [۱۶ و ۱۷]. ساختارهایی نظیر FFDNet در کاهش نویز و بهبود پیش‌پردازش [۱۲]، و ساختارهای سیامی در مقایسه دقیق پیکسل‌ها [۱۶]، اثربخشی بالایی در کاربردهای شهری و جنگلی نشان داده‌اند. همچنین قابلیت استفاده در محیط‌های داده‌سنگین و توانایی تطبیق با معماری‌های ترکیبی، از دیگر مزایای مهم آن‌هاست. در این رویکردها، مدل با استفاده از تعداد بسیار محدودی نمونه برچسب‌خورده و بهره‌گیری از اطلاعات پیشینی خود، قادر به یادگیری و تصمیم‌گیری در وظایفی مانند طبقه‌بندی یا آشکارسازی تغییرات است [۱۸].

مرحله بعدی شامل به کارگیری یک خودرمزگذار انقباضی پشته‌ای (Stacked Contractive Autoencoder) است که با معماری چندلایه خود، امکان استخراج نمایش‌های فشرده و غیربدیهی از داده‌ها را فراهم می‌سازد. این شبکه از طریق به حداقل رساندن حساسیت نسبت به اغتشاشات جزئی در ورودی و حفظ ساختار محلی داده‌ها، نمایش‌های مستحکمی از ویژگی‌های تغییر را استخراج می‌کند. خروجی این بخش، نمایش رمزگذاری‌شده‌ای از ویژگی‌هاست که در فضای ویژگی نیز قابلیت بصری‌سازی و تفکیک‌پذیری بالایی دارد.

در مرحله نهایی، با بهره‌گیری از الگوریتم خوشه‌بندی K-means بر روی بردارهای ویژگی رمزگذاری‌شده، نمونه‌ها به دو کلاس «تغییر یافته» و «تغییر نیافته» تفکیک می‌شوند و نقشه تغییرات نهایی حاصل می‌گردد.

مطالعات اخیر و نتیجه‌گیری

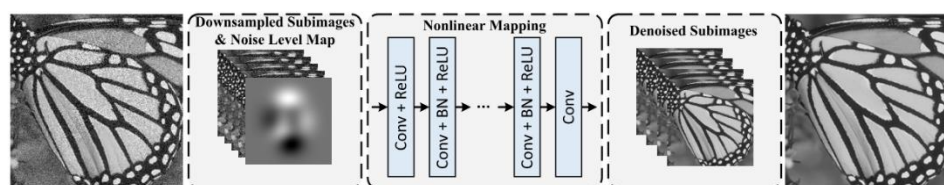
در یکی از گزارش‌های اخیر، امبابی و همکارانش [۱۱] در سال ۲۰۲۱ با ترکیب داده‌های نوری و راداری، از میان روش‌های مختلف موجود، شبکه‌های عصبی پرسپترون چندلایه را به کار گرفتند و به نتایج مطلوبی در زمینه آشکارسازی تغییرات دست یافتند. شبکه‌های عصبی پرسپترون چند لایه به دلیل ساختار ساده و قابلیت یادگیری روابط غیرخطی، در کاربردهای اولیه مانند پایش جنگل‌زدایی و توسعه شهری عملکرد مؤثری داشته‌اند و در مطالعه‌ی تیاگو و همکاران [۷] موفق به کسب ضریب کاپای ۶۶٪ شده‌اند.

این مدل‌ها به دلیل وابستگی به استخراج دستی ویژگی‌ها، امکان بهره‌گیری از ویژگی‌های طراحی‌شده توسط متخصص را فراهم می‌سازند؛ با این حال، نیاز به پیش‌پردازش مستقل و اتکا به داده‌های آموزشی باکیفیت، موجب کاهش کارایی آن‌ها شده است. در مقایسه با شبکه‌های پیچشی، معماری MLP هم دقت کمتری ارائه می‌دهد و هم زمان آموزش بالاتری دارد، به‌ویژه در مواجهه با داده‌های حجیم راداری [۸]. همین محدودیت‌ها سبب شده که در سال‌های اخیر، استفاده از شبکه عصبی پرسپترون چند لایه در حوزه آشکارسازی تغییرات کاهش یابد.

○ شبکه‌های عصبی پیچشی

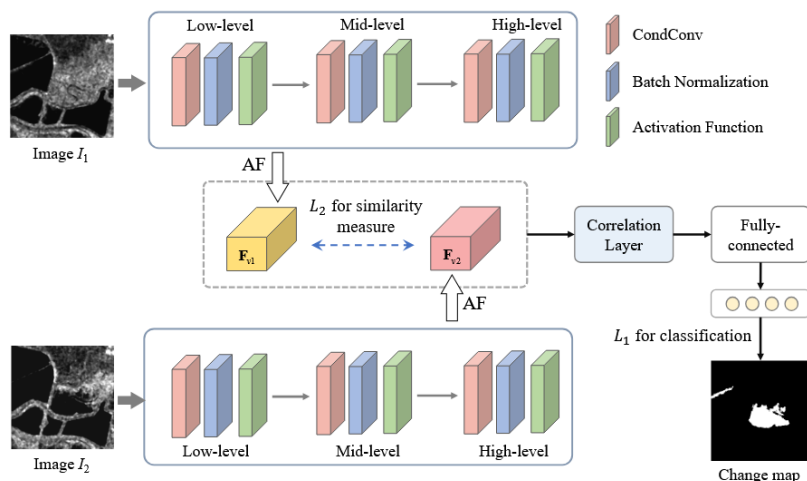
جایگاه معماری و کاربرد اصلی

شبکه‌های عصبی پیچشی (Convolutional Neural Networks) و به اختصار CNN یکی از پرکاربردترین چارچوب‌های یادگیری عمیق در پردازش تصویر هستند که در حوزه‌ی سنجش از دور نیز جایگاهی ممتاز یافته‌اند. این شبکه‌ها، به دلیل توانایی در یادگیری ویژگی‌های مکانی - طیفی از طریق ساختارهای سلسله‌مراتبی، به‌طور گسترده در آشکارسازی تغییرات در تصاویر راداری SAR استفاده شده‌اند. برای مثال، هونگکه و همکارانش [۱۲] در سال ۲۰۲۱ با هدف کاهش نویز لکه‌ای (Speckle Noise) از معماری FFDNet [۱۳] استفاده کردند که در اصل برای حذف نویز طراحی شده بود و به صورت مؤثری به عنوان مرحله



شکل ۵: ساختار کلی شبکه FFDNet برای کاهش نویز تصویر [۱۳].

Fig. 5: Overall architecture of the FFDNet for image denoising [13]



شکل ۶: ساختار کلی روش پیشنهادی گائو و همکارانش در یک شبکه ادغام تطبیقی مبتنی بر معماری سیامی [۱۶]

Fig. 6: The general structure of the method proposed by Gao et. al. in an adaptive fusion network based on Siamese architecture [16]

به‌عنوان نمونه، آسکولد و همکارش [۲۰] در سال ۲۰۲۲، به‌منظور شناسایی تغییرات در گستره آب‌ها و رودخانه‌های کشور نروژ، دو شبکه طبقه‌بند پیچشی را مورد آزمایش قرار دادند: یکی معماری U-Net با ستون فقرات ResNet50 و دیگری DeepLabV3. هر دو مدل پیش‌تر با استفاده از مجموعه داده‌های استاندارد ImageNet و Cityscapes آموزش دیده بودند. نتایج نهایی حاکی از برتری معماری U-Net در این مسئله بود.

توسعه معماری با فناوری‌های نوین

هم‌زمان با پیشرفت‌های فناوریانه، شاهد ادغام نوآوری‌های جدید با معماری‌های موفق گذشته هستیم. به‌عنوان نمونه، در سال ۲۰۲۴، دو و همکارانش [۲۱] در ساختار پیشرفته U-Net++ از ماژول‌های مبتنی بر تبدیل‌کننده (Transformer) برای پردازش تصاویر راداری استفاده کردند. در این روش، ابتدا نقشه‌های ویژگی از تصاویر SAR تک‌زمانه با استفاده از شبکه‌های پیچشی استخراج شد و سپس وصله‌های تصویر (Image Patches) به‌صورت توکن (Tokenized) درآمده و توسط تبدیل‌کننده‌ها کدگذاری شدند تا اطلاعات زمینه‌ای در سطح سراسری مدل‌سازی شود. این طراحی منجر به ایجاد بازنمایی‌های غنی از ویژگی‌های متنی شد. در مرحله رمزگشایی، ویژگی‌های چندمقیاسی رمزگذاری‌شده مجدداً نمونه‌برداری شده و با اتصالات متوالی، یادگیری مؤثر ویژگی‌های معنایی محلی و سراسری ممکن گردید.

محدودیت‌ها و چالش‌ها

با این حال، استفاده از شبکه‌های عصبی پیچشی با چالش‌هایی نیز همراه است. از جمله آن‌ها نیاز بالا به داده‌های آموزشی برجسته‌شده، پیچیدگی محاسباتی زیاد به‌ویژه در معماری‌های عمیق، زمان‌بر بودن فرآیند آموزش و استنتاج، و حساسیت به نویز لکه‌ای در صورت عدم انجام پیش‌پردازش مناسب [۳، ۱۲ و ۱۶]. این عوامل موجب شده‌اند استفاده مؤثر از شبکه‌های عصبی پیچشی در محیط‌های بلادرنگ یا منابع محدود نیازمند طراحی دقیق‌تر و بهینه‌سازی‌های چندجانبه باشد.

- معماری U-Net

جایگاه معماری و کاربرد اصلی

استفاده مکرر و قابل‌توجه از معماری U-Net در میان شبکه‌های عصبی پیچشی برای مسئله شناسایی تغییرات با استفاده از تصاویر راداری، نشان‌دهنده اهمیت این معماری در این حوزه است؛ به‌گونه‌ای که پرداختن جداگانه به این خانواده از شبکه‌ها ضرورتی منطقی می‌یابد. در این راستا، جاتوربیت و همکارانش [۱۹] در سال ۲۰۱۹ از یک ساختار ساده U-Net به‌منظور شناسایی تغییرات در ساختمان‌ها بهره گرفتند. هدف اصلی آن‌ها، طبقه‌بندی دقیق اشیاء دستخوش تغییر بود، به‌طوری‌که تغییرات ناشی از پدیده‌های فصلی به‌اشتباه در نظر گرفته نشوند. این رویکرد مبتنی بر طبقه‌بندی دقیق، در سال‌های بعد نیز مورد تأکید قرار گرفت و توسعه یافت.

مانند U-Net++، نیازمند حجم بالایی از داده‌های برچسب‌خورده و منابع محاسباتی قابل توجه برای آموزش است. همچنین، در صورت عدم تنوع کافی در داده‌های آموزشی، مدل دچار کاهش تعمیم‌پذیری نسبت به داده‌های جدید می‌شود [۱۹].

- شبکه‌های بازگشتی

جایگاه معماری و کاربرد اصلی

بر خلاف سایر حوزه‌های یادگیری عمیق، کاربرد شبکه‌های بازگشتی (Recurrent Neural Networks یا به اختصار RNN) در شناسایی تغییرات تصاویر راداری کمتر مورد توجه قرار گرفته است. با این حال، در مطالعه نیاگو و همکاران [۶] در سال ۲۰۱۹، از ساختاری مبتنی بر چندین لایه حافظه طولانی-کوتاه‌مدت (LSTM) برای طبقه‌بندی تغییرات استفاده شد. نتایج نشان داد که این مدل در مقایسه با طبقه‌بند سنتی ماشین بردار پشتیبان (SVM) عملکرد بهتری داشته و توانست دقت بالاتری در شناسایی تغییرات حاصل کند.

تحلیل عملکرد فنی

مدل‌های RNN، به‌ویژه LSTM، به‌دلیل توانایی در یادگیری روابط زمانی و درک وابستگی‌های توالی داده، برای تحلیل تغییرات زمانی-مکانی در سری‌های زمانی راداری مناسب هستند و در پایش تدریجی پدیده‌هایی مانند تغییرات زیست‌محیطی، کشاورزی یا فرسایش، پتانسیل بالایی دارند. با این حال، پیچیدگی محاسباتی، نیاز به داده‌های سری زمانی با وضوح و کیفیت بالا، و زمان طولانی آموزش، از جمله محدودیت‌های جدی آن‌ها محسوب می‌شوند. همچنین، در مقایسه با معماری‌های پیچشی مانند U-Net، دقت کلی و کارایی شبکه‌های بازگشتی در مقیاس‌های بزرگ معمولاً پایین‌تر است [۶].

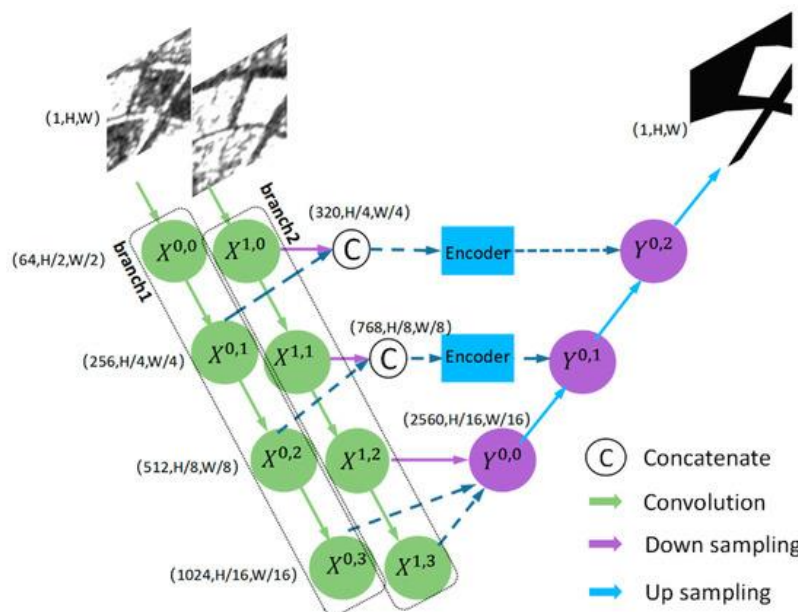
ساختار کلی این مدل در شکل ۷ نمایش داده شده است. در این ساختار، دو شاخه موازی (branch1 و branch2) شامل مسیرهای پیچشی در سطوح مختلف قرار دارند. خروجی‌های چندمقیاسی این شاخه‌ها پس از عبور از چند مرحله پایین‌سازی (Downsampling) و عملیات رمزگذاری (Encoder)، در مسیر صعودی (Upsampling) با استفاده از عملیات الحاق (Concatenation) ترکیب شده و به‌تدریج برای بازسازی نقشه خروجی تغییرات بازنمونه‌برداری می‌شوند. استفاده از اطلاعات در سطوح مختلف مقیاسی و فشردگی ویژگی‌ها در این ساختار، امکان استخراج نمایه‌های معنایی قوی‌تر را فراهم کرده و موجب بهبود دقت در آشکارسازی تغییرات شده است.

تحلیل عملکرد فنی

در سال‌های اخیر، معماری U-Net همچنان به‌عنوان یکی از مؤثرترین ساختارها در حوزه شناسایی تغییرات با استفاده از تصاویر راداری مطرح بوده است. پژوهش‌هایی نظیر [۲۲]، [۲۳] و [۲۴] نیز این معماری را در محوریت ساختار پیشنهادی خود قرار داده و در کاربردهایی چون آشکارسازی تغییرات معادن و ساختمان‌ها به‌کار گرفته‌اند. ساختار رمزگذار-رمزگشای U-Net با حفظ اطلاعات مکانی در مسیرهای پایین‌رو و بالا‌رو، امکان تولید نقشه‌های تغییر دقیق را فراهم می‌کند. این معماری در مطالعات مختلف، دقت‌هایی تا حدود ۹۵٪ در پایش تغییرات شهری [۱۹] و F1-score در بازه ۰/۸۵ تا ۰/۹۳ در داده‌های چندمنبعی [۲۴] به‌دست آورده است. از جمله کاربردهای موفق آن می‌توان به شناسایی تغییرات ساختمانی، ارزیابی خسارات ناشی از بلایای طبیعی و بخش‌بندی نواحی آسیب‌دیده اشاره کرد [۲۱].

محدودیت‌ها و چالش‌ها

با وجود این مزایا، معماری U-Net به‌ویژه در نسخه‌های پیشرفته‌تری



شکل ۷: ساختار کلی روش پیشنهادی TransUNet++SAR توسط دو و همکاران [۲۱] برای آشکارسازی تغییرات در تصاویر راداری

Fig. 7: Overall architecture of the TransUNet++SAR method proposed by Do et al. [21] for SAR image change detection

تصویر تفاضلی (DI) از طریق نسبت لگاریتمی بین دو تصویر ورودی آغاز می‌شود. این تصویر تفاضلی به یک رمزگذار خودکار داده می‌شود تا ویژگی‌های فشرده‌ای از داده‌ها استخراج شده و نویزهای لکه‌ای سرکوب شوند.

سیس، خروجی رمزگذار که حاوی بازنمایی‌های ویژگی است، به خوشه‌بند FCM داده می‌شود تا مجموعه‌ای از پیکسل‌ها با برچسب‌های شبه‌نظارتی (Pseudo Labels) تولید شود. این برچسب‌ها در سه کلاس تعریف می‌شوند و به‌عنوان داده آموزشی برای مرحله بعدی مورد استفاده قرار می‌گیرند. در ادامه، شبکه عصبی پیچشی با استفاده از این داده‌های برچسب‌خورده آموزش دیده و پس از آن، ویژگی‌های تصویر از طریق لایه‌های شبکه عصبی پیچشی پردازش شده و نقشه تغییر نهایی تولید می‌شود.

- توسعه خوشه‌بندی فازی و معماری‌های پیشرفته پیچشی (FCM + CWNN)

در ادامه مسیرهای توسعه‌یافته بر مبنای ترکیب خوشه‌بندی و شبکه‌های پیچشی، در سال‌های اخیر نیز رویکردهایی مشابه با روش گانگ و همکاران [۲۵] دنبال شده است. برای نمونه، کوئی و همکاران [۲۶] در سال ۲۰۱۹، به‌منظور تعیین خودکار نمونه‌های آموزشی با اطمینان بالا، از یک استراتژی گروهی و ساختار خوشه‌بندی مبتنی بر ترکیب چندین FCM استفاده کردند. در این رویکرد، نمونه‌های خوشه‌بندی‌شده جهت آموزش یک شبکه پیچشی طراحی شده مورد استفاده قرار گرفت.

در سال ۲۰۲۰، مینگ و همکارانش [۲۷] از خوشه‌بندی فازی محلی (Local FCM) برای استخراج شبه‌برچسب‌ها استفاده کرده و سیس از یک شبکه موجک پیچشی (CWNN) برای طبقه‌بندی بهره گرفتند. به‌دنبال آن، ژنگ و همکارانش [۲۸] با هدف اعمال تحلیل شی‌گرا، ابتدا با بهره‌گیری از الگوریتم SLIC اقدام به قطعه‌بندی اولیه تصویر کردند و سیس در نسخه توسعه‌یافته‌ای از روش خود در سال بعد [۲۹]، از یک خوشه‌بندی دمرحله‌ای FCM در فضای پیکسل برای تولید داده‌های آموزشی اطمینان‌بخش بهره بردند.

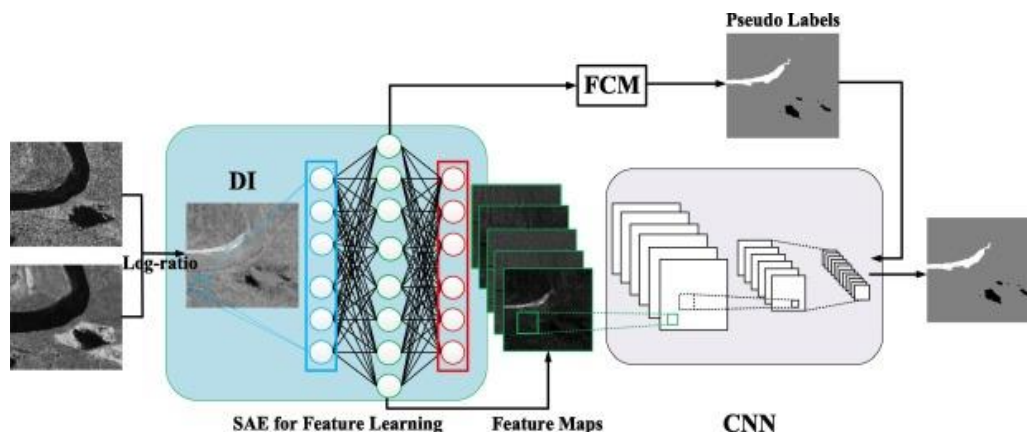
○ رویکردهای یادگیری بدون نظارت و خودنظارتی

همان‌گونه که پیش‌تر اشاره شد، کمبود و دشواری دسترسی به داده‌های برچسب‌خورده در تصاویر سنجش از دور، به‌ویژه داده‌های راداری، یکی از چالش‌های اساسی در توسعه روش‌های یادگیری نظارت‌شده است. در پاسخ به این محدودیت، روش‌های نظارت‌نشده (Unsupervised) و خودنظارتی (Self-supervised) مورد توجه روزافزون قرار گرفته‌اند. در این رویکردها، مدل بدون نیاز به داده‌های برچسب‌خورده یا با تولید برچسب به‌صورت درون‌زایافته، فرآیند یادگیری را انجام می‌دهد و در نتیجه وابستگی به نمونه‌های دستی کاهش می‌یابد. در ادامه، این دسته از روش‌ها به تفصیل بررسی می‌شوند.

- استفاده پایه از شبکه‌های پیچشی در رویکردهای بدون نظارت (CNN) استفاده از شبکه‌های عصبی پیچشی بدون بهره‌گیری از معماری‌های خاص نیز در بسیاری از مطالعات توانسته نیازهای اصلی مرتبط با آشکارسازی تغییرات را برآورده سازد. با این حال، از آن‌جا که این شبکه‌ها ذاتاً نیازمند فرآیند یادگیری مبتنی بر داده برای تنظیم بهینه وزن‌ها هستند، تهیه داده‌های آموزشی پیش از آموزش مدل، به‌ویژه در حوزه تصاویر راداری، یک مرحله ضروری تلقی می‌شود. این داده‌ها معمولاً یا از طریق روش‌های یادگیری بدون نظارت استخراج می‌شوند، یا از مدل‌های از پیش آموزش‌دیده بهره گرفته می‌شود.

- ترکیب رمزگذارهای خودکار و خوشه‌بندی فازی در آشکارسازی تغییرات (Autoencoder + FCM)

در همین راستا، گانگ و همکارانش [۲۵] در سال ۲۰۱۷ چارچوبی ترکیبی برای آشکارسازی و دسته‌بندی تغییرات به دو نوع «مثبت» و «منفی» ارائه دادند. روش پیشنهادی آن‌ها ترکیبی از یک رمزگذار خودکار پراکنده (Sparse Autoencoder)، شبکه عصبی پیچشی و یک خوشه‌بند بدون نظارت مبتنی بر روش FCM (Fuzzy C-Means) بود. همان‌گونه که در شکل ۸ نمایش داده شده است، فرآیند با محاسبه



شکل ۸: ساختار کلی روش پیشنهادی گانگ و همکاران [۲۵] برای آشکارسازی تغییرات در تصاویر راداری با استفاده از ترکیب رمزگذار خودکار، خوشه‌بندی فازی و شبکه پیچشی.
Fig. 8: Overall structure of the change detection method proposed by Gang et al. [25], combining a sparse autoencoder, fuzzy C-means clustering, and a convolutional neural network (CNN).

از خوشه‌بندی فازی برای تولید برچسب‌های اولیه، از یک شبکه عصبی از پیش آموزش‌دیده استفاده می‌شود تا داده‌های آموزشی اولیه را فراهم کند. مزیت کلیدی این روش، ساده‌سازی فرایند و کاهش وابستگی به مراحل میانی است. نتایج نشان می‌دهد که این مدل پایان‌به‌پایان توانسته عملکرد بهتری نسبت به روش‌های مبتنی بر FCM در برخی معیارها از خود نشان دهد.

در ادامه این مسیر، دانگ و همکاران [۳۲] چارچوبی جدید مبتنی بر شبکه‌های تبدیل‌کننده ارائه کردند که ساختار آن بر پایه تقسیم‌بندی تصویر به وصله‌های محلی و اعمال لایه‌های محدودشده به پنجره‌های محاسباتی کوچک طراحی شده است. این طراحی موجب کاهش چشمگیر پیچیدگی محاسباتی و رسیدن به ساختاری با بار محاسباتی خطی شده و در عین حال امکان استخراج ویژگی‌های معنایی سطح بالا را فراهم کرده است.

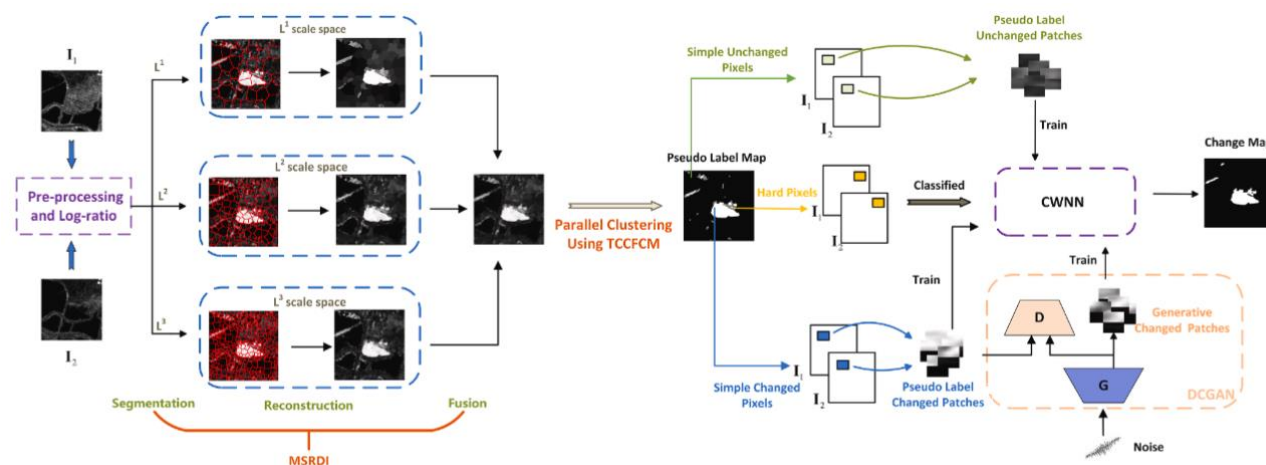
- تحلیل تطبیقی مزایا و چالش‌های روش‌های بدون نظارت

با وجود رشد روش‌های جدید، همچنان روش‌های بدون نظارت مبتنی بر شبکه عصبی پیچشی و خوشه‌بندی فازی جایگاه خود را حفظ کرده‌اند. برای مثال، ژنگ و همکاران [۲۹] با تلفیق FCM و شبکه مولد متخاصم، موفق به تولید شبه‌برچسب‌های معتبر شدند و دقتی تا ۹۹/۶٪ گزارش کردند. این روش‌ها به‌ویژه برای سناریوهای دارای داده‌های برچسب‌خورده محدود، مانند پایش مناطق دورافتاده یا زیست‌محیطی، مناسب‌اند [۲۵]. با این حال، عملکرد نهایی آن‌ها وابسته به کیفیت خوشه‌بندی اولیه و میزان تأثیر نویز لکه‌ای در تصاویر است؛ عاملی که در برخی مطالعات مانند [۲۶] نیز به‌عنوان محدودیت اصلی گزارش شده است. از سوی دیگر، گرچه زمان محاسباتی این روش‌ها در مقایسه با مدل‌های یادگیری عمیق پیچیده نسبتاً پایین است، اما فرآیند بهینه‌سازی پارامترهای FCM خود می‌تواند پیچیدگی محاسباتی و حساسیت به تنظیمات اولیه را افزایش دهد.

در این روش، برای غلبه بر کمبود داده، از شبکه‌های مولد متخاصم شرطی (DCGAN) جهت تولید وصله‌های تغییر مصنوعی استفاده شد و در ادامه، شبکه‌ی موجک پیچشی برای طبقه‌بندی نهایی به‌کار گرفته شد که در مجموع توانست به دقت چشمگیر ۹۹/۶٪ دست یابد. همچنین، در سال ۲۰۲۲، قوش و همکارانش [۳۰] با ارائه نسخه‌ای مکان‌محور از الگوریتم FCM، ساختاری مشابه اما با در نظر گرفتن وابستگی مکانی پیکسل‌ها پیاده‌سازی کردند. ساختار کلی این روش در شکل ۹ نمایش داده شده است. این روش با پیش‌پردازش اولیه شامل محاسبه نسبت لگاریتمی آغاز می‌شود و سپس با اعمال تبدیل چندمقیاسی (MSRDI) و استفاده از فضاها‌ی مقیاسی مختلف، ویژگی‌های تصویری استخراج می‌شوند. خروجی‌ها از طریق خوشه‌بندی موازی مبتنی بر الگوریتم TCCFCM پردازش و نقشه‌ای از شبه‌برچسب‌ها تولید می‌گردد. این نقشه، شامل نمونه‌های ساده تغییرنیافته، سخت، و ساده تغییر یافته است که هرکدام به‌طور جداگانه برای آموزش شبکه موجک پیچشی استفاده می‌شوند. همچنین، به‌منظور تقویت داده‌ها، از شبکه مولد DCGAN برای تولید وصله‌های تغییر مصنوعی بهره گرفته شده است که به بهبود عملکرد نهایی طبقه‌بند کمک می‌کند.

- معماری‌های پایان‌به‌پایان (End-to-End)

در کنار رویکردهای ترکیبی متداول که از خوشه‌بندی برای تولید برچسب‌های اولیه بهره می‌برند، در سال‌های اخیر روش‌هایی بدون نظارت طراحی شده‌اند که کل فرایند شناسایی تغییرات را به‌صورت پایان‌به‌پایان (End-to-End) و بدون نیاز به تصویر تفاوت یا اعمال فیلترهای پیش‌پردازشی انجام می‌دهند. برای نمونه، کیشک و همکاران [۳۱] در سال ۲۰۲۰ روشی مبتنی بر شبکه عصبی پیچشی ارائه کردند که تصاویر راداری را پس از انجام تصحیحات هندسی اولیه، مستقیماً به مدل وارد کرده و طبقه‌بندی نهایی را بدون نیاز به تولید تصویر تفاوت یا خوشه‌بندی واسطه انجام می‌دهد. در این رویکرد، به‌جای بهره‌گیری



شکل ۹: ساختار کلی روش پیشنهادی ژنگ و همکاران [۲۹] در سال ۲۰۲۱ برای آشکارسازی تغییرات در تصاویر راداری با استفاده از خوشه‌بندی فازی، شبکه موجک پیچشی و داده‌افزایی با DCGAN.

Fig. 9: Overall architecture of the change detection method proposed by Zheng et al [29]. (2021), combining fuzzy clustering, complex wavelet neural networks (CWNN), and data augmentation via DCGAN.

مرحله به مرحله در بلوک‌های الحاق (Concatenation) با یکدیگر تلفیق شده و به یک شبکه نهایی برای طبقه‌بندی تغییرات منتقل می‌شود. این ساختار مشابه آن چیزی است که در چارچوب MSCDUNet توسط لی و همکاران [۳۴] ارائه شد؛ مدلی که با به‌کارگیری دو معماری U-Net++ و یکپارچه‌سازی ویژگی‌های کلیدی استخراج‌شده با استفاده از الگوریتم جنگل تصادفی، موفق به دستیابی به F1-score معادل ۹۳٪ در مجموعه داده‌های ترکیبی شد. این نتایج نشان می‌دهد که تلفیق هوشمند ویژگی‌های چندمنبعی می‌تواند نسبت به استفاده از داده‌های تک‌منبعی، عملکرد قابل‌توجهی بهتر ارائه دهد.

در مجموع، بهره‌گیری از معماری‌های چندشاخه، مانند نمونه ارائه‌شده در شکل ۱۰، مسیر مؤثری برای بهره‌برداری بهینه از مزایای داده‌های چندمنبعی فراهم می‌کند و می‌تواند دقت، پایداری و تعمیم‌پذیری مدل‌های آشکارسازی تغییرات را به‌طور محسوسی افزایش دهد.

- سطوح تلفیق اطلاعات در مدل‌های چندمنبعی

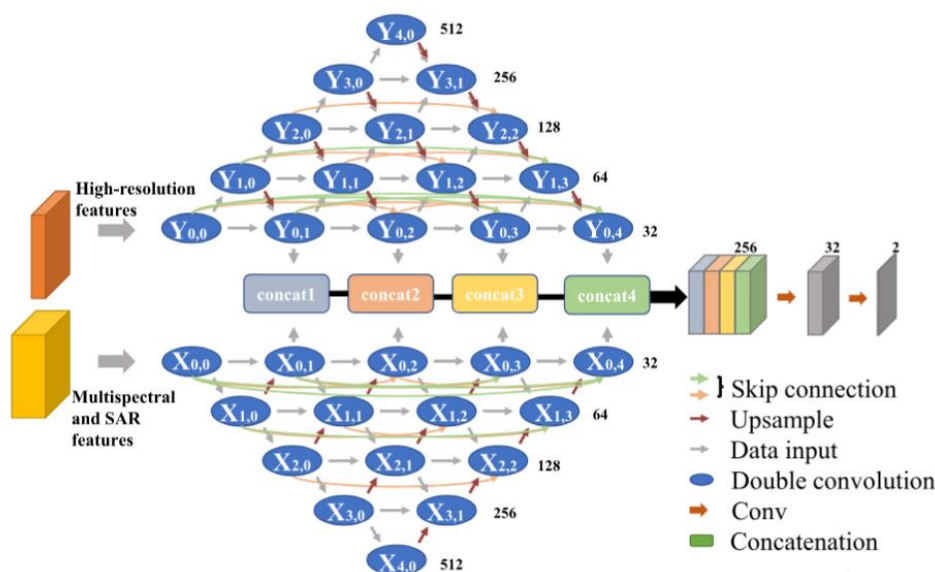
- ادغام داده‌ها در این حوزه می‌تواند در سه سطح اصلی صورت گیرد:
 - سطح پیکسل: نیازمند تطبیق دقیق مکانی-زمانی میان تصاویر راداری و نوری است و متکی به ترکیب مستقیم داده‌های خام است.
 - سطح ویژگی: همان‌گونه که در شکل ۹ مشاهده می‌شود، شامل ترکیب ویژگی‌های استخراج‌شده از هر مسیر با استفاده از شبکه‌های یادگیری عمیق و انعطاف‌پذیری بیشتر در مواجهه با داده‌های ناهمگن است؛
 - سطح تصمیم‌گیری: بر پایه ترکیب نتایج طبقه‌بندی مستقل برای هر منبع داده انجام می‌شود اما به دلیل عدم همگرایی در سطوح عمیق، دقت پایین‌تری دارد [۳۳].

ادغام داده‌های راداری و نوری در معماری‌های پیشرفته شناسایی تغییر

- ضرورت ادغام چندمنبعی در شناسایی تغییرات

ادغام داده‌های راداری با داده‌های نوری، از جمله تصاویر چندطیفی یا با تفکیک‌پذیری بسیار بالا (VHR) به‌عنوان یکی از راهبردهای مؤثر و نوظهور در شناسایی تغییرات مطرح شده است. این رویکرد، با بهره‌گیری از ویژگی‌های مکمل موجود در هر نوع داده، می‌تواند محدودیت‌های ذاتی آن‌ها را جبران کرده و دقت آشکارسازی تغییرات را افزایش دهد. تصاویر SAR قابلیت تصویربرداری مستقل از شرایط نوری و جوی را دارند و نسبت به ویژگی‌های ساختاری و فیزیکی سطح زمین مانند بافت، رطوبت و زبری حساس هستند [۳۳]. در مقابل، تصاویر نوری اطلاعات طیفی دقیق و غنی در باندهای مختلف (مانند RGB و مادون قرمز) ارائه می‌دهند که برای تحلیل پوشش گیاهی، کاربری اراضی و تغییرات بصری سطح زمین مفیدند [۳۴].

- معماری MSCDUNet: نمونه‌ای پیشرفته از ادغام چندسطحی داده‌ها
 شکل ۱۰ ساختار کلی یک معماری ادغامی دوشاخه را نشان می‌دهد که در آن ویژگی‌های استخراج‌شده از داده‌های با وضوح بالا و تصاویر چندطیفی-راداری به‌صورت موازی پردازش و ترکیب می‌شوند. در این چارچوب، هر شاخه با ساختاری شبیه U-Net++، وظیفه پردازش نوع خاصی از داده‌ها را بر عهده دارد و لایه‌های دو کانولوشن (Double Convolution) در مسیر رمزگذاری و بازسازی اطلاعات عمل می‌کنند. اتصال‌های پرش (Connections Skip) و مسیرهای نمونه‌برداری معکوس (Upsampling) برای حفظ اطلاعات مکانی دقیق به‌کار رفته‌اند. پس از استخراج چندسطحی ویژگی‌ها، خروجی هر مسیر به‌صورت



شکل ۱۰: ساختار کلی شبکه‌ی MSCDUNet برای ادغام تصاویر چندمنبعی (SAR، چندطیفی و VHR) با استفاده از معماری دوشاخه، انتخاب ویژگی با جنگل تصادفی، و ترکیب سطوح مختلف ویژگی‌ها [۳۴].

Fig. 10: Overall architecture of the MSCDUNet network for multi-source image fusion (SAR, multispectral, and VHR), using a dual-branch design, feature selection via Random Forest, and multi-level feature integration [34].

- مزایای عملیاتی ادغام داده‌های راداری و نوری

○ افزایش دقت و پایداری نتایج: داده‌های طیفی حاصل از تصاویر نوری و اطلاعات ساختاری موجود در تصاویر راداری، ماهیتی مکمل دارند و می‌توانند محدودیت‌های ذاتی هر یک را جبران کنند. به‌عنوان نمونه، در فرآیند پایش تغییرات پوشش گیاهی، تصاویر نوری قادر به شناسایی تغییرات رنگ، بافت و ویژگی‌های بصری هستند، در حالی که تصاویر راداری اطلاعاتی درباره ساختار گیاهان و میزان رطوبت خاک فراهم می‌کنند. این هم‌افزایی موجب کاهش اثر نویز لکه‌ای در تصاویر SAR و محدودیت‌های ناشی از شرایط جوی در داده‌های نوری می‌شود [۳۴].

○ کاربردپذیری گسترده در سناریوهای مختلف: این رویکرد در حوزه‌های گوناگون از جمله پایش بلایای طبیعی نظیر سیلاب‌ها و رانش زمین، رصد تغییرات کاربری اراضی، و ارزیابی تحولات شهری عملکرد به‌مراتب بهتری نسبت به استفاده از داده‌های منفرد از خود نشان داده است. برای مثال، در مطالعه [۳۴]، ترکیب داده‌های نوری و راداری به شناسایی دقیق تغییرات در مناطق شهری منجر شد. افزایش تعمیم‌پذیری مدل‌های یادگیری: بهره‌گیری از داده‌های چندمنبعی به مدل‌های یادگیری عمیق این امکان را می‌دهد که در برابر تغییرات محیطی مانند تفاوت‌های فصلی، شرایط نوری متغیر یا ویژگی‌های مکانی متنوع، پایداری عملکرد بیشتری داشته باشند. این امر به دلیل فراهم شدن اطلاعات متنوع‌تر و غنی‌تر برای فرآیند آموزش مدل است [۳۳].

- چالش‌ها و محدودیت‌های فنی

با وجود مزایای چشمگیر، ادغام تصاویر راداری و نوری با چالش‌های مهمی مواجه است که در مطالعات آتی باید به‌طور نظام‌مند مورد توجه قرار گیرد:

○ ناهم‌زمانی زمانی و مکانی داده‌ها: تصاویر راداری و نوری معمولاً در بازه‌های زمانی متفاوت یا با تفکیک‌پذیری مکانی ناهمسان به‌دست می‌آیند. این عدم تطابق می‌تواند به تفسیر نادرست تغییرات واقعی منجر شود؛ چرا که ممکن است تفاوت‌های مشاهده‌شده ناشی از زمان تصویربرداری یا اختلافات مکانی، و نه تغییرات واقعی سطح زمین، تلقی گردند [۳۳]. به‌عنوان مثال، تصاویر نوری ممکن است تحت تأثیر پوشش ابری یا سایه قرار گیرند، در حالی که داده‌های SAR در همان بازه زمانی در دسترس هستند ولی با رزولوشن متفاوت.

○ پیچیدگی فرآیند پیش‌پردازش: برای هم‌راستا کردن داده‌های چندمنبعی، مراحل پیش‌پردازشی متعددی مانند تصحیح هندسی، هم‌زمان‌سازی زمانی و نرمال‌سازی داده‌ها ضروری است. این فرآیندها علاوه بر پیچیدگی، می‌توانند منابع محاسباتی قابل‌توجهی مصرف کرده و در صورت اجرا نادرست، منجر به بروز خطاهای تجمیعی شوند [۳۴].

○ افزایش حجم داده و بار محاسباتی: ادغام داده‌های راداری و نوری، حجم ورودی به مدل‌های یادگیری عمیق را به‌طور قابل‌توجهی افزایش می‌دهد و در نتیجه، نیاز به معماری‌های پیچیده‌تر و منابع محاسباتی قدرتمندتری ایجاد می‌کند. این موضوع خصوصاً در کاربردهای بلندپایه مانند پایش بحران‌های طبیعی، یک محدودیت جدی محسوب می‌شود [۳۳].

○ کمبود داده‌های مرجع استاندارد: نبود مجموعه‌داده‌های جامع، برچسب‌خورده و هم‌زمان از تصاویر راداری و نوری، امکان ارزیابی منسجم و مقایسه‌پذیر روش‌های مختلف ادغام را کاهش داده است. این چالش مانعی جدی برای توسعه مدل‌های تعمیم‌پذیر و قابل استفاده در مقیاس وسیع به‌شمار می‌رود [۳۴].

○ تأثیر نویز و شرایط محیطی: تصاویر SAR تحت تأثیر نویز لکه‌ای و تصاویر نوری تحت تأثیر عوامل محیطی مانند ابر، مه یا سایه قرار می‌گیرند. این عوامل می‌توانند موجب کاهش دقت الگوریتم‌های ادغام شوند. اگرچه روش‌هایی نظیر MSCDUNet توانسته‌اند تا حدی این محدودیت‌ها را کاهش دهند، اما همچنان نیاز به توسعه الگوریتم‌های مقاوم‌تر در برابر نویز و ناپایداری‌های محیطی احساس می‌شود [۳۴].

- ارزیابی تطبیقی روش‌های ادغام و محدودیت‌های تعمیم‌پذیری

ادغام تصاویر راداری و نوری را می‌توان گامی راهبردی در جهت رفع کاستی‌های روش‌های مبتنی بر داده‌های تک‌منبعی دانست. با این حال، تحقق کامل ظرفیت‌های این رویکرد در گرو توانایی آن در غلبه بر چالش‌های فنی و مفهومی موجود است. مطالعاتی همچون پژوهش لی و همکاران در قالب معماری MSCDUNet [۳۴] نشان داده‌اند که بهره‌گیری از ساختارهای یادگیری عمیق چندمسیره می‌تواند با استخراج هم‌زمان ویژگی‌های مکمل از منابع داده‌ای مختلف، دقت مدل را به شکل معناداری افزایش دهد. با وجود این، وابستگی جدی این روش‌ها به داده‌های آموزشی باکیفیت و دارای برچسب معتبر، همچنان چالشی مشابه سایر الگوهای یادگیری نظارت‌شده محسوب می‌شود. در عین حال، هرچند ادغام در سطح ویژگی همان‌گونه که در [۳۴] اجرا شده نسبت به روش‌های ادغام در سطوح پیکسل یا تصمیم‌گیری، انعطاف‌پذیری بیشتری در مواجهه با ناهمگنی منابع اطلاعاتی دارد، اما کارایی آن در تمامی سناریوها تضمین‌شده نیست. از این‌رو، ضرورت انجام مطالعات تطبیقی برای ارزیابی سیستماتیک مزایا و محدودیت‌های هر سطح از ادغام و شناسایی الگوی بهینه برای کاربردهای خاص بیش‌ازپیش احساس می‌شود [۳۳].

- راهبردهای آینده‌نگر در توسعه‌ی این مدل‌ها

از منظر عملیاتی نیز، ادغام داده‌های چندمنبعی در حوزه‌هایی چون پایش بلایای طبیعی، که نیازمند تصمیم‌گیری سریع و دقیق هستند، پتانسیل بالایی دارد. با این حال، پیچیدگی‌های فنی از جمله نیاز به

استخراج شده‌اند و برای روش‌هایی که داده‌های کمی گزارش نشده‌اند، تخمین کیفی ارائه شده است. تحلیل داده‌های جدول فوق نشان می‌دهد که معماری‌های پیش‌بینی نظارت‌شده، به‌ویژه U-Net، عملکرد بسیار موفقی در آشکارسازی تغییرات در حوزه‌هایی مانند پایش شهری و بلایای طبیعی داشته‌اند. بر اساس نتایج گزارش‌شده در منابعی مانند [۱۹] و [۳۴]، این شبکه‌ها توانسته‌اند به دقت کلی تا ۹۵٪ و مقدار F1-Score در بازه ۰/۸۵ تا ۰/۹۳ دست یابند. موفقیت U-Net به ساختار رمزگذار-رمزگشای آن نسبت داده می‌شود که امکان حفظ ویژگی‌های مکانی در سطوح عمیق شبکه را فراهم می‌سازد.

پیش‌پردازش‌های سنگین و هزینه‌های محاسباتی بالا، پیاده‌سازی بلادرنگ چنین مدل‌هایی را با محدودیت‌هایی مواجه می‌سازد. همچنین، فقدان مجموعه داده‌های مرجع استاندارد و هم‌زمان از تصاویر راداری و نوری، ارزیابی عینی و توسعه‌پذیر مدل‌ها را دشوار کرده و مانعی در مسیر تعمیم‌پذیری آن‌ها در مقیاس وسیع ایجاد کرده است.

یافته‌ها

- ارزیابی عملکرد روش‌های یادگیری عمیق

جدول ۲ عملکرد روش‌های مختلف را بر اساس معیارهای دقت، F1-score و زمان محاسباتی مقایسه می‌کند. مقادیر از ارجاعات مقاله

جدول ۲: مقایسه عملکرد روش‌های مختلف بر اساس معیارهای دقت، F1-score، و زمان محاسباتی

Table 2: Performance comparison of different methods based on accuracy criteria, F1 score and computing time

روش Method	معماری Architecture	یادگیری Learning	دقت Accuracy	F1-score	زمان محاسباتی Computational time	کاربرد اصلی Main application	مرجع Reference
نظارت‌شده Supervised	MLP	نیاز به داده برچسب‌خورده Need labeled data	۶۶٪ 66%	گزارش نشده Not reported	بالا (آموزش و پیش‌پردازش) High (training & preprocessing)	پایش جنگل‌زدایی، توسعه شهری Monitoring deforestation, urban development	[۷]
	CNN	با یادگیری عمیق By deep learning	بالا (کیفی) High (qualitative)	گزارش نشده Not reported	متوسط تا بالا (بسته به عمق شبکه) Medium to high (depending on network depth)	حذف نویز، تغییرات شهری Noise reduction, urban changes	[۱۷]
	U-Net	رمزگذار/رمزگشا Encoder/Decoder	تا ۹۵٪ Up to 95%	۰/۸۵ تا ۰/۹۳ 0.85 to 0.93	بالا (آموزش) High (training)	بخش‌بندی تغییرات ساختمانی Segmentation of building changes	[۱۹] و [۳۴]
	RNN (LSTM)	مناسب برای سری‌های زمانی Suitable for time series	متوسط (کیفی) Medium (qualitative)	گزارش نشده Not reported	بالا (سری‌های زمانی) High (time series)	تحلیل زمانی تصاویر راداری Temporal analysis of radar images	[۶]
بدون نظارت Unsupervised	CWNN + FCM	شبکه مولد GAN Generative GAN network	تا ۹۹/۶٪ Up to 99.6%	۰/۷۰ تا ۰/۹۰ 0.70 to 0.90	متوسط (خوشه‌بندی و آموزش) Medium (clustering & training)	پایش زیست‌محیطی و مناطق دورافتاده Environmental monitoring and remote areas	[۲۵] و [۲۹]
	Autoencoder + FCM	رمزگذار خودکار پراکنده Sparse Autoencoder	بالا (کیفی) High (qualitative)	گزارش نشده Not reported	متوسط Medium	کاهش نویز و داده‌افزایی Noise reduction and data augmentation	[۲۶]
	GAN + FCM	شبکه مولد Generative network	بسیار بالا (۹۹٪) Very High (99%)	بالا (کیفی) High (qualitative)	بالا High	برچسب‌گذاری داده، تقویت یادگیری Data labeling, reinforcement learning	[۲۹]
	End-to-End	بدون تصویر تفاوت No difference image	بالا (کیفی) High (qualitative)	گزارش نشده Not reported	نسبتاً پایین Relatively low	ساده‌سازی فرایند، حذف پیش‌پردازش Simplify the process, eliminate preprocessing	[۳۱]
چندمنبعی Multi-sources	MSCDUNet		گزارش نشده Not reported	۰/۹۳ 0.93	بالا (پیش‌پردازش و آموزش) High (preprocessing & training)	پایش چندمنبعی و ادغام اطلاعات ساختاری-طیفی Multi-source monitoring and structural-spectral information fusion	[۳۴]

○ شبکه مولد تخصصی عمدتاً برای تولید داده‌های مصنوعی، داده‌افزایی و شبیه‌سازی تغییرات مورد استفاده قرار می‌گیرد. ترکیب شبکه‌های عصبی با خوشه‌بندی فازی، به‌ویژه FCM، نیز در بسیاری از پژوهش‌های بدون نظارت نشان داده است که می‌تواند بدون اتکالی مستقیم به برچسب‌گذاری انسانی، عملکرد رقابتی ارائه دهد.

- مقایسه رویکردهای نظارت‌شده و بدون نظارت

این مقایسه می‌تواند در انتخاب مدل مناسب برای کاربردهای عملی نقش کلیدی داشته باشد. در جدول ۳، این روش‌ها از منظر نوع یادگیری، داده‌های مورد نیاز، دقت و پیچیدگی با یکدیگر مقایسه شده‌اند.

یافته‌های این مرور نشان می‌دهند که یادگیری عمیق، به‌عنوان ابزاری توانمند در استخراج ویژگی‌های پیچیده مکانی و زمانی، تحولی بنیادین در دقت و کارایی فرآیند آشکارسازی تغییرات ایجاد کرده است. در ادامه، تحلیل دقیق‌تری از این یافته‌ها ارائه می‌شود تا ابعاد مزایا و محدودیت‌های این روش‌ها در حوزه سنجش از دور راداری روشن‌تر گردد.

- امکانات معماری‌های ترکیبی و رمزگذارها

روش‌های نظارت‌شده، به‌ویژه معماری‌های مبتنی بر شبکه U-Net، به دلیل قابلیت حفظ اطلاعات مکانی در سطوح عمیق شبکه، در وظایف بخش‌بندی تصویر و آشکارسازی دقیق تغییرات عملکردی برجسته داشته‌اند [۱۹ و ۲۱]. برای مثال، جاتوریبت و همکاران [۱۹] با استفاده از یک U-Net ساده در شناسایی تغییرات ساختمانی در مناطق شهری، دقتی در حدود ۹۵٪ گزارش کردند که توانایی این مدل در تمایز تغییرات واقعی از تغییرات فصلی را به‌خوبی نشان می‌دهد. همچنین، دو همکاران [۲۱] با ترکیب معماری U-Net و تبدیل‌کننده‌ها در قالب مدل TransUNet++SAR، موفق به استخراج بازنمایی‌های معنایی چندمقیاسی شدند که بهبود چشمگیری در شاخص‌های عملکرد نسبت به مدل‌های متعارف داشت.

این یافته‌ها بیانگر آن‌اند که ساختار رمزگذار-رمزگشای U-Net، که امکان مدل‌سازی دقیق روابط مکانی را فراهم می‌سازد، آن را به گزینه‌ای پرکاربرد و مؤثر در زمینه یادگیری نظارت‌شده تبدیل کرده است. با این حال، موفقیت این دسته از روش‌ها به‌شدت به دسترسی به داده‌های آموزشی باکیفیت و برچسب‌خورده وابسته است. همان‌گونه که در مطالعات [۳] و [۵] اشاره شده، کمبود داده‌های برچسب‌دار پژوهشگران را به سمت روش‌های شبه‌نظارتی یا یادگیری با نظارت ضعیف سوق داده است. به‌عنوان نمونه، نینگ و همکاران [۱۰] با بهره‌گیری از رمزگذارهای خودکار و خوشه‌بندی فازی، داده‌های آموزشی تقویت‌شده‌ای تولید کردند و نیاز به برچسب‌گذاری گسترده انسانی را کاهش دادند. چنین رویکردهایی تلاش دارند ضمن حفظ دقت بالا، وابستگی به داده‌های برچسب‌خورده را کاهش دهند.

در مقابل، روش‌های ترکیبی بدون نظارت نظیر تلفیق شبکه عصبی پیچشی با خوشه‌بندی فازی یا بهره‌گیری از شبکه‌های مولد متخاصم، توانسته‌اند بدون نیاز به داده‌های برچسب‌خورده، به دقتی نزدیک به ۹۹٪/۶ دست پیدا کنند [۲۹]. این دستاورد نشان می‌دهد که در شرایط کمبود داده‌های آموزشی، استفاده هوشمندانه از تکنیک‌های خوشه‌بندی و داده‌افزایی می‌تواند جایگزینی مؤثر برای مدل‌های نظارت‌شده باشد. اگرچه شبکه‌های بازگشتی به‌ویژه مدل‌های LSTM، پتانسیل بالایی در تحلیل الگوهای زمانی-مکانی دارند، اما به دلیل پیچیدگی محاسباتی بالا و نیاز به داده‌های سری زمانی متراکم، در عمل کاربرد محدودتری داشته و دقت آن‌ها نسبت به شبکه عصبی پیچشی یا U-Net کمتر گزارش شده است [۶].

در حوزه تلفیق داده‌ها، مدل‌هایی نظیر MSCDUNet که از ترکیب داده‌های راداری و نوری بهره می‌گیرند، به F1-Score معادل ۰/۹۳ دست یافته‌اند [۳۴] که بالاتر از بسیاری از روش‌های تک‌منبعی است. هرچند این ترکیب موجب ارتقای دقت شده، اما هزینه آن، افزایش پیچیدگی محاسباتی و نیاز به پیش‌پردازش‌های گسترده‌تر بوده است. از منظر زمان اجرا، روش‌های نظارت‌شده مبتنی بر معماری‌های پیچشی مانند CNN و U-Net به منابع پردازشی قابل‌توجهی در مرحله آموزش نیاز دارند، در حالی که مدل‌های بدون نظارت، علیرغم بهره‌گیری از فرایندهای خوشه‌بندی، معمولاً سریع‌تر اجرا می‌شوند و در سناریوهای بلادرنگ گزینه‌های مناسب‌تری محسوب می‌گردند. برای برخی الگوریتم‌ها مانند شبکه‌ی عصبی پرسپترون چند لایه، شبکه عصبی پیچشی و ترکیب خودرمزگذار با FCM، مقادیر عددی F1-Score گزارش نشده‌اند. این موضوع می‌تواند ناشی از اهداف متفاوت پژوهش‌ها باشد؛ از جمله طراحی مدل‌ها برای کاهش نویز یا استخراج ویژگی‌های میانی، یا نبود داده‌های مرجع برچسب‌دار. در بسیاری از این مطالعات، ارزیابی‌ها صرفاً بر پایه شاخص‌های کیفی، دقت کلی، یا معیارهای درونی خوشه‌بندی انجام گرفته و F1 به‌صورت مستقیم محاسبه نشده یا گزارش نشده است.

در جمع‌بندی، هر یک از مدل‌های پرکاربرد یادگیری عمیق دارای مزایا و محدودیت‌های خاص خود هستند:

- شبکه‌ی عصبی پرسپترون چند لایه به‌عنوان مدلی ساده، معمولاً برای داده‌های ساختاریافته مناسب است و در پردازش تصویر کاربری محدودی دارد.
- شبکه عصبی پیچشی با استفاده از فیلترهای محلی در شناسایی الگوهای مکانی مؤثر است و در کاربردهای طبقه‌بندی و آشکارسازی تغییرات عملکرد بالایی دارد.
- U-Net با ساختار متقارن و قابلیت حفظ اطلاعات مکانی در سطوح عمیق، در بخش‌بندی تغییرات عملکرد برجسته‌ای دارد.
- RNN و LSTM برای داده‌های زمانی مناسب‌اند و در ترکیب با شبکه عصبی پیچشی می‌توانند تحلیل زمانی-مکانی را تقویت کنند.

جدول ۳: مقایسه تطبیقی روش‌های یادگیری نظارت‌شده و بدون نظارت در آشکارسازی تغییرات مبتنی بر تصاویر راداری

Table 3: Comparative analysis of supervised and unsupervised learning methods for radar-based

ویژگی Feature	روش‌های یادگیری نظارت‌شده Supervised learning methods	روش‌های یادگیری بدون نظارت Unsupervised learning methods
نوع داده آموزشی مورد نیاز Type of training data required	نیازمند حجم قابل توجهی از داده‌های برچسب‌خورده با تنوع مناسب برای تعمیم‌پذیری مطلوب Requires a significant amount of labeled data with appropriate diversity for optimal generalizability	نیازمند داده‌های خام و بدون برچسب؛ مناسب در شرایط فاقد اطلاعات مرجع Requires raw, unlabeled data; suitable for situations without reference information
الزامات محاسباتی و پیچیدگی مدل Computational requirements and model complexity	وابسته به حجم داده، معماری شبکه و پارامترهای یادگیری؛ پیچیدگی محاسباتی بالا Dependent on data size, network architecture, and learning parameters; high computational complexity	به‌طور معمول سبک‌تر و سریع‌تر؛ مناسب برای سناریوهای بلادرنگ و منابع محدود Typically lighter and faster; suitable for real-time and resource-constrained scenarios
سرعت پردازش و زمان اجرا Processing speed and execution time	فرآیند آموزش کندتر، اما نتایج دقیق‌تر در صورت آموزش مناسب Slower training process, but more accurate results if trained properly	اجرای سریع‌تر به دلیل حذف مرحله یادگیری با داده برچسب‌دار Faster execution due to elimination of the learning step with labeled data
دقت شناسایی تغییرات Accuracy of change detection	عملکرد بالا در صورت وجود داده‌های آموزشی غنی؛ F1-score تا ۰/۹۵ گزارش شده است [۱۹] High performance when rich training data is available; F1-scores up to 0.95 have been reported [19]	عملکرد وابسته به کیفیت الگوریتم‌های خوشه‌بندی؛ F1-score بین ۰/۷۰ تا ۰/۹۰ [۲۵ و ۲۶] Performance dependent on the quality of clustering algorithms; F1-score between 0.70 and 0.90 [25, 26]
معماری‌های متداول Common architectures	روش‌های MLP، CNN، U-Net، U-Net، CNN، MLP methods	CNN با FCM، Autoencoder با FCM، GAN-based networks
چالش‌های اصلی Main challenges	هزینه بالای تهیه داده‌های برچسب‌خورده، حساسیت به کیفیت داده آموزشی High cost of labeled data acquisition, sensitive to training data quality	حساسیت بالا به نویز لکه‌ای، دشواری در تفکیک دقیق تغییرات در غیاب داده مرجع High sensitivity to speckle noise, difficulty in accurately distinguishing changes in the absence of reference data
انعطاف‌پذیری در شرایط فاقد داده مرجع Flexibility in situations without reference data	محدود به کیفیت و تنوع داده‌های آموزشی اولیه Limited to the quality and diversity of the initial training data	انعطاف‌پذیرتر برای داده‌های جدید و ناشناخته بدون نیاز به برچسب‌گذاری More flexible for new and unknown data without the need for labeling
کاربردهای شاخص Indicator applications	پایش توسعه شهری، شناسایی جنگل‌زدایی، مدیریت بلایای طبیعی Urban development monitoring, deforestation detection, natural disaster management [7, 8, 19, 21]	پایش زیست‌محیطی مناطق دورافتاده، تحلیل تغییرات تدریجی در سری‌های زمانی [۲۵، ۲۷ و ۲۹] Remote environmental monitoring, analysis of gradual changes in time series [25, 27, 29]
شاخص‌های عملکرد گزارش‌شده Reported performance indicators	دقت تا ۹۵٪ با U-Net؛ F1-score در محدوده ۸۵٪ تا ۹۳٪ در داده‌های SAR [۱۹ و ۳۴]؛ کارایی ۶۶٪ با MLP در پایش جنگل [۷] Accuracy up to 95% with U-Net; F1-scores in the range of 0.85 to 0.93 on SAR data [19, 34]; Kappa of 66% with MLP in forest monitoring [7]	دقت تا ۹۹/۶٪ در مدل FCM+GAN برای پیکسل‌محور؛ F1-score تا ۹۰٪ بسته به کیفیت خوشه‌بندی [۲۵، ۲۶ و ۲۹] Accuracy up to 99.6% in the FCM+GAN model for pixel-based; F1-score up to 0.90 depending on the quality of clustering [25, 26, 29]

– تأثیر داده‌های چندمنبعی در بهبود دقت مدل‌ها

در شرایطی که داده‌های برچسب‌دار محدود یا غیرقابل دسترس هستند، روش‌های بدون نظارت، به‌ویژه آن‌هایی که از ترکیب خوشه‌بندی فازی و شبکه‌های عصبی پیچشی بهره می‌برند، انعطاف‌پذیری بالایی ارائه می‌دهند [۲۵ و ۲۹]. گانگ و همکاران [۲۵] با به‌کارگیری رمزگذار خودکار پراکنده به همراه الگوریتم خوشه‌بندی فازی، برچسب‌های شبه‌نظارتی تولید کردند که در آموزش شبکه پیچشی به‌کار رفت و منجر به دقتی قابل قبول در شناسایی تغییرات شد. همچنین، ژنگ و همکاران [۲۹] با بهره‌گیری از خوشه‌بندی دومرحله‌ای خوشه‌بندی فازی و شبکه مولد متخاصم برای داده‌افزایی، به دقتی در حدود ۹۹/۶٪ دست یافتند که کارایی بالای این روش‌ها در تولید داده‌های آموزشی معتبر را نشان می‌دهد.

این نتایج نشان می‌دهد که الگوریتم FCM به‌عنوان یک ابزار کلیدی در یادگیری بدون نظارت، امکان استخراج بازنمایی‌های معنایی از تصاویر را

بدون نیاز به برچسب‌گذاری دستی فراهم می‌سازد. با این حال، دقت نهایی این روش‌ها به کیفیت خوشه‌بندی اولیه وابسته است و اغلب تحت تأثیر نویزهای لکه‌ای موجود در تصاویر راداری قرار می‌گیرد [۲۶ و ۳۰]. برای نمونه، کوئی و همکاران [۲۶] نشان دادند که هرچند استراتژی‌های گروهی مبتنی بر خوشه‌بندی فازی توانسته‌اند نمونه‌های آموزشی با اطمینان بالا تولید کنند، اما نویزهای ذاتی تصویر باعث کاهش دقت خوشه‌بندی شده‌اند. این چالش‌ها بیانگر آن است که بهبود تکنیک‌های پیش‌پردازش، مانند حذف نویز و افزایش کیفیت تصویر ورودی، برای ارتقای عملکرد مدل‌های بدون نظارت ضروری است.

– چالش‌های عملیاتی و مسیرهای آتی پژوهش

در بررسی روش‌های یادگیری عمیق برای آشکارسازی تغییرات در تصاویر راداری، مجموعه‌ای از چالش‌های فناورانه، داده‌ای و مفهومی دیده می‌شود که موجب به‌کارگیری گسترده این روش‌ها در کاربردهای

می‌تواند در پایش بلایای طبیعی، جنگل‌زدایی، توسعه شهری و مدیریت منابع، نقش مؤثری ایفا کند [۷ و ۳۴]. با این حال، تحقق این ظرفیت‌ها مستلزم رفع چالش‌هایی نظیر کمبود داده‌های استاندارد، توسعه الگوریتم‌های مقیاس‌پذیر و بهینه‌سازی زیرساخت‌های محاسباتی است. از منظر نظری، برتری نسبی برخی معماری‌ها نظیر U-Net با تبدیل‌کننده‌ها [۲۱] یا مدل‌های بدون نظارت مبتنی بر شبکه‌های مولد متخاصم [۲۹]، چشم‌اندازهای نوینی برای طراحی ساختارهای پیشرفته‌تر فراهم کرده‌اند. به‌طور کلی، آینده این حوزه در گرو پیوند میان پیشرفت‌های فناوریانه، دسترسی به داده‌های غنی، و همکاری‌های میان‌رشته‌ای میان علوم داده، سنجش از دور و سیاست‌گذاری محیطی خواهد بود. با اتکا به همین مرور نظام‌مند و با استفاده از یافته‌های آن، می‌توان جهت‌گیری‌های کلیدی پژوهش‌های آتی را نیز بر پایه ادبیات موجود، به شرح زیر ترسیم کرد:

نخست، مطابق با مطالعات اخیر [۳۶ و ۳۷]، توسعه روش‌های یادگیری خودنظارت‌شده و بدون نظارت پیشرفته به‌عنوان پاسخی به کمبود داده‌های برجسب‌دار ضروری است. روش‌هایی که از ساختار داده‌های بدون برجسب برای یادگیری ویژگی‌های معنایی استفاده می‌کنند، به‌ویژه با بهره‌گیری از یادگیری کنتراستی یا خوشه‌بندی پویا، می‌توانند تعمیم‌پذیری مدل‌ها را افزایش دهند. در این راستا، مدل‌های مبتنی بر تبدیل‌کننده‌های خودنظارتی در شناسایی تغییرات پیچیده در تصاویر SAR کنویدبک‌بخش بوده‌اند.

دوم، در پی پژوهش‌هایی مانند [۳۸ و ۳۹]، ادغام داده‌های چندمنبعی مانند راداری، اپتیک و LiDAR می‌تواند موجب افزایش دقت شناسایی تغییرات شود. توسعه روش‌هایی که ناهماهنگی‌های زمانی، مکانی و رزولوشنی میان این منابع را به‌صورت خودکار مدیریت کنند، حیاتی است [۳۸]. چارچوب‌های یادگیری عمیق چندوجهی (Multimodal) برای استخراج ویژگی‌های مشترک از داده‌های ناهمگن، به‌ویژه در کاربردهایی چون پایش بلایای طبیعی، کارایی بالایی دارند [۳۹].

سوم، بهبود روش‌های کاهش نویز لکه‌ای در تصاویر راداری همچنان یک ضرورت فنی محسوب می‌شود. گسترش شبکه‌هایی نظیر FFDNet یا PCA-Net با هدف حذف نویز، می‌تواند دقت شناسایی تغییرات را به‌ویژه در مناطق با پوشش همگن یا پیچیده افزایش دهد [۴۰]. همچنین بهره‌گیری از یادگیری انتقالی با استفاده از مدل‌های پیش‌آموزش‌دیده، رویکردی مکمل در کاهش نویز محسوب می‌شود [۴۱].

چهارم، توسعه معماری‌های سبک و مقیاس‌پذیر، متناسب با داده‌های تولیدی توسط ماهواره‌های نسل جدید مانند سنتینل-۱، اهمیت روزافزونی دارد. طراحی نسخه‌های بهینه‌شده U-Net یا تبدیل‌کننده‌های کم‌حجم، اجرای این مدل‌ها را در سیستم‌های تعبیه‌شده یا منابع پردازشی محدود ممکن می‌سازد [۴۲].

پنجم، ایجاد مجموعه‌داده‌های مرجع و عمومی با کیفیت بالا، گامی کلیدی برای استانداردسازی ارزیابی عملکرد الگوریتم‌هاست. نبود چنین منابعی، مقایسه منصفانه بین روش‌ها را دشوار ساخته و مانع شفافیت

عملی می‌شوند و افق‌های جدیدی نیز برای توسعه پژوهش‌های آینده ترسیم می‌کنند.

یکی از چالش‌های بنیادی در پردازش تصاویر SAR، نویز لکه‌ای (Speckle Noise) است که ناشی از ماهیت چندبخشی امواج راداری بوده و منجر به کاهش نسبت سیگنال به نویز (SNR) و تضعیف کیفیت بصری تصاویر می‌شود [۳ و ۱۲]. برای مقابله با این چالش، الگوریتم‌هایی همچون FFDNet و PCA-Net توسعه یافته‌اند که با هدف بهبود کیفیت تصویر، دقت مدل‌های آشکارسازی تغییرات را نیز ارتقاء داده‌اند. به‌طور خاص، هونگکه و همکاران [۱۲] با به‌کارگیری FFDNet موفق شدند تعادلی میان حذف مؤثر نویز و سرعت استنتاج برقرار کنند؛ قابلیت‌های برای کاربردهای بلادرنج نظیر پایش سریع مناطق حادثه‌خیز از اهمیت بالایی برخوردار است. همچنین، مدل PCA-Net با بهره‌گیری از تجزیه مؤلفه‌های اصلی، توانسته است در تقویت سیگنال‌های مهم و تضعیف مؤلفه‌های نویزی مؤثر واقع شود [۱۶]. با این حال، در شرایط پیچیده‌تر مانند مناطق با بافت متراکم یا تغییرات ناهمگن، همچنان نیاز به توسعه مدل‌های مقاوم‌تر و تطبیق‌پذیرتر احساس می‌شود.

از سوی دیگر، ادغام داده‌های چندمنبعی به‌ویژه ترکیب تصاویر راداری و نوری، به‌عنوان یکی از مهم‌ترین یافته‌های این مرور شناخته می‌شود. مطالعاتی نظیر پژوهش لی و همکاران [۳۴] با معرفی مدل MSCDUNet نشان داده‌اند که بهره‌گیری هم‌زمان از تصاویر SAR، چندطیفی و VHR، می‌تواند به ارتقای چشمگیر دقت منجر شود؛ به‌طوری‌که در این مدل، F1-score معادل ۹۳٪ به‌دست آمده است. مزیت اصلی این ادغام، بهره‌برداری از ویژگی‌های مکمل داده‌ها و جبران محدودیت‌های ذاتی هر منبع است، مانند کاهش اثر نویز در تصاویر SAR یا پوشش ابری در تصاویر نوری. با این حال، چالش‌هایی نظیر ناهماهنگی زمانی و مکانی میان منابع، پیچیدگی پیش‌پردازش، افزایش بار محاسباتی و کمبود داده‌های مرجع استاندارد، همچنان مانعی برای بهره‌برداری کامل از این رویکرد محسوب می‌شوند [۳۳ و ۳۴].

مقایسه میان روش‌های نظارت‌شده و بدون نظارت نیز حاکی از مزایا و محدودیت‌های خاص هر رویکرد است. روش‌های نظارت‌شده مبتنی بر معماری‌هایی نظیر U-Net در صورت دسترسی به داده‌های برجسب‌خورده کافی، از دقت و پایداری بالایی برخوردارند [۱۹ و ۲۱]، اما هزینه تهیه این داده‌ها و وابستگی به کیفیت آن‌ها، کاربرد آن‌ها را در بسیاری از سناریوهای واقعی محدود می‌کند. در مقابل، روش‌های بدون نظارت با وجود انعطاف‌پذیری بیشتر در شرایط فاقد داده مرجع، نسبت به نویز و کیفیت خوشه‌بندی حساس‌اند [۲۵ و ۲۹]. رویکردهای ترکیبی مانند یادگیری با نظارت ضعیف یا شبه‌نظارتی که در پژوهش‌هایی مانند [۵] و [۱۰] ارائه شده‌اند، می‌کوشند مزایای هر دو گروه را در قالبی یکپارچه تلفیق کنند.

یافته‌های این مطالعه پیامدهای کاربردی و نظری مهمی برای آینده حوزه آشکارسازی تغییرات مبتنی بر یادگیری عمیق دارد. از منظر کاربردی، توانایی مدل‌های یادگیری عمیق در شناسایی دقیق تغییرات

نویز لکه‌ای (Speckle Noise) به‌عنوان یک چالش ساختاری در تصاویر راداری، عاملی اثرگذار در عملکرد تمامی رویکردها محسوب می‌شود. اگرچه الگوریتم‌هایی چون FFDNet و PCA-Net تا حدی توانسته‌اند تعادلی میان حذف نویز و حفظ جزئیات مکانی برقرار کنند، اما نیاز به مدل‌هایی با توانایی بالاتر در تطبیق با پیچیدگی‌های محتوایی، مانند تغییرات ناهمگن یا بافت‌های متراکم، همچنان پابرجاست. در همین راستا، بهره‌گیری از تکنیک‌های یادگیری انتقالی و مدل‌های پیش‌آموزش‌دیده، می‌تواند در کاهش نویز و تقویت قابلیت تعمیم مدل‌ها مؤثر واقع شود.

از منظر راهبردی، ادغام داده‌های چندمنبعی، به‌ویژه ترکیب تصاویر راداری، نوری و چندطیفی، به‌عنوان یکی از مسیرهای نویدبخش در افزایش دقت شناسایی تغییرات شناسایی شده است. معماری‌هایی مانند MSCDUNet با بهره‌گیری از ویژگی‌های مکمل منابع مختلف و همجوشی اطلاعات طیفی و ساختاری، توانسته‌اند F1-scoreهایی تا ۹۳٪ کسب کنند. با این حال، چالش‌هایی نظیر ناهم‌آهنگی زمانی و مکانی میان منابع، پیچیدگی فرآیندهای پیش‌پردازش، افزایش بار محاسباتی و کمبود داده‌های مرجع عمومی و استاندارد، مانع از بهره‌برداری کامل از این ظرفیت شده‌اند.

بررسی تطبیقی میان رویکردهای گوناگون نشان می‌دهد که هیچ‌یک به‌تنهایی پاسخ‌گوی همه سناریوهای عملیاتی نیست. انتخاب روش مناسب، باید با توجه به ماهیت داده، هدف کاربردی، محدودیت‌های محاسباتی و سطح مورد انتظار از دقت و تعمیم‌پذیری صورت گیرد. در سطح کاربردی، یادگیری عمیق قابلیت آن را دارد که در بهبود تصمیم‌گیری در حوزه‌هایی چون مدیریت منابع طبیعی، پایش محیط‌زیست، تحلیل بلایای طبیعی، و برنامه‌ریزی شهری، نقشی تعیین‌کننده ایفا کند. در سطح نظری نیز، توسعه معماری‌های ترکیبی، با بهره‌گیری هم‌زمان از مزایای مدل‌های مبتنی بر U-Net، تبدیل‌کننده‌ها (Transformers)، خوشه‌بندی فازی و GAN، همراه با روش‌های یادگیری انتقالی، چندشانی و خودنظارتی، افق اصلی پژوهش‌های پیش‌رو خواهد بود.

در مجموع، مرور حاضر با ترسیم وضعیت موجود و شناسایی چالش‌ها و ظرفیت‌های موجود، مسیر آینده این حوزه را به‌سوی مدل‌های یادگیری هوشمند، مقاوم، مقیاس‌پذیر و مبتنی بر داده‌های چندمنبعی هدایت می‌کند. تحقق این مسیر، مستلزم توسعه الگوریتم‌های مقاوم به نویز، طراحی چارچوب‌های همجوشی پیشرفته، بهینه‌سازی منابع محاسباتی، و ایجاد زیرساخت‌های داده‌ای استاندارد و قابل اشتراک است. پیوند میان پیشرفت‌های فناوریانه، دسترسی به داده‌های غنی، و هم‌افزایی میان‌رشته‌ای میان علوم داده، سنجش از دور و سیاست‌گذاری محیطی، عامل تعیین‌کننده در تحقق این چشم‌انداز خواهد بود.

مشارکت نویسندگان

میزان مشارکت نویسندگان در نگارش مقاله بطور یکسان است.

پیشرفت‌ها شده است. مجموعه داده‌های جامع و برچسب‌دار با پوشش سناریوهای مختلف، مبنای توسعه قابل اعتماد مدل‌های آینده خواهد بود [۴۳].

در نهایت، کاربرد یادگیری عمیق در تحلیل سری‌های زمانی راداری، به‌ویژه برای مدل‌سازی پدیده‌های پویایی چون جنگل‌زدایی تدریجی یا نوسانات سطح آب، نیازمند مدل‌هایی با توانایی درک وابستگی‌های زمانی-مکانی است. بهره‌گیری از شبکه‌های بازگشتی یا تبدیل‌کننده‌های زمانی (Temporal Transformers) در این زمینه می‌تواند به تقویت دقت تحلیل‌های سری زمانی کمک کند [۴۴].

تمرکز پژوهش‌های آتی بر این محورهای راهبردی، زمینه را برای توسعه مدل‌های مقاوم‌تر، انعطاف‌پذیرتر و قابل‌اعتمادتر در شناسایی تغییرات زمین فراهم می‌سازد و می‌تواند کاربرد عملی سنجش از دور را در مدیریت منابع، پایش محیط‌زیست و برنامه‌ریزی شهری به‌طور معناداری ارتقاء دهد.

نتیجه‌گیری

مرور حاضر نشان داد که طی دهه گذشته، بهره‌گیری از یادگیری عمیق در حوزه شناسایی تغییرات در تصاویر سنجش از دور، به‌ویژه داده‌های راداری، تحولی بنیادین در دقت، انعطاف‌پذیری و گستره کاربردهای عملیاتی این حوزه ایجاد کرده است. الگوریتم‌های یادگیری عمیق با توانایی در استخراج ویژگی‌های پیچیده و معنایی، قابلیت تمایز بهتر میان تغییرات واقعی و نویز یا نوسانات غیرمعنادار را فراهم ساخته‌اند. در این میان، روش‌های نظارت‌شده و به‌ویژه معماری‌هایی نظیر U-Net، به‌واسطه توانمندی بالا در حفظ اطلاعات فضایی و بازسازی دقیق ساختارهای تغییر یافته، عملکردی ممتاز در کاربردهایی چون پایش توسعه شهری، جنگل‌زدایی و رخدادهای طبیعی نشان داده‌اند. در برخی پژوهش‌ها، دقتی تا ۹۵٪ و F1-score بالای ۰/۹ گزارش شده است. با این حال، اتکای شدید این روش‌ها به داده‌های برچسب‌خورده، همراه با هزینه و دشواری تولید این نوع داده‌ها، یکی از موانع اصلی در گسترش عملی آن‌ها محسوب می‌شود.

برای مقابله با این چالش، رویکردهایی مانند یادگیری نظارت‌ضعیف، شبه‌نظارتی و خودنظارتی معرفی شده‌اند که تلاش دارند با بهره‌گیری از ساختار درونی داده‌ها و تکیه بر تکنیک‌هایی نظیر یادگیری کنتراستی یا رمزگذارهای خودکار، کارایی مدل‌ها را بدون نیاز کامل به برچسب انسانی حفظ کنند. در سوی دیگر، روش‌های بدون نظارت نیز از طریق ترکیب شبکه‌های پیچشی (CNN) با خوشه‌بندی فازی (FCM)، یا به‌کارگیری شبکه‌های مولد متخاصم (GAN)، به‌ویژه در شرایط فاقد داده‌های آموزشی، گزینه‌های عملیاتی قابل اتکایی ارائه داده‌اند. برخی پژوهش‌ها دقت‌هایی تا ۹۹/۶٪ برای این دسته از روش‌ها گزارش کرده‌اند. با این حال، وابستگی به خوشه‌بندی اولیه، حساسیت به نویز، و چالش در پایایی و تعمیم‌پذیری، همچنان محدودیت‌های کلیدی در این گروه از الگوریتم‌ها به شمار می‌رود.

[11] Mbaye M, Ngom N, Faye G, Baratoux D. Change detection and machine learning approach for mapping artisanal small-scale gold mining using C-band SAR and Google Earth Engine. 2021;GC24A-06.

[12] Duan H, Dong X, You S, Han S. A deep learning denoising framework based on FFDNet for SAR image change detection. In: ICEIEC 2021 - IEEE Int Conf Electron Inf Emerg Commun; 2021 Jun. p. 1–4. doi:10.1109/ICEIEC51955.2021.9463810.

[13] Zhang K, Zuo W, Zhang L. FFDNet: Toward a fast and flexible solution for CNN based image denoising. IEEE Trans Image Process. 2018;27(9):4608–22. doi:10.1109/TIP.2018.2839891.

[14] Wang R, Zhang J, Chen J, Jiao L, Wang M. Imbalanced learning-based automatic SAR images change detection by morphologically supervised PCA-Net. IEEE Geosci Remote Sens Lett. 2019;16(4):554–8. doi:10.1109/LGRS.2018.2878420.

[15] Chan T-H, Jia K, Gao S, Lu J, Zeng Z, Ma Y. PCANet: A simple deep learning baseline for image classification?. IEEE Trans Image Process. 2015;24(12):5017–32. doi:10.1109/TIP.2015.2475625.

[16] Gao Y, Gao F, Dong J, Du Q, Li H-C. Synthetic aperture radar image change detection via Siamese adaptive fusion network. IEEE J Sel Top Appl Earth Obs Remote Sens. 2021;14:10748–60. doi:10.1109/JSTARS.2021.3120381.

[17] Peng J, et al. A parallel change detection method for spatiotemporally multi-temporal SAR image based on Q-learning and wavelet. In: 14th Int Conf Digital Image Process (ICDIP 2022); 2022 Oct. p. 1078–91. doi:10.1117/12.2644622.

[18] Sun X, Wang B, Wang Z, Li H, Li H, Fu K. Research progress on few-shot learning for remote sensing image interpretation. IEEE J Sel Top Appl Earth Obs Remote Sens. 2021;14:2387–402. doi:10.1109/JSTARS.2021.3052869.

[19] Jaturapitpornchai R, Matsuoka M, Kanemoto N, Kuzuoka S, Ito R, Nakamura R. SAR-image based urban change detection in Bangkok, Thailand using deep learning. In: IGARSS 2019; 2019 Jul. p. 7403–6. doi:10.1109/IGARSS.2019.8899341.

[20] Askevold R, Vågen M. Automated mapping and change detection of rivers and inland water bodies by semantic segmentation of SAR imagery using deep learning [Master's thesis]. NTNU; 2022 [cited 2024 Apr 16].

[21] Du Z, Li X, Miao J, Huang Y, Shen H, Zhang L. Concatenated deep-learning framework for multitask change detection of optical and SAR images. IEEE J Sel Top Appl Earth Obs Remote Sens. 2024;17:719–31. doi:10.1109/JSTARS.2023.3333959.

[22] Murdaca G, Ricciuti F, Rucci A, Le Saux B, Fumagalli A, Prati C. A semi-supervised deep learning framework for change detection in open-pit mines using SAR imagery. Remote Sens. 2023;15(24):Article 24. doi:10.3390/rs15245664.

[23] Wang C, Su W, Gu H. SAR image change detection based on semisupervised learning and two-step training. IEEE Geosci Remote Sens Lett. 2022;19:1–5. doi:10.1109/LGRS.2021.3050746.

تشکر و قدردانی

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

تعارض منافع

«هیچ‌گونه تعارض منافع توسط نویسندگان بیان نشده است».

منابع و مآخذ

[1] Parelius EJ. A review of deep-learning methods for change detection in multispectral remote sensing images. Remote Sens. 2023;15(8). doi:10.3390/rs15082092.

[2] Cheng G, et al. Change detection methods for remote sensing in the last decade: A comprehensive review. arXiv Preprint arXiv:2305.05813. 2023.

[3] Wang R, Wang W, Dong P, Haojiang W, Jiao L, Chen JW. SAR image change detection via a few-shot learning-based neural network. In: IGARSS 2021 - IEEE Int Geosci Remote Sens Symp; 2021 Jul. p. 5287–90. doi:10.1109/IGARSS47720.2021.9554705.

[4] Khan SH, He X, Porikli F, Bennamoun M. Forest change detection in incomplete satellite images with deep neural networks. IEEE Trans Geosci Remote Sens. 2017;55(9):5407–23.

[5] Hou X, et al. Deep collaborative learning with class-rebalancing for semi-supervised change detection in SAR images. Knowl Based Syst. 2023;264:110281. doi:10.1016/j.knosys.2023.110281.

[6] Neagoe V-E, Ciotec A-D, Bruzzone L. A weakly-supervised change detection technique for SAR images based on deep learning and synthetic training data generated by an ensemble of self-organizing maps. In: IGARSS 2019 - IEEE Int Geosci Remote Sens Symp; 2019 Jul. p. 1669–72. doi:10.1109/IGARSS.2019.8898344.

[7] Barreto TLM, Rosa RAS, Wimmer C, Nogueira JB, Almeida J, Cappabianco FAM. Deforestation change detection using high-resolution multi-temporal X-band SAR images and supervised learning classification. In: IGARSS 2016 - IEEE Int Geosci Remote Sens Symp; 2016 Jul. p. 5201–4. doi:10.1109/IGARSS.2016.7730355.

[8] Liu J, Gong M, Zhao J, Li H, Jiao L. Difference representation learning using stacked restricted Boltzmann machines for change detection in SAR images. Soft Comput. 2016;20(12):4645–57. doi:10.1007/s00500-014-1460-0.

[9] De S, Pirrone D, Bovolo F, Bruzzone L, Bhattacharya A. A novel change detection framework based on deep learning for the analysis of multi-temporal polarimetric SAR images. In: IGARSS 2017; 2017 Jul. p. 5193–6. doi:10.1109/IGARSS.2017.8128171.

[10] Lv N, Chen C, Qiu T, Sangaiah AK. Deep learning and superpixel feature extraction based on contractive autoencoder for change detection in SAR images. IEEE Trans Ind Inform. 2018;14(12):5530–8. doi:10.1109/TII.2018.2873492.

survey [Preprint]. arXiv:2410.07824 [cs.CV]. 2024 [cited 2025 Jun 12]. <https://doi.org/10.48550/arXiv.2410.07824>

[38] Shafique A, Cao G, Khan Z, Asad M, Aslam M. Deep learning-based change detection in remote sensing images: A review. *Remote Sens.* 2022;14(4):871. doi:10.3390/rs14040871.

[39] Wang L, Zhang M, Gao X, Shi W. Advances and challenges in deep learning-based change detection for remote sensing images: A review through various learning paradigms. *Remote Sens.* 2024;16(5):804. doi:10.3390/rs16050804.

[40] Gao F, Wang X, Gao Y, Dong J, et al. Sea ice change detection in SAR images based on convolutional-wavelet neural networks. *IEEE Geosci Remote Sens Lett.* 2019;PP(99):1–5. doi:10.1109/LGRS.2019.2895656.

[41] Chen H, Jiao L, Liang M, Liu F, Yang S, Hou B. Fast unsupervised deep fusion network for change detection of multitemporal SAR images. *Neurocomputing.* 2019 Mar 7;332:56–70.

[42] Khelifi L, Mignotte M. Deep learning for change detection in remote sensing images: Comprehensive review and meta-analysis. *IEEE Access.* 2020;PP(99):1. doi:10.1109/ACCESS.2020.3008036.

[43] Shi W, Zhang M, Zhang R, Chen S, Zhan Z. Change detection based on artificial intelligence: state-of-the-art and challenges. *Remote Sens.* 2020;12(10):1688. doi:10.3390/rs12101688.

[44] Gong M, Zhao J, Liu J, Miao Q, Jiao L. Change detection in synthetic aperture radar images based on deep neural networks. *IEEE Trans Neural Netw Learn Syst.* 2016;27(1):125–38. doi:10.1109/TNNLS.2015.2435783.

[24] Alatalo J, Sipola T, Rantonen M. Improved difference images for change detection classifiers in SAR imagery using deep learning. *IEEE Trans Geosci Remote Sens.* 2023;61:1–14. doi:10.1109/TGRS.2023.3324994.

[25] Gong M, Yang H, Zhang P. Feature learning and change feature classification based on deep learning for ternary change detection in SAR images. *ISPRS J Photogramm Remote Sens.* 2017;129:212–25. doi:10.1016/j.isprsjprs.2017.05.001.

[26] Cui B, Zhang Y, Yan L, Wei J, Wu H. An unsupervised SAR change detection method based on stochastic subspace ensemble learning. *Remote Sens.* 2019;11(11):Article 11. doi:10.3390/rs11111314.

[27] Meng W, Wang L, Du A, Li Y. SAR image change detection based on data optimization and self-supervised learning. *IEEE Access.* 2020;8:217290–305. doi:10.1109/ACCESS.2020.3042017.

[28] Zhang X, et al. Two-phase object-based deep learning for multi-temporal SAR image change detection. *Remote Sens.* 2020;12(3):Article 3. doi:10.3390/rs12030548.

[29] Robust unsupervised small area change detection from SAR imagery using deep learning. *ISPRS J Photogramm Remote Sens.* 2021;173:79–94. doi:10.1016/j.isprsjprs.2021.01.004.

[30] Ghosh C, Majumdar D, Mondal B. A deep learning-based SAR image change detection using spatial intuitionistic fuzzy C-means clustering. *Trans GIS.* 2022;26(6):2519–35. doi:10.1111/tgis.12966.

[31] Keshk HM, Yin X-C. Change detection in SAR images based on deep learning. *Int J Aeronaut Space Sci.* 2020;21(2):549–59. doi:10.1007/s42405-019-00222-0.

[32] Dong H, et al. A contrastive learning transformer for change detection in high-resolution SAR images. *SSRN [Preprint].* 2022 Jul 22. doi:10.2139/ssrn.4169439.

[33] Zhang J. Multi-source remote sensing data fusion: status and trends. *Int J Image Data Fusion.* 2010;1(1):5–24. doi:10.1080/19479830903561035.

[34] Li H, Zhu F, Zheng X, Liu M, Chen G. MSCDUNet: A deep learning framework for built-up area change detection integrating multispectral, SAR, and VHR data. *IEEE J Sel Top Appl Earth Obs Remote Sens.* 2022;15:5163–76. doi:10.1109/JSTARS.2022.3181155.

[35] Zhou Z, Siddiquee MMR, Tajbakhsh N, Liang J. UNet++: A nested U-Net architecture for medical image segmentation. *arXiv [Preprint].* 2018 Jul 18. doi:10.48550/arXiv.1807.10165.

[36] Cheng G, Huang Y, Li X, Lyu S, Xu Z, Zhao H, Zhao Q, Xiang S. Change detection methods for remote sensing in the last decade: A comprehensive review. *Remote Sens.* 2024;16(13):2355. doi:10.3390/rs16132355.

[37] Yu Z, Li T, Zhu Y, Pan R. Exploring foundation models in remote sensing image change detection: A comprehensive

معرفی نویسندگان

AUTHORS BIOSKETCHES



محمد رضا زرگر فارغ التحصیل کارشناسی ارشد در رشته مهندسی نقشه‌برداری - سنجش از دور می‌باشد. ایشان مدرک کارشناسی و کارشناسی ارشد خود را در رشته مهندسی نقشه‌برداری به ترتیب در سال‌های ۱۳۹۹ و ۱۴۰۲ از دانشگاه تهران دریافت نمودند.

Zargar, M.R. M.Sc. in Surveying and Geospatial Engineering, College of Engineering, University of Tehran, Tehran, Iran

✉ Zargar.mr@ut.ac.ir



امیر آقابالائی مدرک کارشناسی خود را در رشته مهندسی نقشه‌برداری در سال ۱۳۸۹ از دانشگاه تهران و مدارک کارشناسی ارشد و دکتری خود را در رشته سنجش از دور به ترتیب در سال‌های ۱۳۹۴ و ۱۳۹۹ از دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی دریافت کرد.

Khazai, S. Associate Professor, Imam Hossein Comprehensive University, Tehran, Iran

✉ Skhazai@ihu.ac.ir



علی مهتدی فارغ التحصیل کارشناسی ارشد در رشته مهندسی نقشه برداری گرایش سنجش از دور می باشد. ایشان مدرک کارشناسی خود را از دانشگاه صنعتی جندی شاپور دزفول و کارشناسی ارشد خود را از موسسه آموزش عالی حکمت قم سال ۱۴۰۳ دریافت کردند. سابقه پژوهشی ایشان یک مقاله ژورنالی و دو مقاله کنفرانسی است.

Mohtadi, A. M.Sc. in Remote Sensing, Hekmat Higher Educational Institution, Qom, Iran

✉ Mohtadi1375@gmail.com

علاقه اصلی تحقیقاتی او پردازش و تجزیه و تحلیل داده و تصاویر سنجش از دوری است.

Aghabalaee, A. Assistant Professor, Imam Hossein Comprehensive University, Tehran, Iran

✉ Remotesensing@ihu.ac.ir



صفا خزائی مدرک کارشناسی خود را در رشته مهندسی نقشه برداری و ژئوماتیک در سال ۱۳۷۸ از دانشگاه امام حسین (ع) و مدارک کارشناسی ارشد و دکتری خود در رشته فتوگرامتری و سنجش از دور را به ترتیب در سال های ۱۳۸۱ و ۱۳۹۱ از دانشگاه تهران دریافت کرد. علاقه اصلی تحقیقاتی او شامل تشخیص ناهنجاری و هدف در تصاویر فرایطیفی و شبیه سازی تصاویر فرایطیفی است.

Citation (Vancouver): Zargar M.R, Aghabalaee A, Khazai S, Mohtadi A. [A Systematic Review of Machine Learning Methods for Change Detection in Radar and Optical Images with a Focus on Deep Learning]. *J. RS. GEOINF. RES.* 2025; 3(2): 235-256

doi <https://doi.org/10.22061/jrsgr.2025.12190.1104>



COPYRIGHTS

© 2025 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/>)



ORIGINAL RESEARCH PAPER

Multi-objective optimization of CCTV camera placement using artificial intelligence algorithms

H. Sanei arani¹, M. Esmaeili^{1,2}, M. Afshar kazimi³¹ Department of Information Technology Management, Faculty of Management and Economics, Science and Research branch-Islamic Azad University, Tehran, Iran² Department of Computer Engineering, Kashan Branch-Islamic Azad University, Kashan, Iran³ Department of Industrial Management, Faculty of Management and Accounting, Central Tehran branch- Islamic Azad University, Tehran, Iran

ABSTRACT

Received: 28 April 2025
 Reviewed: 02 June 2025
 Revised: 11 July 2025
 Accepted: 23 August 2025

KEYWORDS:

CCTV Camera Placement
 Multi-Objective Optimization
 Intelligent Routing
 Q Learning Algorithm
 Video Surveillance System

* Corresponding author

✉ mesmaeili@iaau.ac.ir

☎ (+98913) 3612834

Background and Objectives: Optimizing the placement of surveillance cameras is a fundamental component of intelligent urban traffic management systems. Proper camera deployment significantly enhances traffic monitoring accuracy and reduces incident detection time. As a result, the problem of optimal camera placement has long been a research challenge for many scholars. Modern approaches employ multi-objective optimization methods to enable simultaneous analysis of various influential parameters. Despite significant advancements in optimization techniques, current methods rely on 2D and 3D grid-based modeling of the study area, which faces major limitations in complex urban environments. In these methods, the space is divided into a regular grid, and optimal camera locations are selected with appropriate angular rotation. However, in real urban topologies, road networks consist of nested and irregular paths, causing many computed points to fall outside accessible routes. This mismatch between theoretical models and practical conditions severely undermines the effectiveness of traditional methods. Given these limitations, developing a new framework that simultaneously considers real urban topologies, physical constraints, and urban planning requirements has become essential. New methods must integrate actual traffic routes, permissible camera installation points, and mandatory angle adjustments into their models. This requires using realistic virtual traffic data and applying artificial intelligence algorithms for optimization.

Methods: The current research analyzes urban maps and requires a comprehensive and precise city map to identify optimal locations based on real data. The map is represented as a matrix—a 2D grid of points—where accessible paths and obstacles are defined by different numerical values. Since a street's width includes multiple points, a central row is selected to represent the path, restricting vehicle movement to this route and providing an ideal location for surveillance cameras. The optimal placement process is systematically conducted in four stages after matrix formation. First, origin-destination pairs are randomly generated using population density-based probability distribution. Second, optimal routing for each pair is simulated based on traffic behavior—shortest path selection during normal hours and alternative routes during peak hours. Third, all generated routes are aggregated to create virtual traffic, and path density is calculated for traffic-based optimization. Finally, considering different camera types based on purchase cost and installation expenses, placement is optimized for cost efficiency.

Findings: One hundred thousand new data points were generated, and two experiments were conducted. The first experiment used a greedy algorithm to maximize camera coverage across all paths. The second experiment applied the proposed method, first identifying high-traffic points, then maximizing coverage in these areas while minimizing installation costs. Results showed that the proposed method improves monitoring efficiency by 40% on new routes and reduces project costs by 6.6%.

Conclusion: In urban surveillance camera placement, methods focusing solely on maximum path coverage are ineffective, and traffic assessment is crucial for optimization. Additionally, since geometric features of paths are eliminated in the proposed method, it is scalable and applicable to any city and routing system. Furthermore, urban planners often purchase

cameras with varying fields of view and brands, which can be leveraged as an opportunity for cost optimization.



NUMBER OF REFERENCES

31



NUMBER OF FIGURES

8



NUMBER OF TABLES

2

مقاله پژوهشی

بهینه سازی چند هدفه جانمایی دوربین مدار بسته با استفاده از الگوریتم های هوش مصنوعی

حسن صانعی آرانی^۱، مهدی اسماعیلی^{۲*}، محمد علی افشار کاظمی^۳

^۱ گروه مدیریت فن آوری اطلاعات، دانشکده مدیریت و اقتصاد، واحد علوم و تحقیقات، دانشگاه آزاد اسلامی، تهران، ایران

^۲ گروه مهندسی کامپیوتر، دانشکده برق و کامپیوتر، واحد کاشان، دانشگاه آزاد اسلامی، کاشان، ایران

^۳ گروه مدیریت صنعتی، دانشکده مدیریت و اقتصاد، واحد تهران مرکز، دانشگاه آزاد اسلامی، تهران، ایران

چکیده

پیشینه و اهداف: بهینه سازی جانمایی دوربین های مدار بسته یکی از ارکان اساسی سیستم های هوشمند مدیریت ترافیک شهری است. استقرار صحیح این دوربین ها دقت پایش ترافیک را افزایش می دهد و زمان تشخیص حوادث را کاهش می دهد. بنابراین، مسأله بهینه سازی جانمایی دوربین ها سال ها است به عنوان یک چالش پژوهشی مطرح می شود. رویکردهای نوین حل مسئله از روش های بهینه سازی چند هدفه استفاده می کنند تا امکان تحلیل همزمان پارامترهای مختلف را فراهم کنند. با وجود پیشرفت های قابل توجه در روش های بهینه سازی، رویکردهای فعلی مبتنی بر شبکه بندی دوبعدی و سه بعدی هستند که در محیط های شهری پیچیده با محدودیت های اساسی مواجه می شوند. در این روش ها، فضا به صورت یک شبکه منظم تقسیم بندی می شود و نقاط بهینه برای نصب دوربین ها با چرخش زاویه ای مناسب انتخاب می شوند. اما در توپولوژی واقعی شهرها، شبکه های معابر به صورت خطوط تو در تو و غیرمنظم گسترده شده اند و بسیاری از نقاط محاسبه شده خارج از مسیرهای قابل دسترس قرار می گیرند. این ناهمخوانی بین مدل های نظری و شرایط عملی، کارایی روش های سنتی را به شدت زیر سوال می برد. با توجه به این محدودیت ها، ارائه یک چارچوب نوین ضروری است که توپولوژی واقعی شهرها، محدودیت های فیزیکی و الزامات برنامه ریزی شهری را همزمان در نظر بگیرد. روش های جدید باید بتوانند مسیرهای واقعی ترافیک، مکان های مجاز نصب دوربین و زاویه بندی اجباری را در مدل های خود ادغام کنند. این امر نیازمند استفاده از روش های مبتنی بر داده های ترافیک مجازی واقع گرا و به کارگیری الگوریتم های هوش مصنوعی برای بهینه سازی است.

روش ها: روش پژوهش حاضر نقشه های شهری را تحلیل می کند و به یک نقشه جامع و دقیق از شهر نیاز دارد تا موقعیت های بهینه را بر اساس داده های واقعی شناسایی کند. نقشه مورد استفاده به صورت یک ماتریس نمایش داده می شود که شبکه ای دوبعدی از نقاط است و مسیرهای قابل دسترس و موانع غیرقابل عبور با اعداد مختلف تعریف شده اند. از آنجا که عرض یک خیابان شامل چندین نقطه است، یک ردیف از مرکز مسیر به عنوان نماینده مسیر در نظر گرفته می شود تا حرکت وسایل نقلیه را به آن محدود کند و مکان ایده آلی برای استقرار دوربین های نظارتی فراهم نماید. فرآیند جانمایی بهینه پس از تشکیل ماتریس مدل، در چهار مرحله به صورت سیستماتیک انجام می شود. در مرحله اول، جفت های مبدأ-مقصد به صورت تصادفی با استفاده از توزیع احتمال مبتنی بر تراکم جمعیتی تولید می شوند. در مرحله دوم، برای هر جفت مبدأ-مقصد، مسیریابی بهینه با شبیه سازی رفتار ترافیکی شهروندان انجام می شود. این شبیه سازی در دو حالت انجام می گیرد: ساعات عادی با انتخاب کوتاه ترین مسیر و ساعات شلوغی با انتخاب مسیرهای فرعی. در مرحله سوم، تمام مسیرهای تولید شده تجمیع می شوند و ترافیک مجازی ساخته می شود. سپس تراکم مسیرها محاسبه می شود و بهینه سازی بر اساس ترافیک انجام می گیرد. در مرحله چهارم، با در نظر گرفتن انواع دوربین ها بر اساس قیمت خرید و هزینه های نصب، جانمایی بر اساس هزینه بهینه می شود.

تاریخ دریافت: ۰۸ اردیبهشت ۱۴۰۴

تاریخ داوری: ۱۲ خرداد ۱۴۰۴

تاریخ اصلاح: ۲۰ تیر ۱۴۰۴

تاریخ پذیرش: ۰۱ شهریور ۱۴۰۴

واژگان کلیدی:

جانمایی دوربین های مدار بسته

بهینه سازی چند هدفه

مسیریابی هوشمند

الگوریتم Q Learning

سیستم پایش تصویری

* نویسنده مسئول

mesmaeili@iau.ac.ir

۰۹۱۳-۳۶۱۲۸۳۴ ①

یافته‌ها: یکصد هزار داده جدید ایجاد شد و دو آزمایش انجام گرفت. در آزمایش اول، از یک الگوریتم حریصانه برای حداکثر کردن پوشش دوربین‌ها در کل مسیر استفاده شد. آزمایش دوم از روش پیشنهادی بهره گرفت که ابتدا نقاط پرتدد را شناسایی می‌کند، سپس پوشش دوربین‌ها را در این نقاط حداکثر می‌کند و در نهایت هزینه‌های نصب را به حداقل می‌رساند. نتایج نشان داد روش پیشنهادی در پایش مسیرهای جدید ۴۰ درصد کاراتر و در اجرای پروژه ۶۶ درصد مقرون به صرفه‌تر است.

نتیجه‌گیری: در جانمایی دوربین‌های مدار بسته شهری هر روشی که حداکثر پوشش را در مسیرهای شهری در نظر بگیرد کارایی ندارد و سنجش ترافیک عامل مهمی برای بهینه‌سازی است. همچنین در روش پیشنهادی چون ویژگی‌های هندسی مسیرها حذف شده‌اند، این روش مقیاس پذیر بوده و برای هر شهر و سیستم مسیریابی قابل اعمال است. همچنین برنامه‌ریزان شهری معمولاً دوربین‌های با میدان دید و برندهای متفاوت را خریداری می‌کنند که می‌تواند به عنوان فرصت در نظر گرفته شده و هدف دوم بهینه‌سازی برای کاهش هزینه در نظر گرفته شود.

مقدمه

بهینه‌سازی جانمایی دوربین‌های مدار بسته به عنوان یکی از ارکان اساسی سیستم‌های هوشمند مدیریت ترافیک شهری شناخته می‌شود. مطالعات نشان می‌دهد که استقرار صحیح این دوربین‌ها می‌تواند به میزان زیادی در دقت پایش ترافیک و کاهش زمان تشخیص حوادث مؤثر باشد. چالش اصلی در این حوزه، تعیین نقاط بهینه نصب دوربین‌ها با در نظر گرفتن معیارهایی همچون پوشش حداکثری، حداقل نقاط کور و همپوشانی بهینه میدان دید است. رویکردهای نوین مبتنی بر روش‌های بهینه‌سازی چندهدفه، امکان تحلیل همزمان این پارامترها را فراهم ساخته‌اند [۱-۴].

در سال‌های اخیر، تلفیق داده‌های ترافیک با الگوریتم‌های یادگیری ماشین، تحولی در روش‌های جانمایی دوربین‌ها ایجاد کرده است. پژوهش‌ها نشان می‌دهد استفاده از مدل‌های مبتنی بر ترافیک می‌تواند دقت جانمایی را نسبت به روش‌های سنتی افزایش دهد. این سیستم‌های هوشمند قادرند نقاط بحرانی مسیرها را با دقت بیشتری شناسایی کنند و پیشنهادهای بهینه‌ای برای استقرار دوربین‌ها ارائه دهند. چنین رویکردی به ویژه در کلان‌شهرهایی با بافت پیچیده معابر، کارایی ویژه‌ای دارد [۵-۸].

با توجه به رشد فزاینده شهرنشینی، نیاز به توسعه چارچوب‌های علمی برای جانمایی دوربین‌های ترافیک بیش از پیش احساس می‌شود. مطالعات اخیر بر اهمیت تلفیق سه فاکتور کلیدی تأکید دارند: (۱) الگوهای ترافیکی پویا (۲) ویژگی‌های فیزیکی معابر (۳) هزینه‌های استقرار. طراحی سیستم‌های تطبیقی که بتوانند با تغییر الگوهای ترافیک، پیشنهادهای جانمایی را به روزرسانی کنند، از جمله زمینه‌های پژوهشی نوظهور در این حوزه محسوب می‌شود. این پیشرفت‌ها می‌تواند تحولی اساسی در مدیریت هوشمند ترافیک شهری ایجاد کند [۹ و ۱۰]. با وجود پیشرفت‌های قابل توجه در روش‌های بهینه‌سازی جانمایی دوربین‌های نظارتی، رویکردهای متداول مبتنی بر شبکه‌بندی دوبعدی و سه‌بعدی فضا، در محیط‌های شهری پیچیده با محدودیت‌های اساسی مواجه هستند. در این روش‌ها، فضای مورد نظر به صورت یک شبکه منظم تقسیم‌بندی می‌شود و نقاط بهینه برای نصب دوربین‌ها با چرخش زاویه‌ای مناسب انتخاب می‌گردد. اما در توپولوژی واقعی شهرها،

شبکه‌های معابر به صورت خطوط تو در تو و غیرمنظم گسترده شده‌اند، به طوری که بسیاری از نقاط محاسبه شده در خارج از مسیرهای قابل دسترس قرار می‌گیرند. این ناهماهنگی بین مدل‌های نظری و شرایط عملی، کارایی روش‌های سنتی را به شدت زیر سوال می‌برد [۱۱ و ۱۲]. علاوه بر این، در برنامه‌ریزی شهری، دوربین‌های نظارتی عموماً می‌بایست در امتداد مسیرها و در نقاط مشخصی (مانند تقاطع‌ها یا میانه معابر) نصب شوند، در حالی که زاویه دید آن‌ها نیز باید در راستای جهت حرکت ترافیک تنظیم گردد. این محدودیت‌ها باعث می‌شود که بسیاری از نقاط پیشنهادی توسط الگوریتم‌های مرسوم، از نظر عملی غیرقابل اجرا باشند. به عنوان مثال، یک نقطه بهینه نظری ممکن است در وسط یک ساختمان یا فضای سبز قرار گیرد، در حالی که نصب دوربین در آن مکان از نظر فنی و حقوقی امکان‌پذیر نباشد چنین چالش‌هایی لزوم توسعه روش‌های جدیدی را که به طور خاص برای محیط‌های شهری طراحی شده‌اند، بیش از پیش آشکار می‌سازد.

با توجه به این محدودیت‌ها، ارائه یک چارچوب نوین که بتواند توپولوژی واقعی شهرها، محدودیت‌های فیزیکی و الزامات برنامه‌ریزی شهری را به طور همزمان در نظر بگیرد، به یک ضرورت تبدیل شده است. روش‌های جدید باید قادر باشند تا مسیرهای واقعی ترافیک، مکان‌های مجاز نصب دوربین و زاویه‌بندی اجباری را در مدل‌های خود ادغام کنند. این امر مستلزم به‌کارگیری روشهای پیشرفته مبتنی بر داده‌های واقعی ترافیک یا ترافیک مجازی منطبق بر دنیای واقع باشد و الگوریتم‌های هوش مصنوعی را برای بهینه‌سازی به کار گیرد. بنابراین، پژوهش‌های آینده مانند این پژوهش باید بر پر کردن این شکاف متمرکز شوند تا سیستم‌های نظارت ترافیک شهری به حداکثر کارایی خود دست یابند. وسایل نقلیه دارای طیف گسترده‌ای از ویژگی‌های رفتار ترافیکی هستند. بنابراین، اتخاذ روش‌های علمی برای تجزیه و تحلیل و شبیه‌سازی ترافیک ضروری است. شبیه‌سازی مجازی همراه با داده‌های ترافیک واقعی، داده مناسب را برای شبیه‌سازی ترافیک فراهم می‌کند. اگرچه اکنون داده‌های سفر در سطح فردی از نظر فنی قابل دسترسی است، اما به دو دلیل به دست آوردن آن بسیار دشوار است زیرا اولاً جمع‌آوری داده‌های سفر در سطح فردی گران است و توسط سیاست‌های محلی محدود شده است که منجر به این می‌شود که تنها تعداد کمی از محققانی که با

در فضاهای گوناگون این مسأله پژوهشی بررسی شده است. جدول ۱ لیستی از آخرین مقالات در این زمینه را نشان می دهد و بررسی می کند روش مطرح شده در این مقالات تا چه اندازه می تواند جوابگوی توپولوژی پیچیده شده شهری باشد و قابلیت اجرایی داشته باشد. این جدول نشان می دهد برای نقشه یک شهر و مسیرهای در هم تنیده آن لازم است از نگاهی متفاوت این مسأله بررسی شود و روش با رویکردی متفاوت مطرح شود.

دولت همکاری کرده اند می توانند آن را دریافت کنند. ثانیاً داده های واقعی سفر در سطح فردی مشمول حریم خصوصی است و اشتراک گذاری آن موجب نقض حریم خصوصی می شود. بنابراین در چند دهه گذشته، محققان علمی تحقیقات زیادی در مورد شبیه سازی جمعیت انجام داده اند و پیشرفت های چشمگیری در زمینه شبیه سازی ترافیک یا ترافیک مجازی داشته اند [۱۶-۱۳].

مسأله بهینه سازی جانمایی دوربین سالهاست که به عنوان یک چالش پژوهشی برای پژوهشگران زیادی بوده است و همواره با اهداف گوناگون

جدول ۱: پژوهش های انجام شده

Table 1: Research conducted

مرجع	سال	کاربرد پژوهش	قابلیت اجرا در توپولوژی پیچیده شهری
Reference	Year	Research Application	Applicability in complex urban topology
[17]	۲۰۲۵	ردیابی یک متحرک	قابل اجرا - نیازمند دوربین خاص
	2025	Tracking a Moving Object	Applicable - requires a special camera
[18]	۲۰۲۳	نظارت بر ساختمان سازی	غیر قابل اجرا - دارای کاربرد خاص مانند بار دینامیکی (موانع متحرک شهری)
	2023	Building Surveillance	Not applicable - has a specific application such as dynamic load (urban moving obstacles)
[19]	۲۰۲۵	پایش ترافیک با پهباد	قابل اجرا - نامناسب و غیر ایمن برای بافت شهری
	2025	Traffic Monitoring with Drones	Applicable - unsuitable and unsafe for urban context
[20]	۲۰۲۱	پایش ترافیک با یادگیری عمیق	قابل اجرا - نیازمند داده های آموزش داده شده
	2021	Traffic Monitoring with Deep Learning	Applicable - requires trained data
[21]	۲۰۲۴	نظارت بر ساختمان	قابل اجرا - فرآیندی دشوار و زمان بر برای اجرا در هر مسیر از خیابان
	2024	Building Surveillance	Applicable - a difficult and time-consuming process to implement on every route of the street
[22]	۲۰۲۴	پایش مکان با شکل چند ضلعی	قابل اجرا - فرآیندی دشوار و زمان بر برای اجرا در هر مسیر از خیابان
	2024	Polygonal Location Monitoring	Applicable - a difficult and time-consuming process to implement on every route of the street
[23]	۲۰۲۴	مسئله پوشش راس	قابل اجرا - نیازمند گراف استخراج شده از محیط
	2024	Vertex Covering Problem	Applicable - requires a graph extracted from the environment
[24]	۲۰۲۲	تمرکز بر گراف مسیر شهری	قابل اجرا - نیازمند گراف استخراج شده از محیط
	2022	Focusing on Urban Route Graph	Applicable - requires a graph extracted from the environment
[25]	۲۰۲۲	سیستم مشارکتی پایش	قابل اجرا - دشواری هماهنگی بین عوامل در شهرها با پیچیدگی بالا
	2022	Participatory Monitoring System	Applicable - difficulty in coordinating between agents in cities with high complexity
[26]	۲۰۲۱	نظارت ایمن بر ساختمان	قابل اجرا - فرآیندی دشوار و زمان بر برای اجرا در هر مسیر از خیابان
	2021	Secure Building Surveillance	Applicable - a difficult and time-consuming process to implement on every route of the street
[27]	۲۰۲۰	نظارت برنامه ریزی شده بر ترافیک	قابل اجرا - ناقص و نیازمند اقدامات بعدی
	2020	Planned Traffic Surveillance	Applicable - incomplete and requires further measures
[28]	۲۰۲۱	بررسی تجهیزات نظارتی	قابل اجرا - ناقص و نیازمند اقدامات بعدی
	2021	Surveillance Equipment Review	Applicable - incomplete and requires further measures
[29]	۲۰۲۱	رصد شکار غیر قانونی	قابل اجرا برای پارک ها و بوستان های شهری
	2021	Poaching Monitoring	Applicable for urban parks and gardens
[30]	۲۰۲۲	شبیه سازی سه بعدی	قابل اجرا در موارد خاص مانند مناطق کوهستانی دارای ارتفاع مختلف
	2022	3D Simulation	Applicable in special cases such as mountainous areas with different heights
[31]	۲۰۲۲	نظارت با پهباد	قابل اجرا - نامناسب و غیر ایمن برای بافت شهری
	2022	Urban Surveillance	Applicable - unsuitable and unsafe for urban context

روش تحقیق

روش پژوهش جاری با تحلیل نقشه‌های شهری است و نیازمند یک نقشه جامع و دقیق از شهر است تا بتواند موقعیت‌های بهینه را شناسایی کند. نقشه‌های مورد استفاده را می‌توان از طریق منابع اینترنتی معتبر و سرویس‌های نقشه‌برداری دیجیتال تهیه کرد. این تصویر باید به گونه‌ای باشد که تمام جزئیات مسیرها و موانع شهری در آن حفظ شده باشد که می‌توان با یک ماتریس نمایش داد. تفاوت اصلی بین یک تصویر خام و یک ماتریس پردازش شده در این است که ماتریس نهایی باید به صورت یک شبکه دوبعدی از نقاط سفید (نمایانگر مسیرهای قابل دسترسی) و نقاط سیاه (نمایانگر موانع غیرقابل عبور) تعریف شود. این ماتریس همچنین باید در ابعاد بهینه‌شده و با اندازه‌ی مناسب ذخیره شود تا پردازش‌های بعدی با سرعت و دقت بیشتری انجام پذیرد. تبدیل نقشه شهری به یک ماتریس دودویی (متشکل از صفر و یک) یکی از مراحل کلیدی پیش‌پردازش داده‌ها در این پژوهش محسوب می‌شود. این فرآیند به منظور آماده‌سازی داده‌های ورودی برای الگوریتم‌های بهینه‌سازی انجام می‌شود و تأثیر مستقیمی بر دقت نتایج نهایی دارد. این پژوهش بر روی نقشه اخذ شده از گوگل مپ از شهرستان آران و بیدگل - استان اصفهان - ایران انجام شده است اما روش ارائه شده بر روی هر نقشه از شهر قابل اعمال است.

برای پیاده‌سازی عملی این ایده در محیط واقعی یک شهر، لازم است برخی ابهامات مفهومی مرتفع گردد. یکی از چالش‌های اساسی، تعیین دقیق نقاط نماینده در مسیرهای شهری است، چرا که عرض یک خیابان اصلی در مدل دیجیتال ممکن است شامل چندین پیکسل باشد که هر کدام می‌توانند به عنوان مسیر عبور در نظر گرفته شوند. برای حل این مشکل، مفهوم اسکلت مسیر معرفی شده است که در آن هر مسیر اصلی صرفاً توسط یک ردیف از پیکسل‌های مرکزی نمایش داده می‌شود. این رویکرد نه تنها پیچیدگی‌های ناشی از عرض متغیر معابر را حذف می‌کند، بلکه فرضیه حرکت وسایل نقلیه را نیز به عبور از این خط مرکزی محدود می‌سازد. جالب توجه اینکه این نقاط مرکزی به دلیل موقعیت استراتژیکشان در وسط معابر، مکان‌های ایده‌آلی برای استقرار دوربین‌های نظارتی محسوب می‌شوند.

شکل ۱ نمایشی از ماتریس ذکر شده و اسکلت مسیرها را برای بخشی از یک شهر ارائه می‌دهد. این ماتریس را به صورت زیر نیز می‌توان نمایش داد:

$$A = \begin{bmatrix} a_{11} & a_{12} & \dots & a_{1m} \\ a_{21} & a_{22} & \dots & a_{2m} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ a_{n1} & a_{n2} & \dots & a_{nm} \end{bmatrix}$$

رابطه ۱:

رابطه ۱ نمایش ماتریسی است که سطرها و ستون‌های آن طول و عرض مدل پیشنهادی است که هر پیکسل را با مقادیر عددی مشخص می‌کند. برای هر a_{ij} ، اگر پیکسل جزء بخشی باشد که پوشش تصویری برای آن

هدف از این پژوهش ارائه راهکاری است که قابلیت اجرا در نقشه واقعی شهر را داشته باشد. بررسی اجمالی پیشینه تحقیق نشان می‌دهد که روش‌های پژوهش‌های انجام شده حتی اگر لحاظ فنی قابلیت اجرا در نقشه شهری را داشته باشند به سه دلیل با چالش‌های اساسی مواجه هستند: ۱- روش‌های مبتنی بر پهنای مخاطره‌آمیز بوده و ممکن است موجب آسیب به شهروندان شود. ۲- روش‌هایی که طول و عرض زیاد مانند مرزها و... را پایش می‌کنند به هیچ عنوان کارایی لازم را در مسیرهای شهری که معابری باریک و درهم تنیده هستند را ندارند. ۳- روش‌هایی که برای مکان خاصی مانند یک ساختمان معین طراحی شده است هم از نظر ابعاد هندسی به دشواری برای هر مسیر شهری تطابق پذیر هستند. همچنین بار پردازش زیادی را برای نقشه جامع شهر نیاز دارند. بنابراین نیاز به شیوه‌ای است که این کاربرد خاص را مدنظر قرار داده و با معیارهای مناسب بهینه‌سازی را انجام دهد. پوشش بیشینه یا صد درصدی برای اکثر شهرهای جهان به دلایل هزینه زیاد در یک بازه زمانی کوتاه امکان پذیر نیست. برنامه‌ریزان شهری حداقل ده سال را برای توسعه دوربین‌های شهری در نظر می‌گیرند و در هر سال پایش بخشی از شهر را تکمیل می‌کنند. در این پژوهش ابتدا ترافیک و سپس هزینه اولویت توسعه در نظر گرفته شده است و هر عدد برای سطح پوشش اولیه تنها یک محک است و می‌تواند برای شروع یا ادامه کار افزایش پایش تصویری بر اساس توان مالی در نظر گرفته شود.

در این پژوهش، روشی نوین ارائه می‌شود که چالش‌های مذکور را با یک چارچوب چندمرحله‌ای جامع مورد توجه قرار می‌دهد. در مرحله اول، یک ماتریس هوشمند از نقشه شهری به عنوان محیط شبیه‌سازی ایجاد می‌گردد که در آن هر نقطه از فضای شهری دارای هویت دیجیتال منحصر به فرد است. این ماتریس به گونه‌ای طراحی شده است که مسیرهای اصلی و فرعی را به عنوان مکان‌های بالقوه نصب دوربین، با مقادیر وزنی متفاوت از نقاط غیرقابل تردد (مانند ساختمان‌ها و فضای سبز) به دقت تفکیک می‌نماید.

در مرحله بعد، با استفاده از شبیه‌سازی ترافیک مجازی مبتنی بر داده‌های تاریخی و پیش‌بینی‌های الگوریتمی، مسیرهای پرتراфик شناسایی و اولویت‌بندی می‌شوند. این رویکرد امکان تشخیص نقاط بحرانی شبکه معابر را فراهم می‌سازد. در مرحله نهایی، با در نظر گرفتن تنوع دوربین‌های موجود در بازار از نظر برد مؤثر و قیمت تمام‌شده، بهینه‌ترین مکان‌های نصب برای هر نوع دوربین در امتداد مسیرهای شناسایی شده محاسبه می‌گردد.

این روش جامع با ترکیب سه مولفه کلیدی (۱) مدل‌سازی هوشمند فضای شهری، (۲) شبیه‌سازی پویای ترافیک و (۳) بهینه‌سازی چندمعیاره، راهکاری عملیاتی برای جانمایی دوربین‌های نظارتی در محیط‌های شهری پیچیده ارائه می‌دهد. نتایج اولیه نشان می‌دهد این چارچوب می‌تواند پوشش نظارتی را تا ۴۰ درصد نسبت به روش‌های متداول افزایش دهد، در حالی که هزینه‌های اجرایی را تا ۶/۶ کاهش می‌دهد.

$$P = \begin{bmatrix} p_{11} & p_{12} & \dots & p_{1m} \\ p_{21} & p_{22} & \dots & p_{2m} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ p_{n1} & p_{n2} & \dots & p_{nm} \end{bmatrix}$$

رابطه ۲:

P_{ij} احتمال انتخاب هر نقطه از محیط بر اساس میزان تراکم جمعیتی آن مکان است. طبق قانون جمع احتمالات در یک فضای نمونه‌ای باید مجموع احتمالات همه پیشامدهای ناپیوسته یک باشد. پس رابطه زیر باید برقرار باشد:

$$\sum_{i,j=0}^{n,m} p_{ij} = 1$$

رابطه ۳:

در رابطه بالا p_{ij} برای مکانهایی که غیرمسیر هستند صفر خواهد بود. برای یافتن مقادیر غیر صفر، هر نقطه از مسیر با مقادیر عددی w_1, w_2, w_3 برای سه سطح از تراکم جمعیتی یعنی پرتراکم، تراکم معمول، کم تراکم وزن داده شود و از رابطه زیر بدست می‌آید:

$$P_{ij} = \frac{W_{i,j}}{\sum_{i,j=0}^{n,m} W_{i,j}}$$

رابطه ۴:

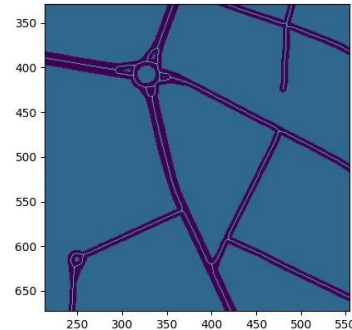
W_{ij} تراکم جمعی نقطه ij است که برای نقاط تراکم بالاتر، p_{ij} که احتمال انتخاب آن نقطه است بیشتر خواهد شد. بنابراین ترافیک مجازی ساخته شده در مراحل بعد واقعی‌تر خواهد بود.

○ مسیریابی هوشمند با الگوریتم‌های هوش مصنوعی (بلوک دوم) برای هر جفت مبدأ-مقصد گام قبل، مسیریابی بهینه با استفاده از الگوریتم‌های هوش مصنوعی انجام می‌شود. برای شبیه‌سازی رفتار ترافیکی شهروندان، از دو رویکرد مسیریابی متفاوت استفاده می‌شود: - ساعات عادی: انتخاب کوتاه‌ترین مسیر (بر اساس معیارهای فاصله). در رویکرد اول که مبتنی بر منطق عقلایی است، از الگوریتم کلاسیک ای استار برای یافتن کوتاه‌ترین مسیر بین دو نقطه استفاده می‌شود. این رویکرد رفتار شهروندان در شرایط عادی که به دنبال کوتاه‌ترین مسیر هستند را مدل می‌کند.

- ساعات اوج ترافیک: در رویکرد دوم که پیچیدگی بیشتری دارد، از تکنیک‌های یادگیری تقویتی برای شبیه‌سازی رفتار شهروندان در ساعات پرتراکم استفاده می‌شود. زیرا رفتار ترافیکی شهروندان همیشه تابع شرایط ترافیکی است. مثلاً گاهی ممکن است کوتاه‌ترین مسیر را از مبدأ تا مقصد انتخاب نکنند؛ چون مسیرهای اصلی ترافیک زیادی دارند و با مسیرهای دورتر زودتر به مقصد می‌رسند. با استفاده از یادگیری تقویتی می‌توان این مسیرهای جانبی را شناسایی کرد.

حرکت عامل در ماتریس محیط مشابه یک متحرک در شهر است. عامل ضمن حرکت و گرفتن پاداش مثبت یا منفی از محیط، مسیرش را به سمت مقصد پیدا می‌کند. می‌توان با دادن پاداش منفی یا مثبت بامعنا؛

مدنظر نباشد با num_1 و اگر جز مسیرهای اصلی و فرعی شهر باشد که باید پوشش یابد با num_2 و اگر جز مسیر و واقع بر روی اسکلت مسیر باشد با num_3 و اگر نقطه ای از اسکلت مسیر باشد که دو یا چند مسیر را به هم متصل می‌کند با num_4 مقداردهی خواهد شد. اکنون محیط شبیه سازی آماده شده است.



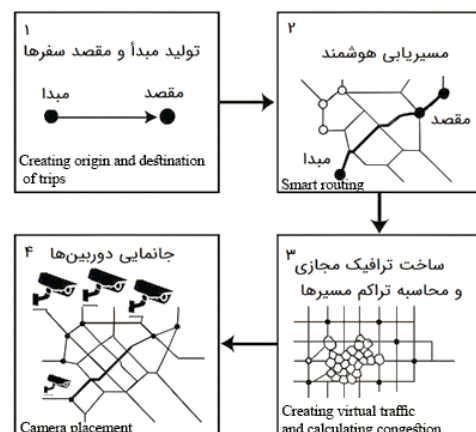
شکل ۱: نمایش بخشی از محیط شهری که مسیرها (خیابان‌ها) با رنگ آبی پررنگ و غیر مسیرها با آبی کم رنگ مشخص شده است. اسکلت مسیر، خط سفید باریک در وسط مسیر است.

Fig. 1: A representation of a portion of an urban environment where paths (streets) are marked in bold blue and non-paths in pale blue. The path skeleton is the thin white line in the middle of the path.

فرآیند جانمایی بهینه دوربین‌های نظارتی پس از پردازش داده‌های اولیه و تشکیل ماتریس مدل، در چهار مرحله اصلی سیستماتیک انجام می‌شود. شکل ۲ یک فرآیند چهار مرحله را به صورت بلوک‌های متوالی نمایش می‌دهد. در ادامه، هر مرحله به تفصیل تشریح می‌شود:

○ تولید تصادفی مبدأ و مقصد سفرها با در نظر گرفتن اولویت و احتمال (بلوک اول)

در این مرحله، با استفاده از توزیع احتمال مبتنی بر تراکم نقاط (مانند مراکز تجاری، اداری، یا مسکونی)، جفت‌های مبدأ-مقصد به صورت تصادفی تولید می‌شوند. این توزیع احتمال می‌تواند بر اساس تراکم مناطق شهری تنظیم شود تا انعکاسی واقع‌گرایانه از الگوی سفر داشته باشد. ماتریس زیر نمایشی از محیط شبیه‌سازی قبلی است:



شکل ۲: یک فرآیند چهار مرحله ای برای یافتن مکان های بهینه

Fig. 2: A four-step process for finding optimal locations.

در رابطه ۵ دو شرط روبرو مجاورت نقاط و به بیان دیگر توالی نقاط را نشان می‌کنند.

شبه کد ۱: الگوریتم/اصلاح شده یادگیری تقویتی

```

1: RL-Func(path):
2: Maze=aij[1352*1551] Discrete Environment
3: Agent=A vehicle for traveling from origin to destination
4: Define Actions-Space=8 directions, States = Relationship(1)
5: Define Rewards,MAX-Reward, Episode
6: for all (States, Actions) do
7:   if Q(State,Action)='Block' then
8:     Q(State,Action)= MAX-Reward
9:   else
10:    Q(State,Action)=0
11:   end if
12: end for
13: for all Episode do
14:   Update Q-Table on Epsilon Greedy Policy
15:   if Last 10 Q-Table Values are Same then
16:     Save path
17:     break
18:   end if
19: end for
20: return path

```

○ ساخت ترافیک مجازی و محاسبه تراکم مسیرها- بهینه سازی بر اساس ترافیک (بلوک سوم)

با تجميع تمام مسیرهای تولیدشده، یک مدل ترافیک مجازی ساخته می‌شود. مجموعه ای از مسیرها را می‌توان به صورت زیر نمایش داد:

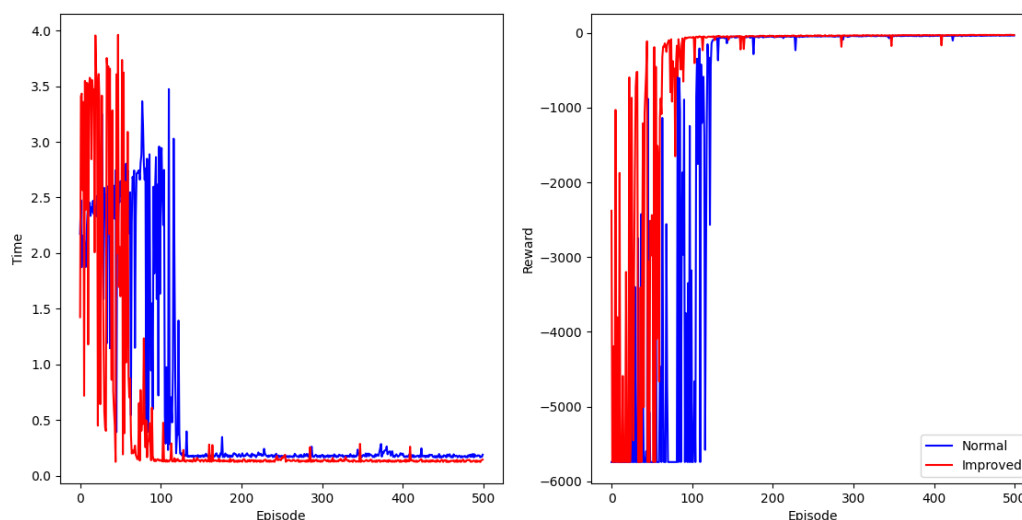
مسیرهای جانبی را توسط عامل شناسایی کرد. در این پژوهش برای یک حرکت که به مقصد نرسد پاداش -0.5 در نظر گرفته می‌شود و برای حرکت در یک حالت (پیکسل) که قبلاً عبور کرده -2 و برای حرکت منجر به برخورد با بلوکها -75 و برای حرکت در حالت‌هایی که توسط دوربین در رویکرد اول پوشش داده شده -1 قرار داده می‌شود تا عامل حتی المقدور از این حالت‌ها عبور نکند. در صورت رسیدن به هدف پاداش $+10$ تخصیص داده می‌شود.

یکی از مشهورترین الگوریتم‌های مورد استفاده برای یادگیری تقویتی؛ Q -Learning است. یک ویژگی خاص این محیط نسبت به سایر محیط‌ها آن است که تعداد حرکت‌های مناسب که منجر به برخورد به بلوک‌ها نشود کم است. هر پیکسل از مسیر با یک پیکسل بالا و یک پیکسل در پایین آن مرتبط است؛ بنابراین معمولاً شش حرکت دیگر منجر به برخورد به بلوک و گرفتن پاداش منفی می‌شود. یک راه برای بهبود الگوریتم آن است که جدول Q حالت حرکت را برای این حرکت‌ها شناسایی کنیم و مقدار آن را برابر با یک مقدار منفی بزرگ قرار دهیم. این Q از پیش مقدار داده شده باعث می‌شود انتخاب آن از جدول انجام نشود و فقط حرکت‌هایی که منجر به حرکت در اسکلت مسیر جاده است انتخاب شود. شبه کد آن در شبه کد ۱ نمایش داده می‌شود. نتیجه کار در شکل ۳ نمایش داده می‌شود. در این شکل هم زمان همگرایی و هم مقدار پاداش نهایی زودتر از الگوریتم پیش فرض است. این کار برای حالتی که مسیرهای زیادی را می‌بایست از این روش پیدا کرد منجر به کارآمدی می‌شود.

یک مسیر شهری از هر کدام از دو روش بالا را در ماتریس محیط می‌توان به صورت زیر نمایش داد:

$$\text{Route}_1 = [(i_1, j_1), (i_2, j_2), \dots, (i_k, j_k)] \text{ if } |i_{t+1} - i_t| \leq 1, |j_{t+1} - j_t| \leq 1$$

رابطه ۵:



شکل ۳: اصلاح الگوریتم q-learning به منظور کارایی بهتر

Fig. 3: Modification of the q-learning algorithm for better performance

را نیز حتماً باید در نظر گرفت زیرا ممکن است دوربینی هزینه آن کم باشد؛ اما به هر حال هزینه نصب اگر در نظر گرفته شود در قیاس با دوربین گران‌تر، باتوجه به همه محدودیت‌ها مناسب‌تر تشخیص داده شود. $X_{i,path}$ تعداد دوربین در هر مسیر است.

محدودیت‌ها عبارتند از:

محدودیت اول: برای نقاط پرتکرار، هدف حداکثرکردن پوشش است، بنابراین طول مسیر نظارت شده نباید کمتر از طول خیابان باشد. این محدودیت را می‌توان به صورت رابطه زیر بیان کرد:

$$\sum_{i=1}^{N_{cam}} a_i \times X_{i,path} \geq L_{path} \quad \forall path \quad \text{رابطه ۱۱:}$$

در رابطه بالا a_i تعداد پیکسل‌های میدان دید دوربین i است و L_{path} نیز طول هر مسیر است.

محدودیت دوم: مربوط به تعداد مکان‌های مناسب برای نصب دوربین در هر مسیر است. فضای شهری مناطق محدودی را برای نصب دوربین فراهم می‌کند. در رابطه زیر تعداد کل دوربین‌ها باید کمتر از K_{path} تعداد مکان‌های مناسب برای نصب دوربین در هر مسیر باشد.

$$\sum_{i=1}^{N_{cam}} X_{i,path} \leq K_{path} \quad \forall path \quad \text{رابطه ۱۲:}$$

محدودیت متغیرها: تعداد دوربین‌ها در هر مسیر عدد صحیح مثبت است.

$$X_{i,path} \in Z^+ \quad \forall i, path \quad \text{رابطه ۱۳:}$$

این چهار بلوک، چارچوب سیستماتیک لازم برای جانمایی هوشمند دوربین‌ها را تشکیل می‌دهند. نتیجه انجام مراحل فوق را می‌توان در ماتریس محیط اعمال کرد و نقاطی از مسیر را که با جانمایی دوربین رصد می‌شوند را به صورت زیر نمایش داد:

$$V = \begin{bmatrix} v_{11} & v_{12} & \dots & v_{1m} \\ v_{21} & v_{22} & \dots & v_{2m} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ v_{n1} & v_{n2} & \dots & v_{nm} \end{bmatrix} \quad \text{رابطه ۱۴:}$$

در ماتریس فوق هر عضو از مسیر که تحت پوشش دوربین قرار گرفته با یک مقدار عددی غیر صفر مشخص می‌شود و بقیه مقادیر صفراند. از این ماتریس می‌توان در محاسبه سطح پوشش استفاده کرد. شبه کد ۲، شبه کد اصلی است که تمام مراحل چهارگانه را در خود دارد.

$$Routes = \{Route_1, Route_2, \dots, Route_N\} \quad \text{رابطه ۶:}$$

N تعداد مسیرهایی است که ترافیک مجازی یک شهر را ایجاد می‌کند. فراوانی هر نقطه از ماتریس محیط را می‌توان با این رابطه بدست آورد:

$$f_{i,j} = \sum_{R \in Routes} I(i,j) \in R \quad \text{رابطه ۷:}$$

در رابطه فوق I تابع نشانگر است یعنی اگر نقطه در مسیر باشد ۱ وگرنه صفر خواهد بود. در این روش، تراکم ترافیکی هر نقطه بر اساس تعداد سفرهای عبوری محاسبه می‌گردد. بنابراین معیاری نیاز است تا تراکم نقاط با آن مقایسه شود و بر اساس آن میزان ترافیک آن نقطه بدست آید. این معیار، متوسط تکرار نقاط در مسیرها انتخاب شده است که از رابطه زیر بدست می‌آید:

$$\bar{f} = \frac{1}{n \times m} \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^m f_{i,j} \quad \text{رابطه ۸:}$$

نقاط پرتراffic که اولویت نصب دوربین‌ها هستند نقاطی هستند که از متوسط تکرار بیشتر باشند:

$$H = \{(i, j) | f_{i,j} > \bar{f}\} \quad \text{رابطه ۹:}$$

این مرحله امکان شناسایی نقاط بحرانی و مسیرهای پرتراffic را فراهم می‌کند.

○ بهینه‌سازی جانمایی دوربین‌ها بر اساس هزینه (بلوک چهارم)
در این مرحله، مسیرهایی که تعداد تکرار آنها از حد معیار فراتر رفته (مجموعه H)، به عنوان کاندیدای نصب دوربین انتخاب می‌شوند. معمولاً دوربین‌ها با میدان دید مختلف و قیمت مختلف برای نصب دوربین خریداری می‌شود. اکنون با در نظر گرفتن انواع دوربین بر اساس قیمت خرید و هزینه‌های نصب، جانمایی بهینه انجام می‌شود تا پوشش نظارتی با حداقل هزینه حاصل گردد.

هر مسیر از خیابانی که در مجموعه H قرار دارد براساس دوربین‌های مختلف بازار با کمترین هزینه می‌تواند پوشش داده شود. می‌توان این مسئله می‌تواند به عنوان یک مسئله برنامه‌ریزی عدد صحیح خطی یا ILP مدل‌سازی کرد. متغیر این مسئله X_i است که تعداد دوربین‌ها از هر نوع است و برای این تحقیق $i=1,2,3$ است. تابع هدف کمینه کردن هزینه برای هر مسیر از خیابان است و عبارتست از:

$$\text{Min} \sum_{path=1}^{N_{path}} \sum_{i=1}^{N_{cam}} C_i \times X_{i,path} \quad \text{رابطه ۱۰:}$$

در رابطه فوق C_i ها هزینه خرید دوربین و نصب آن است. هزینه نصب

شبه کد ۲: شبه کد اصلی

نتایج و بحث

جدول ۲ مشخصات محیط مورد بررسی را نشان می‌دهد و متغیرها را با کارکرد و مقدار آن مشخص می‌کند.

برای روش پیشنهادی طبق جدول ۲ ماتریس محیط طبق رابطه ۱ ایجاد شد. با استفاده از روابط ۲ و ۳ و ۴ به تمام نقاط شهری اولویت انتخاب بر حسب تراکم داده شد که در شکل ۴ نشان داده شده است.

اکنون با استفاده از روابط ۵، ۶، ۷، ۸ و ۹ می‌توان مسیرها را ساخت و پر ترافیک ترین آنها را برای نصب دوربین پیدا کرد. روابط این مرحله هدف بهینه سازی بر اساس ترافیک را محقق می‌کند. شکل ۵ مراحل هر کدام از روابط ذکر شده را نشان می‌دهد. ابتدا با استفاده از ماتریس رابطه ۲، برای هر نقطه احتمال انتخاب مشخص می‌کند، مبدا و مقصد یک مسافرت شهری به صورت تصادفی انتخاب شده و با توجه به دو رویکرد ذکر شده یک مسافرت شهری ساخته خواهد شد و مجموعه این مسافرت‌ها در تعدادهای متفاوت، ترافیک مجازی بدست خواهد آورد.

اکنون متوسط تکرار نقاط به عنوان معیار اولیه برای انتخاب نقاط پرترافیک در نظر گرفته می‌شود. نقاطی که بالاتر از این معیار باشند در سه ترافیک مجازی طبق نمودارهای شکل ۵ در بیش از ۹۵ درصد اشتراک دارند و با ساخت مسافرت‌های بیشتر، نتایج نیز یکسان‌تر می‌شوند. چون انتخاب‌ها در مبدا و مقصد شهری رندم بود، این همگرایی نتایج نشان دهنده فرآیند صحیح ساخت مدل و ترافیک شهری را نشان می‌دهد. این بخش پایان هدف اول بهینه سازی ترافیکی است.

```

1: Define aij, pij, vij Matrices
2: Define CAMi = Width, CAMi = Length, IntraCity = Trip - Count
3: In GEM Customize Environment
4: for IntraCity = Trip - Count do
5:   origin, Destination = Random-Select(aij, pij)
6:   All-Path = ASTAR - Algorithm(origin, Destination)
7: end for
8: for path in All-Path do
9:   RES-Path1 = Length(path) ≥ Average-Length(All-Path)
10: end for
11: for path in RES-Path1 do
12:   CAMiCount = OR-Func(Path)
13:   for CAM-Type in CAMiCount do
14:     Visible = Placement-Func(Path, CAM-Type)
15:     vij Matrix ← Visible
16:   end for
17: end for
18: for selected-paths in All-Path do
19:   RL-Path = RL-Func(selected-path(origin, Destination))
20: end for
21: for path in RL-Path do
22:   RES-Path2 = Length(path) ≥ Average-Length(RL-Path)
23: end for
24: for path in RES-Path2 do
25:   CAMiCount = OR-Func(Path)
26:   for CAM-Type in CAMiCount do
27:     Visible = Placement-Func(Path, CAM-Type)
28:     vij Matrix ← Visible
29:   end for
30: end for
31: OR-Func(path):
32:   Model-Variables = CAMiCount
33:   Model-Constraints = Relationship(11), Relationship(12), Relationship(13)
34:   Model-objective-Function = Relationship(10)
35:   return CAMiCount = Model.Solved()
36: Placement-Func(Path, CAM-Type):
37:   Slope = DeltaY / DeltaX for x,y on Path(xi, yi)
38:   if 0.2 ≤ slope ≤ 5 then
39:     return Oblique-Rect-FOV(xi, yi)
40:   else if slope ≤ 0.2 then
41:     return Horizontal-Rect-FOV(xi, yi)
42:   else if slope ≥ 5 then
43:     return Vertical-Rect-FOV(xi, yi)
44:   end if

```

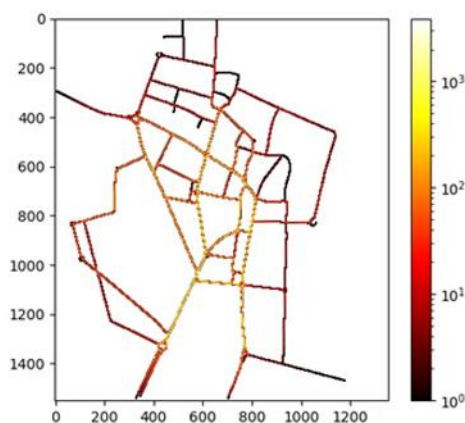
جدول ۲: مشخصات محیط مورد بررسی

Table 2: Characteristics of the studied environment

نام متغیر - Variable name	کارکرد - Function	مقدار - Value
$m*n$	ابعاد ماتریس محیط - Dimensions of the environment matrix	۱۳۵۱*۱۳۵۱
Num1-4	مقادیر عددی ماتریس - Numerical values of the matrix	۰-۴
W1-4	مقادیر وزن تراکم نقاط شهری - Weight values of the density of urban points	۲۰-۴۰-۶۰-۸۰
N_{path}	تعداد مسیرهای شهر مورد نظر - Number of routes in the desired city	۲۰۴
N_{cam}	تعداد دوربین‌های مورد استفاده - Number of cameras used	۳
C1-3	هزینه خرید و نصب دوربین‌ها - Cost of purchasing and installing cameras	۱۵۰۰۰۰۰۰-۳۰۰۰۰۰۰۰-۵۰۰۰۰۰۰۰
A1-3	میدان دید در راستای مسیر - Field of view along the route	۴۰ متر-۱۰۰ متر-۱۶۰ متر
N	تعداد نمونه سازی ها برای ایجاد ترافیک مجازی - Number of samplings to create virtual traffic	۱۳۹۹۵-۳۹۹۹۵-۴۵۶۶۴
K_{path}, L_{path}	طول هر مسیر و تعداد نقاط مناسب در آن - Length of each route and the number of suitable points in it	Depends on route

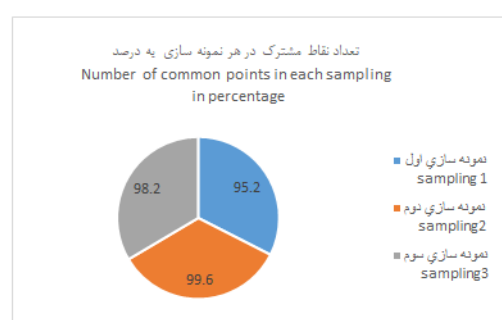
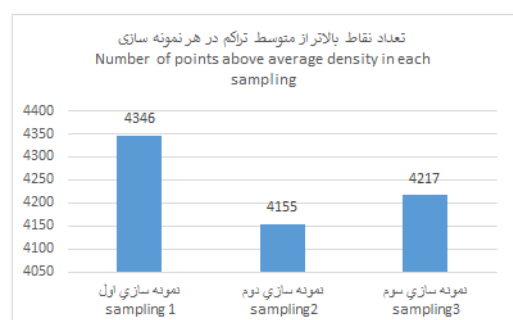
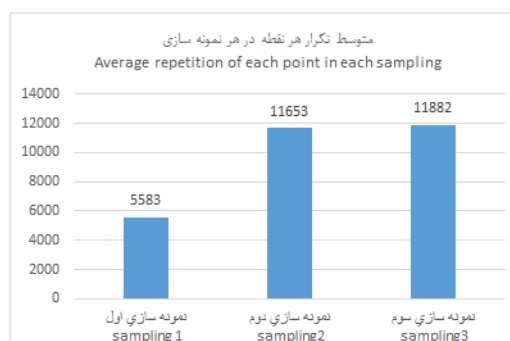
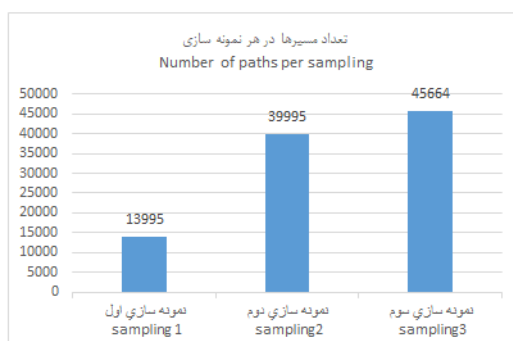
را پوشش می دهند، در محیط شبیه سازی شده میتوان یک مستطیل با عرض مسیر و طول میدان دید دوربین ترسیم کرد. این مستطیل به عنوان نماینده مساحت تحت پوشش دوربین در نظر گرفته می شود و زاویه نصب بر اساس آن محاسبه می گردد. در شبه کد اصلی، خطوط ۳۶ تا ۴۴ این فرآیند را به صورت گام به گام تشریح می کند. این روش نه تنها دقت بالایی در تعیین زاویه نصب ارائه می دهد، بلکه امکان محاسبه مساحت دقیق تحت پوشش را نیز فراهم می سازد.

اکنون لازم است کارایی روش پیشنهادی در آزمایش هایی به بوته نقد و بررسی گذاشته شود. بنابر این دو آزمایش ترتیب داده شد. در آزمایش اول، از یک الگوریتم حریصانه برای حداکثر کردن پوشش دوربین ها در کل مسیر استفاده شد. در این روش، دوربین هایی با بیشترین برد انتخاب شدند، مگر آنکه طول مسیر یا بخش باقیمانده از آن، کمتر از برد دوربین باشد. این آزمایش به عنوان پایه ای برای مقایسه کارایی روش های بعدی در نظر گرفته شد است. انتخاب روش گریزی نه بواسطه مقایسه با روش پایه بلکه برای مقایسه هر روشی است که پیشنهاد کرد پوشش را در نظر بگیرد صورت گرفته است. هدف آن است که اثبات شود در پروسه زمان بر توسعه دوربین های مدار بسته شهری معیار ترافیک و هزینه می بایست هدف بهینه سازی باشد و نه پیشنهاد کردن پوشش. آزمایش دوم از روش پیشنهادی استفاده می کند ابتدا نقاط پرتدد بر اساس روابط ذکر شده را شناسایی کرده و سپس با هدف حداکثر سازی پوشش در این نقاط پرتراffic و سپس حداقل کردن هزینه های نصب، دوربین ها در مکان های بهینه نصب می شوند.



شکل ۴: نمایش تراکم نقاط شهری و احتمال بالاتر انتخاب برای نقاط متراکم تر
Fig. 4: Showing the density of urban points and the higher probability of selection for denser points

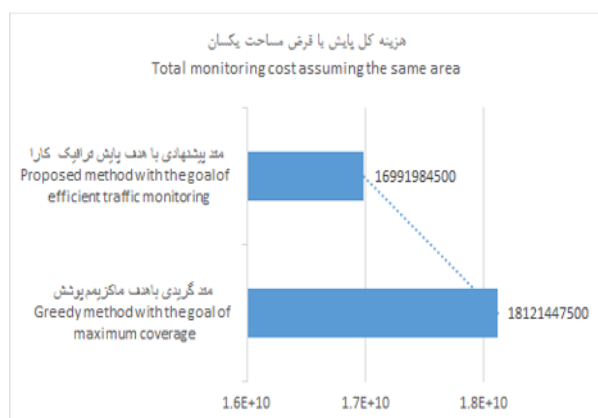
در بخش دوم با استفاده از روابط ۱۰، ۱۱، ۱۲ و ۱۳ جانمایی دوربین ها در نقاط بدست می آید تا هدف دوم یعنی بهینه سازی اقتصادی انجام گیرد. نتیجه آن در ماتریس رابطه ۱۳ منعکس خواهد شد. شکل ۶ نتیجه خروجی را نشان می دهد. هر نقطه از شهر در روش پیشنهادی اگر جزء منتخبین ترافیک بالاتر باشد در میدان دید یک دوربین قرار خواهد گرفت. با توجه به میدان دید دوربین ها، زاویه نصب آنها باید به گونه ای تعیین شود که راستای اسکلت مسیر را به طور کامل پوشش دهد. از آنجا که فرض بر این است که دوربین های انتخابی حداقل عرض مسیر



شکل ۵: ایجاد ترافیک مجازی با سه نمونه سازی از مسیرها و یکسان شدن نتایج در بیش از ۹۵ درصد نقاط
Fig. 5: Creating virtual traffic with three samplings of routes and the results being the same in more than 95% of the points

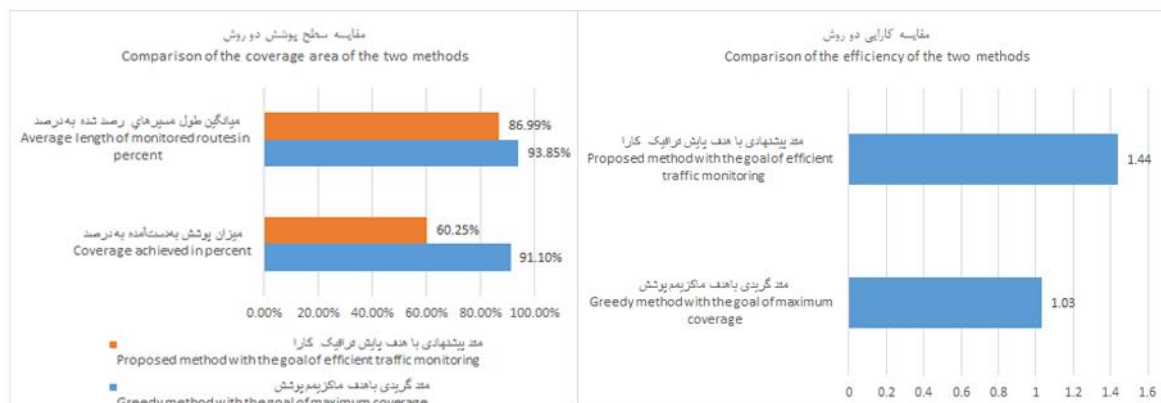
پوشش مساحتی داشت. این نتیجه بیانگر آن است که صرف افزایش مساحت تحت نظارت، لزوماً به معنای بهبود نظارت بر تردد‌های شهری نیست. در مقابل، روش پیشنهادی با وجود پوشش مساحتی حدود ۶۰٪، توانست به طور متوسط ۸۶٪ از طول سفرهای شهری را پوشش دهد که ۱۶٪ بهبود نسبی نسبت به پوشش مساحتی آن نشان می‌دهد. این موضوع تأیید می‌کند که استقرار دوربین‌ها در مکان‌های دقیق‌تر و با در نظر گرفتن الگوهای ترافیکی، کارایی بسیار بالاتری دارد.

اگر از نظر هزینه‌های اقتصادی دو روش مقایسه شود باید مناسب‌ترین معیار را انتخاب کرد زیرا مسلماً روش‌هایی که پوشش بیشتری داشته‌اند هزینه بیشتری را هم طلب می‌کنند. بنابراین مجموع هزینه‌های خرید و نصب دوربین در یک روش به جمع پیکسل پایش شده در یک روش تقسیم می‌شود تا هزینه پایش تصویری یک پیکسل بدست آید. اکنون با فرض پایش تصویری تمام مسیر های یک شهر، این مقدار باید در مساحت مسیرها ضرب شود. هزینه نهایی دو روش در شکل ۸ نمایش داده شده است و به خوبی مشخص است که روابط بخش ۴ هزینه را به طور قابل توجه کاهش داده است.



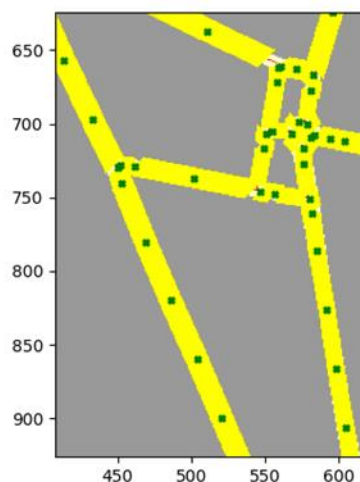
شکل ۸: نمایش تحقق هدف اقتصادی بودن روش پیشنهادی

Fig. 8: Demonstration of achieving the goal of economic efficiency of the proposed method



شکل ۷: نمایش کارایی روش پیشنهادی در پایش ترافیک

Fig. 7: Showing the efficiency of the proposed method in traffic monitoring



path no,	camera x,y position,	slope	156	1248	428	1.004
path no,	camera x,y position,	slope	157	1038	175	0.32
path no,	camera x,y position,	slope	157	1063	183	0.24
path no,	camera x,y position,	slope	157	1088	189	0.28
path no,	camera x,y position,	slope	157	1113	196	0.24
path no,	camera x,y position,	slope	157	1138	202	0.28
path no,	camera x,y position,	slope	157	1163	208	0.32

شکل ۶: جانمایی دوربین‌ها به شکل نقطه سبز در شکل بالا و در نقشه شهر، موقعیت مکانی و زاویه دوربین‌ها در پایین شکل.

Fig. 6: Camera placement as green dots in the top figure and on the city map, the location and angle of the cameras are at the bottom of the figure

۱۰۰۰۰۰ داده جدید ایجاد شد تا نتایج بر اساس داده‌هایی که بر اساس آنها مدل طراحی نشده و روش بر روی آنها اعمال نگردیده در شرایط یکسان آزمایش‌ها صورت گیرد و دو روش برای آنها امتحان گردد. در این پژوهش، ایده اصلی به حداکثر رساندن پوشش طول سفرهای شهری به جای تمرکز صرف بر حداکثرسازی مساحت تحت پوشش بود. نتایج آزمایش انجام‌شده در شکل ۷ نشان داده که رویکردهای مختلف، تأثیرات متفاوتی بر کارایی سیستم نظارتی دارند. در روش اول که با الگوریتم حریصانه انجام شد، بیش از ۹۱٪ مساحت پوشش داده شد، اما این روش تنها ۲٪ بهبود در پوشش طول سفرهای شهری نسبت به

نتیجه‌گیری

این پژوهش برای اولین بار بهینه‌سازی دوربین‌های مدار بسته شهری را در نقشه اصلی یک شهر مورد بررسی قرار داد و چون به دلیل محدودیت هزینه، توسعه پایش تصویری در طی چندین سال صورت می‌گیرد دو عامل مهم میزان ترافیک مسیر و هزینه نهایی را در این پروسه زمان بر مطرح نمود. روش‌ها و پژوهش‌های قبل به طور اساسی در این فرآیند قابل پیاده‌سازی عملی نبودند و لازم بود از منظر درست و با شیوه صحیح به این کاربرد خاص از یک مساله پژوهشی معمول نگاه شود. بنابر این ایده اصلی، به حداکثر رساندن پایش تصویری در طول سفر شهری به جای حداکثر کردن محدوده پوشش شهری بود. بنابراین، زمانی که مساحت با استفاده از الگوریتم حریصانه به حداکثر رسید، به طور متوسط تنها ۲ درصد بیشتر را پوشش داد اما این مقدار در روش پیشنهادی ۱۸ درصد بود. این بدین معنی است که هدف حداکثر پوشش در مسیرهای شهری ۴۰ درصد کمتر از روش پیشنهادی که مبتنی بر داده‌های ترافیکی است کارایی دارد. در نتیجه هر روشی که محدوده پوشش را در مسیرهای شهری در نظر بگیرد اثربخشی نخواهد داشت و سنجش ترافیک عامل مهمی برای بهینه‌سازی است. همچنین روش‌های انجام شده در پیشینه تحقیق به دلیل آنکه منطقه مورد بررسی را شبکه‌بندی می‌کند و سپس با الگوریتم‌های مختلف بدنبال یافتن مناسب‌ترین نقاط در شبکه ایجاد شده می‌گردد وابسته به شکل هندسی ناحیه مورد بررسی است. اما در روش پیشنهادی مسیرها به اسکلت مسیر تبدیل شده و وابستگی به هندسه مسیر کاملاً حذف می‌شود. بنابراین تغییر نقشه یا ابعاد نقشه و توپولوژی آن در مدل‌سازی ظاهر نشده و روش پیشنهادی کاملاً مقیاس پذیر می‌شود.

هدف دوم بهینه‌سازی این پژوهش کاهش هزینه بود. برنامه‌ریزان شهری معمولاً دوربین‌های با میدان دید و برندهای متفاوت را برای بخش‌های متنوع شهری خریداری می‌کنند که می‌تواند یک فرصت باشد. با روش برنامه ریزی خطی عدد صحیح، تنوع قیمت و میدان دید مدل‌سازی شد و روش پیشنهادی تا ۶۶ درصد صرفه جویی داشت. دسترسی به اطلاعات مربوط به سیستم‌های پایش شهری با چالش‌های عمده‌ای مواجه است، چرا که این داده‌ها غالباً ماهیت امنیتی داشته و به سادگی در اختیار پژوهشگران قرار نمی‌گیرند. این محدودیت دسترسی، موجب کاهش منابع داده‌ای معتبر شده و پژوهشگر را به استفاده از اطلاعات اینترنتی سوق می‌دهد. علیرغم این محدودیت، تلاش شده دقت و قابلیت اطمینان نتایج تحقیق حفظ گردد.

برای بهبود دقت مدل پیشنهادی در کارهای آینده، می‌توان هر مسیر عریض را به دو مسیر مجزا تقسیم کرد. این تقسیم‌بندی امکان شناسایی دقیق‌تر نقاط نصب دوربین‌ها را فراهم می‌سازد و دقت پوشش نظارتی را افزایش می‌دهد. همچنین مدل‌سازی موانع طبیعی غیرقابل رفع مانند کوه‌ها، رودخانه‌ها یا ساختمان‌های تاریخی باید در کارهای آتی به طور جداگانه مدنظر قرار گیرد. همچنین توسعه الگوریتم‌های مسیریابی در واقعی تر شدن ترافیک مجازی بسیار با اهمیت است. می‌توان معیارهایی

مانند زمان سفر، مصرف سوخت یا آلاینده‌گی را نیز در محاسبات وارد کرد و مدل‌سازی را کامل تر نمود. همچنین در صورت دسترسی به داده‌های ترافیکی واقعی و جامع یک شهر، توصیه می‌شود این داده‌ها جایگزین داده‌های مجازی مورد استفاده در مدل شوند. هرچند داده‌های واقعی برای شهرهای اندکی در جهان وجود دارد اما در صورت وجود می‌تواند الگوهای ترافیکی دقیق‌تر و قابل اعتمادتری را ارائه دهند که منجر به نتایج بهینه‌تر می‌شود.

مشارکت نویسندگان

در این مقاله نویسندگان به نسبت برابر مشارکت داشته‌اند.

تعارض منافع

«هیچگونه تعارض منافع توسط نویسندگان بیان نشده است.»

سپاسگزاری

از واحد پژوهش دانشگاه آزاد اسلامی واحد علوم و تحقیقات به واسطه همراهی در این پژوهش سپاسگزاریم.

منابع و مآخذ

- [1] Li Y, Cheng Z, Yao X, Kong Z, Wang Z, Liu M. Multi-Objective Optimal Deployment of Road Traffic Monitoring Cameras: A Case Study in Wujiang, China. Sustainability. 2023 Aug 4;15(15):12011. <https://doi.org/10.3390/su151512011>
- [2] Mohanty A, Mohapatra AG, Mohanty SK. Real-time traffic monitoring with AI in smart cities. In: Lecture Notes in Intelligent Transportation and Infrastructure. Cham: Springer Nature Switzerland; 2025. p. 135–65. https://doi.org/10.1007/978-3-031-72959-1_7
- [3] Wu H, Yang J, Yuan M-D, Li X. Heuristic optimal scheduling for road traffic incident detection under computational constraints. Sensors (Basel) [Internet]. 2024;24(22). <https://doi.org/10.3390/s24227221>
- [4] Zhang X, Feng Y, Angeloudis P, Demiris Y. Monocular Visual Traffic Surveillance: A Review. IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems [Internet]. 2022 Sep 1 [cited 2024 Mar 9];23(9):14148–65. DOI: 10.1109/TITS.2022.3147770
- [5] Khan SW, Hafeez Q, Khalid MI, Alroobaea R, Hussain S, Iqbal J, et al. Anomaly Detection in Traffic Surveillance Videos Using Deep Learning. Sensors [Internet]. 2022 Jan 1;22(17):6563. <https://doi.org/10.3390/s22176563>
- [6] Sindhu VS. Vehicle Identification from Traffic Video Surveillance Using YOLOv4. 2021 5th International Conference on Intelligent Computing and Control Systems (ICICCS). 2021 May 6. DOI: 10.1109/ICICCS51141.2021.9432144
- [7] Zahra A, Ghafoor M, Munir K, Ullah A, UI Abideen Z. Application of region-based video surveillance in smart cities

efficient Bi-level optimization approach. *Journal of Building Engineering* [Internet]. 2023 Jul 3; 77:107257.

[19] Kumar A, Ramachandran V, Rashid M, Javed AR, Islam S, Abdullah Al Hejaili. An Intelligent Traffic Monitoring System in Congested Regions with Prioritization for Emergency Vehicle Using UAV Networks. *Tsinghua Science & Technology* [Internet]. 2025 Mar 3 [cited 2025 Apr 3]; 30(4):1387–400. DOI: 10.26599/TST.2023.9010078

[20] Gupta H, Verma OP. Monitoring and surveillance of urban road traffic using low altitude drone images: a deep learning approach. *Multimedia Tools and Applications*. 2021 Jun 16. <https://doi.org/10.1007/s11042-021-11146-x>

[21] Seau Chen Houn, Pal A, Lin JJ. 4D BIM and Reality Model-Driven Camera Placement Optimization for Construction Monitoring. *Journal of construction engineering and management*. 2024 Jun 1; 150(6). <https://doi.org/10.1061/JCEMD4.COENG-1460>

[22] Alihodzic A, Tuba E, Tuba M. Optimizing Camera Placement for Maximum Coverage of Simple Polygons with Holes: Deterministic Approaches and Swarm Intelligence Algorithms. *Springer tracts in nature-inspired computing*. 2024 Sep 25;389–409. https://doi.org/10.1007/978-981-97-5979-8_18

[23] Almousa M, Ehr Gott M, Kheiri A. Exploring the Optimal Camera Placement Problem and Its Relationship with the Set Covering Problem. *Lecture Notes in Operations Research*. 2024; 295–306. https://doi.org/10.1007/978-3-031-61589-4_23

[24] Sumi, Menon V. An Efficient Graph Based Approach for Reducing Coverage Loss from Failed Cameras of a Surveillance Network. *IEEE Sensors Journal* [Internet]. 2022 Mar 8 [cited 2025 Jun 23];22(8):8155–63. Available from: <https://ieeexplore.ieee.org/abstract/document/9730884/> DOI: 10.1109/JSEN.2022.3157819

[25] Du Y, Wang F, Zhao C, Zhu Y, Ji Y. Quantifying the performance and optimizing the placement of roadside sensors for cooperative vehicle-infrastructure systems. *IET Intelligent Transport Systems*. 2022; Apr 11; 16(7):908–25. <https://doi.org/10.1049/itr2.12185>

[26] Altahir, A. A., Asirvadani, V. S., Sebastian, P., Hamid, N. H. B., & Ahmed, E. F. Optimizing visual sensors placement with risk maps using dynamic programming. *IEEE Sensors Journal*, 2021; 22(1), 393-404. <https://doi.org/10.1109/jsen.2021.3127989>.

[27] Bisagno, N., Xamin, A., De Natale, F., Conci, N., & Rinner, B. Dynamic camera reconfiguration with reinforcement learning and stochastic methods for crowd surveillance. *Sensors*, 2020; 20(17), 4691. <https://doi.org/10.3390/s20174691>.

[28] Ezzat, M. A., Abd El Ghany, M. A., Almotairi, S., & Salem, M. A. M. Horizontal review on video surveillance for smart cities: Edge devices, applications, datasets, and future trends. *Sensors*, 2021; 21(9), 3222. <https://doi.org/10.3390/s21093222>.

[29] Heyns, A. M. Optimisation of surveillance camera site locations and viewing angles using a novel multi-attribute, multi-objective genetic algorithm: A day/night anti-poaching

using deep learning. *Multimedia Tools and Applications*. 2021 Dec 27. <https://doi.org/10.1007/s11042-021-11468-w>

[8] Cao Y, Zhang J, Yu Z, Xu K. Neural Observation Field Guided Hybrid Optimization of Camera Placement. *IEEE Robotics and Automation Letters* [Internet]. 2024 Aug 19;9(11):9207–14. Available from: <https://ieeexplore.ieee.org/abstract/document/10638696/> DOI: 10.1109/LRA.2024.3445634

[9] Tahir M, Qiao Y, Kanwal N, Lee B, Asghar MN. Real-Time Event-Driven Road Traffic Monitoring System Using CCTV Video Analytics. *IEEE Access*. 2023 Jan 1;11:139097–111. DOI: 10.1109/ACCESS.2023.3340144

[10] Rezaee K, Rezakhani SM, Khosravi MR, Moghimi MK. A survey on deep learning-based real-time crowd anomaly detection for secure distributed video surveillance. *Personal and Ubiquitous Computing*. 2021 Jun 25. <https://doi.org/10.1007/s00779-021-01586-5>

[11] Arif T, Abu, Rahman M, Mahbubul Alam Joarder. Vision-based real-time traffic flow monitoring system for road intersections in Dhaka city. *Applied Intelligence*. 2025 Jun 19;55(11). <https://doi.org/10.1007/s10489-025-06631-x>

[12] Anirudh Puligandla V, Loncaric S. A Multi-Resolution Approach for Large Real-World Camera Placement Optimization Problems. *IEEE Access*. 2022;1–1. DOI: 10.1109/ACCESS.2022.3176817

[13] Liu C, Liu Z, Chai Y, Liu T. Review of Virtual Traffic Simulation and Its Applications. *Journal of Advanced Transportation*. 2020 Jun 19;2020:1–9. <https://doi.org/10.1155/2020/8237649>

[14] Chao Q, Bi H, Li W, Mao T, Wang Z, Lin MC, et al. A Survey on Visual Traffic Simulation: Models, Evaluations, and Applications in Autonomous Driving. *Computer Graphics Forum* [Internet]. 2019 Jul 15;39(1):287–308. <https://doi.org/10.1111/cgf.13803>

[15] Bazán Guillén A, Barbecho Bautista P, Aguilar Igartua M. RUTGe: Realistic urban traffic generator for urban environments using deep reinforcement learning and SUMO simulator. In: *Proceedings of the 11th International Conference on Vehicle Technology and Intelligent Transport Systems*. SCITEPRESS - Science and Technology Publications; 2025. p. 557–64. <https://doi.org/10.5220/0013375000003941>

[16] Song H, Min O. Statistical traffic generation methods for urban traffic simulation. 2018 20th International Conference on Advanced Communication Technology (ICACT). 2018 Feb 1. DOI: 10.23919/ICACT.2018.8323712

[17] Zhou J, Deng H, Zhao Z, Zou Y, Wang X. Sensor Placement Optimization of Visual Sensor Networks for Target Tracking Based on Multi-Objective Constraints. *Applied Sciences* [Internet]. 2024 Feb 20 [cited 2025 Jun 23];14(5):1722–2. Available from: <https://www.mdpi.com/2076-3417/14/5/1722> <https://doi.org/10.3390/app14051722>

[18] Chen Z, Lai Z, Song C, Zhang X, Cheng JCP. Smart camera placement for building surveillance using OpenBIM and an



مهدی اسماعیلی در حال حاضر دانشیار دانشگاه آزاد اسلامی واحد کاشان است. او در سال ۲۰۱۱ مدرک دکترای خود را از دانشگاه دبرسن مجارستان و مدرک کارشناسی ارشد خود را در رشته کامپیوتر در ایران دریافت کرد. علاقمندی ایشان

در حوزه تدریس داده کاوی و یادگیری ماشین است و در حوزه‌های داده کاوی و یادگیری عمیق تحقیقات زیادی را انجام داده است. وی چندین کتاب به زبان فارسی و مقالاتی در کنفرانس‌ها و مجلات بین‌المللی منتشر کرده است.

Mehdi Esmaeili is currently an associate professor at Islamic Azad University, Kashan Branch. He received his PhD from the University of Debrecen, Hungary, in 2011 and his MSc in Computer Science from Iran. His interests lie in teaching data mining and machine learning, and he has conducted extensive research in the fields of data mining and deep learning. He has published several books in Persian and articles in international conferences and journals.

✉ mesmaeili@iau.ac.ir



محمدعلی افشار کاظمی مدرک دکترای مدیریت صنعتی، گرایش تحقیقات عملیاتی را دریافت کرده است وی استاد و عضو هیئت علمی دانشگاه آزاد اسلامی واحد تهران مرکز است. علایق او شامل منطق فازی و هوش مصنوعی است.

Mohammad Ali Afshar Kazemi holds a PhD in Industrial Management, majoring in Operations Research. He is a professor and faculty member at Islamic Azad University, Central Tehran Branch. His interests include fuzzy logic and artificial intelligence.

✉ m.afsharkazemi@iauec.ac.ir

application. Computers, Environment and Urban Systems, 2021; 88, 101638. <https://doi.org/10.1016/j.compenvurbsys.2021.101638>.

[30] Aubry A, Babu P, Braca P, De Maio A, Panwar K. Sensor placement strategies for target localization via 3D AOA measurements. IEEE Trans Aerosp Electron Syst [Internet]. 2024;1–14. DOI: 10.1109/TAES.2024.3463636

[31] Yun, W. J., Park, S., Kim, J., Shin, M., Jung, S., Mohaisen, D. A., & Kim, J. H. Cooperative multiagent deep reinforcement learning for reliable surveillance via autonomous multi-UAV control. IEEE Transactions on Industrial Informatics, 18(10), 2022; 7086-7096. <https://doi.org/10.1109/tii.2022.3143175>.

معرفی نویسندگان

AUTHOR(S) BIOSKETCHES



حسن صانعی آرانی دانش آموخته مهندسی برق – الکترونیک در مقاطع کارشناسی و کارشناسی ارشد در دانشگاه صنعتی اصفهان و دانشگاه آزاد اسلامی واحد تهران جنوب است. در حال حاضر دانشجوی دکتری مدیریت فناوری اطلاعات، گرایش کسب و کار هوشمند، دانشگاه آزاد اسلامی واحد علوم تحقیقات تهران است. او علاقه مند به پژوهش‌های کاربردی هوش مصنوعی است.

Hassan Sanei Arani holds a bachelor's and master's degree in electrical and electronic engineering from Isfahan University of Technology and Islamic Azad University, South Tehran Branch. He is currently a PhD student in Information Technology Management, Smart Business, Islamic Azad University, Tehran Science and Research Branch. He is interested in applied research in artificial intelligence.

✉ hassan.sanei@srbiu.ac.ir

Citation (Vancouver): Sanei arani H, Esmaeili M, Afshar kazimi M. [Multi-objective optimization of CCTV camera placement using artificial intelligence algorithms]. *J. RS. GEOINF. RES.* 2025; 3(2): 257-270

 <https://doi.org/10.22061/jrsgr.2025.12191.1103>



COPYRIGHTS



© 2025 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/>)



ORIGINAL RESEARCH PAPER

3D Modeling of Shir-Qaleh Castle in Shahmirzad Using UAV-Based Photogrammetry; With an Approach to Documentation, Conservation, Restoration, and Cultural Heritage Zoning

A. Shahsavari Baboukani¹, S. Sadeghian^{*1}, A. Vafaeinejad¹, D. Sedighpour²¹ Department of Geoinformation and Geomatics Engineering, Faculty of Civil, Water and Environmental Engineering, Shahid Beheshti University, Tehran, Iran² Faculty of Conservation and Restoration, University of Art, Isfahan, Iran

ABSTRACT

Received: 11 April 2025
 Reviewed: 20 May 2025
 Revised: 01 July 2025
 Accepted: 26 August 2025

KEYWORDS:

3D Modeling
 Photogrammetry
 Drone
 Cultural Heritage
 Documentation

* Corresponding author

✉ sa_sadeghian@sbu.ac.ir

☎ (+98912) 3505745

Background and Objectives: Three-dimensional modeling and documentation of immovable cultural heritage, especially in the fields of conservation, restoration, and sustainable management of these assets, play a significant role in preserving the historical and cultural identity of communities. This approach not only enables precise and comprehensive recording of the physical and spatial characteristics of historical buildings and sites but also provides a scientific basis for comparative analyses, defining heritage boundaries, damage assessment, and designing restoration programs. Utilizing technologies such as drone-based photogrammetry, as a non-destructive, accurate, and rapid method, allows for comprehensive data acquisition of historical and natural structures with minimal human intervention, facilitating documentation, analysis, and conservation/restoration planning processes. One of the notable advantages of this method is the significant reduction in costs and execution time compared to other surveying and documentation techniques, making it a cost-effective and efficient option.

The importance of this method increases in areas with challenging geographical conditions, including mountainous, inaccessible, or restricted-access regions, as it enables precise data collection without the need for prolonged onsite presence. Therefore, drone-based photogrammetry can be considered an innovative and practical solution for recording, conserving, and optimizing planning in projects related to cultural heritage.

Methods: This research was conducted in three stages: library, field, and office. In the library stage, basic information regarding the historical background, geographical location, and condition of the studied site was collected. In the field stage, ground control points were first surveyed using a dual-frequency satellite positioning receiver, and their precise coordinates were recorded to enable data georeferencing. Then, to capture accurate data of the target area, a DJI Mavic Mini 2 drone was used for aerial photography. During several planned flights, the drone captured a series of high-resolution aerial images from different angles of the castle and its surrounding environment. The images were acquired with appropriate overlap (80% longitudinal and 50% lateral) to enable accurate three-dimensional modeling.

Findings: Following the completion of field data collection and office-based processing, a set of high-accuracy and high-quality digital products was generated, serving the objectives of the research in documentation, restoration, and conservation of cultural heritage. These products included a precise 3D model of the castle structure, a digital elevation model (DEM) representing surface topography, a high-resolution Ortho mosaic map with geometric corrections, and a 2D plan illustrating the dimensions and spatial layout of architectural elements. The accuracy assessment of the 3D model, conducted using ground control points (GCPs) measured around the study site, revealed planimetric and vertical errors of 2.4 cm and 1.9 cm, respectively, indicating a high level of precision in the final results. Additionally, a topographic map featuring contour lines and a comprehensive site map encompassing all natural and man-made features within the study area were produced. These data provide a solid foundation for environmental analyses, boundary delineation, and risk assessments, effectively supporting processes related to the conservation, restoration, and sustainable management of cultural heritage.

Conclusion: The use of drone-based photogrammetry in the documentation and three-dimensional modeling of cultural heritage, as a non-destructive, accurate, and cost-effective method, has brought a remarkable transformation in the approaches to recording and conserving historical sites. This technology, utilizing high-resolution aerial images and image processing techniques, enables the production of precise three-dimensional models of buildings, sites, and cultural structures. The resulting data not only provides a realistic digital representation of the current condition of the heritage assets but also serves as a reliable basis for specialized analyses, conservation and restoration planning, and legal documentation. One of the key applications of these data is the preparation of a three-dimensional cadastral system for cultural heritage; a process in which spatial, descriptive, and ownership information of historical assets is organized in an integrated and digital format. The 3D cadaster, relying on accurate models generated by photogrammetry, facilitates advanced spatial management, precise delineation of heritage boundaries, monitoring of changes, and prevention of encroachments or environmental damages. Particularly in areas with dense historical fabric or complex topographic conditions, this information can play a central role in managerial and legal decision-making.



NUMBER OF REFERENCES
32



NUMBER OF FIGURES
10



NUMBER OF TABLES
2

مقاله پژوهشی

مدلسازی سه‌بعدی شیرقلعه شه‌میرزاد با استفاده از فتوگرامتری پهپادمبنا؛ با رویکرد مستندسازی، حفاظت، مرمت و تعیین حریم میراث فرهنگی

ابوالفضل شه‌سواری بابوکانی^۱، سعید صادقیان^{۱*}، علیرضا وفائی‌نژاد^۱، داود صدیق‌پور^۲

^۱ گروه مهندسی نقشه برداری، دانشکده مهندسی عمران، آب و محیط زیست دانشگاه شهید بهشتی، تهران، ایران

^۲ دانشکده حفاظت و مرمت، دانشگاه هنر اصفهان، ایران

چکیده

پیشینه و اهداف: مدلسازی سه‌بعدی و مستندسازی میراث فرهنگی غیرمنقول، به‌ویژه در زمینه حفاظت، مرمت و مدیریت پایدار این آثار، نقش بسزایی در حفظ هویت تاریخی و فرهنگی جوامع ایفا می‌کند. این رویکرد نه تنها امکان ثبت دقیق و جامع ویژگی‌های کالبدی و فضایی بناها و محوطه‌های تاریخی را فراهم می‌سازد، بلکه بستری علمی برای تحلیل‌های تطبیقی، تعیین حریم آثار، ارزیابی آسیب‌ها و طراحی برنامه‌های مرمتی فراهم می‌آورد. بهره‌گیری از فناوری‌هایی نظیر فتوگرامتری پهپادمبنا، به‌عنوان روشی غیرمخرب، دقیق و سریع، امکان ثبت اطلاعات جامع از ساختارهای تاریخی و طبیعی را با حداقل دخالت انسانی فراهم کرده و موجب تسهیل در فرآیندهای مستندسازی، تحلیل و برنامه‌ریزی‌های حفاظتی و مرمتی می‌شود. یکی از مزایای برجسته این روش، کاهش چشمگیر هزینه‌ها و زمان اجرایی نسبت به روش‌های دیگر برداشت و مستندسازی است که آن را به گزینه‌ای مقرون‌به‌صرفه و کارآمد بدل می‌سازد. اهمیت این روش در مناطقی با شرایط جغرافیایی دشوار، از جمله نواحی کوهستانی، صعب‌العبور یا دارای محدودیت دسترسی، دوچندان می‌شود؛ چراکه امکان برداشت داده‌های دقیق بدون نیاز به حضور طولانی‌مدت در محل را فراهم می‌کند. بدین ترتیب، فتوگرامتری پهپادمبنا می‌تواند به عنوان راهکاری نوین و عملیاتی برای ثبت، حفاظت و برنامه‌ریزی بهینه در پروژه‌های مرتبط با میراث فرهنگی مورد استفاده قرار گیرد.

روش‌ها: این پژوهش در سه مرحله کتابخانه‌ای، میدانی و دفتری انجام پذیرفت. در مرحله کتابخانه‌ای، اطلاعات پایه‌ای درباره پیشینه تاریخی، موقعیت جغرافیایی و وضعیت سایت مورد مطالعه گردآوری شدند. در مرحله میدانی، ابتدا نقاط کنترل زمینی با استفاده از گیرنده تعیین موقعیت ماهواره‌ای سه‌فرکانسه برداشت و مختصات

تاریخ دریافت: ۲۲ فروردین ۱۴۰۴

تاریخ داوری: ۳۰ اردیبهشت ۱۴۰۴

تاریخ اصلاح: ۱۰ تیر ۱۴۰۴

تاریخ پذیرش: ۰۴ شهریور ۱۴۰۴

واژگان کلیدی:

مدلسازی سه‌بعدی

فتوگرامتری

پهپاد

میراث فرهنگی

مستندسازی

* نویسنده مسئول

sa_sadeghian@sbu.ac.ir

۰۹۱۲-۲۵۰۵۷۴۵ ①

دقیق آن‌ها ثبت گردید تا امکان هم‌مرجع‌سازی داده‌ها فراهم شود. سپس، به منظور برداشت داده‌های دقیق از محدوده مورد نظر، از پهپاد *DJI Mavic Mini 2* برای تصویربرداری هوایی استفاده شد. پهپاد طی چند پرواز برنامه‌ریزی‌شده، مجموعه‌ای از تصاویر هوایی با وضوح بالا از زوایای مختلف قلعه و محیط پیرامون آن ثبت کرد. تصاویر با همپوشانی مناسب (۸۰ درصد طولی و ۵۰ درصد عرضی) برداشت گردیده شد تا امکان مدل‌سازی سه‌بعدی دقیق فراهم گردد.

یافته‌ها: پس از انجام مراحل برداشت میدانی و پردازش‌های دفتری، مجموعه‌ای از محصولات رقومی با دقت و کیفیت بالا تولید شد که در راستای اهداف تحقیق در زمینه مستندسازی، مرمت و حفاظت میراث فرهنگی کاربرد دارند. این محصولات شامل مدل سه‌بعدی دقیق از ساختار قلعه، مدل رقومی ارتفاعی نمایش‌دهنده ارتفاعات سطح زمین، نقشه ارتوموزائیک با وضوح بالا و اصلاح‌شده از نظر هندسی، و همچنین پلان دوبعدی بازنمایی‌کننده ابعاد و موقعیت عناصر معماری بود. ارزیابی دقت مدل سه‌بعدی با استفاده از نقاط کنترل زمینی برداشت‌شده در اطراف سایت نشان داد که خطای مسطحاتی و ارتفاعی مدل به ترتیب برابر با ۲.۴ و ۱.۹ سانتی‌متر بوده که بیانگر دقت بالای نتایج حاصل است. افزون بر این، نقشه توپوگرافی همراه با نمایش منحنی‌های میزان و نیز نقشه نهایی سایت شامل کلیه عوارض طبیعی و مصنوعی موجود در محدوده مطالعه تهیه شد. این اطلاعات، بستر مناسبی برای انجام تحلیل‌های محیطی، تعیین حدود حریم سایت و ارزیابی مخاطرات فراهم آورده و نقش مؤثری در فرآیندهای حفاظت، مرمت و مدیریت پایدار میراث فرهنگی ایفا می‌کند.

نتیجه‌گیری: استفاده از فتوگرامتری پهپادمبنا در مستندسازی و مدلسازی سه‌بعدی میراث فرهنگی، به‌عنوان یک روش غیرمخرب، دقیق و مقرون‌به‌صرفه، تحولی چشم‌گیر در شیوه‌های ثبت و حفاظت آثار تاریخی ایجاد کرده است. این فناوری با بهره‌گیری از تصاویر هوایی با وضوح بالا و تکنیک‌های پردازش تصویر، امکان تولید مدل‌های سه‌بعدی دقیق از بناها، محوطه‌ها و ساختارهای فرهنگی را فراهم می‌آورد. داده‌های حاصل نه تنها بازنمایی رقومی واقع‌گرایی‌ناهنای از وضعیت موجود آثار ارائه می‌دهند، بلکه پایه‌ای قابل اعتماد برای تحلیل‌های تخصصی، برنامه‌ریزی حفاظتی و مرمتی و تهیه مستندات حقوقی محسوب می‌شوند. یکی از کاربردهای کلیدی این داده‌ها، تهیه کاداستر سه‌بعدی میراث فرهنگی است؛ فرآیندی که در آن اطلاعات مکانی، توصیفی و مالکیتی آثار تاریخی در قالبی یکپارچه و رقومی سازمان‌دهی می‌گردد. کاداستر سه‌بعدی با تکیه بر مدل‌های دقیق تولیدشده از فتوگرامتری، امکان مدیریت فضایی پیشرفته، تعیین دقیق حریم آثار، پایش تغییرات و پیشگیری از تجاوزات یا آسیب‌های محیطی را فراهم می‌سازد. به‌ویژه در مناطق با بافت تاریخی متراکم یا شرایط توپوگرافی پیچیده، این اطلاعات می‌توانند نقش محوری در تصمیم‌سازی‌های مدیریتی و حقوقی ایفا کنند.

مقدمه

ارکان اساسی در حفاظت پیشگیرانه، برنامه‌ریزی‌های مرمتی و مدیریت یکپارچه میراث، از اهمیت مضاعفی برخوردار می‌شود [۶]. تولید و بهره‌گیری از مدل‌های سه‌بعدی سایت‌های باستانی با اهداف متعددی صورت می‌گیرد که از مهم‌ترین آن‌ها می‌توان به مستندسازی دقیق، حفاظت از آثار، برنامه‌ریزی برای مرمت و بازسازی، تعیین حریم و حدود قانونی محوطه‌های تاریخی و همچنین تسهیل در انجام مطالعات پژوهشی و آموزشی اشاره نمود [۷]. مستندسازی آثار تاریخی غیرقابل انتقال (غیرمنقول) یکی از مهم‌ترین اقدامات در مسیر حفاظت و نگهداری از میراث فرهنگی است [۸]. این فرآیند بسته به نوع اثر، موقعیت مکانی، شرایط فیزیکی و میزان دقت مورد انتظار، با استفاده از روش‌ها و ابزارهای متنوعی انجام می‌شود. برای دستیابی به نتایج مطلوب، برنامه‌ریزی مناسب و انتخاب شیوه‌ای متناسب با ویژگی‌های اثر، امری ضروری است [۹]. روش‌های سنتی مانند نقشه‌برداری کلاسیک، اندازه‌گیری دستی و دیگر شیوه‌های ابتدایی، اگرچه ساده و کم‌هزینه هستند، اما دقت محدودی دارند و اجرای آن‌ها به مهارت شخصی و زمان زیادی نیاز دارد. به‌ویژه در مورد آثار با فرم‌های پیچیده و جزئیات ظریف، این روش‌ها چندان کارآمد نیستند [۱۰]. با پیشرفت

کشور عزیزمان ایران به‌واسطه موقعیت جغرافیایی منحصربه‌فرد خود، همواره بستر شکل‌گیری، تعامل و تلاقی تمدن‌های بزرگ بوده است. این جایگاه تاریخی و فرهنگی موجب شده است تا در بستر تاریخی چند هزار ساله این سرزمین، میراثی غنی، متکثر و بی‌بدیل از آثار تاریخی، معماری‌های ارزشمند، هنرهای بومی و نمادهای فرهنگی شکل گیرد [۱]. این گنجینه عظیم، نه تنها نشانگر هویت و ریشه‌های تاریخی ملت ایران است، بلکه بخشی از حافظه تاریخی بشر به‌شمار می‌آید که حفاظت و انتقال آن به آیندگان، وظیفه‌ای جهانی تلقی می‌شود [۲]. با این حال، میراث فرهنگی با تهدیدهای گوناگونی مواجه است. این تهدیدها شامل عوامل طبیعی مانند فرسایش تدریجی مصالح، تغییرات اقلیمی، زلزله، سیلاب و آتش‌سوزی و همچنین عوامل انسانی نظیر جنگ، توسعه بی‌برنامه شهری، مداخلات غیرتخصصی و بهره‌برداری نادرست می‌شوند. چنین شرایطی می‌تواند به آسیب‌هایی جدی و گاه جبران‌ناپذیر در ساختار، ارزش‌های زیبایی‌شناختی و اصالت آثار فرهنگی منجر شوند [۳، ۴، ۵]. در چنین شرایطی، مستندسازی دقیق، نظام‌مند و علمی آثار فرهنگی، به‌عنوان یکی از

تجهیزات و امکان ذخیره‌سازی و آرشیو اطلاعات برای تحلیل‌های دوره‌ای، این روش را به گزینه‌ای کارآمد و هوشمندانه در پروژه‌های مستندسازی تبدیل شده است [۱۶، ۲۲]. در نهایت، مدل‌سازی سه‌بعدی حاصل از این فرآیند، نه تنها بهینه‌سازی و تسهیل عملیات مستندسازی را به همراه دارد، بلکه زمینه‌ای علمی و کاربردی برای انجام تحلیل‌های تطبیقی، اجرای مرمت اصولی، توسعه گردشگری مجازی و آموزش‌های تخصصی در حوزه‌های فرهنگ و تاریخ فراهم می‌آورد [۲۳، ۲۴]. این رویکرد فناورانه، آینده‌نگر و اقتصادی، پاسخی دقیق و علمی به نیاز روزافزون حفاظت از میراث ارزشمند انسانی در برابر تهدیدهای فزاینده طبیعی و انسانی است [۲۵].

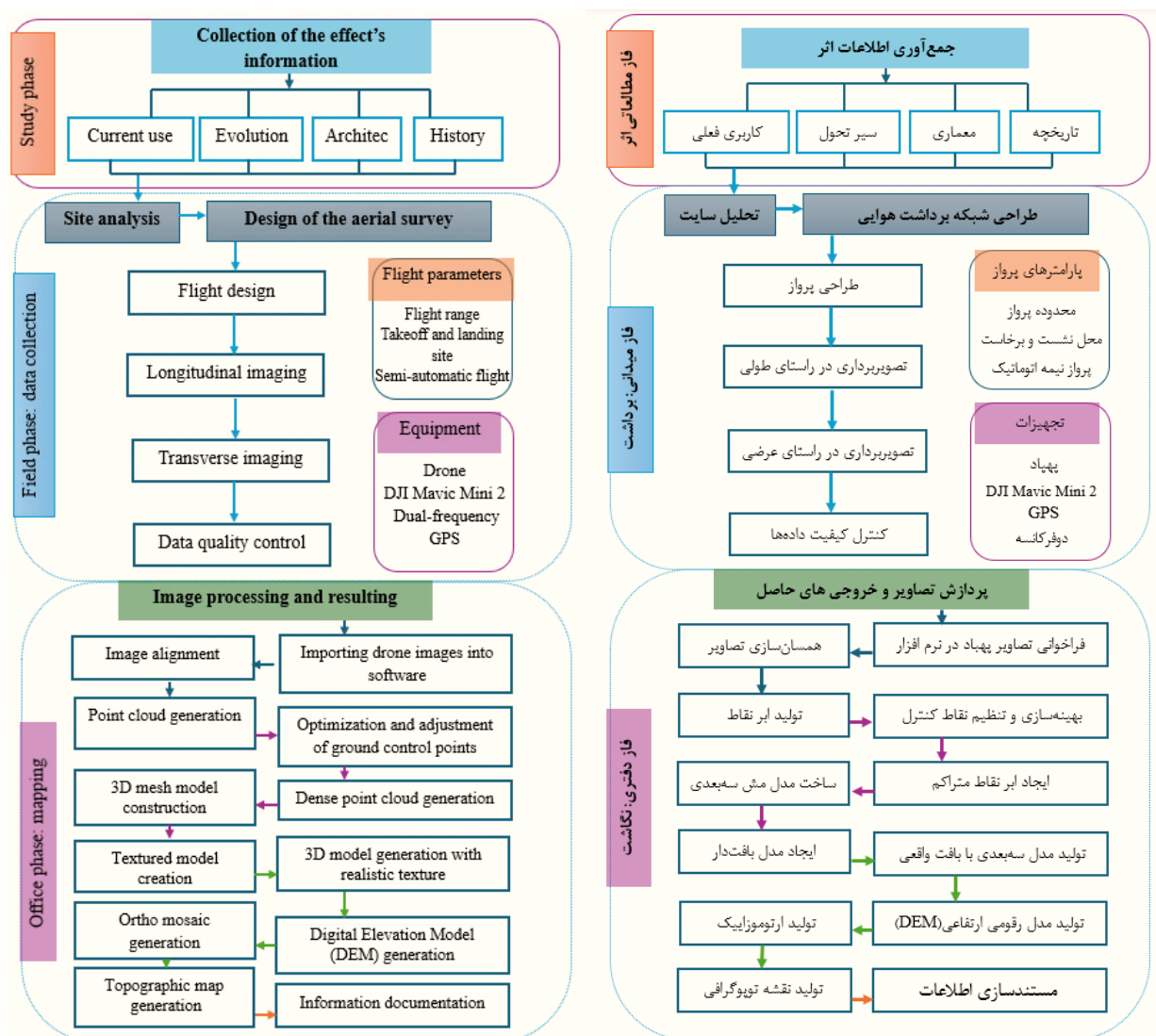
روش تحقیق

این پژوهش از نوع کاربردی بوده و در سه مرحله‌ی اصلی شامل مطالعات کتابخانه‌ای، میدانی و دفتری به انجام رسیده است. هدف اصلی این تحقیق، مدل‌سازی سه‌بعدی و مستندسازی اطلاعات مکان تاریخی- باستانی شیرقلعه شه‌میرزاد می‌باشد. در این راستا، ابتدا اطلاعات اولیه با مرور منابع مکتوب و مطالعات پیشین گردآوری شده، سپس داده‌های مورد نیاز به‌صورت میدانی از طریق تصویربرداری هوایی با استفاده از پهپاد تهیه گردیده و در نهایت در محیط‌های نرم‌افزاری پردازش و تحلیل شده‌اند. ساختار کلی انجام این پژوهش در شکل شماره (۱) ارائه شده و شامل تمامی مراحل از داده‌برداری تا تولید محصولات نهایی نظیر مدل سه‌بعدی، نقشه‌های ارتوموزایک، مدل رقومی ارتفاعی (DEM) و مستندات معماری می‌باشد. مدل سه‌بعدی حاصل، به‌عنوان پایه‌ای برای مستندسازی رقومی و دقیق بنای تاریخی و محیط اطراف آن در نظر گرفته شده است، به‌گونه‌ای که بتوان از آن در فرآیندهای مرمت، بازسازی و حفاظت از میراث فرهنگی بهره‌برداری نمود. این اقدام، نقش مهمی در حفظ اطلاعات معماری، تاریخی و فرهنگی قلعه برای نسل‌های آینده ایفا خواهد کرد.

مرحله مطالعاتی

در مرحله مطالعات کتابخانه‌ای، اطلاعات جامع و مستندی در خصوص تاریخچه، ویژگی‌های معماری و سیر تحول قلعه تاریخی شه‌میرزاد گردآوری شد. این مرحله با هدف شناخت دقیق‌تر پیشینه فرهنگی و معماری بنا و فراهم‌سازی بستر نظری مناسب برای فازهای بعدی پژوهش انجام گرفت. در ادامه، موقعیت مکانی قلعه و همسایگی‌های پیرامونی آن نیز مورد تحلیل قرار گرفت تا درک کاملی از بستر استقرار اثر به‌دست آید. بر اساس داده‌های به‌دست آمده از منابع مکتوب، نقشه‌ها و تصاویر ماهواره‌ای، طرح اولیه‌ای از ساختار کلی قلعه ترسیم شد. این طرح به‌عنوان مبنای اولیه برای برداشت میدانی مورد استفاده قرار گرفت و موجب افزایش دقت و بهره‌وری در مرحله بازدید حضوری از سایت اثر گردید.

و گسترش فناوری‌ها و نیاز به مستندسازی دقیق‌تر و سریع‌تر، استفاده از ابزارهای پیشرفته‌تر در این حوزه رایج شده است. این ابزارها که اغلب غیرمخرب، سریع و مقرون‌به‌صرفه هستند، امکان ثبت اطلاعات کامل‌تری از آثار تاریخی را فراهم می‌کنند. همچنین، داده‌های رقومی به‌دست آمده از این روش‌ها، قابلیت نگهداری، تحلیل و بازتولید مجازی را نیز دارند [۱۱]. در این میان، فناوری‌های نوین همچون سنجش از دور، فتوگرامتری و اسکن لیزری، ابزارهایی کارآمد برای مستندسازی دقیق، تهیه نقشه‌های مهندسی و پلنک‌های اطلاعاتی جامع از آثار فرهنگی و تاریخی فراهم ساخته‌اند. از جمله این روش‌ها، فتوگرامتری یکی از مؤثرترین و منعطف‌ترین تکنیک‌ها در مستندسازی آثار تاریخی به‌شمار می‌آید [۱۲]. بر اساس تعریف انجمن فتوگرامتری و سنجش از دور آمریکا، فتوگرامتری به‌عنوان علم، هنر و فناوری ای است که هدف آن استخراج اطلاعات دقیق و قابل اطمینان از اجسام و پدیده‌های فیزیکی و محیطی است. این فرآیند از طریق ثبت، اندازه‌گیری و تفسیر تصاویر و الگوهای انرژی تابشی الکترومغناطیسی انجام می‌گیرد [۱۳]. فتوگرامتری، به‌عنوان روشی مبتنی بر تصویر، این امکان را فراهم می‌سازد که با استفاده از دو یا چند تصویر گرفته‌شده از زوایای مختلف نسبت به یک نمای ثابت، موقعیت و ویژگی‌های هندسی اجسام را با دقت بالا تعیین و بازسازی کند [۱۵]. این روش با استفاده از تصاویر برداشت‌شده و پردازش آن‌ها، امکان تولید مدل‌های دقیق سه‌بعدی، استخراج اطلاعات هندسی و بافتی و ایجاد نقشه‌های به‌روز از وضعیت کنونی بناها را فراهم می‌سازد [۱۴]. ویژگی‌هایی همچون عدم نیاز به تماس فیزیکی با سازه، امکان ثبت هم‌زمان بافت، رنگ، فرم و ابعاد، قابلیت ذخیره‌سازی و بازتحلیل تصاویر در زمان‌های مختلف و نیز دقت بالا در بازسازی ساختارهای هندسی، فتوگرامتری را به ابزاری بی‌بدیل در این حوزه تبدیل نموده است [۱۵]. با وجود مزایای متعدد، فتوگرامتری کلاسیک در برخی شرایط با محدودیت‌هایی روبه‌رو است؛ به‌ویژه زمانی که دسترسی مستقیم به اجزای بنا یا عوارض موردنظر دشوار یا خطرناک باشد [۱۶]. با این حال، توسعه فناوری فتوگرامتری رقومی و ادغام آن با پهپادها، این موانع را تا حد زیادی برطرف کرده است [۱۷]. پهپادهای مجهز به دوربین‌های متریک یا غیرمتریک با قابلیت تصویربرداری با وضوح بالا از زوایای مختلف و ارتفاعات کم، توانسته‌اند امکان برداشت سریع، دقیق و مقرون‌به‌صرفه اطلاعات را در فضاهای محدود یا صعب‌العبور فراهم آورند [۱۸]. فتوگرامتری مبتنی بر پهپاد، با تلفیق مزایای فتوگرامتری برد کوتاه و تصویربرداری هوایی، به یکی از کارآمدترین ابزارها در مستندسازی میراث فرهنگی تبدیل شده است [۱۹، ۲۰]. این فناوری با فراهم آوردن امکان پرواز در ارتفاع پایین، دسترسی آسان به زوایای دشوار و پیچیده، برداشت غیرتماسی و تولید مدل‌های سه‌بعدی با دقت بالا، تحولی بنیادین در شیوه‌های ثبت، تحلیل و حفاظت از آثار تاریخی ایجاد کرده است [۲۱]. علاوه بر دقت بالای داده‌های خروجی، ویژگی‌هایی نظیر هزینه اجرایی پایین، قابلیت انجام برداشت‌های مکرر، عدم نیاز به باند پروازی، سهولت در جابه‌جایی



شکل ۱: ساختار مدل‌سازی سه‌بعدی و مستندسازی سایت باستانی مورد نظر.

Fig. 1: Structure of 3D modeling and documentation of the targeted archaeological site.

مرحله میدانی

با حضور در محل قلعه، عملیات برداشت میدانی با هدف جمع‌آوری داده‌های دقیق و عینی برای فرآیند مدل‌سازی آغاز شد. در این مرحله، ابتدا نقاط کنترل زمینی (Ground Control Points) با استفاده از گیرنده سه فرکانسه تعیین موقعیت اندازه‌گیری گردید تا دقت مکانی تصاویر هوایی تضمین شود. به موازات آن، ویژگی‌های معماری قلعه و محیط پیرامونی آن با بهره‌گیری از پهباد و از طریق تصویربرداری هوایی با هم‌پوشانی مناسب ثبت شد. این تصاویر، با پوشش کامل اجزای بنا از زوایای مختلف، داده‌های پایه مورد نیاز برای تولید محصولات نهایی پروژه را فراهم آوردند.

مرحله دفتری

در مرحله دفتری این پژوهش، فرآیند انتقال و سامان‌دهی تصاویر برداشت‌شده آغاز گردید. پیش از شروع پردازش، کلیه تصاویر به دقت مورد بازبینی قرار گرفتند تا نمونه‌های دارای کیفیت پایین، تکراری یا

نامناسب شناسایی شده و از مجموعه داده‌ها حذف شوند. این اقدام با هدف تضمین کیفیت داده‌های ورودی و بهینه‌سازی دقت و سرعت مراحل پردازش صورت گرفت. در گام بعد، تصاویر منتخب به نرم‌افزار تخصصی وارد شده و روند پردازش آغاز شد. در ابتدا، موقعیت دقیق نقاط کنترل زمینی (GCPs) در تصاویر تعیین و تثبیت گردید تا همبستگی مکانی بین تصاویر و مختصات واقعی زمین برقرار شود و شرایط لازم برای بازسازی هندسه سه‌بعدی دقیق فراهم آید. سپس با بهره‌گیری از الگوریتم‌های پیشرفته فتوگرامتری و محاسبات دقیق ریاضی، اطلاعات سه‌بعدی از تصاویر استخراج شد. این داده‌ها مبنای تولید یک مدل سه‌بعدی واقع‌گرایانه و دقیق از قلعه تاریخی شه‌میرزاد قرار گرفتند. در ادامه، محصولات نهایی پروژه شامل مدل سه‌بعدی با بافت واقعی، مدل رقومی ارتفاعی (Digital Elevation Model)، نقشه‌های توپوگرافی و منحنی میزان و مستندسازی رقومی اطلاعات سایت و محیط اطراف آن تولید گردید.

پیشینه پژوهش

این حوزه اشاره کرد. وی در اوت ۱۹۳۵ میلادی (مرداد ۱۳۱۴ هجری شمسی) نخستین پرواز به منظور تهیه عکس‌های هوایی از مناطق باستانی ایران را با هدف مطالعات باستان‌شناسی انجام داد. مجموعه تصاویر هوایی گردآوری شده توسط او در فاصله سال‌های ۱۳۱۴ تا ۱۳۱۷ هجری شمسی، بعدها در قالب کتابی با عنوان پرواز بر فراز شهرهای باستانی ایران منتشر شد. این تصاویر که اکنون در موزه ایران باستان در تهران نگهداری می‌شوند، نه تنها از منظر فنی در تاریخ عکاسی هوایی کشور اهمیت دارند، بلکه از نظر علمی نیز نقطه آغازین استفاده نظام‌مند از تصاویر هوایی در شناسایی، مستندسازی و تحلیل میراث فرهنگی ایران به‌شمار می‌آیند [۱۳]. در جدول ۱، خلاصه‌ای از مشخصات تعدادی از پژوهش‌های داخلی و خارجی انجام‌شده در این زمینه ارائه شده است که شامل اهداف مطالعه، نوع پهپاد و سنسور مورد استفاده، نوع سایت تاریخی، خروجی‌های تولیدشده و مزایا و محدودیت‌های مشاهده‌شده در هر تحقیق می‌باشد. این جدول، نمای کلی از رویکردهای علمی موجود و مسیرهای پژوهشی طی شده در حوزه مدلسازی سه‌بعدی آثار تاریخی با فناوری‌های نوین را ارائه می‌دهد.

استفاده از تصاویر هوایی به‌عنوان روشی برای مستندسازی میراث فرهنگی ابتدا در زمینه باستان‌شناسی مطرح شد و سپس به سایر حوزه‌ها گسترش یافت. نخستین تلاش‌ها برای استفاده از پهپادها (از نوع هلی کوپتر) به منظور اخذ تصاویر هوایی در فتوگرامتری معماری به پروژه تصویربرداری راه‌آهن معلق شهر ووپتال آلمان در سال ۱۹۸۰ بازمی‌گردد. در این پروژه، امکان استفاده از هلی کوپتر هدایت از راه دور برای حمل دوربین و گرفتن تصاویر هوایی استفاده شد. این روش در سال ۲۰۰۰ برای مستندسازی و مدل‌سازی سه‌بعدی یک آسیاب تاریخی در شهر آگینبورگ در شمال شرق استرالیا و همچنین برطرف کردن نواقص اطلاعاتی اخذ زمینی (مانند تصاویر بام) مورد استفاده قرار گرفت. در این پروژه، مدل‌های حاصل از تصاویر هوایی و زمینی با هم یکپارچه و شبکه‌بندی شدند که از نخستین نمونه‌های استفاده از پهپاد در فتوگرامتری معماری به‌شمار می‌آید [۱۱]. در زمینه بهره‌گیری از تصاویر هوایی برای مستندسازی و پژوهش در حوزه میراث فرهنگی ایران، می‌توان به فعالیت‌های پیشگامانه اریک فردریش اشمیت، باستان‌شناس آمریکایی، به‌عنوان نخستین گام‌های مؤثر در

جدول ۱: خلاصه‌ای برخی از مطالعات پیشین انجام‌شده توسط محققان، در حوزه فتوگرامتری مبتنی بر پهپاد و مدلسازی سه‌بعدی میراث فرهنگی.

Table1: A summary of selected previous studies conducted by researchers in the field of UAV-based photogrammetry and 3D modeling of cultural heritage.

ردیف Row	عنوان تحقیق Research title	نتایج Results
1	مدلسازی سه‌بعدی به‌منظور مستندنگاری، مرمت و تعیین حریم قلعه دولت‌آباد قم با استفاده از تصاویر پهپاد. 3D modeling for documentation, restoration, and boundary determination of Dolatabad Castle in Qom using drone imagery.	در این مطالعه، مدلسازی سه‌بعدی قلعه دولت‌آباد با هدف مستندسازی و مرمت آن انجام شد. در نهایت، با بهره‌گیری از نتایج حاصل، این اثر در فهرست آثار ملی به ثبت رسید [۱]. In this study, 3D modeling of Dolatabad Castle was carried out for the purpose of documentation and restoration. Ultimately, using the obtained results, this site was registered on the National Heritage List [1].
2	معرفی روش غیرمخرب فتوگرامتری در مطالعه و برداشت بناهای تاریخی. Introduction of the non-destructive photogrammetry method in the study and surveying of historical buildings.	در این مطالعه، کارایی فتوگرامتری به‌عنوان روشی غیرمخرب و دقیق برای مستندسازی و حفاظت از میراث فرهنگی مورد بررسی قرار گرفته است [۲]. In this study, the effectiveness of photogrammetry as a non-destructive and precise method for documenting and preserving cultural heritage has been examined [2].
3	کاربرد فتوگرامتری پهپادمبنا در مدلسازی سه‌بعدی سایت‌های باستانی. Application of drone-based photogrammetry in 3D modeling of archaeological sites.	در این مطالعه، مدلسازی سه‌بعدی پل حاج سید محمد، از آثار ملی ثبت‌شده در شهر زنجان با بهره‌گیری از فتوگرامتری مبتنی بر پهپاد انجام شد و بر نقش مؤثر این روش در حفاظت، بازسازی و مرمت میراث فرهنگی تأکید گردید [۱۲]. In this study, 3D modeling of Haj Seyed Mohammad Bridge, a registered national heritage site in Zanjan, was carried out using drone-based photogrammetry, highlighting the method's effective role in the preservation, reconstruction, and restoration of cultural heritage [12].
4	مدلسازی سه‌بعدی میراث معماری با به‌کارگیری فتوگرامتری پهپاد؛ مطالعه موردی: کاروانسرای دیرگچین. 3D modeling of architectural heritage using drone photogrammetry; Case study: Dirgachin Caravanserai.	در این مطالعه، مدلسازی سه‌بعدی کاروانسرای دیرگچین با استفاده از فتوگرامتری مبتنی بر پهپاد انجام شد و نتایج به‌دست‌آمده نشان‌دهنده توانمندی بالای این روش در تهیه مدل‌های سه‌بعدی از میراث معماری است [۸]. In this study, 3D modeling of Dirgachin Caravanserai was carried out using drone-based photogrammetry, and the results demonstrated the high capability of this method in producing 3D models of architectural heritage [8].
5	بررسی جایگاه مهندسی ژئوماتیک در کاربردهای میراث فرهنگی - باستان‌شناسی و معماری. Investigation of the role of geomatics engineering in cultural heritage, archaeology, and architectural applications.	این مطالعه به بررسی نقش و کارایی روش‌های مهندسی ژئوماتیک، از جمله فتوگرامتری و سنجش از دور، در فرآیند مستندسازی، مرمت و حفاظت از میراث فرهنگی می‌پردازد و بر جنبه‌هایی چون دقت، زمان، هزینه و استاندارد سازی این روش‌ها تأکید دارد [۱۳]. This study examines the role and effectiveness of geomatics engineering methods, including photogrammetry and remote sensing, in the processes of documentation, restoration, and preservation of cultural heritage, emphasizing aspects such as accuracy, time, cost, and standardization of these methods [13].

ردیف Row	عنوان تحقیق Research title	نتایج Results
6	مستندسازی، مدل‌سازی سه‌بعدی و تجسم میراث فرهنگی با استفاده از فتوگرامتری پهپاد و اسکنرهای لیزری زمینی.	این مطالعه با بهره‌گیری از تکنیک‌های اسکن لیزری زمینی و فتوگرامتری پهپادی به مستندسازی میراث فرهنگی پرداخته و به مقایسه دقت، هزینه و ویژگی‌های فنی هر یک از این روش‌ها می‌پردازد [۱۷]. This study utilizes terrestrial laser scanning and drone photogrammetry techniques for the documentation of cultural heritage, comparing the accuracy, cost, and technical characteristics of each method [17]. در این مطالعه با ارزیابی دقت فتوگرامتری پهپادی در مدل‌سازی سه‌بعدی استوای معبد پگولینگان نشان می‌دهد که این روش با دقت بالا، ابزاری قابل اعتماد برای مستندسازی و مدیریت حفاظتی میراث فرهنگی است [۲۶]. This study, by evaluating the accuracy of drone photogrammetry in 3D modeling of the Pegulingan Temple stupa, demonstrates that this method is a highly accurate and reliable tool for the documentation and protective management of cultural heritage [26]. در این مطالعه، از فتوگرامتری پهپادی به منظور پایش و مستندسازی دقیق دیوارهای تاریخی برگامو یکی از میراث‌های ثبت‌شده در فهرست یونسکو استفاده شده است تا زمینه‌ای برای حفاظت و نگهداری مؤثر در برابر آسیب‌های محیطی و انسانی فراهم شود [۲۷]. In this study, drone photogrammetry was used for the precise monitoring and documentation of the historic walls of Bergamo, a UNESCO World Heritage site, providing a basis for effective protection and maintenance against environmental and human-induced damage [27]. در این مطالعه، به منظور مستندسازی و مدل‌سازی سه‌بعدی واقع‌گرایانه مسجد گدیک احمد پاشا، از فتوگرامتری مبتنی بر پهپاد استفاده شده است؛ نتایج نشان‌دهنده کارایی بالای این روش در حفاظت و ثبت میراث فرهنگی می‌باشد [۲۸]. In this study, drone-based photogrammetry was used for the documentation and realistic 3D modeling of Gedik Ahmet Pasha Mosque; the results demonstrate the high efficiency of this method in the preservation and recording of cultural heritage [28].
7	مدلسازی سه‌بعدی با استفاده از تکنیک فتوگرامتری پهپاد برای مستندسازی رقومی بناهای میراث فرهنگی. 3D modeling using drone photogrammetry technique for the digital documentation of cultural heritage buildings.	
8	فتوگرامتری پهپاد برای حفظ میراث فرهنگی: مدل‌سازی و نقشه‌برداری دیوارهای ونیزی برگامو ایتالیا. Drone photogrammetry for cultural heritage preservation: modeling and surveying the Venetian walls of Bergamo, Italy.	
9	مدلسازی سه‌بعدی واقع‌گرایانه با استفاده از پهپاد: مسجد گدیک احمد پاشا در افیون قره‌حصار ترکیه. Realistic 3D modeling using drones: Gedik Ahmet Pasha Mosque in Afyonkarahisar, Turkey.	

چشمه‌ها، بارندگی و احتمالاً قنوات بوده است. بر اساس روایات تاریخی، ساکنان قلعه با احداث بنایی برج‌مانند در دامنه کوه و ایجاد راه‌پله‌های مارپیچ، امکان انتقال آب از چشمه‌های خودجوش پای‌کوه به قلعه را فراهم می‌ساختند. در حال حاضر، بسیاری از فضاهای داخلی قلعه در زیر خاک مدفون شده‌اند، اما برج‌ها، باروها و دیوارهای آن همچنان پابرجا هستند و تصویری نسبتاً کامل از ساختار دفاعی و معماری آن ارائه می‌دهند. این بنا با شماره ثبت ۴۴۲۷ در تاریخ ۵ آذر ۱۳۸۰ در فهرست آثار ملی ایران به ثبت رسیده است [۲۹، ۳۱]. شکل (۲) نمایی از مجموعه تاریخی شیرقلعه شه‌میرزاد را نمایش می‌دهد که چشم‌انداز کلی قلعه را به‌خوبی نشان می‌دهد.



شکل ۲: تصویر هوایی سایت باستانی شیرقلعه شه‌میرزاد.
Fig. 2: Aerial view of the archaeological site of Shirghaleh Shahr Mirzad.

معرفی سایت باستانی - تاریخی شیرقلعه شه‌میرزاد
شیرقلعه شه‌میرزاد، یکی از آثار تاریخی و فرهنگی مهم استان سمنان، در فاصله حدود سه کیلومتری شمال غرب شهر شه‌میرزاد در شهرستان مهدی‌شهر واقع شده است. این شهر در حدود ۲۴ کیلومتری شمال سمنان قرار دارد. موقعیت جغرافیایی قلعه در میان دو رشته‌کوه و در دره‌ای کوهستانی است که ساختار تدافعی آن را تقویت کرده است. آثار قلعه بر فراز قله کوه شمالی در این منطقه قابل مشاهده است. شیرقلعه از نظر تاریخی و معماری، از پناهگاه‌های مهم و مستحکم اسپهبدان طبرستان به شمار می‌رود و در ردیف قلعه‌های سارو دسته‌بندی می‌شود. بر پایه مطالعات باستان‌شناسی، زیرساخت‌های قلعه به دوره‌های اشکانی و ساسانی بازمی‌گردد و در دوران اسلامی نیز مورد استفاده قرار گرفته است. شواهد تاریخی نشان می‌دهند که این قلعه در قرون پنجم و ششم هجری قمری، به‌وسیله فرقه اسماعیلیه و از جمله گروه‌های وابسته به قلعه الموت مورد بهره‌برداری قرار گرفته و حتی احتمال وجود تونل زیرزمینی جهت انتقال آب از چشمه پای‌کوه به درون قلعه مطرح شده است [۲۹]. مصالح اصلی سازه شامل سنگ، ملات ساروج و ترکیباتی نظیر آهک، خاکستر، ماسه بادی، گل، نی و دانه‌های ریز سنگی بوده که موجب استحکام قابل توجه بنا شده است. شیرقلعه دارای هفت برج دفاعی با ابعاد و ارتفاع نامنظم است که این تفاوت‌ها به دلیل ناهمواری طبیعی سطح کوه ایجاد شده‌اند [۳۰]. تفاوت در نوع ملات‌های به‌کاررفته نیز حاکی از دوره‌های مختلف بازسازی و مرمت، به‌ویژه در دوران اسلامی است. منبع تأمین آب این قلعه کوهستانی همچون سایر قلاع مشابه،

مراحل انجام پروژه

در مرحله نخست این پژوهش، به منظور افزایش دقت مکانی و ژئورفرنس تصاویر هوایی، شش نقطه کنترل زمینی (GCPs) در محدوده مورد مطالعه اندازه‌گیری و برداشت گردید. این نقاط با استفاده از گیرنده سه فرکانسه تعیین موقعیت و با دقت بالا در موقعیت‌های استراتژیک در سطح منطقه انتخاب و ثبت شدند. هدف از تعیین این نقاط، ایجاد مرجع‌های مکانی قابل اطمینان برای تصحیح هندسی تصاویر هوایی و بهبود دقت فرآیند مدلسازی سه‌بعدی در مراحل بعدی بود. استقرار نقاط کنترلی در مکان‌های کلیدی باعث شد تا صحت داده‌های مکانی تضمین شده و تمام مراحل بعدی از جمله پردازش تصاویر، تولید ابرنقاط و مدل‌سازی سه‌بعدی، با دقت و انسجام بالا انجام پذیرد. شکل (۳) نمونه‌ای از نقطه کنترلی تعیین‌شده در منطقه را نمایش می‌دهد که گیرنده تعیین موقعیت زمینی GPS سه فرکانسه در حال ثبت مختصات دقیق آن است. این نقاط نقش حیاتی در همسان‌سازی صحیح مدل سه‌بعدی با موقعیت واقعی زمین ایفا می‌کنند.

در ادامه، تحلیل دقیق سایت از منظر توپوگرافی، موانع طبیعی، سازه‌های موجود و عوامل محیطی انجام شد تا پیش‌نیازهای لازم برای پرواز ایمن

و مؤثر پهپاد فراهم شود. بر اساس این تحلیل، شبکه‌ای منظم برای برداشت هوایی طراحی شد که امکان تصویربرداری با پوشش کامل و همپوشانی مناسب را فراهم آورد. محدوده پرواز به دقت تعیین شد و محل‌های مناسب برای نشست و برخاست پهپاد، با توجه به شرایط فیزیکی منطقه و امنیت عملیات، انتخاب گردید. در ادامه برای تصویربرداری هوایی از محدوده مورد مطالعه از پهپاد DJI Mavic Mini 2 به‌عنوان ابزار تصویربرداری هوایی استفاده گردید. در طول عملیات پروازی، پهپاد تصاویر هوایی متعددی با وضوح و کیفیت بالا از زوایای مختلف قلعه و محدوده اطراف آن ثبت نمود. این تصاویر به‌عنوان داده‌های پایه در مراحل بعدی پروژه، به‌ویژه در فرآیند تولید ابرنقاط، ساخت مدل سه‌بعدی و تحلیل‌های ساختاری مورد استفاده قرار گرفتند. شکل (۴) پهپاد مورد استفاده در عملیات تصویربرداری هوایی این پژوهش را نشان می‌دهد.

همچنین، جدول شماره (۲) مشخصات فنی پهپاد DJI Mini 2 و سنجنده نصب‌شده بر روی آن را به‌صورت جامع نمایش می‌دهد. ارائه این اطلاعات به منظور درک بهتر از توانمندی‌های فنی پهپاد و ارزیابی میزان انطباق آن با اهداف مدلسازی سه‌بعدی انجام شده است.



شکل ۳: اندازه‌گیری و ثبت نقاط کنترل زمینی تعیین‌شده در اطراف قلعه با استفاده از گیرنده تعیین موقعیت.
Fig. 3: Measurement and recording of ground control points (GCPs) around the castle using a positioning receiver



شکل ۴: پهپاد DJI Mavic Mini 2 که در عملیات تصویربرداری هوایی پروژه به کار گرفته شده است.
Fig. 4: DJI Mavic Mini 2 UAV used in the aerial imaging operations of the project

جدول ۲: مشخصات فنی پهپاد و سنجنده مربوطه [۳۲].

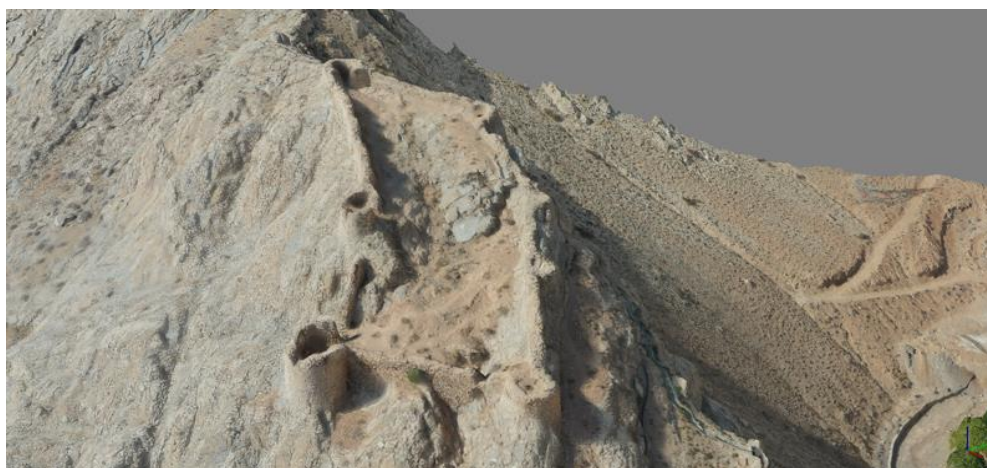
Table2: Technical specifications of the UAV and the corresponding sensor [32].

Sensor specifications		Drone specifications	
Sensor type	CMOS (Complementary Metal–Oxide–Semiconductor)	Weight	249 g
Resolution	12 MP	Dimensions (unfolded)	56 × 289 × 245 mm
Pixel size	1.55 μm	Maximum horizontal speed	16 m/s (approximately 57.6 km/h)
Image size (maximum)	4000 × 3000 px (aspect ratio 4:3)	Maximum flight time	Up to 31 minutes (in no-wind conditions)
Electronic shutter speed	1/4 to 1/8000 s	Video transmission system	OcuSync 2.0 (transmission range up to 10 km in ideal conditions)
24 mm equivalent focal length, 83° FOV, f/2.8 aperture	Lens	Flight battery	2250 mAh, 7.7 V, Li-Po
Camera stabilization	3-axis (Tilt, Roll, Pan)	Supported memory	microSD up to 256 GB

گردد. این گام، بستر لازم برای بازسازی دقیق هندسه سه‌بعدی و ارتقاء دقت مکانی نتایج نهایی را فراهم ساخت. در ادامه، فرایند هم‌راستاسازی (Alignment) تصاویر اجرا شد. این مرحله شامل استخراج ویژگی‌های مشترک میان تصاویر و محاسبه موقعیت نسبی هر تصویر در فضا بر اساس شرط هم‌خطی (Collinearity Condition) و الگوریتم‌های تطبیق خودکار (Image Matching) می‌باشد. نتیجه این فرایند، تشکیل مدل اولیه و تخمین موقعیت نسبی دوربین‌ها و ساختار کلی صحنه است. نخستین محصول قابل استخراج پس از هم‌راستاسازی تصاویر، ابر نقاط متراکم (Dense Point Cloud) است. در این مرحله، با استفاده از تکنیک‌های بازسازی سه‌بعدی، میلیون‌ها نقطه دارای مختصات فضایی دقیق از سطح شیء یا منطقه مورد مطالعه استخراج می‌شود. این ابر نقاط، بازتابی از ساختار فیزیکی و هندسی محیط بوده و پایه‌ای برای تولید مدل‌های سطحی است. در مرحله بعد، با استفاده از داده‌های حاصل از ابر نقاط متراکم، مدل مش‌بندی‌شده (Mesh) تولید می‌شود. طی این فرایند، نقاط مجزا به واسطه‌ی الگوریتم‌های بازسازی سطح به یک شبکه‌ی پیوسته از مثلث‌ها (Triangular Mesh) تبدیل می‌گردند. مدل مش حاصل، هندسه دقیق شیء یا سطح زمین را بازنمایی کرده و برای استفاده در تحلیل‌های بعدی ضروری است.

در گام بعدی، مرحله‌ی تولید بافت (Texture Mapping) انجام می‌شود. در این فرایند، رنگ واقعی سطح مدل سه‌بعدی با استفاده از داده‌های تصویری ثبت‌شده بازسازی می‌گردد. تمامی تصاویر اولیه در این مرحله مورد استفاده قرار گرفته و با بهره‌گیری از روش درون‌یابی (Interpolation)، برای هر نقطه روی مدل مش، مقدار رنگی (RGB) محاسبه و تخصیص داده می‌شود. نتیجه این مرحله، تولید یک مدل سه‌بعدی با ظاهر طبیعی و واقع‌گرایانه است که ویژگی‌های بصری سطح واقعی را با دقت بالایی بازتاب می‌دهد. شکل (۵) مدل سه‌بعدی نهایی قلعه شیرقلعه و مناطق پیرامونی آن را نمایش می‌دهد. این مدل، بازنمایی دقیقی از ساختار هندسی و ظاهر واقعی سازه‌های تاریخی موجود در سایت را ارائه می‌دهد و به عنوان خروجی نهایی فرایند مدل‌سازی سه‌بعدی، نقش کلیدی در مستندسازی، تحلیل‌های معماری-باستان‌شناسی و حفاظت رقومی از اثر تاریخی ایفا می‌نماید.

طراحی پرواز در این پروژه با استفاده از نرم‌افزار تخصصی پهپاد مورد استفاده صورت گرفت که در آن عواملی همچون ارتفاع پروازی، سرعت حرکت پهپاد، مسیر پرواز و موقعیت دقیق نقاط تصویربرداری به‌دقت در نظر گرفته شد. تصویربرداری هوایی با پهپاد که با همپوشانی در دو راستای طولی و عرضی که به ترتیب با ۸۰ و ۵۰ درصد انجام شد. این مقادیر هم‌پوشانی، امکان تولید مدل‌های دقیق سه‌بعدی را فراهم کرد و از بروز خلأهای تصویری جلوگیری نمود. در پایان عملیات میدانی (برداشت)، کنترل کیفیت اولیه داده‌ها صورت گرفت تا از کفایت وضوح تصاویر، پوشش کامل منطقه، و صحت همپوشانی اطمینان حاصل شود. در صورت وجود نقص، تصویربرداری در بخش‌های مورد نظر مجدداً تکرار گردید. این مرحله، با فراهم‌سازی داده‌های پایه‌ای دقیق و منسجم، نقش اساسی در موفقیت مراحل بعدی پروژه از جمله نگاشت سه‌بعدی ایفا نمود. پس از اتمام عملیات میدانی و برداشت تصاویر هوایی، مرحله دفتری با هدف پردازش داده‌ها و ساخت مدل سه‌بعدی دقیق از سایت تاریخی شیرقلعه شه‌میرزاد آغاز شد. این مرحله با فراخوانی تصاویر ثبت‌شده توسط پهپاد در نرم‌افزار تخصصی Agisoft Metashape آغاز گردید. نرم‌افزار Agisoft Metashape یکی از نرم‌افزارهای قدرتمند در حوزه فتوگرامتری و مدل‌سازی سه‌بعدی است که امکان پردازش تصاویر هوایی و زمینی را با دقت بالا فراهم می‌سازد. این نرم‌افزار با استفاده از تکنولوژی ساختار از حرکت (Structure from Motion) قابلیت تشخیص و همسان‌سازی خودکار نقاط مشترک در تصاویر مختلف را داراست و از طریق آن می‌توان مدل‌های سه‌بعدی واقع‌گرایانه تولید کرد. در مرحله دفتری این پژوهش، فرایند پردازش داده‌ها با انتقال، سامان‌دهی و سازمان‌دهی تصاویر برداشت‌شده آغاز شد. پیش از آغاز تحلیل‌های نرم‌افزاری، کلیه تصاویر به‌دقت مورد بازبینی اولیه قرار گرفتند تا نمونه‌های دارای کیفیت پایین، تصاویر تکراری یا دارای خطاهای فنی شناسایی و از مجموعه داده‌ها حذف شوند. این اقدام با هدف افزایش کیفیت ورودی، کاهش خطاهای احتمالی و ارتقای دقت پردازش انجام پذیرفت. در گام بعد، تصاویر منتخب به محیط نرم‌افزار تخصصی Agisoft Metashape وارد شده و روند پردازش آغاز گردید. ابتدا موقعیت دقیق نقاط کنترل زمینی (GCPs) در تصاویر شناسایی و تثبیت شد تا همبستگی مکانی بین داده‌های تصویری و مختصات مکانی واقعی برقرار



شکل ۵: مدل سه بعدی شیرقلعه شهرمیرزاد با بافت واقعی.
Fig. 5: 3D model of Shirqaleh, Shahr Mirzad with realistic texture.

استخراج نمود. ارتوموزاییک نوعی تصویر نقشه برداری شده و کاملاً ژئورفرنس شده است که از تلفیق مجموعه‌ای از تصاویر هوایی یا زمینی، پس از اعمال اصلاحات هندسی، به دست می‌آید. در فرآیند تولید آن، اثرات ناشی از توپوگرافی، تغییرات ارتفاعی و جابجایی پرسپکتیوی (Relief Displacement) به طور کامل حذف شده و هر پیکسل تصویر به موقعیت دقیق مکانی خود در سطح زمین بازتاب داده می‌شود. نتیجه‌ی این فرایند، تصویری یکنواخت، دقیق و مقیاس پذیر است که به عنوان مبنایی معتبر برای تولید نقشه‌های پایه، تحلیل‌های مکانی و مطالعات جغرافیایی کاربرد فراوان دارد. شکل (۷) نمایی از تصویر ارتوموزاییک منطقه مورد مطالعه را ارائه می‌دهد.

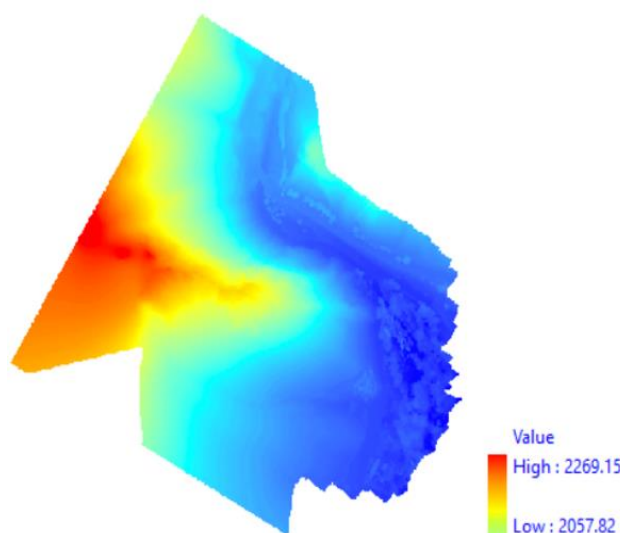
همچنین در ادامه، تحلیل توپوگرافی منطقه با هدف مشخص نمودن ویژگی‌های ارتفاعی و پستی و بلندی‌های پیرامون قلعه صورت گرفت. برای این منظور، از مختصات دقیق نقاط کنترل زمینی که در ابتدای مرحله میدانی در سطح سایت و مناطق اطراف برداشت شده بودند، بهره‌برداری شد.



شکل ۷: تصویر ارتوموزاییک منطقه مورد مطالعه.
Fig. 7: Orthomosaic image of the study area.

این نقاط به عنوان مرجع ارتفاعی مورد استفاده قرار گرفتند و امکان تولید یک مدل ارتفاعی دقیق از منطقه را فراهم کردند. بر پایه این

پس از تولید ابر نقاط متراکم و مدل مش، می‌توان با استخراج مقادیر ارتفاعی از مدل سه بعدی، اقدام به تولید مدل رقومی ارتفاعی (DEM) نمود. این مدل، نمایش عددی ارتفاع سطح زمین در قالب یک شبکه منظم از سلول‌ها (Raster) است. در واقع، DEM اطلاعات ارتفاعی نقاط مختلف سطح زمین را بدون در نظر گرفتن پوشش‌های سطحی مانند ساختمان یا درختان ارائه می‌دهد. این مدل به صورت مستقیم از داده‌های سه بعدی استخراج شده و یکی از خروجی‌های کلیدی در پروژه‌های فتوگرامتری هوایی محسوب می‌شود. شکل (۶) مدل رقومی ارتفاعی (DEM) منطقه مورد مطالعه را نمایش می‌دهد که در آن توزیع ارتفاعی سطوح زمین با تفکیک پذیری مناسب به تصویر کشیده شده است. این مدل، مبنایی برای تحلیل‌های مکانی و ارزیابی ارتفاعی منطقه محسوب می‌شود.



شکل ۶: مدل رقومی ارتفاعی (DEM) شیرقلعه شهرمیرزاد و مناطق اطراف آن.
Fig. 6: Digital Elevation Model (DEM) of Shirqaleh, Shahr Mirzad and its surrounding areas.

در مراحل نهایی پردازش فتوگرامتری، از مدل سه بعدی تولید شده می‌توان تصویر ارتوفتو (Ortho Photo) یا ارتوموزاییک (Ortho mosaic)

می‌سازد. در مجموع، تهیه این پلان به‌عنوان یکی از محصولات نهایی پروژه، نقش مهمی در مستندسازی فنی اثر، تولید اسناد معماری قابل استناد و تسهیل طرح‌های حفاظتی و مرمتی آینده ایفا می‌نماید. شکل (۹) نمایی از پلان دوبعدی قلعه تاریخی شیرقلعه شه‌میرزاد را نمایش می‌دهد که در نرم‌افزار تخصصی Autodesk Civil 3D ترسیم شده است. این نقشه با دقت بالا تهیه شده و جزئیات فنی، ساختاری و هندسی قلعه را به‌صورت دقیق و نظام‌مند ارائه می‌کند؛ به‌گونه‌ای که موقعیت دیوارها، فضاهای داخلی، ورودی‌ها و دیگر عناصر معماری موجود در سایت به‌خوبی قابل تشخیص است.

در نهایت و با توجه به تمامی مراحل انجام‌شده در این پروژه، نقشه‌ای جامع و دقیق از سایت باستانی شیرقلعه شه‌میرزاد تهیه گردید. این نقشه شامل اطلاعات توپوگرافی منطقه به همراه کلیه عوارض طبیعی و مصنوعی موجود در محدوده قلعه و پیرامون آن می‌باشد. برای افزایش خوانایی و کاربردپذیری، نقشه مزبور با لژاند (راهنمای علائم) کامل تهیه شده است تا عناصر مختلف مانند دیوارهای تاریخی، مسیرها، خطوط منحنی میزان، ارتفاعات، پوشش گیاهی و دیگر ساختارهای طبیعی و انسانی به‌وضوح تفکیک و شناسایی شوند. این نقشه نهایی، در کنار مدل سه‌بعدی تولیدشده، مجموعه‌ای جامع از داده‌های مکانی و تصویری فراهم می‌آورد که پایه‌ای مستحکم برای مستندسازی علمی و فنی قلعه تاریخی شیرقلعه به‌شمار می‌رود. این مستندسازی دقیق، نقش کلیدی در تعیین حریم حفاظتی اثر، برنامه‌ریزی برای مرمت و حفاظت دارد. به بیان دیگر، نقشه و مدل حاصل از این پژوهش، می‌تواند به‌عنوان مبنایی معتبر و قابل استناد در تصمیم‌گیری‌های آتی در حوزه مدیریت و حفاظت از میراث فرهنگی منطقه مورد استفاده قرار گیرند و زمینه‌ساز اقدامات اجرایی و تخصصی در جهت پایداری و احیای این اثر تاریخی ارزشمند باشند. شکل (۱۰) نقشه نهایی سایت تاریخی شیرقلعه را نمایش می‌دهد که به‌عنوان یکی از مهم‌ترین خروجی‌های پروژه، مبنایی ارزشمند برای تحلیل‌ها، ارزیابی وضعیت موجود و تهیه مدارک فنی و حقوقی محسوب می‌شود.

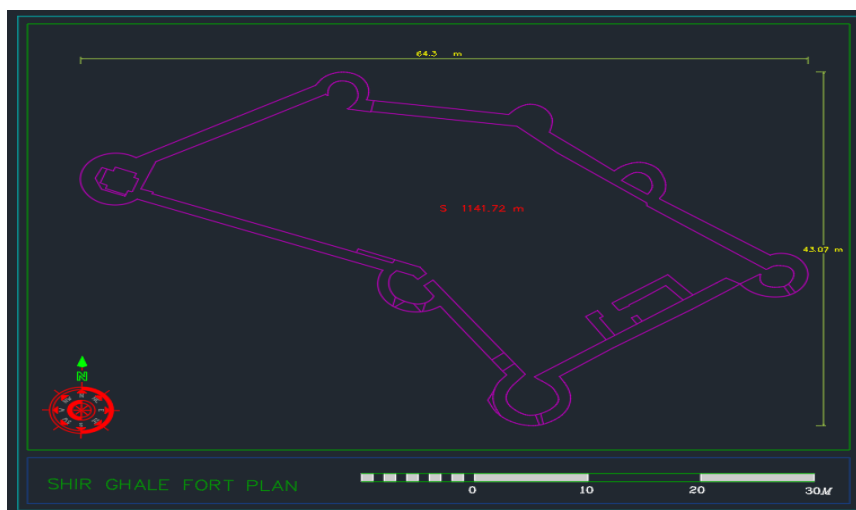
داده‌ها، منحنی‌های میزان (Contour Lines) در محیط نرم‌افزار ترسیم شدند. منحنی‌های میزان خطوطی هم‌ارتفاع هستند که تغییرات تدریجی ارتفاع در سطح زمین را به‌صورت گرافیکی و قابل فهم نمایش می‌دهند. این منحنی‌ها ابزاری مهم در تحلیل توپوگرافی هستند، چراکه نه تنها شیب زمین و اختلاف ارتفاع بخش‌های مختلف را مشخص می‌کنند، بلکه نقش کلیدی در برنامه‌ریزی حفاظت، طراحی مسیر دسترسی و ارزیابی استقرار سازه‌ها ایفا می‌کنند. شکل (۸) نمایش‌دهنده منحنی‌های میزان ترسیم‌شده پیرامون قلعه شیرقلعه و مناطق اطراف آن است. این نقشه توپوگرافی به‌وضوح اختلاف تراز ارتفاعی بخش‌های مختلف سایت، موقعیت قلعه نسبت به زمین‌های اطراف و شیب‌های طبیعی منطقه را نشان می‌دهد. اطلاعات به‌دست‌آمده از این تحلیل، به درک بهتر دلایل مکانیابی تاریخی قلعه، مسیرهای طبیعی دسترسی و همچنین خطرات بالقوه مانند فرسایش یا رانش زمین کمک می‌نماید.

به‌منظور مستندسازی اطلاعات، پلان دوبعدی قلعه شیرقلعه با استفاده از خروجی‌های مدل سه‌بعدی و در محیط نرم‌افزار تخصصی Autodesk Civil 3D ترسیم گردید. این پلان، با دقت هندسی بالا و بر مبنای اطلاعات استخراج‌شده از مدل سه‌بعدی ژئورفرنس‌شده تهیه شد و به‌عنوان نمایی فنی از ساختار کلیدی قلعه نشان می‌دهد. پلان قلعه شامل نمایش دقیق دیوارهای محیطی، برج‌ها، ورودی‌ها، فضاهای داخلی قابل تشخیص، اختلاف ترازها و عناصر معماری باقی‌مانده است. با توجه به موقعیت توپوگرافی قلعه، در پلان اختلاف ارتفاع نقاط مختلف نیز لحاظ شده و هندسه کلی بنا نسبت به پستی‌وبلندی‌های پیرامونی به‌درستی نمایش داده شده است. این نقشه مبنای مناسبی برای تحلیل‌های معماری و بازخوانی سازمان فضایی قلعه در دوره تاریخی خود محسوب می‌شود. همچنین در این پلان، جهت‌گیری معماری فضاها، نوع چینش اجزای سازه‌ای، و مسیرهای احتمالی تردد درون قلعه به‌روشنی قابل مشاهده است. ترسیم این پلان نه تنها به درک دقیق‌تری از ساختار معماری بنا کمک می‌کند، بلکه امکان مقایسه آن با نمونه‌های مشابه تاریخی و بررسی تغییرات احتمالی در طول زمان را نیز فراهم



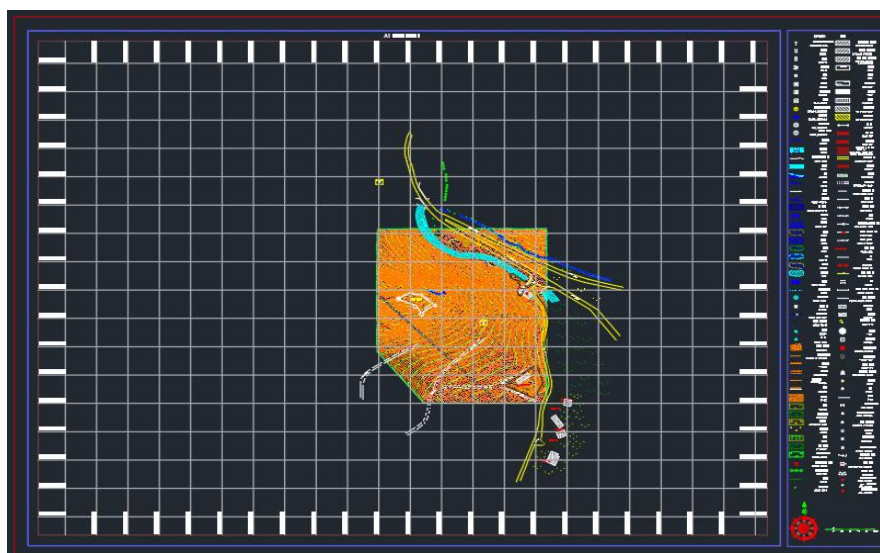
شکل ۸: نقشه توپوگرافی ترسیم شده در نرم‌افزار تخصصی Autodesk Civil 3D از منطقه مورد مطالعه.

Fig. 8: Topographic map of the study area generated in Autodesk Civil 3D software.



شکل ۹: پلان دوبعدی ترسیم‌شده سایت باستانی شیرقلعه شه‌میرزاد در نرم‌افزار تخصصی Autodesk Civil 3D.

Fig. 9: Two-dimensional plan of the Shirghaleh archaeological site in Shahmirzad, drawn using Autodesk Civil 3D software.



شکل ۱۰: مستندسازی اطلاعات در قالب نقشه نهایی از سایت تاریخی شیرقلعه شه‌میرزاد، شامل عوارض طبیعی، عناصر مصنوعی و داده‌های توپوگرافی منطقه.

Fig. 10: Documentation of information in the form of a final map of the historical site of Shirghaleh in Shahmirzad, including natural features, man-made elements, and topographic data of the area.

بحث و تحلیل

از تصاویر هوایی با دقت بالا و پردازش آن‌ها از طریق نرم‌افزارهای تخصصی، امکان تولید مدل‌های سه‌بعدی با کیفیت بالا و وضوح هندسی مناسب را فراهم می‌سازد که برای تحلیل‌های چندبعدی و تصمیم‌گیری‌های آتی بسیار ارزشمند هستند. علاوه بر مدل سه‌بعدی دقیق، فرآیند فتوگرامتری پهنادمنیا محصولات مکمل و کاربردی متعددی را ارائه می‌دهد که می‌توانند به صورت مستقیم در فرآیندهای حفاظت، تعیین حریم، طراحی مرمتی و مدیریت سایت‌های تاریخی به کار گرفته شوند. از جمله این محصولات می‌توان به مدل رقومی ارتفاع (DEM)، نقشه ارتوموزائیک، پلان‌های دو بعدی و سه بعدی سازه‌ها و سایت و نقشه‌های توپوگرافی شامل منحنی‌های میزان دقیق اشاره کرد. این اطلاعات لایه‌لایه و قابل تلفیق، امکان تحلیل جامع‌تری از ساختار فضایی، توپوگرافی و تغییرات محیطی سایت را فراهم می‌سازند و زمینه را برای پایش بلندمدت، تحلیل‌های فرسایشی و تهیه نقشه‌های مرجع

برای ارزیابی دقت مدل سه‌بعدی حاصل از فرآیند فتوگرامتری، شش نقطه کنترل زمینی به کار گرفته شد که مختصات آن‌ها به وسیله گیرنده موقعیت‌یاب سه‌فرکانسه با دقت بالا برداشت و ثبت گردید. با مقایسه موقعیت این نقاط در مدل سه‌بعدی تولید شده با مقادیر واقعی اندازه‌گیری‌شده، خطای مسطحاتی (Planimetric Error) با استفاده از رابطه ریشه مجموع مربعات خطاهای محوری X و Y، برابر با ۲.۴ سانتی‌متر و خطای ارتفاعی (Vertical Error) برابر با ۱.۹ سانتی‌متر محاسبه شد. یافته‌های این تحقیق نشان داد که بهره‌گیری از فناوری فتوگرامتری پهنادمنیا (UAV-based photogrammetry) در مدل‌سازی سه‌بعدی سایت‌های تاریخی و باستانی، از جنبه‌های مختلف فنی، اقتصادی و زمانی دارای مزایای قابل توجهی در مقایسه با سایر روش‌های سنتی یا پیشرفته‌تر نظیر اسکن لیزری زمینی است. این روش، با استفاده

مشارکت نویسندگان

در این مقاله، نویسندگان به نسبت برابر مشارکت داشته اند.

تشکر و قدردانی

بدین وسیله از کلیه عزیزانی که ما را در انجام این تحقیق یاری کردند، صمیمانه تشکر می کنیم.

تعارض منافع

«هیچگونه تعارض منافع توسط نویسندگان بیان نشده است.»

منابع و مآخذ

- [1] Sadeghian S, Rajabi A, Sedighpour D. [3D modeling for documentation, restoration and boundary determination of Dowlatabad Castle in Qom using UAV images]. *Journal of Surveying Sciences and Technologies*. 2020; 3: 229-241. [In Persian]
<https://dorl.net/dor/20.1001.1.17357853.1400.18.6.8.2>
- [2] Sadeghian S, Rajabi A, Farrokhi M. [Assessment of changes in the ancient areas of Hetmanate, Hamedan, using remote sensing and geographic information systems]. *Asar*. 2019; 40(3): 148-163. [In Persian]
<https://dorl.net/dor/20.1001.1.10247697.1398.40.3.9>
- [3] Crowley K, McEwen L, Jones S, et al. Cultural heritage and risk assessments: Gaps, challenges, and future research directions for the inclusion of heritage within climate change adaptation and disaster management. *Climate Resilience and Sustainability*. 2022;1(2): e45.
doi: 10.1002/cli2.45.
- [4] Sesana E, Gagnon AS, Ciantelli C, Cassar J, Hughes JJ. Climate change impacts on cultural heritage: A literature review. *WIREs Climate Change*. 2021;12(4): e710.
doi: 10.1002/wcc.710.
- [5] Rahimi Jafari F, Habibi F, Moazen S. [Introducing the non-destructive method of photogrammetry in the study and survey of historical monuments]. *Pazhoh-e Bastansanji*. 2021; 7(2): 135-158. [In Persian]
<https://dorl.net/dor/20.1001.1.17357853.1400.18.6.8.2>
- [6] Fadaei H. [Review of laws, methods, and documentation tools in international documents related to the conservation and management of cultural heritage]. *Journal of Conservation and Restoration Knowledge*. 2024; 7(2): 1-28. [In Persian]
- [7] Javadi M, Sadeghian S. Evaluation of geomatics methods in 3D and 4D documentation of cultural heritage. 1st National Conference on Documentation of Natural and Cultural Heritage; 2018; Shahid Rajaee Teacher Training University, Tehran, Iran
- [8] Zeynolpour Asl M, Samadzadegan F, Dadras Javan F, Talebian MH. [3D modeling of architectural heritage using UAV photogrammetry; case study: Deir-e Gachin Caravanserai].

مستند فراهم می کنند. از منظر فنی، دقت داده‌های تولیدشده از طریق فتوگرامتری پهپادمبنا، در صورت تعریف صحیح نقاط کنترل زمینی (GCPs) و استفاده از مسیرهای پروازی بهینه، به سطحی قابل رقابت با اسکن لیزری می‌رسد، در حالی که هزینه اجرا، زمان برداشت میدانی و نیاز به نیروی انسانی متخصص در این روش به مراتب کمتر است. این ویژگی‌ها، فتوگرامتری پهپادمبنا را به گزینه‌ای عملی و مقیاس‌پذیر برای پروژه‌های مستندسازی در مقیاس‌های مختلف تبدیل کرده است، به‌ویژه در شرایطی که دسترسی به تجهیزات پیشرفته‌تر یا منابع مالی محدود است. همچنین، تنوع خروجی‌های حاصل از این روش و قابلیت استفاده چندمنظوره از داده‌ها، امکان ایجاد یک پایگاه داده جامع از وضعیت موجود سایت را فراهم می‌آورد. که در آینده نیز می‌تواند برای مقاصد آموزشی، بازسازی مجازی، مستندسازی تغییرات و برنامه‌ریزی‌های حفاظتی مورد استفاده قرار گیرد. به‌علاوه، این روش ظرفیت بالایی برای ترکیب با سایر فناوری‌های تحلیل‌محور نظیر سیستم اطلاعات مکانی، واقعیت افزوده و مدل‌سازی اطلاعات ساختمان تاریخی دارد که افق‌های نوینی در مدیریت هوشمند میراث فرهنگی می‌گشاید.

نتیجه‌گیری

پژوهش حاضر با هدف مستندسازی دقیق، جامع و کاربردی سایت تاریخی شیرقلعه شه‌میرزاد، با بهره‌گیری از رویکرد نوین فتوگرامتری مبتنی بر پهپاد طراحی و اجرا شد. این مطالعه در سه مرحله اصلی شامل مطالعات مقدماتی، عملیات میدانی و فعالیت‌های دفتری به انجام رسید و مجموعه‌ای از خروجی‌های ارزشمند همچون مدل سه‌بعدی با بافت واقعی، مدل رقومی ارتفاعی (DEM)، ارتوموزایک دقیق، پلان‌های دوبعدی، نقشه‌های توپوگرافی و مستندات معماری تولید گردید. نتایج به‌دست‌آمده بیانگر آن است که بهره‌گیری از پهپادها و نرم‌افزارهای تخصصی فتوگرامتری می‌تواند فرآیند مستندسازی آثار تاریخی را با دقت بالا، سرعت بیشتر و هزینه کمتر نسبت به روش‌های سنتی انجام دهد. مدل سه‌بعدی تولیدشده، نه‌تنها بازنمایی دقیقی از ساختار معماری و توپوگرافی قلعه ارائه می‌دهد، بلکه به‌عنوان یک ابزار چندمنظوره در حوزه‌هایی نظیر تهیه کاداستر سه‌بعدی، تعیین حریم حفاظتی، طراحی اقدامات مرمتی، تحلیل‌های ساختاری، پایش وضعیت سازه، توسعه گردشگری مجازی، آموزش و پژوهش کاربرد دارد. یکی از نتایج کلیدی پروژه، تهیه نقشه‌ای جامع و مستند از منطقه مورد مطالعه بود که شامل اطلاعات دقیق ارتفاعی، منحنی‌های میزان و لایه‌بندی عوارض طبیعی و مصنوعی است. این نقشه به‌ویژه در تعیین دقیق حریم قانونی و حفاظتی قلعه نقش تعیین‌کننده‌ای دارد و ابزار فنی مهمی برای مراجع ذی‌ربط در زمینه حفاظت از میراث فرهنگی محسوب می‌شود. در مجموع، این پژوهش نشان داد که ترکیب فناوری‌های نوین سنجش از دور، تصویربرداری پهپادی و پردازش فتوگرامتری، روشی علمی، دقیق و قابل اعتماد برای مستندسازی آثار تاریخی به‌شمار می‌رود.

user-oriented HBIM. *International Journal of Heritage in the Digital Era*. 2016; 5(1): 141–158.
doi: 10.1260/2047-4970.5.1.141

[19] Varol F. Creation of surface models using unmanned aerial vehicle (UAV) photogrammetry in cultural heritage areas: The example of Kilistra Ancient City. *International Journal of Engineering and Geosciences*. 2025; 10(2): 137–150.
doi: 10.26833/ijeg.1487818

[20] Manajitprasert S, Tripathi NK, Arunplod S. Three-Dimensional (3D) Modeling of Cultural Heritage Site Using UAV Imagery: A Case Study of the Pagodas in Wat Maha That, Thailand. *Applied Sciences*. 2019; 9(18): 3640.
doi: 10.3390/app9183640

[21] Themistocleous K, Mettas C, Evagorou E, Hadjimitsis D. The use of UAVs and photogrammetry for the documentation of cultural heritage monuments: the case study of the churches in Cyprus. *Proceedings of SPIE - The International Society for Optical Engineering*. 2019; 11156: 111560I.
doi: 10.1117/12.2533056

[22] Zachos A, Anagnostopoulos CN. Using TLS, UAV, and MR Methodologies for 3D Modelling and Historical Recreation of Religious Heritage Monuments. *Journal on Computing and Cultural Heritage*. 2024; 17(1): 1-22. doi: 10.1145/3577890

[23] Pepe M, Alfio VS, Costantino D. UAV Platforms and the SfM-MVS Approach in the 3D Surveys and Modelling: A Review in the Cultural Heritage Field. *Applied Sciences*. 2022; 12(24): 12886.
doi: 10.3390/app122412886.

[24] Shahsavari Babukani A, Gharagozlou A. Capabilities of Geographic Information Systems (GIS) and artificial intelligence for management and protection of cultural heritage and historical monuments. 1st International Conference on Hekmat-Based Architecture, Urban Development, Art, Industrial Design, Construction and Technology; 2025 February 27; Tabriz, Iran: Tabriz Islamic Art University.

[25] Erenoglu RC, Bayburt E, Kilic V, Yilmaz E. An UAS-assisted multi-sensor approach for 3D modeling and reconstruction of cultural heritage site. *Journal of Cultural Heritage*. 2017; 27: 111-123. doi: 10.1016/j.culher.2017.06.003.

[26] Partama IGY, Yastika PE, Wijaya IMW. 3D modeling using UAV-photogrammetry technique for digital documentation of cultural heritage buildings. *GEOMATE Journal*. 2025; 28(126): 61–70. doi: 10.21660/2025.126.4768

[27] Azzola P, Cardaci A, Mirabella Roberti G, Nannei VM. UAV photogrammetry for cultural heritage preservation modeling and mapping Venetian walls of Bergamo. *The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*. 2019; XLII-2/W9: 45–50.
doi: 10.5194/isprs-archives-XLII-2-W9-45-2019.

[28] Uysal M, Toprak AS, Polat N. Photo realistic 3D modeling with UAV: Gedik Ahmet Pasha Mosque in Afyonkarahisar. *The*

Journal of Fine Arts – Architecture and Urban Planning. 2021; 26(4): 61-73. [In Persian]
<https://doi.org/10.22059/jfaup.2021.325822.672644>

[9] Sadeghian S, Sokhtanlou Z, Aliyari F. A review of remote sensing archaeology: identification, discovery, monitoring, and mapping of cultural heritage. *National Conference on Geomatics and Cultural Heritage*; 2017; Iran

[10] Bagnolo V, Paba N. UAV-based photogrammetry for archaeological heritage site survey and 3D modeling of the Sardus Pater Temple (Italy). In: *The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*. 2019; XLII-2/W17: 45–52.
doi: 10.5194/isprs-archives-XLII-2-W17-45-2019

[11] Ahangari M, Sadeghian S. [Capabilities of photogrammetry in documentation and virtual reality production in cultural and natural heritage]. *Proceedings of the 2nd National Conference on Documentation of Natural and Cultural Heritage*; 2019; Shahid Rajae Teacher Training University, Tehran, Iran. [In Persian]

[12] Hemmati-Mandjin Z, Ebadi H, Hosseini Nohe Ahmadabadian A, Esmaeili F. [Application of UAV-based photogrammetry in 3D modeling of archaeological sites]. *Proceedings of the 2nd National Conference on Information Technology Engineering*; 2016; Khajeh Nasir Toosi University of Technology, Tehran, Iran. [In Persian]

[13] Alitajar S, Afshari Azad S. [Investigating the role of geomatics engineering in the applications of cultural heritage, archaeology and architecture]. *Iranian Journal of Archaeological Research*, 3(5), 169-195. [In Persian]

[14] Remondino F, El-Hakim S. Image-based 3D modelling: a review. *The Photogrammetric Record*. 2006; 21(115): 269-291.
doi:10.1111/j.1477-9730.2006.00383.x

[15] Shahsavari Babukani A, Sadeghian S, Vafaienajad A. Capabilities of photogrammetry and remote sensing for 3D modeling and documentation of cultural heritage and archaeological sites. 1st International Conference on Hekmat-Based Architecture, Urban Development, Art, Industrial Design, Construction and Technology; 2025 February; Tabriz, Iran.

[16] Sun Z, Zhang Y. Using drones and 3D modeling to survey Tibetan architectural heritage: A case study with the multi-door stupa. *Sustainability*. 2018; 10(7): 2259.
doi: 10.3390/su10072259.

[17] Ulvi A. Documentation, three-dimensional (3D) modelling and visualization of cultural heritage by using unmanned aerial vehicle (UAV) photogrammetry and terrestrial laser scanners. *International Journal of Remote Sensing*. 2021; 42(6): 1994-2021. doi: 10.1080/01431161.2020.1834164

[18] Chiabrando F, Sammartano G, Spanò A. Historical buildings models and their handling via 3D survey: from point cloud to

دانشگاه شهید بهشتی تهران مشغول فعالیت است. از جمله سوابق اجرایی ایشان می‌توان به ریاست آموزشکده نقشه‌برداری سازمان نقشه‌برداری کشور در بازه زمانی ۱۳۸۵ تا ۱۳۹۲ اشاره کرد. ایشان، برگزیده سه دوره به‌عنوان پژوهشگر برگزیده کشوری و دریافت لوح تقدیر از وزیر علوم، تحقیقات و فناوری در سال‌های ۱۳۸۱، ۱۳۸۳ و ۱۳۸۸ است. همچنین موفق به کسب رتبه اول در دومین دوره مسابقات قرآن ویژه اعضای هیئت علمی سراسر کشور در بخش ایده‌پردازی قرآنی شده‌اند و در سال ۱۳۹۱ لوح تقدیر معاون فرهنگی و اجتماعی وزارت علوم، تحقیقات و فناوری را دریافت کرده‌اند.

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

✉ sa_sadeghian@sbu.ac.ir



علیرضا وفائی‌نژاد دارای مدرک دکتری تخصصی در رشته مهندسی نقشه‌برداری با گرایش سیستم‌های اطلاعات مکانی از دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی می‌باشد. ایشان هم‌اکنون به‌عنوان دانشیار و مدیر گروه نقشه‌برداری در دانشکده مهندسی عمران، آب

و محیط زیست دانشگاه شهید بهشتی تهران مشغول فعالیت است. وی بیش از ۳۵ مقاله علمی در نشریات بین‌المللی معتبر، ۷۰ مقاله در نشریات داخلی و ۵۰ مقاله در کنفرانس‌های ملی و بین‌المللی ارائه کرده‌اند. زمینه‌های تخصصی ایشان شامل سیستم‌های اطلاعات مکانی هوشمند، یادگیری ماشین، بهینه‌سازی مبتنی بر سیستم‌های اطلاعات مکانی و کاربردهای آن در مدیریت منابع آب و محیط زیست می‌باشد.

Vafaeinejad, A. Associate Professor at the Department of Geotechnical and Transportation Engineering, Faculty of Civil, Water and Environmental Engineering, Shahid Beheshti University, Tehran, Iran

✉ a_vafaei@sbu.ac.ir



داود صدیق‌پور دارای مدرک کارشناسی ارشد مرمت آثار تاریخی از دانشگاه هنر اصفهان بوده و پیش از آن، دوره کارشناسی خود را در رشته باستان‌شناسی در دانشگاه بوعلی سینا همدان به پایان رسانده است. همچنین، وی با رویکرد میان‌رشته‌ای، موفق به اخذ مدرک کارشناسی ارشد در رشته

سنجش از دور از دانشگاه حکمت قم شده است؛ ترکیبی که توانمندی‌های وی را در تحلیل، پایش و مدیریت منابع فرهنگی تقویت نمود. وی با فعالیت حرفه‌ای در عرصه میراث فرهنگی، در بیش از یکصد پروژه ملی در زمینه‌های گوناگون از جمله گمانه‌زنی با هدف شناسایی و تعیین حریم آثار تاریخی، مستندنگاری باستان‌شناختی و مرمت و بازسازی سازه‌های تاریخی مشارکت فعال داشته است. از جمله

International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences. 2013; XL-5/W2: 659–662. doi: 10.5194/isprsarchives-XL-5-W2-659-2013.

[29] Islamic Republic News Agency (IRNA). Shirghaleh Shahr Mirzad; the jewel of the exemplary tourist city. [Accessed 15th August 2019].

[30] Young Journalists Club (YJC). Let's get to know Shirghaleh Shahr Mirzad better (with pictures). [Accessed 2025].

[31] MrBilit. Shir Castle: An ancient fort near Shahr Mirzad. [Accessed 2020].

[32] Maan. Mavic Mini 2 Review. [Accessed December 2023].

معرفی نویسندگان

AUTHOR(S) BIOSKETCHES



ابوالفضل شهبوساری بابوکانی دانشجوی کارشناسی‌ارشد مهندسی نقشه‌برداری گرایش فتوگرامتری در دانشگاه شهید بهشتی تهران است. وی در هر سه مقطع کاردانی، کارشناسی و کارشناسی‌ارشد جزو دانشجویان ممتاز بوده و هم‌اکنون عضو مجمع دبیران شورای صنفی

رفاهی دانشگاه شهید بهشتی می‌باشد. ایشان در آزمون دکتری تخصصی رشته مهندسی نقشه‌برداری سال ۱۴۰۴، موفق به کسب رتبه ۱۳ در گرایش فتوگرامتری و در آزمون کارشناسی‌ارشد سال ۱۴۰۲، رتبه ۲۸ در سهمیه آزاد شده است. زمینه‌های علمی و پژوهشی وی شامل میراث فرهنگی، سیستم‌های اطلاعات مکانی، پهنه‌بندی رطوبت سطحی خاک، طبقه‌بندی تصاویر ماهواره‌ای، پایش پوشش گیاهی و همچنین کاربردهای نظامی و دفاعی فتوگرامتری و سنجش از دور می‌باشد. همچنین، وی تاکنون ایده‌های متعددی در حوزه‌های ثبت و کاداستر داشته است که این ایده‌ها به سازمان ثبت اسناد و املاک کشور ارائه شده‌اند.

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

✉ a.shahsavari@babukani@Mail.sbu.ac.ir



سعید صادقیان دارای مدرک دکتری تخصصی در رشته مهندسی نقشه‌برداری گرایش فتوگرامتری از دانشگاه تهران (۱۳۸۱–۱۳۷۶) می‌باشد. وی پیش از آن، کارشناسی ارشد خود را در همین گرایش از دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی

(۱۳۷۵–۱۳۷۲) و مدرک کارشناسی مهندسی نقشه‌برداری را نیز از همین دانشگاه (۱۳۷۱–۱۳۶۶) اخذ کرده است. ایشان هم‌اکنون به‌عنوان دانشیار در دانشکده مهندسی عمران، آب و محیط زیست

در پروژه‌های راهبردی حفاظت و احیای میراث فرهنگی در سطح ملی شناخته می‌شود.

Faculty of Conservation and Restoration, University of Art,
Isfahan, Iran

✉ davodsedighpor@yahoo.com

پروژه‌های شاخص تحت مدیریت و مشارکت مؤثر ایشان می‌توان به مرمت و بازسازی قلعه پرتغالی‌های هرمز، تپه هگمتانه، قره‌تپه قمروود، قلعه دولت‌آباد، تپه قلی‌درویش و حمام تاریخی عشقلی اشاره کرد. نامبرده هم‌اکنون به عنوان یکی از متخصصان سازمان میراث فرهنگی

Citation (Vancouver): Shahsavari Baboukani A, Sadeghian S, Vafaeinejad A, Sedighpour D. [3D Modeling of Shir-Qaleh Castle in Shahmirzad Using UAV-Based Photogrammetry; With an Approach to Documentation, Conservation, Restoration, and Cultural Heritage Zoning]. *J. RS. GEOINF. RES.* 2025; 3(2): 271-286

 <https://doi.org/10.22061/jrsg.2025.12148.1102>



COPYRIGHTS

© 2025 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/>)



ORIGINAL RESEARCH PAPER

Land use changes using satellite images processing and geographic information systems in Gilan province, Iran

Sh. Felegari¹, K. Moravej^{*1}, A. Sharifi², A. Golchin¹, P. Karami³¹ Department of Soil Sciences, Faculty of Agriculture, University of Zanjan, Zanjan, Iran² Department of Surveying Engineering, Faculty of Civil, Water and Environmental Engineering, Shahid Beheshti University, Tehran, Iran³ Department of Range and Watershed Management, Faculty of Natural Resources, University of Kurdistan, Kurdistan, Iran

ABSTRACT

Received: 20 January 2025
 Reviewed: 01 March 2025
 Revised: 16 June 2025
 Accepted: 11 August 2025

KEYWORDS:

Boosted Regression Trees
 Landsat-9
 Random Forest
 Sentinel-1
 Support Vector Machine
 Total Soil Nitrogen

* Corresponding author

✉ kmoravej@znu.ac.ir

☎ (+9824) 33052606

Background and Objectives: Human activities and natural processes drive land use changes, resulting in pressing issues such as deforestation, biodiversity loss, and heightened vulnerability to natural disasters like floods. Population growth and increasing socio-economic demands exert substantial pressure on land use and cover, often leading to unregulated alterations primarily attributed to mismanagement in agriculture, urban development, pasturelands, and forests. Integrating remote sensing and geographic information systems (GIS) offers a potent approach to accurately assess and monitor land use changes across vast areas. Satellite data, particularly from sources like Landsat's Multispectral Scanner (MSS), Thematic Mapper (TM), and Advanced Thematic Mapper (ETM+), have been extensively utilized to analyze land use changes, especially in forested and agricultural regions. This study aims to analyze land use changes in paddy rice soil texture in Gilan, North Iran, from 1391 to 1401. Leveraging Landsat MSS and ETM+ data and GIS software, the study endeavors to identify and characterize significant land use and cover changes, providing valuable insights into regional landscape dynamics.

Methods: In this research conducted in Gilan province, Landsat-8 satellite images from 2012 and 2022, featuring minimal cloud cover, were utilized. Geometric and radiometric corrections were made on Landsat-8 satellite images to reduce errors. Employing the maximum likelihood method, supervised classification of land use classes was determined. This method calculates the probability of a pixel belonging to each predefined class and assigns the pixel to the class with the highest probability. This comprehensive approach enabled the analysis of land use dynamics in the study area, offering valuable insights into environmental changes over time.

Findings: The evaluation of land use classification maps revealed an overall accuracy of 80% and a kappa coefficient exceeding 0.8, indicating substantial agreement with ground truth classes. Forest area exploitation decreased from 46% in 2011 to 33% in 2011, signaling ecosystem degradation. Similarly, pasture land decreased from 51% in 1391 to 42% in 1401. Conversely, agricultural land witnessed significant growth, increasing by 7% from 2013 to 1401 (34% to 41%). Residential land area experienced a notable increase, rising by 34%. These findings underscore significant land use changes, including forest decline and increased residential expansion, highlighting the pressing need for sustainable land management practices in the study area.

Conclusion: Forest cover in the study area declined by 13%, whereas residential land witnessed a significant expansion of 34%. Data analysis indicated that the primary alterations in land area were linked to changes in residential use. Remote sensing technology proved instrumental in precisely, effectively, and economically estimating these changes, highlighting its crucial role in environmental studies.



NUMBER OF REFERENCES

30



NUMBER OF FIGURES

4



NUMBER OF TABLES

1

مقاله پژوهشی

تغییرات کاربری اراضی با استفاده از پردازش تصاویر ماهواره ای و سامانه‌های اطلاعات جغرافیایی در استان گیلان، ایران

شیلان فعله‌گری^۱، کامران مروج^{۱*}، علیرضا شریفی^۲، احمد گلچین^۱، پرویز کرمی^۳^۱ گروه خاک‌شناسی، دانشکده کشاورزی، دانشگاه زنجان، زنجان، ایران^۲ گروه مهندسی نقشه‌برداری، دانشکده مهندسی عمران، آب و محیط زیست، دانشگاه شهید بهشتی، تهران، ایران^۳ گروه مرتع و آبخیزداری، دانشکده منابع طبیعی، دانشگاه کردستان، کردستان، ایران

چکیده

پیشینه و اهداف: فعالیت‌های انسانی و فرآیندهای طبیعی باعث ایجاد تغییرات کاربری می‌شوند که منجر به مسائل مهمی مانند جنگل‌زدایی، از بین رفتن تنوع زیستی و افزایش آسیب‌پذیری در برابر بلایای طبیعی مانند سیل می‌شود. رشد جمعیت و افزایش تقاضاهای اجتماعی-اقتصادی فشار قابل توجهی بر کاربری و پوشش زمین وارد می‌کند که اغلب منجر به تغییرات غیرقانونی می‌شود که عمدتاً به سوء مدیریت در کشاورزی، توسعه شهری، مراتع و جنگل‌ها نسبت داده می‌شود. ادغام سنجش از دور و سیستم‌های اطلاعات جغرافیایی (GIS) یک رویکرد قوی برای ارزیابی دقیق و نظارت بر تغییرات کاربری زمین در مناطق وسیع ارائه می‌دهد. داده‌های ماهواره‌ای، به ویژه از منابعی مانند اسکنر چندطیفی (Landsat (MSS)، نقشه برداری موضوعی (TM) و نقشه برداری موضوعی پیشرفته (ETM+)، به طور گسترده برای تجزیه و تحلیل تغییرات کاربری زمین، به ویژه در مناطق جنگلی و کشاورزی استفاده شده است. این مطالعه با هدف تحلیل تغییرات کاربری اراضی در بافت خاک برنج شالیزاری در گیلان، شمال ایران از سال ۱۳۹۱ تا ۱۴۰۱ انجام شده است. با استفاده از داده‌های Landsat MSS و ETM+ و نرم‌افزار GIS، این مطالعه تلاش می‌کند تا تغییرات کاربری و پوشش قابل‌توجهی را شناسایی و مشخص کند و بینش‌های ارزشمندی را در مورد پویایی چشم‌انداز منطقه‌ای ارائه دهد.

تاریخ دریافت: ۰۱ بهمن ۱۴۰۳
تاریخ داوری: ۱۱ اسفند ۱۴۰۳
تاریخ اصلاح: ۲۶ خرداد ۱۴۰۴
تاریخ پذیرش: ۲۰ مرداد ۱۴۰۴

واژگان کلیدی:

درختان رگرسبون تقویت شده
لندست-۹
جنگل تصادفی
سنتینل-۱
ماشین بردار پشتیبانی
نیترژون کل خاک

روش‌ها: در این مطالعه که در استان گیلان انجام شد، تصاویر ماهواره‌ای Landsat-8 از سال‌های ۱۳۹۱ و ۱۴۰۱، با حداقل پوشش ابری، استفاده شد. بروی تصاویر ماهواره‌ای لندست-۸ برای کاهش خطاها اصلاحات هندسی و رادیومتریک انجام شد. با استفاده از روش حداکثر احتمال، طبقه‌بندی نظارت شده طبقات کاربری زمین را مشخص کرد. این روش احتمال یک پیکسل متعلق به هر کلاس از پیش تعریف شده را محاسبه می‌کند و پیکسل را به کلاسی با بیش‌ترین احتمال اختصاص می‌دهد. این رویکرد جامع، تحلیل پویایی کاربری زمین در منطقه مورد مطالعه را تسهیل کرد و بینش‌های ارزشمندی را در مورد تغییرات محیطی در طول زمان ارائه داد.

یافته‌ها: ارزیابی نقشه‌های طبقه‌بندی کاربری اراضی دقت کلی ۸۰٪ و ضریب کاپا بیش از ۰.۸ را نشان داد که نشان‌دهنده توافق قابل‌توجه با کلاس‌های حقیقت زمینی است. بهره‌برداری از مساحت جنگل از ۴۶ درصد در سال ۲۰۱۱ به ۳۳ درصد در سال ۲۰۱۱ کاهش یافته است که نشان‌دهنده تخریب اکوسیستم است. به همین ترتیب، اراضی مرتع از ۵۱ درصد در سال ۱۳۹۱ به ۴۲ درصد در سال ۱۴۰۱ کاهش یافت. در مقابل، زمین‌های کشاورزی شاهد رشد قابل توجهی بودند که از سال ۲۰۱۳ تا ۱۴۰۱ به میزان ۷ درصد (۳۴ درصد به ۴۱ درصد) افزایش یافت. مساحت زمین مسکونی افزایش قابل توجهی را تجربه کرد و ۳۴ درصد افزایش یافت. این یافته‌ها بر تغییرات قابل‌توجه کاربری زمین، از جمله کاهش جنگل‌ها و افزایش گسترش مسکونی تأکید می‌کند، که نیاز مبرم به شیوه‌های مدیریت پایدار زمین در منطقه مورد مطالعه را برجسته می‌کند.

نتیجه‌گیری: به طور خاص، پوشش جنگلی در منطقه مورد مطالعه ۱۳ درصد کاهش یافت، در حالی که گسترش خیره‌کننده ۳۴ درصدی در زمین‌های مسکونی مشاهده شد. تجزیه و تحلیل داده‌ها هم‌چنین نشان داد که عمده‌ترین تغییرات مساحت زمین در منطقه به تغییرات در کاربری مسکونی نسبت داده شده است. استفاده از فناوری سنجش از دور در برآورد دقیق، کارآمد و اقتصادی این تغییرات، با تأکید بر نقش حیاتی سنجش از دور در مطالعات زیست‌محیطی، مفید بود.

* نویسنده مسئول

kmoravej@znu.ac.ir

① ۰۲۴-۳۳۰۵۲۶۰۶

مقدمه

تغییر کاربری اراضی و پوشش زمین اهمیت قابل توجهی در درک تغییرات محیطی دارد. این تغییرات که توسط فعالیت‌های انسانی و فرآیندهای طبیعی هدایت می‌شود [۱]، منجر به مسائل نگران کننده‌ای مانند جنگل زدایی، از بین رفتن تنوع زیستی، افزایش دمای جهانی و افزایش آسیب پذیری در برابر بلایای طبیعی مانند سیل شده است [۲]. این چالش‌ها به طور پیچیده با تغییرات در الگوهای کاربری اراضی مرتبط هستند و بر نقش حیاتی داده‌ها در اطلاع رسانی تصمیمات مدیریت زیست محیطی و شکل دادن به استراتژی‌های برنامه ریزی آینده تأکید دارند [۳].

در همین راستا، رشد روزافزون جمعیت و افزایش تقاضاهای اجتماعی-اقتصادی فشار زیادی بر استفاده و پوشش زمین وارد می‌کند. این فشار اغلب باعث ایجاد تغییرات تصادفی و غیرقابل تنظیم در کاربری اراضی می‌شود که در درجه اول به سوء مدیریت در مناطق کشاورزی، شهری، مرتع و جنگل نسبت داده می‌شود [۴، ۵]. این تغییرات نه تنها تخریب محیط زیست را تشدید می‌کند، بلکه به پدیده‌های خطرناکی مانند رانش زمین و سیل نیز کمک می‌کند [۶].

در این ارتباط، ادغام سنجش از دور و سیستم‌های اطلاعات جغرافیایی (GIS) به عنوان یک رویکرد قدرتمند برای تعیین دقیق و نظارت بر تغییرات کاربری اراضی در مناطق وسیع ظاهر می‌شود [۷، ۸]. تلاش‌های تحقیقاتی قبلی و در حال انجام در سراسر جهان به طور گسترده از این فناوری‌ها برای مطالعه دینامیک تغییرات کاربری اراضی استفاده کرده‌اند [۹]. استفاده از داده‌های ماهواره‌ای و نرم‌افزارهایی همچون GIS به ویژه، جمع آوری کارآمد، ذخیره سازی، تجسم و تجزیه و تحلیل داده‌های دیجیتالی را که برای تشخیص تغییرات در طول زمان حیاتی است، تسهیل می‌کند [۱۰]. تصاویر سنجش از دور، به ویژه داده‌های ماهواره‌ای، به عنوان منبع اطلاعات اولیه برای کاربردهای GIS برجسته هستند. تصاویر ماهواره‌ای نمای جامعی از سطح زمین ارائه می‌دهد و آن را برای تشخیص الگوهای تغییر کاربری اراضی بسیار ارزشمند می‌کند [۱۱]. انواع مختلفی از داده‌های ماهواره‌ای، از جمله اسکنر چندطیفی لندست (MSS)، نقشه برداری موضوعی (TM) و نقشه بردار موضوعی پیشرفته (ETM+)، از زمان شروع برنامه لندست در سال ۱۹۷۲ به طور گسترده مورد استفاده قرار گرفته‌اند [۱۲]. این آرشوها، همراه با طیف‌های بالا وضوح، تصاویر ماهواره‌ای را برای مطالعه تغییرات کاربری اراضی، به ویژه در مناطق جنگلی و کشاورزی ضروری می‌کند [۱۳، ۱۴]. هدف اصلی روش‌های تشخیص ذکرشده، شناسایی و توصیف تغییرات در کاربری اراضی در طول زمان است. چندین تکنیک، مانند مقایسه پس از طبقه بندی، تفاوت تصویر، و تجزیه و تحلیل اجزای اصلی، برای این منظور توسعه داده شده است. در این میان، مقایسه پس از طبقه بندی به عنوان یک رویکرد قابل اعتماد برجسته می‌شود و مزیت توضیح دقیق ماهیت تغییرات را ارائه می‌دهد [۱۴، ۱۵].

در مطالعه حاضر، یک تکنیک مقایسه تشخیص تغییر پیکسل به پیکسل برای نقشه‌های تغییر کاربری اراضی مشتق شده از ماهواره [۱۶] اعمال شد که امکان تجزیه و تحلیل جامع دینامیک کاربری اراضی را فراهم می‌کند. به طور خلاصه، این مطالعه با هدف تحلیل تغییرات کاربری اراضی در بافت خاک برنج شالیزاری گیلان، شمال ایران از سال ۱۳۹۱ تا ۱۴۰۱ انجام شد. با استفاده از داده‌های Landsat MSS و ETM+ به دست آمده در مقاطع زمانی مختلف، و همچنین استفاده از نرم افزار GIS برای تهیه نقشه تغییرات، این مطالعه تلاش می‌کند تا تغییرات قابل توجه در کاربری و پوشش زمین را شناسایی و مشخص کند. این مطالعه به دنبال ارائه بینش‌های ارزشمندی در مورد پویایی چشم‌انداز در حال تحول منطقه است.

روش تحقیق

منطقه مورد مطالعه این تحقیق در استان گیلان در شمال ایران با مختصات بین طول جغرافیایی ۴۹ درجه و ۱۹ دقیقه و ۴۰ ثانیه و ۴۹ درجه و ۳۲ دقیقه و ۲۰ ثانیه شرقی و عرض جغرافیایی ۳۷ درجه و ۱۹ دقیقه و ۲۰ ثانیه و ۳۷ درجه و ۲۴ دقیقه و ۵۵ ثانیه شمالی واقع شده است. بر اساس آمار ۲۰ ساله ایستگاه هواشناسی محلی، میانگین بارندگی سالانه در منطقه ۱۲۴۶ میلی متر و میانگین دمای سالانه ۱۶/۸ درجه سانتی گراد است. بهرامی و همکاران گزارش داده‌اند که زمین منطقه مورد مطالعه با مناطق پست با شیب کمتر از ۵/۵ درصد مشخص می‌شود و کاربری اصلی زمین برای شالی کاری است. منطقه مورد مطالعه و محل های نمونه برداری به ترتیب در شکل ۱ نشان داده شده است.

جمع‌آوری داده‌ها

در این مطالعه از تصاویر ماهواره‌ای لندست-۸ که توسط حسگرهای TM و ETM در سال‌های ۱۳۹۱ و ۱۴۰۱ گرفته شده است، استفاده شد. این تصاویر در آخرین روز شهریورماه برای هر دو سال به دست آمد. دستیابی به تصاویر ماهواره‌ای مناسب با توجه به این نیاز که هر تصویر انتخابی پوشش ابری بیش از ۵ درصد نداشته باشد، چالش مهمی را ایجاد کرد. شرایط اقلیمی خاص و ابری زیاد منطقه، امکان دسترسی به تصاویر مناسب را در بیشتر فصول سال محدود کرد. بر روی تصاویر ماهواره‌ای لندست-۸ برای کاهش خطاها اصلاحات هندسی و رادیومتری انجام شد. تصحیح هندسی از نقاط کنترل زمینی جمع‌آوری شده از منطقه استفاده کرد، با هدف خطای ریشه میانگین مربع (RMS) کمتر از ۱، با RMS تصاویر OLI پس از حذف نقاط نامناسب به ۰/۴۳ می‌رسد. برای تصحیح جوی تصاویر ETM، یک فرآیند تصحیح تصاویر OLI با استفاده از روش تصویر به تصویر انجام شد. در این مطالعه از ترکیب باندهای ۵، ۴ و ۳ از ماهواره ETM و باندهای ۷، ۵ و ۴ از ماهواره OLI در RGB برای پردازش تصویر و اهداف نظارت بر تغییرات استفاده شد.

روش شناسی نظارت شده

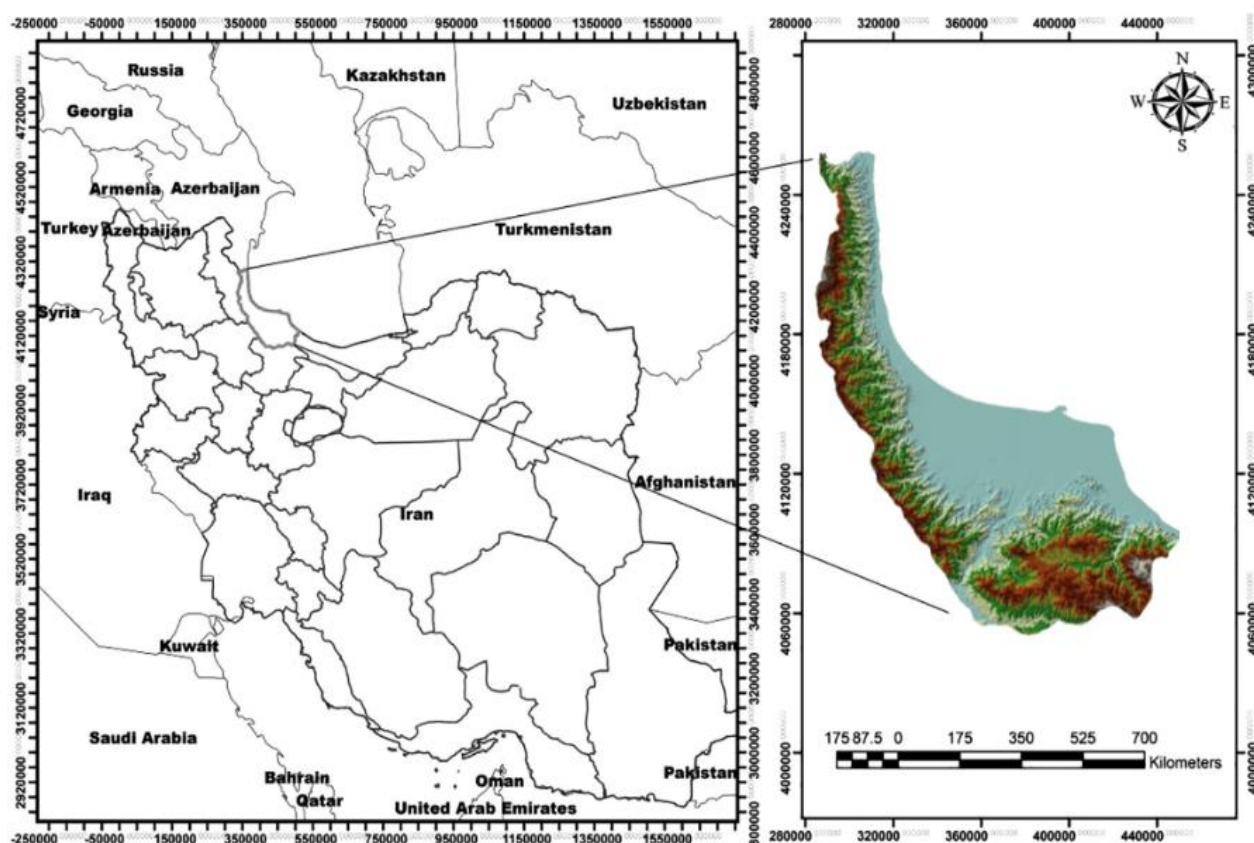
کشاورزی، مراتع، مناطق دریایی، زمین های بایر و مناطق مسکونی است. با استفاده از نمونه های اقلیمی، طبقه بندی نظارت شده با استفاده از روش حداکثر احتمال برای تولید نقشه های کاربری اولیه برای هر تصویر انجام شد. برای کاهش نویز در تصاویر طبقه بندی شده، یک فیلتر اکثریت ۳×۳ اعمال شد [۲۳،۲۴] و به دنبال آن دقت نقشه ارزیابی شد. پارامترهای رایج ارزیابی دقت شامل دقت کلی، دقت سازنده، دقت کاربر و ضریب کاپا است که به ویژه برای مقایسه نتایج در طبقه بندی های مختلف مفید است. ضریب کاپا با استفاده از رابطه زیر محاسبه می شود [۲۵]:

$$\text{Kappa} = \frac{P_0 - P_c}{1 - P_c} \times 100$$

پس از تهیه نقشه های کاربری اراضی برای هر دو دوره، نقشه ها در محیط سیستم اطلاعات جغرافیایی (GIS) چیده شدند و با استفاده از روش مقایسه پس از طبقه بندی، نقشه تغییر ایجاد شد. برای ترسیم، تشریح ساختار و گردش کار روش مورد استفاده در پژوهش مورد نظر، می توان به دو قسمت اصلی توجه کرد: جمع اوری داده ها و اجرای طبقه بندی نظارت شده تصاویر ماهواره ای (شکل ۲).

روش نظارت شده برای طبقه بندی پیکسل، کاربر را ملزم می کند که مناطق آموزشی نماینده را برای هر کلاس از پیش تعریف شده تعیین کند. تخصص کاربر نقش مهمی در شناسایی و مکان یابی این مناطق آموزشی دارد [۱۷]. محققان معمولاً روش نظارت شده را به دلیل توانایی آن در ارائه تعاریف کلاسی دقیق تر در مقایسه با روش بدون نظارت ترجیح می دهند [۱۸-۲۰]. الگوریتم های دیجیتال مختلفی برای تشخیص تغییرات کاربری زمین با استفاده از داده های سنجنش از دور توسعه یافته اند. روش های کلیدی برای تشخیص تغییرات کاربری اراضی شامل تفاوت تصویر، نسبت تصویر، تجزیه و تحلیل مؤلفه های اصلی، منطق فازی، مقایسه پس از طبقه بندی و طبقه بندی طیفی زمانی است [۲۱،۲۲]. در این تحقیق از روش حداکثر احتمال، یک رویکرد متداول با نظارت آماری برای شناسایی الگوی تغییرات استفاده شد. این روش احتمال یک پیکسل متعلق به هر کلاس از پیش تعریف شده را محاسبه می کند و پیکسل را به کلاسی با بیشترین احتمال اختصاص می دهد.

دانش قبلی از منطقه مورد مطالعه و مشاهدات میدانی نشان دهنده چندین کاربری غالب از اراضی از جمله پوشش جنگلی، زمین های



شکل ۱: موقعیت منطقه مورد مطالعه.

Fig.1: Location of the study area and sampling points

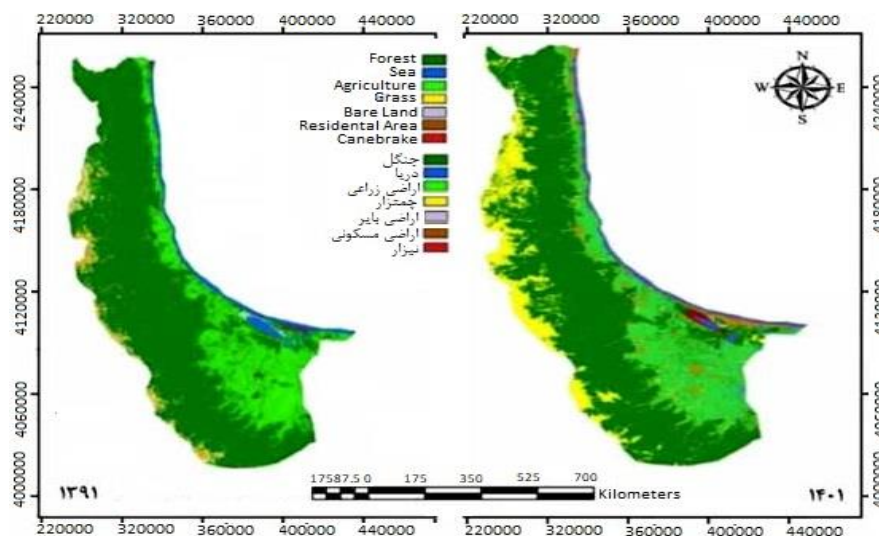
محاسبات ماتریس خطا، دقت کلی ۸۰٪ و ضریب کاپا بیش از ۰/۸ را نشان داد.

این مقادیر کاپا قوی و دقت کلی بیش از ۸۰ درصد، توافق قابل توجهی را بین طبقه‌بندی و کلاس‌های حقیقت زمینی واقعی نشان می‌دهد. این سطح بالای دقت را می‌توان به انتخاب دقیق نکات آموزشی، استفاده گسترده از تصاویر نرم افزار Google Earth برای آماده سازی نقاط آموزشی و توجه دقیق به انتخاب این نقاط نسبت داد. جدول ۱ خلاصه‌ای از دقت به دست آمده در طبقه بندی تصاویر ماهواره ای را ارائه می‌دهد.

جدول ۱: نتایج دقت کلی و ضریب کاپا برای تصویر ETM+ و OLI
Table1: The results of the overall accuracy and Kappa coefficient for ETM+ and OLI image

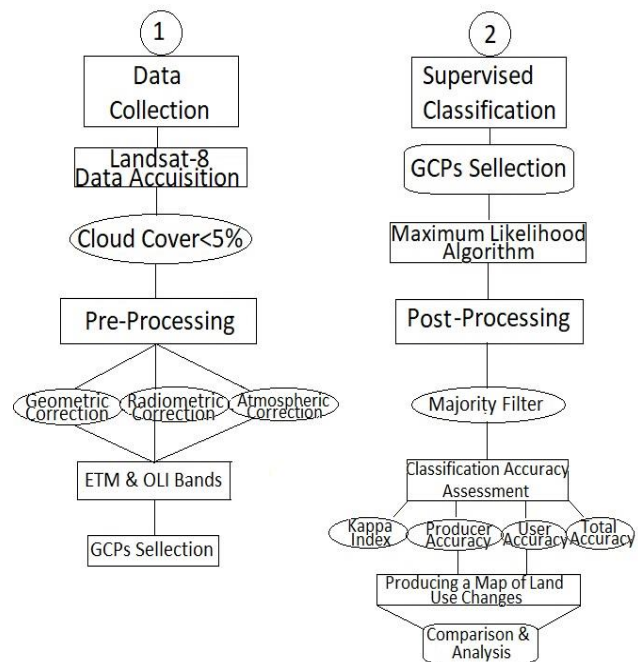
سال Year	تصویر Image	ضریب کاپا Kappa coefficient	ضریب دقت Accuracy coefficient
2012	TM	0.86	92.45
2022	ETM	0.88	92.3

در مرحله بعدی، نقشه‌های این مطالعه تحت یک تحلیل مقایسه‌ای به مدت ۱۰ سال قرار گرفتند. مساحت طبقات کاربری اراضی برای سال‌های ۱۳۹۱ و ۱۴۰۱ به صورت درصد تعیین شد. با توجه به یافته‌های نشان داده شده در شکل ۴، بهره‌برداری از مناطق جنگلی از ۴۶ درصد در سال ۱۳۹۱ به ۳۳ درصد در سال ۱۴۰۱ کاهش یافته است. تغییر مساحت اراضی مرتع نیز روند کاهشی مشابهی طی کردند، به‌طوری‌که از ۵۱ درصد در سال ۱۳۹۱ به ۴۲ درصد در سال ۱۴۰۱ رسید. مساحت زمین کشاورزی در منطقه مورد مطالعه رشد قابل توجهی را در طول دوره ۱۰ ساله نشان داد، و با افزایش ۷ درصدی در سال ۱۴۰۱ (۴۱ درصد) نسبت به سال ۱۳۹۱ (۳۴ درصد) مواجه بودیم. مساحت زمین مسکونی افزایش کلی در منطقه مورد مطالعه را تجربه کرد. به طوری‌که شاهد افزایش ۳۴ درصدی در منطقه مورد مطالعه بودیم.



شکل ۳: موقعیت منطقه مورد مطالعه.

Fig.3: Location of the study area and sampling points



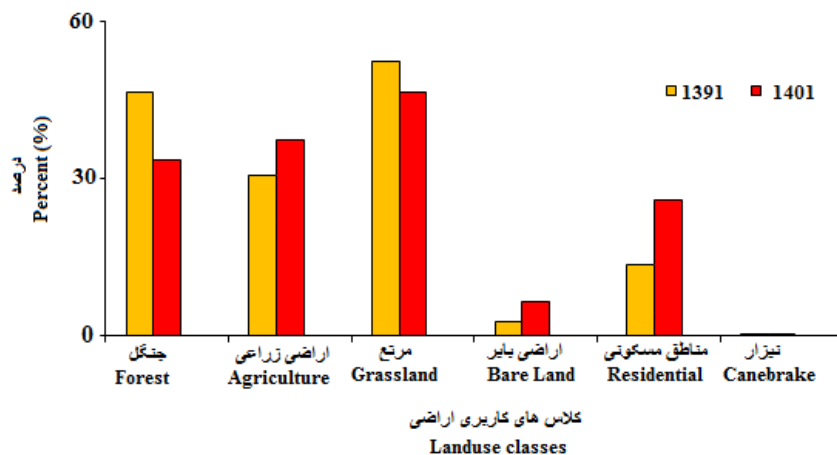
شکل ۲: فلوجارت تشریح ساختار و گردشکار روش مورد استفاده.

Fig.2: Flowchart describing the structure and workflow

نتایج و بحث

با استفاده از تصاویر ماهواره‌ای، منطقه مورد مطالعه در استان گیلان در شمال ایران به هفت واحد کاربری پوشش جنگلی، زمین کشاورزی، مرتع، مناطق دریایی، زمین بدون پوشش گیاهی، منطقه مسکونی و نیزار تقسیم شد. نقشه‌های کاربری جداگانه برای هر تاریخ تهیه شد. همانطور که در شکل ۳ نشان داده شده است، نقشه‌های کاربری زمین برای سال‌های ۱۳۹۱ و ۱۴۰۱ تهیه شد.

یکی از رایج‌ترین تکنیک‌های مورد استفاده برای ارزیابی دقت طبقه‌بندی، محاسبه ماتریس خطا است، روشی که به طور گسترده در مطالعات متعدد مورد استفاده قرار می‌گیرد. در این تحقیق، نقشه‌های طبقه‌بندی کاربری اراضی مورد ارزیابی قرار گرفتند که از طریق



شکل ۴: نمودار تغییرات کاربری اراضی از سال ۱۳۹۱ تا ۱۴۰۱

Fig. 4: Graph of land use changes from 2012 to 2022

ناهماهنگی ساختار فضایی و قطبی شدن مراکز شهری می‌شود [۳۰]. عوامل اقتصادی مانند قیمت پایین زمین کشاورزی و تقاضای کارگران مهاجر کم درآمد که به دلیل ناکارآمدی کشاورزی به دنبال سود از فروش زمین هستند، در این روند نقش دارند. استفاده از اراضی جنگلی در این منطقه در سال‌های اخیر به دلیل تعرض جمعیت‌های حاشیه‌نشین، اقدامات غیرقانونی کشاورزی و رها شدن زمین‌های تخریب‌شده کاهش یافته است. رشد جمعیت و هجوم گردشگران به مناطق جنگلی، گسترش زمین‌های مسکونی و جنگل زدایی را تشدید می‌کند. این یافته‌ها بر تأثیر متقابل پیچیده عوامل اجتماعی-اقتصادی و محیطی که باعث تغییر کاربری زمین در منطقه مورد مطالعه و فراتر از آن می‌شوند، تأکید می‌کند.

نتیجه‌گیری

این مطالعه از تصاویر ماهواره‌ای از سال ۱۳۹۱ تا ۱۴۰۱ برای تجزیه و تحلیل تغییرات کاربری زمین در سراسر منطقه، با استفاده از حداکثر الگوریتم شباهت و روش نظارت شده استفاده کرد. این تحقیق با هدف تعیین کمیت میزان تغییرات بین دسته‌های مختلف کاربری زمین در بازه زمانی مشخص شده انجام شد. یافته‌ها افزایش قابل توجهی در کاربری اراضی و مناطق مسکونی از سال ۱۳۹۱ تا ۱۴۰۱ نشان داد. به طور خاص، پوشش جنگلی در منطقه مورد مطالعه ۱۳ درصد کاهش یافت، در حالی که گسترش خیره‌کننده ۳۴ درصدی در زمین‌های مسکونی مشاهده شد. تجزیه و تحلیل داده‌ها هم‌چنین نشان داد که عمده‌ترین تغییرات مساحت زمین در منطقه به تغییرات در کاربری مسکونی نسبت داده شده است. استفاده از فناوری سنجش از دور در برآورد دقیق، کارآمد و اقتصادی این تغییرات، با تأکید بر نقش حیاتی سنجش از دور در مطالعات زیست‌محیطی، مفید بود. در این تحقیق از تصاویر ماهواره‌ای برای استخراج نقشه تغییرات کاربری زمین استفاده شد که کارایی آن را در نقشه‌برداری و ارزیابی تغییرات کاربری زمین

این نتایج حاکی از کاهش قابل توجه کاربری اراضی جنگلی به میزان ۳ درصد در منطقه مورد مطالعه است که نشان دهنده تخریب اکوسیستم است. در مقابل، شاهد تبدیل غالب اراضی منطقه به مناطق مسکونی با افزایش ۳۴ درصدی در سال ۱۳۹۱ نسبت به سال ۱۴۰۱ بود. نتایج به‌دست‌آمده از دقت کلی و ضریب کاپا (از ارزیابی‌های تصویر برای ارزیابی تغییرات منطقه) نشان‌دهنده اثربخشی تصاویر ماهواره‌ای در تشخیص تغییرات است. دقت بالای به دست آمده در این مطالعه را می‌توان به عوامل متعددی از جمله استفاده از تصاویر نرم افزار Google Earth برای آماده‌سازی نقاط آموزشی، فراوانی نقاط آموزشی و انتخاب دقیق این نقاط نسبت داد. این یافته‌ها با ادعای علی و همکاران [۲۶] مطابقت دارد که گزارش کرد طبقه‌بندی کاربری زمین مبتنی بر تصاویر ماهواره‌ای می‌تواند به سطوح دقت قابل قبولی، معمولاً حدود ۸۵ درصد دست یابد. با گذشت زمان، تغییرات در پوشش زمین و الگوهای کاربری زمین در درجه اول توسط عوامل انسانی هدایت می‌شود [۲۷]. عوامل مختلف مؤثر بر تغییر کاربری اراضی در منطقه مورد مطالعه را می‌توان به عوامل اقتصادی، حاکمیتی، جمعیتی و طبیعی دسته‌بندی کرد. عوامل اقتصادی دخیل در تغییر کاربری زمین شامل افزایش قیمت زمین پس از تبدیل و ناکارآمدی اقتصادی فعالیت‌های کشاورزی به دلیل واردات کشاورزی است [۲۸]. عوامل حاکمیتی مانند حمایت ناکافی دولت از کشاورزان و اجرا و نظارت ناکارآمد قوانین حفاظت از کاربری اراضی، در کنار گسترش بی‌رویه مناطق شهری نیز نقش مهمی ایفا کرده است. عوامل جمعیتی، از جمله تمایل ساکنان شهری به ویلاهای روستایی و مهاجرت از روستا به شهر، به گسترش شهرها دامن زده است، در حالی که تغییرات آب و هوایی و خشکسالی تخریب زمین و آلودگی محیط زیست را تشدید کرده و بر کیفیت زمین تأثیر می‌گذارد [۲۹]. بخش قابل توجهی از تبدیل زمین‌های کشاورزی و جنگلی در منطقه مورد مطالعه به گسترش کاربری مسکونی نسبت داده می‌شود، این امر تأکید بیشتری بر شهرنشینی در منطقه شرقی دارد که منجر به

[5] Navin MS, Agilandeewari L. *Comprehensive review on land use/land cover change classification in remote sensing*. Journal of Spectral Imaging 2020;9. <https://doi.org/10.1255/jsi.2020.a8>.

[6] Mallupattu PK, Sreenivasula Reddy JR. *Analysis of land use/land cover changes using remote sensing data and GIS at an Urban Area, Tirupati, India*. The Scientific World Journal 2013;2013. <https://doi.org/10.1155/2013/268623>.

[7] Liping C, Yujun S, Saeed S. *Monitoring and predicting land use and land cover changes using remote sensing and GIS techniques—A case study of a hilly area, Jiangle, China*. PLoS One 2018;13. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0200493>.

[8] Tewabe D, Fentahun T. *Assessing land use and land cover change detection using remote sensing in the Lake Tana Basin, Northwest Ethiopia*. Cogent Environ Sci 2020;6. <https://doi.org/10.1080/23311843.2020.1778998>.

[9] Habte DG, Belliethathan S, Ayenew T. *Evaluation of the status of land use/land cover change using remote sensing and GIS in Jewha Watershed, Northeastern Ethiopia*. SN Appl Sci 2021;3. <https://doi.org/10.1007/s42452-021-04498-4>.

[10] Novitasari D, Sarjiya, Hadi SP, Budiarto R, Deendarlianto. *The climate and land-use changes impact on water availability for hydropower plants in Indonesia*. Energy Strategy Reviews 2023;46. <https://doi.org/10.1016/j.esr.2022.101043>.

[11] Xu Q, Zhu AX, Liu J. *Land-use change modeling with cellular automata using land natural evolution unit*. Catena (Amst) 2023;224. <https://doi.org/10.1016/j.catena.2023.106998>.

[12] Arifin T, Nur Amri S, Rahmania R, Yulius, Ramdhan M, Chandra H, et al. *Forecasting land-use changes due to coastal city development on the peri-urban area in Makassar City, Indonesia*. Egyptian Journal of Remote Sensing and Space Science 2023;26. <https://doi.org/10.1016/j.ejrs.2023.02.002>.

[13] Agarwal P, Sahoo D, Parida Y, Ranjan Paltasingh K, Roy Chowdhury J. *Land use changes and natural disaster fatalities: Empirical analysis for India*. Ecol Indic 2023;154. <https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2023.110525>.

[14] Adjei-Poku B, Afrane SK, Amoako C, Inkoom DKB. *Customary land ownership and land use change in Kumasi: An issue of chieftaincy sustenance*. Land Use Policy 2023;125. <https://doi.org/10.1016/j.landusepol.2022.106483>.

[15] Ghalambordezfooly R, Hosseini F. *Factors Affecting Illegal Land-use Changes in Residential Areas: (Case Study: District 6 of Tehran)*. Journal of Regional and City Planning 2023;34. <https://doi.org/10.5614/jpwk.2023.34.2.5>.

[16] Li L, Xu E. *Scenario analysis and relative importance indicators for combined impact of climate and land-use change on annual ecosystem services in the Karst mountainous region*. Ecol Indic 2023;147. <https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2023.109991>.

[17] Taan A, Farou Z. *Supervised Learning Methods for Skin Segmentation Based on Pixel Color Classification, Central-*

نشان می‌دهد. این مطالعه بر نیاز مبرم برای رسیدگی به شیوه‌های نامناسب کاربری اراضی و کاهش تغییرات شدید کاربری زمین، به‌ویژه کاهش جنگل‌ها، که چالش‌هایی را برای توسعه هماهنگ و پایدار ایجاد می‌کند و بر کیفیت زندگی در استان گیلان تأثیر منفی می‌گذارد، تأکید می‌کند. در نتیجه، اقدامات پیشگیرانه برای محدود کردن تغییر کاربری زمین و تخریب محیط زیست، به‌ویژه در سال‌های اخیر ضروری است. اقدامات پیشنهادی شامل:

- اجرای دقیق قوانین حفاظت از کاربری اراضی برای حفاظت از منابع طبیعی.

- استفاده از تصاویر ماهواره‌ای با وضوح فضایی بالاتر برای افزایش دقت استخراج کاربری اراضی و تسهیل نظارت بر تغییرات منطقه.

- مقایسه و هم‌سویی کاربری‌های موجود با کاربری‌های مطلوب، اصلاح شیوه‌های کاربری نامطلوب.

- انجام مطالعات و ارزیابی‌های جامع آمایش سرزمین برای طبقه‌بندی منابع زمین و تعیین راهبردهای کاربری بهینه.

- تدوین برنامه‌های بلند مدت، میان مدت و کوتاه مدت برای احیای منابع تخریب شده و حفاظت از اکوسیستم‌های حیاتی.

مشارکت نویسندگان

در این مقاله، نویسندگان به نسبت سهم برابر مشارکت داشته‌اند.

تشکر و قدردانی

بدینوسیله از همکارانی که ما را در انجام این تحقیق یاری کردند، صمیمانه تشکر می‌کنیم.

تعارض منافع

«هیچ‌گونه تعارض منافع توسط نویسندگان بیان نشده است.»

منابع و مآخذ

[1] Lin J, Li X, Wen Y, He P. *Modeling urban land-use changes using a landscape-driven patch-based cellular automaton (LP-CA)*. Cities 2023;132. <https://doi.org/10.1016/j.cities.2022.103906>.

[2] Elagouz MH, Abou-Shleel SM, Belal AA, El-Mohandes MAO. *Detection of land use/cover change in Egyptian Nile Delta using remote sensing*. Egyptian Journal of Remote Sensing and Space Science 2020;23. <https://doi.org/10.1016/j.ejrs.2018.10.004>.

[3] Abebe G, Getachew D, Ewunetu A. *Analysing land use/land cover changes and its dynamics using remote sensing and GIS in Gubalafito district, Northeastern Ethiopia*. SN Appl Sci 2022;4. <https://doi.org/10.1007/s42452-021-04915-8>.

[4] Reis S. *Analyzing land use/land cover changes using remote sensing and GIS in Rize, North-East Turkey*. Sensors 2008;8. <https://doi.org/10.3390/s8106188>.

Computer Vision and Pattern Recognition Workshops, vol. 2022- June, 2022.
<https://doi.org/10.1109/CVPRW56347.2022.00139>.

[30] Blix K, Ruescas AB, Johnson JE, Camps-Valls G. *Learning Relevant Features of Optical Water Types*. IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters 2022;19.
<https://doi.org/10.1109/LGRS.2021.3072049>.

معرفی نویسندگان

AUTHOR(S) BIOSKETCHES



شیلان فعله‌گری دانشجوی مقطع دکتری مهندسی علوم خاک بوده و مشغول فعالیت در حوزه آموزش و پژوهش است. ایشان دوره کارشناسی و کارشناسی ارشد خود را در دانشگاه بوعلی همدان و در زمینه کیفیت خاک سپری کرده اند زمینه‌های تخصصی و علاقمندی ایشان عبارتند از: توسعه کاربردهای سنجش از دور، پایش تغییرات اقلیمی و نقشه برداری خاک

Felehgari, S. Department of Soil Science, Faculty of Agriculture, University of Zanjan, Zanjan, Iran.

✉ Shilan.Felegari@znu.ac.ir



کامران مروج دانشیار گروه مهندسی علوم خاک در دانشکده کشاورزی دانشگاه زنجان می‌باشند. فعالیت‌های پژوهشی اخیر وی در حوزه تهیه نقشه رقومی خاک، تجزیه و تحلیل‌های ژئومرفومتری و ارزیابی تناسب اراضی است. همچنین کاربردهای سنجش از دور در پایش تغییرات اقلیمی، مدیریت کاربری و پوشش اراضی و مدل‌سازی محیطی با استفاده از کلان داده‌های سنجش از دور از زمینه‌های تخصصی ایشان است.

Moravej, K. Associate Professor at the Department of Soil Science, Faculty of Agriculture, University of Zanjan, Zanjan, Iran.

✉ Kmoravej@znu.ac.ir



علیرضا شریفی دانشیار گروه مهندسی نقشه‌برداری در دانشکده مهندسی عمران دانشگاه تربیت دبیر شهید رجائی 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 می‌باشد. در حال حاضر ایشان بیش از

European. Journal of New Technologies in Research, Education and Practice 2021;3.
<https://doi.org/10.36427/cejntrep.3.1.779>.

[18] Chaitanya K, Erdil E, Karani N, Konukoglu E. *Local contrastive loss with pseudo-label based self-training for semi-supervised medical image segmentation*. Med Image Anal 2023;87. <https://doi.org/10.1016/j.media.2023.102792>.

[19] Shi Z, Ma Y, Fu M. *Fuzzy Support Tensor Product Adaptive Image Classification for the Internet of Things*. Comput Intell Neurosci 2022;2022. <https://doi.org/10.1155/2022/3532605>.

[20] Phan S, Torrejon D, Furseth J, Mee E, Luscombe C. *Exploiting weak supervision to facilitate segmentation, classification, and analysis of microplastics (<100 μm) using Raman microspectroscopy images*. Science of the Total Environment 2023;886.
<https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2023.163786>.

[21] Mittal S, Tatarchenko M, Brox T. *Semi-Supervised Semantic Segmentation with High- And Low-Level Consistency*. IEEE Trans Pattern Anal Mach Intell 2021;43.
<https://doi.org/10.1109/TPAMI.2019.2960224>.

[22] Liu H, Qi Y, Xiao W, Tian H, Zhao D, Zhang K, et al. *Identification of Male and Female Parents for Hybrid Rice Seed Production Using UAV-Based Multispectral Imagery*. Agriculture. (Switzerland) 2022;12.
<https://doi.org/10.3390/agriculture12071005>.

[23] Tang W, Hu J, Zhang H, Wu P, He H. *Kappa coefficient: a popular measure of rater agreement*. Shanghai Arch Psychiatry 2015;27. <https://doi.org/10.11919/j.issn.1002-0829.215010>.

[24] De Raadt A, Warrens MJ, Bosker RJ, Kiers HAL. *Kappa Coefficients for Missing Data*. Educ Psychol Meas 2019;79.
<https://doi.org/10.1177/0013164418823249>.

[25] Foody GM. *Explaining the unsuitability of the kappa coefficient in the assessment and comparison of the accuracy of thematic maps obtained by image classification*. Remote Sens Environ 2020;239. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2019.111630>.

[26] Ali K, Johnson BA. *Land-Use and Land-Cover Classification in Semi-Arid Areas from Medium-Resolution Remote-Sensing Imagery: A Deep Learning Approach*. Sensors 2022;22.
<https://doi.org/10.3390/s22228750>.

[27] Rowland MM, Nielson RM, Wisdom MJ, Clark DA, DiDonato GT, Hafer JM, et al. *Success is dependent on effort: Unraveling characteristics of successful deer and elk hunters*. Wildl Soc Bull 2023;47. <https://doi.org/10.1002/wsb.1414>.

[28] Kanga S, Meraj G, Johnson BA, Singh SK, PV MN, Farooq M, et al. *Understanding the Linkage between Urban Growth and Land Surface Temperature—A Case Study of Bangalore City, India*. Remote Sens (Basel) 2022;14.
<https://doi.org/10.3390/rs14174241>.

[29] Johnson N, Treible W, Crispell D. *Open Sentinel Map: A Large-Scale Land Use Dataset using Open Street Map and Sentinel-2 Imagery*. IEEE Computer Society Conference on

فضایی شیمی و دینامیک ماده آلی در خاک‌ها، آلودگی خاک و تغذیه گیاه می‌باشد و اخیراً در زمینه بیوچار نیز به تحقیقات گسترده‌ای پرداخته‌اند.

Golchin, A. Professor at the Department of Soil Science, Faculty of Agriculture, University of Zanjan, Zanjan, Iran.

✉ agolchin2011@yahoo.com



پرویز کرمی استادیار گروه مرتعداری در دانشکده کشاورزی دانشگاه کردستان می‌باشند. فعالیت‌های پژوهشی اخیر وی در حوزه کارایی اشکال و سطوح مختلف پلات برای برآورد تولید علفزارهای نیمه استپی و شبیه سازی عملکرد اکوسیستم‌های مرتعی با مدل CENTURY می‌باشد.

Karami, P. Assistant Professor at the Department of Range and Watershed Management, Faculty of Natural Resources, University of Kurdistan, Kurdistan, Iran.

✉ P.karami@uok.ac.ir

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 Surveying and Geomatics Engineering, Faculty of Civil Engineering, Shahid Rajaee Teacher Training University, Tehran, Iran

✉ a_sharifi@sru.ac.ir



احمد گلچین استاد گروه مهندسی علوم خاک در دانشکده کشاورزی دانشگاه زنجان می‌باشند. ایشان دوره‌های کارشناسی، کارشناسی ارشد و دکترای خود را به ترتیب در دانشگاه‌های شیراز، تهران و ادلاید استارلیا سپری کردند. فعالیت‌های پژوهشی اخیر وی در حوزه حاصلخیزی خاک، توزیع

Citation (Vancouver): Felegari Sh, Moravej k, Sharifi A, Golchin A, Karami P. [Land use changes using satellite images processing and geographic information systems in Gilan province, Iran]. *J. RS. GEOINF. RES.* 2025; 3(2): 287-295

 <https://doi.org/10.22061/jrsgr.2025.11659.1091>



COPYRIGHTS

© 2025 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/>)



ORIGINAL RESEARCH PAPER

A Web-Based GIS Framework for Optimal Bank Branch Selection Using MCDM Algorithms

A. Pourbeik¹, J. Saberian^{*2}, S. Mohseni²¹ Department of GIS and Remote Sensing, Faculty of Natural Resources and Environment, Islamic Azad University, Science and Research Branch, Tehran, Iran² Department of Surveying Engineering, Faculty of Engineering, Islamic Azad University, South Tehran Branch, Tehran, Iran

ABSTRACT

Received: 21 April 2025
 Reviewed: 06 July 2025
 Revised: 14 August 2025
 Accepted: 04 October 2025

KEYWORDS:

GIS
 WebGIS
 MCDM
 AHP
 Smart Banking

* Corresponding author

✉ j_saberian@azad.ac.ir

☎ (+9821) 33722831

Background and Objectives: In the modern era, the banking industry is continuously developing solutions to provide faster, more convenient, and more intelligent services to its customers. With the digitalization of nearly 80% of banking services, customer expectations for personalized experiences have surged. In this context, Geographic Information Systems (GIS) have emerged as a powerful tool for location-based analysis and decision-making optimization. Previous studies have demonstrated that GIS can play a vital role in selecting new branch locations, assessing market share, and determining optimal routing. However, a need persists for an integrated tool that empowers customers to select the most suitable branch based on their priorities. The loss of time and the confusion customers face when searching for a branch that offers their required services remain significant challenges for in-person banking. The primary objective of this research is to design and develop an intelligent, user-centric Web-based Geographic Information System (WebGIS) for the optimal selection of bank branches. By integrating web technologies, GIS, and Multi-Criteria Decision-Making (MCDM) algorithms, this system aims to streamline the branch selection process for customers. The specific aims of this study include: creating an interactive platform for searching and displaying branch information; implementing an optimal routing functionality that accounts for real-world constraints; and, most importantly, providing a feature for ranking branches based on user-personalized criteria, thereby enabling the most intelligent choice in the minimum possible time.

Methods: In this research, a multi-stage approach was employed for the system's development. Initially, a geospatial database was created within the ArcGIS Desktop environment using the WGS84 Web Mercator coordinate system. Data about the branches of Dey Bank, including both attribute data (name, address, code, services) and spatial information, were stored in this database. To ensure optimal management and facilitate concurrent user access, an Enterprise Geodatabase was utilized on the Microsoft SQL Server platform. In the subsequent stage, the required map services, encompassing the branch layer and the network analysis layer for routing, were published via ArcGIS for Server. The client-side of the system was developed using the ArcGIS API for JavaScript, which provides interactive functionalities such as searching, displaying information, filtering, and routing. For the implementation of the intelligent selection component, the Analytic Hierarchy Process (AHP), a prominent multi-criteria decision-making method, was adopted. The decision criteria selected were: VIP branch status, availability of safe deposit boxes, provision of foreign exchange services, and access to insurance services. Through a user interface, users can perform pairwise comparisons of these criteria to specify their relative importance. The system then utilizes these comparisons to construct a comparison matrix, normalizes it, and calculates the final weight for each criterion. These weights are ultimately applied to compute the final score and ranking for all bank branches.

Findings: The outcome of this research is a fully operational WebGIS system, successfully accessible via web browsers across various platforms. Through this system, users can visualize all bank branches on an interactive map and access comprehensive information by clicking on any branch.

The most significant finding of this study is the successful implementation of the AHP algorithm. The system ranks all branches based on these priorities and subsequently suggests

the most suitable options to the user. Furthermore, a routing capability from the user's current location to a selected branch is incorporated into the system. This feature considers the traffic restriction zone layer as a barrier and renders the optimal route as a graphical line on the map.

Conclusion: This research demonstrates that integrating WebGIS technology with multi-criteria decision-making algorithms, such as AHP, offers a highly effective solution to the real-world challenge of optimal service selection. By providing a suitable and intelligent platform, the developed system significantly mitigates the time loss and confusion experienced by customers, empowering them to make an informed choice that is fully aligned with their personal needs.

This intelligent selection process enhances the customer experience for in-person banking, representing a significant step toward increasing customer satisfaction and loyalty. The study confirms that investing in intelligent location-based systems is value-adding not only for customers but also for organizations, enabling them to optimize services and gain a better understanding of demand patterns. This creates a win-win scenario for both service providers and their clientele.



NUMBER OF REFERENCES
30



NUMBER OF FIGURES
4



NUMBER OF TABLES
4

مقاله پژوهشی

طراحی و توسعه سامانه اطلاعات مکانی تحت وب برای انتخاب هوشمند شعبه بانک با استفاده از الگوریتم‌های تصمیم‌گیری چندمعیاره

آرمین پوربیک^۱، جواد صابریان^{۲*}، سیدمحمدسینا سیدمحسنی^۲

^۱ گروه سنجش از دور و سیستم اطلاعات جغرافیایی، دانشکده منابع طبیعی و محیط زیست، دانشگاه آزاد اسلامی، واحد علوم تحقیقات، تهران، ایران
^۲ گروه مهندسی نقشه برداری، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه آزاد اسلامی، واحد تهران جنوب، تهران، ایران

چکیده

پیشینه و اهداف: در دنیای مدرن، صنعت بانکداری به طور مداوم در حال توسعه راهکارهایی برای ارائه خدمات سریع‌تر، آسان‌تر و هوشمندانه‌تر به مشتریان است. با دیجیتالی شدن نزدیک به ۸۰ درصد خدمات بانکی، انتظارات مشتریان برای تجربه‌های شخصی‌سازی شده افزایش یافته است. در این میان، سیستم‌های اطلاعات مکانی به ابزاری کارآمد برای تحلیل‌های مبتنی بر مکان و بهینه‌سازی تصمیم‌گیری‌ها بدل شده‌اند. مطالعات پیشین نشان است که GIS می‌تواند در انتخاب مکان شعب جدید، ارزیابی سهم بازار و مسیریابی بهینه نقشی حیاتی ایفا کند. با این حال جای خالی یک ابزار یکپارچه که به مشتریان اجازه دهد تا بر اساس اولویت‌های فردی خود بهترین شعبه را انتخاب کنند همچنان احساس می‌شود. اتلاف وقت و سردرگمی مشتریان برای یافتن شعبه‌ای که خدمات مورد نظرشان را ارائه می‌دهد، یکی از چالش‌های خدمات حضوری است. هدف اصلی این پژوهش، طراحی و توسعه یک سامانه اطلاعات مکانی تحت وب (WebGIS) هوشمند و کاربرمحور برای انتخاب بهینه شعب بانکی است. این سامانه با تلفیق وب، GIS و الگوریتم‌های تصمیم‌گیری چندمعیاره (MCDM) به دنبال تسهیل فرآیند انتخاب شعبه برای مشتریان است. اهداف مشخص این تحقیق شامل ایجاد یک پلتفرم تعاملی برای جست‌وجو و نمایش اطلاعات شعب، پیاده‌سازی قابلیت مسیریابی بهینه با در نظر گرفتن محدودیت‌های ترافیکی و مهم‌تر از همه، فراهم کردن امکانی برای رتبه‌بندی شعب بر اساس معیارهای شخصی‌سازی شده توسط کاربر است تا هوشمندانه‌ترین انتخاب در کمترین زمان ممکن رخ دهد.

روش‌ها: در این تحقیق، از یک رویکرد چندمرحله‌ای برای توسعه سامانه استفاده شد. ابتدا پایگاه داده اطلاعات مکانی در محیط ArcGIS Desktop و با سیستم مختصات UTM ایجاد گردید. داده‌های مربوط به شعب بانک دی، شامل اطلاعات مکانی و توصیفی (نام، آدرس، کد، نوع خدمات)، در این پایگاه داده ذخیره شد. برای مدیریت بهینه و امکان دسترسی همزمان کاربران، از Enterprise Geodatabase بر روی بستر Microsoft SQL Server استفاده شد. در

تاریخ دریافت: ۰۱ اردیبهشت ۱۴۰۴
تاریخ داوری: ۱۵ تیر ۱۴۰۴
تاریخ اصلاح: ۲۳ مرداد ۱۴۰۴
تاریخ پذیرش: ۱۲ مهر ۱۴۰۴

واژگان کلیدی:

سیستم اطلاعات مکانی
WebGIS
تصمیم‌گیری چندمعیاره
فرآیند تحلیل سلسله مراتبی
بانکداری هوشمند

* نویسنده مسئول

j_saberian@azad.ac.ir

① ۲۱-۳۲۷۲۲۸۳۱

مرحله بعد سرویس‌های نقشه مورد نیاز، از جمله لایه شعب و تحلیل شبکه برای مسیریابی، از طریق ArcGIS for Server منتشر شدند. بخش سمت کاربر سامانه با بهره‌گیری از ArcGIS JavaScript API توسعه داده شد که امکانات تعاملی مانند جستجو، نمایش اطلاعات، فیلتر کردن و مسیریابی را فراهم می‌کند. برای پیاده‌سازی بخش انتخاب هوشمند بانک، از فرآیند تحلیل سلسله مراتبی (AHP) به عنوان یکی از روش‌های تصمیم‌گیری چندمعیاره استفاده شد. معیارهای تصمیم‌گیری شامل VIP بودن شعبه، وجود صندوق امانات، دارا بودن باجه ارزی و برخورداری از خدمات بیمه انتخاب شدند. کاربران می‌توانند از طریق یک رابط کاربری، این معیارها را به صورت زوجی مقایسه کرده و میزان ارجحیت هر کدام را مشخص کنند. سپس سامانه با استفاده از این مقایسات زوجی، ماتریس مقایسه را تشکیل داده، آن را نرمال‌سازی کرده و وزن نهایی هر معیار را محاسبه می‌کند. این وزن‌ها در نهایت برای محاسبه امتیاز و رتبه‌بندی نهایی هر شعبه بانک به کار گرفته می‌شوند.

یافته‌ها: نتیجه این پژوهش، یک سامانه WebGIS کاملاً عملیاتی است که با موفقیت بر روی مرورگرهای وب در پلتفرم‌های مختلف قابل اجرا است. پیاده‌سازی موفق الگوریتم AHP بزرگترین یافته این پژوهش است. سامانه پس از دریافت اولویت‌ها، تمامی شعب را بر اساس آن رتبه‌بندی کرده و در آخر مناسب‌ترین گزینه‌ها را به کاربر پیشنهاد می‌دهد. علاوه بر این قابلیت مسیریابی از مکان فعلی کاربر به شعبه منتخب، با در نظر گرفتن لایه محدوده طرح ترافیک به عنوان مانع احتمالی، در سامانه تعبیه شده است و بهترین مسیر به صورت یک پلی‌لاین بر روی نقشه ترسیم می‌شود. کاربران از طریق این سامانه قادر هستند تا تمامی شعب بانک را بر روی نقشه مشاهده کرده و با کلیک بر روی هر شعبه، به جزئیات کامل آن دسترسی پیدا کنند.

نتیجه‌گیری: این تحقیق نشان داد که ادغام فناوری WebGIS با الگوریتم‌های تصمیم‌گیری چندمعیاره مانند AHP، راهکاری بسیار مؤثر برای حل چالش‌های انتخاب بهینه خدمات بانکی در دنیای واقعی است. سامانه توسعه‌یافته با فراهم کردن بستری مناسب و هوشمند قادر است به طور قابل توجهی از اتلاف وقت و سردرگمی مشتریان بکاهد و به آن‌ها کمک می‌کند تا انتخابی آگاهانه و کاملاً منطبق بر نیازهای شخصی خود داشته باشند. این فرآیند انتخاب هوشمند، تجربه مشتری از خدمات حضوری بانکی را بهبود بخشیده و می‌تواند گامی بزرگ در جهت افزایش رضایت و وفاداری مشتریان باشد. این پژوهش ثابت کرد که سرمایه‌گذاری در سیستم‌های مکان‌محور و هوشمند، نه تنها برای مشتریان، بلکه برای سازمان‌ها نیز در جهت بهینه‌سازی خدمات و درک بهتر الگوهای تقاضا، ارزش‌آفرین است.

مقدمه

طریق این سیستم توزیع یافته انجام خواهد شد. با استفاده از تکنولوژی WebGIS می‌توان علاوه بر رفع محدودیت‌های GIS محلی امکان یکپارچه‌سازی و دسترسی به اطلاعات در زمان‌ها و مکان‌های مختلف را فراهم کرد [۴-۶]. اطلاع‌رسانی در خصوص خدمات قابل ارائه در مراکز خدمات‌رسانی نقش مهمی در بازاریابی و جذب مشتریان دارد.

صنعت بانک‌داری نیز طی سال‌های اخیر به صورت مداوم در حال توسعه‌ی راهکارها و روش‌هایی است که مشتریان بتوانند سریع‌تر، آسان‌تر و هوشمندانه‌تر از خدمات بانکی استفاده کنند [۷-۹]. توسعه و همه‌گیری خدمات نوین بانکی از طریق اینترنت و گوشی‌های تلفن همراه گواه بر این موضوع است بطوریکه نزدیک به ۸۰ درصد خدمات بانکی دیجیتال شده‌اند و مشتریان انتظار دارند در سال‌های آینده شاهد ارتقاء فرآیند بانکی دیجیتال بیشتری باشند [۱۰، ۱۱]. برنامه‌های GIS وب‌مبنا قادر به نمایش اطلاعات و عوارض مربوط به شاخص‌های توسعه‌ی پایدار نیز هستند و این سیستم می‌تواند ابزاری را برای برنامه‌ریزان، مدیران و عموم مردم به وسیله‌ی ایجاد یک نقطه شروع برای نمایش اطلاعات مکانی زمان مرجع فراهم نماید که کاربران شاهد سرعت رشد رسیدن به توسعه پایدار باشند. انواع این سامانه‌ها امکان قابلیت دسترسی به توصیفات، نمایش و یا عدم نمایش یک شاخص خاص و یکپارچه شدن با منابع شبکه‌های اجتماعی را دارا هستند [۱۲].

در سال‌های اخیر، نرخ توسعه فناوری در زمینه GIS بسیار سریع بوده است [۱، ۲]؛ از طرف دیگر، تکنولوژی‌های کامپیوتری به شدت قدرتمندتر از قبل شده‌اند که تأثیر این اتفاق در بهبود آنالیزهای مکانی کاملاً مشهود است. در دنیای مدرن امروز آنالیز و مطالعات جغرافیایی به یکی از ارکان اصلی محاسبات بازاریابی، معرفی خدمات، رشد شرکت‌ها و کسب‌وکارها بدل شده است بطوریکه در این حوزه مطالعات مکانی و استفاده از سیستم‌های اطلاعات مکانی به ابزاری بسیار مفید و کارآمد برای آنالیزهای مربوط به مکان و تصمیم‌گیری‌های بهینه در این حوزه تبدیل شده‌اند از این‌رو در فازهای پیشرفته، این سیستم تبدیل به دسترسی قدرتمند برای پشتیبانی از فعالیت مدیران و تصمیم‌گیران شده است [۳]. توسعه سیستم اطلاعات مکانی به‌طور مستقیم تأثیرپذیر از پیشرفت حوزه فناوری اطلاعات بوده که پیشرفت‌های عمیق GIS منعکس‌کننده توسعه روزافزون حوزه فناوری اطلاعات است. این سیستم در سال‌های اخیر به صورت WebGIS و سپس MobileGIS تکامل یافته است. پیش از آن، جهت پردازش و آنالیز داده‌های مکانی، نصب انواع نرم‌افزارهای مربوطه حوزه GIS بر روی سیستم کامپیوتری امری لازم و ضروری بود، اما امروزه با توسعه فناوری WebGIS به تدریج به سمت سیستم اطلاعات جغرافیایی توزیع یافته (Distributed GIS System) پیش رفته‌ایم که در آن دستیابی به داده‌ها و تحلیل‌ها از

در پژوهشی به مکانیابی موقعیت بانکها در کشور روسیه پرداخته‌اند [۲۱]. روغنیان و همکاران نیز در پژوهشی مشابه به موقعیت یابی بانکها در شهر اصفهان با استفاده از سیستم اطلاعات مکانی پرداخته‌اند [۲۲]. همچنین ندال و همکاران در ۲۰۰۳ تحقیقی را در مورد مکانی‌یابی شعب بانک در عمان انجام داده‌اند. در تحقیق آنها GIS ابزاری قدرتمند برای کمک به بانکها برای مکان‌یابی شعب جدید و خودپردازها، رستوران‌ها و ... معرفی می‌شود [۲۳]. لو و همکاران با استفاده از تکنیکهای داده کاوی و ابزارهای ذخیره سازی داده به طراحی و توسعه یک سامانه مدیریت اطلاعات بانک پرداخته‌اند [۲۴].

با وجود تحقیقات متعددی که تا کنون در زمینه WebGIS و در زمینه مکانیابی بانک با استفاده از GIS انجام شده است، اما تحقیقی در زمینه انتخاب هوشمند شعبه بانک بر اساس نیاز مشتریان مشاهده نشده است. لذا در این پژوهش با بهره‌گیری از مزایای سیستم اطلاعات مکانی، اینترنت و وب و تلفیق آن با روش‌های تصمیم‌گیری چندمعیاره، روند انتخاب و دسترسی به شعب بانک در شهرهای کوچک و بزرگ خصوصاً کلان‌شهرها برای مشتریان تسهیل می‌شود. این سامانه از طریق کامپیوتر و تلفن همراه در اختیار مشتریان بانک قرار گرفته تا آن‌ها را در هر زمان و هر مکان برای انتخاب بهترین شعبه بانک و مسیریابی بهینه آن یاری کند.

روش تحقیق

○ معیارهای انتخاب شعبه بانک

در این پژوهش معیارهای VIP بودن شعبه، وجود صندوق امانات، دارا بودن باجه ارزی و همچنین برخورداری از خدمات بیمه، برای توسعه‌ی سامانه در نظر گرفته شده‌اند.

شعبه VIP: در شعب VIP، مشتریان خاص در محیطی آرام و دلپذیر، دریافت خدمات بانکی و غیربانکی را تجربه می‌کنند. شعب VIP با فضایی خصوصی و متفاوت‌تر از سایر شعب و با ایجاد حس آرامش و امنیت بالا برای مشتریان ایجاد شده است که می‌توانند تمامی امور بانکی و غیر بانکی خود را توسط بانکدار اختصاصی پیگیری نمایند.

صندوق امانات: از جمله خدماتی که بانک‌ها به مشتریان خود ارائه می‌کنند، نگهداری اشیاء، اسناد و کالاهای ارزشمند مشتریان بانک، در صندوق امانات بانک می‌باشد. قرارداد صندوق امانات بانک‌ها، یک قرارداد خصوصی به موجب ماده ده قانون مدنی می‌باشد و حدود مسئولیت بانک، در قبال صندوق و مشتری بستگی به مفاد عقد و تعهدات بانک، در قرارداد دارد.

باجه /رزی: شعبی از بانک که در آن‌ها خدمات ارزی-ریالی و خدمات مربوط به سپرده‌های ارزی انجام می‌گردد.

خدمات بیمه: شامل انواع خدمات بیمه‌های درمانی، تکمیلی، عمر، آتیه، خودرو، ساختمان و ... می‌باشد.

در سال‌های اخیر استفاده از GIS در زمینه بازاریابی و تجارت در کشورهای توسعه یافته به شدت افزایش یافته است. به عنوان نمونه بانک‌های کانادایی از GIS برای انتخاب مکان احداث شعب جدید، شناسایی ریسک تعطیلی یک شعبه، انجام فعالیت‌های بازاریابی، شناخت بهتر بازار و مسیریابی بهینه مشتریان به شعب استفاده نموده‌اند. دونالد و همکاران در سال ۲۰۰۱ به روش‌های ادغام شعب و راه‌های دستیابی به آن پرداخته‌اند. پژوهش آن‌ها بروی نقش GIS در کمک به اجرای یک طرح اقتصادی تاکید می‌کند. آنها برای برآورد سهم بازار از مدل خاصی استفاده کرده‌اند که در آن از نرم‌افزارهای GIS برای محاسبه فاصله‌ی میان مناطق و شعب استفاده می‌شود [۱۳]. GIS در سیستم بانکداری و سازمان‌دهی شبکه سرویس‌دهی نقش مهمی ایفا می‌کند؛ ترکیب مدل عرضه و تقاضا و سیستم اطلاعات مکانی می‌تواند مکان بهینه شعب بانک را مشخص کند [۱۴]. سوتانتا و همکاران در مقاله خود به کاربرد WebGIS جهت مدیریت دارایی در سازمانهای بزرگ پرداخته‌اند. نتایج آزمایش نمونه اولیه آنها نشان داد که WebGIS اطلاعات مختلفی را در مورد دارایی‌های سازمانی به صورت بصری بر اساس نقشه‌های دیجیتال ارائه می‌دهد که متناسب با نیازهای کاربران می‌باشد [۱۵]. پنیگراهی و همکاران در پژوهش سال ۲۰۰۳ به چگونگی استفاده از ابزار GIS، برای ساده‌سازی سامانه مدیریت کسب اطلاعات در بانک‌ها و ارگان‌های اقتصادی می‌پردازند. مقاله‌ی آن‌ها پیشنهاد رویکرد استفاده از سامانه‌ی GIS یکپارچه را ارائه می‌دهد که به بانک‌ها امکان مکان‌یابی شعب جدید بانک و خودپردازها را می‌دهد [۱۶]. فو نشان داد که چطور از سیستم اطلاعات مکانی برای توزیع شبکه‌ی بانکی در محدوده‌ی تجاری شهر نیویورک استفاده شده است. سیستم اطلاعات مکانی قادر است اطلاعات ارزشمندی در حوزه ترکیب تراکم، عرضه و تقاضا و فعالیت‌های اقتصادی تولید نماید [۱۷]. همچنین علی حسینی در پایان‌نامه‌ی کارشناسی ارشد خود، به مطالعه‌ی نحوه‌ی استقرار شعب بانک‌ها با تأکید بر جمعیت، نحوه‌ی استقرار بانک‌ها در ارتباط با کاربری‌های مجاور از نظر میزان سازگاری یا ناسازگاری و ارائه‌ی پیشنهادهایی جهت بهبود فضایی شعب بانک‌های منطقه ۳ شهر اصفهان پرداخته است. وی در نهایت نتیجه گرفته که استقرار شعب بانک‌های منطقه ۳ در ارتباط با جمعیت ساکن و تراکم آن‌ها مناسب نبوده و دسترسی در برخی قسمت‌های منطقه نسبتاً ضعیف بوده است. همچنین از نظر میزان سازگاری کاربری‌های مجاور بانک در منطقه، ناسازگاری نسبتاً بالایی مشاهده کرده است [۱۸]. از سامانه‌های WebGIS در حوزه تحقیق و توسعه کشور، می‌توان به پژوهش قلیچ‌خانی و همکاران اشاره کرد که در این زمینه سامانه‌ای پویا و کاربردی طراحی نمودند. آن‌ها با استفاده از نرم‌افزار ArcIMS، ArcSDE و نگهداری داده گردشگران در سیستم مدیریت پایگاه داده و SQL Server، با استفاده از HTML سامانه‌ای جهت رفاه حال گردشگران قم طراحی کردند [۱۹]. مائو و لیمن در پژوهش خود WebGIS را طراحی کردند که با توجه به احترام به حقوق شهروندی بومی‌های کانادایی به مدیریت منابع کمک می‌کند [۲۰]. ماکزیمکو و همکاران

وزن معیار بدست آمده از جدول ۳ و W_{ij} میزان سهم هر شعبه از هر معیار می‌باشد که می‌تواند از مقایسات زوجی بین شعب بدست آید. در این پژوهش W_{ij} همواره برابر صفر و یک خواهد بود. صفر به معنی نداشتن معیار و یک به معنی داشتن معیار توسط شعبه مورد نظر می‌باشد.

$$W_i = \sum_{j=1}^4 w_j \times w_{ij} \quad (1)$$

پیاده سازی و اجرا

○ آماده سازی پایگاه داده مکانی

ابتدا یک پایگاه داده مکانی ایجاد و موقعیت مکانی ۵۴ شعبه مختلف از شعب بانک دی از شهر تهران به صورت یک لایه نقطه ای در آن وارد شد. اطلاعات توصیفی مورد نیاز شعب نیز از طریق نرم افزار ArcGIS وارد پایگاه داده گردید، در نتیجه پایگاه اطلاعات مکانی و توصیفی مورد نیاز برای ورود به سامانه تکمیل شد. با توجه به نیاز کاربران آن‌ها باید بتوانند در محیط سامانه به ویرایش، حذف یا اضافه کردن اطلاعات موجود در پایگاه داده انتشار یافته از سمت سرور بپردازند. لذا استفاده از ژئودیتابیس در نرم افزار ArcGIS پاسخگوی نیاز نبوده و در نتیجه باید از ژئودیتابیس سازمان یافته (Enterprise Geodatabase) استفاده شود. Enterprise Geodatabase یک پایگاه داده اطلاعات مکانی بوده که در یک سیستم مدیریت پایگاه داده رابطه‌ای ساخته و پرداخته می‌شود [۲۶]. با توجه به همگونی ArcGIS Desktop و Microsoft SQL Server، از این سامانه مدیریت پایگاه داده استفاده شد.

○ تعیین اهمیت معیارها نسبت به یکدیگر

برای تعیین ضریب اهمیت معیارها روش‌های مختلفی وجود دارد که معمول‌ترین آن‌ها، مقایسه دودویی است. در این روش معیارها مقایسه می‌شوند و درجه اهمیت هر معیار نسبت به دیگری مشخص می‌شود. برای این کار می‌توان از روش تحلیل سلسه مراتبی (AHP) استفاده کرد [۲۵]. میزان ارجحیت و اهمیت معیارها با یکدیگر بصورت دو به دو مقایسه می‌شود. این مقایسات زوجی به صورت اعدادی که در جدول ۱ بیان شده است، صورت می‌پذیرد.

جدول ۱: امتیازدهی به اولویت های مشتری.

Table 1: Scoring customer priorities.				
Absolutely higher	Much higher	Higher	Slightly higher	Equal preference
9	7	5	3	1

به عنوان نمونه ماتریس مقایسه حاصل از مقایسات زوجی معیارهای یک کاربر مطابق جدول ۲ می‌باشد.

در گام بعدی، ماتریس مقایسه نرمالیزه می‌شود. بدین معنی که هر عدد موجود در ستون به عدد مجموع آن ستون تقسیم خواهد شد، همچنین میانگین هر سطر محاسبه می‌گردد. این عدد بیانگر وزن هر معیار (w_j) است. همانطور که مشخص است، VIP بودن شعبه در این مثال وزن بالاتری به خود اختصاص داده است و بقیه معیارها نیز با توجه به عدد بدست آمده، قابل اولویت‌بندی هستند. جدول ۳ نشان دهنده اعداد به دست آمده است.

و در نهایت، با استفاده از رابطه‌ی (۱) میزان ارجحیت هر شعبه برای ۴ معیار در نظر گرفته شده مورد محاسبه قرار می‌گیرد. در این رابطه W_j

جدول ۲: مقادیر ماتریس مقایسه تشکیل شده بر اساس میزان اهمیت معیارها.
Table 2: Values of the comparison matrix based on the criteria's importance.

Insurance services	Safe deposit box	Currency branch	VIP	
5	3	9	1	VIP
1	5	1	$\frac{1}{9}$	Currency branch
3	1	$\frac{1}{5}$	$\frac{1}{3}$	Safe deposit box
1	$\frac{1}{3}$	1	$\frac{1}{5}$	Insurance services
10	9.33	11.2	1.64	Sum of column

جدول ۳: مقادیر ماتریس نرمالایز شده و میانگین هر سطر.

Table 3: Normalized matrix values and the average of each row (w_j).

w_j	Insurance services	Safe deposit box	Currency branch	VIP	
0.555	0.50	0.32	0.80	0.60	VIP
0.192	0.10	0.53	0.08	0.06	Currency branch
0.152	0.30	0.10	0.01	0.20	Safe deposit box
0.082	0.10	0.03	0.08	0.12	Insurance services
	1	1	1	1	Sum of column

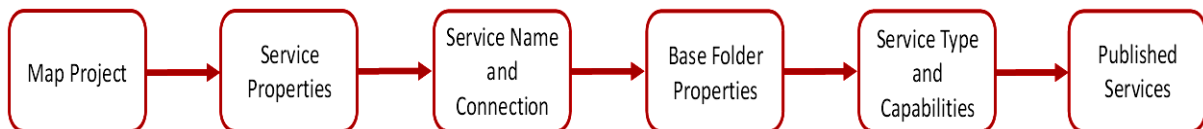
در بالای لایه‌ها قرار گرفته و کاملاً قابل تشخیص هستند [۲۸]. Feature Layer با استفاده از اطلاعات گرافیکی، پردازش و نمایش اطلاعات را در دستگاه کاربر به صورت مناسبی فراهم می‌کند. لایه‌ها از سه نوع روش برای نمایش داده استفاده می‌کنند، روش Snapshot mode برای دریافت عوارض به صورت یکجا، روش On demand mode برای دریافت اطلاعاتی که در محدوده نمایش هستند و در نهایت Selection mode که برای دریافت عوارض انتخاب شده به کار می‌رود [۳۰]. برای در اختیار دادن امکان جست‌وجو به کاربر با استفاده از نام و یا آدرس شعبه، از Query و QueryTask استفاده می‌شود. مولفه‌ی Query برای مشخص کردن پارامترهای QueryTask می‌باشد. با استفاده از خصوصیت where برای مولفه‌ی Query و نوشتن این دستور به زبان SQL عوارض یافت می‌شود و با کمک متد QueryTask عمل جست‌وجو و دریافت عوارض صورت می‌پذیرد. شکل ۲ نمای کلی برنامه در سمت کاربر را نشان می‌دهد.

با استفاده از دکمه مقایسه معیارها کاربر می‌تواند اولویت‌های خود را با یکدیگر به صورت زوجی مقایسه نماید تا معیارهای او در ماتریس مقایسه در سمت سرور تشکیل شود. شکل ۳ فرم معرفی ترجیحات کاربر را انتخاب شعبه را نشان می‌دهد.

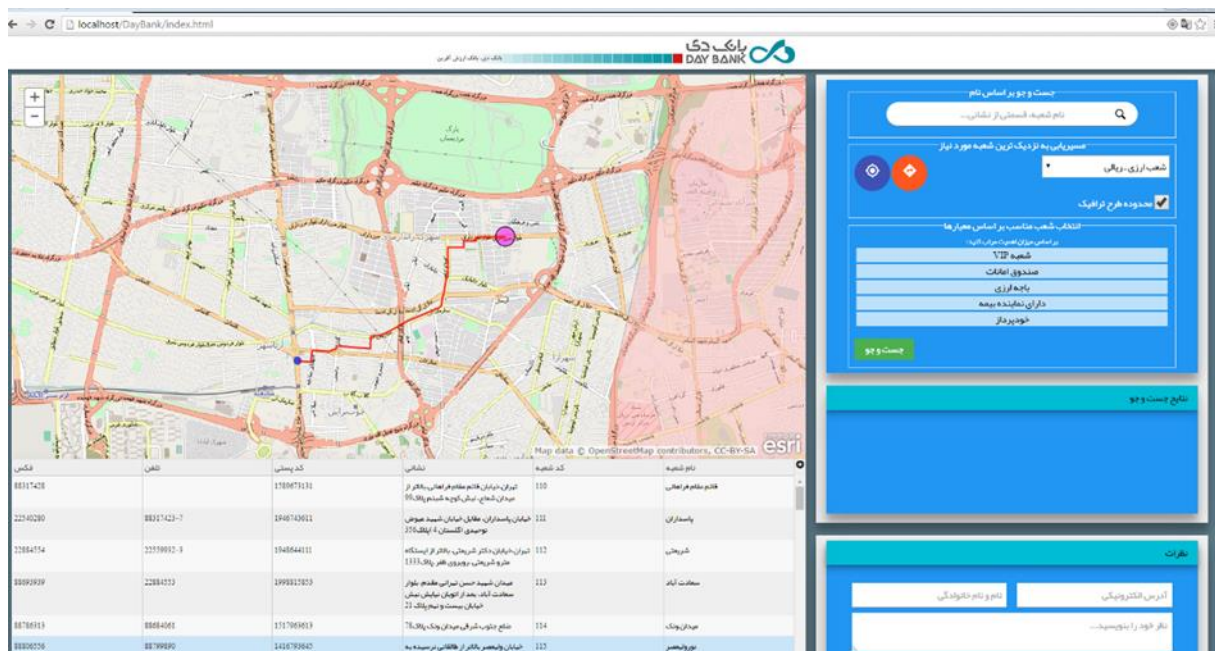
در نتیجه چندین کاربر به طور همزمان می‌توانند به مشاهده و ویرایش اطلاعات موجود در پایگاه داده بپردازند [۲۷]. پس از تکمیل Geodatabase، پروژه آماده نشر در GIS server است [۲۸]. برای ساخت، ویرایش و مدیریت نقشه (Map Document) و همچنین تعریف فرمت، نماد و سیستم مختصات از نرم افزار ArcGIS Desktop استفاده شد. سرویس نقشه‌ها با استفاده از API سمت کاربر، دسترسی اطلاعاتی از قبیل عوارض و توصیفات مربوط به آن‌ها را به کاربر میسر می‌کند؛ شکل ۱ نشان دهنده گردش کار انتشار سرویس‌ها با استفاده از ArcGIS است. به کمک ArcGIS REST Directory سرویس‌های میزبانی شده توسط ArcGIS for Server لیست می‌شود که نشان‌دهنده سرویس‌های منتشر شده و آماده استفاده است. هر سرویس توسط URL منحصر به فرد خود، قابل دسترسی و پردازش توسط API سمت کاربر (در اینجا ArcGIS JavaScript API) می‌باشد [۲۹].

○ توسعه‌ی برنامه در سمت کاربر

برای توسعه برنامه در سمت کاربر از دو نوع سرویس نقشه درون برنامه Feature Layer و Graphic Layer استفاده شد. Graphic Layer به توسعه دهنده اجازه نمایش عوارض گرافیکی به صورت خط، نقطه و پلی‌گون را می‌دهد. عوارض اضافه شده به نقشه به صورت Graphic Layer همیشه



شکل ۱: روند انتشار سرویس‌ها
Fig.1: Service Publishing Process



شکل ۲: نمایی از شکل نهایی برنامه توسعه یافته.

Fig.2: Final overview of the application.

داده تا ترجیحات خود را بازنگری کند. در جدول ۴ تمامی شعب بانک دی بر اساس یک نمونه معیارهای انتخاب شده توسط کاربر رتبه‌بندی می‌شوند. این رتبه‌بندی توسط روش AHP که قبل‌تر توضیح داده شد صورت می‌پذیرد.

در ادامه با توجه به اهمیت معیار فاصله در انتخاب شعبه مطلوب، ابتدا ۵ شعبه دارای امتیاز بالاتر در فرآیند وزن دهی انتخاب شده و سپس از بین آنها شعبه ای که در فاصله کمتری نسبت به موقعیت کاربر قرار دارد انتخاب و مسیریابی به آن انجام می‌شود. این مهم با استفاده از قابلیت ClosestFacilityTask و معرفی URL مربوط به آن در قسمت ArcGIS REST Directory و معرفی پارامترهای مربوط به آنالیز، یعنی Facilities (۵ شعبه بانک با وزن بالاتر) و Incidents (موقعیت کاربر) و محدوده طرح ترافیک و زوج و فرد به Polygon Barriers در بخش سرور انجام می‌شود. مطابق شکل ۴ نتیجه‌ی این فرآیند که یک PolyLine است به سمت کاربر ارسال شده و با معرفی سمبل آن به صورت Graphic Layer به نقشه اضافه می‌شود که توسط کاربر قابل مشاهده خواهد بود.

شکل ۳: فرم معرفی ترجیحات کاربر.

Fig.3: Form of user preferences.

نتایج و بحث

پس از معرفی ترجیحات کاربر، ابتدا میزان سازگاری ماتریس مقایسات زوجی محاسبه می‌شود و در صورت غیر قابل قبول بودن به کاربر پیغام

جدول ۴: رتبه‌بندی شعب بانک دی بر اساس معیارها.

Table 4: Ranking Day Bank branches based on criteria.

Rank	Priority	Branch number	Rank	Priority	Branch number	Rank	Priority	Branch number
44	0/0101592	37	14	0/0152766	19	1	0/0186008	1
47	0/0099896	38	34	0/0123592	20	2	0/0185486	2
43	0/0104419	39	31	0/0128761	21	3	0/0183361	3
33	0/0126768	40	21	0/0140877	22	4	0/0176669	4
24	0/0137304	41	22	0/0139787	23	5	0/0170463	5
46	0/010148	42	17	0/0146295	24	8	0/0165564	6
38	0/0111466	43	30	0/012961	25	9	0/0162555	7
29	0/0130784	44	35	0/0118219	26	6	0/0168237	8
49	0/0098012	45	28	0/0131089	27	13	0/015585	9
51	0/0089822	46	16	0/0148605	28	15	0/0148828	10
32	0/0128667	47	23	0/0138102	29	7	0/0166018	11
50	0/0090106	48	40	0/0110041	30	10	0/016231	12
54	0/0076465	49	41	0/0107884	31	11	0/0160781	13
53	0/0079409	50	27	0/0134094	32	18	0/0146016	14
37	0/0115346	51	36	0/0117735	33	20	0/0143248	15
52	0/0089617	52	48	0/0098974	34	12	0/0158962	16
42	0/0106369	53	25	0/0134561	35	19	0/0144084	17
39	0/0110616	54	45	0/0101541	36	26	0/0134519	18

شاید لازم باشد که ابتدا فاصله کلاسه بندی شده و سپس کلاس‌های مختلف فاصله دو به دو در تحلیل سلسله مراتبی با هم مقایسه شوند.

مشارکت نویسندگان

آرمین پوربیک در ایده پردازی، پیاده سازی و جمع آوری و تحلیل داده‌ها و نگارش پیش نویس مقاله نقش داشته است. جواد صابریان در ایده پردازی و هدایت پژوهش و اصلاح اساسی دست نوشته مشارکت داشته است. سیدمحمد سینا سید محسنی در اصلاح اساسی دست نوشته و آماده سازی فرمت نهایی مقاله مشارکت داشته اند.

تشکر و قدردانی

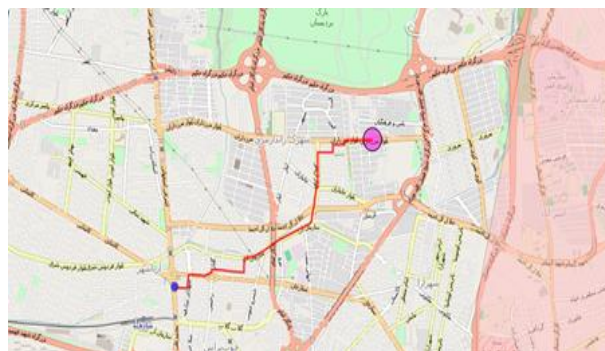
بدین وسیله از کلیه عزیزانی که ما را در انجام این تحقیق یاری کردند، صمیمانه تشکر می کنیم.

تعارض منافع

«هیچگونه تعارض منافع توسط نویسندگان بیان نشده است.»

منابع و مآخذ

- [1] Zhou C. Exploring future GIS visions in the era of the scientific and technological revolution. *Information Geography*. 2025;1(1):100007. <https://doi.org/10.1016/j.infgeo.2025.100007>
- [2] Song W, Wu C. Introduction to advancements of GIS in the new IT era. 2021;27(1):1-4. <https://doi.org/10.1080/19475683.2021.1890920>
- [3] Goodchild MF, Haining RP. GIS and spatial data analysis: Converging perspectives. *Papers in Regional Science*. 2004;83(1):363-85. <https://doi.org/10.1007/s10110-003-0190-y>
- [4] Hosseini R, Tong D, Lim S, Sohn G, Gidófalvi G. A framework for performance analysis of OpenStreetMap data in navigation applications: the case of a well-developed road network in Australia. *Annals of GIS*. 2025;31(2):233-50. <https://doi.org/10.1080/19475683.2025.2468184>
- [5] Ochoa-Ortiz H, Re B. Exploring why and how commercial organizations contribute to OpenStreetMap. *Annals of GIS*. 2025;31(2):221-32. <https://doi.org/10.1080/19475683.2025.2457396>
- [6] Sajjadian N, Shojaian A, Ebadi H. Information Dissemination via Web GIS and Its Application in Tourism Management. 2014. [In Persian].
- [7] Maximenko D, Maximenko M. GIS for location planning of banks' physical networks. *Regional Studies, Regional Science*. 2021;8(1):362-5. <https://doi.org/10.1080/21681376.2021.1986421>



شکل ۴: آنالیز مربوط به نزدیکترین شعبه و رسم پلی لاین مسیر موقعیت کاربر تا شعبه مورد نظر.

Fig. 4: Analysis of the nearest branch and drawing a polyline for the route from the current coordinates to the desired branch.

نتیجه‌گیری

در دنیای مدرن امروز که زمان از ارزش بالایی برخوردار است، باید بیش از پیش از اتلاف وقت و سردرگمی کاربران و مشتریان اصناف مختلف کاسته شود. سامان‌دهی اطلاعات و در اختیار گذاشتن آن در بستری مناسب برای استفاده بهینه کاربران می‌تواند باعث کاهش سردرگمی افراد و انتخابی هوشمندانه با بالاترین تطابق با خواسته‌های شخص شود. از این رو در این پژوهش سعی بر آن شد سیستمی توسعه یابد تا کاربران بتوانند با سهولت بیشتر و با تاثیر پارامترها و معیارهای شخصی خود مناسب‌ترین و نزدیک‌ترین شعبه بانکی را انتخاب کرده و بهترین مسیر را از موقعیت فعلی کاربر تا شعبه مدنظر دریافت کنند. این اتفاق باعث می‌شود تا کاربر تجربه بهتری از خدمات حضوری بانکی داشته باشد و بتواند در کمترین زمان، هوشمندانه‌ترین انتخاب را بر اساس نیاز خود داشته باشد. بدین ترتیب توسعه سیستم‌هایی از این قبیل می‌تواند گام بزرگی در کسب رضایت مشتری بردارند. این سامانه با تلفیق WebGIS و الگوریتم‌های تصمیم‌گیری چندمعیاره (MCDM)، به‌طور خاص فرآیند تحلیل سلسله مراتبی (AHP)، توسعه داده شد. این تحقیق با موفقیت سیستم اطلاعات مکانی را با روش تحلیل سلسله‌مراتبی (AHP) ترکیب کرد. این امر به کاربران اجازه می‌دهد تا معیارهای مختلفی نظیر VIP بودن شعبه، دسترسی به صندوق امانات، خدمات ارزی و خدمات بیمه را بر اساس اهمیت شخصی خود به صورت زوجی مقایسه کنند. سامانه سپس با استفاده از این اولویت‌ها، وزن هر معیار را محاسبه کرده و شعب را رتبه‌بندی می‌کند. یکی از قابلیت‌های برجسته این سیستم، ارائه خدمات مسیریابی هوشمند است. سامانه پس از شناسایی ۵ شعبه برتر بر اساس معیارهای کاربر، بهترین مسیر را از موقعیت فعلی کاربر تا شعبه مقصد ترسیم می‌کند.

در ادامه این کار تحقیقی برای بهبود نتایج سامانه و رضایت بیشتر کاربران پیشنهاد می‌شود که معیار فاصله شعبه نسبت به موقعیت کاربر به عنوان یکی از پارامترهای وزن دهی شعبه در محاسبات وارد شود تا از انتخاب شعب با فاصله بسیار زیاد جلوگیری شود. برای این منظور

- [21] Ehlers M, Jung S, Stroemer K. Design and implementation of a GIS based bicycle routing system for the world wide web (WWW). International Archives of Photogrammetry Remote Sensing and Spatial Information Sciences. 2002;34(4):425-9.
- [22] Roghanian E, Namazian Z, A decision problem for bank branch site selection: A GIS Mapping perspective with Maximal Covering Location Problem: A case study of Isfahan, Iran. International Journal of Services and Operations Management. 2020;1(1).
- [23] Al-Hanbali N. Building a Geospatial database and GIS data-Model integration for Banking: ATM site location. Commission IV Joint Workshop: Data Integration and Digital Mapping Challenges in Geospatial Analysis, Integration and Visualization II, September Stuttgart, Germany. 2003:6.
- [24] Luo J, Xu J, Aldosari O, Althubiti S, Deebani W, Design and Implementation of an Efficient Electronic Bank Management Information System Based Data Warehouse and Data Mining Processing, Information Processing & Management, 2022:59(6). <https://doi.org/10.1016/j.ipm.2022.103086>
- [25] Razi P, Ramli N, Ali M, Ramadhansyah P. Selection of best consultant by using analytical hierarchy Process (AHP). IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. 2020;712(1):012016. <http://dx.doi.org/10.1088/1757-899X/712/1/012016>
- [26] Nasser H. Learning ArcGIS Geodatabases: Packt Publishing Ltd; 2014.
- [27] Hosseini SMR. Principles and Fundamentals of Web GIS and its Application in Engineering Sciences 2015 [In Persian].
- [28] Raeisi R, Katorani Sh, Karami J. Principles and Fundamentals of Web GIS, 2nd ed, Mahvareh, 2012 [In Persian].
- [29] Yang M, Liu T, Wang X, Yan Y, Hu R, Zhu Q. Design of WebGIS system based on javascript and ArcGIS server. 2017 International Conference on Smart Grid and Electrical Automation (ICSGEA). 2017:709-12. <http://dx.doi.org/10.1109/ICSGEA.2017.68>
- [30] Persaud H. Monitoring Community Health Using a Web-Based GIS Application. 2013.
- [8] MIHAI F-C, editor GIS AND BANKING. Proceedings of the 18th International Conference on Informatics in Economy Education, Research and Business Technologies; 2019. <http://dx.doi.org/10.12948/ie2019.04.23>
- [9] Ono A, Saito Y, Sakai K, Uesugi I. Does geographical proximity matter in small business lending? Evidence from changes in main bank relationships. 2016. <http://dx.doi.org/10.1111/ajfs.12447>
- [10] Sheth JN, Jain V, Roy G, Chakraborty A. AI-driven banking services: the next frontier for a personalised experience in the emerging market. International Journal of Bank Marketing. 2022;40(6):1248-71. <https://doi.org/10.1108/IJBM-09-2021-0449>
- [11] Karimi Z. Geographic Information Systems (GIS) and its Application in the Banking Industry. National Seminar on the Application of GIS in Economic, Social, and Urban Planning. 2015. <https://civilica.com/doc/150526> [In Persian].
- [12] Kiani GA. Development of a Web GIS for Urban Sustainability Indicators of Oakland, California. 2014.
- [13] MacDonald EH. GIS in banking: Evaluation of Canadian bank mergers. Canadian Journal of Regional Science. 2001;24(3):419-47.
- [14] Miliotis P, Dimopoulou M, Giannikos I. A hierarchical location model for locating bank branches in a competitive environment. International transactions in operational research. 2002;9(5):549-65. <https://doi.org/10.1111/1475-3995.00373>
- [15] Sutanta E, Nurnawati E, Iswahyudi C, Kumalasanti RA, The Model Prototype of WebGIS-based for Organizational Asset Management. Journal of Physics: Conference Series. 2021. 10.1088/1742-6596/1823/1/012032
- [16] Panigrahi P, Vijay SP, Ronald RP. GIS-Tool for Simplifying the Collection Management System in Banks and Financial Service Organizations. Map Asia. 2003.
- [17] Fu Y. Managing Customer Services Using GIS in Banks: A Case in Chinese Competitive Environment. 2007.
- [18] R. Hosseini AZAaNA. Spatial Analysis of Bank Branch Locations Using GIS; Case Study: Bank Branches in District 3 of Isfahan. Department of Geography. 2010, 10.1504/IJSOM.2020.10025399.[In Persian].
- [19] Ghelichkhani K, Motekan AA, Ziaian P, Shakiba A. Designing and Implementing WebGIS for Tourism Information Dissemination (Case Study: Qom City). Geomatics 87 Conference and the 4th Conference on Standardization of Geographical Names. 2008. [In Persian].
- [20] Mao L. Web-based Information System for Land Management. University of Calgary. 2005.

معرفی نویسندگان

AUTHOR(S) BIOSKETCHES



آرمین پوربیک دارای مدرک کارشناسی مهندسی عمران نقشه برداری در سال ۱۳۹۱ از دانشگاه آزاد تهران جنوب و مدرک کارشناسی ارشد سنجش از دور و سیستم اطلاعات مکانی در سال ۱۳۹۵ از دانشگاه آزاد علوم تحقیقات تهران می‌باشد. ایشان هم اکنون به عنوان متخصص GIS در شهر سیدنی کشور استرالیا مشغول فعالیت می‌باشند.

Saberian, J. Assistant Professor at the Department of Surveying Engineering, Faculty of Engineering, Islamic Azad University-South Tehran Branch, Tehran, Iran

✉ j_saberian@azad.ac.ir



سید محمد سینا سید محسنی در حال حاضر دانشجوی رشته مهندسی نقشه‌برداری در دانشگاه آزاد واحد تهران جنوب است. وی علاقه‌مند به حوزه اطلاعات مکانی و کاربردهای سنجش از دور می‌باشد و در این زمینه فعالیت دارد. در حال حاضر حوزه شغلی او در زمینه نقشه‌برداری و برنامه‌نویسی می‌باشد.

Mohseni, S. Department of Surveying Engineering, Faculty of Engineering, Islamic Azad University-South Tehran Branch, Tehran, Iran

✉ s.seyedmohseni@iau.ir

Pourbeik, A. Department of GIS and Remote Sensing, Faculty of Natural Resources and Environment, Islamic Azad University-Science and Research Branch, Tehran, Iran

✉ armin.pourbeik@gmail.com



جواد صابریان دارای مدرک دکتری تخصصی مهندسی نقشه‌برداری (گرایش سامانه اطلاعات مکانی) از دانشگاه خواجه نصیرالدین طوسی است. از سال ۱۳۹۰ تاکنون در دانشگاه آزاد واحد تهران جنوب به عنوان استادیار گروه مهندسی نقشه‌برداری مشغول فعالیت است. ایشان تا

کنون موفق به چاپ بیش از ۳۰ مقاله در مجلات و کنفرانس‌های معتبر داخلی و بین‌المللی شده‌اند. زمینه‌های تخصصی ایشان عبارتند از: شبکه‌های حمل و نقل، الگوریتم‌های مسیریابی، مسائل بهینه‌سازی در GIS، پایگاه داده. از سال ۱۳۸۵ در بسیاری از پروژه‌های اجرایی نقشه‌برداری و GIS به ویژه در پروژه‌های وزارت نیرو، شرکت نفت و سازمان ثبت اسناد و املاک کشور نقش موثر داشته‌اند.

Citation (Vancouver): Pourbeik A, Saberian J, Mohseni S. [A Web-Based GIS Framework for Optimal Bank Branch Selection Using MCDM Algorithms]. *J. RS. GEOINF. RES.* 2025; 3(2): 297-306

doi <https://doi.org/10.22061/jrsgr.2025.12430.1108>



COPYRIGHTS

© 2025 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/>)



ORIGINAL RESEARCH PAPER

A Study and Investigation on the Implementation of Service-Oriented Architecture for Spatial Data Infrastructure in Urban Management

H. Bazalipour, Gh. Fallahi*

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

ABSTRACT

Received: 20 April 2025
 Reviewed: 07 June 2025
 Revised: 22 July 2025
 Accepted: 29 October 2025

KEYWORDS:

Service-Oriented Architecture (SOA)
 Spatial Data Infrastructure (SDI)
 Open Geospatial Consortium (OGC)
 Standards
 Geospatial Web Services
 Spatial Data Processing
 Scalability

* Corresponding author

✉ g_fallahi@sbu.ac.ir

☎ (+98912) 3906013

Background and Objectives: Spatial data, as one of the fundamental components of urban information systems, plays a crucial role in analysis, planning, decision-making, and policy evaluation processes. In recent decades, the rapid growth of urbanization, the emergence of smart cities, and the expansion of sensor networks and the Internet of Things (IoT) have led to an exponential increase in the volume and diversity of spatial data. These data are collected from multiple sources such as Geographic Information Systems (GIS), satellite imagery, remote sensing, intelligent transportation systems, and citizen-generated data. Consequently, the effective management of these datasets has become one of the major challenges in contemporary urban management. The absence of standardized and integrated infrastructures often leads to inconsistency among executive organizations, data redundancy, and reduced accuracy in data-driven decision-making.

Methods: To address these challenges, this study proposes a novel framework based on Service-Oriented Architecture (SOA) for establishing an integrated spatial data infrastructure in urban management. SOA, with its core principles of service independence, reusability, composability, and interoperability, provides a flexible and scalable foundation for developing distributed spatial systems. Additionally, the research utilizes international OGC standards, including Web Map Service (WMS), Web Feature Service (WFS), and Web Processing Service (WPS), to establish a unified technical framework for the exchange, processing, and visualization of spatial data across heterogeneous environments. The use of these standards enables various urban subsystems to interact dynamically and seamlessly without dependency on specific technologies or programming languages.

Findings: The findings indicate that the proposed framework consists of three main layers: the spatial data service layer for storing, managing, and accessing distributed datasets; the processing service layer for analyzing, integrating, and extracting spatial patterns at different decision-making levels; and the interaction management layer for service orchestration, data flow control, and quality assurance in heterogeneous environments. This three-layered structure was designed to enhance scalability, minimize inter-component dependencies, and improve interoperability among diverse urban systems. A case study was implemented in a real urban management environment to empirically evaluate the performance, stability, and reliability of the proposed framework in terms of response time, processing volume, and coordination among services.

Conclusion: The results demonstrated that implementing the integrated SOA-OGC framework led to an average 30% reduction in response time, improved scalability in handling large spatial datasets, and simplified service maintenance and expansion. Moreover, interoperability among urban systems in various domains—such as transportation, environment, and public services—was significantly enhanced. However, challenges including data security assurance, user access control, system stability under high network load, and Quality of Service (QoS) remain critical issues requiring further investigation. In summary, the study concludes that adopting a service-oriented approach in conjunction with OGC standards provides an effective foundation for developing spatial data infrastructures in urban management. This framework not only strengthens data-driven decision-making but also paves the way toward smart city realization, sustainable

resource management, and improved quality of urban life. Future research is recommended to integrate Cloud GIS, Big Spatial Data processing, and Artificial Intelligence (AI)-based spatial analytics within this architecture to further enhance the performance, scalability, and security of urban spatial systems.



NUMBER OF REFERENCES
31



NUMBER OF FIGURES
4



NUMBER OF TABLES
3

مقاله پژوهشی

مطالعه و بررسی پیاده سازی معماری سرویس گرا برای زیر ساخت داده های مکانی در مدیریت شهری

حسین بازعلي پور، غلامرضا فلاحي*

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

چکیده

پیشینه و اهداف: داده های مکانی به عنوان یکی از ارکان اساسی نظام های اطلاعاتی شهری، نقشی تعیین کننده در فرآیندهای تحلیل، برنامه ریزی، تصمیم سازی و ارزیابی سیاست های شهری ایفا می کنند. در دهه های اخیر، با رشد شتابان شهرنشینی، ظهور شهرهای هوشمند و گسترش سامانه های حسگر و اینترنت اشیا، حجم و تنوع داده های مکانی به صورت تصاعدی افزایش یافته است. این داده ها از منابع متعددی نظیر سامانه های اطلاعات جغرافیایی (GIS)، تصاویر ماهواره ای، داده های سنجش از دور، سامانه های حمل و نقل هوشمند، و داده های تولید شده توسط شهروندان جمع آوری می شوند. در نتیجه، مدیریت مؤثر این داده ها به یکی از چالش های اساسی مدیریت شهری معاصر تبدیل شده است. نبود زیرساخت های استاندارد و یکپارچه موجب ناهمگنی میان نهادهای اجرایی، تکرار داده ها، و کاهش دقت تصمیم گیری های مبتنی بر داده می شود.

روش ها: در پاسخ به این نیاز، این پژوهش چارچوبی نوین مبتنی بر معماری سرویس گرا (Service-Oriented Architecture - SOA) را برای ایجاد زیرساخت داده های مکانی شهری پیشنهاد می کند. معماری سرویس گرا با اصولی همچون استقلال سرویس ها، استفاده مجدد، ترکیب پذیری و تعامل پذیری، بستر مناسبی برای توسعه سامانه های توزیع شده و انعطاف پذیر فراهم می آورد. این پژوهش همچنین با بهره گیری از استانداردهای بین المللی OGC شامل WFS، WMS و WPS، چارچوبی فنی برای تبادل، پردازش و نمایش داده های مکانی در محیط های ناهمگون ایجاد کرده است. استفاده از این استانداردها موجب می شود تا سامانه های مختلف شهری، بدون وابستگی به فناوری یا زبان برنامه نویسی خاص، بتوانند به صورت هماهنگ و پویا با یکدیگر تعامل داشته باشند.

یافته ها: یافته های پژوهش نشان می دهد که چارچوب پیشنهادی شامل سه لایه اصلی است: لایه سرویس های داده مکانی برای ذخیره، مدیریت و دسترسی به داده های توزیع شده؛ لایه سرویس های پردازشی برای تحلیل، تلفیق و استخراج الگوهای مکانی در سطوح مختلف تصمیم گیری؛ و لایه مدیریت تعامل برای یکپارچه سازی سرویس ها، کنترل جریان داده و تضمین کیفیت خدمات در محیط های ناهمگون. این ساختار سه لایه با هدف افزایش مقیاس پذیری، کاهش وابستگی میان مؤلفه ها و بهبود تعامل میان سامانه های شهری طراحی شده است. در این پژوهش، یک نمونه موردی (Case Study) در محیط واقعی مدیریت شهری پیاده سازی گردید تا کارایی، پایداری و قابلیت اطمینان چارچوب پیشنهادی از منظر زمان پاسخ گویی، حجم پردازش و هماهنگی میان سرویس ها به صورت تجربی ارزیابی شود.

نتیجه گیری: نتایج نشان داد که پیاده سازی چارچوب تلفیقی SOA-OGC سبب کاهش میانگین زمان پاسخ دهی تا ۳۰٪، افزایش مقیاس پذیری سامانه در مواجهه با داده های حجیم، و تسهیل نگهداری و توسعه سرویس ها شده است. همچنین، سطح تعامل پذیری میان سامانه های شهری در حوزه های مختلف نظیر حمل و نقل، محیط زیست و خدمات عمومی به طور معناداری افزایش یافته است. از سوی دیگر، چالش هایی همچون تضمین امنیت داده های حساس، مدیریت سطح دسترسی کاربران، حفظ پایداری سامانه در شرایط بار سنگین شبکه، و تضمین کیفیت سرویس ها (QoS) از جمله موضوعات کلیدی هستند که نیازمند بررسی های بیشتر می باشند.

تاریخ دریافت: ۳۱ فروردین ۱۴۰۴
تاریخ داوری: ۱۷ خرداد ۱۴۰۴
تاریخ اصلاح: ۳۱ تیر ۱۴۰۴
تاریخ پذیرش: ۰۷ آبان ۱۴۰۴

واژگان کلیدی:
معماری سرویس گرا
زیرساخت داده های مکانی
استانداردهای OGC
سرویس های وب مکانی
پردازش داده های مکانی
مقیاس پذیری

*نویسنده مسئول
g_fallahi@sbu.ac.ir
۰۹۱۲-۳۹۰۶۰۱۳

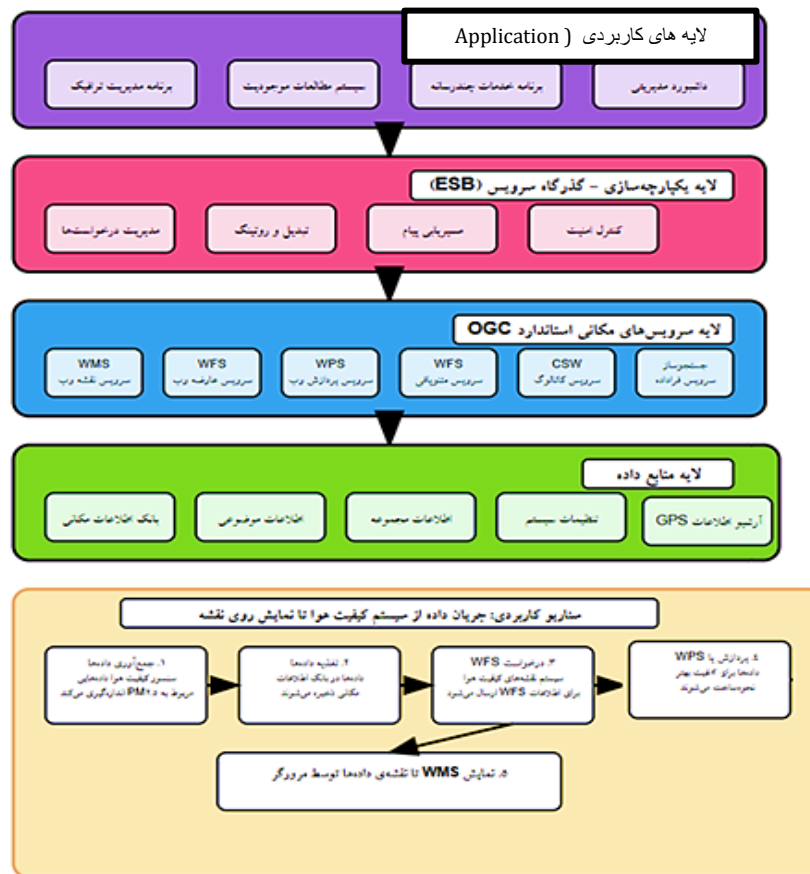
در جمع‌بندی، نتایج پژوهش نشان می‌دهد که بهره‌گیری از معماری سرویس‌گرا در کنار استانداردهای OGC می‌تواند زیربنایی مؤثر برای توسعه زیرساخت داده‌های مکانی در مدیریت شهری فراهم آورد. این چارچوب ضمن ارتقای تصمیم‌گیری‌های مبتنی بر داده، مسیر را برای تحقق شهر هوشمند، مدیریت پایدار منابع و بهبود کیفیت زندگی شهروندان هموار می‌سازد. برای پژوهش‌های آینده پیشنهاد می‌شود که فناوری‌های ابری (Cloud GIS)، پردازش کلان‌داده‌های مکانی (Big Spatial Data) و هوش مصنوعی در تحلیل داده‌های مکانی در قالب این معماری ادغام شوند تا کارایی و امنیت سامانه‌های شهری به سطح بالاتری ارتقا یابد.

مقدمه

که امکان ارائه نقشه‌ها، داده‌های ویژگی و پردازش مکانی را به صورت استاندارد و قابل تعامل فراهم می‌آورند. استفاده از این استانداردها در معماری سرویس‌گرا، زمینه ایجاد سامانه‌های اطلاعات مکانی مدرن، مقیاس‌پذیر و قابل اعتماد را فراهم می‌سازد (Li, 2022). با این حال، ترکیب سرویس‌های مکانی با سرویس‌های وب مبتنی بر فناوری‌های مختلف و تضمین کارایی، امنیت، و مقیاس‌پذیری سیستم، چالش‌های مهمی است که باید مورد توجه قرار گیرد (Liakos, 2022). در محیط‌های شهری که داده‌ها و سرویس‌ها به صورت توزیع‌شده در اختیار سازمان‌ها و کاربران مختلف قرار دارند، مشکلاتی مانند ناسازگاری فناوری، پیچیدگی مدیریت سرویس‌ها، و نیاز به هماهنگی پویا و انعطاف‌پذیر به وجود می‌آید (Zulian, 2021). علاوه بر این، افزایش حجم داده‌ها و نیاز به پردازش در زمان واقعی یا نزدیک به زمان واقعی، فشار مضاعفی بر معماری زیرساخت وارد می‌کند که بدون طراحی اصولی معماری سرویس‌گرا، پاسخگو نخواهد بود (Wetzel, 2024). هدف این پژوهش، بررسی و ارائه چارچوبی نوین و کاربردی برای پیاده‌سازی معماری سرویس‌گرا در زیرساخت داده‌های مکانی در حوزه مدیریت شهری است که بتواند محدودیت‌های موجود در تعامل‌پذیری، ترکیب و کارایی سرویس‌ها را برطرف سازد. در این چارچوب، اصول و استانداردهای SOA و OGC به صورت تلفیقی به کار گرفته شده‌اند تا امکان ایجاد سرویس‌های مستقل، ترکیب‌پذیر و مقیاس‌پذیر فراهم گردد. این چارچوب با طراحی و پیاده‌سازی نمونه‌های کاربردی در محیط‌های واقعی مدیریت شهری، عملکرد و کارایی خود را اثبات می‌کند و راه را برای توسعه سامانه‌های جامع اطلاعات مکانی باز می‌کند.

در شکل ۱، چارچوب معماری سرویس‌گرا پیشنهادی بر اساس ساختار چهارلایه‌ای طراحی شده است. لایه کاربردی شامل برنامه‌های مدیریت شهری و رابط‌های کاربری است. لایه یکپارچه‌سازی یا گذرگاه سرویس وظیفه هماهنگی ارتباطات، مسیریابی پیام و کنترل امنیت را بر عهده دارد. لایه سرویس‌های مکانی استاندارد OGC قلب معماری را تشکیل می‌دهد که شامل سرویس‌های WFS، WMS، CSW و SOS می‌باشد. لایه منابع داده نیز شامل پایگاه‌های داده مکانی، داده‌های سنسوری، تصاویر ماهواره‌ای و داده‌های GPS است که زیربنای عملیات مکانی را فراهم می‌آورد. این ساختار لایه‌ای ضمن حفظ انعطاف‌پذیری و مقیاس‌پذیری سیستم، قابلیت توسعه و نگهداری آن را تسهیل می‌کند.

داده‌های مکانی به عنوان یکی از منابع حیاتی و بنیادی در حوزه مدیریت شهری مطرح هستند (Osani, 2024). این داده‌ها که شامل اطلاعات مربوط به موقعیت‌های جغرافیایی، ویژگی‌های فضایی، و روابط مکانی بین اشیاء و پدیده‌ها می‌شوند، پایه و اساس تحلیل‌های مکانی، برنامه‌ریزی شهری، مدیریت منابع، حمل‌ونقل، زیرساخت‌ها و خدمات شهری را تشکیل می‌دهند (Abdoli, 2024). افزایش روزافزون جمعیت شهری، توسعه سریع زیرساخت‌ها و نیاز به تصمیم‌گیری‌های به موقع و دقیق، مدیریت داده‌های مکانی را به یکی از چالش‌های اساسی مدیریت شهری تبدیل کرده است (Sargsyan, 2024). با پیشرفت فناوری‌های اطلاعاتی و ارتباطی، حجم داده‌های مکانی با سرعت زیادی افزایش یافته است و انواع مختلفی از داده‌ها از منابع گوناگون شامل حسگرها، تصاویر ماهواره‌ای، سیستم‌های موقعیت‌یابی جهانی (GPS)، داده‌های سازمانی و اجتماعی تولید می‌شود (Fierens, 2025). این تنوع و حجم بالای داده، ضرورت وجود زیرساختی منعطف، پویا، مقیاس‌پذیر و قابل تعامل را برای مدیریت، ذخیره، پردازش و اشتراک‌گذاری داده‌ها بیش از پیش آشکار می‌کند (Chowdhury, 2022). در این راستا، ایجاد زیرساخت داده‌های مکانی (SDI) که بتواند داده‌های پراکنده و ناهمگون را به صورت یکپارچه ارائه دهد، یک ضرورت حیاتی است (Taylor, 2021). معماری سرویس‌گرا (SOA) به عنوان یک رویکرد نوین در طراحی سیستم‌های نرم‌افزاری، راهکاری مناسب برای پیاده‌سازی این زیرساخت محسوب می‌شود. SOA با تکیه بر اصولی چون استقلال سرویس‌ها، استفاده مجدد، ترکیب‌پذیری و اتصال سست، امکان ایجاد سیستم‌های توزیع شده، منعطف و قابل توسعه را فراهم می‌کند. این معماری اجازه می‌دهد تا سرویس‌های مختلف داده‌ای، پردازشی و تحلیلی به صورت مستقل توسعه یافته و سپس به صورت یکپارچه در چارچوبی هماهنگ ترکیب شوند (Li, 2024). بنا بر این، SOA می‌تواند پاسخگوی نیازهای متنوع و پیچیده مدیریت داده‌های مکانی در محیط‌های شهری باشد که در آن چندین سازمان و سیستم مختلف به تبادل داده و همکاری نیاز دارند (Zhao, 2025). از سوی دیگر، استانداردهای تعریف شده توسط سازمان (OGC) به عنوان چارچوبی فنی و بین‌المللی برای ارائه، تبادل و پردازش داده‌های مکانی در بستر وب مطرح هستند (Fang, 2023). این استانداردها شامل سرویس‌هایی مانند (WFS)، (WMS) و (WPS) هستند



شکل ۱: معماری سرویس‌گرا توسعه‌یافته برای زیرساخت داده‌های مکانی در مدیریت شهری (توسعه یافته از: (Santhanavanich et al., 2022)

Fig. 1: Extended Service-Oriented Architecture (SOA) for Spatial Data Infrastructure (SDI) in Urban Management (Adapted from Santhanavanich et al., 2022)

آورد. علاوه بر این، در مدیریت شهری که چندین ذینفع و سازمان ممکن است به سیستم دسترسی داشته باشند، حفظ امنیت و صحت داده‌ها از اهمیت بالایی برخوردار است (Fang, 2023). در نهایت، تضمین یکپارچگی داده‌ها و هماهنگی بین سرویس‌های مستقل از دیگر چالش‌های اساسی است که کمتر به آن پرداخته شده است. در معماری سرویس‌گرا، سرویس‌ها به صورت مستقل عمل می‌کنند، اما برای اینکه داده‌های مکانی به درستی مدیریت شوند، باید این سرویس‌ها به صورت هماهنگ و یکپارچه با یکدیگر کار کنند (Masó, 2022; Pal, 2025). تضمین این یکپارچگی و تبادل داده‌های بدون مشکل، به ویژه در سیستم‌های پیچیده و توزیع‌شده مدیریت شهری، نیازمند توجه ویژه به طراحی پروتکل‌های ارتباطی، استانداردهای داده و فرآیندهای هماهنگی است. پژوهش حاضر با هدف پر کردن این خلا و ارائه چارچوبی که ضمن پوشش این چالش‌ها، به بهبود کارایی و انعطاف‌پذیری سیستم‌های داده مکانی مدیریت شهری بپردازد، این نیاز را مورد توجه قرار می‌دهد. این چارچوب بر اساس اصول SOA و استانداردهای OGC طراحی شده است و می‌تواند زمینه‌ساز پیشرفت‌های قابل توجهی در این حوزه باشد.

پیشینه مطالعات مرتبط

اکثر تحقیقات پیشین در حوزه داده‌های مکانی عمدتاً به بررسی و پیاده‌سازی مستقل هر یک از سرویس‌های اصلی استانداردهای OGC

چالش‌ها و ضرورت پژوهش

پیاده‌سازی معماری سرویس‌گرا (SOA) برای داده‌های مکانی در مدیریت شهری با وجود مزایای قابل توجه، با چالش‌های متعددی همراه است. یکی از بزرگ‌ترین مشکلات، ناسازگاری فناوری‌ها است. در بسیاری از پروژه‌های داده‌های مکانی، سرویس‌ها و سیستم‌ها از فناوری‌ها و پلتفرم‌های مختلفی استفاده می‌کنند که ممکن است به طور طبیعی با یکدیگر تعامل نداشته باشند. این امر می‌تواند منجر به بروز مشکلات در هماهنگی و هم‌پوشانی داده‌ها و خدمات شود (Masood, 2021). به عنوان مثال، سرویس‌های ارائه داده‌های مکانی ممکن است از فرمت‌های مختلفی برای داده‌ها استفاده کنند که باعث پیچیدگی در تبادل و پردازش داده‌ها می‌شود. از طرف دیگر، نیاز به مدیریت کیفیت سرویس (QoS) در این نوع سیستم‌ها بسیار حائز اهمیت است، زیرا تضمین کارایی، قابلیت اعتماد، و امنیت داده‌ها در چنین سیستم‌های توزیع‌شده و مقیاس‌پذیر ضروری است (Giao, 2022). یکی دیگر از چالش‌های عمده در پیاده‌سازی SOA برای داده‌های مکانی، مسائل امنیتی است. داده‌های مکانی معمولاً شامل اطلاعات حساس هستند که حفاظت از آن‌ها در برابر دسترسی غیرمجاز یا آسیب‌دیدگی امری حیاتی است. پیاده‌سازی یک معماری سرویس‌گرا می‌تواند چالش‌هایی را در زمینه مدیریت و تضمین امنیت داده‌ها در سطح سرویس‌ها، به ویژه زمانی که سرویس‌ها به صورت عمومی در دسترس قرار دارند، به وجود

استقلال سرویس‌ها باعث می‌شود تا هر بخش بتواند به صورت جداگانه توسعه، نگهداری و به‌روزرسانی شود، بدون اینکه تأثیر منفی روی کل سیستم داشته باشد (Fantinato, 2021). واسطه‌های استاندارد و پروتکل‌های مشخص به عنوان رابط‌های ارتباطی بین سرویس‌ها عمل می‌کنند و ارتباطات را به صورت قابل پیش‌بینی و امن تسهیل می‌نمایند (Bohloul, 2021). اصول کلیدی SOA شامل مواردی همچون استفاده مجدد از سرویس‌ها، ترکیب‌پذیری، اتصال سست و قابلیت مقیاس‌پذیری است. استفاده مجدد به معنای طراحی سرویس‌ها به گونه‌ای است که بتوانند در سناریوهای مختلف و سیستم‌های متعدد به کار گرفته شوند، که این امر باعث کاهش هزینه‌ها و افزایش سرعت توسعه می‌شود (Banerjee, 2025). ترکیب‌پذیری به امکان ایجاد سیستم‌های پیچیده‌تر از طریق اتصال و ترکیب چندین سرویس مستقل اشاره دارد. اتصال سست نیز به کاهش وابستگی‌های مستقیم میان سرویس‌ها دلالت دارد که انعطاف‌پذیری و تغییرات آتی را تسهیل می‌کند. در نهایت، قابلیت مقیاس‌پذیری باعث می‌شود سیستم بتواند با افزایش حجم کاربران یا داده‌ها به خوبی پاسخگو باشد (Giao, 2022). یکی از مهم‌ترین مزایای معماری سرویس‌گرا، تسهیل توسعه سیستم‌های توزیع‌شده است. در این معماری، سرویس‌ها می‌توانند روی سرورهای مختلف و در محیط‌های ناهمگون مستقر شوند و از طریق شبکه با یکدیگر ارتباط برقرار کنند. این ویژگی برای سازمان‌های بزرگ و سیستم‌های پیچیده که نیازمند همکاری میان بخش‌های مختلف هستند، بسیار حیاتی است. همچنین، SOA با کاهش پیچیدگی ساختار کلی سیستم، به تیم‌های توسعه این امکان را می‌دهد که به صورت مستقل روی سرویس‌های مختلف کار کنند و در نتیجه سرعت توسعه و پاسخگویی به نیازهای جدید افزایش یابد (Masood, 2021). در حوزه داده‌های مکانی که به دلیل ماهیت پراکنده، ناهمگون و حجیم بودن داده‌ها، مدیریت و اشتراک‌گذاری آن‌ها با چالش‌های زیادی همراه است، SOA می‌تواند زیرساخت مناسبی فراهم کند. با به کارگیری این معماری، امکان ترکیب سرویس‌های مختلف مکانی مانند ارائه نقشه، پردازش داده‌ها، و تحلیل فضایی به صورت مستقل و در عین حال هماهنگ فراهم می‌شود. این رویکرد نه تنها پیچیدگی‌های فنی را کاهش می‌دهد بلکه باعث افزایش انعطاف‌پذیری و مقیاس‌پذیری سیستم‌های داده مکانی می‌شود و امکان توسعه پایدار زیرساخت داده‌های مکانی در حوزه‌های مختلف از جمله مدیریت شهری را میسر می‌سازد (Pal, 2025).

استانداردهای OGC

سازمان OGC یکی از نهادهای بین‌المللی معتبر و پیشرو در زمینه استانداردسازی داده‌ها و سرویس‌های مکانی است که هدف اصلی آن تسهیل تعامل‌پذیری میان سیستم‌ها و نرم‌افزارهای مختلف جغرافیایی و مکانی می‌باشد (Bai, 2021). این سازمان استانداردهای متعددی را تعریف کرده است که به صورت گسترده در سامانه‌های اطلاعات مکانی به کار گرفته می‌شوند و امکان تبادل، اشتراک‌گذاری و پردازش داده‌های مکانی را به شکلی هماهنگ و بدون وابستگی به فناوری‌های خاص فراهم

مانند WMS، WFS و WPS پرداخته‌اند. این پژوهش‌ها نشان داده‌اند که هر یک از این سرویس‌ها نقش ویژه و کاربردی در ارائه نقشه‌ها، مدیریت داده‌های ویژگی و اجرای پردازش‌های مکانی دارند. به عنوان مثال، WMS به عنوان یک سرویس ارائه تصویر نقشه، امکان نمایش لایه‌های متنوع را فراهم می‌کند، در حالی که WFS امکان دسترسی و ویرایش مستقیم داده‌های مکانی ساختاریافته را ارائه می‌دهد. همچنین، WPS به عنوان سرویس پردازش مکانی، قابلیت اجرای الگوریتم‌های پیچیده را به صورت توزیع‌شده فراهم می‌آورد (Granell, 2004). با این وجود، یکی از محدودیت‌های اصلی این مطالعات، تمرکز بر کاربردهای تکی و جزیره‌ای این سرویس‌ها بوده است. به دلیل تنوع فناوری‌ها و استانداردهای موجود، ترکیب یکپارچه و هماهنگ این سرویس‌ها در قالب یک چارچوب کلی و عملی کمتر مورد توجه قرار گرفته است. این مسئله باعث شده تا در عمل، زیرساخت‌های داده مکانی از انسجام و یکپارچگی لازم برخوردار نباشند و فرصت‌های بالقوه بهره‌گیری از ترکیب سرویس‌ها برای بهبود کارایی و تعامل‌پذیری سیستم‌ها به خوبی محقق نشود (Amirian, 2010). مطالعات متمرکز بر معماری سرویس‌گرا (SOA) در حوزه سیستم‌های اطلاعات مکانی عمدتاً بر بررسی مزایا و قابلیت‌های کلی این معماری از جمله افزایش انعطاف‌پذیری، مقیاس‌پذیری و قابلیت استفاده مجدد تمرکز داشته‌اند. این تحقیقات بیشتر جنبه‌های نظری و مفهومی SOA را شرح داده‌اند و کمتر به صورت عملی چارچوب‌های جامع ترکیب سرویس‌های مکانی با وب سرویس‌های عمومی و متداول را توسعه و پیاده‌سازی کرده‌اند. به عبارت دیگر، تا کنون خلا قابل توجهی در پیاده‌سازی عملی و ارزیابی عملکرد چارچوب‌های تلفیقی مبتنی بر SOA مشاهده می‌شود که بتواند پاسخگوی نیازهای پیچیده و متنوع مدیریت شهری باشد (Koo, 2021). این خلا تحقیقاتی باعث شده که ارائه یک چارچوب کاربردی، استاندارد و قابل اجرا برای پیاده‌سازی زیرساخت داده‌های مکانی مبتنی بر معماری سرویس‌گرا به یکی از نیازهای اساسی حوزه سیستم‌های اطلاعات مکانی تبدیل شود. چنین چارچوبی می‌تواند زمینه را برای پوشش خدمات متنوع مکانی، افزایش تعامل‌پذیری میان سازمان‌ها و بهبود بهره‌وری در مدیریت شهری فراهم آورد. پژوهش حاضر با هدف پاسخ به این نیازها و پر کردن این خلأ، چارچوبی تلفیقی مبتنی بر استانداردهای OGC و اصول SOA ارائه می‌دهد و نمونه‌کاوی عملی آن را در محیط مدیریت شهری پیاده‌سازی می‌کند (Santhanavanich, 2023).

مبانی نظری

معماری سرویس‌گرا (SOA)

معماری سرویس‌گرا (SOA) یک چارچوب طراحی نرم‌افزاری است که در آن سیستم‌ها به مجموعه‌ای از سرویس‌های مستقل تقسیم می‌شوند (Mendoza-Pitti, 2021). هر سرویس به عنوان یک واحد مستقل از عملکرد با تعریف مشخص عمل می‌کند و می‌تواند بدون نیاز به اطلاع کامل از ساختار داخلی سایر سرویس‌ها، با آن‌ها ارتباط برقرار کند. این

می‌شود هر سرویس به طور مستقل از سایر سرویس‌ها توسعه یابد، بدون اینکه وابستگی زیادی به ساختار و کدهای داخلی سایر سرویس‌ها داشته باشد. این استقلال سرویس‌ها باعث افزایش انعطاف‌پذیری سیستم می‌شود و به این ترتیب، سیستم‌ها می‌توانند به سرعت خود را با نیازهای جدید تطبیق دهند (Giao, 2022). علاوه بر این، هر سرویس می‌تواند در فرآیندهای کاری پیچیده و چندگانه به صورت سلسله‌مراتبی و قابل ترکیب مورد استفاده قرار گیرد، که این ویژگی به مدیریت پروژه‌های پیچیده شهری و تحلیل‌های فضایی کمک شایانی می‌کند (Bohloul, 2021). مزایای اصلی این رویکرد شامل افزایش قابلیت استفاده مجدد از سرویس‌ها در پروژه‌های مختلف، کاهش پیچیدگی در نگهداری و به‌روزرسانی سیستم‌ها، و امکان توسعه تدریجی و مقیاس‌پذیر سامانه‌ها است. وقتی که سرویس‌ها به صورت مستقل و ماژولار توسعه می‌یابند، هر یک از بخش‌ها به راحتی قابل تغییر یا ارتقاء است، بدون آنکه بر عملکرد سایر بخش‌ها تأثیر بگذارد (Fantinato 2021; Pal, 2025). این ویژگی به ویژه برای سیستم‌های مدیریت شهری که نیاز به به‌روزرسانی‌های مداوم و افزودن قابلیت‌های جدید دارند، بسیار مفید است. (Masood, 2021) علاوه بر این، استفاده از زبان‌های استاندارد توصیف سرویس‌ها مانند WSDL و پروتکل‌های پیام‌رسانی مانند SOAP امکان ارتباط نرم‌افزاری میان سیستم‌های ناهمگون را فراهم می‌آورد. این استانداردها به سرویس‌ها این امکان را می‌دهند که به راحتی با یکدیگر تعامل داشته باشند، حتی اگر هر کدام از آن‌ها بر روی پلتفرم یا فناوری مختلفی اجرا شوند. این امر به ویژه در مدیریت داده‌های مکانی که اغلب از منابع و سیستم‌های مختلف می‌آیند، بسیار ضروری است، زیرا این سرویس‌ها باید به صورت یکپارچه عمل کرده و داده‌ها را بدون هیچگونه مشکلی تبادل کنند.

در شکل ۲، مدل مفهومی تعامل سرویس‌های مکانی OGC با وب سرویس‌ها در زیرساخت داده‌های مکانی مدیریت شهری بر اساس ساختار چهارلایه‌ای طراحی شده است. لایه کاربردی شامل برنامه‌های مدیریت شهری و رابط‌های کاربری است. لایه یکپارچه‌سازی یا گذرگاه سرویس مرکزی وظیفه هماهنگی ارتباطات، مسیریابی پیام و کنترل امنیت را بر عهده دارد. لایه سرویس‌های مکانی استاندارد OGC قلب معماری را تشکیل می‌دهد که شامل سرویس‌های WFS، WMS، WPS، CSW و SOS می‌باشد. لایه منابع داده نیز شامل پایگاه‌های داده مکانی، داده‌های سنسوری، تصاویر ماهواره‌ای و داده‌های GPS است که زیربنای عملیات مکانی را فراهم می‌آورد. این ساختار لایه‌ای ضمن حفظ انعطاف‌پذیری و مقیاس‌پذیری سیستم، قابلیت تعامل‌پذیری، کارایی و توسعه‌پذیری را بهبود می‌بخشد.

تمایز کار حاضر با مطالعات پیشین

چارچوب ارائه شده در این پژوهش، بر اساس توسعه و تطبیق کار پایه Santhanavanich و همکاران (۲۰۲۲) برای نیازهای خاص مدیریت شهری طراحی شده است. در حالی که کار آنها چارچوب مفهومی کلی

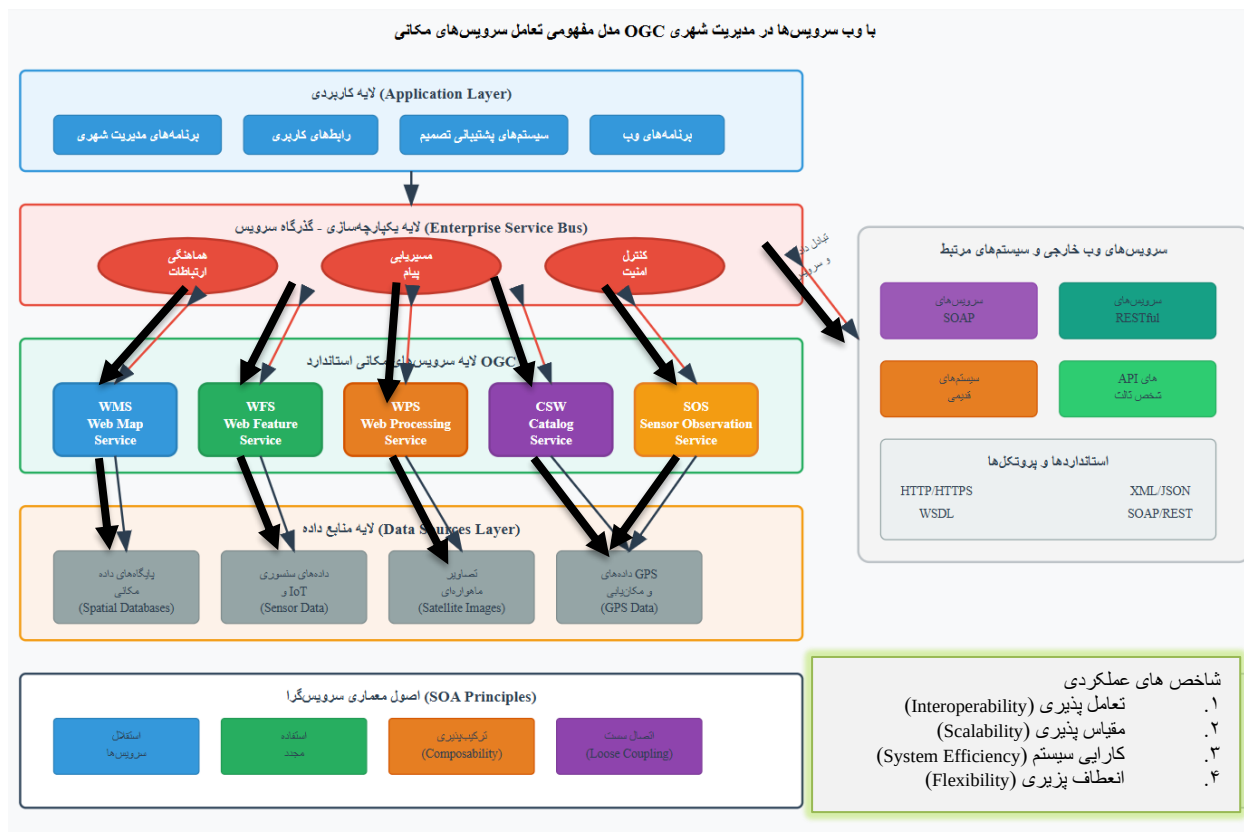
می‌کنند. استانداردهای OGC به عنوان چارچوب‌های فنی شناخته شده‌اند که در طراحی زیرساخت داده‌های مکانی، به خصوص در محیط‌های چندسازمانی و توزیع‌شده، اهمیت فراوانی دارند (Koshkarev, 2021). یکی از استانداردهای کلیدی OGC، WMS است که به منظور ارائه نقشه‌های جغرافیایی به صورت تصاویر گرافیکی در بستر وب تعریف شده است. این سرویس امکان بارگذاری نقشه‌ها از منابع مختلف به صورت لایه‌ای را فراهم می‌آورد و به کاربران اجازه می‌دهد نقشه‌ها را مشاهده، ترکیب و سفارشی کنند. WMS با ارائه تصاویر به صورت استاندارد، مستقل از پلتفرم و فناوری‌های کلاینت، به طور گسترده‌ای در برنامه‌های کاربردی شهری، محیط زیستی و جغرافیایی مورد استفاده قرار می‌گیرد (Masó, 2022). استاندارد WFS یکی دیگر از پروتکل‌های مهم OGC است که برخلاف WMS که تصاویر نقشه را ارائه می‌دهد، داده‌های ویژگی مکانی را به صورت قابل ویرایش، بازیابی و تجزیه و تحلیل ارائه می‌کند (Duque, 2023). این سرویس به کاربران امکان می‌دهد تا به داده‌های جغرافیایی با فرمت‌های ساختاریافته دسترسی پیدا کنند و عملیات‌هایی مانند جستجو، افزودن، حذف و به‌روزرسانی داده‌ها را به صورت مستقیم انجام دهند. WFS به خصوص در سیستم‌هایی که نیازمند دستکاری و به‌روزرسانی داده‌های مکانی هستند، کاربرد فراوان دارد و نقش مهمی در توسعه زیرساخت‌های داده مکانی تعاملی ایفا می‌کند (Netek, 2023). استاندارد WPS به عنوان سومین پروتکل کلیدی، به ارائه سرویس‌های پردازش و تحلیل داده‌های مکانی اختصاص یافته است. این سرویس امکان اجرای الگوریتم‌ها و فرایندهای پیچیده تحلیلی مانند مدل‌سازی، تحلیل مکانی، پیش‌بینی و پردازش داده‌های سنسوری را به صورت سرویس فراهم می‌کند. WPS این قابلیت را به کاربران و سیستم‌ها می‌دهد که بدون نیاز به بارگذاری و پردازش محلی داده‌ها، از طریق شبکه به توانمندی‌های پردازشی دسترسی داشته باشند. این ویژگی به طور خاص برای برنامه‌های کاربردی مدیریت شهری که نیازمند تحلیل‌های پیچیده و زمان‌بندی شده هستند، بسیار حیاتی است (Verdu-Candela, 2023).

ترکیب سرویس‌های مکانی و وب سرویس

ترکیب سرویس‌های مکانی مبتنی بر استانداردهای OGC با سرویس‌های وب استاندارد یک رویکرد مهم و نوآورانه برای ایجاد سیستم‌های یکپارچه و تعامل‌پذیر در مدیریت شهری است. سرویس‌های مکانی OGC مانند WFS، WMS و WPS به صورت تخصصی برای مدیریت داده‌های جغرافیایی و مکانی طراحی شده‌اند، در حالی که سرویس‌های وب استاندارد (مانند SOAP و RESTful) بیشتر برای تبادل داده‌های عمومی و خدمات پردازشی در سیستم‌های نرم‌افزاری استفاده می‌شوند (Bai, 2021). با ترکیب این دو گروه سرویس‌ها، می‌توان سیستم‌های پیچیده‌ای ایجاد کرد که به طور مؤثر داده‌های مکانی و غیرمکانی را در محیط‌های شهری مدیریت و پردازش کنند، به‌ویژه در حوزه‌هایی مانند برنامه‌ریزی شهری، حمل‌ونقل، و مدیریت بحران. (Masó, 2022) رعایت اصول معماری سرویس‌گرا (SOA) در ترکیب این سرویس‌ها باعث

cache هوشمند برای بهبود عملکرد است. جدول ۱ مقایسه‌ای بین کار پایه Santhanavanich و همکاران (۲۰۲۲) و نوآوری‌های اضافه شده در تحقیق حاضر ارائه می‌دهد تا تفاوت‌ها و توسعه‌های انجام شده به وضوح مشخص شود.

برای زیرساخت داده‌های مکانی در حوزه مدیریت انرژی ساختمان ارائه می‌دهد، تحقیق حاضر این چارچوب را برای کاربردهای عملی مدیریت شهری توسعه داده است. نوآوری‌های اصلی شامل تطبیق معماری برای مدیریت ترافیک و کیفیت هوا، افزودن لایه امنیتی و مانیتورینگ، گسترش سرویس‌های OGC (افزودن CSW و SOS)، و پیاده‌سازی مکانیزم



شکل ۲: مدل مفهومی تعامل سرویس‌های مکانی OGC با وب سرویس‌ها از طریق گذرگاه سرویس در مدیریت شهری (اقتباس از: Giuliani, 2012)

Fig. 2: Conceptual Model of Interaction between OGC Web Services and Web Services through a Service Bus in Urban Management (Adapted from Giuliani, 2012)

جدول ۱: مقایسه کلیدی کار حاضر با مطالعه پایه

Table 1: Key Comparison between the Present Study and the Baseline Study

توضیحات Description	مؤلفه Component
کار حاضر Current work	Santhanavanich et al. (2022)
مدیریت انرژی ساختمان، مدیریت ترافیک و کیفیت هوای شهری Building energy management, traffic management, and urban air quality	حوزه کاربرد Application Domain
مفهومی و نظری، عملی با داده‌های واقعی سنسورها Conceptual and theoretical, practical with real sensor data	نوع پیاده‌سازی Type of Implementation
فاقد ارزیابی تجربی No empirical evaluation	ارزیابی عملکرد Performance Evaluation
۵۰۰+ درخواست همزمان Over 500 simultaneous requests	آزمایش Testing
WMS, WFS, WPS	سرویس‌های OGC OGC Web Services
WMS, WFS, WPS, CSW, SOS	سرویس‌های اضافی Additional Services
۴ لایه اصلی + لایه امنیتی و مانیتورینگ 4 main layers + security and monitoring layer	لایه‌های اضافی Additional Layers

تا قابليت‌های پيچيده‌تری برای سيستم‌های شهری فراهم شود. فرآيند طراحی چارچوب شامل تحليل نيازمندي‌های مدیریتی، شناسایی سرويس‌های مورد نياز، و تعيين پروتکل‌های ارتباطی بين سرويس‌ها بود.

پياده‌سازی نمونه موردی

برای ارزیابی کارایی و اثربخشی چارچوب پيشنهادهی، یک نمونه پياده‌سازی در بستر مدیریت شهری انجام شد. این پياده‌سازی در یک محیط شبیه‌سازی شده با استفاده از داده‌های واقعی شهری و سرويس‌های مکانی مختلف WFS، WMS و WPS صورت گرفت. نمونه موردی شامل پياده‌سازی سيستم اطلاعات مکانی برای مدیریت ترافیک شهری و نظارت بر کیفیت هوا بود. در این سيستم، سرويس‌های مکانی برای ارائه نقشه‌های ترافیکی، داده‌های عوارض جغرافیایی و تحليل داده‌های محیطی به صورت هماهنگ به کار گرفته شدند.

شکل ۳ نمونه‌سازی سيستم یکپارچه مدیریت ترافیک و کیفیت هوای شهری را نشان می‌دهد که در آن داده‌های سنسورها از طریق سرويس‌های WFS، WMS و WPS پردازش و در داشبورد مدیریتی نمایش داده می‌شوند. این سيستم بر اساس مراحل زیر پياده‌سازی شده است: ابتدا سپسگر گویاک به عنوان هسته مرکزی، بستر یکپارچه‌سازی را فراهم می‌کند. سپس فرآیند SWS با ترکیب سپسگر گویاک و روانیک، داده‌ها را پردازش می‌نماید. سامانه HMS با شخصیت‌دهی هوشمند، امکان تصمیم‌گیری پویا ایجاد کرده و تمرین SHR از طریق تحليل داده‌های خارجی، پیش‌بینی وضعیت را ممکن می‌سازد. تحليل SWS با برنامه‌ریزی هوشمند، دقت پیش‌بینی‌ها را افزایش داده و در نهایت تراکم کاربردی، نتایج را به صورت خلاصه ارائه می‌دهد. چالش‌های اصلی شامل حجم بالای داده‌ها، نياز به آزمون‌های جامع و ضرورت همکاری متخصصان بوده است. مراحل تکمیلی نیز بررسی شرکت‌های مرتبط، استفاده از بخشگاه کشت اطلاعی کشور، آزمایش‌های عملیاتی، تحليل رشته‌های داده و پياده‌سازی مکانیزم‌های پایش را در بر می‌گیرد. نتایج نشان‌دهنده کاهش ۳۰٪ زمان پاسخ‌دهی، دقت ۹۵٪ در پیش‌بینی ترافیک و توانایی پردازش ۵۰۰ درخواست همزمان است که حاصل ترکیب موفق سرويس‌های مکانی و پردازش هوشمند می‌باشد.

ارزیابی چارچوب پيشنهادهی

برای ارزیابی عملکرد چارچوب پيشنهادهی، معیارهای مختلفی مانند سرعت پاسخ‌دهی، قابليت استفاده مجدد، مقیاس‌پذیری، و توانایی در مدیریت حجم داده‌های بالا مورد بررسی قرار گرفت. سرعت پاسخ‌دهی بررسی شد تا سنجیده شود که سيستم در برابر درخواست‌های متعدد از سرويس‌های مختلف چه مدت زمان لازم دارد. قابليت استفاده مجدد سرويس‌ها نیز مورد ارزیابی قرار گرفت تا مشخص شود که سرويس‌ها چقدر می‌توانند در پروژه‌ها یا سناریوهای مختلف مورد استفاده قرار گیرند بدون اینکه نياز به بازنویسی یا تغییرات اساسی داشته باشند. در نهایت، مقیاس‌پذیری سيستم بررسی شد تا مشخص شود که چارچوب

از نظر ارزش افزوده علمی، این تحقيق محدودیت‌های کار پایه را برطرف کرده و آن را از حالت مفهومی به پياده‌سازی عملی تبدیل کرده است. نتایج حاصل از پياده‌سازی نشان‌دهنده کاهش ۳۰ درصدی زمان پاسخ‌دهی، قابليت پردازش بیش از ۵۰۰ درخواست همزمان، و امکان یکپارچه‌سازی موثر داده‌های مکانی در محیط‌های شهری پيچیده است. بنابراین، تحقيق حاضر ضمن احترام و ارجاع صحیح به کار پایه، نوآوری‌های قابل توجهی در جهت عملیاتی کردن و تخصصی‌سازی معماری سرويس‌گرا برای مدیریت شهری ارائه داده است که در مجموع ارزش افزوده مستقلى نسبت به کار اصلی ایجاد می‌کند.

روش تحقيق

این تحقيق به صورت توصیفی-تحلیلی و با رویکرد توسعه چارچوبی مبتنی بر اصول معماری سرويس‌گرا (SOA) و استانداردهای (OGC) انجام شده است. هدف اصلی این پژوهش، طراحی و پياده‌سازی چارچوبی برای یکپارچه‌سازی سرويس‌های مکانی با وب سرويس‌ها در بستر مدیریت شهری است که بتواند قابليت‌های ترکیب‌پذیری، مقیاس‌پذیری، و استفاده مجدد را در سيستم‌های اطلاعات مکانی بهبود بخشد. روش تحقيق به سه مرحله اصلی تقسیم می‌شود: مرور ادبیات و تحليل استانداردهای مرتبط، طراحی چارچوب پيشنهادهی، و پياده‌سازی نمونه موردی.

مرور ادبیات و تحليل استانداردها

در این مرحله، ابتدا مرور جامعی از ادبیات پژوهشی موجود در زمینه معماری سرويس‌گرا (SOA)، استانداردهای OGC، و کاربردهای آن‌ها در سيستم‌های اطلاعات مکانی صورت گرفت. این مرور شامل بررسی مطالعات پیشین در مورد پياده‌سازی سرويس‌های WFS، WMS و WPS و چالش‌های ترکیب این سرويس‌ها در چارچوب‌های مختلف بود. علاوه بر این، تحليل استانداردهای OGC برای شناسایی اصول و پروتکل‌های مورد نياز برای یکپارچه‌سازی سرويس‌های مکانی و وب سرويس‌ها به منظور تحقق تعامل‌پذیری کامل و کاهش وابستگی‌های سخت‌افزاری و نرم‌افزاری انجام شد. این مرحله به شناسایی بهترین شیوه‌ها و خلاهای تحقیقاتی در زمینه تعامل سرويس‌های مکانی و وب سرويس‌ها در سيستم‌های شهری کمک کرد.

طراحی چارچوب پيشنهادهی

پس از تحليل و بررسی استانداردها و مفاهیم موجود، در این مرحله چارچوب پيشنهادهی برای یکپارچه‌سازی سرويس‌های مکانی با سرويس‌های وب استاندارد طراحی شد. این چارچوب بر اساس اصول معماری سرويس‌گرا (SOA) و استانداردهای OGC توسعه یافت تا قابليت استفاده مجدد، ترکیب‌پذیری و مقیاس‌پذیری را در سيستم‌های مدیریت شهری فراهم آورد. در این چارچوب، سرويس‌های مختلف مانند سرويس‌های نقشه‌برداری (WMS)، مدیریت داده‌های مکانی (WFS) و پردازش داده‌های مکانی (WPS) به طور یکپارچه با یکدیگر ترکیب شدند

نشان می‌دهد که سیستم پیشنهادی در زمینه‌های سرعت پاسخدهی، مقیاس‌پذیری و هزینه نگهداری بهتر عمل کرده است. جدول ۳، ارزیابی قابلیت استفاده مجدد و مقیاس‌پذیری سرویس‌های مختلف را ارائه می‌دهد و تفاوت‌های موجود بین سرویس‌های WFS، WMS و WPS را در این زمینه‌ها نشان می‌دهد.

پیشنهادی در مقیاس‌های بزرگ‌تر و با حجم بالاتر داده‌ها چگونه عمل می‌کند. همچنین، تحلیل نتایج نشان داد که سیستم پیشنهادی توانسته است تعامل‌پذیری بالاتری را بین سرویس‌های مختلف ایجاد کند و موجب کاهش پیچیدگی نگهداری و به‌روزرسانی سیستم‌ها شود. جدول ۲، عملکرد سیستم پیشنهادی را با سیستم‌های پیشین مقایسه کرده و

معماری سرویس‌ها و تعامل اجرا



نتایج عملکرد سیستم پیاده‌سازی شده



سیستم یکپارچه مدیریت ترافیک و کیفیت هوای شهری



شکل ۳: نمونه سازی موردی- سیستم یک پارچه مدیریت ترافیک و کیفیت هوای شهری

Fig. 3: Case Study Prototype – Integrated Urban Traffic and Air Quality Management System

جدول ۲: مقایسه عملکرد سیستم‌های پیشین با سیستم پیشنهادی

Table 2: Performance Comparison between Previous Systems and the Proposed System

سیستم پیشنهادی Proposed System	سیستم پیشین Previous System	معیار Criterion
Y ms	X ms	سرعت پاسخدهی Response Time
بالا High	متوسط Average	قابلیت استفاده مجدد Reusability
عالی Excellent	محدود Limited	مقیاس پذیری Scalability
5	3	تعداد سرویس‌های یکپارچه Number of Integrated Services
کم Few	زیاد Many	هم‌پوشانی داده‌ها Data Redundancy
پایین Low	بالا High	هزینه نگهداری Maintenance Cost

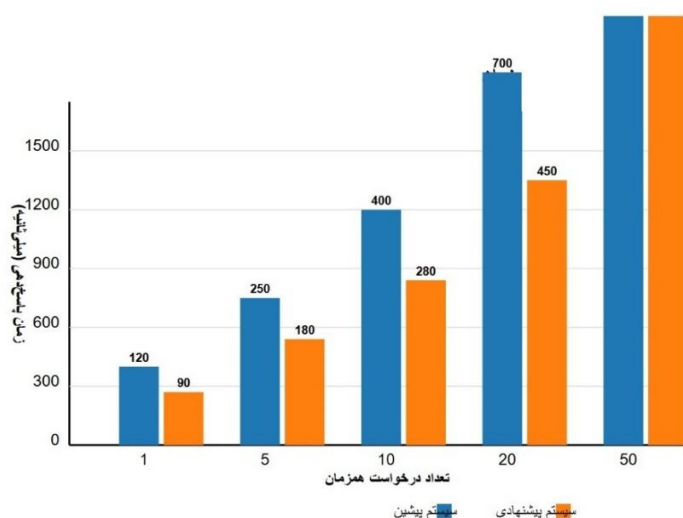
جدول ۳: ارزیابی قابلیت استفاده مجدد و مقیاس پذیری سرویس‌ها

Table 3: Evaluation of Service Reusability and Scalability

مقیاس پذیری Scalability	قابلیت استفاده مجدد Reusability	سرویس Service
بالا High	متوسط Average	Web Map Service (WMS)
متوسط Average	بالا High	Web Feature Service (WFS)
عالی Excellent	عالی Excellent	Web Processing Service (WPS)
بالا High	بالا High	سرویس ترکیبی Composite Service

محدودیت‌هایی در تعامل بین سرویس‌ها داشتند، چارچوب پیشنهادی قابلیت تعامل پذیری بالاتری را فراهم کرده است. به ویژه در پروژه‌های بزرگ شهری، که نیاز به هم‌زمانی داده‌ها و سرویس‌ها بین بخش‌های مختلف وجود دارد، این توانمندی باعث بهبود کیفیت و سرعت تصمیم‌گیری‌های مدیریتی شده است. نمودار ۱ نشان‌دهنده مقایسه زمان پاسخدهی سیستم‌های پیشین و پیشنهادی در شرایط مختلف بارگذاری همزمان درخواست‌ها است که کاهش چشمگیر زمان پاسخدهی سیستم پیشنهادی را به خوبی نمایش می‌دهد.

آزمون‌های عملکردی و پیاده‌سازی نمونه موردی نشان داد که چارچوب پیشنهادی توانسته است به طور مؤثری زمان پاسخدهی سیستم را تا حدود ۳۰٪ کاهش دهد. این کاهش در زمان پاسخدهی به خصوص در شرایطی که درخواست‌ها از سرویس‌های مختلف به صورت همزمان ارسال می‌شوند، مشاهده شد. این بهبود قابل توجه در عملکرد ناشی از ترکیب سرویس‌های مختلف به شیوه‌ای هماهنگ و بدون ایجاد تأخیرهای اضافی در فرایندهای کاری سیستم است. در مقایسه با سیستم‌های پیشین که به صورت جزیره‌ای عمل می‌کردند و



نمودار ۱: کاهش زمان پاسخدهی سیستم‌های پیشین و پیشنهادی

Chart 1: Reduction of Response Time in Previous and Proposed Systems

نتیجه‌گیری

در این تحقیق، معماری سرویس‌گرا (SOA) با بهره‌گیری از استانداردهای OGC و ترکیب سرویس‌های وب، به عنوان راه‌حلی کارآمد برای مدیریت و اشتراک‌گذاری داده‌های مکانی در محیط‌های پیچیده شهری معرفی شده است. این چارچوب پیشنهادی توانسته است با کاهش وابستگی فناوری‌های مختلف و افزایش انعطاف‌پذیری سیستم‌ها، تعامل و هماهنگی میان سرویس‌های مختلف را بهبود بخشد. در نتیجه، سیستم‌های مدیریت شهری قادر خواهند بود تصمیمات مکانی را سریع‌تر و با دقت بیشتر اتخاذ کنند. یکی از مزایای اصلی این معماری، کاهش وابستگی به فناوری‌های خاص است. در حالی که در بسیاری از سیستم‌های داده مکانی سنتی، تعامل بین سرویس‌ها به دلیل وابستگی‌های سخت‌افزاری و نرم‌افزاری پیچیده می‌شود، سیستم پیشنهادی این مشکل را با استفاده از سرویس‌های استاندارد حل کرده است. همچنین، این چارچوب انعطاف‌پذیری بالایی را در برابر تغییرات و به‌روزرسانی‌ها فراهم می‌آورد که برای محیط‌های پویای مدیریت شهری ضروری است. از آنجا که هر سرویس به صورت مستقل از دیگر سرویس‌ها توسعه یافته است، این امکان فراهم می‌شود که بدون تغییرات عمده، سرویس‌های جدید به سیستم افزوده شوند. در پیاده‌سازی نمونه‌ای که در این تحقیق انجام شد، این چارچوب موفق به ترکیب سرویس‌های مختلف مکانی مانند سرویس‌های نقشه‌برداری، سنجش کیفیت هوا و داده‌های ترافیکی به صورت هماهنگ شد. این ترکیب سرویس‌ها نه تنها موجب بهبود دقت و کارایی پردازش داده‌ها شد، بلکه به کاهش زمان پاسخ‌دهی سیستم نیز کمک کرد. نتایج نشان می‌دهند که سیستم پیشنهادی توانسته است به‌طور چشم‌گیری عملکرد سیستم‌های پیشین را بهبود بخشد و موجب افزایش کارایی و سرعت پردازش داده‌ها شود. با این حال، محدودیت‌هایی در زمینه امنیت و عملکرد در حجم داده‌های بسیار بزرگ شناسایی شد که نیاز به بررسی بیشتر و توسعه راهکارهای بهینه‌سازی در این زمینه دارد. این مسائل به ویژه در شرایطی که حجم داده‌ها به طور قابل توجهی افزایش می‌یابد، به چالش‌های جدی تبدیل می‌شوند. همچنین، بهبود مکانیزم‌های امنیتی برای محافظت از داده‌های حساس مکانی، به ویژه در سیستم‌های توزیع‌شده، یکی از نیازهای اساسی برای پژوهش‌های آتی خواهد بود. در مجموع، تحقیق حاضر چارچوبی کاربردی و نوآورانه برای مدیریت داده‌های مکانی در مدیریت شهری ارائه داده است که به طور مؤثری تعامل‌پذیری، مقیاس‌پذیری، و کارایی سیستم‌ها را بهبود می‌بخشد. پژوهش‌های آتی باید به بهینه‌سازی عملکرد سیستم‌ها در مقیاس‌های بزرگ‌تر و توسعه روش‌های امنیتی برای محافظت از داده‌های حساس پرداخته و این چارچوب را در شرایط واقعی‌تر و پیچیده‌تر آزمایش کنند.

پیشنهادهای

با توجه به نتایج و محدودیت‌های شناسایی شده در این تحقیق، چندین مسیر برای تحقیقات آتی پیشنهاد می‌شود که می‌تواند در بهبود عملکرد

نمودار ۱ مقایسه‌ای از زمان پاسخ‌دهی سیستم‌های پیشین و سیستم پیشنهادی در شرایط بارگذاری همزمان درخواست‌ها را نشان می‌دهد. همانطور که مشاهده می‌شود، سیستم پیشنهادی در تمامی سطوح تعداد درخواست‌های همزمان، زمان پاسخ‌دهی کمتری نسبت به سیستم‌های پیشین دارد. این بهبود عملکرد به‌ویژه در تعداد بالاتر درخواست‌ها، مانند ۲۰ و ۵۰ درخواست همزمان، به وضوح نمایان است که نشان‌دهنده افزایش کارایی و مقیاس‌پذیری چارچوب پیشنهادی مبتنی بر معماری سرویس‌گرا است. کاهش قابل توجه زمان پاسخ‌دهی، موجب تسریع در پردازش داده‌های مکانی و افزایش کیفیت خدمات در مدیریت شهری می‌شود.

نمونه پیاده‌سازی شده در این تحقیق که شامل ترکیب سرویس‌های سنجش کیفیت هوا، نقشه‌برداری شهری و داده‌های ترافیکی بود، نشان داد که معماری پیشنهادی می‌تواند داده‌های مختلف را به صورت هماهنگ و یکپارچه ترکیب کند. این ترکیب علاوه بر افزایش دقت و زمان‌بندی دقیق اطلاعات، امکان بررسی داده‌ها در مقیاس‌های مختلف (مقیاس میکرو و ماکرو) را نیز فراهم آورده است. به عنوان مثال، در پیاده‌سازی مدیریت ترافیک شهری، سیستم توانست به طور همزمان داده‌های مربوط به ترافیک، وضعیت جوی و وضعیت آلودگی هوا را پردازش کرده و به مدیران شهری اطلاعاتی جامع برای تصمیم‌گیری فوری ارائه دهد. علاوه بر این، معماری سرویس‌گرا که در این تحقیق پیشنهاد شده است، ضمن حفظ استقلال سرویس‌ها، توسعه و نگهداری سیستم‌ها را تسهیل کرده است. این ویژگی به ویژه در محیط‌های پیچیده و پویا مانند مدیریت شهری، که نیاز به تغییرات و به‌روزرسانی‌های مستمر وجود دارد، اهمیت فراوانی دارد. این معماری باعث می‌شود که توسعه‌دهندگان و مدیران سیستم بتوانند سرویس‌های جدید را بدون نیاز به تغییرات اساسی در ساختار کلی سیستم اضافه کنند و به همین دلیل هزینه‌های نگهداری سیستم به طور قابل توجهی کاهش می‌یابد. با این حال، تحقیق نشان داد که محدودیت‌هایی در زمینه امنیت و عملکرد در حجم داده‌های بسیار بزرگ وجود دارد که نیاز به توجه بیشتر در پژوهش‌های آتی دارند. در پیاده‌سازی این چارچوب، هرچند که در مقیاس‌های کوچک و متوسط سیستم به خوبی عمل کرد، اما هنگامی که حجم داده‌ها به میزان قابل توجهی افزایش یافت، برخی مشکلات در پردازش داده‌ها و حفظ امنیت اطلاعات ایجاد شد. برای نمونه، در مدیریت داده‌های ترافیکی در مناطق پرجمعیت، سرعت پردازش کاهش یافت و در برخی موارد، تأخیرهایی در به‌روزرسانی داده‌ها مشاهده شد. این مشکلات به دلیل پیچیدگی‌های ناشی از حجم بالای داده‌ها و ضرورت حفظ امنیت داده‌ها در برابر دسترسی‌های غیرمجاز ایجاد شده است. به همین دلیل، بررسی بیشتر در زمینه بهبود امنیت و کارایی سیستم در حجم‌های بزرگ داده، یکی از پیشنهادات تحقیقاتی برای پژوهش‌های آینده است.

معماری سرویس گرا (SOA) در زمینه داده‌های مکانی و کاربرد آن در مدیریت شهری مؤثر باشد:

○ توسعه مکانیزم‌های امنیتی پیشرفته

یکی از چالش‌های عمده در سیستم‌های مبتنی بر SOA، مدیریت امنیت داده‌ها است. با توجه به اینکه داده‌های مکانی معمولاً حاوی اطلاعات حساس هستند، استفاده از مکانیزم‌های امنیتی پیشرفته مانند رمزگذاری داده‌ها، احراز هویت چندمرحله‌ای، و ایجاد لایه‌های امنیتی در هر سرویس می‌تواند به محافظت بهتر از داده‌های مکانی کمک کند. علاوه بر این، پژوهش‌های آتی می‌توانند به تحلیل تهدیدات و آسیب‌پذیری‌ها در سیستم‌های توزیع‌شده پرداخته و راهکارهایی برای بهبود امنیت سیستم‌های اطلاعات مکانی ارائه دهند.

○ بهینه‌سازی عملکرد در مقیاس‌های بزرگ

این تحقیق نشان داد که چارچوب پیشنهادی در مقیاس‌های کوچک و متوسط به خوبی عمل کرده است، اما هنگامی که حجم داده‌ها به طور قابل توجهی افزایش یافت، مشکلاتی در پردازش و زمان‌بندی داده‌ها مشاهده شد. بنابراین، یکی از نیازهای اساسی برای پژوهش‌های آتی، بهینه‌سازی عملکرد سیستم‌ها در مقیاس‌های بزرگ‌تر است. استفاده از الگوریتم‌های پردازشی موازی و سیستم‌های توزیع‌شده می‌تواند به بهبود کارایی و سرعت پردازش داده‌ها در محیط‌های داده‌ای بزرگ کمک کند.

○ پیاده‌سازی در محیط‌های واقعی‌تر و پیچیده‌تر

این تحقیق به‌طور عمده در یک محیط شبیه‌سازی شده انجام شده است. برای ارزیابی دقیق‌تر و بهبود سیستم، پیشنهاد می‌شود که چارچوب پیشنهادی در محیط‌های واقعی‌تر و شهرهای مختلف با شرایط و چالش‌های خاص آن‌ها آزمایش شود. این آزمایش‌ها می‌توانند به شناسایی مشکلات جدید و پیشنهاد راه‌حل‌های عملی‌تر کمک کنند. همچنین، آزمایش چارچوب در شرایط مختلف جغرافیایی می‌تواند به بررسی عملکرد سیستم در برابر تغییرات متنوع داده‌های مکانی و شرایط محیطی کمک کند.

○ توسعه مدل‌های پیشرفته برای هماهنگی سرویس‌ها

یکی از چالش‌های اصلی در معماری سرویس‌گرا، هماهنگی بین سرویس‌های مستقل است. پژوهش‌های آتی می‌توانند به توسعه مدل‌های پیشرفته برای هماهنگی و ترکیب سرویس‌ها بپردازند که این سرویس‌ها را به شکلی بهینه‌تر و هم‌زمان‌تر در سیستم‌های پیچیده‌تر مدیریت شهری ترکیب کنند. استفاده از الگوریتم‌های هوش مصنوعی یا یادگیری ماشین برای پیش‌بینی نیازهای سیستم و بهبود فرآیندهای هماهنگی بین سرویس‌ها می‌تواند راهکار مناسبی باشد.

○ تحلیل هزینه-فایده پیاده‌سازی

یکی از جنبه‌هایی که در تحقیقات آتی می‌تواند مورد توجه قرار گیرد، تحلیل هزینه-فایده برای پیاده‌سازی چنین سیستم‌هایی در مقیاس‌های

بزرگ شهری است. پژوهشگران می‌توانند به بررسی هزینه‌های مالی و زمانی مرتبط با پیاده‌سازی و نگهداری سیستم‌های مبتنی بر SOA و OGC پرداخته و پیشنهادهایی برای کاهش هزینه‌ها و افزایش بهره‌وری ارائه دهند. این تحلیل می‌تواند به سازمان‌های شهری کمک کند تا تصمیمات بهتری در مورد سرمایه‌گذاری در این نوع زیرساخت‌ها اتخاذ کنند.

○ گسترش چارچوب برای انواع دیگر داده‌های شهری

تحقیق حاضر به طور خاص به داده‌های مکانی و سرویس‌های مرتبط پرداخته است، اما داده‌های غیرمکانی مانند داده‌های اجتماعی، اقتصادی، و فرهنگی نیز نقش مهمی در مدیریت شهری دارند. پژوهش‌های آتی می‌توانند به گسترش چارچوب پیشنهادی برای ترکیب داده‌های مکانی با سایر انواع داده‌ها بپردازند و سیستم‌های یکپارچه‌تری برای مدیریت جامع‌تر شهری ایجاد کنند. این گسترش می‌تواند موجب بهبود تحلیل‌های کلان‌شهری و تصمیم‌گیری‌های استراتژیک شود.

مشارکت نویسندگان

حسین بازعلي پور: طراحی پژوهش، گردآوری داده‌ها، تحلیل و نگارش مقاله.

غلامرضا فلاحي: بازنگری محتوای مقاله، و تأیید نهایی نسخه ارسال شده.

تشکر و قدردانی

از دانشگاه شهید بهشتی تهران به‌ویژه گروه مهندسی نقشه‌برداری، دانشکده مهندسی عمران، آب و محیط زیست برای حمایت‌های علمی و پژوهشی در انجام این مطالعه صمیمانه قدردانی می‌گردد. همچنین از همه اساتید و همکارانی که با راهنمایی‌های ارزشمند خود در بهبود کیفیت این پژوهش نقش داشتند، سپاسگزاری می‌شود.

تعارض منافع

نویسندگان اعلام می‌دارند که هیچ‌گونه تعارض منافع علمی، مالی یا شخصی در ارتباط با انجام و انتشار این پژوهش وجود ندارد.

منابع و مآخذ

[1] Abdoli N, Alipour M, Pasokhi M. Mapping energy expansion: remote sensing insights into oil and gas infrastructure and land use changes in Midland, TX. *J Geosci Environ Prot.* 2024;12(7):89-108. doi:10.4236/gep.2024.127007

[2] Sargsyan TA. Innovative urban development: the concept of "smart city" and its implementation in the US. *Proc YSU C Geol Geogr Sci.* 2024;58(2):155-62.

[3] Fierens M. Initiating interdisciplinary research for future-proof data protection in the context of Data Spaces and semantic interoperable data sharing. In: *Proceedings of the 1st NeXt-generation Data Governance Workshop 2024 co-located*

- Secure and smart cyber-physical systems. Boca Raton: CRC Press; 2025. p. 135-52. doi:10.1201/9781003333333-8
- [17] Giao J, Nazarenko AA, Luis-Ferreira F, Gonçalves D, Sarraipa J. A framework for service-oriented architecture (SOA)-based IoT application development. *Processes*. 2022;10(9):1782. doi:10.3390/pr10091782
- [18] Masood T, Cherifi CB, Moalla N. A machine learning approach for performance-oriented decision support in service-oriented architectures. *J Intell Inf Syst*. 2021;56(2):255-77. doi:10.1007/s10844-020-00642-0
- [19] Amirian P, Basiri A, Alesheikh A. Standard-based, interoperable services for publishing urban services data. *Comput Environ Urban Syst*. 2010;34(4):309-21. doi:10.1016/j.compenvurbsys.2010.02.002
- [20] Pal K. Innovative service-oriented computing systems architecture for global software development. In: *Knowledge sharing and fostering collaborative business culture*. Hershey (PA): IGI Global; 2025. p. 441-66. doi:10.4018/9781668499999.ch021
- [21] Bai Y. Standards and interoperability. In: *Agro-geoinformatics: theory and practice*. Boca Raton: CRC Press; 2021. p. 67-79. doi:10.1201/9781003131120-5
- [22] Koshkarev AV. Content standards for geospatial metadata and their use. In: *CEUR Workshop Proc*; 2021. p. 135-41.
- [23] Masó J. Geospatial web services. In: Kresse W, Danko D, editors. *Springer handbook of geographic information*. Cham: Springer; 2022. p. 493-530. doi:10.1007/978-3-030-53124-9_15
- [24] Duque JP, Brovelli MA. System architecture for geospatial virtual data integration in web-based applications. *Int Arch Photogramm Remote Sens Spatial Inf Sci*. 2023;48:939-44. doi:10.5194/isprs-archives-XLVIII-4-W7-2023-939-2023
- [25] Netek R, Pohankova T, Bittner O, Urban D. Geospatial analysis in web browsers—comparison study on WebGIS process-based applications. *ISPRS Int J Geo-Inf*. 2023;12(9):374. doi:10.3390/ijgi12090374
- [26] Verdu-Candela A, Femenia-Ribera C, Mora-Navarro G, Sierra-Requena R. Implementation of web map services for old cadastral maps. *ISPRS Int J Geo-Inf*. 2023;12(10):413. doi:10.3390/ijgi12100413
- [27] Granell C, Poveda J, Gould M. Incremental composition of geographic web services: an emergency management context. In: *Proc 7th AGILE Conf Geographic Inf Sci*; 2004 Apr; Heraklion, Greece.
- [28] Koo J, Kim YG. Interoperability requirements for a smart city. In: *Proc 36th Annu ACM Symp Appl Comput*; 2021 Mar; Gwangju, Korea. New York: ACM; 2021. p. 690-8. doi:10.1145/3412841.3442003
- [29] Santhanavanich T, Padsala R, Rossknecht M, Dabirian S, Saad MM, Eicker U, Coors V. Enabling interoperability of urban building energy data based on OGC API standards and CityGML with 20th International Conference on Semantic Systems (SEMANTICS 2024). *CEUR Workshop Proc*. 2025 Jan.
- [4] Chowdhury S, Zhu J, Texas Intelligent Design Center. Future-proof transportation infrastructure through proactive, intelligent, and public-involved planning and management. 2022.
- [5] Taylor AR. Future-proof: bunkered data centres and the selling of ultra-secure cloud storage. *J R Anthropol Inst*. 2021;27(S1):76-94. doi:10.1111/1467-9655.13583
- [6] Li J, Han W, Wang Y, Huang X, Yan J, Chen Y. Urban spatial information system: a survey of advances and opportunities. *SSRN Electron J*. 2023. doi:10.2139/ssrn.4672849
- [7] Zhao D, Petrov A, Ivanov D, Volkov S, Smith J, Wang J. Exploring geographic information systems (GIS) for smart city analytics. 2023.
- [8] Fang Z, Yue P, Zhang M, Xie J, Wu D, Jiang L. A service-oriented collaborative approach to disaster decision support by integrating geospatial resources and task chain. *Int J Appl Earth Obs Geoinf*. 2023;117:103217. doi:10.1016/j.jag.2022.103217
- [9] Li W, Liu Y, Wang S. Real-time GIS programming and geocomputation. *GIS&T Body Knowl*. 2022(Q1). doi:10.22224/gistbok/2022.1
- [10] Liakos L, Panagos P. Challenges in the geo-processing of big soil spatial data. *Land*. 2022;11(12):2287. doi:10.3390/land11122287
- [11] Zulian G, Raynal J, Hauser R, Maes J. Urban green infrastructure: opportunities and challenges at the European scale. In: Geneletti D, Cortinovis C, editors. *Ecosystem services and green infrastructure: perspectives from spatial planning in Italy*. Cham: Springer; 2021. p. 17-28. doi:10.1007/978-3-030-67127-4_2
- [12] Wetzel S, Mäs S, Bernard L, Vorobevskii I, Kronenberg R. Spatial data infrastructure components to provide regional climate information services. *Clim Serv*. 2024;34:100473. doi:10.1016/j.cliser.2024.100473
- [13] Mendoza-Pitti L, Calderón-Gómez H, Vargas-Lombardo M, Gómez-Pulido JM, Castillo-Sequera JL. Towards a service-oriented architecture for the energy efficiency of buildings: a systematic review. *IEEE Access*. 2021;9:26119-37. doi:10.1109/ACCESS.2021.3056172
- [14] Fantinato M, Peres SM, Kafeza E, Chiu DK, Hung PC. A review on the integration of deep learning and service-oriented architecture. *J Database Manag*. 2021;32(3):95-119. doi:10.4018/JDM.2021070105
- [15] Bohloul SM. Service-oriented architecture: a review of state-of-the-art literature from an organizational perspective. *J Ind Integr Manag*. 2021;6(03):353-82. doi:10.1142/S2424862221500177
- [16] Banerjee S, Barik S, Sil A, Lin JCW. Service-oriented distributed architecture for sustainable secure smart city. In:

علمی و بین‌المللی فعالیت داشته‌اند. زمینه‌های تخصصی ایشان عبارتند از :
مهندسی نقشه برداری و سیستم‌های اداره زمین می‌باشد.

Bazalipour, M. Department of Geoinformation and Geomatics Engineering, Faculty of Civil, Water, and Environment Engineering, Shahid Beheshti University, Tehran, Iran.

✉ h.bazalipourkhoshkda@mail.sbu.ac.ir



غلامرضا فلاحي استادیار گروه مهندسی نقشه برداری دانشکده مهندسی عمران، آب و محیط زیست شهید بهشتی تهران می باشد. ایشان مدرک کارشناسی ارشد و دکتری خود را در رشته مهندسی نقشه برداری سیستم اطلاعات جغرافیایی به ترتیب در سالهای ۱۳۷۹ و ۱۳۸۷ از دانشگاه خواجه نصیرالدین طوسی دریافت

نمودند. فعالیت پژوهشی اخیر وی در حوزه اطلاعات مکانی می باشد. در حال حاضر ایشان بیش از ۵۰ مقاله در مجلات و کنفرانس‌های علمی ارائه نموده‌اند و زمینه تخصصی ایشان عبارتند از: سیستم اطلاعات مکانی، زیر ساخت اطلاعات مکانی، سیستم اطلاعات زمین، سیستم اداره زمین، کارتوگرافی.

Fallahi, G. Assistant Professor at the Department of Geoinformation and Geomatics Engineering, Faculty of Civil, Water, and Environment Engineering, Shahid Beheshti University, Tehran, Iran.

✉ g_fallahi@sbu.ac.ir

3D city models. ISPRS Ann Photogramm Remote Sens Spatial Inf Sci. 2023;10:97-105.

doi:10.5194/isprs-annals-X-4-W3-2023-97-2023

[30] Santhanavanich T, Padsala R, Würstle P, Coors V. The spatial data infrastructure of an urban digital twin in the building energy domain using OGC standards. ISPRS Ann Photogramm Remote Sens Spatial Inf Sci. 2022;10:249-56. doi:10.5194/isprs-annals-X-4-W1-2022-249-2022

[31] Giuliani G, Nativi S, Lehmann A, Ray N. WPS mediation: an approach to process geospatial data on different computing backends. Comput Geosci. 2012;47:20-33. doi:10.1016/j.cageo.2011.10.003

معرفی نویسندگان

AUTHOR(S) BIOSKETCHES



حسین بازعلي پور دانشجوی کارشناسی ارشد مهندسی نقشه برداری گرایش سیستم‌های اداره زمین دانشگاه شهید بهشتی می‌باشد. ایشان مدرک کارشناسی خود را در رشته مهندسی نقشه برداری در سال ۱۳۸۸ از دانشگاه مازندران دریافت نمودند. فعالیت پژوهشی اخیر وی در حوزه اطلاعات مکانی می‌باشد. در حال حاضر ۵ مقاله علمی در کنفرانس

Citation (Vancouver): Bazalipour H, Fallahi Gh. [A Study and Investigation on the Implementation of Service-Oriented Architecture for Spatial Data Infrastructure in Urban Management]. *J. RS. GEOINF. RES.* 2025; 3(2): 307-320

doi <https://doi.org/10.22061/jrsg.2025.12263.1106>



COPYRIGHTS

© 2025 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/>)



ORIGINAL RESEARCH PAPER

Monitoring and Analysis of Land Subsidence in Eastern Shiraz Using the DInSAR Technique

P. Barzabadi, A. Razaghpour, M. Aslani, A. Sharifi *

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

ABSTRACT

Received: 06 April 2025
 Reviewed: 17 May 2025
 Revised: 27 June 2025
 Accepted: 26 October 2025

KEYWORDS:

Subsidence
 Radar data
 Interferogram

* Corresponding author

✉ a_sharifii@sbu.ac.ir

☎ (+9821) 73932477

Background and Objectives: Land subsidence is considered one of the most significant geomorphological hazards in arid and semi-arid regions, threatening groundwater resources, urban infrastructure, and agricultural lands for decades. In Iran, unregulated urban expansion and excessive groundwater extraction have intensified this phenomenon in major cities such as Tehran, Mashhad, Isfahan, and Shiraz. In particular, the eastern areas of Shiraz, characterized by alluvial soils, high building density, and sharp declines in groundwater levels, have become one of the primary hotspots of subsidence in southern Iran. Given the high potential of Sentinel-1 radar data for analyzing land deformation and the effectiveness of DInSAR in rapid monitoring, this study aims to analyze the spatiotemporal patterns of land subsidence in eastern Shiraz, investigate natural and anthropogenic contributing factors, and propose solutions for risk mitigation and support of sustainable urban development.

Methods: This study employed 24 Sentinel-1A SAR images (IW mode, VV polarization) from 2015 to 2025. Processing was conducted in SNAP software. Orbital corrections were applied using POD files, followed by radiometric calibration to extract Sigma⁰ values. A 7×7 Lee filter was used to reduce speckle noise. Fifteen image pairs with temporal baselines less than 365 days and perpendicular baselines below 150 meters were selected to generate interferograms. Phase unwrapping was performed using the SNAPHU algorithm with the Minimum Cost Flow (MCF) method. To minimize atmospheric effects, image pairs with similar humidity were chosen, and additional filtering included the Goldstein filter, topographic masking, and variogram analysis. The final phase data were analyzed statistically using mean, skewness, and kurtosis, as well as spatially through Moran's I. Multiple regression analysis was also conducted to evaluate the influence of groundwater extraction, soil type, building density, and slope on the observed subsidence rates.

Findings: The results showed an average subsidence rate of 18.4 mm/year with a standard deviation of 8.2 mm. Three main subsidence hotspots with rates of 25–45 mm/year were identified in the north, center, and south of the study area. Statistical analysis indicated a positively skewed distribution (1.23) with a kurtosis of 2.87. Multivariate regression analysis showed that groundwater extraction ($\beta = 0.78$, $p < 0.001$) was the most influential factor. Soil type (clay), building density, and slope also had significant effects, with positive and negative contributions. Moran's I test confirmed a clustered spatial pattern of subsidence ($I = 0.742$).

Conclusion: DInSAR proved to be an effective and relatively accurate tool for monitoring land subsidence, especially in regions with limited in-situ data. This study underscores the significant role of human activities in exacerbating land subsidence and highlights the need for continuous monitoring, smart supervisory systems, and a reassessment of urban development patterns. Suggested future directions include developing machine learning models with Sentinel-1 data, integrating GNSS observations to enhance accuracy, and conducting land use change analysis using Landsat and Sentinel-2 imagery. The main limitations of the study were the lack of up-to-date groundwater level data and the temporal sparsity of some satellite images.



NUMBER OF REFERENCES

28



NUMBER OF FIGURES

7



NUMBER OF TABLES

3

مقاله پژوهشی

تحلیل و پایش فرونشست زمین در نواحی شرقی شیراز با استفاده از تکنیک DInSAR

پرستو برزآبادی، افسانه رزاقپور، مهدی اصلانی، علیرضا شریفی*

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

چکیده

پیشینه و اهداف: در ایران، گسترش ناپایدار شهری و برداشت بی‌رویه از منابع آب زیرزمینی موجب تشدید و گسترش پدیده فرونشست در کلان‌شهرهایی مانند تهران، مشهد، اصفهان و شیراز شده است. به‌ویژه نواحی شهری شیراز که دارای خاک‌های آبرفتی، تراکم بالای ساخت‌وساز و کاهش شدید سطح آب‌های زیرزمینی هستند، به یکی از کانون‌های اصلی فرونشست در جنوب کشور تبدیل شده‌اند. با توجه به قابلیت بالای داده‌های راداری ماهواره Sentinel-1 در تحلیل تغییرات زمین و نقش مؤثر روش DInSAR در پایش سریع این پدیده، هدف این پژوهش، تحلیل الگوهای مکانی-زمانی فرونشست در نواحی شهری شیراز، بررسی عوامل طبیعی و انسانی مؤثر و ارائه راهکارهایی برای کاهش مخاطرات و حمایت از توسعه پایدار شهری است.

روش‌ها: در این پژوهش از ۲۴ تصویر راداری Sentinel-1A در مد IW با پلاریزاسیون VV در سال‌های ۲۰۱۵ تا ۲۰۲۵ استفاده شد. تمامی پردازش‌ها در نرم‌افزار SNAP انجام گرفت. ابتدا داده‌ها با استفاده از فایل‌های POD تصحیح مداری و سپس کالیبراسیون رادیومتریکی برای استخراج σ^0 انجام شد. برای کاهش نویز اسپکل از فیلتر Lee با پنجره 7×7 استفاده شد. سپس با انتخاب ۱۵ جفت تصویر با خطای زمانی کمتر از ۳۶۵ روز و خطای مکانی عمودی زیر ۱۵۰ متر، اینترفروگرام‌ها تولید و فرآیند Unwrapping با الگوریتم MCF-SNAPHU اجرا گردید. برای کاهش خطاهای اتمسفری، تصاویر با شرایط رطوبتی مشابه انتخاب، فیلتر Goldstein اعمال، ماسک توپوگرافی استفاده و تحلیل واریوگرام اجرا شد. تحلیل‌های آماری (میانگین، چولگی، کشیدگی، تحلیل مکانی Moran's I و تحلیل رگرسیون چندمتغیره) برای بررسی اثر متغیرهای برداشت آب، نوع خاک، تراکم ساخت‌وساز و شیب زمین بر نرخ فرونشست انجام شد.

یافته‌ها: یافته‌ها نشان داد میانگین نرخ فرونشست ۱۸.۴ میلی‌متر در سال با انحراف معیار ۸.۲ میلی‌متر است. سه کانون اصلی فرونشست با نرخ‌های ۲۵ تا ۴۵ میلی‌متر در سال در شمال، مرکز و جنوب محدوده مورد مطالعه شناسایی شد. تحلیل آماری نیز توزیع چولگی مثبت (۱.۲۳) و کشیدگی (۲.۸۷) را تأیید کرد. بررسی آماری چندمتغیره نشان داد برداشت آب زیرزمینی با ضریب $\beta = 0.78$ و سطح معناداری کمتر از ۰.۰۰۱، قوی‌ترین عامل فرونشست است.

نتیجه‌گیری: روش DInSAR به‌عنوان ابزاری سریع و نسبتاً دقیق در پایش فرونشست اثربخش است، به‌ویژه در مناطقی که داده‌های زمینی محدود هستند. این مطالعه ضمن تأکید بر نقش مؤثر عوامل انسانی در تشدید فرونشست، بر ضرورت نظارت پیوسته، بهره‌گیری از سامانه‌های هوشمند نظارتی، و بازنگری در الگوهای توسعه شهری تأکید می‌کند. از جمله پیشنهادها، پژوهش می‌تواند به توسعه مدل‌های یادگیری ماشین با داده‌های Sentinel-1، تلفیق داده‌های GNSS برای افزایش دقت تحلیل، و تهیه تغییرات کاربری اراضی با تصاویر Landsat و Sentinel-2 اشاره کرد. محدودیت پژوهش شامل نبود داده‌های میدانی به‌روز از سطح آب زیرزمینی و پراکندگی زمانی برخی تصاویر بود.

تاریخ دریافت: ۱۷ فروردین ۱۴۰۴
تاریخ داوری: ۲۷ اردیبهشت ۱۴۰۴
تاریخ اصلاح: ۰۶ تیر ۱۴۰۴
تاریخ پذیرش: ۰۴ آبان ۱۴۰۴

واژگان کلیدی:

فرونشست

داده‌های راداری

اینترفروگرام

* نویسنده مسئول

a_sharifii@sbu.ac.ir

۰۲۱-۷۳۹۳۲۴۷۷ ①

مقدمه

پدیده اغلب در نتیجه فعالیت‌های انسانی نظیر برداشت بی‌رویه از منابع آب زیرزمینی، استخراج هیدروکربن‌ها و توسعه ناپایدار شهری رخ می‌دهد و در مناطق خشک و نیمه‌خشک مانند ایران، به‌ویژه در دشت‌های تهران، مشهد، اصفهان، کرمان و شیراز، شدت و گستره

فرونشست زمین به‌عنوان یکی از مهم‌ترین مخاطرات ژئومورفولوژیکی و زمین‌ساختی، تهدیدی جدی برای زیرساخت‌های شهری، اراضی کشاورزی و منابع آب در بسیاری از مناطق جهان به‌شمار می‌رود. این

چین، ارزیابی نرخ فرونشست در شهرهای بزرگ انجام و نرخ‌های بالایی گزارش شد [۵]. در ایران نیز بررسی‌های متعددی با بهره‌گیری از داده‌های InSAR انجام گرفته است. در یکی از این مطالعات، نرخ فرونشست تا ۳۰ سانتی‌متر در سال در دشت رفسنجان اندازه‌گیری و ارتباط آن با برداشت بی‌رویه آب زیرزمینی تأیید شد [۶]. در پژوهشی دیگر، با استفاده از داده‌های Sentinel-1 و نرم‌افزار SNAP، فرونشست در دشت تهران-شهری مدل‌سازی و الگوریتم‌های یادگیری ماشین برای بهبود دقت نتایج به کار گرفته شد [۷]. بررسی‌های انجام‌شده در تهران نیز نقشه‌های دقیق تغییر شکل زمین را ارائه کردند [۸]. افزون بر آن، الگوهای فرونشست در شهر شیراز با روش SBAS-InSAR تحلیل و مناطق بحرانی شناسایی شده‌اند [۹]. مطالعات دیگری نیز در خارج از ایران انجام شده است. نتایج پژوهشی در فلات تبت، تغییر شکل‌های سطحی این منطقه را با استفاده از داده‌های Sentinel-1 نشان داد [۱۰]. در بررسی دیگری، ترکیب داده‌های راداری، زمین‌شناسی و هیدرولوژیکی برای تحلیل فرونشست در دشت هشتگرد به کار رفت و همبستگی بالایی میان برداشت آب و جابجایی سطح زمین مشاهده شد [۱۱]. الگوریتم ISBAS برای شناسایی تغییر شکل زمین در میدان نفتی تنگیز در قزاقستان به کار گرفته شد [۱۲]. تحلیل‌های عددی انجام‌شده در دشت رفسنجان نیز روند فعلی و آینده فرونشست را با دقت قابل‌توجهی شبیه‌سازی کردند [۱۳].

تحقیقات جدیدتر از ترکیب روش‌های InSAR و یادگیری ماشین برای تهیه نقشه‌های حساسیت فرونشست در مناطق نیمه‌خشک ایران استفاده کرده‌اند [۱۴]. در مطالعات دیگر نیز اثرات کاهش آبخوان‌ها بر فرونشست ایران تحلیل شد [۱۵]، و ترکیب داده‌های InSAR و GNSS برای تحلیل تغییر شکل سطح در منطقه آناتولی نتایج دقیقی ارائه داد [۱۶]. بررسی‌های دیگری نیز در تهران با استفاده از تصاویر راداری و داده‌های Landsat انجام و ارتباط مستقیم افت سطح آب زیرزمینی با نرخ فرونشست تأیید شد [۱۷]. همچنین، تحلیل تعامل آبخوان و فرونشست در دشت تهران با بهره‌گیری از داده‌های Sentinel-1 و روش DiNSAR انجام شد [۱۸]. پایش تغییر شکل در شهرهای دلتای یانگ‌تسه نیز با روش SBAS-InSAR صورت گرفته است [۱۹]. در پژوهشی جامع، وضعیت فرونشست ایران با استفاده از داده‌های گرانش‌سنجی، GPS و InSAR تحلیل شد و نتایج حاکی از کاهش چشمگیر ذخایر آب زیرزمینی بود [۲۰]. همچنین مطالعات انجام‌شده در دشت اردبیل نشان دادند که برداشت بی‌رویه از آب‌های زیرزمینی و تغییرات اقلیمی از عوامل اصلی وقوع فرونشست هستند [۲۱]. بررسی‌های جدید در استان خراسان رضوی نیز مدل‌های یادگیری عمیق را برای پیش‌بینی فرونشست توسعه داده‌اند [۲۲]. در حوزه بین‌المللی، تحلیل فرونشست در معادن زغال‌سنگ پاکستان با روش‌های SBAS-InSAR و Stacking-InSAR انجام شد [۲۳] و در ویتنام نیز با بهره‌گیری از روش PSInSAR میزان تغییر شکل سطحی ارزیابی گردید [۲۴]. نتایج پژوهشی دیگر تأیید کرد که نرم‌افزار SNAP توانایی بالایی در پردازش سریع و دقیق داده‌های راداری دارد [۲۵]. بررسی‌های صورت‌گرفته در دشت قم نیز با استفاده از روش

بیشتری دارد. سازندهای رس‌دار، خاک‌های آبرفتی غیرمتراکم و عدم تعادل در تراز ورودی و خروجی آبخوان‌ها از دیگر عوامل تشدیدکننده فرونشست در این نواحی محسوب می‌شوند.

مطالعات پیشین نشان داده‌اند که فرونشست زمین می‌تواند پیامدهای جبران‌ناپذیری از جمله تخریب شبکه‌های انتقال آب و گاز، آسیب به ساختمان‌ها و جاده‌ها، کاهش بهره‌وری زمین‌های کشاورزی، و در نهایت تهدید توسعه پایدار مناطق شهری را به همراه داشته باشد. در برخی مناطق، میزان فرونشست سالانه به بیش از ۲۵ تا ۴۰ میلی‌متر رسیده که بیانگر یک بحران زیست‌محیطی در حال گسترش است.

با توجه به محدودیت دسترسی به داده‌های زمینی دقیق و گسترده، به‌ویژه در کشورهای در حال توسعه، استفاده از روش‌های نوین سنجش از دور، به‌ویژه تکنیک تداخل‌سنجی راداری با استفاده از داده‌های ماهواره‌ای (DiNSAR)، به‌عنوان ابزاری کارآمد، دقیق و مقرون‌به‌صرفه برای پایش تغییرات سطح زمین مورد توجه محققان قرار گرفته است. داده‌های ماهواره Sentinel-1 با قدرت تفکیک مکانی مناسب، تکرار زمانی بالا و دسترسی رایگان، یکی از منابع اصلی برای پایش پیوسته و گسترده فرونشست در سال‌های اخیر بوده‌اند. همچنین، ترکیب این داده‌ها با اطلاعات GNSS و سایر منابع مکانی می‌تواند به ارتقاء دقت و صحت تحلیل‌های مکانی-زمانی کمک شایانی نماید.

در این پژوهش، با بهره‌گیری از داده‌های راداری Sentinel-1 و به‌کارگیری تکنیک DiNSAR در محیط نرم‌افزار اسنپ، به تحلیل الگوهای مکانی و زمانی فرونشست در نواحی شرقی شهر شیراز پرداخته شده است. منطقه مورد مطالعه به دلیل شرایط زمین‌شناسی خاص، خاک‌های آبرفتی حساس، توسعه شهری بی‌رویه و افت شدید سطح آب‌های زیرزمینی، به یکی از کانون‌های اصلی فرونشست در جنوب کشور تبدیل شده است.

هدف اصلی این پژوهش، شناسایی مناطق پرخطر، تحلیل عوامل طبیعی و انسانی مؤثر بر بروز و تشدید فرونشست، و در نهایت ارائه راهکارهایی برای کاهش اثرات این پدیده و حمایت از برنامه‌های توسعه پایدار شهری است.

پیشینه تحقیق

مطالعات متعددی پدیده فرونشست زمین را با استفاده از داده‌های راداری و تکنیک‌های تداخل‌سنجی (InSAR) بررسی کرده‌اند. در یکی از پژوهش‌ها، مدل‌سازی فرونشست در مناطق ساحلی انجام شد و بر اهمیت تحلیل سری‌زمانی برای پیش‌بینی دقیق این پدیده تأکید گردید [۱]. همچنین در مطالعه‌ای جهانی، نقشه تهدید فرونشست در مقیاس وسیع تهیه و مناطق پرخطر شناسایی شد [۲]. بررسی دیگری نیز گستردگی جهانی فرونشست را با داده‌های راداری تحلیل و نقش عوامل انسانی مانند سدسازی را مشخص کرده است [۳]. تحلیل داده‌های راداری نشان داد که روش aperture مصنوعی در ارزیابی نرخ فرونشست از دقت بالایی برخوردار است [۴]. افزون بر این، در یک مطالعه ملی در

بهره گرفته شد. این داده‌ها در مد Interferometric Wide Swath (IW) و با قطبش ۷۷ جمع‌آوری شده‌اند و بازه زمانی ده‌ساله از ژانویه ۲۰۱۵ تا ژانویه ۲۰۲۵ را پوشش می‌دهند. در مجموع، تعداد ۲۴ تصویر با رزولوشن مکانی ۵ متر در راستای برد (range) و ۲۰ متر در راستای آزیموت (azimuth) مورد استفاده قرار گرفتند. این تصاویر با توجه به تناوب پوشش (۶ تا ۱۲ روزه)، توان تفکیک مکانی مطلوب و دسترسی رایگان، برای مطالعات تداخل‌سنجی راداری در مقیاس منطقه‌ای بسیار مناسب هستند. جهت حذف اثرات توپوگرافی از مدل رقومی ارتفاعی SRTM با قدرت تفکیک مکانی ۳۰ متر استفاده شد. این مدل به‌عنوان مرجع توپوگرافی در تمام مراحل پردازش داده‌های تداخل‌سنجی به‌کار گرفته شد.

تمامی مراحل پیش‌پردازش داده‌ها در محیط نرم‌افزار SNAP (نسخه ESA 9.0) انجام گرفت. در نخستین گام، تصحیح مداری با استفاده از فایل‌های Precise Orbit Determination (POD) با دقت حدود ۵ سانتی‌متر برای ارتقاء دقت هندسی تصاویر اعمال شد. سپس کالیبراسیون رادیومتریکی با اعمال ضرایب کالیبراسیون مطلق برای تبدیل مقادیر DN به σ^0 انجام گرفت. جهت کاهش نویز اسپیکل، از فیلتر Lee Sigma با پنجره 7×7 پیکسل و آستانه واریانس ۰.۵ بهره گرفته شد.

برای تولید اینترفروگرام‌ها، ۱۵ جفت تصویر بر اساس معیارهایی چون اختلاف زمانی کمتر از ۳۶۵ روز و خط مبنای عمودی کمتر از ۱۵۰ متر انتخاب شدند. هدف از این انتخاب، به حداقل رساندن خطاهای فازی و افزایش همبستگی زمانی و مکانی تصاویر بود. در ادامه، داده‌های آماده‌شده وارد مراحل تولید اینترفروگرام، بازگشایی فاز (Unwrapping) و تصحیح اتمسفری شدند که در بخش بعدی شرح داده خواهند شد.

مراحل پردازش DinSAR در محیط SNAP

در این پژوهش، جهت استخراج نرخ فرونشست زمین از داده‌های راداری Sentinel-1A، تکنیک تداخل‌سنجی راداری تفاضلی (DInSAR) به‌صورت جفتی (pair-wise) پیاده‌سازی شد. پردازش‌ها در نرم‌افزار SNAP (Sentinel Application Platform) با استفاده از ابزارهای مرتبط با ماژول S-1 Toolbox انجام شد. در گام نخست، تصاویر راداری مورد نظر در قالب فرمت SLC (Single Look Complex) وارد محیط SNAP شده و از میان آن‌ها، ۱۵ جفت تصویر با خط مبنای عمودی کمتر از ۱۵۰ متر و فاصله زمانی کمتر از ۳۶۵ روز به‌عنوان ترکیب‌های مستر-اسلیو انتخاب شدند. این انتخاب با هدف کاهش خطای ناشی از دکوریلیشن زمانی و فضایی صورت گرفت. پارامترهای دقیق پردازشی در جدول ۱ ارائه شده است. در شکل ۱ نیز روند کلی تحقیق نشان داده شده است که در ادامه جزئیات آن مطرح گردیده است.

مراحل کلیدی تولید اینترفروگرام

- هم‌ترازی دقیق تصاویر (Coregistration)

در اولین مرحله از فرآیند پردازش داده‌های DInSAR، هم‌ترازی دقیق تصاویر مستر و اسلیو انجام گرفت. هدف اصلی این مرحله، انطباق کامل

PSInSAR و داده‌های Sentinel-1 نرخ فرونشست سالانه تا بیش از ۷۰ میلی‌متر را گزارش کرده‌اند [۲۶]. در مطالعات جدید، از ترکیب داده‌های SBAS-InSAR و GNSS برای شناسایی نواحی گسلی و شکستگی‌های زیرسطحی در محدوده شهر هانگژو در چین استفاده شده است [۲۷]. این پژوهش‌ها نشان دادند که نقشه‌های حاصل از ترکیب داده‌های راداری و GNSS می‌توانند در برنامه‌ریزی توسعه شهری و مدیریت مخاطرات ژئوتکنیکی کاربرد فراوانی داشته باشند. همچنین در مطالعه‌ای نوآورانه، داده‌های DInSAR با مدل‌های یادگیری عمیق ترکیب شدند تا الگویی برای پیش‌بینی سریع و دقیق فرونشست شهری توسعه یابد [۲۸]. نتایج این تحقیق نشان داد که ترکیب ویژگی‌های فیزیکی زمین با داده‌های راداری می‌تواند دقت پیش‌بینی را تا بیش از ۹۰ درصد افزایش دهد.

اگرچه در سال‌های اخیر پژوهش‌های متعددی از تکنیک‌های پیشرفته InSAR مانند PS-InSAR و SBAS-InSAR برای تحلیل دقیق و بلندمدت فرونشست در ایران و سایر نقاط جهان استفاده کرده‌اند، اما هنوز چالش‌های مهمی در پایش سریع و به‌روز پدیده فرونشست با استفاده از تکنیک DInSAR باقی مانده است. بیشتر مطالعات پیشین بر تحلیل‌های سری‌زمانی متمرکز بوده‌اند که علی‌رغم دقت بالا، به داده‌های پرتعداد، زمان پردازش طولانی و نرم‌افزارهای پیشرفته‌تر نیاز دارند که در بسیاری از سازمان‌های اجرایی یا در محیط‌های پژوهشی با امکانات محدود، دسترس‌پذیر نیستند.

از سوی دیگر، اغلب تحقیقات قبلی بر روی مناطق خاصی از ایران مانند تهران، رفسنجان، کرمان و شیراز متمرکز بوده‌اند و مناطقی که ترکیبی از ریسک بالای فرونشست و کمبود داده‌های زمینی دارند، کمتر مورد بررسی قرار گرفته‌اند. همچنین، به‌رغم اثبات کارایی نرم‌افزار SNAP برای پردازش داده‌های Sentinel-1، تعداد کمی از مطالعات به‌طور سیستماتیک کل مراحل پردازش DInSAR از هم‌ترازی تا بازگشایی فاز و تصحیح اتمسفری را در یک محیط این‌سورس استانداردسازی کرده‌اند و این فرآیندها را به‌صورت مستند و قابل تکرار گزارش داده‌اند.

در نهایت، بررسی بازه زمانی بلندمدت (۲۰۱۵-۲۰۲۵) با دقت مکانی بالا (۲۰×۵ متر) با استفاده از Sentinel-1 و رویکرد تداخل‌سنجی تفاضلی در بسیاری از مناطق ایران هنوز انجام نشده یا به‌صورت کامل مستند نشده است. به‌ویژه، مطالعات اندکی به بررسی پویایی سالانه تغییر شکل زمین در بازه‌های بلندمدت با تمرکز بر مناطق بدون داده‌های زمینی پرداخته‌اند. از این‌رو، این تحقیق می‌کوشد تا با تمرکز بر تحلیل DInSAR در یک بازه زمانی ده‌ساله، و پیاده‌سازی دقیق مراحل پردازش در نرم‌افزار SNAP، بخشی از این خلأ علمی و کاربردی را پوشش دهد.

روش تحقیق

داده‌های مورد استفاده و پیش‌پردازش

در این پژوهش، به‌منظور پایش و تحلیل مکانی-زمانی فرونشست زمین در نواحی شرقی شهر شیراز، از داده‌های راداری ماهواره Sentinel-1A

این الگوریتم با استفاده از نقاط کنترل زمینی و تطبیق ویژگی‌های مکانی تصویر، دقت هم‌ترازی را به سطحی نزدیک به دقت پیکسلی افزایش داد. نتیجه هم‌ترازی با کیفیت بالا، امکان تولید اینترفروگرام‌های معتبر و با حداقل خطا را فراهم ساخت که پایه و اساس سایر مراحل تحلیل محسوب می‌شود.

- تولید اینترفروگرام (Interferogram Formation)

پس از انجام هم‌ترازی، مرحله بعدی تولید اینترفروگرام‌ها بود که از طریق عملیات ضرب کانژوگه بین تصاویر مستر و اسلیو انجام شد. این عملیات فاز نسبی برگشتی بین دو برداشت راداری از یک ناحیه مشترک را استخراج می‌کند. فاز به دست آمده شامل اطلاعاتی از تغییرات ارتفاعی، جابجایی سطح و اثرات اتمسفری است. در این پژوهش، از نوع اینترفروگرام تفاضلی (Differential Interferogram) استفاده شد که با حذف مؤلفه توپوگرافی تنها جابجایی‌های سطح زمین را نشان می‌دهد. تولید اینترفروگرام در نرم‌افزار SNAP و با ماژول اختصاصی آن صورت گرفت و داده‌ها برای پردازش‌های بعدی آماده شدند. کیفیت و دقت این مرحله تأثیر مستقیمی بر صحت برآورد فرونشست دارد.

- حذف فاز توپوگرافی (Topographic Phase Removal)

برای تحلیل دقیق تغییرات سطح زمین، لازم است که تأثیر توپوگرافی از فاز اینترفروگرام جدا شود. این کار با استفاده از مدل ارتفاعی دیجیتال SRTM 1Sec بر رزولوشن ۳۰ متر انجام گرفت. ابتدا مدل ارتفاعی با تبدیل به سیستم مختصات تصویر راداری، نقشه فاز توپوگرافی را تولید کرد که میزان تأثیرات ارتفاع بر فاز را نشان می‌داد. سپس این نقشه از کل اینترفروگرام تفریق شد تا تنها فاز مربوط به جابجایی واقعی سطح زمین باقی بماند. این فرآیند تحت عنوان «Topo Phase Removal» در نرم‌افزار SNAP اجرا شد و به طور قابل توجهی موجب افزایش دقت تفسیری فاز و کاهش خطاهای ناشی از ناهمواری‌های زمین گردید.

- تخمین و ارزیابی همبستگی (Coherence Estimation)

کیفیت فاز استخراج شده در اینترفروگرام با محاسبه نگاشت همبستگی (Coherence Map) مورد سنجش قرار گرفت. همبستگی شاخصی از میزان تطابق آماری بین تصاویر مستر و اسلیو در هر پیکسل است و نشان‌دهنده قابلیت اعتماد به داده‌های فاز آن ناحیه است. در این تحقیق، آستانه همبستگی برابر ۰.۳ تعیین شد. بدین معنی که پیکسل‌هایی با مقدار همبستگی کمتر از این آستانه حذف یا ماسک شدند. این گام از اهمیت بالایی برخوردار بود، زیرا پیکسل‌های با همبستگی پایین معمولاً به دلیل تغییرات سریع پوشش زمین، نویز یا عوامل دیگر، داده‌های فازی نامعتبر تولید می‌کنند. حذف این نقاط باعث افزایش دقت و قابلیت اطمینان نتایج نهایی شد.

- فیلتر کردن نویز فاز (Phase Filtering)

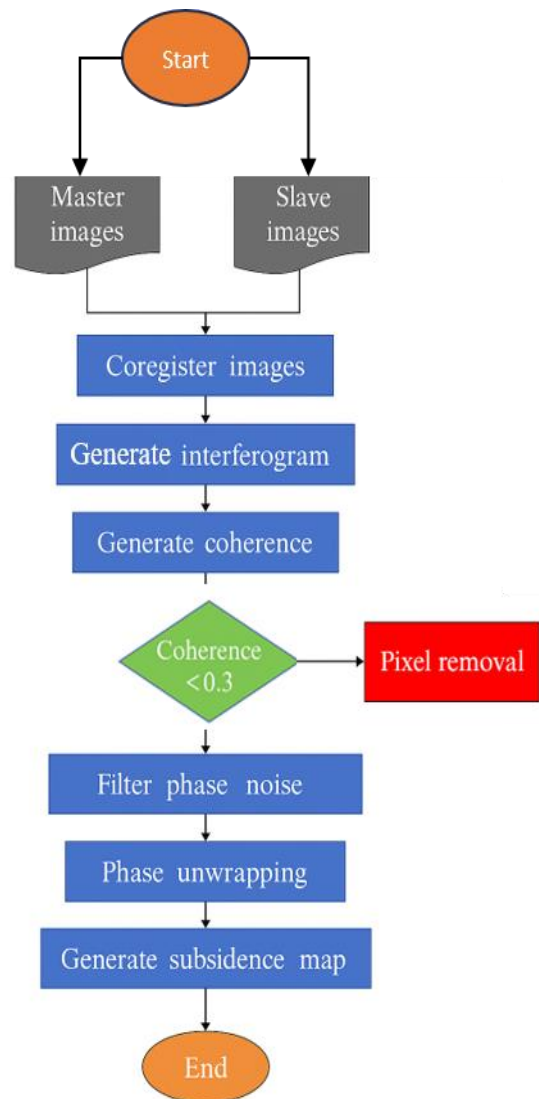
نقشه فاز حاصل از اینترفروگرام معمولاً حاوی نویزهای پراکنده است که می‌توانند منجر به اشتباه در برآورد تغییرات سطح زمین شوند. برای

و دقیق پیکسل‌های دو تصویر راداری است به گونه‌ای که هر پیکسل در موقعیت مکانی مشابه روی سطح زمین در هر دو تصویر قرار داشته باشد. این امر ضروری است تا تحلیل تغییرات زمانی در موقعیت‌های یکسان زمین قابل انجام شود. برای این منظور، از ماژول S-1 Back Geocoding در نرم‌افزار SNAP به منظور هم‌راستاسازی دقیق تصاویر استفاده شد و الگوریتم Enhanced Spectral Diversity (ESD) به منظور بهبود دقت ثبت و کاهش خطای جابه‌جایی فضایی میان سکانس‌های راداری به کار گرفته شد.

جدول ۱: پارامترهای دقیق پردازش DInSAR

Table 1: Detailed Parameters of DInSAR Processing

Step	Settings
Noise Filtering	Lee Filter, 7x7
DEM	SRTM 1Sec (30 m)
Unwrapping Method	SNAPHU – Minimum Cost Flow
Coherence Threshold	0.3
Interferogram Type	Differential, Master-Slave Pairs



شکل ۱: روند کلی تحقیق

Fig. 1: Overall Research Workflow

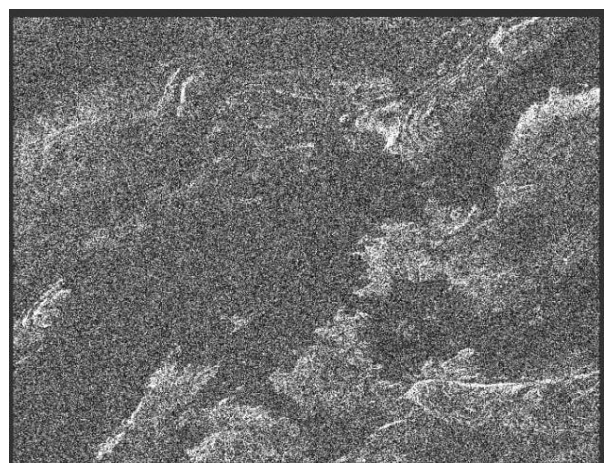
برخورد دارند؛ بنابراین، داده‌های آن‌ها برای تولید اینترفروگرام‌های با کیفیت و تحلیل تغییر شکل زمین از جمله برآورد نرخ فرونشست، قابل اطمینان‌تر محسوب می‌شوند. در مقابل، نواحی با شدت کم و متغیر اغلب دچار دکوریلیشن شدید و نویز بالا می‌شوند، که این موضوع در نقشه کوهرنسی نیز به‌وضوح قابل مشاهده و تأیید است.



شکل ۲: نقشه شدت بازتاب امواج راداری
Fig. 2: Radar backscatter intensity map

نقشه کوهرنسی (Coherence Map)

در شکل ۳، نقشه کوهرنسی بین دو تصویر راداری مشاهده می‌شود. کوهرنسی شاخصی است برای سنجش میزان همبستگی آماری بین دو تصویر در هر پیکسل و بیانگر کیفیت داده‌های اینترفروگرام است. دامنه مقادیر کوهرنسی بین ۰ (فاقد همبستگی) تا ۱ (همبستگی کامل) است. در این نقشه، مناطق روشن‌تر دارای کوهرنسی بالا و مناطق تیره دارای کوهرنسی پایین هستند.



شکل ۳: نقشه کوهرنسی
Fig. 3: Coherence map

بر اساس بررسی نقشه کوهرنسی:

- نواحی مرتفع و کوهستانی یا مناطق با پوشش زمین پایدار، معمولاً دارای کوهرنسی بالا هستند که این امر تحلیل تغییر شکل را در این مناطق امکان‌پذیر می‌کند.

کاهش این نویزها، در دو مرحله فیلترگذاری انجام شد. ابتدا، فیلتر فضایی Lee با اندازه پنجره 7×7 پیکسل به کار رفت. این فیلتر با میانگین‌گیری وزن‌دار و حفظ لبه‌ها، نویزهای تصادفی را کاهش داد و ساختارهای فضایی مهم را حفظ نمود. سپس فیلتر فرکانسی Goldstein با پارامتر تنظیم $\alpha=0.5$ اعمال شد که به ویژه در حذف نویزهای با فرکانس بالا در نواحی همبستگی بالا مؤثر است. ترکیب این دو فیلتر موجب بهبود کیفیت کلی نقشه فاز و افزایش دقت فرآیند بازگشایی فاز شد.

– بازگشایی فاز (Phase Unwrapping)

فاز اینترفروگرام‌ها به صورت محدود و حلقوی بین $-\pi$ تا $+\pi$ اندازه‌گیری می‌شود که برای تعیین تغییرات واقعی جابجایی باید به مقادیر پیوسته تبدیل شود. این کار با فرآیند بازگشایی فاز انجام می‌گیرد. در این تحقیق، الگوریتم Minimum Cost Flow (MCF) در نرم‌افزار SNAPU برای بازگشایی فاز استفاده شد. این الگوریتم یکی از پیشرفته‌ترین و دقیق‌ترین روش‌ها برای بازیابی پیوستگی فاز است که به ویژه در محیط‌های شهری و کوهستانی پیچیده عملکرد خوبی دارد. داده‌ها ابتدا برای SNAPU آماده و پس از اجرای الگوریتم، نتایج به محیط SNAP بازگردانده شدند. دقت این مرحله مستقیماً بر صحت برآورد نرخ فرونشست زمین تأثیرگذار است.

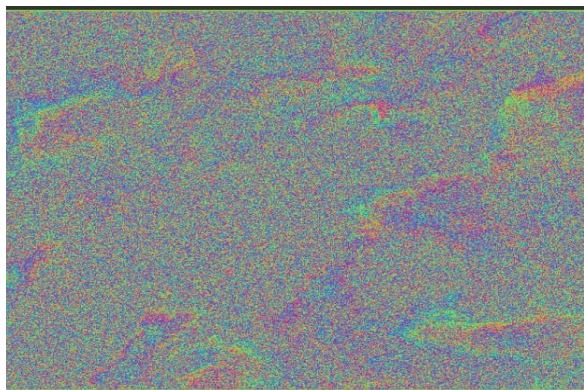
– تصحیح خطاهای اتمسفری (Atmospheric Correction)

خطاهای ناشی از تغییرات فضایی و زمانی شرایط جوی، به ویژه بخار آب، یکی از منابع مهم خطا در داده‌های DinSAR هستند. برای کاهش این خطاها، در ابتدا تصاویر انتخاب شدند که شرایط جوی مشابهی داشته و رطوبت نسبی آنها کمتر از ۶۰ درصد بود. سپس، فیلتر مکانی Goldstein بار دیگر به منظور حذف نوسانات فضایی پرنوسان و مؤلفه‌های اتمسفری به کار گرفته شد. علاوه بر این، ماسک توپوگرافی برای حذف نواحی مرتفع و حساس به تغییرات اتمسفری اعمال گردید. در نهایت، تحلیل واریوگرام برای شناسایی ساختارهای فضایی پایداری که ناشی از خطاهای سیستماتیک بود، انجام و اصلاحات لازم اعمال شدند. این مراحل موجب بهبود کیفیت داده‌ها و کاهش خطاهای سیستماتیک شد.

یافته‌ها و تحلیل نتایج

تولید نقشه شدت (Intensity Map)

در شکل ۲، نقشه شدت تصویر راداری نمایش داده شده است که میزان بازتاب امواج راداری از سطح زمین را نشان می‌دهد. در این نقشه، نواحی با روشنایی بیشتر بیانگر بازتابنده‌های قوی‌تر نظیر سازه‌های مصنوعی، صخره‌های سخت و مناطق شهری هستند، در حالی که نواحی تیره‌تر به بازتاب ضعیف‌تر مرتبط بوده و معمولاً شامل سطوح نرم، اراضی کشاورزی و پوشش‌های گیاهی می‌باشند. نقشه شدت از آن جهت حائز اهمیت است که نواحی با شدت بازتاب بالاتر معمولاً از همبستگی زمانی بیشتری



شکل ۴: اینترفروگرام تولید شده
Fig. 4: Generated interferogram

تحلیل آماری فرونشست

تحلیل کمی بر اساس نمودار displacement_VV با بررسی دقیق این نمودار: ویژگی مقدار تقریبی تحلیل بازه زمانی ۲۰۱۵ تا ۲۰۲۵ (۱۰ سال) نشان‌دهنده تغییر بلندمدت است مقدار نشست کل حدود ۱.۱۵ متر نشست شدید در یک دهه روند نشست افزایشی یکنواخت با نوسان‌های موضعی یعنی فرونشست مداوم با نرخ نسبتاً پایدار شیب بیشتر از سال ۲۰۱۹ به بعد دیده می‌شود احتمال افزایش برداشت آب یا خشک‌سالی بیشتر. نرخ فرونشست سالانه (میانگین): اگر جابه‌جایی ۱.۱۵ متر در مدت ۱۰ سال اتفاق افتاده باشد: نرخ میانگین سالانه = ۱.۱۵ متر در ۱۰ سال اتفاق افتاده است که نشانگر ۱۱.۵ سانتی‌متر در سال است این مقدار بسیار بالا است. نرخ بالاتر از ۴ سانتی‌متر در سال معمولاً بحرانی محسوب می‌شود

نتایج پردازش ۲۴ تصویر Sentinel-1 نشان‌دهنده توزیع غیریکنواخت فرونشست در نواحی شرقی شیراز است. تحلیل آماری توصیفی نشان می‌دهد (جدول ۲، شکل ۵):

○ مناطق دارای کوه‌ررسی پایین، مانند بخش‌های دارای پوشش گیاهی متراکم، مناطق کشاورزی، بافت‌های شهری متراکم یا مناطقی که تغییرات سریع سطح زمین رخ داده است، قابلیت اعتماد به داده‌های فاز را کاهش می‌دهند.

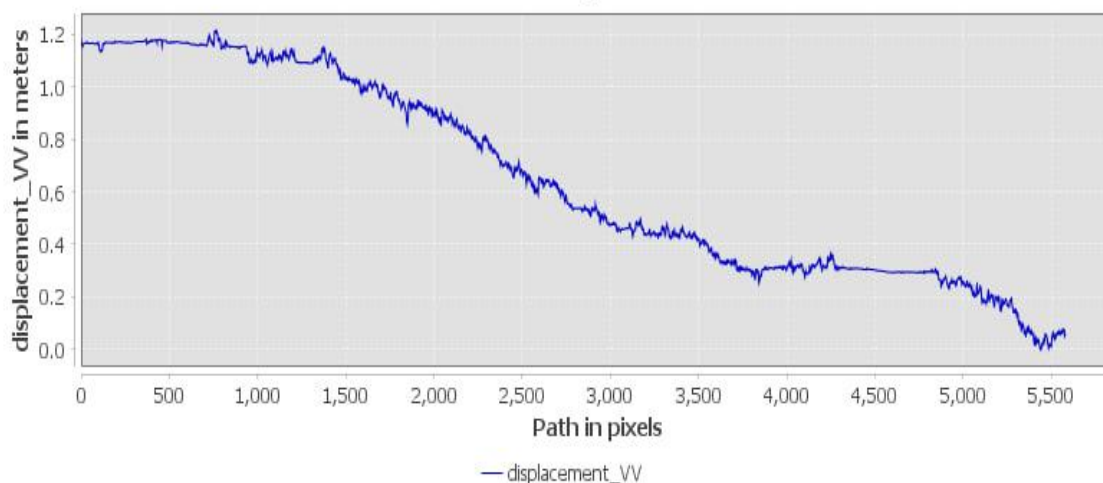
در این تحقیق، آستانه کوه‌ررسی ۰.۳ در نظر گرفته شد. بنابراین، پیکسل‌هایی با مقدار کمتر از این عدد در مراحل بعدی تحلیل حذف شدند تا دقت نتایج فرونشست افزایش یابد.

اینترفروگرام (Interferogram)

باتوجه به شکل ۴، نقشه فاز اینترفروگرام حاصل از دو تصویر راداری Sentinel-1 مربوط به تاریخ‌های ۱۱ ژوئن ۲۰۱۵ و ۶ فوریه ۲۰۲۵ نمایش داده شده است. این نقشه حاصل تفاضل فاز دو تصویر هم‌پوشان بوده و حاوی اطلاعات دقیق از تغییرات نسبی فاز در سطح زمین طی بازه زمانی مذکور است. الگوهای رنگین‌کمانی مشاهده‌شده در قالب نوارهای متوالی (interferometric fringes) نشانگر تغییرات فاز هستند که می‌توانند ناشی از جابجایی سطح زمین (مانند فرونشست)، پستی‌بلندی‌های زمین (توپوگرافی)، یا نویزهای اتمسفری و دکوریلیشن باشند.

تحلیل کیفی این نقشه امکان شناسایی نواحی با الگوی منظم نوارهای فاز را فراهم می‌سازد که احتمالاً بیانگر تغییر شکل واقعی سطح زمین هستند. در مقابل، مناطق دارای الگوهای نامنظم، پراکنده یا نویز بالا نشان‌دهنده دکوریلیشن شدید بوده و قابلیت اعتماد تحلیلی پایینی دارند. بر اساس وضعیت اینترفروگرام، بخشی از منطقه مورد مطالعه دارای همبستگی مکانی مناسب و فاز قابل استفاده است، اما نواحی با نویز بالا نیازمند فیلترگذاری، حذف یا اعمال ماسک در مراحل بعدی پردازش داده‌ها می‌باشند.

Profile Plot for displacement_VV

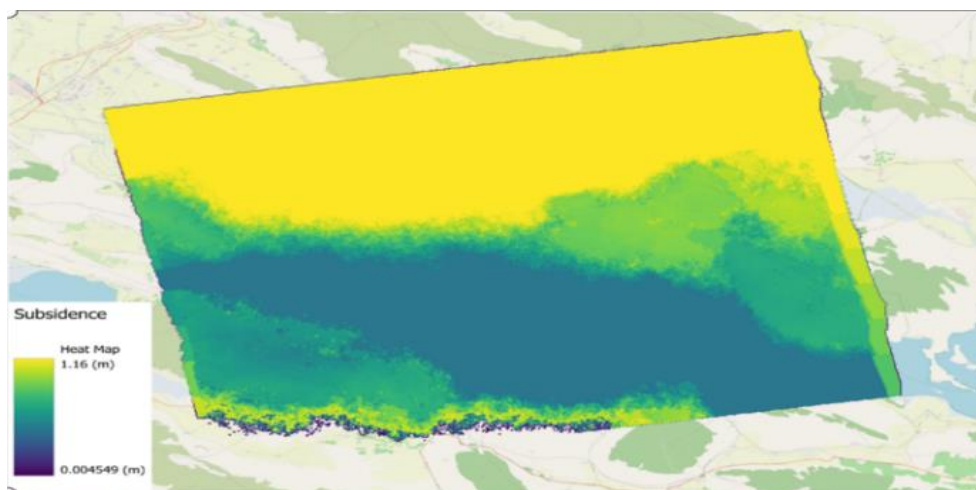


شکل ۵: نرخ فرونشست
Fig. 5: subsidence rate

جدول ۲: آمار توصیفی نرخ فرونشست (mm/year)

Table 2: Descriptive Statistics of Subsidence Rate (mm/year)

Statistical Index	Value
Mean	18.4 ± 8.2
Median	16.7
Mode	12.3
Range	2.1 – 47.8
Skewness	1.23
Kurtosis	2.87
Coefficient of Variation	44.6%



شکل ۶: نقشه نرخ فرونشست در نواحی شرقی شیراز

Fig. 6: Subsidence Rate Map in the Eastern Regions of Shiraz

تحلیل مکانی نتایج فرونشست در نواحی شرقی شهر شیراز نشان می‌دهد که این پدیده نه تنها به صورت پراکنده و تصادفی رخ نداده، بلکه دارای یک الگوی مشخص و خوشه‌ای است که بیانگر وجود مناطق بحرانی و

کانون‌های تمرکز فرونشست است. نتایج تحلیل خوشه‌ای با استفاده از شاخص موران (Moran's I) که یکی از شناخته‌شده‌ترین روش‌های آماری برای بررسی خودهمبستگی فضایی داده‌هاست، گویای این مسئله است. مقدار به‌دست‌آمده برای شاخص موران معادل 0.742 با سطح معناداری کمتر از 0.001 است که این مقدار نشان‌دهنده وجود خودهمبستگی فضایی مثبت قوی در نرخ فرونشست می‌باشد. به بیان ساده‌تر، مناطقی که دارای نرخ بالای فرونشست هستند، تمایل دارند در کنار یکدیگر قرار بگیرند و به شکل خوشه‌ای یا کانونی در سطح منطقه گسترش یابند.

مطابق با نتایج این تحلیل، سه کانون اصلی فرونشست در محدوده شرقی شهر شیراز شناسایی شد که هرکدام دارای ویژگی‌های خاص خود هستند:

– کانون شمالی: این منطقه با مساحتی حدود ۴۵ کیلومتر مربع و نرخ متوسط فرونشست 31.2 ± 6.8 میلی‌متر در سال، شدیدترین نرخ فرونشست در کل محدوده مورد مطالعه را تجربه می‌کند. بررسی‌های میدانی و داده‌های جانبی نشان می‌دهد که در این ناحیه، تمرکز بالایی از چاه‌های بهره‌برداری آب زیرزمینی، خاک‌های رسی آبرفتی و

ساخت‌وسازهای شهری وجود دارد که در کنار کاهش شدید سطح آب‌های زیرزمینی، منجر به شدت گرفتن فرونشست شده است.

– کانون مرکزی: این کانون با وسعتی معادل ۳۸ کیلومتر مربع و نرخ متوسط فرونشست 28.7 ± 5.4 میلی‌متر در سال، در محدوده مرکزی شهر و اطراف آن قرار دارد. با توجه به تراکم بالای ساختمان‌های مسکونی و تجاری، ضعف خاک‌های زیرسطحی و توسعه سریع شهری بدون درنظر گرفتن مطالعات ژئوتکنیکی، این منطقه به یکی از کانون‌های فرونشست تبدیل شده است. وجود زیرساخت‌های حیاتی مانند خطوط انتقال گاز، آب و مخابرات در این ناحیه، خطرات ناشی از فرونشست را دوچندان می‌کند.

– کانون جنوبی: در جنوب محدوده مورد مطالعه، منطقه‌ای به وسعت ۲۹ کیلومتر مربع با نرخ متوسط فرونشست 25.1 ± 7.2 میلی‌متر در سال شناسایی شد. این ناحیه عمدتاً شامل اراضی کشاورزی و حاشیه‌های توسعه شهری است که برداشت بی‌رویه آب برای مصارف کشاورزی در کنار افت سطح ایستابی و ویژگی‌های زمین‌شناسی منطقه، از مهم‌ترین دلایل وقوع فرونشست در این بخش محسوب می‌شود.

نقشه تغییر شکل زمین در نواحی شرقی شیراز (شکل ۶) این کانون‌های فرونشست را به‌خوبی نمایش می‌دهد. این نقشه نشان می‌دهد که الگوی فرونشست در منطقه کاملاً همگن نیست و مناطق دارای نرخ بالا به‌صورت خوشه‌ای و متمرکز در نقاط خاصی توزیع شده‌اند، درحالی‌که

کانون شمالی: این منطقه با مساحتی حدود ۴۵ کیلومتر مربع و نرخ متوسط فرونشست 31.2 ± 6.8 میلی‌متر در سال، شدیدترین نرخ فرونشست در کل محدوده مورد مطالعه را تجربه می‌کند. بررسی‌های میدانی و داده‌های جانبی نشان می‌دهد که در این ناحیه، تمرکز بالایی از چاه‌های بهره‌برداری آب زیرزمینی، خاک‌های رسی آبرفتی و

جدول ۳: ضرایب رگرسیون عوامل مؤثر بر فرونشست

Table 3: Regression Coefficients of Factors Affecting Land Subsidence

Variable	β Coefficient	Standard Error	R ²	p-value	t-value
Groundwater Extraction	0.78	0.12	6.45	<0.001	0.61
Soil Type (Clay)	0.34	0.08	4.23	<0.01	0.18
Building Density	0.28	0.09	3.11	<0.05	0.12
Slope	-0.19	0.06	-3.17	<0.05	0.08

- نوع خاک (رس): ضریب β برابر با ۰.۳۴ نشان‌دهنده تأثیر مثبت نوع خاک بر فرونشست است. خاک‌های رسی به دلیل خاصیت فشردگی بالا، در برابر برداشت آب زیرزمینی حساس‌تر هستند.

- تراکم ساختمانی: با ضریب β برابر با ۰.۲۸، این متغیر نشان‌دهنده تأثیر مثبت تراکم ساختمانی بر فرونشست است. افزایش ساخت و ساز در نواحی شهری می‌تواند به فرونشست کمک کند.

- شیب زمین: ضریب β منفی (۰.۱۹) نشان‌دهنده تأثیر منفی شیب زمین بر فرونشست است. به این معنی که در نواحی با شیب بیشتر، احتمال فرونشست کمتر است.

نتیجه‌گیری و پیشنهادات

نتایج این پژوهش به روشنی نشان می‌دهد که نواحی شرقی شهر شیراز با نرخ‌های بالای فرونشست زمین مواجه هستند؛ به‌ویژه در مناطق شهری متراکم، اراضی کشاورزی و نواحی با خاک‌های رسی آبرفتی، شدت فرونشست قابل توجه‌تر است. نرخ اندازه‌گیری شده فرونشست در این مناطق بین ۲۵ تا ۴۵ میلی‌متر در سال متغیر بوده که این منطقه را در زمره پهنه‌های بحرانی کشور قرار می‌دهد.

سایر نواحی دارای نرخ فرونشست پایین‌تر و پراکندگی محدودتری هستند.

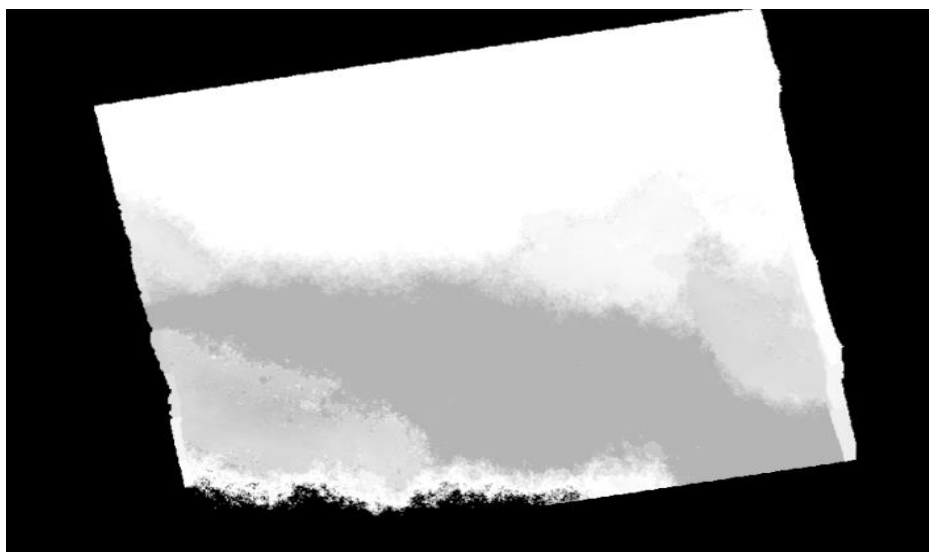
علاوه بر سه کانون اصلی، تحلیل فضایی نشان می‌دهد که در اطراف این کانون‌ها نوارهای انتقالی مشاهده می‌شود که دارای نرخ فرونشست متوسط بین ۱۵ تا ۲۵ میلی‌متر در سال هستند. این مناطق به‌عنوان مناطق مستعد توسعه پدیده فرونشست در آینده شناسایی شده‌اند و لازم است در طرح‌های توسعه شهری و مدیریت منابع آب، توجه ویژه‌ای به آن‌ها شود.

در مجموع، تحلیل مکانی فرونشست در این مطالعه علاوه بر شناسایی دقیق مناطق بحرانی، نشان می‌دهد که این پدیده ارتباط تنگاتنگی با الگوی فضایی بهره‌برداری از منابع آب زیرزمینی، نوع خاک و توسعه شهری دارد. وجود الگوی خوشه‌ای قوی نیز بیانگر آن است که در صورت عدم مداخله و اعمال مدیریت صحیح، احتمال گسترش این کانون‌ها و افزایش نرخ فرونشست در آینده بسیار زیاد است. لذا نتایج این بخش می‌تواند مبنای علمی و کاربردی مناسبی برای برنامه‌ریزی‌های مدیریتی و کاهش مخاطرات ناشی از فرونشست در شرق شهر شیراز باشد.

تحلیل علل فرونشست

تحلیل رگرسیون چندمتغیره نشان داد که عوامل زیر بیشترین تأثیر را بر نرخ فرونشست دارند:

- برداشت آب زیرزمینی: با ضریب β برابر با ۰.۷۸، این متغیر نشان‌دهنده تأثیر قوی برداشت آب زیرزمینی بر فرونشست است. این رابطه معنادار ($p < 0.001$) نشان می‌دهد که افزایش برداشت آب زیرزمینی به‌طور مستقیم با افزایش نرخ فرونشست مرتبط است.



شکل ۷: نقشه تغییر شکل سطح زمین در نواحی شرقی شیراز

Fig. 7: Ground Deformation Map in the Eastern Regions of Shiraz

فعلی، احتمال بروز خسارات گسترده به زیرساخت‌ها، محیط‌زیست و منابع حیاتی در شرق شیراز وجود دارد که نیازمند اقدامات پیشگیرانه، فوری و مبتنی بر شواهد علمی است.

مشارکت نویسندگان

در این مقاله، نویسندگان به نسبت برابر مشارکت داشته‌اند.

تعارض منافع

«هیچگونه تعارض منافع توسط نویسندگان بیان نشده است.»

منابع و مآخذ

- [1] Shirzaei M, Bürgmann R, Fielding EJ. Measuring, modelling and projecting coastal land subsidence. *Nat Rev Earth Environ*. 2021;2(1):40–58. doi:10.1038/s43017-020-00115-x.
- [2] Herrera-García G, et al. Mapping the global threat of land subsidence. *Science*. 2021;371(6524):34–36. doi:10.1126/science.abb8549.
- [3] Davydzenka T, Tahmasebi P, Shokri N. Unveiling the global extent of land subsidence: The sinking crisis. *Geophys Res Lett*. 2024;51(4):e2023GL104497. doi:10.1029/2023GL104497.
- [4] Bokhari R, et al. Land subsidence analysis using synthetic aperture radar data. *Heliyon*. 2023;9(3): e14690. doi:10.1016/j.heliyon.2023.e14690.
- [5] Ao Z, et al. A national-scale assessment of land subsidence in China's major cities. *Science*. 2024;384(6693):301–306. doi:10.1126/science.adl4366.
- [6] Motagh M, et al. Quantifying groundwater exploitation induced subsidence in the Rafsanjan plain, southeastern Iran, using InSAR time-series and in situ measurements. *Eng Geol*. 2017;218:134–151. doi:10.1016/j.enggeo.2017.01.011.
- [7] Azarakhsh Z, Azadbakht M, Matkan A. Estimation, modeling, and prediction of land subsidence using Sentinel-1 time series in Tehran-Shahriar plain: A machine learning-based investigation. *Remote Sens Appl Soc Environ*. 2022;25:100691. doi:10.1016/j.rsase.2021.100691.
- [8] Moradi A, et al. Assessments of land subsidence in Tehran metropolitan, Iran, using Sentinel-1A InSAR. *Environ Earth Sci*. 2023;82(23):569. doi:10.1038/s41598-022-25659-4.
- [9] Karami E, et al. Monitoring of land surface displacement based on SBAS-InSAR time-series and GIS techniques: A case study over the Shiraz Metropolis, Iran. *ISPRS Ann Photogramm Remote Sens Spatial Inf Sci*. 2023;10:371–378. doi:10.1007/s10040-023-02657-y.
- [10] Ou Q, et al. Large-scale interseismic strain mapping of the NE Tibetan Plateau from Sentinel-1 interferometry. *J Geophys Res Solid Earth*. 2022;127(6):e2022JB024176. doi:10.1007/s12665-023-11225-2.

مطابقت کامل نتایج با مطالعات پیشین از جمله تحقیقات Karami et al. (۲۰۲۳) و Gharechaei et al. (۲۰۲۳)، نقش بارز برداشت بی‌رویه آب زیرزمینی و ویژگی‌های ژئوتکنیکی خاک‌های فشرده‌پذیر را در تشدید این پدیده تأیید می‌کند. نتایج تحلیل رگرسیون چندمتغیره نشان داد که برداشت آب زیرزمینی با ضریب β برابر با ۰.۷۸ قوی‌ترین متغیر تأثیرگذار بر نرخ فرونشست است. سایر عوامل نظیر نوع خاک، تراکم ساختمانی و شیب زمین نیز اثر معناداری دارند. همچنین آزمون Moran's I نشان‌دهنده یک الگوی خوشه‌ای و متمرکز از فرونشست در سطح منطقه بوده که ضرورت نظارت هدفمند و منطقه‌محور را برجسته می‌سازد.

در این تحقیق، از تکنیک DInSAR مبتنی بر داده‌های Sentinel-1 برای پایش تغییر شکل زمین استفاده شد. این روش علیرغم دقت کمتر نسبت به تکنیک‌های پیشرفته‌تری مانند PSInSAR یا SBAS-InSAR، به دلیل سادگی، سرعت پردازش و دسترسی رایگان به داده‌ها، گزینه‌ای مؤثر برای ارزیابی سریع مناطق مستعد فرونشست به‌شمار می‌آید. با توجه به روند صعودی فرونشست و شناسایی نواحی پرخطر، اتخاذ اقدامات مدیریتی فوری و سیاست‌گذاری بلندمدت ضروری است. در این راستا، پیشنهاد‌های زیر ارائه می‌شود:

پیشنهاد‌های اجرایی:

- محدودسازی برداشت منابع آب زیرزمینی در مناطق بحرانی با اعمال ضوابط قانونی و نظارتی؛
 - راه‌اندازی سامانه‌های پایش مستمر بر مبنای داده‌های راداری و ماهواره‌ای؛
 - بازنگری در طرح‌های توسعه شهری و کاربری اراضی در راستای کاهش آسیب‌پذیری؛
 - بهسازی ژئوتکنیکی خاک در نواحی حساس با استفاده از تکنیک‌های مقاوم‌سازی زیرساخت.
- پیشنهاد‌های پژوهشی:
- توسعه مدل‌های پیش‌بینی فرونشست با استفاده از یادگیری ماشین و ترکیب داده‌های InSAR و هیدروژئولوژیکی؛
 - ادغام داده‌های GNSS و InSAR برای افزایش دقت پایش‌های زمانی و مکانی؛
 - بررسی تأثیر تغییرات کاربری اراضی با بهره‌گیری از تصاویر Landsat و Sentinel-2؛
 - اجرای مطالعات طولانی‌مدت با تکنیک‌های SBAS-InSAR و PSInSAR برای تحلیل روندهای پایدار؛
 - ارزیابی اثرات فرونشست بر زیرساخت‌های حیاتی برای برنامه‌ریزی مقاوم‌سازی شهری.

در مجموع، نتایج این پژوهش با تأکید بر نقش پررنگ فعالیت‌های انسانی در تسریع پدیده فرونشست، بر لزوم بازنگری در مدیریت منابع، توسعه پایدار و راهکارهای پایش مستمر زمین تأکید دارد. در صورت تداوم روند

[24] Nguyen TT, Tran HT. Analyzing of land subsidence by Sentinel-1 time-series images using PSInSAR method: A case study of Thai Nguyen, Vietnam. *Remote Sens Appl Soc Environ*. 2023;32:100987.

[25] Sadeghi M, Rahimi A, Hosseini M. High-resolution PSInSAR mapping of land subsidence in the Qom Plain and integration with groundwater data. *J Remote Sens Hydrol*. 2025;12(1):45–62.

[26] Zhang Y, Liu X, Wang J. 3D fault zone detection via SBAS-InSAR and GNSS in the Hangzhou urban and rural area. *Remote Sens Environ*. 2024;297:113873.

[27] He S, Li K, Chen Q. Deep learning-enhanced hybrid DInSAR for rapid urban subsidence prediction. *ISPRS J Photogramm Remote Sens*. 2025;198:100–113.

[28] Zhang L, Lai Z, Syvitski J. Variation of material fluxes in a large heterogenic subtropical river: A combination of climate change and human damming influences. *J Hydrol Reg Stud*. 2023;50:101560. doi:10.1016/j.ejrh.2023.101560.

[11] Khoshlahjeh Azar M, Shami S, Nilfouroushan F. Integrated analysis of Hashtgerd plain deformation using Sentinel-1 SAR, geological and hydrological data. *Sci Rep*. 2022;12:21522. doi:10.5194/isprs-annals-X-4-W1-2022-371-2023.

[12] Grebby S, et al. Delineating ground deformation over the Tengiz oil field, Kazakhstan, using the Intermittent SBAS (ISBAS) DInSAR algorithm. *Int J Appl Earth Obs Geoinf*. 2019;81:37–46.

[13] Bockstiegel M, et al. Simulation of present and future land subsidence in the Rafsanjan plain, Iran, due to groundwater overexploitation using numerical modeling and InSAR data analysis. *Hydrogeol J*. 2024;32(1):289–305.

[14] Gharechae H, et al. Land subsidence susceptibility mapping using Interferometric Synthetic Aperture Radar (InSAR) and machine learning models in a semiarid region of Iran. *Land*. 2023;12(4):843.

[15] Haghshenas Haghighi M, Motagh M. Uncovering the impacts of depleting aquifers: A remote sensing analysis of land subsidence in Iran. *Sci Adv*. 2024;10(19):eadk3039. doi:10.3390/ijgi11090495.

[16] Weiss JR, et al. High-resolution surface velocities and strain for Anatolia from Sentinel-1 InSAR and GNSS data. *Geophys Res Lett*. 2020;47(17):e2020GL087376.

[17] Babaee S, et al. Spatiotemporal characterization of the subsidence and change detection in Tehran plain (Iran) using InSAR observations and Landsat 8 satellite imagery. *Remote Sens Appl Soc Environ*. 2024;36:101290.

[18] Rafiei F, et al. Aquifer and land subsidence interaction assessment using Sentinel-1 data and DInSAR technique. *ISPRS Int J Geo-Inf*. 2022;11(9):495. doi:10.1038/s41598-022-17438-y.

[19] Wang R, et al. Large-scale surface deformation monitoring using SBAS-InSAR and intelligent prediction in typical cities of Yangtze River Delta. *Remote Sens*. 2023;15(20):4942. doi:10.3390/rs15204942.

[20] Hinderer J, et al. Water depletion and land subsidence in Iran using gravity, GNSS, InSAR and precise levelling data. In: *Beyond 100: The Next Century in Geodesy*. Proc IAG Gen Assem; 2019 Jul 8–18; Montreal, Canada. Cham: Springer; 2020. p.153–159.

[21] Ghorbani Z, et al. Use of InSAR data for measuring land subsidence induced by groundwater withdrawal and climate change in Ardabil Plain, Iran. *Sci Rep*. 2022;12(1):13998.

[22] Kariminejad N, et al. Deep learning-based predictive models of land subsidence and collapsed pipes in Razavi Khorasan Province, Iran. *Earth Sci Inf*. 2024;17(4):3529–3545. doi:10.1007/s12145-024-01349-9.

[23] Ashraf T, Yin F, Liu L, Zhang Q. Land subsidence detection using SBAS- and Stacking-InSAR with zonal statistics and topographic correlations in Lakhra Coal Mines, Pakistan. *Remote Sens*. 2024;16(20):3815.

معرفی نویسندگان

AUTHOR(S) BIOSKETCHES



پرستو برزآبادی دانشجوی کارشناسی ارشد سیستم‌های اداره زمین دانشگاه شهید بهشتی می‌باشد. ایشان تاکنون موفق به چاپ مقالات متعدد در کنفرانس‌های داخلی و بین‌المللی و زمینه‌های زیرساخت داده‌های مکانی، کاداستر سه بعدی و سیستم‌های مدیریت زمین شده‌اند.

Barzabadi, P. Department of Geoinformation and Geomatics Engineering, Faculty of Civil, Water, and Environment Engineering, Shahid Beheshti University, Tehran, Iran.

✉ p.borzabadi@mail.sbu.ac.ir



افسانه رزاقپور دانشجوی کارشناسی ارشد سیستم‌های اداره زمین دانشگاه شهید بهشتی می‌باشند. ایشان تاکنون موفق به چاپ مقالات متعدد در کنفرانس‌های داخلی و بین‌المللی در زمینه‌های زیرساخت داده‌های مکانی، کاداستر سه بعدی شده‌اند.

Razaghpour, A. Department of Geoinformation and Geomatics Engineering, Faculty of Civil, Water, and Environment Engineering, Shahid Beheshti University, Tehran, Iran.

✉ a.razaghpour@mail.sbu.ac.ir



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 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 Environment Engineering, Shahid Beheshti University, Tehran, Iran.

✉ a_sharifii@sbu.ac.ir



مهدی اصلانی دانشجوی کارشناسی ارشد سیستم‌های اداره زمین دانشگاه شهید بهشتی می‌باشند. ایشان تاکنون موفق به چاپ مقالات متعدد در کنفرانس‌های داخلی و بین‌المللی در زمینه‌های زیرساخت داده‌های مکانی، کاداستر سه بعدی شده‌اند.

Aslani, M. Department of Geoinformation and Geomatics Engineering, Faculty of Civil, Water, and Environment Engineering, Shahid Beheshti University, Tehran, Iran.

✉ m.aslaniaslmarz@mail.sbu.ac.ir

علیرضا شریفی دانشیار گروه مهندسی نقشه‌برداری در دانشکده مهندسی عمران، آب و محیط زیست 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

Citation (Vancouver): Barzabadi P, Razaghpour A, Aslani M, Sharifi A. [Monitoring and Analysis of Land Subsidence in Eastern Shiraz Using the DInSAR Technique]. *J. RS. GEOINF. RES.* 2025; 3(2): 321-332

 <https://doi.org/10.22061/jrsgr.2025.12229.1105>



COPYRIGHTS

© 2025 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/>)



ORIGINAL RESEARCH PAPER

Monitoring methane emissions in Iran using Sentinel-P5 satellite data: Analyzing emission trends and identifying critical sources (2019-2023)

B. Babaei¹, R. Dousti^{1,*}, E. Javadnia^{1,*}, S. Kiaei¹, A.H Abdi², H. Karami²¹ Department of Geomatics Engineering, Faculty of Engineering, University of Zanjan, Zanjan, Iran² Iranian Space Research Center, Tehran, Iran

ABSTRACT

Received: 14 May 2025
Reviewed: 05 July 2025
Revised: 09 September 2025
Accepted: 22 November 2025

KEYWORDS:

Methane Emissions
Climate Change
Sentinel-5p Satellite
TROPOMI Sensor
Remote Sensing

* Corresponding authors

✉ javadnia@znu.ac.ir

✉ r_dousti@znu.ac.ir

☎ (+9824) 33054504

Background and Objectives: Methane, as the second most important greenhouse gas after carbon dioxide, plays a significant role in intensifying global warming. Its global warming potential (GWP) over a 100-year period is estimated to be about 28 times greater than that of carbon dioxide. According to reports by the Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC), approximately 40% of anthropogenic methane emissions are linked to the energy sector, particularly the oil and gas industries. As one of the major producers of oil and gas worldwide, Iran faces serious challenges in monitoring and controlling methane emissions—a matter of particular importance within the framework of international commitments such as the Paris Agreement. The Sentinel-5P satellite, equipped with the TROPOMI sensor, provides high spatial resolution and daily coverage, enabling continuous monitoring and quantification of methane emissions on a global scale. This study aims to examine the temporal trends of methane emissions in Iran over a five-year period (2019–2023) and to identify critical areas in terms of emission intensity.

Methods: This research was conducted using a descriptive–analytical approach based on time-series data derived from the TROPOMI sensor onboard the Sentinel-5P satellite within the Google Earth Engine platform. Methane concentration data with a spatial resolution of 5.5×7 km were extracted for the entire geographical extent of Iran and processed to obtain annual, seasonal, and monthly averages. To analyze temporal trends and spatial patterns, five-year variation maps and charts were generated to identify dominant trends and high-emission regions.

Findings: The results indicated an increasing trend in the annual mean methane concentration over Iran during the study period, with an estimated annual growth rate of about 0.03%. On average, methane concentrations exceeded the IPCC threshold of 1800 ppb by approximately 101.21 ppb. Seasonal analyses revealed that the highest concentrations occurred in autumn and winter, likely due to increased gas extraction activities and reduced efficiency of leakage control systems during colder periods. The total cumulative methane concentration from all sources during the five-year study period reached a considerable value of 1,487,134,705 ppb.

Conclusion: The findings highlight a serious challenge for Iran in managing and controlling methane emissions. The observed upward trend underscores the urgent need to formulate and implement effective mitigation policies. In this regard, the deployment of advanced leak detection systems and investment in modern emission control technologies can play a significant role in reducing the environmental impacts of methane.



NUMBER OF REFERENCES

35



NUMBER OF FIGURES

10



NUMBER OF TABLES

0

مقاله پژوهشی

پایش انتشار متان در ایران با استفاده از داده‌های ماهواره Sentinel-P5: تحلیل روند انتشار و شناسایی منابع بحرانی (۲۰۱۹-۲۰۲۳)

بهناز بابائی^۱، رضا دوستی^{۱*}، اسلام جوادنیا^{۱*}، سینا کیائی^۱، امیرحسین عبدی^۲، حشمت کرمی^۲^۱ گروه مهندسی نقشه برداری، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه زنجان، زنجان، ایران^۲ پژوهشگاه فضایی ایران، تهران، ایران

چکیده

پیشینه و اهداف: متان به عنوان دومین گاز گلخانه‌ای مهم پس از دی‌اکسید کربن، نقش چشمگیری در تشدید پدیده گرمایش جهانی دارد. پتانسیل گرمایش جهانی این گاز در بازه زمانی صدساله، حدود ۲۸ برابر بیشتر از دی‌اکسید کربن برآورد شده است. بر اساس گزارش‌های هیئت بین‌دولتی تغییرات اقلیمی (IPCC)، حدود ۴۰ درصد از انتشار متان با منشأ انسانی به بخش انرژی، به‌ویژه صنایع نفت و گاز، مربوط می‌شود. ایران به عنوان یکی از تولیدکنندگان عمده نفت و گاز جهان، با چالشی جدی در زمینه کنترل و پایش انتشار این گاز گلخانه‌ای مواجه است؛ موضوعی که در چارچوب تعهدات بین‌المللی همچون توافق‌نامه پاریس از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است. ماهواره Sentinel-5P مجهز به حسگر TROPOMI با قابلیت تفکیک مکانی بالا و پوشش روزانه، امکان پایش مستمر و کمی‌سازی انتشار متان را در مقیاس جهانی فراهم کرده است. هدف این پژوهش، بررسی روند تغییرات انتشار متان در ایران طی دوره پنج‌ساله (۲۰۱۹ تا ۲۰۲۳) و شناسایی مناطق بحرانی از نظر میزان انتشار است.

روش‌ها: این پژوهش با رویکرد توصیفی-تحلیلی و بر پایه سری‌های زمانی داده‌های روزانه سنجنده TROPOMI ماهواره Sentinel-5P در پلتفرم Google Earth Engine انجام شد. داده‌های غلظت متان با تفکیک مکانی ۷×۵/۵ کیلومتر برای کل محدوده جغرافیایی ایران استخراج و به صورت میانگین‌های سالانه، فصلی و ماهانه پردازش گردید. به منظور تحلیل روندهای زمانی و الگوهای مکانی، نقشه‌ها و نمودارهای تغییرات پنج‌ساله تولید و بررسی شدند تا روندهای غالب و نواحی با انتشار بالا شناسایی شوند.

یافته‌ها: نتایج نشان داد که میانگین سالانه غلظت متان در ایران طی دوره مورد مطالعه روندی افزایشی داشته و نرخ رشد سالانه آن حدود ۰/۰۳ درصد برآورد شده است. مقدار میانگین ثبت‌شده، به طور متوسط ۱۰۱/۲۱ ppb بالاتر از آستانه ۱۸۰۰ ppb تعیین‌شده توسط IPCC بوده‌اند. بررسی تغییرات فصلی نشان داد بیشترین میزان انتشار در فصل‌های پاییز و زمستان رخ می‌دهد که احتمالاً ناشی از افزایش فعالیت‌های استخراج گاز و کاهش کارایی سامانه‌های کنترل نشت در دوره‌های سرد سال است. مجموع کل انتشار متان از تمامی منابع طی پنج سال، به رقم قابل توجه ۱'۴۸۷'۱۳۴'۷۰۵ ppb رسید.

نتیجه‌گیری: یافته‌های این پژوهش بیانگر چالش جدی ایران در زمینه مدیریت و کنترل انتشار متان است. روند افزایشی این گاز گلخانه‌ای، ضرورت تدوین و اجرای سیاست‌های مؤثر کاهش انتشار را برجسته می‌سازد. در این راستا، بهره‌گیری از سامانه‌های پیشرفته تشخیص نشت و سرمایه‌گذاری در فناوری‌های نوین کنترل انتشار می‌تواند نقش بسزایی در کاهش اثرات زیست‌محیطی ایفا کند.

* نویسنده مسئول

javadnia@znu.ac.ir

r_dousti@znu.ac.ir

۰۲۴-۲۳۰۵۴۵۰۴

مقدمه

اضطراری اقلیمی " (Climate Emergency Brake) توصیف می‌شود، چراکه با توجه به عمر نسبتاً کوتاه‌تر متان در جو، کاهش انتشار آن می‌تواند نسبت به دی‌اکسید کربن تأثیرات اقلیمی سریع‌تری به همراه داشته باشد. این ویژگی، کاهش متان را به یک راهبرد کلیدی و مؤثر برای مقابله با گرمایش جهانی در بازه زمانی کوتاه‌مدت تبدیل می‌کند. [۲، ۴].

متان از طیف گسترده‌ای از منابع منتشر می‌شود که فعالیت‌های انسانی در سطح جهانی، اصلی‌ترین عامل آن به شمار می‌روند. این منابع شامل

گاز متان (CH₄) پس از کربن دی‌اکسید دومین گاز گلخانه‌ای مهم ناشی از فعالیت‌های انسانی با عمر نسبتاً کوتاه در جو (۱±۹ سال) است که پتانسیل گرمایش جهانی (GWP) صد ساله‌ی آن ۲۸ برابر بزرگ‌تر از دی‌اکسید کربن می‌باشد و نقش تعیین‌کننده‌ای در تغییرات اقلیمی ایفا می‌کند [۱-۳]. پتانسیل گرمایش جهانی قابل توجه متان، ضرورت اقدام فوری برای کنترل انتشار آن را در راستای کاهش گرمایش زمین برجسته می‌سازد. کاهش انتشار متان اغلب به عنوان فعال‌سازی "ترمز

فناوری‌های سنجش از دور، به‌ویژه داده‌های ماهواره‌ای، انقلابی در پایش متان ایجاد کرده است؛ به‌گونه‌ای که امکان اندازه‌گیری گسترده‌تر، منسجم‌تر و دقیق‌تری را در سطح جهانی فراهم می‌آورد. این تحول، نمایانگر تغییری پارادایمیک به‌سوی شفافیت و پاسخ‌گویی بی‌سابقه در ردیابی انتشارات گازهای گلخانه‌ای است؛ امری که نقشی کلیدی در تدوین و اجرای سیاست‌های مؤثر زیست‌محیطی ایفا می‌کند [۱، ۱۵].

امروزه طیف متنوعی از حسگرهای ماهواره‌ای به‌طور خاص برای پایش گازهای گلخانه‌ای توسعه یافته‌اند، از جمله Sentinel-5P، GOSAT، Sentinel-2 و Sentinel-3. GHGSat. این ابزارها از فناوری‌هایی نظیر طیف‌سنجی مادون‌قرمز موج کوتاه (SWIR) و مادون‌قرمز حرارتی (TIR) برای شناسایی امضای طیفی منحصربه‌فرد متان در جو بهره می‌برند [۱۱، ۱۵، ۱۶]. در میان نسل کنونی ماهواره‌های پایش جو، ماهواره Sentinel-5P که مجهز به ابزار TROPOMI (ابزار پایش تروپوسفری) است، توجه زیادی را به خود جلب کرده است. این ماهواره در ۱۳ اکتبر ۲۰۱۷ به‌عنوان بخشی از برنامه کوپرنیک آژانس فضایی اروپا (ESA) پرتاب شد و پوشش جهانی روزانه به‌همراه وضوح مکانی نسبتاً بالایی در حدود $7 \times 5/5$ کیلومتر مربع ارائه می‌دهد (که از مقدار اولیه 7×7 کیلومتر مربع بهبود یافته است [۱۷، ۱۸]). این ویژگی‌ها، TROPOMI را به ابزاری مناسب برای پایش مستمر و دقیق متان در مقیاس‌های منطقه‌ای تا ملی تبدیل کرده است و بسیاری از محدودیت‌های ذاتی روش‌های سنتی زمینی را برطرف می‌سازد.

مطالعات پیشین به‌طور گسترده توانایی سنجنده‌ی TROPOMI را در شناسایی انتشاردهندگان عمده‌ی متان - که اغلب با عنوان ابرانتشاردهندگان (Super Emitters) شناخته می‌شوند - و همچنین در تخمین میدان‌های انتشار منطقه‌ای نشان داده‌اند [۱]. به‌طور خاص، داده‌های TROPOMI در مطالعات متعددی برای شناسایی و کمی‌سازی ستون‌های متان ناشی از منابع گوناگون مانند تأسیسات نفت و گاز، محل‌های دفن زباله، و معادن زغال‌سنگ به‌کار گرفته شده‌اند [۲۲-۱۹]. با این حال، باید توجه داشت که در حالی که TROPOMI پوشش مکانی گسترده‌ای با قابلیت شناسایی ناهنجاری‌های قابل‌توجه ارائه می‌دهد، اما محدودیت‌هایی در وضوح مکانی و آستانه‌ی تشخیص دارد. این موضوع باعث می‌شود نشت‌های متان با شدت پایین یا پراکندگی زیاد (مثلاً از منابع کشاورزی یا سیستم‌های توزیع شهری) به‌درستی شناسایی نشوند [۱]. این نکته برای تفسیر نتایج مطالعات مبتنی بر TROPOMI حیاتی است، زیرا داده‌های حاصل عمدتاً نمایانگر منابع متراکم‌تر و با شدت بالاتر انتشارات هستند و ممکن است تصویر کاملی از تمامی منابع پراکنده یا کوچک‌تر ارائه ندهند.

چشم‌انداز جغرافیایی و صنعتی منحصربه‌فرد ایران، این کشور را به یکی از مورد‌های جذاب برای مطالعه انتشار متان در منطقه جنوب غرب آسیا تبدیل کرده است. فعالیت‌های گسترده در حوزه‌ی تولید و فرآورش نفت و گاز طبیعی، سهم قابل‌توجهی در بودجه‌ی متان ایران دارند. در واقع، داده‌ها نشان می‌دهند که بخش انرژی، به‌ویژه از طریق نشت

دامداری، سیستم‌های نفت و گاز، استخراج زغال‌سنگ، محل‌های دفن زباله، تصفیه فاضلاب و کشت برنج هستند. در این میان، بخش انرژی، به‌ویژه صنایع نفت و گاز، مسئول تقریباً ۴۰ درصد از کل انتشار متان ناشی از فعالیت‌های انسانی است [۴، ۵]. در این بخش، انتشارهای فراری حاصل از نشت‌های ناخواسته در تجهیزات تحت فشار مانند شیرآلات، فلنچ‌ها و همچنین احتراق ناقص در فرآیند مشعل‌سوزی، سهم قابل توجه و در عین حال پیچیده‌ای از کل انتشار متان را به خود اختصاص می‌دهند. ماهیت پراکنده و متناوب این نشت‌ها، اندازه‌گیری و کنترل آن‌ها را به‌ویژه دشوار می‌سازد [۶، ۷].

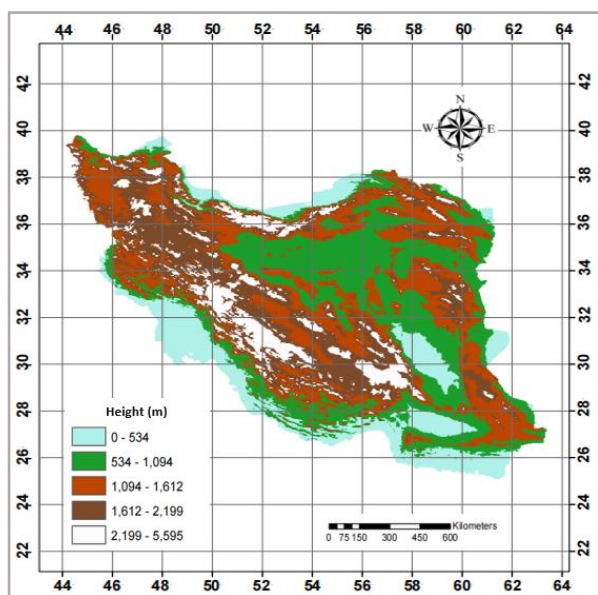
افزایش غلظت گازهای گلخانه‌ای در جو، ضرورت همکاری جهانی را برجسته ساخته و زمینه‌ساز شکل‌گیری توافق‌نامه‌های بین‌المللی نظیر توافق‌نامه پاریس شده است. این توافق‌نامه، به‌عنوان یکی از اسناد کلیدی در سیاست‌گذاری اقلیمی، اهدافی حیاتی را دنبال می‌کند؛ از جمله، برداشتن گامی مؤثر در جهت کاهش گرمایش جهانی، برای جلوگیری از افزایش $1/5$ تا 2 درجه‌ی دمای کره‌ی زمین، در مقایسه با دوره‌ی پیش از صنعتی شدن و کاهش انتشار گازهای گلخانه‌ای در سطح جهانی [۸]. شناسایی و اندازه‌گیری دقیق انتشار این گازها، به‌ویژه در مورد گازهایی مانند متان، از اهمیت بالایی برخوردار است؛ با این حال، به دلیل پراکندگی و ناپیوستگی منابع آن‌ها در طول زنجیره‌های تأمین، تولید و توزیع، این فرایند غالباً با چالش‌های جدی مواجه است [۹، ۱۱].

ایران، به‌عنوان یکی از تولیدکنندگان اصلی نفت و گاز در جهان، با چالشی جدی در زمینه‌ی پایش و کنترل انتشار گازهای گلخانه‌ای، به‌ویژه ناشی از سوزاندن گاز، مواجه است [۱۰]. بر اساس توافق‌نامه پاریس، ایران تعهداتی داوطلبانه برای کاهش ۴ درصدی انتشار گازهای گلخانه‌ای تا سال ۲۰۳۰ ارائه داده و همچنین کاهش ۸ درصد اضافی را به‌صورت مشروط و در صورت رفع برخی موانع بین‌المللی پذیرفته است. شایان ذکر است که تنها بخش انرژی مسئول بیش از ۸۰ درصد از کل انتشار گازهای گلخانه‌ای در کشور است. روندهای موجود در انتشار متان، به‌طور مستقیم بر میزان پیشرفت یا عدم تحقق تعهدات بین‌المللی ایران تأثیرگذار است [۱۱]. دستیابی به این اهداف اغلب با عوامل ژئوپلیتیکی پیچیده‌ای مانند تحریم‌های بین‌المللی، که دسترسی به منابع مالی و فناوری‌های نوین را محدود می‌سازند، و همچنین یارانه‌های داخلی انرژی، که انگیزه برای سرمایه‌گذاری در فناوری‌های پاک را تضعیف می‌کنند، با مانع مواجه می‌شود. این تلاقی بین اهداف زیست‌محیطی در سطح ملی و واقعیت‌های ژئوپلیتیکی در سطح بین‌المللی، لایه‌ای از پیچیدگی راهبردی به چالش کاهش انتشار گازهای گلخانه‌ای در ایران می‌افزاید [۱۴-۱۲].

در گذشته، اندازه‌گیری انتشار متان عمدتاً به روش‌های سنتی زمینی متکی بود. این رویکردها به‌طور ذاتی با محدودیت‌هایی از جمله پوشش مکانی و زمانی محدود، هزینه‌های عملیاتی بالا، و ناتوانی در شناسایی مؤثر انتشارات پراکنده و متناوب همراه بودند. با این حال، ظهور

ناهمگونی توپوگرافیک، در کنار موقعیت راهبردی ایران در مجاورت منابع آبی اصلی مانند دریای خزر در شمال و خلیج فارس و دریای عمان در جنوب، شرایط جغرافیایی منحصربه‌فردی را ایجاد کرده است [۲۶، ۲۵].

ایران دارای چهار فصل متمایز است که با نوسانات قابل توجه در پارامترهای اقلیمی مانند دما، بارش، پوشش برف و الگوهای باد همراه‌اند. این شرایط جوی پویا، همراه با توپوگرافی پیچیده، چالش‌هایی اساسی را برای پایش‌های ماهواره‌ای ایجاد می‌کند [۲۷، ۲۵]. برای مثال، نواحی کوهستانی و پوشش ابری پایدار می‌توانند موجب ایجاد شکاف‌های داده‌ای در تصاویر ماهواره‌ای شوند، در حالی‌که تغییرات فصلی در وضعیت جوی، ممکن است بر الگوهای انتشار و قابلیت آشکارسازی ستون‌های متان تأثیر بگذارد [۱۷]. درک دقیق این پیچیدگی‌های محیطی، برای پردازش مؤثر داده‌های سنجش از دور و تفسیر صحیح روندهای انتشار گازهای گلخانه‌ای، به‌ویژه متان، امری حیاتی است. شکل ۱ نقشه‌ی تغییرات ارتفاعی ایران را نشان می‌دهد که در آن، نواحی مرتفع و هموار به‌روشنی قابل مشاهده هستند و بیانگر تنوع ارتفاعی گسترده در سراسر کشور می‌باشند.



شکل ۱: نقشه‌ی تغییرات ارتفاعی کشور ایران با تغییر ارتفاع (صفر (سطح آب‌های آزاد) تا ارتفاع حداکثر ۵۵۹۵ متر)

Fig. 1: Topographic Elevation Map of Iran (Ranging from 0 m [sea level] up to 5595 m maximum elevation)

داده‌های مورد استفاده

منبع داده Sentinel-5P TROPOMI

داده‌های اصلی مورد استفاده در این مطالعه از حسگر TROPOMI نصب‌شده روی ماهواره Sentinel-5 Precursor (S5P) به‌دست آمد. TROPOMI یک طیف‌سنج تصویربرداری با دید نادر است که بازتاب‌ها را در طیف وسیعی از باندهای فرابنفش (UV) تا مادون‌قرمز موج کوتاه (SWIR) ثبت می‌کند. این ماهواره در ارتفاع ۸۲۴ کیلومتری از سطح

شعله‌سوزی (flaring)، و تهویه گاز (venting)، یکی از اصلی‌ترین منابع انتشار متان در کشور است. نقاط داغ انتشار متان در ایران پیش‌تر در پژوهش‌ها شناسایی شده‌اند. به‌عنوان نمونه، محل دفن زباله آزادکوه (کهریزک) در جنوب تهران یکی از منابع مهم متان در مقیاس شهری گزارش شده که در مطالعاتی با استفاده از داده‌های سنجش‌از‌دور، میانگین غلظت متان تا حدود ۱۹۷۰ ppm در آن ثبت شده است [۲۳]. علاوه بر آن، مطالعات مرتبط با فعالیت‌های شعله‌سوزی گاز (gas flaring) نیز جایگاه ایران را در میان کشورهای پراکنش‌کننده متان تثبیت می‌کنند. به‌طور خاص، گزارش‌ها ایران را در سال ۲۰۱۵ سومین کشور بزرگ در زمینه سوزاندن گاز معرفی کرده‌اند [۲۴]. این واقعیت تأکیدی است بر نقش کلیدی بخش نفت و گاز در انتشار گازهای گلخانه‌ای کشور و لزوم سیاست‌گذاری و پایش دقیق در این حوزه.

با وجود پیشرفت‌های قابل‌توجه در مطالعات انتشار متان در ایران و بهره‌گیری از داده‌های سنجش از دور، تحلیل جامع و بلندمدت مکانی-زمانی انتشار این گاز گلخانه‌ای در سطح ملی، به‌ویژه با تمرکز بر تأسیسات نفت و گاز، همچنان جای خالی محسوسی در ادبیات پژوهش دارد. چنین تحلیلی می‌تواند درک دقیق و به‌روز از روندهای انتشار را ارائه دهد، مناطق بحرانی پایدار را شناسایی کند و دیدی دقیق و پویا از الگوهای انتشار فراهم کند؛ دیدی که برای تدوین سیاست‌های کاهش انتشارات و پایش تعهدات اقلیمی ایران ضروری است.

بنابراین، اهداف این تحقیق عبارتند از:

- تحلیل روندهای زمانی انتشار متان در سراسر ایران از سال ۲۰۱۹ تا ۲۰۲۳، در سه مقیاس سالانه، فصلی و ماهانه؛
- شناسایی مناطق بحرانی و نقاط داغ با تمرکز ویژه بر مناطق دارای فعالیت‌های نفت و گاز؛
- ارزیابی میزان فراتر رفتن غلظت متان از آستانه‌ی جهانی ۱۸۰۰ ppb که توسط هیئت بین‌الدول تغییر اقلیم (IPCC) به‌عنوان حد هشدار مطرح شده است؛
- ارزیابی توانمندی‌ها و محدودیت‌های داده‌های Sentinel-5P TROPOMI و پلتفرم Google Earth Engine برای پایش ملی و هدفمند انتشار متان در ایران.

منطقه مورد مطالعه

این تحقیق در گستره‌ی جغرافیایی ایران انجام شده است؛ کشوری با مساحتی بالغ بر ۱۶۴۸،۱۹۵ کیلومتر مربع که آن را در رتبه‌ی شانزدهم بزرگ‌ترین کشورهای جهان قرار می‌دهد. ایران در جنوب‌غربی آسیا واقع شده و بین عرض‌های جغرافیایی ۲۵°۰۳' تا ۳۹°۴۷' شمالی و طول‌های ۴۴°۱۴' تا ۶۳°۲۰' شرقی نسبت به نصف‌النهار گرینویچ امتداد دارد. توپوگرافی ایران عمدتاً کوهستانی و نیمه‌خشک است و با میانگین ارتفاعی بیش از ۱۲۰۰ متر از سطح دریا مشخص می‌شود. وجود رشته‌کوه‌های برجسته‌ای نظیر زاگرس و البرز، به‌همراه قله‌های پراکنده متعدد، به این کشور تنوع ارتفاعی چشمگیری بخشیده است. این

(کیفیت بهینه) است. در محصول سطح سوم (Level-3) داده‌های متان در GEE، پیکسل‌هایی با مقدار qa_value کمتر از ۵، حذف می‌شوند. با وجود این فیلترگذاری، احتمال باقی‌ماندن پیکسل‌های دارای خطا یا مصنوعات گرافیکی وجود دارد [۱۷].

وجود شکاف‌های داده که به‌صورت نواحی سفید در خروجی‌های گرافیکی مشاهده می‌شوند، ویژگی ذاتی سنجش از دور ماهواره‌ای غیرفعال است. این شکاف‌ها اغلب در مناطق دارای پوشش ابر مداوم، زوایای بالای خورشید، یا مناطق کوهستانی پیچیده مانند زاگرس و البرز رخ می‌دهند که بازایی دقیق داده را مختل می‌کند [۱۷]. این محدودیت‌ها بر ضرورت تفسیر دقیق نتایج و درک تعادل بین پوشش مکانی وسیع و دقت داده تأکید می‌کنند. همچنین، استفاده از پارامتر تصحیح‌شده متان در این مطالعه نشان می‌دهد که تصحیح بازتاب سطح به‌عنوان یک گام ضروری در بازایی دقیق، از پیش در پردازش مجموعه‌داده GEE اعمال شده است [۷، ۱۷، ۳۱].

تحلیل داده

پس از پردازش داده‌ها، غلظت متان با آستانه 1800 ppb تعیین‌شده توسط IPCC که نشان‌دهنده افزایش $2/5$ برابری نسبت به دوران پیشاصنعتی است، مقایسه شد. عبور از این آستانه به‌عنوان یک شاخص کلیدی تغییرات اقلیمی، نگرانی‌های فزاینده‌ای برای پژوهشگران و سیاست‌گذاران ایجاد کرده است [۳۳، ۳۲]. تحلیل آماری بر میانگین‌های سالانه، فصلی و ماهانه انجام شد و شامل محاسبه معیارهای آماری کلیدی نظیر حداقل، حداکثر، میانگین و انحراف معیار بود تا درک جامع‌تری از الگوها و تغییرپذیری انتشار متان در سراسر کشور حاصل گردد.

نتایج

تحلیل داده‌های حاصل از ماهواره Sentinel-5P (ابزار TROPOMI) در بازه زمانی ۲۰۱۹ تا ۲۰۲۳، روندها و الگوهای قابل توجهی از انتشار متان در ایران را در مقیاس‌های سالانه، فصلی و ماهانه، به‌همراه توزیع‌های جغرافیایی متمایز، نمایان می‌سازد.

تحلیل روندهای سالانه غلظت متان (۲۰۱۹-۲۰۲۳)

تحلیل داده‌های حاصل از سنجنده TROPOMI در بازه زمانی ۲۰۱۹ تا ۲۰۲۳ نشان‌دهنده روندی افزایشی در میانگین سالانه غلظت متان در سطح ایران است (شکل ۲). در بازه پنج‌ساله مورد بررسی، میانگین سالانه غلظت متان در جو ایران از $1884/40 \text{ ppb}$ در سال ۲۰۱۹ به $1910/36 \text{ ppb}$ در سال ۲۰۲۳ افزایش یافته که نشان‌دهنده نرخ رشد سالانه‌ای در حدود $0/3\%$ است. این مقادیر به‌طور پیوسته و با میانگین $10/121 \text{ ppb}$ از حد آستانه‌ای 1800 ppb تعیین‌شده توسط IPCC فراتر رفته‌اند. در طول این دوره، مجموع تجمعی غلظت متان از تمامی منابع به مقدار قابل توجه $1,487,134,705 \text{ ppb}$ رسید. شکل ۳ و ۴ به‌ترتیب

زمین قرار دارد و پوشش جهانی روزانه با چرخه تکرار ۱۴ روزه و وضوح مکانی 5.5×7 کیلومتر را فراهم می‌سازد [۱۷، ۱۸].

پارامتر کلیدی مورد استفاده در این پژوهش، کسر مولی خشک میانگین ستونی متان (XCH_4) بود که یک شاخص حیاتی برای پایش تغییرات منطقه‌ای و بلندمدت در غلظت متان اتمسفری محسوب می‌شود. توانایی TROPOMI در ارائه پوشش تقریباً روزانه با وضوح مکانی نسبتاً بالا برای یک ابزار پایش جهانی، آن را به ابزاری مؤثر در شناسایی ناهنجاری‌های بزرگ‌مقیاس متان و تعیین میدان‌های انتشار منطقه‌ای تبدیل کرده است [۱، ۲۸]. با این حال، باید توجه داشت که هرچند TROPOMI در شناسایی "ابرنشاردهندگان" متان بسیار موفق عمل می‌کند، اما به دلیل محدودیت‌های وضوح مکانی و تشخیص ذاتی، ممکن است در ثبت نشت‌های کوچک یا پراکنده موفق نباشد. بنابراین، داده‌های این مطالعه عمدتاً بیانگر منابع بزرگ و متمرکز متان هستند و ممکن است تمامی منابع بالقوه را شامل نشوند.

پلتفرم پردازش داده (Google Earth Engine (GEE

کلیه مراحل گردآوری و پیش‌پردازش داده‌ها با استفاده از پلتفرم GEE انجام شد. این پلتفرم، یک محیط ابری قدرتمند برای تحلیل داده‌های مکانی-زمانی در مقیاس سیاره‌ای است و دسترسی به مجموعه‌داده‌های عظیم ماهواره‌ای را فراهم می‌کند GEE. با پشتیبانی از API‌های پایتون و جاوا اسکریپت، امکان فیلترگذاری، پردازش و استخراج داده‌ها را تسهیل می‌نماید و انجام تحلیل‌های وسیع را حتی در مناطقی با محدودیت منابع محاسباتی ممکن می‌سازد. برای این تحقیق، از پارامتر $CH_4_column_volume_mixing_ratio_dry_air_bias_corrected$ استفاده شد که با نسبت اختلاط ستونی-میانگین هوای خشک (XCH_4) مطابقت دارد و به‌صورت پیش‌فرض در GEE با تصحیح بازتاب سطح (surface albedo) پردازش شده است [۲۹، ۳۰].

روش تحقیق

مراحل پردازش داده

رویکرد پژوهش، توصیفی-تحلیلی بوده و بر تحلیل سری‌های زمانی داده‌های روزانه Sentinel-5P TROPOMI در محدوده جغرافیایی ایران طی سال‌های ۲۰۱۹ تا ۲۰۲۳ متمرکز بوده است. داده‌های مربوط به غلظت متان ابتدا در پلتفرم GEE گردآوری و پیش‌پردازش شدند. در ادامه، نقشه‌های میانگین سالانه و نمودارهای سری‌زمانی تغییرات فصلی و ماهانه متان با بهره‌گیری از نرم‌افزار MATLAB تولید و تحلیل گردید.

کنترل کیفیت و فیلترگذاری

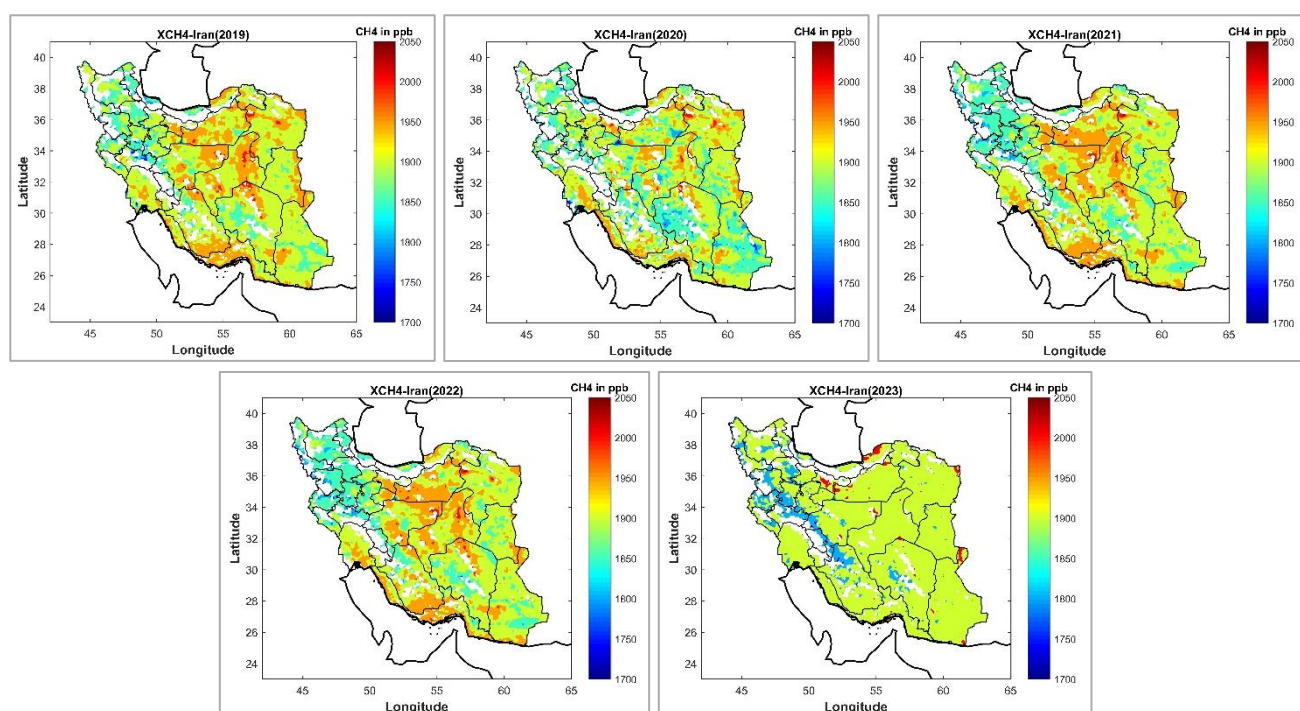
داده‌های Sentinel-5P تحت تأثیر عواملی نظیر پوشش ابر، شدت تابش خورشید، زاویه اوج خورشید، عامل جرم هوا در تروپوسفر، ناهنجاری‌های اقیانوسی و سرعت باد قرار دارند [۱۷، ۱۸]. به‌منظور اطمینان از کیفیت داده‌ها، برای هر پیکسل مقدار تضمین کیفیت (qa_value) اختصاص داده می‌شود که عددی بین ۰ (خطای پردازش یا کیفیت پایین) تا ۱

مدیریت پیامدهای زیست‌محیطی ناشی از غلظت فزاینده متان در جو تأکید دارد.

نمایش‌های گرافیکی سالانه نیز اغلب بخش‌هایی با رنگ سفید را نشان می‌دادند که بیانگر شکاف داده برای مناطق یا بازه‌های زمانی خاص بودند (شکل ۲). این شکاف‌ها صرفاً به معنای داده‌های مفقود نیستند، بلکه محدودیت‌های ذاتی سنجش از دور ماهواره‌ای غیرفعال را برجسته می‌کنند. عواملی همچون پوشش ابر مداوم، زوایای اوج خورشید بالا (که میزان نور خورشید موجود برای بازیابی داده‌ها را کاهش می‌دهد) یا توپوگرافی پیچیده مناطق کوهستانی ایران می‌توانند به‌طور قابل توجهی بر کامل بودن و کیفیت داده‌های پایش تأثیر بگذارند. این امر بر لزوم موازنه میان پوشش مکانی گسترده و کامل بودن داده‌ها، که یکی از چالش‌های رایج در پایش جوی ماهواره‌ای است، تأکید دارد.

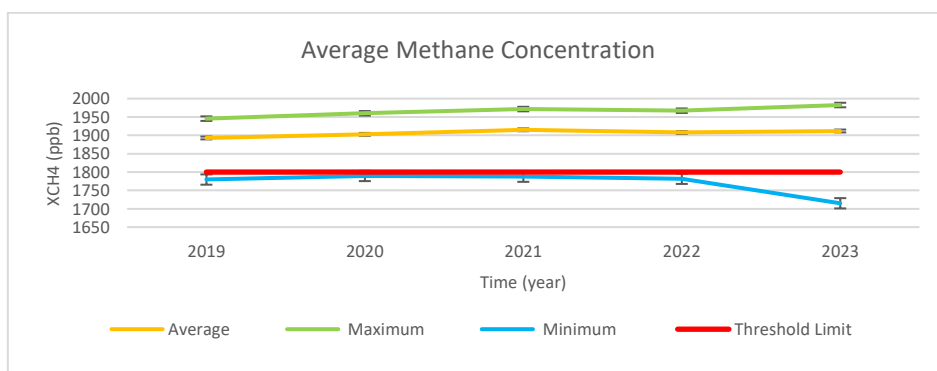
میانگین سالانه و مجموع سالانه غلظت متان در سطح کشور را به‌صورت نموداری نمایش می‌دهند.

بررسی مقادیر حداکثر و حداقل سالانه نیز بر پیچیدگی‌های این روند تأکید دارد. در حالی که مقادیر حداکثر به‌طور مداوم حدود ۲۰۰ تا ۲۵۰ ppb بالاتر از آستانه ۱۸۰۰ ppb ثبت شدند، مقادیر حداقل در برخی سال‌ها کاهش یافته‌اند؛ به‌ویژه در سال ۲۰۲۳ که کمترین مقدار ثبت‌شده به ۱۶۸۶/۳۶ ppb رسید و برای نخستین بار در دوره مطالعه به زیر ۱۷۰۰ ppb سقوط کرد. افزایش دامنه‌ی بین مقادیر حداقل و حداکثر می‌تواند نشانگر دو پدیده هم‌زمان باشد: از یک‌سو تشدید منابع موجود تولید متان، و از سوی دیگر، ظهور احتمالی نقاط داغ جدید یا رویدادهای محلی با شدت بالا و پراکندگی زمانی بیشتر. این گسترش در دامنه‌ی مقادیر ثبت‌شده، بر ضرورت پایش مستمر و دقیق برای



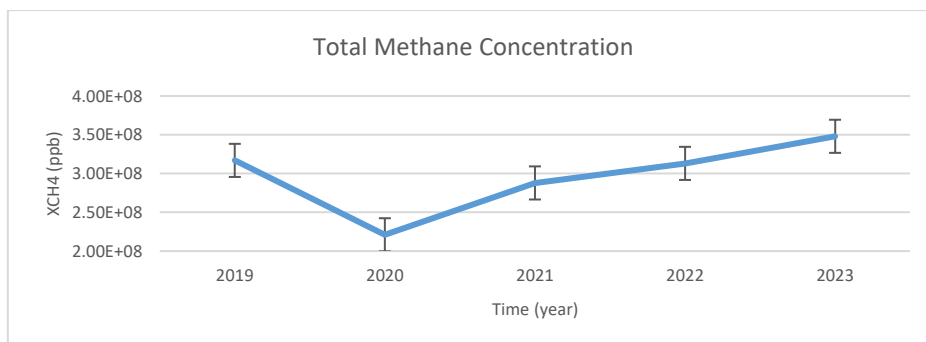
شکل ۲: تغییرات مکانی سالانه غلظت متان در ایران طی سال‌های ۲۰۱۹ تا ۲۰۲۲ بر اساس داده‌های سنجنده TROPOMI (ماهواره Sentinel-5P)

Fig. 2: Annual Spatial Variations of Methane Concentrations in Iran (2019–2022), based on Sentinel-5P (TROPOMI) observations.



شکل ۳: نمودار تغییرات میانگین سالانه غلظت متان در ایران (۲۰۱۹–۲۰۲۳)

Fig. 3: Annual Average Methane Concentration Trends in Iran (2019–2023)



شکل ۴: مجموع غلظت سالانه متان در ایران (۲۰۲۳-۲۰۱۹)
Fig. 4: Total Annual Methane Concentration in Iran (2019-2023)

می‌سازد. در طول دوره مطالعاتی، میانگین غلظت متان در اغلب ماه‌ها به‌طور مستمر بالاتر از آستانه ۱۸۰۰ ppb باقی ماند. برخی ماه‌ها با اوج‌های قابل توجه همراه بودند؛ برای مثال: فوریه و سپتامبر در سال ۲۰۱۹، آگوست و اکتبر در سال ۲۰۲۰، دسامبر و سپتامبر در سال ۲۰۲۱، ژوئن و آگوست در سال ۲۰۲۲، و دسامبر و سپتامبر در سال ۲۰۲۳. در مقابل، ماه‌هایی مانند ژوئن ۲۰۱۹، فوریه ۲۰۲۰، آگوست ۲۰۲۱، فوریه ۲۰۲۲ و اکتبر ۲۰۲۳، کمترین مقادیر حداقلی را ثبت کردند. این نوسانات ماهانه می‌توانند حاصل ترکیبی از عوامل زیست‌محیطی، شرایط اقلیمی، و تغییرات در شدت یا نوع فعالیت‌های انسانی باشند. آمار جامع مربوط به تغییرات ماهانه غلظت متان برای هر سال در نمودارهای شکل‌های ۶ تا ۱۰ ارائه شده‌اند.

توزیع جغرافیایی و نقاط داغ انتشار متان در ایران

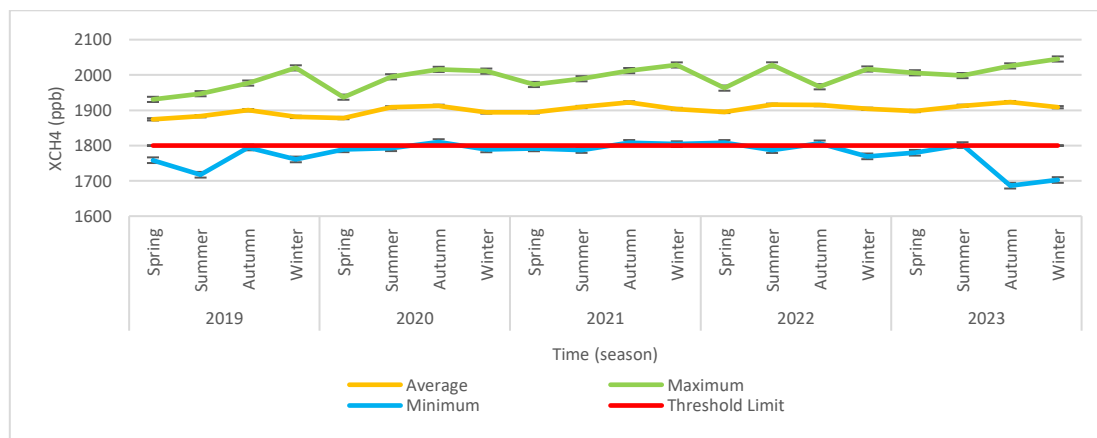
تحلیل مکانی انتشار متان در ایران طی دوره مطالعاتی (۲۰۲۳-۲۰۱۹) نشان‌دهنده وجود نقاط داغ جغرافیایی مشخص، به‌ویژه در استان‌های جنوبی و جنوب‌غربی کشور، است. این مناطق به‌طور مداوم سطوح بالایی از انتشار متان را نشان دادند که به‌طور قوی با تمرکز فعالیت‌های صنعت نفت و گاز در این نواحی همبستگی دارد. پایداری این انتشارات بالا بر نقش کلیدی صنعت سوخت‌های فسیلی در افزایش غلظت متان جوی ایران تأکید می‌کند.

الگوهای فصلی غلظت متان (۲۰۲۳-۲۰۱۹)

تحلیل الگوهای فصلی در دوره مورد مطالعه نشان می‌دهد که بالاترین انتشار متان در ایران عمدتاً در فصل‌های پاییز و زمستان رخ داده است. این اوج تکرارشونده در ماه‌های سردتر به‌احتمال زیاد با افزایش تقاضای انرژی برای گرمایش مرتبط است، که می‌تواند فعالیت‌های استخراج گاز طبیعی را افزایش داده و منجر به نشت بیشتر متان شود. افزون‌براین، کارایی سامانه‌های کنترل نشت در زیرساخت‌های نفت و گاز ممکن است در دماهای پایین‌تر کاهش یابد، که این نیز به تشدید انتشارهای فراری می‌انجامد. این الگوی فصلی، به آسیب‌پذیری عملکردی زیرساخت‌های انرژی در برابر نوسانات دمایی اشاره دارد. در مقابل، فصل تابستان عموماً پایین‌ترین مقادیر ثبت‌شده را در هر سال به خود اختصاص داده است. با این حال، در تمامی فصل‌ها و طی همه سال‌های مورد بررسی، میانگین فصلی غلظت متان همواره بالاتر از آستانه ۱۸۰۰ ppb قرار داشته و اغلب بیش از ۱۰۰ ppb از این مقدار فراتر رفته است. این مسئله حاکی از تداوم سطح بالای متان در جو ایران صرف‌نظر از تغییرات فصلی است. جزئیات آماری مربوط به این نوسانات در شکل ۵ ارائه شده است.

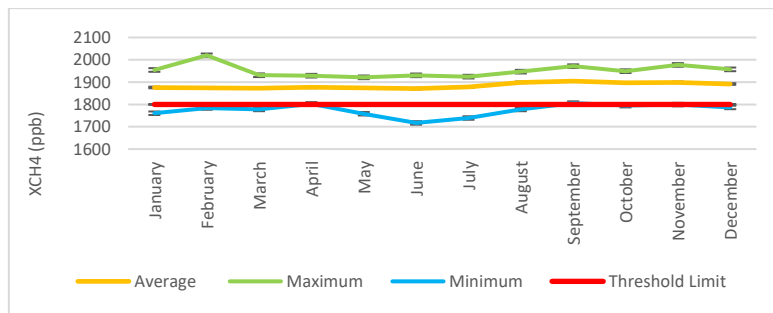
تغییرات ماهانه غلظت متان (۲۰۲۳-۲۰۱۹)

تحلیل داده‌های ماهانه غلظت متان در ایران طی سال‌های ۲۰۱۹ تا ۲۰۲۳، الگوهای زمانی دقیق‌تری از تغییرات این گاز گلخانه‌ای را نمایان



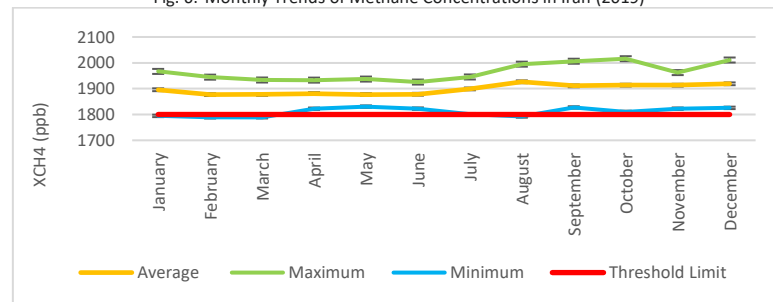
شکل ۵: نمودار تغییرات فصلی غلظت متان در ایران طی سال‌های ۲۰۲۳ تا ۲۰۱۹ بر اساس داده‌های Sentinel-5P (TROPOMI)

Fig. 5: Seasonal variations in methane concentrations in Iran (2019-2023) from Sentinel-5P (TROPOMI)



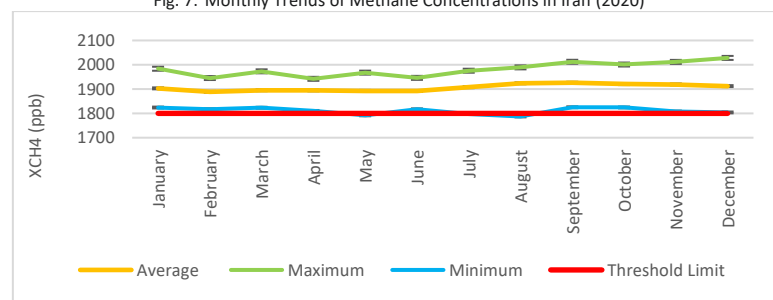
شکل ۶: روند تغییرات ماهانه غلظت متان در ایران (۲۰۱۹)

Fig. 6: Monthly Trends of Methane Concentrations in Iran (2019)



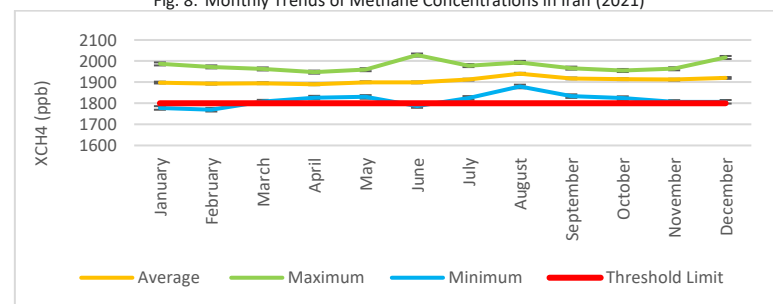
شکل ۷: روند تغییرات ماهانه غلظت متان در ایران (۲۰۲۰)

Fig. 7: Monthly Trends of Methane Concentrations in Iran (2020)



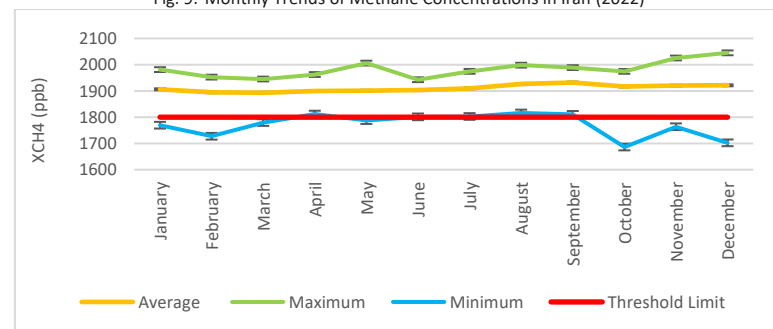
شکل ۸: روند تغییرات ماهانه غلظت متان در ایران (۲۰۲۱)

Fig. 8: Monthly Trends of Methane Concentrations in Iran (2021)



شکل ۹: روند تغییرات ماهانه غلظت متان در ایران (۲۰۲۲)

Fig. 9: Monthly Trends of Methane Concentrations in Iran (2022)



شکل ۱۰: روند تغییرات ماهانه غلظت متان در ایران (۲۰۲۳)

Fig. 10: Monthly Trends of Methane Concentrations in Iran (2023)

با این حال، وضوح مکانی TROPOMI برای شناسایی نشت‌های کوچک یا پراکنده کافی نیست و احتمال کم‌برآوردی کل انتشار وجود دارد. شرایط جوی (پوشش ابر، زاویه خورشید، توپوگرافی پیچیده) نیز می‌تواند باعث ایجاد شکاف داده شود. اگرچه فیلتر qa_value و تصحیح آلبدو کیفیت داده‌ها را بهبود می‌بخشند، اما امکان باقی ماندن مصنوعات وجود دارد. این محدودیت‌ها ضرورت رویکرد چندحسگری و چندلایه را برای برآورد جامع‌تر بودجه متان نشان می‌دهد.

نتایج این مطالعه با پژوهش‌های قبلی درباره انتشار متان در ایران همسو است. شناسایی محل دفن زباله تهران به عنوان یک نقطه داغ پایدار با یافته‌های محمدی و آخوندزاده (۲۰۲۳) مطابقت دارد که غلظت حدود ۱۹۷۰ ppm را در محل آرادکوه گزارش کرده بودند [۲۳]. این تداوم، اهمیت کاهش هدفمند این منبع را برجسته می‌کند.

همچنین، سهم قابل توجه بخش نفت و گاز با نتایج وهاب‌پور و همکاران (۲۰۱۸) همخوان است که ایران را سومین کشور بزرگ در سوزاندن گاز در سال ۲۰۱۵ معرفی کرده بودند [۲۴]. مشاهدات ماهواره‌ای این مطالعه، تأییدی مستقل و به‌روز از وسعت این انتشارها ارائه می‌دهد. یافته‌ها ضرورت تدوین سیاست‌های قوی برای کاهش انتشار متان و تحقق تعهدات توافق پاریس را برجسته می‌کند. پیشنهادها شامل توسعه سامانه‌های پیشرفته تشخیص نشت، بهینه‌سازی فرآیندهای صنعتی، و سرمایه‌گذاری هدفمند در فناوری‌های کنترل انتشار است.

الگوهای موفق جهانی، مانند برنامه ابرانتشاردهنده متان سازمان حفاظت محیط‌زیست آمریکا (US EPA)، نشان می‌دهند که داده‌های ماهواره‌ای می‌توانند ابزار نظارت و اجرای مؤثر سیاست‌ها باشند [۳۴]. با این حال، در ایران موانع اقتصادی ناشی از یارانه‌های سنگین انرژی و موانع فناورانه ناشی از تحریم‌ها، اجرای این اقدامات را دشوار می‌سازد [۳۵].

پیشرفت فناوری‌های ماهواره‌ای فرصت‌های مهمی برای ارتقاء دقت پایش فراهم کرده است. ترکیب داده‌های Sentinel-5P با ماهواره‌های وضوح بالا مانند GHGSat، PRISMA، Sentinel-2 و Sentinel-3، همراه با اعتبارسنجی زمینی، می‌تواند برآورد منابع کوچک‌تر را ممکن سازد. به‌کارگیری مدل‌های پیشرفته انتقال جوی، همچون GEOS-Chem، و تمرکز مطالعات آینده بر منابع مشخص (مانند کارایی سوزاندن در میادین نفت و گاز یا محل‌های دفن زباله)، می‌تواند به دقت و کارایی راهکارهای کاهش کمک کند.

ماموریت‌های جدیدی چون Carbon Mapper، MethaneSAT و GeoCarb امکان ردیابی تقریباً بلادرنگ انتشارها را فراهم خواهند ساخت و مسیر را برای اجرای مؤثرتر سیاست‌ها و ارزیابی مستمر نتایج کاهش هموار می‌کنند.

نتیجه‌گیری

این تحقیق، تحلیل مکانی-زمانی جامعی از انتشار گاز متان در ایران در بازه زمانی ۲۰۱۹ تا ۲۰۲۳ با بهره‌گیری از داده‌های ماهواره‌ای Sentinel-5P TROPOMI ارائه می‌دهد. نتایج نشان‌دهنده روند نگران‌کننده و

علاوه بر مناطق اصلی تولید نفت و گاز، در برخی ماه‌ها انتشارات قابل‌توجهی در مجاورت استان تهران مشاهده شد. این مشاهدات با یافته‌های محمدی و آخوندزاده (۲۰۲۳/۱۴۰۲) هم‌خوانی دارد که محل دفن زباله آرادکوه در کهریزک را به‌عنوان منبعی پایدار و قابل‌توجه برای انتشار متان با غلظت‌های تقریبی ۱۹۷۰ ppm شناسایی کرده بودند [۲۳].

شناسایی مکرر این دو منطقه—مناطق غنی از منابع هیدروکربنی در جنوب و محل دفن زباله تهران—به‌عنوان نقاط داغ پایدار در بازه‌های زمانی مختلف و مطالعات مستقل، بر اهمیت آن‌ها به‌عنوان اهداف اولویت‌دار برای اقدامات کاهش هدفمند تأکید می‌کند. تمرکز انتشارات متان در منابع انسانی‌محور و قابل شناسایی نشان می‌دهد که مداخلات متمرکز می‌توانند به‌طور بالقوه کاهش قابل‌توجهی در ردپای متان ملی ایران به همراه داشته باشند.

بحث

یافته‌های این مطالعه نشان‌دهنده روند صعودی هشداردهنده در انتشار متان ایران از سال ۲۰۱۹ تا ۲۰۲۳ است، به‌طوری که میانگین سالانه غلظت‌ها همواره بالاتر از آستانه ۱۸۰۰ ppb قرار داشته است. این افزایش پایدار با روند جهانی رشد بودجه متان همسو بوده و فعالیت‌های انسانی، به‌ویژه در بخش‌های سوخت فسیلی و کشاورزی، مهم‌ترین محرک‌های آن به شمار می‌آیند. همبستگی قوی بین نقاط داغ متان و مناطق دارای فعالیت‌های متمرکز نفت و گاز در جنوب و جنوب‌غرب ایران، این برداشت را تقویت می‌کند که صنعت نفت و گاز از عوامل اصلی انتشار CH₄ در کشور و جهان است.

چالش انتشار با پدیده انتشارات فراری (نشت‌های ناخواسته و سوزاندن ناقص) پیچیده‌تر می‌شود و اندازه‌گیری دقیق و کنترل مؤثر را دشوار می‌سازد. تغییرات فصلی، با اوج‌گیری انتشارات در پاییز و زمستان، بیانگر آسیب‌پذیری‌های عملیاتی در بخش انرژی است که احتمالاً با افزایش تقاضای گاز برای گرمایش و کاهش کارایی سامانه‌های کنترل نشت در دماهای پایین مرتبط است.

افزایش مداوم انتشار متان، با وجود تعهدات ایران در توافق پاریس، نشان‌دهنده شکاف در اجرای سیاست‌های اقلیمی است. این وضعیت چالش‌های جدی کشورهای تولیدکننده سوخت فسیلی را در گذار به الگوهای کم‌انتشار آشکار می‌سازد؛ به‌ویژه زمانی که محدودیت‌های ژئوپلیتیکی مانند تحریم‌ها یا سیاست‌های داخلی همچون یارانه سنگین انرژی، انگیزه سرمایه‌گذاری در کاهش انتشار را کاهش می‌دهند.

روش‌شناسی مطالعه با بهره‌گیری از داده‌های Sentinel-5P TROPOMI و پردازش آن‌ها در بستر GEE، امکان پایش مستمر و در مقیاس ملی را با وضوح مکانی نسبتاً بالا (۵/۵ × ۷ کیلومتر) فراهم کرد. این رویکرد محدودیت‌های روش‌های زمینی سنتی را تا حد زیادی برطرف نمود و قابلیت پردازش کارآمد داده‌های مکانی-زمانی وسیع را فراهم ساخت.

Environmental science & technology, 2022. 56(4): p. 2143-2152. <https://doi.org/10.1021/acs.est.1c04873>

[4] Shindell, D., et al., *Global methane assessment: Benefits and costs of mitigating methane emissions*. 2021, United Nations Environment Programme.

[5] Alvarez, R.A., et al., *Assessment of methane emissions from the US oil and gas supply chain*. Science, 2018. 361(6398): p. 186-188. <https://doi.org/10.1126/science.aar7204>

[6] Zhang, Y., et al., *Quantifying methane emissions from the largest oil-producing basin in the United States from space*. Science advances, 2020. 6(17): p. eaaz5120. <https://doi.org/10.1126/sciadv.aaz5120>

[7] Jacob, D.J., et al., *Satellite observations of atmospheric methane and their value for quantifying methane emissions*. Atmospheric Chemistry and Physics, 2016. 16(22): p. 14371-14396. <https://doi.org/10.5194/acp-16-14371-2016>

[8] UNFCCC, *The paris agreement*. United Nations, 2015.

[9] Kyoto Protocol United Nations framework convention on climate change. Kyoto Protocol, Kyoto, 1997. 19(8): p. 1-21.

[10] Mousavi, A., et al., *A policy context and process analysis to implement the Paris Agreement on climate change in the health system of Iran*. BMC Public Health, 2025. 25(1): p. 893. <https://doi.org/10.1186/s12889-025-22029-3>

[11] Yousef, S., *Iran's commitments toward meeting the goals of Paris Agreement: harnessing the global temperature rise*. Региональные проблемы, 2018. 21(3-1): p. 112-114. [https://doi.org/10.31433/1605-220X-2018-21-3\(1\)-112-114](https://doi.org/10.31433/1605-220X-2018-21-3(1)-112-114)

[12] Sabory, N.R., M.S.S. Danish, and T. Senjyu, *Afghanistan's Energy and Environmental Scenario*, in *Energy and Environmental Outlook for South Asia*. 2020, CRC Press. p. 17-38. <https://doi.org/10.1201/9781003131878-2>

[13] Oyewunmi, T., *Transnational Approaches to Controlling Methane Emissions from Oil and Gas Operations (Chapter 13)*. Reducing Emissions of Short-Lived Climate Pollutants: Perspectives on Law and Governance (Brill, 2023) pp, 2023: p. 364-391. https://doi.org/10.1163/9789004684089_015

[14] Boyd, R., J. Turner, and B. Ward, *Intended nationally determined contributions: what are the implications for greenhouse gas emissions in 2030?* 2015.

[15] Yoshida, Y., et al., *Retrieval algorithm for CO₂ and CH₄ column abundances from short-wavelength infrared spectral observations by the Greenhouse gases observing satellite*. Atmospheric Measurement Techniques, 2011. 4(4): p. 717-734. <https://doi.org/10.5194/amt-4-717-2011>

[16] Inoue, M., et al., *Validation of XCO₂ derived from SWIR spectra of GOSAT TANSO-FTS with aircraft measurement data*. Atmospheric Chemistry and Physics, 2013. 13(19): p. 9771-9788. <https://doi.org/10.5194/acp-13-9771-2013>

[17] Sentinels. *Sentinel-5P TROPOMI* [Online]. Available:.. 2017.

افزایشی انتشار متان در کشور است، به‌طوری‌که غلظت‌های میانگین سالانه به‌طور مداوم از آستانه مجاز ۱۸۰۰ ppb مطابق معیارهای IPCC فراتر رفته‌اند. استان‌های جنوبی و جنوب غربی ایران که مرکز فعالیت‌های گسترده نفت و گاز هستند، به‌عنوان کانون‌های بحرانی (نقاط داغ) شناسایی شده‌اند. همچنین، انتشار قابل توجه و پایداری از محل دفن زباله‌های تهران گزارش شده است. علاوه بر این، الگوی فصلی مشخصی مشاهده شد که بیشترین میزان انتشار در ماه‌های پاییز و زمستان به ثبت رسیده است. این یافته‌ها چالش جدی مدیریت و کنترل انتشار متان در ایران را برجسته می‌سازد و اهمیت استفاده از داده‌های ماهواره‌ای Sentinel-5P TROPOMI که با پلتفرم گوگل ارث انجین پردازش شده‌اند را برای پایش ملی این گاز گلخانه‌ای اثبات می‌کند.

نتایج این پژوهش، داده‌های مستقل و قابل اطمینانی فراهم می‌کند که می‌تواند به شکل مؤثری سیاست‌های اقلیمی ایران را جهت تحقق تعهدات بین‌المللی و توسعه استراتژی‌های هدفمند کاهش انتشار متان یاری رساند. با توجه به روند رو به رشد انتشار، ضرورت اجرای سیاست‌های قوی و کارآمد کاهش انتشار گاز متان در ایران امری فوری و حیاتی است. این اقدامات باید شامل نصب و راه‌اندازی سیستم‌های پیشرفته تشخیص نشت، بهینه‌سازی فرآیندهای صنعتی و سرمایه‌گذاری در فناوری‌های نوین کنترل انتشار باشد. در نهایت، پایش ماهواره‌ای مستمر و تحقیقات تکمیلی برای ارزیابی اثربخشی این سیاست‌ها و دستیابی به کاهش‌های معنادار در انتشار متان ضروری بوده و می‌تواند نقشی کلیدی در تلاش‌های جهانی مقابله با تغییرات اقلیمی ایفا کند.

مشارکت نویسندگان

در این مقاله، نویسندگان به نسبت برابر مشارکت داشته‌اند.

تشکر و قدردانی

بدین وسیله از همکاری که ما را در انجام این تحقیق یاری کردند، صمیمانه تشکر می‌کنیم.

تعارض منافع

«هیچگونه تعارض منافع توسط نویسندگان بیان نشده است.»

منابع و مآخذ

[1] Dubey, L., J. Cooper, and A. Hawkes, *Minimum detection limits of the TROPOMI satellite sensor across North America and their implications for measuring oil and gas methane emissions*. Science of The Total Environment, 2023. 872: p. 162222. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2023.162222>

[2] Rogelj, J., et al., *Paris Agreement climate proposals need a boost to keep warming well below 2 C*. Nature, 2016. 534(7609): p. 631-639. <https://doi.org/10.1038/nature18307>

[3] Irakulis-Loitxate, I., et al., *Satellites detect abatable super-emissions in one of the world's largest methane hotspot regions*.

sixth assessment report of the intergovernmental panel on climate change, 2021. 2(1): p. 2391.

[33] Solomon, S., et al., *AR4 Climate Change 2007: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. 2007, Cambridge University Press, Cambridge, UK.

[34] Agency, U.S.E.P. *Methane super-emitter program*. 2025 [cited 2025 Retrieved August 9, 2025].

[35] Kohan, B.G. and H. Dahouei, *Reforming Iran's Energy Policy: Strategies for Sustainability, Subsidies, and Global Integration*. journal of public & international affairs, 2025.

[18] TROPOMI. *TROPOMI-TROPOspheric Monitoring Instrument*. Available:.. 2017.

[19] Pandey, S., et al., *Daily detection and quantification of methane leaks using Sentinel-3: a tiered satellite observation approach with Sentinel-2 and Sentinel-5p*. Remote Sensing of Environment, 2023. 296: p. 113716. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2023.113716>

[20] Sadavarte, P., et al., *Methane emissions from superemitting coal mines in Australia quantified using TROPOMI satellite observations*. Environmental Science & Technology, 2021. 55(24): p. 16573-16580. <https://doi.org/10.1021/acs.est.1c03976>

[21] Liu, M., et al., *A new divergence method to quantify methane emissions using observations of Sentinel-5P TROPOMI*. Geophysical Research Letters, 2021. 48(18): p. e2021GL094151. <https://doi.org/10.1029/2021GL094151>

[22] Maasakkers, J.D., et al., *Using satellites to uncover large methane emissions from landfills*. Science Advances, 2022. 8(31): p. eabn9683. <https://doi.org/10.1126/sciadv.abn9683>

[23] Mohammadi, M. and M. Akhoondzadeh, *Monitoring and detection of methane gas in Tehran in Google Earth Engine*. Journal of Geoinformatics in Civil Engineering, 2023. 1(1): p. 41-52.

[24] Vahabpour, A., et al., *A study on environmental effects of gas flaring in Iran and its role for the country's commitments in Paris agreement*. Strategic Studies of public policy, 2018. 8(27): p. 133-154.

[25] Matthews, R. and H.F. Nashli, *The archaeology of Iran from the Palaeolithic to the Achaemenid empire*. 2022: Routledge. <https://doi.org/10.4324/9781003224129>

[26] Zarrinkafsh, M.K., *"Geomorphological Characteristics of the Zagros and Alborz Mountain Ranges"*. Iranian Journal of Earth Sciences, 2003: p. 1(1), 1-14.

[27] Iran, I. *Iran-Greece Chamber of Commerce*. 2019.

[28] Lorente, A., et al., *Accounting for surface reflectance spectral features in TROPOMI methane retrievals*. Atmospheric Measurement Techniques Discussions, 2022. 2022: p. 1-15. <https://doi.org/10.5194/amt-2022-255>

[29] Hossein, A.A. *Google Earth Engine*. Available:.. 2018.

[30] Gorelick, N., et al., *Google Earth Engine: Planetary-scale geospatial analysis for everyone*. Remote sensing of Environment, 2017. 202: p. 18-27. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2017.06.031>

[31] Butz, A., et al., *TROPOMI aboard Sentinel-5 Precursor: Prospective performance of CH₄ retrievals for aerosol and cirrus loaded atmospheres*. Remote sensing of environment, 2012. 120: p. 267-276. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2011.05.030>

[32] Masson-Delmotte, V., et al., *Climate change 2021: the physical science basis*. Contribution of working group I to the

معرفی نویسندگان

AUTHOR(S) BIOSKETCHES



بهناز بابائی فارغ‌التحصیل کارشناسی ارشد رشته مهندسی نقشه‌برداری-ژئودزی از دانشگاه زنجان در سال ۱۴۰۴ می‌باشد و علایق تحقیقاتی او شامل شناسایی و مکان‌یابی نقاط انتشار، پایش تغییرات و بررسی تأثیرات انتشار گاز گلخانه‌ای متان به خصوص در بخش صنعت نفت و گاز در کشور ایران است.

Babaei, B. Department of Geomatics Engineering, Faculty of Engineering, University of Zanjan, Zanjan, Iran

✉ behnaz3598@gmail.com



رضا دوستی استادیار گروه مهندسی نقشه‌برداری دانشگاه زنجان است. ایشان مدرک کارشناسی ارشد خود را سال ۱۳۹۱ در رشته مهندسی نقشه‌برداری گرایش ژئودزی از دانشگاه زنجان و مدرک دکتری خود را سال ۱۴۰۰ در رشته ژئوفیزیک و ژئودزی از دانشگاه تحصیلات تکمیلی علوم پایه زنجان اخذ نموده‌اند. پژوهش‌های اخیر ایشان در زمینه مدل‌سازی عددی تحولات ژئودینامیکی زمین و همچنین مبانی ریاضیاتی سیستم‌های مختصات و سیستم‌های تصویر می‌باشد.

Dousti, R. Assistant Professor at the Department of Geomatics Engineering, Faculty of Engineering, University of Zanjan, Zanjan, Iran

✉ r_dousti@znu.ac.ir



سینا کیانی دارای تحصیلات کارشناسی و کارشناسی ارشد از دانشگاه زنجان در رشته مهندسی نقشه‌برداری. وی از سال ۱۳۹۹ در مقطع دکتری در رشته مهندسی نقشه‌برداری-سیستم اطلاعات مکانی مشغول به تحصیل می‌باشد. فعالیت پژوهشی ایشان در



در حال حاضر به عنوان کارشناس و محقق سنجش از دور در پژوهشگاه فضایی ایران مشغول به فعالیت است. حوزه تخصصی ایشان شامل پایش آتش سوزی جنگل ها و مراتع، تحلیل و تغییرات کاربری اراضی، و پایش محصولات کشاورزی با بهره گیری از داده ها و تصاویر ماهواره ای است. تمرکز اصلی فعالیت های او بر توسعه مدل های مکانی دقیق و کاربردی جهت مدیریت بهینه منابع طبیعی و پایش تغییرات محیطی است.

Abdi. A.H, M.Sc. in Remote Sensing and GIS, Researcher at the Iranian Space Research Center, Iran

✉ Amir.h1547@gmail.com

حشمت کرمی مدرک کارشناسی ارشد خود را در رشته سنجش از دور و GIS از دانشگاه هرمزگان در سال ۱۳۹۵ دریافت کرده و در حال حاضر دانشجوی دکتری سنجش از دور و GIS در دانشگاه تهران و پژوهشگر پژوهشگاه فضایی ایران است. فعالیت های پژوهشی وی بر کاربردهای سنجش از دور و GIS در حوزه های مختلفی چون پایش ماهواره ای زیست محیطی مانند جنگل ها، تالاب ها، آب های زیرزمینی و سایر کاربردهای مرتبط متمرکز است. زمینه های تخصصی او شامل پردازش تصاویر ماهواره ای، سری زمانی و کاربردهای سنجش از دور و GIS در مدیریت زمین می باشد.

Karami .H, PhD student in Remote Sensing and GIS, Researcher at the Iranian Space Research Center, Iran

✉ heshmat.karami@ut.ac.ir

زمینه کاهش گازهای گل خانه ای و همچنین ایجاد بسترها و استانداردهای مورد نیاز در حیطه نفت و گاز می باشد.

Kiaei, S. Department of Geomatics Engineering, Faculty of Engineering, University of Zanjan, Zanjan, Iran

✉ sina61ir@yahoo.com



اسلام جوادنیا استادیار گروه مهندسی نقشه برداری در دانشکده مهندسی دانشگاه زنجان است. ایشان مدرک کارشناسی ارشد و دکتری خود را در رشته مهندسی نقشه برداری - سنجش از دور به ترتیب در سال های ۱۳۸۶ و ۱۳۹۶ از دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی دریافت کرده اند. فعالیت های پژوهشی

اخیر ایشان در زمینه کاربرد یادگیری ماشین در برآورد پارامترهای جوی از تصاویر ماهواره ای و همچنین به کارگیری سنجش از دور در پایش تغییرات اقلیمی، کشاورزی، مدیریت جنگل ها، مدیریت کاربری و پوشش اراضی و مدل سازی محیطی با استفاده از داده های سنجش از دور متمرکز است. زمینه های تخصصی وی عبارت اند از پردازش تصاویر اپتیک و راداری، یادگیری ماشین و توسعه کاربردهای سنجش از دور.

Javadnia, E. Assistant Professor at the Department of Geomatics Engineering, Faculty of Engineering, University of Zanjan, Zanjan, Iran

✉ Javadnia@znu.ac.ir

امیر حسین عبدی دارای مدرک کارشناسی ارشد سنجش از دور و سیستم اطلاعات جغرافیایی (GIS) از دانشگاه هرمزگان می باشد.

Citation (Vancouver): Babaei B, Dousti R, Javadnia E, Kiaei S, H Abdi A, Karami H. [Monitoring methane emissions in Iran using Sentinel-P5 satellite data: Analyzing emission trends and identifying critical sources (2019-2023)]. *J. RS. GEOINF. RES.* 2025; 3(2): 333-344

doi <https://doi.org/10.22061/jrsgr.2025.12508.1109>



COPYRIGHTS

© 2025 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/>)



ORIGINAL RESEARCH PAPER

Design and Development of an Intelligent Web-Based Spatial Decision Support System for Optimal Allocation of Local Disaster Response Centers

A. Parvini, A.A. AleSheikh*

Geospatial Information Systems Department, Faculty of Surveying Engineering, K. N. Toosi University of Technology, Tehran, Iran

ABSTRACT

Received: 28 April 2025
Reviewed: 19 June 2025
Revised: 02 October 2025
Accepted: 30 December 2025

KEYWORDS:

Spatial Decision-Support System
Distribution of Relief-Items
Web-based System
Disaster Management
Genetics and Tabu Algorithms

* Corresponding author:

alesheikh@kntu.ac.ir

(+9821) 88786212

Background and Objectives: Optimal management of humanitarian supply chains and distribution of relief items after natural disasters is a major challenge in the field of crisis management. Despite the importance of optimal allocation of local distribution centers in post-disaster situations, many existing decision-making tools lack spatial capabilities, flexibility in scenario building, and ease of access. Aiming to fill the gap in previous studies, this paper designs a web-based system that utilizes geographic information systems (GIS) and meta-heuristic algorithms to enable optimal allocation of distribution centers and management of relief items.

Methods: In this study, an intelligent web-based spatial decision support system has been developed that helps decision makers allocate relief distribution centers more efficiently in different post-crisis scenarios. This system consists of three main parts, including a database, a decision engine, and a web-based user interface, and can be fully implemented in a browser without the need to install additional software. Also, genetic and forbidden search algorithms have been integrated to optimize resource allocation and distribution of relief items in this system. Users can edit input data, define different scenarios, and visually view the results on a map. In this system, common uncertainties after disasters, including different rates of affected populations, as well as five different planning periods ranging from 8 to 72 hours (i.e. 8, 16, 24, 48, and 72 hours), have been considered. The system's high flexibility in defining and analyzing various scenarios makes it an effective tool for improving decision-making in planning relief aid distribution operations.

Findings: Results show that the proposed hybrid algorithm has been able to improve the optimal allocation of distribution centers and the effective distribution of items and reduce the amount of unmet demand. However, depending on the number of iterations of the algorithm, different scenarios, and some input parameters, the results have sometimes been unstable, which can be investigated and analyzed more precisely in future studies.

Conclusion: This study presents a comprehensive, web-based decision support system for the optimal management of relief distribution, which can significantly increase the efficiency of crisis operations. The combined use of meta-heuristic algorithms and geographic data in this system enables rapid response and accurate decision-making. Future development and improvements of this system can include support for different types of items and diverse disaster situations to play a more effective role in reducing human and financial losses.



NUMBER OF REFERENCES
34



NUMBER OF FIGURES
13



NUMBER OF TABLES
6

مقاله پژوهشی

طراحی و توسعه سیستم هوشمند پشتیبان تصمیم‌گیری مکانی مبتنی بر وب برای بهینه‌سازی تخصیص مراکز توزیع محلی پاسخ به بلایا

امیر پروینی، علی اصغر آل شیخ*

گروه سیستم‌های اطلاعات مکانی، دانشکده مهندسی نقشه برداری، دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی، تهران، ایران

چکیده

هدف: مدیریت بهینه زنجیره تأمین بشردوستانه و توزیع اقلام امدادی پس از بلایای طبیعی از چالش‌های مهم در حوزه مدیریت بحران است. با وجود اهمیت تخصیص بهینه مراکز توزیع محلی در شرایط پس از بحران، از جمله زلزله، بسیاری از ابزارهای تصمیم‌گیری موجود فاقد قابلیت‌های مکانی، انعطاف‌پذیری در سناریوسازی و سهولت دسترسی هستند. این مقاله باهدف پر کردن خلأ موجود در مطالعات پیشین، سامانه‌ای مبتنی بر وب طراحی کرده است که با بهره‌گیری از قابلیت‌های سیستم اطلاعات مکانی (GIS) و الگوریتم‌های فرا ابتکاری، امکان تخصیص بهینه مراکز توزیع و مدیریت اقلام امدادی را فراهم می‌آورد.

روش: در این مطالعه، یک سامانه هوشمند پشتیبانی تصمیم‌گیری مکانی مبتنی بر وب توسعه داده شده است که به تصمیم‌گیرندگان کمک می‌کند تا مراکز توزیع کمک‌های امدادی را به صورت کارآمدتری در سناریوهای مختلف پس از بحران تخصیص دهند. این سامانه از سه بخش اصلی شامل پایگاه داده، موتور تصمیم‌گیری و رابط کاربری تحت وب تشکیل شده و امکان اجرای کامل آن در مرورگر، بدون نیاز به نصب نرم‌افزار اضافی، فراهم شده است. همچنین از ترکیب الگوریتم‌های ژنتیک و جستجوی ممنوعه برای بهینه‌سازی تخصیص منابع و توزیع اقلام امدادی در این سامانه استفاده شده است. در این سامانه کاربران می‌توانند داده‌های ورودی را ویرایش کرده، سناریوهای مختلف را تعریف کرده و نتایج را به صورت بصری بر روی نقشه مشاهده کنند. در این سامانه، عدم قطعیت‌های رایج پس از وقوع بلایای طبیعی، از جمله نرخ‌های متفاوت جمعیت آسیب‌دیده و همچنین پنج دوره زمانی برنامه‌ریزی مختلف در بازه ۸ تا ۷۲ ساعت (۸، ۱۶، ۲۴، ۴۸ و ۷۲ ساعت) در نظر گرفته شده‌اند. انعطاف‌پذیری بالای سامانه در تعریف و تحلیل سناریوهای متنوع، آن را به ابزاری مؤثر برای بهبود تصمیم‌گیری در برنامه‌ریزی عملیات توزیع کمک‌های امدادی تبدیل می‌کند.

یافته‌ها: نتایج نشان می‌دهد که الگوریتم ترکیبی پیشنهادی توانسته است تخصیص بهینه مراکز توزیع اقلام را بهبود بخشد و میزان تقاضای برآورده نشده را کاهش دهد. هرچند، بسته به تعداد تکرار الگوریتم در سناریوهای مختلف و تغییر پارامترهای ورودی، نتایج گاهی ناپایدارند که می‌توانند در مطالعات آتی موردبررسی و تحلیل دقیق‌تری قرار گیرند.

نتیجه‌گیری: این مطالعه سامانه‌ای جامع و مبتنی بر وب برای پشتیبانی تصمیم‌گیری در مدیریت بهینه توزیع اقلام امدادی ارائه داده است که می‌تواند کارایی عملیات بحران را به طور قابل توجهی افزایش دهد. استفاده ترکیبی از الگوریتم‌های فرا ابتکاری و داده‌های مکانی در این سامانه، امکان پاسخگویی سریع و تصمیم‌گیری دقیق را فراهم می‌سازد. توسعه و بهبودهای آتی این سامانه می‌تواند شامل پشتیبانی از انواع مختلف اقلام و شرایط بحرانی متنوع باشد تا نقش مؤثرتری در کاهش خسارات انسانی و مالی ایفا کند.

تاریخ دریافت: ۰۸ اردیبهشت ۱۴۰۴
تاریخ داوری: ۲۹ خرداد ۱۴۰۴
تاریخ اصلاح: ۱۰ مهر ۱۴۰۴
تاریخ پذیرش: ۰۹ دی ۱۴۰۴

واژگان کلیدی:

سامانه پشتیبان تصمیم‌گیر مکانی
توزیع اقلام امدادی
سامانه تحت وب
مدیریت بحران
الگوریتم‌های ژنتیک و جستجوی ممنوعه

* نویسنده مسئول

alesheikh@kntu.ac.ir

© ۲۱-۸۸۷۸۶۲۱۲

مقدمه

همواره بر این نکته تأکید می‌شود که سرعت و دقت در تصمیم‌گیری که مبتنی بر اطلاعات موثق و به‌روز باشد، نقش تعیین‌کننده‌ای در کیفیت واکنش به بحران‌ها ایفا می‌کنند [۱]. مدیریت مؤثر بلایای طبیعی نیازمند هماهنگی دقیق و هدفمند بین فرآیندهای تصمیم‌گیری در حوزه لجستیک بشردوستانه و استفاده بهینه از داده‌ها و اطلاعات مکانی است. ضرورت این کارایی در پاسخگویی به بحران‌ها، با توجه به تجربیات ناگوار گذشته مانند طوفان کاترینا، بیش‌ازپیش نمایان شده است [۲].

در محیط‌های شهری امروزی، بلایای طبیعی مانند زلزله می‌توانند منجر به اختلال در نظم زندگی روزمره و آسیب‌های زیرساختی شهری شده و نیازهای گسترده و غیرقابل‌پیش‌بینی را به وجود بیاورند. چنین وقایعی معمولاً با ناپایداری مکانی، محدودیت منابع، فشار زمانی و دشواری دسترسی به مناطق آسیب‌دیده همراه هستند که برنامه‌ریزی امدادرسانی را پیچیده‌تر کرده و اهمیت رویکردهای تحلیلی و سامانه‌های پشتیبان تصمیم‌گیری را برجسته‌تر می‌سازد. در حوزه مدیریت بحران،

سیستم پیشنهادی این مقاله، به تخصیص بهینه مراکز توزیع محلی با بهره‌گیری از ترکیب الگوریتم‌های فرا ابتکاری ژنتیک (همراه با مکانیسم تنظیم پویای پارامترها با استفاده از الگوریتم یادگیری تقویتی) و جستجوی ممنوعه می‌پردازد. این سیستم به کاربران امکان می‌دهد با تنظیم پارامترهای مربوط به عدم قطعیت، سناریوهای مختلفی را شبیه‌سازی کرده و نتایج را بر روی نقشه مشاهده کنند. علاوه بر آن، کاربران قادر به افزودن مراکز بر روی نقشه تعاملی و ذخیره اطلاعات مکانی و توصیفی آن‌ها در پایگاه داده سیستم می‌باشند تا برای بهینه‌سازی مدل لجستیک طراحی‌شده از آن‌ها استفاده شود. انعطاف‌پذیری این سیستم قابلیت تعریف سناریوهای عدم قطعیت و حتی تنظیم پارامترهای مدل بهینه‌سازی با تعریف پیکربندی‌های مختلف را برای کاربر فراهم می‌کند. همچنین کاربر می‌تواند مدل را برای مناطق مختلف شهر تحت تأثیر بلایای طبیعی اجرا نموده و از گزارش‌های سیستم برای برنامه‌ریزی توزیع کمک‌های امدادی استفاده کند. گزارش‌های دریافتی از این سیستم نقش مهمی در برنامه‌ریزی توزیع اقلام امدادی ایفا می‌کند. به‌عنوان مثال، کاربر می‌تواند مشاهده کند چه مقدار کالا از کدام مراکز توزیع محلی به کدام نقاط تقاضا باید ارسال شود. همچنین، میزان تقاضای برآورده نشده و کالای اضافی ذخیره‌شده در مراکز توزیع نیز قابل‌بررسی است. نتایج تجربی نشان می‌دهد که ادغام ابزارهای توسعه وب، مدل‌سازی ریاضی چندهدفه و جستجوی ابتکاری می‌تواند راهکاری عملی برای بهبود کارایی توزیع اقلام امدادی در شرایط واقعی فراهم آورد.

مرور پیشینه تحقیق

در این بخش، مروری کوتاه بر ادبیات موجود درباره سامانه‌های پشتیبانی تصمیم‌گیری در مدیریت بحران ارائه‌شده است. این بخش به دو زیرمجموعه تقسیم‌شده است. در بخش اول، زنجیره تأمین معرفی می‌شوند و بخش بعدی به سیستم پشتیبانی تصمیم‌گیر مکانی برای تخصیص تسهیلات و توزیع اقلام امدادی اختصاص دارد.

زنجیره تأمین

توزیع بهینه اقلام امدادی و تخصیص راهبردی منابع در شرایط پس از بحران، از عوامل تعیین‌کننده در کاهش مخاطرات انسانی و تسهیل فرایند باز توانی و بازسازی محسوب می‌شود. در این راستا، استقرار و به‌کارگیری زنجیره‌های تأمین انسانی کارآمد نقشی حیاتی ایفا می‌کند؛ چراکه این زنجیره‌ها بستر لازم را برای انتقال به‌موقع، کارآمد و عادلانه منابع حیاتی به جوامع آسیب‌دیده فراهم می‌سازند. به‌کارگیری رویکردهای مدیریت یکپارچه زنجیره تأمین و استفاده از فناوری‌های نوین در ردیابی و تخصیص منابع، می‌تواند به شکل چشمگیری در افزایش تاب‌آوری سامانه‌های امدادرسانی و به حداقل رساندن خسارات انسانی مؤثر واقع شود. در سال‌های اخیر بهینه‌سازی زنجیره‌های تأمین انسانی به دلیل افزایش فراوانی و شدت بلایای طبیعی و همچنین بحران‌های ناشی از درگیری‌های انسانی و سیاسی، بیش‌ازپیش

پیامدهای مدیریت ضعیف واکنش به بحران شامل افزایش تلفات و رنج، تخریب زیرساخت‌ها و اختلال در خدمات ضروری است. این اثرات نامطلوب که اغلب با تأخیر یا تخصیص نادرست منابع امدادی تشدید می‌شوند، نیاز حیاتی به سامانه‌های پشتیبانی تصمیم‌گیری (DSS) را برجسته می‌کنند که می‌توانند سرعت، دقت و اثربخشی فعالیت‌های واکنش به بحران را افزایش دهند. سامانه‌های پشتیبانی تصمیم‌گیری رایج در این حوزه بر بهینه‌سازی تخصیص منابع، مکان‌یابی تأسیسات و مدیریت زنجیره تأمین در شرایط عدم قطعیت و کمبود منابع متمرکز بوده‌اند. لذا تخصیص بهینه مراکز توزیع محلی و انتخاب کارآمد مسیرهای انتقال، از عوامل کلیدی در توزیع به‌موقع اقلام امدادی محسوب می‌شوند و نقش تعیین‌کننده‌ای در کاهش خسارات انسانی و ارتقای کارایی عملیات خدمت‌رسانی ایفا می‌کنند [۳].

یکی از مهم‌ترین چالش‌های لجستیکی پس از بلایای طبیعی، تخصیص تسهیلات امدادی برای توزیع سریع و کارآمد کمک‌های امدادی است. طراحی و اجرای مراکز واکنش موقت به بحران (TDR) که به‌عنوان تأسیسات محلی برای ارائه کمک‌های ضروری به قربانیان در بلافاصله پس از فاجعه عمل می‌کنند، بسیار مهم است. مراکز TDR به‌عنوان گره‌های حیاتی در شبکه لجستیک بشردوستانه عمل می‌کنند و شکاف بین مراکز امدادی و جمعیت‌های آسیب‌دیده را در طول دوره عملیات امداد در مقیاس بزرگ‌تر، پر می‌کنند [۴]. پس از وقوع بلایای طبیعی، قربانیان به دلیل عدم دسترسی به اقلام ضروری مانند آب آشامیدنی، مواد غذایی، کیت‌های پزشکی و چادرهای امدادی با مشکلات جدی مواجه می‌شوند. این چالش عمدتاً ناشی از دشواری دسترسی گروه‌های امدادی به مناطق آسیب‌دیده در زمان مناسب است؛ به‌ویژه در شرایط آشفته و ناپایداری که معمولاً پس از یک فاجعه بزرگ حاکم می‌شود [۵]. در چنین شرایطی، بهره‌گیری از ظرفیت مراکز محلی نظیر مدارس، مساجد و دانشگاه‌ها مستقیماً بر توانایی تأمین نیازهای اولیه تأثیر می‌گذارد و در نتیجه تلفات و رنج ثانویه در بین بازماندگان را کاهش می‌دهد.

طراحی سامانه‌ای کارآمد برای مدیریت زنجیره تأمین در شرایط بحرانی و چالش‌برانگیز، مستلزم در نظر گرفتن معیارهای متعدد و متنوعی است. این امر شامل حداقل سازی فواصل حمل‌ونقل، تأمین تقاضای آسیب‌دیدگان و مدیریت بهینه موجودی در مراکز توزیع است. علاوه بر این، ماهیت پویا و متغیر میدان عملیات، مانند اختلال احتمالی در شبکه‌های ارتباطی و نوسانات تقاضا در بازه‌های زمانی مختلف، ضرورت طراحی سامانه‌هایی منعطف و مبتنی بر وب را دوچندان می‌کند تا امکان مدیریت کارآمد و واکنش سریع در مواجهه با این چالش‌ها فراهم شود. مطالعات گسترده‌ای در زمینه بهینه‌سازی لجستیک بشردوستانه انجام‌شده است، اما همچنان نیاز به یک سیستم جامع مبتنی بر وب احساس می‌شود که بتواند داده‌های مکانی، مدل‌های ریاضی چندهدفه و الگوریتم‌های جستجوی ترکیبی را برای تخصیص بهینه مراکز توزیع محلی ادغام کند [۶].

می سازد [۱۶]. علاوه بر این، مدل های بهینه سازی برای تحلیل مدیریت بحران درون سازمان ها که تمام اجزای داخلی اصلی را در نظر بگیرد، وجود ندارد که نشان دهنده نیاز مبرم به ایجاد یک چارچوب قابل اعتماد برای مدیریت بحران درون سازمان ها است که شامل اجزای مختلفی مانند شعب منطقه ای و واحدهای عملیاتی می شود.

فوریت عملیات بشردوستانه مستلزم آمادگی و واکنش سریع است و این ضرورت، اهمیت تحلیل و ارزیابی نظام مند رویه های لجستیکی به کاررفته در توزیع کمک های اضطراری در مواجهه با بلایای طبیعی و بحران های بزرگ بین المللی را دوجندان می کند [۱۷]. با توجه به چالش ها و فرصت های موجود در حوزه لجستیک انسانی، طراحی و پیاده سازی سامانه های پشتیبانی تصمیم گیری فضایی به عنوان یکی از محورهای کلیدی و نوظهور در تحقیقات این حوزه مطرح شده است. در این میان، سیستم اطلاعات مکانی (GIS) به عنوان ابزاری قدرتمند و کارآمد نقش بسزایی در مدیریت و بهینه سازی عملیات امداد رسانی ایفا می کند. به طور خاص، این سیستم می تواند در جمع آوری، پردازش و تحلیل داده ها مرتبط با خرابی ها و اختلالات شبکه حمل و نقل پیش از آغاز عملیات امدادی در مرحله پاسخ به فاجعه مورد استفاده قرار گیرد [۷]. علاوه بر این، در فرآیند برنامه ریزی پیش از وقوع بحران، پلتفرم های مبتنی بر سیستم اطلاعات مکانی بستر مؤثری برای پشتیبانی از تصمیم گیری های راهبردی فراهم می کنند. این پلتفرم ها به ذی نفعان و سازمان های مسئول مدیریت بحران امکان می دهند تا با شبیه سازی سناریوهای مختلف، نسبت به برآورد دقیق منابع مورد نیاز، آماده سازی تجهیزات و امکانات و همچنین تعیین مکان های بهینه برای استقرار تأسیسات و منابع امدادی اقدام کنند [۱۸]. چنین رویکردی، ضمن ارتقای کارایی زنجیره های تأمین انسانی، می تواند به کاهش زمان واکنش، افزایش دقت در تخصیص منابع و به حداقل رساندن پیامدهای انسانی و اقتصادی بلایای طبیعی کمک شایانی نماید. در این مقاله زنجیره تأمین دوسطحی در نظر گرفته شده است. همان طور که در شکل ۱ نمایش داده شده است، کالاهای امدادی از پایگاه های امداد به مراکز توزیع محلی در محلات مختلف منطقه ارسال و در آنجا ذخیره می شوند و سپس از این مراکز به نقاط تقاضا ارسال می شوند.

سیستم پشتیبانی تصمیم گیر برای تخصیص تسهیلات و توزیع اقلام امدادی

در مدیریت عملیات بلایای طبیعی، برنامه ریزی و پاسخ مؤثر به بحران ها از اهمیت ویژه ای برخوردار است. سامانه های پشتیبانی تصمیم گیر (DSS) ابزارهای حیاتی برای کمک به تصمیم گیرندگان در شرایط پرفشار و پر از عدم قطعیت پس از بلایا به شمار می روند [۱۹-۲۱]. این سامانه ها با کاهش بار شناختی و ارائه اطلاعات سازمان یافته، فرآیند حل مسئله و تصمیم گیری را بهبود می بخشند. سالوادور و همکاران در سال ۲۰۱۹ تأکید می کنند که زنجیره تأمین بشردوستانه (HSC) نقش مهمی در پاسخ های مؤثر و سریع به بلایای طبیعی و انسان ساخت دارد، اما

مورد توجه محققان و سیاست گذاران قرار گرفته اند. این زنجیره ها به عنوان یک مؤلفه کلیدی در مدیریت بحران و امداد بشردوستانه نقش بسزایی در کاهش پیامدهای انسانی و اجتماعی فجایع طبیعی ایفا می کنند و کارایی آن ها ارتباط مستقیمی با سرعت، دقت و عدالت در تخصیص منابع دارد [۷].

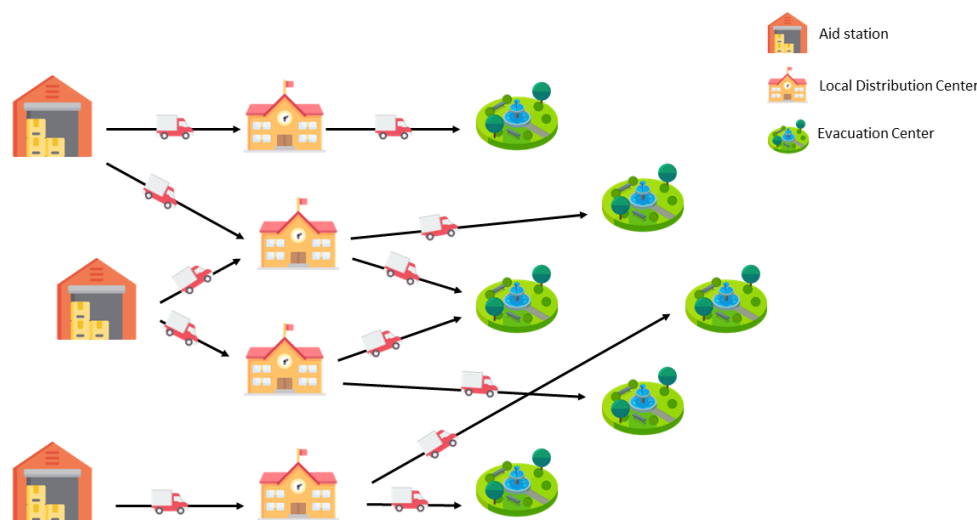
برنامه ریزی یک جنبه حیاتی از زنجیره تأمین است که تأثیرگذاری عملیات امدادی را تعیین می کند و بر اهمیت توزیع به موقع و کافی منابع در بازه های زمانی مشخص برای کاهش تلفات انسانی تأکید می کند [۸]. زنجیره تأمین شامل فعالیت هایی مانند برنامه ریزی، اجرا و مدیریت است که همگی به منظور کاهش آسیب ها و تلفات در طول بلایای طبیعی طراحی شده اند [۹].

یک مرور جامع ادبیات نشان می دهد که تحقیقات زیادی در زمینه بهینه سازی جنبه های مختلف لجستیک انسانی، از جمله طراحی شبکه، مدیریت موجودی و برنامه ریزی حمل و نقل وجود دارد. با این حال، عدم قطعیت ها و پیچیدگی های ذاتی سناریوهای مختلف، توسعه سامانه های پشتیبانی تصمیم گیری تخصصی را که قادر به مقابله با چالش های منحصر به فرد توزیع کمک های انسانی و تخصیص تسهیلات هستند، ضروری می سازد [۱۰]. این چالش ها با این واقعیت که سازمان های بشردوستانه اغلب در محیط هایی با زیرساخت های آسیب دیده، منابع محدود و تعدادی از ذینفعان با نیازها و اولویت های متنوع فعالیت می کنند، تشدید می شوند [۱۱، ۱۲]. علاوه بر این، هماهنگی میان بازیگران مختلف، از جمله نهادهای دولتی، سازمان های غیردولتی و سازمان های کمک رسان بین المللی، برای اطمینان از تحویل کارآمد و مؤثر کمک ها ضروری است [۱۳]. هم چنین کارایی زنجیره های تأمین به شدت به ادغام بی نقص اطلاعات در تمام مراحل عملیات، از ارزیابی اولیه نیازها تا توزیع نهایی، وابسته است که این نیازمند ایجاد شبکه های ارتباطی قوی و سامانه های مدیریت داده است که بتوانند تبادل به موقع و دقیق اطلاعات را بین تمامی ذینفعان تسهیل کنند. بسیاری از مطالعات بر روی مدل های بهینه سازی ریاضی که برای سناریوهای مختلف طراحی شده اند، تمرکز دارند. این مدل ها هدفشان بهبود تصمیم گیری و ساده سازی فرآیندها در لجستیک انسانی است، اما عملکرد آن ها شامل مجموعه ای از فعالیت ها مانند آمادگی، برنامه ریزی، تأمین، حمل و نقل، انبارداری، ردیابی و پیگیری، گمرک و ترخیص کالا می شود [۱۴، ۱۵].

توسعه مدل هایی برای پاسخ سریع به رویدادهای مشابه می تواند با ارائه دستورالعمل های پایه ای برای فرآیند توزیع در زنجیره تأمین، از این فرایند حمایت کند. کارایی در لجستیک، به دلیل تضمین جریان صحیح کالاها از منبع به جمعیت های آسیب دیده، یک عامل کلیدی موفقیت به شمار می آید. عملیات اضطراری نیازمند مدیریت کارآمد است تا تأمین کمک های امدادی به موقع و مؤثر انجام شود؛ با این حال، مدیریت لجستیک انسانی به دلیل خطرات و عدم قطعیت های ناشی از بلایای طبیعی، پیچیده تر است و این امر برنامه ریزی و کاهش ریسک را دشوار

برنامه‌ریزی و دستیابی به اهداف پایداری می‌شوند [۲۲].

چالش‌هایی مانند ادغام ابعاد پایداری (اقتصادی، اجتماعی و زیست‌محیطی) و کمبود سامانه‌های پشتیبانی تصمیم‌گیر مانع از



شکل ۱: زنجیره تأمین بشردوستانه

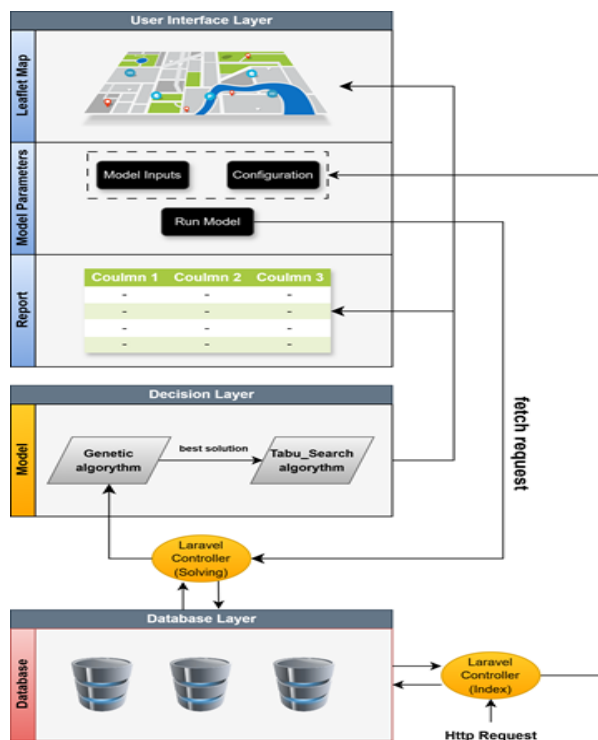
Fig. 1: Humanitarian logistics

سال‌های ۲۰۱۷ و ۲۰۱۹ یک سیستم پشتیبانی تصمیم‌گیر برنامه‌ریزی جامع چندهدفه (multi-objective Master Planning DSS) برای مدیریت زنجیره‌های تأمین بشردوستانه پایدار (SHSCs) پیشنهاد کردند. این سیستم شامل تعریف مجموعه‌ای از معیارها برای اندازه‌گیری عملکرد یک SHSC، یک الگوریتم برای حل مسئله چندهدفه و یک مدل ریاضی برنامه‌ریزی جامع برای حمایت از برنامه‌ریزی تاکتیکی SHSC است. همچنین این سیستم به تصمیم‌گیرندگان کمک می‌کند تا سطوح عملکرد قابل‌قبول در ابعاد اقتصادی، اجتماعی و زیست‌محیطی پایداری، علاوه بر اثربخشی، به دست آورند [۲۸]. معیارهای کلیدی عملکرد پایداری که در مدل آن‌ها در نظر گرفته شده است، شامل اثربخشی (نرخ تحقق نیازها)، کارایی (هزینه عملیات)، توانمندسازی محلی (نرخ تأمین محلی) و کاهش آلودگی (ردپای کربن) است [۲۸، ۲۲]. صاحب‌جمع نیا و همکاران در سال ۲۰۱۷ یک سیستم پشتیبانی تصمیم‌گیر هیبریدی (HDSS) را برای مدیریت زنجیره‌های امداد بشردوستانه در مواجهه با بلایای طبیعی بزرگ و بدون اطلاع قبلی مانند زلزله توسعه دادند. این سیستم از یک شبیه‌ساز، یک موتور استنتاج مبتنی بر قانون و یک سیستم مبتنی بر دانش (KBS) تشکیل شده است [۲۹]. جانا و همکاران در سال ۲۰۲۲ یک سیستم پشتیبانی تصمیم‌گیر سلسله‌مراتبی برای تخصیص منابع و وظایف در مدیریت بحران، به‌ویژه در سناریوهای سیل در هند، ارائه کردند [۳۰]. فلورز و همکاران در سال ۲۰۱۵ یک مدل برنامه تصادفی چند سناریویی (SMSP) را به‌عنوان هسته یک مدل هوش مصنوعی برای طراحی HSC مقاوم پیشنهاد کردند. این مدل برای حل مسئله مکان‌یابی تسهیلات، ظرفیت‌سازی انبارها و روش‌های تحویل اقلام به ذی‌نفعان طراحی شده است [۱۲]. ماهر جان و همکاران در سال ۲۰۱۹ مفهوم ترتیب استقرار مراکز لجستیکی موقت (TLHS) را در شرایط محدودیت منابع معرفی کردند. آن‌ها یک روش سه مرحله‌ای توسعه

طی تحقیقاتی در سال ۲۰۰۹، کاندوتی و همکاران چارچوبی برای سیستم پشتیبانی تصمیم‌گیر (DSS) جهت تخصیص بهینه منابع اضطراری در مدیریت بحران را معرفی کردند [۲۳]. با توجه به ماهیت مکانی داده‌های مرتبط با بلایای طبیعی و نیازهای توزیع امداد، سامانه‌های پشتیبانی تصمیم‌گیر مکانی (SDSS) اهمیت فزاینده‌ای پیدا کرده‌اند. همچنین سیستم اطلاعات مکانی به‌عنوان ابزاری کارآمد برای مدیریت و استفاده از داده‌های مکانی، امکان بررسی تفاوت‌های مکانی را فراهم می‌کند. سو و همکاران در سال ۲۰۰۱ چارچوبی برای SDSS جهت برنامه‌ریزی تقاضای آبیاری کشاورزی پیشنهاد کردند که با ادغام داده‌ها و مدل‌های مرتبط، ابزاری کارآمد برای برنامه‌ریزی بهتر تقاضا از طریق سناریوسازی و آشکارسازی تأثیرات آن سناریوها ارائه می‌دهد [۲۴]. لاهمار و همکاران نیز در سال ۲۰۲۰ یک مدل بهداشت مکانی چندمعیاره مبتنی بر GIS برای مدیریت بحران توسعه دادند که با زبان برنامه‌نویسی پایتون (Python) پیاده‌سازی شده و به تعیین کوتاه‌ترین مسیر دسترسی به امکانات پزشکی اضطراری کمک می‌کند [۲۵]. العباد و همکاران در سال ۲۰۲۴ یک موتور مسیریابی تحت وب برای مدیریت سیلاب ارائه کردند که با ادغام داده‌های مکانی و غیرمکانی و استفاده از زبان‌های برنامه‌نویسی مانند پایتون و جاوا اسکریپت (JavaScript)، نیاز به نرم‌افزارهای پیچیده و تحلیلگران متخصص را برطرف می‌کند و به‌عنوان ابزاری کاربرپسند برای مسیریابی عمل می‌کند [۲۶].

تخصیص تسهیلات و توزیع اقلام امدادی یکی از مهم‌ترین مسائل در مدیریت عملیات بلایای طبیعی است. مراکز توزیع موقت (TLHS) به دلیل توانایی آن‌ها در پشتیبانی از عملیات اضطراری بلافاصله پس از وقوع فاجعه، اهمیت زیادی دارند [۲۷، ۲۰]. محققان بسیاری به این موضوع در محیط‌های صنعتی و بشردوستانه پرداخته‌اند. سالوادور و همکاران در

انجام شده است که مزایای متعددی در طراحی و مدیریت پایگاه داده به همراه دارد. موتور تصمیم‌گیری با زبان پایتون برنامه‌نویسی شده، درحالی‌که رابط کاربری با جاوا اسکریپت، HTML و CSS توسعه‌یافته است. شکل ۲، نمای کلی معماری سیستم و چگونگی عملکرد آن را نمایش می‌دهد. در ادامه، جزئیات بیشتری از هر یک از این اجزا ارائه خواهد شد تا درک بهتری از ساختار و کارکرد این سیستم حاصل شود.



شکل ۲: معماری سیستم
Fig. 2: System architecture

پایگاه داده

در این مطالعه، پایگاه داده سیستم با استفاده از ابزار Migration در لاراول ایجاد گردیده است. این پایگاه داده شامل هفت جدول است که شامل اطلاعات گره‌ها، فواصل بین گره‌ها و پیکربندی مدل می‌شود. جزئیات اطلاعات جداول پایگاه داده در جدول ۱ نمایش داده شده است.

جدول ۱: جداول پایگاه داده
Table 1: Database tables

نام جدول (Tables name)	موارد تعریفی (Tables definition)
cmds	اطلاعات مراکز پایگاه امداد
ldcs	اطلاعات مراکز توزیع محلی
ecs	اطلاعات مراکز تخلیه
cmd_to_ldc_distances	اطلاعات فواصل بین مراکز پایگاه امداد و مراکز توزیع محلی
ldc_to_ec_distances	اطلاعات فواصل بین مراکز توزیع محلی و مراکز تخلیه
scenarios	اطلاعات سناریوها
configuration	اطلاعات پیکربندی مدل

دادند که شامل یک مدل بهینه‌سازی برای تعیین تعداد و مکان فضایی TLHs (باهداف کمینه کردن تقاضای برآورده نشده کل)، یک سیستم رتبه‌بندی عامل فازی تحت تصمیم‌گیری گروهی برای محاسبه وزن اهمیت ویژگی‌های ذهنی و یک رویکرد تصمیم‌گیری گروهی چند صفتی فازی برای تعیین ترتیب استقرار TLHs انتخابی است [۲۷]. این روش در زمینه زلزله نپال در سال ۲۰۱۵ مورد استفاده قرار گرفت و به دلیل ماهیت کیفی و مبهم عوامل پس از فاجعه، قابلیت ادغام نظرات چندین تصمیم‌گیرنده را دارد. پاسکوال و همکاران در سال ۲۰۲۰ یک مدل عددی برای پیش‌مکان‌یابی موجودی کمک‌های بشردوستانه پیشنهاد دادند. هدف این مدل کاهش زمان پاسخ اضطراری و هزینه‌های تدارکات برای رویدادهای لرزه‌ای است [۳۱]. این DSS تعداد بهینه انبارها، مکان‌های آن‌ها و مقادیر بهینه کالاهای ضروری (کیت‌های بهداشتی، تخت‌خواب، پتو و چادر کمپ) را برای تخصیص از پیش در منطقه مشخص می‌کند و به‌طور نوآورانه‌ای اندازه انبارها و تخریب احتمالی آن‌ها را بر اساس ویژگی‌های زلزله در نظر می‌گیرد و با استفاده از داده‌های دو زلزله بزرگ در ایتالیا اعتبارسنجی شده است. شوتر و همکاران در سال ۲۰۱۵ یک سیستم پشتیبانی تصمیم گیر موقت (ad hoc DSS) را برای لجستیک امدادرسانی بشردوستانه ارائه کردند. این سیستم از تکنیک‌های سناریو و یک مدل بهینه‌سازی برای محاسبه گزینه‌های تصمیم‌گیری امیدوارکننده استفاده می‌کند. این DSS اطلاعات جدید را به‌طور مداوم ادغام می‌کند تا توصیه‌های تصمیم‌گیری قوی و انعطاف‌پذیر را ارائه دهد [۳۲]. آن‌ها رویکرد خود را برای مسئله مکان‌یابی تسهیلات در هائیتی، برای بیمارستان‌های چادری موقت پس از زلزله ۲۰۱۰، نشان دادند که زمان حمل‌ونقل را بهینه‌سازی کرده و به سطح خدمات ۱۰۰ درصدی دست می‌یابد. چاودور و همکاران در سال‌های ۲۰۱۹ و ۲۰۲۰ یک ابزار پشتیبانی تصمیم گیر مبتنی بر سناریو برای تخصیص تسهیلات پاسخ موقت به بلایا (TDR) برای توزیع اقلام امدادی تحت عدم قطعیت تقاضا توسعه دادند. این سیستم شامل یک پایگاه داده، یک موتور تصمیم گیر (با استفاده از چارچوب برنامه‌ریزی تصادفی دومرحله‌ای) و یک رابط کاربری است [۴، ۲۰]. این مطالعات نشان می‌دهند که توسعه SDSS ها و DSS های تخصصی برای مکان‌یابی تسهیلات و توزیع اقلام امدادی در مدیریت بحران از اهمیت حیاتی برخوردار است. این سامانه‌ها با ادغام قابلیت‌های مکانی، تحلیلی و بهینه‌سازی و همچنین در نظر گرفتن عدم قطعیت‌ها و ترجیحات تصمیم‌گیرندگان، به بهبود قابل توجهی در اثربخشی و کارایی عملیات امدادرسانی کمک می‌کنند.

روش تحقیق

در این مطالعه یک سیستم هوشمند پشتیبان تصمیم‌گیری مکانی مبتنی بر وب طراحی و توسعه‌یافته است که شامل سه عنصر اصلی پایگاه داده، موتور پردازش تصمیمات و رابط کاربری است. پیاده‌سازی این سیستم با استفاده از چارچوب برنامه‌نویسی لاراول (Laravel)

$$r_{wf}x_{ijw} = r_{fw}x_{ijf}, \quad (4)$$

$$\forall i, j, w, f; w > f; w, f \in k$$

$$\sum_{j=1}^{n_{LDC}} \sum_{k=1}^{n_C} inv_{jk} \leq C_{zj}, \quad \forall j, k \quad (5)$$

$$\sum_{j=1}^{n_N} y_{ij} \leq \alpha, \quad \forall i \quad (6)$$

$$z_n \leq n_n, \quad \forall n \quad (7)$$

$$\sum_{n=1}^{n_N} z_n \leq N_T \quad (8)$$

اندیس‌ها و مجموعه‌ها

مجموعه محله‌ها	$N = 1, \dots, n_N$
مجموعه پایگاه‌های امدادی	$I = 1, 2, 3, \dots, n_{CMD}$
مجموعه مراکز توزیع محلی	$J = 1, 2, 3, \dots, n_{LDC}$
مجموعه مراکز تخلیه	$E = 1, 2, 3, \dots, n_{EC}$
مجموعه کالاها (w: آب، f: غذا، m: کیت پزشکی S: چادر امدادی)	$w, f, m, s = 1, \dots, n_C$

پارامترها

تقاضای کالای k در مرکز تخلیه e	d_{ek}
هزینه (فاصله) بین پایگاه امداد i و مرکز توزیع محلی j	c_{ij}
هزینه (فاصله) بین مرکز توزیع محلی j و مرکز تخلیه e	c_{je}
تعداد کالای k	b_k
ظرفیت هر مرکز توزیع محلی	C
نسبت عرضه بین کالای w و f	R_{wf}
بیشترین تعداد مراکز توزیع محلی که می‌تواند در محله n استفاده شود.	n_n
مجموع تعداد مراکز توزیع محلی ممکن	N_T
حداکثر تعداد مراکز تخلیه که یک مرکز توزیع محلی می‌تواند به آن کالا ارسال کند.	α
ضریب مجموع فواصل	β
ضریب مجموع تقاضای برآورده نشده	γ
ضریب مجموع تعداد مراکز محلی استفاده‌شده	λ
ضریب مجموع کالاهای اضافی در مراکز توزیع محلی	ω
پنالتی تقاضای برآورده نشده	pu
پنالتی کالاهای اضافی	pa

متغیرهای تصمیم

تعداد مراکز توزیع استفاده‌شده در هر محله	z_n
برابر یک است اگر پایگاه امداد i به مرکز تخلیه j کالا ارسال کند در غیر این صورت صفر است	y_{ij}
برابر یک است اگر مرکز توزیع محلی j به مرکز تخلیه e کالا ارسال کند در غیر این صورت صفر است	y_{je}
مقدار کالای ارسالی از پایگاه امداد i به مرکز توزیع محلی j	x_{ijk}
مقدار کالای ارسالی از مرکز توزیع محلی j به مرکز تخلیه e	x_{jek}

در این مدل پیشنهادی، کاربر می‌تواند با انتخاب استان، شهر و منطقه موردنظر، اطلاعات مربوط به گره‌ها را از پایگاه داده دریافت کند. این مدل به‌گونه‌ای طراحی شده است که قابلیت گسترش برای مناطق، شهرها و حتی کشورهای دیگر را داشته باشد.

این سیستم با واکنشی اطلاعات از جداول پایگاه داده و ارسال آن به مدل، به کاربران کمک می‌کند تا به راحتی به داده‌های موردنیاز خود دسترسی داشته باشند. در پایگاه داده سیستم، داده‌هایی در مورد نیازهای اساسی افراد آسیب‌دیده مانند آب، غذا، کیت پزشکی و چادر امدادی در بازه‌های زمانی مختلف ثبت شده است. این اطلاعات بر اساس مطالعات قبلی تنظیم شده و شامل پیکربندی‌های مختلفی است که کاربران قادرند پیکربندی‌های سفارشی را به سیستم اضافه نمایند و از آن برای برنامه‌ریزی و مدیریت بحران‌ها استفاده کنند [۳۳].

موتور تصمیم‌گیری

در این مقاله، یک رویکرد برنامه‌ریزی دومارحله‌ای برای بهینه‌سازی زنجیره تأمین بشردوستانه ارائه می‌شود. موتور تصمیم‌گیری بر اساس تخصیص مراکز توزیع محلی به پایگاه‌های مدیریت بحران در مرحله اول و اختصاص مراکز تخلیه برای توزیع کالاها در مرحله دوم طراحی شده است. با توجه به اهمیت عدم قطعیت تقاضا در این زمینه، تقاضای مراکز تخلیه بر اساس جمعیت مناطق اطراف که بر اساس فاصله تعیین می‌شود، محاسبه می‌گردد. هدف اصلی این مدل، بهینه‌سازی زنجیره تأمین از طریق به حداقل رساندن تعداد مراکز توزیع، کاهش مسافت طی شده برای دسترسی به منابع، کاهش تقاضای برآورده نشده و کالاهای اضافی باقیمانده در مراکز توزیع محلی است. این روش، یک راهکار جامع برای مدیریت مؤثر منابع در شرایط بحرانی ارائه می‌دهد. این مدل، با تلفیق هوشمندانه الگوریتم‌های ژنتیک و جستجوی ممنوعه، به حل این مسئله که از نوع مسائل NP-Hard است می‌پردازد. جواب حاصل از نسل نهایی الگوریتم ژنتیک، به عنوان ورودی در الگوریتم جستجوی ممنوعه استفاده می‌شود. سپس، با اجرای جستجوی محلی، بهینه‌سازی بیشتری صورت می‌گیرد تا به بهترین جواب ممکن حاصل شود. روابط ریاضی، پارامترها و متغیرها در این مدل به شرح زیر است:

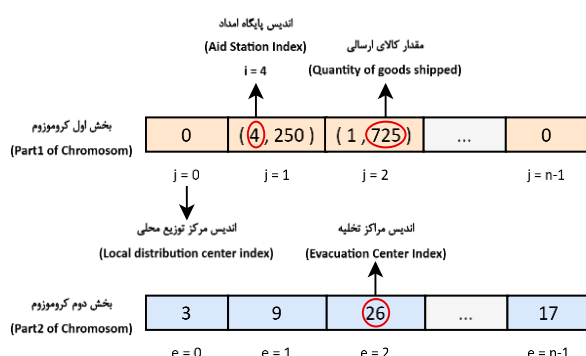
تابع هدف و محدودیت‌ها

$$\min f = \lambda \left(\sum_{n=1}^{n_N} z_n \right) + \gamma \left(\sum_{k=1}^{n_C} \sum_{e=1}^{n_{EC}} u_{ek} \right) + \beta \left(\sum_{i=1}^{n_{CMD}} \sum_{j=1}^{n_{LDC}} y_{ij} c_{ij} + \sum_{j=1}^{n_{LDC}} \sum_{e=1}^{n_{EC}} y_{je} c_{je} \right) + pu + pa \quad (1)$$

$$u_{ek} = d_{ek} - \sum_{j=1}^{n_{LDC}} x_{jek}, \quad \forall e, k \quad (2)$$

$$surp_{jk} = inv_{jk} - \sum_{e=1}^{n_{EC}} x_{jek}, \quad \forall j, k \quad (3)$$

دوم، مقدار کالای ارسالی را نشان می‌دهد که مقادیر اولیه آن‌ها ۶۰۰۰۰ واحد در نظر گرفته شده است. این مقدار مطابق با حداکثر ظرفیت واحد کالای امدادی مدارس به صورت فرضی در نظر گرفته شده است. بدین معنا که از حداکثر ظرفیت مدارس در مرحله ابتدایی اجرای الگوریتم استفاده می‌شود و در تکرارهای بعدی این مقدار تغییر می‌کند. تعداد ژن‌ها در بخش دوم کروموزوم برابر با تعداد مراکز تخلیه در منطقه مورد مطالعه است. در این بخش، هر ژن به صورت غیر تکراری، اندیس یکی از مراکز تخلیه را به خود تخصیص می‌دهد. نمونه‌ای از ساختار کامل این کروموزوم در شکل ۳ نشان داده شده است.



شکل ۳: نمایش کروموزوم

Fig. 3: Chromosome representation

عملگرهای استفاده شده در این الگوریتم عبارتند از عملگر انتخاب رتبه‌بندی تقسیم شده (Split Rank Selection)، عملگر ترکیب دونقطه‌ای (Two-Point Crossover) برای بخش اول و عملگر ترکیب متقاطع (Order Crossover) برای بخش دوم کروموزوم و عملگر جهش جابجایی (Swap Mutation). همچنین از یادگیری تقویتی (Reinforcement Learning) برای تنظیم پویا و بهینه پارامترهای الگوریتم ژنتیک استفاده شد. جزئیات پارامترهای یادگیری تقویتی در جدول ۲ نمایش داده شده است.

جدول ۲: تنظیم پارامترهای یادگیری تقویتی الگوریتم ژنتیک

Table 2: Setting the reinforcement learning parameters of the genetic algorithm

پارامترها (Parameters)	نرخ (Ratio)
نرخ یادگیری (α) (Learning ratio)	0.7
نرخ پاداش (γ) (Reward ratio)	0.1
نرخ اکتشاف (ϵ) (Exploration ratio)	0.3

نرخ یادگیری (α) مشخص می‌کند که چه میزان از اطلاعات جدید در بهروزرسانی مقادیر ماتریس کیفیت (Q) نسبت به مقادیر گذشته لحاظ شود؛ مقدار بالاتر آن منجر به انطباق سریع‌تر با تغییرات محیط می‌شود، درحالی‌که مقادیر پایین‌تر پایداری بیشتری ایجاد می‌کنند. نرخ پاداش

$surp_{jk}$ مقدار کالای اضافی باقی‌مانده k در مرکز توزیع محلی j
 u_{ek} مقدار تقاضای برآورده نشده کالای k در مرکز تخلیه e

هدف اصلی در فرمول‌بندی مدل برنامه‌ریزی عدد صحیح که در رابطه ۱ ارائه شده است، به حداقل رساندن چهار مؤلفه اساسی شامل مجموع فواصل، مجموع تعداد مراکز توزیع، مجموع تقاضای برآورده نشده و مجموع کالاهای اضافی باقی‌مانده در مراکز توزیع محلی است. روابط ۲ و ۳ به ترتیب به محاسبه مقادیر تقاضای برآورده نشده و کالاهای اضافی می‌پردازند. نسبت‌های تأمین میان انواع مختلف کالاهای، مطابق با رابطه ۴ تعریف می‌شوند و تضمین می‌کنند که کلیه کالاهای مراکز توزیع بر اساس یک نسبت تأمین خاص (متعادل) تأمین شوند. این نسبت‌ها بر مبنای استانداردها و فرضیات مطرح شده در مقاله کاودور و همکاران تنظیم شده‌اند [۳۳]. علاوه بر این، رابطه ۵ محدودیت‌های ظرفیتی مراکز توزیع محلی را نشان می‌دهد. رابطه ۶ تعداد مراکز تخلیه را که یک مرکز توزیع محلی می‌تواند به آن‌ها کالا ارسال کند، محدود می‌کند تا سطح خدمات مراکز توزیع در شرایط هرج و مرج پس از یک فاجعه، کنترل شود. درنهایت، رابطه ۷ به محدود کردن تعداد مراکز توزیع محلی تخصیص یافته در یک محله می‌پردازد و رابطه ۸ نیز تعداد کل تأسیسات را محدود می‌کند.

الگوریتم ژنتیک

الگوریتم ژنتیک به عنوان یکی از روش‌های رایج، به طور گسترده توسط پژوهشگران برای حل مسائل NP-Hard در حوزه زنجیره تأمین بشردوستانه به کار گرفته شده است. روند اجرای این الگوریتم به شرح زیر است:

۱. تولید جمعیت اولیه
۲. محاسبه تابع برازندگی جواب‌ها
۳. انتخاب والدین
۴. ترکیب جفت والدین
۵. جهش بر روی فرزندان
۶. تکرار مراحل فوق تا شرط پایان الگوریتم

کروموزوم طراحی شده برای حل مسئله از دو بخش اصلی تشکیل شده است. تعداد ژن‌ها در بخش اول کروموزوم متناسب با تعداد مراکز توزیع محلی در منطقه مورد مطالعه است. هر ژن در این بخش می‌تواند یکی از دو حالات زیر را داشته باشد:

○ مقدار صفر: در این حالت، مقدار ژن برابر با صفر است که نشان‌دهنده عدم انتخاب مرکز توزیع مربوطه برای توزیع کالا است. به عنوان مثال، اگر مقدار ژن با اندیس سوم از بخش اول کروموزوم صفر باشد، نشان‌دهنده این است که مرکز توزیع محلی با اندیس سه برای توزیع کالا انتخاب نشده است.

○ آرایه دو عنصری: در این حالت، هر ژن شامل یک آرایه دو عنصری است. عنصر اول این آرایه، اندیس پایگاه امدادی را مشخص می‌کند که کالاهای امدادی را به مرکز توزیع مربوطه ارسال می‌کند و درایه

با شهر بر اساس انتخاب کاربر پالایه شده و تنها شهرهای مربوط به آن استان نمایش داده می‌شوند. همچنین، کاربر می‌تواند منطقه موردنظر را برای برنامه‌ریزی از منوی District یا ناحیه مشخص کند. در ادامه، کاربر می‌تواند پارامترهای ورودی مدل شامل نرخ جمعیت آسیب‌دیده (APR)، دوره زمانی برنامه‌ریزی (PP) و پیکربندی سیستم (Configuration) را از بخش Parameters تنظیم کند. بخش Tasks به کاربر این امکان را می‌دهد که با استفاده از دکمه Update Data به داده‌های مربوط به گره‌ها یا سایر جداول موجود در پایگاه داده دسترسی یابد و آن‌ها را ویرایش کند. علاوه بر این، دکمه Create Inputs به کاربر اجازه می‌دهد ورودی‌های مدل را تعریف کرده و آن‌ها را در جدول پایگاه داده با عنوان ذخیره کند تا در آینده قابل استفاده باشند. لازم به ذکر است که تمامی منوهای ذکرشده به صورت مستقیم با پایگاه داده مرتبط هستند و هرگونه تغییر در داده‌های پایگاه داده، زیرمنوها را نیز به‌روزرسانی می‌کند. پس از انجام تنظیمات نهایی ورودی‌ها و پارامترها، کاربر با کلیک بر روی دکمه Solve Model مدل را اجرا کرده و منتظر دریافت پاسخ از سرور می‌ماند. طراحی این بخش‌ها در شکل ۴ نمایش داده شده است.

در فرایند حل مدل، سیستم پاسخ را از طریق سرور ارسال می‌کند و گزارش‌ها حاصل در قالب جدول‌هایی در بخش گزارش‌های مدل به کاربر ارائه می‌گردد. این گزارش‌ها شامل نمایش بصری نقاط مرتبط با مدل در نقشه است که شامل پایگاه‌های امداد، مراکز توزیع محلی انتخاب‌شده و مراکز تخلیه است. این نمایش بصری به کاربران کمک می‌کند تا محدوده مکانی استقرار پایگاه‌ها و مراکز توزیع را بهتر درک کنند. هنگامی که کاربر نشانگر ماوس را بر روی این نقاط حرکت می‌دهد، اطلاعات مفیدی مانند نام مراکز، میزان موجودی کالا و جزئیات ارسال کالا از سطوح بالاتر به پایین‌تر زنجیره را مشاهده می‌کند. با کلیک بر روی هر نقطه، کاربر می‌تواند مقادیر و مقاصد ارسال کالا از آن نقطه را ببیند. به‌طور خاص، با کلیک بر روی مراکز تخلیه، کاربر می‌تواند جزئیات دریافت آب، غذا، کیت‌های پزشکی و چادرهای امدادی از مراکز توزیع محلی را مشاهده نماید. این اطلاعات در جدول‌هایی در قسمت پایین نقشه، پس از کلیک بر روی نقاط، در دسترس کاربر قرار می‌گیرد. شکل‌های ۵، ۶ و ۷ نمونه‌هایی از این گزارش‌ها را به تصویر می‌کشند.

(۷) نشان‌دهنده اهمیت پاداش‌های آینده نسبت به پاداش‌های فوری است و در تعیین سیاست بهینه نقش حیاتی دارد. همچنین نرخ اکتشاف (۴) میزان تمایل عامل به جستجوی اعمال جدید در برابر بهره‌برداری از تجربیات گذشته را تنظیم می‌کند؛ به گونه‌ای که تعادل میان کشف فرصت‌های جدید و استفاده از دانش موجود برقرار شود. انتخاب متعادل این پارامترها تضمین‌کننده کارایی بالاتر الگوریتم و جلوگیری از گیر افتادن در راه‌حل‌های محلی خواهد بود [۳۴].

الگوریتم جستجوی ممنوعه

به‌منظور بهبود تابع برازندگی بهترین پاسخ حاصل از آخرین نسل تولیدشده توسط الگوریتم ژنتیک، از الگوریتم جستجوی ممنوعه استفاده گردید. در این رویکرد، چهار نوع حرکت برای جستجوی محلی تعریف شد. این حرکات شامل موارد زیر است:

- حرکت نوع اول: انجام یک جابجایی ژن در بخش اول کروموزوم
- حرکت نوع دوم: انجام یک جابجایی ژن در بخش دوم کروموزوم
- حرکت نوع سوم: حذف یا افزودن یک مرکز توزیع محلی. در این نوع حرکت، اگر مقدار ژن انتخابی صفر باشد، یک آرایه دوبعدی متناسب با ساختار جمعیت اولیه در الگوریتم ژنتیک به آن ژن اختصاص می‌یابد؛ در غیر این صورت، مقدار آن صفر می‌شود.
- حرکت نوع چهارم: افزایش یا کاهش موجودی کالا در مرکز توزیع محلی انتخاب‌شده.

در هر تکرار، این حرکات به صورت تصادفی انجام می‌گیرند و هم‌زمان، مقدار برازندگی هر حرکت محاسبه و در لیست‌های مجزایی ذخیره می‌شود تا در لیست ممنوعه مورداستفاده قرار گیرد. تعداد تکرار الگوریتم ۴۰۰۰ و طول لیست ممنوعه ۱۲ در نظر گرفته شده است.

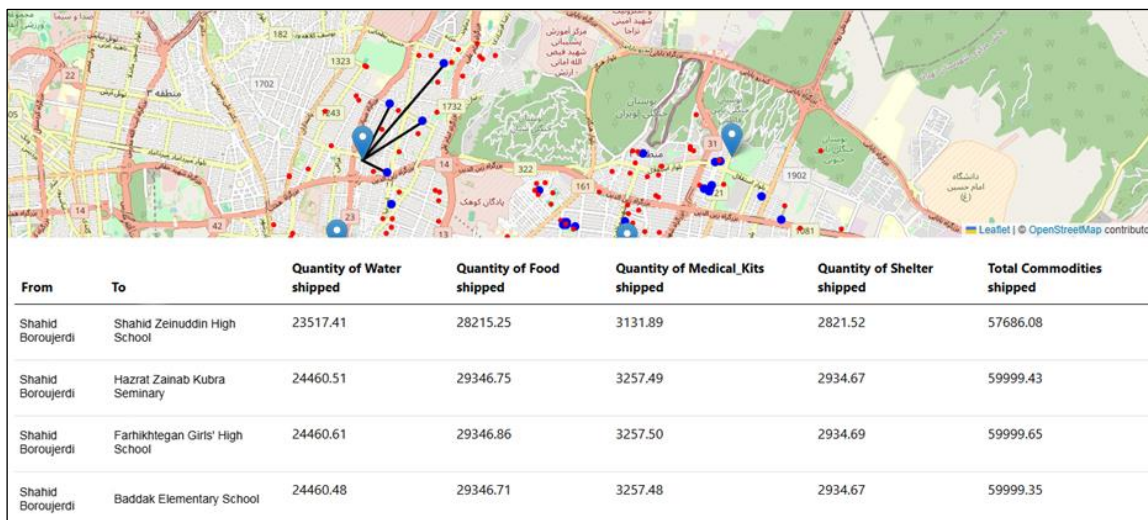
رابط کاربری

رابط کاربری سیستم طراحی شده در این پژوهش از سه مؤلفه اصلی شامل نقشه‌نمایشی، ورودی‌های مدل و بخش جدول گزارش‌ها تشکیل شده است. در بخش ناحیه تحت تأثیر (Affected Area) کاربر قادر است استان موردنظر را که تحت تأثیر بلایای طبیعی قرار گرفته است، از طریق یک منو انتخاب کند. پس از انتخاب استان، منوی City

Model Inputs		
Affected Area	Parameters	Tasks
Region تهران	APR 0.75	Update Data
City تهران	PP(Hours) 16	Create Inputs
District 4	Configuration MC1-Standard	Solve Model

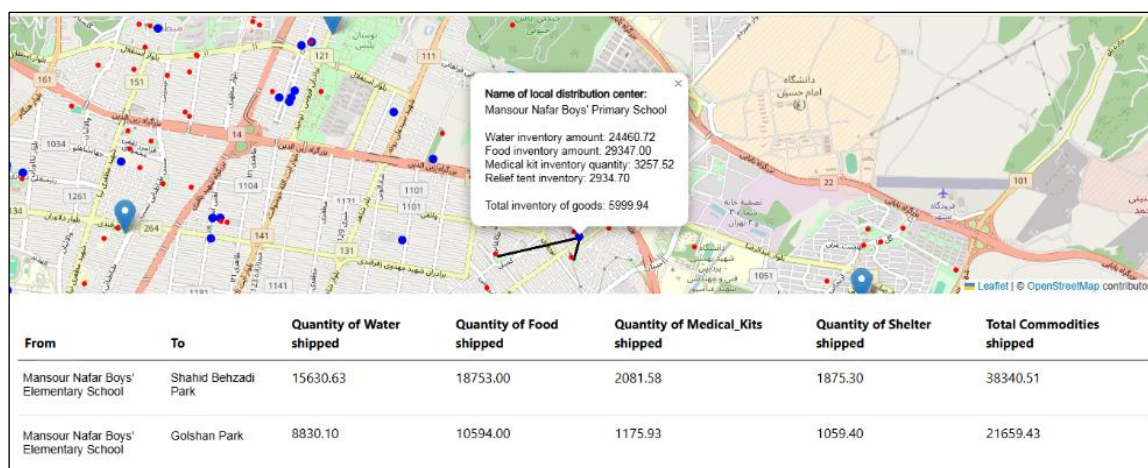
شکل ۴: رابط کاربری تنظیم ورودی‌های مدل

Fig. 4: Model Inputs Setting Interface



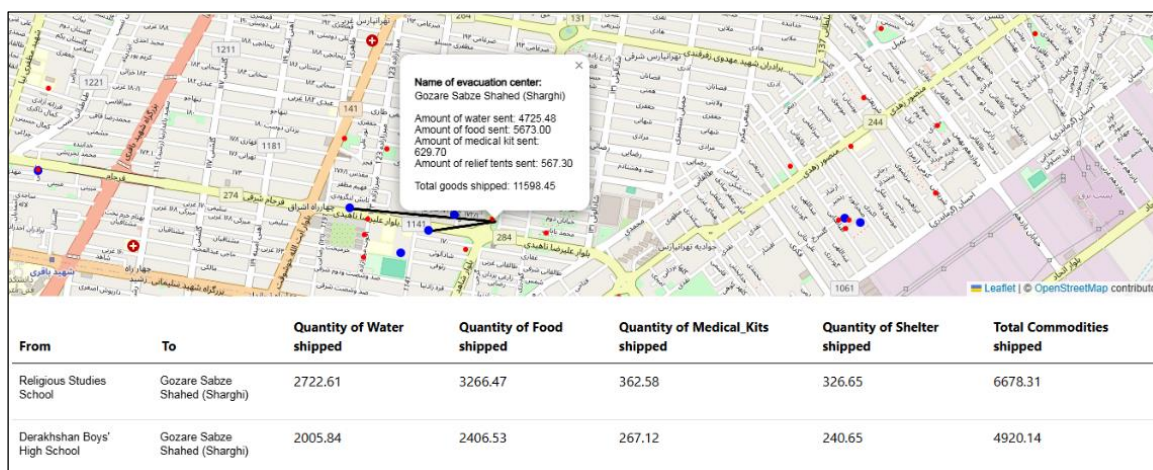
شکل ۵: نمایش بصری و جدول گزارش‌های مربوط به پایگاه امداد کلیک شده

Fig. 5: Visual display and report table for the clicked aid station



شکل ۶: نمایش بصری و جدول گزارش‌های مربوط به مرکز توزیع محلی انتخاب‌شده از روی نقشه

Fig. 6: Visual display and report table for a local distribution center selected from the map



شکل ۷: نمایش بصری و جدول گزارش‌های مربوط به مرکز تخلیه انتخاب‌شده از روی نقشه

Fig. 7: Visual display and report table for the evacuation center selected from the map

بخش Model Reports، شامل پنج دسته گزارش است که سیستم به کاربر ارائه می‌دهد. اولین دسته اطلاعات راه‌حل (Solution Information) نام دارد و در شکل ۸ خلاصه‌ای از جزئیات مرتبط با مدل اجرایی را ارائه می‌دهد.

بخش Model Reports، شامل پنج دسته گزارش است که سیستم به کاربر ارائه می‌دهد. اولین دسته اطلاعات راه‌حل (Solution

Model Reports	
Solution Information	Inventory Decisions Service Decisions Additional inventory Unmet demand
Solution Information	
Solution Status :	Optimal solution found
Iterations :	1000
Solution Time (sec) :	827.2141172885895
Total Distance :	707699.22094056
Total LDC Used :	44
Total Unmet Demand Amount :	0
Total Additional Inventory :	2919.4875936857975

شکل ۸: جدول گزارش کلی از حل مدل
Fig. 8: General report table of model solution

تخصیص یافته را مشاهده کنند. دسته‌های چهارم و پنجم، به ترتیب موجودی مازاد (Additional Inventory) و تقاضای برآورده نشده (Unmet Demand) هستند که در شکل ۱۱ نشان داده شده است. این بخش‌ها، بر اساس نتایج مدل، اطلاعات مربوط به کالاهای اضافی ارسالی یا تقاضاهای برآورده نشده را ارائه می‌دهند. هدف از این گزارش‌ها، مدیریت بهینه ارسال کالاها و اطمینان از برآورده شدن تقاضاها در مراکز توزیع محلی است. این گزارش‌ها، با ارائه جزئیات دقیق در مورد کالاهای ارسالی و دریافتی، نقش مهمی در برنامه‌ریزی و مدیریت منابع ایفا می‌کنند. کاربران می‌توانند از این اطلاعات برای تصمیم‌گیری‌های آگاهانه در زمینه ذخیره‌سازی و توزیع کالاها استفاده کنند.

این اطلاعات شامل تعداد دفعات تکرار الگوریتم، مدت زمان حل مدل، مجموعه فواصل بین مراکز تخصیص یافته، تعداد مراکز توزیع محلی مورد استفاده، میزان تقاضای برآورده نشده و سطح موجودی اضافی کالاها است. دسته دوم، با عنوان تصمیم‌گیری موجودی (Inventory Decision)، اطلاعات مربوط به کالاهای ارسالی از پایگاه‌های امداد (CMD) به مراکز توزیع محلی (LDC) را مطابق شکل ۹ ارائه می‌دهد. این بخش، به کاربران امکان می‌دهد تا از میزان کالاهای موجود در مراکز توزیع محلی آگاهی یابند. دسته سوم، تصمیم‌گیری سرویس (Service Decision) نام دارد و جزئیات کالاهایی را که از مراکز توزیع محلی به مراکز تخلیه (EC) ارسال می‌شوند را مطابق شکل ۱۰ نشان می‌دهد. کاربران با کلیک بر روی سطرهای جداول، می‌توانند اتصالات مراکز

Inventory Decisions						
CMD Search...	LDC Search...					
CMD Name	LDC Name	Quantity of Water Storage	Quantity of Food Storage	Quantity of Medical_Kits Storage	Quantity of Shelter Storage	Total Commodities Storage
Hakimieh	Miqdad Elementary School	24460.69	29346.96	3257.51	2934.70	59999.86
Hakimieh	Mansour Nafar Boys' High School	24460.72	29347.00	3257.52	2934.70	59999.94
Hakimieh	Bostane Omid Girls' Elementary School	24460.57	29346.82	3257.50	2934.68	59999.57
Shahid Ebadi	Saadi Girls' Government Model First Year High School	24460.56	29346.81	3257.50	2934.68	59999.55
Shahid Ebadi	Nabovvat Girls' First Year High School	24460.74	29347.02	3257.52	2934.70	59999.98
Shahid Ebadi	Ghaffari Boys' High School	24460.62	29346.88	3257.50	2934.69	59999.69
Shahid Ebadi	Ghaffari High School	24460.71	29346.98	3257.51	2934.70	59999.90
Shahid Ebadi	Shahid Aref Nasab Elementary School	24460.50	29346.73	3257.49	2934.67	59999.39
Shahid Ebadi	Religious Studies School	24460.71	29346.98	3257.51	2934.70	59999.90

شکل ۹: جدول گزارش مقدار کالاهای ارسالی از پایگاه امداد به مراکز توزیع محلی (مقدار موجودی مراکز توزیع محلی)
Fig. 9: Table reporting the amount of goods sent from the aid station to local distribution centers (local distribution center inventory amount)

Service Decisions						
LDC Search...	EC Search...					
LDC Name	EC Name	Quantity of Water shipped	Quantity of Food shipped	Quantity of Medical_Kits shipped	Quantity of Shelter shipped	Total Commodities shipped
Farhang Educational Complex, Region 4	Ostad Khodabakhsh School	1245.25	1494.00	165.83	149.40	3054.48
Farhang Educational Complex, Region 4	Homaye Rahmat School	5334.82	6400.50	710.46	640.05	13085.82
Farhang Educational Complex, Region 4	Khajeh Nasir Park	17880.60	21452.43	2381.22	2145.24	43859.50
Shahid Zeinuddin High School	Rezvan School	776.40	931.50	103.40	93.15	1904.45
Shahid Zeinuddin High School	Pooya School	1999.15	2398.50	266.23	239.85	4903.73
Shahid Zeinuddin High School	Khajeh Nasir Park	11700.31	14037.57	1558.17	1403.76	28699.80
Shahid Zeinuddin High School	Narges Educational Complex	9014.30	10815.00	1200.47	1081.50	22111.27
Shahid Zeinuddin High School	Ferdowsi School	27.24	32.68	3.63	3.27	66.82
Maharat Amoz Elementary School	Hossein Hamed Park	9566.91	11478.00	1274.06	1147.80	23466.77
Maharat Amoz Elementary School	Khajeh Abdullah Ansari High School	1861.62	2233.50	247.92	223.35	4566.39

شکل ۱۰: جدول گزارش مقدار کالاهای ارسالی از مراکز توزیع محلی به مراکز تخلیه
Fig. 10: Table reporting the quantity of goods shipped from local distribution centers to discharge centers

Solution Information Inventory Decisions Service Decisions **Additional inventory** Unmet demand

Additional inventory Info					
LDC Name	Amount of excess Water	Amount of excess Food	Amount of excess Medical_kit	Amount of excess Shelter	Total inventory amount
Jelveh Danesh2 Preschool and Elementary School	422.24	506.59	56.23	50.66	1035.72
Narges Art School	767.97	921.38	102.27	92.14	1883.77

شکل ۱۱: جدول گزارش موجودی مازاد مراکز توزیع محلی

Fig. 11: Local Distribution Centers Excess Inventory Report Table

نامحدود در نظر گرفته شده است، درحالی که ظرفیت مراکز توزیع محلی را به ۶۰۰۰۰ واحد محدود کرده ایم. تنظیمات پارامترهای الگوریتم ها در جدول ۴ نوشته شده است.

جدول ۴: پارامترهای الگوریتم
Table 4: Algorithm parameters

پارامترها (Parameters)	مقادیر (values)
تعداد جمعیت اولیه (Initial population)	250
تعداد تکرار ژنتیک (Genetic max iteration)	500
تعداد تکرار جستجوی ممنوعه (Tabu search max iteration)	4000
اندازه لیست ممنوعه (tabu list size)	12

نتایج حاصل از بهینه سازی در جدول ۵ خلاصه شده است که شامل چهار تابع هدف مختلف است: مجموع فواصل (OF1)، تعداد مراکز توزیع محلی فعال (OF2)، تقاضای برآورده نشده (OF3) و موجودی مازاد (OF4). کدها در محیط برنامه نویسی visual studio code و سیستم سخت افزاری با پردازنده Intel(R) Core(TM) i5-4210U CPU @ 1.70GHz 2.40GHz و مقدار رم 8.00GB (RAM) اجرا شدند.

جدول ۳: پیکربندی های مدل

Table 3: Model configurations

Configuration	ویژگی کلیدی	اثر روی مدل	NT	λ	γ	β
استاندارد (MC1) (Standard)	ضرایب به صورت متعادل تنظیم شده اند.	تعادل بین کمینه سازی فاصله، کاهش مراکز فعال، تأمین تقاضا و کاهش موجودی مازاد	100	1,000	1	2
بودجه کم (MC2) (Lower budge)	محدودیت روی تعداد مراکز توزیع محلی	کمینه سازی هزینه های عملیاتی و مسافت جابجایی، ولی ممکن است بخشی از تقاضا پوشش داده نشود.	60	1,000	1	2
رضایت کم تقاضا (MC3) (Lower demand satisfaction)	کاهش جریمه تقاضای برآورده نشده	تمایل مدل به پوشش کمتر تقاضا برای کاهش هزینه ها، در نتیجه فاصله و موجودی مازاد بهینه تر می شود.	100	1,000	0.5	2

نتایج و بحث

در این مطالعه، به منظور ارزیابی کارایی سیستم، یک مطالعه موردی در منطقه ۴ شهر تهران ارائه می شود. این منطقه به عنوان منطقه ای تحت تأثیر بلایای طبیعی در نظر گرفته شده است، با نرخ های جمعیت متأثر ۷۵ درصد و ۹۵ درصد. سه پیکربندی مختلف برای این سناریو در نظر گرفته شده است: پیکربندی استاندارد (MC1-Standard)، پیکربندی با بودجه محدود (MC2-Lower Budge) و پیکربندی با رضایت تقاضای پایین (MC3-Lower Demand Satisfaction). در پیکربندی استاندارد، ضرایب به گونه ای تنظیم شده اند که بهینه سازی توابع هدف به صورت متعادل انجام شود. پیکربندی بودجه کم، تعداد مراکز توزیع محلی را محدود می کند، درحالی که پیکربندی رضایت کم تقاضا، هزینه واحد تقاضای برآورده نشده را کاهش می دهد. جزئیات این پیکربندی ها در جدول ۳ ارائه شده است.

علاوه بر این، پنج دوره زمانی برنامه ریزی شامل ۸، ۱۶، ۲۴، ۴۸ و ۷۲ ساعت در نظر گرفته شده است. در طراحی سناریوهای شبیه سازی، توجه دقیق به نرخ جمعیت تحت تأثیر، بازه های زمانی برنامه ریزی و تنظیمات مدل ضروری است. به کارگیری مقادیر غیر واقعی برای این پارامترها می تواند خروجی هایی ایجاد کند که فاقد کارایی عملی باشند؛ برای مثال، بودجه هایی بسیار بیشتر یا کمتر از مقادیر متعارف که با شرایط واقعی همخوانی ندارند. در این نمونه مثال، ظرفیت پایگاه های امداد،

جدول ۵: معیارهای عملکرد (PMs) برای پیکربندی‌های مختلف مدل (MCs) و دوره‌های برنامه‌ریزی (PPs) برای نرخ جمعیت تحت تأثیر ۷۵٪
 Table 5: Performance Measures (PMs) for Different Model Configurations (MCs) and Planning Periods (PPs) for a Population Rate Affected by 75%

Configuration	PP1 (8h)	PP2 (16h)	PP3 (24h)	PP4 (48h)	PP5 (72h)
MC1-OF1	683,700.68	681,095.50	978,225.36	937,754.36	885,068.36
MC1-OF2	24	26	68	97	97
MC1-OF3	2,994.09	1,637.78	0	1,947,381.70	5,765,291.64
MC1-OF4	2,362.85	227.92	3,129.95	0	0
Solution Time (sec)	626.66	617.33	717.23	770.08	657.76
MC2-OF1	690,169.79	7,870,086.24	763,076.92	379,950.14	326,032.59
MC2-OF2	24	46	60	60	60
MC2-OF3	0	0	348,817.21	4,167,381.70	7,985,291.64
MC2-OF4	1,941.56	2,001.00	0	0	0
Solution Time (sec)	647.12	688.61	684.81	414.93	318.74
MC3-OF1	553,110.01	690,747.38	846,135.64	826,390.77	799,666.27
MC3-OF2	21	43	65	95	97
MC3-OF3	145,056.22	118,573.28	804,90.62	2,067,381.70	5,765,291.64
MC3-OF4	444.18	0	0	0	0
Solution Time (sec)	497.44	616.26	692.24	588.28	583.29

را هبرد بهینه دارد. در دوره‌های برنامه‌ریزی کوتاه‌مدت (PP1 و PP2)، پیکربندی بودجه کم (MC2) عملکرد بهتری ارائه می‌دهد؛ زیرا با فعال‌سازی مراکز توزیع کمتر، فاصله حمل‌ونقل و هزینه‌ها را کاهش می‌دهد و در عین حال، تقریباً تمام تقاضا را پوشش می‌دهد. در دوره‌های برنامه‌ریزی میان‌مدت (PP3 و PP4)، اگرچه MC2 همچنان در بهینه‌سازی مسافت و هزینه برتری دارد، اما برای حداکثر تأمین تقاضا، پیکربندی استاندارد (MC1) و تا حدی رضایت کم تقاضا (MC3) کارآمدترند، هرچند به بهای افزایش تعداد مراکز فعال و موجودی مازاد. در دوره برنامه‌ریزی بلندمدت (PP5)، انتخاب پیکربندی وابسته به اولویت‌های تصمیم‌گیرنده است: اگر پوشش کامل تقاضا اهمیت بیشتری دارد، MC1 بهترین گزینه است؛ اما اگر هدف اصلی کاهش مسافت جابه‌جایی و هزینه‌های توزیع باشد، MC2 مناسب‌تر است؛ و در حالتی که کنترل موجودی مازاد در اولویت باشد، MC3 عملکرد بهتری ارائه می‌دهد.

در ادامه، با اعمال تنظیمات مشابه جدول ۵، نرخ جمعیت تحت تأثیر را به ۹۵ درصد افزایش دادیم. نتایج حاصل در جدول ۶ نشان‌دهنده تأثیر قابل توجه این افزایش بر تخصیص منابع است. تفسیر داده‌ها در جدول ۶ نیز مشابه تحلیل‌های ارائه‌شده در جدول ۴ است که نشان‌دهنده الگوها و نتایج مشابه در هر دو مورد است. به‌طور کلی، نتایج نشان می‌دهد که انتخاب پیکربندی بهینه باید متناسب با دوره‌های برنامه‌ریزی و ترجیحات تصمیم‌گیرنده انجام شود: MC1 برای بهینه‌سازی متعادل، MC2 برای واکنش سریع با منابع محدود و MC3 برای شرایطی که مدیریت موجودی مازاد اهمیت بالاتری دارد، عملکرد بهینه‌تری ارائه می‌دهند.

نتایج جدول ۵ برای جمعیتی با ۷۵ درصد تأثیرپذیری محاسبه شده‌اند. باوجود اینکه انتظار می‌رود با افزایش دوره‌های برنامه‌ریزی، تقاضای برآورده نشده افزایش یابد، اما این موضوع به پیکربندی مدل و پارامترهای آن بستگی دارد. با در نظر گرفتن بازه‌های زمانی گسترده‌تر، مقادیر حاصل از ترکیب خطی توابع هدف به‌طور قابل توجهی افزایش می‌یابد. این روند در نتایج پیکربندی اول مشهود است، جایی که باوجود تعداد ثابت مراکز توزیع محلی در بازه‌های زمانی مختلف، مجموع فواصل در دوره ۷۲ ساعته کمتر از ۴۸ ساعت است. این پدیده می‌تواند ناشی از ماهیت احتمالاتی الگوریتم ژنتیک باشد که در جستجوی راه‌حل‌های بهینه، نتایج متغیر و ناپایداری ارائه می‌دهد. باین‌حال، با تکرار بیشتر الگوریتم یا تنظیم دقیق‌تر پارامترها، می‌توان انتظار داشت که این تفاوت‌ها کاهش یافته و مقادیر به یکدیگر نزدیک شوند.

در پیکربندی MC1-OF2، الگوریتم برای بازه زمانی ۸ ساعته، ۲۴ مرکز توزیع را انتخاب می‌کند تا از افزایش بیش‌ازحد تقاضای برآورده نشده جلوگیری شود. در مقابل، پیکربندی سوم، علی‌رغم وجود تقاضای برآورده نشده قابل توجه، تمایلی به گسترش مراکز توزیع برای جبران آن نشان نمی‌دهد. نتایج حاصل، علاوه بر تقاضای برآورده نشده، حاکی از وجود موجودی مازاد نیز هستند. این امر ناشی از ذات الگوریتم حل مدل و تأثیر ضرایب توابع هدف در پیکربندی سیستم است. آزمایش‌ها نشان دادند که الگوریتم ژنتیک به کاررفته در مدل، نقش مؤثری در بهینه‌سازی توابع هدف FO2، FO3 و FO4 دارد، درحالی‌که الگوریتم جستجوی ممنوعه، بهینه‌سازی تابع هدف FO1 را بهبود می‌بخشد.

در ارزیابی سه پیکربندی مدل (MC1، MC2 و MC3) نتایج (جدول ۴) نشان می‌دهد که دوره‌های برنامه‌ریزی نقش تعیین‌کننده‌ای در انتخاب

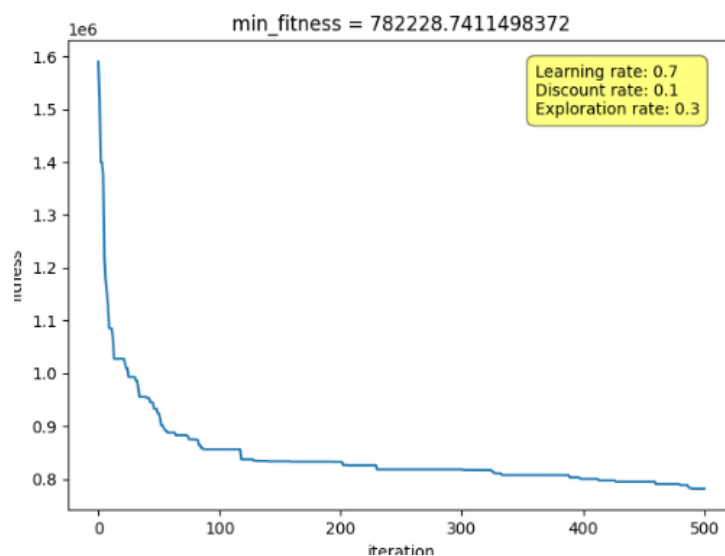
جدول ۶: معیارهای عملکرد (PMs) برای پیکربندی‌های مختلف مدل (MCs) و دوره‌های برنامه‌ریزی (PPs) برای نرخ جمعیت تحت تأثیر ۹۵٪

Table 6: Performance metrics (PMs) for different model configurations (MCs) and planning periods (PPs) for the 95% affected population rate

Configuration	PP1 (8h)	PP2 (16h)	PP3 (24h)	PP4 (48h)	PP5 (72h)
MC1-OF1	718,033.77	901,111.60	1,123,391.90	869,233.47	790,362.44
MC1-OF2	31	59	86	97	97
MC1-OF3	0	0	0	4,018,683.50	8,854,702.74
MC1-OF4	2,228.86	1,744.34	8,479.42	0	0
Solution Time (sec)	582.87	685.83	733.54	582.71	533.10
MC2-OF1	754,463.01	905,279.51	547,994.16	382,413.74	276,165.45
MC2-OF2	30	60	60	60	60
MC2-OF3	0	803.85	1,401,835.16	6,238,683.50	11,074,702.74
MC2-OF4	3158.11	0	0	0	0
Solution Time (sec)	562.73	669.79	516.23	393.10	338.03
MC3-OF1	690,982.99	8,320,93.18	1,021,458.54	790,246.94	669,417.09
MC3-OF2	29	57	82	97	97
MC3-OF3	65,147.06	32,867.67	113,044.46	4,018,683.5	8,854,702.74
MC3-OF4	832.62	0	0	0	0
Solution Time (sec)	589.64	717.50	696.95	666.96	489.63

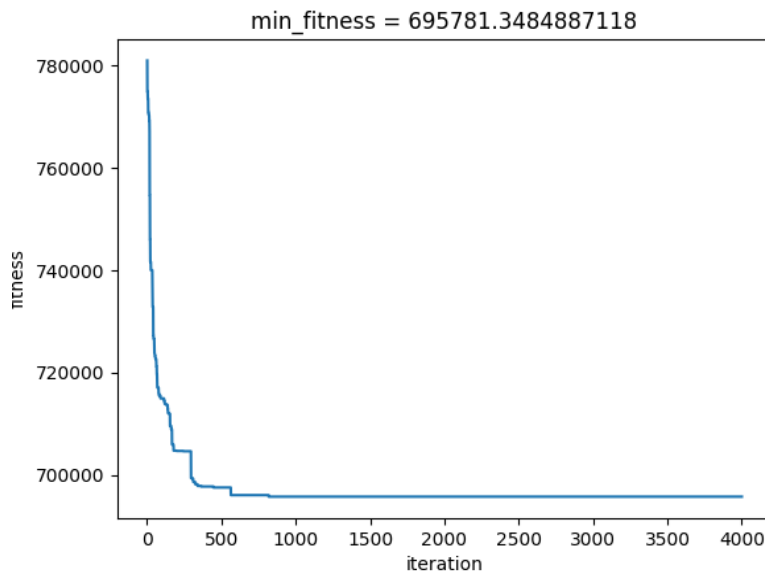
حداقل مقدار برازندگی ۷۸۲,۲۲۸ برسد. این روند نشان‌دهنده توانایی ژنتیک در جستجوی گسترده و تولید یک جواب اولیه مناسب است. در ادامه، الگوریتم جستجوی ممنوعه از همین جواب استفاده کرده و با جستجوی محلی دقیق‌تر، مقدار برازندگی را سریعاً کمینه و تثبیت کرده تا به حداقل مقدار برازندگی ۶۹۵,۷۸۱ برسد؛ بنابراین می‌توان نتیجه گرفت که صحت همگرایی هر دو الگوریتم تأیید می‌شود و ترکیب آن‌ها نشان می‌دهد که ژنتیک در یافتن فضای جواب‌های خوب و جستجوی ممنوعه در بهبود و پالایش نهایی آن‌ها کارآمد است.

به‌منظور اطمینان از صحت عملکرد الگوریتم ترکیبی پیشنهادی، یک نمونه از پیکربندی سیستم (MC1-Standard) به‌صورت مستقل در فایل پایتون اجرا و نتایج آن در شکل‌های ۱۲ و ۱۳ نشان داده شده است. شکل ۱۲ روند همگرایی الگوریتم ژنتیک و شکل ۱۳ عملکرد الگوریتم جستجوی ممنوعه را در کمینه‌سازی تابع برازندگی نشان می‌دهد. با توجه به این‌که جواب نهایی الگوریتم ژنتیک به‌عنوان نقطه شروع به الگوریتم جستجوی ممنوعه داده شده است، روند همگرایی دو نمودار معنای تکمیلی پیدا می‌کند. الگوریتم ژنتیک ابتدا از یک جمعیت تصادفی حرکت کرده و به‌تدریج مقدار برازندگی را کاهش داده تا به



شکل ۱۲: نمودار تابع برازندگی حاصل از الگوریتم ژنتیک

Fig. 12: Fitness function diagram obtained from the genetic algorithm



شکل ۱۳: نمودار تابع برازندگی حاصل از الگوریتم جستجوی ممنوعه
Fig. 13: Fitness function graph resulting from the forbidden search algorithm

توابع هدف است. مزیت اصلی استفاده از این نوع الگوریتم‌ها پیشنهاد جواب‌های متنوع غیر مغلوب به‌عنوان گزینه‌های انتخاب بیشتر به کاربر برای تصمیم‌گیری در اهداف متضاد است.

استفاده از فناوری وب به‌عنوان بستری برای توسعه ابزار تصمیم‌گیری، مزایای قابل‌توجهی را در زمینه انعطاف‌پذیری و بهره‌وری برای کاربران به همراه دارد. این رویکرد، مدیریت داده‌ها و تولید گزارش‌ها را به‌طور چشمگیری بهبود می‌بخشد. تحقیقات آینده می‌تواند بر بهبود و گسترش این سامانه متمرکز باشد. یکی از جنبه‌های قابل توسعه، افزایش توانایی آن در پشتیبانی از طیف وسیع‌تری از تأسیسات و تجهیزات امدادی است. تلفن‌های همراه هوشمند می‌توانند برای جمع‌آوری داده‌ها بلادرنگ فاجعه مؤثر واقع شوند و با ادغام با سامانه‌های پشتیبانی تصمیم‌گیر تحت وب دقت و سرعت واکنش را در شرایط بحرانی افزایش خواهد داد. چنین ظرفیتی زمانی اهمیت بیشتری می‌یابد که وظایف امدادگران نیز به شکل خودکار در بستر سیستم و با استفاده از تلفن‌های هوشمند تخصیص یابند و هماهنگی میان نیروهای حاضر در صحنه تسهیل شود. از سوی دیگر، کارایی سامانه زمانی دوچندان خواهد شد که موتور تصمیم‌گیری آن به‌صورت پویا عمل کند؛ به این منظور که بتواند در لحظه به تغییرات غیرمنتظره محیطی پاسخ دهد. افزوده شدن لایه‌های تحلیلی مبتنی بر یادگیری ماشین نیز امکان پیش‌بینی دقیق‌تر تقاضای اقلام امدادی را فراهم می‌کند و برنامه‌ریزی را به واقعیت‌های میدانی نزدیک‌تر می‌سازد. در کنار همه این موارد، بهره‌گیری از مدل‌های زبان بزرگ می‌تواند به تحلیل انبوه داده‌های متنی و گزارش‌های غیرساختاریافته مرتبط با بلاای طبیعی کمک کند و اطلاعات سازمان‌یافته‌ای استخراج شود که به‌طور مستقیم در بهبود کیفیت تصمیم‌گیری سامانه به کار رود.

نتیجه‌گیری و پیشنهادها

این پژوهش، سامانه‌ای مبتنی بر وب را معرفی می‌کند که به‌عنوان یک ابزار قدرتمند برای بهینه‌سازی تخصیص منابع در عملیات امدادرسانی عمل می‌کند. سامانه مذکور، یک سیستم جامع است که از ترکیب سه عنصر اصلی تشکیل شده است: یک پایگاه داده جامع، یک موتور پردازش تصمیم‌گیری و یک رابط کاربری کاربرپسند. هر یک از این اجزا با استفاده از فناوری‌های نوین و متناسب باهدف طراحی شده و در یک پلتفرم وب یکپارچه ادغام شده‌اند. برای اثبات کارایی سامانه، مطالعه موردی ارائه شده است که در آن، سناریوهای مختلف امدادرسانی شبیه‌سازی شده و سامانه به‌طور موفقیت‌آمیزی تخصیص منابع بهینه را برای هر سناریو ارائه کرده است. الگوریتم‌های استفاده شده در هسته سیستم برای ۳ پیکربندی استاندارد (MC1)، بودجه کم (MC2) و رضایت کم تقاضا (MC3) در ۵ دوره زمانی ۸، ۱۶، ۲۴، ۴۸ و ۷۲ ساعته اجرا شدند و نتایج حاصل نشان می‌دهد که مدل در هر یک از این پیکربندی‌ها عملکردی سازگار با انتظارات داشته و توانسته است خروجی‌های قابل قبولی ارائه دهد. کاربران می‌توانند با توجه به شرایط عدم قطعیت پس از بحران، پیکربندی‌ها و سناریوهای مختلف را تعریف کرده و مدل را بر اساس آن‌ها اجرا و درمورد نتایج آن تصمیم‌گیری کنند. نحوه تعریف پیکربندی برای عملکرد بهتر مدل نیازمند دانش و دقت بسیار زیادی است که باعث شده این مورد به چالش اصلی این تحقیق تبدیل شود. همچنین الگوریتم‌های بکار گرفته شده در این تحقیق نیازمند تحلیل‌ها و ارزیابی‌های بیشتر برای سنجش حساسیت و پایداری‌شان نسبت به پارامترهای متغیر مدل هستند. ازاین‌رو پیشنهاد ما برای تحقیقات در زمینه بهینه‌سازی با اهداف متضاد، استفاده از الگوریتم‌های بهینه‌سازی چندهدفه نظیر NSGA-II برای چالش تعیین ضرایب اهداف در پیکربندی‌های مختلف سیستم جهت ترکیب خطی

[9] Aghsami A, Sharififar S, Markazi Moghaddam N, Hazrati E, Jolai F, Yazdani R. Strategies for humanitarian logistics and supply chain in organizational contexts: pre-and post-disaster management perspectives. *Systems*. 2024;12(6):215. <https://doi.org/10.3390/systems12060215>

[10] Salam MA, Khan SA. Lessons from the humanitarian disaster logistics management: A case study of the earthquake in Haiti. *Benchmarking: An International Journal*. 2020;27(4):1455–73. <https://doi.org/10.1108/BIJ-04-2019-0165>

[11] Saïah F, Vega D, Kovács G. Toward a common humanitarian supply chain process model: the Frontline Humanitarian Logistics Initiative. *International Journal of Operations & Production Management*. 2023;43(13):238–69. <https://doi.org/10.1108/IJOPM-01-2023-0054>

[12] Florez JV, Luras M, Okongwu U, Dupont L. A decision support system for robust humanitarian facility location. *Engineering Applications of Artificial Intelligence*. 2015;46:326–35. <https://doi.org/10.1016/j.engappai.2015.06.020>

[13] Balcik B, Beamon BM, Krejci CC, Muramatsu KM, Ramirez M. Coordination in humanitarian relief chains: Practices, challenges and opportunities. *International Journal of production economics*. 2010;126(1):22–34. <https://doi.org/10.1016/j.ijpe.2009.09.008>

[14] Boostani A, Jolai F, Bozorgi-Amiri A. Designing a sustainable humanitarian relief logistics model in pre-and postdisaster management. *International Journal of Sustainable Transportation*. 2021;15(8):604–20. <https://doi.org/10.1080/15568318.2020.1773975>

[15] Munyaka J-CB, Yadavalli VSS. Using transportation problem in humanitarian supply chain to prepositioned facility locations: a case study in the Democratic Republic of the Congo. *International Journal of System Assurance Engineering and Management*. 2021;12(1):199–216. <https://doi.org/10.1007/s13198-020-01031-5>

[16] Safeer M, Anbuudayasankar S, Balkumar K, Ganesh K. Analyzing transportation and distribution in emergency humanitarian logistics. *Procedia Engineering*. 2014;97:2248–58. <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2014.12.469>

[17] da Costa SRA, Campos VBG, de Mello Bandeira RA. Supply chains in humanitarian operations: cases and analysis. *Procedia-Social and Behavioral Sciences*. 2012;54:598–607. <https://doi.org/10.1016/j.sbspro.2012.09.777>

[18] Fikar C, Gronalt M, Hirsch P. A decision support system for coordinated disaster relief distribution. *Expert Systems with Applications*. 2016;57:104–16. <https://doi.org/10.1016/j.eswa.2016.03.039>

[19] Park J, Cullen R, Smith-Jackson T, editors. Designing a decision support system for disaster management and recovery. *Proceedings of the Human Factors and Ergonomics Society Annual Meeting*; 2014: SAGE Publications Sage CA: Los Angeles, CA. <https://doi.org/10.1177/1541931214581416>

مشارکت نویسندگان

در این مقاله، نویسندگان به نسبت برابر مشارکت داشته‌اند.

تشکر و قدردانی

بدین وسیله از کلیه عزیزی که ما را در این تحقیق یاری کردند، صمیمانه تشکر می‌کنیم.

تعارض منافع

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

منابع و مآخذ

[1] Paton D, Smith L, Violanti J. Disaster response: risk, vulnerability and resilience. *Disaster Prevention and Management: An International Journal*. 2000;9(3):173–80. <https://doi.org/10.1108/09653560010335068>

[2] Lee J, Xu JZ, Sohn K, Lu W, Berthelot D, Gur I, et al. Assessing post-disaster damage from satellite imagery using semi-supervised learning techniques. *arXiv preprint arXiv:201114004*. 2020. <https://doi.org/10.48550/arXiv.2011.14004>

[3] Modiri M, Eskandari M, Hasanzadeh S. Multi-objective modeling of relief items distribution network design problem in disaster relief logistics considering transportation system and CO2 emission. *Scientia Iranica*. 2022. <https://doi.org/10.24200/sci.2022.57132.5080>

[4] Cavdur F, Sebatli-Saglam A, Kose-Kucuk M. A spreadsheet-based decision support tool for temporary-disaster-response facilities allocation. *Safety science*. 2020;124:104581. <https://doi.org/10.1016/j.ssci.2019.104581>

[5] Aliakbari A, Rashidi Komijan A, Tavakkoli-Moghaddam R, Najafi E. A new robust optimization model for relief logistics planning under uncertainty: a real-case study. *Soft Computing-A Fusion of Foundations, Methodologies & Applications*. 2022;26(8). <https://doi.org/10.1007/s00500-022-06823-4>

[6] Durugbo CM, Al-Balushi Z. Supply chain management in times of crisis: a systematic review. *Management Review Quarterly*. 2023;73(3):1179–235.

[7] Tickle M, Hannibal C. The use of technological innovations in promoting effective humanitarian aid: A systematic review of the literature. *International Journal of Technology and Human Interaction (IJTHI)*. 2022;18(1):1–14. <https://doi.org/10.4018/IJTHI.293204>

[8] Ahmadi M, Seifi A, Tootooni B. A humanitarian logistics model for disaster relief operation considering network failure and standard relief time: A case study on San Francisco district. *Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review*. 2015;75:145–63. <https://doi.org/10.1016/j.tre.2015.01.008>

management. Journal of Humanitarian Logistics and Supply Chain Management. 2020;10(2):205–30.
https://doi.org/10.1108/JHLSCM-07-2019-0043

[32] Schätter F, Wiens M, Schultmann F. A new focus on risk reduction: an ad hoc decision support system for humanitarian relief logistics. Ecosystem Health and Sustainability. 2015;1(3):1–11. https://doi.org/10.1890/ehs14-0020.1

[33] Cavdur F, Kose-Kucuk M, Sebatli A. Allocation of temporary disaster response facilities under demand uncertainty: An earthquake case study. International Journal of Disaster Risk Reduction. 2016;19:159–66.
https://doi.org/10.1016/j.ijdr.2016.08.009

[34] Quevedo J, Abdelatti M, Imani F, Sodhi M, editors. Using reinforcement learning for tuning genetic algorithms. Proceedings of the genetic and evolutionary computation conference companion; 2021.
https://doi.org/10.1145/3449726.3463203

[20] Cavdur F, Sebatli A. A decision support tool for allocating temporary-disaster-response facilities. Decision Support Systems. 2019;127:113145.
https://doi.org/10.1016/j.dss.2019.113145

[21] Rye S, Aktas E. A multi-attribute decision support system for allocation of humanitarian cluster resources based on decision makers' perspective. Sustainability. 2022; 14(20): 13423. https://doi.org/10.3390/su142013423

[22] Laguna-Salvadó L, Luras M, Okongwu U, Comes T. A multicriteria Master Planning DSS for a sustainable humanitarian supply chain. Annals of Operations Research. 2019;283(1):1303–43.
https://doi.org/10.1016/j.engappai.2015.06.020

[23] Kondaveti R, Ganz A, editors. Decision support system for resource allocation in disaster management. 2009 Annual International Conference of the IEEE Engineering in Medicine and Biology Society; 2009: IEEE.
https://doi.org/10.1109/IEMBS.2009.5332498

[24] Su M-D, Wen T-H, editors. Spatial decision support system for irrigation demand planning. Bridging the Gap: Meeting the World's Water and Environmental Resources Challenges; 2001.
https://doi.org/10.1061/40569(2001)359

[25] Lahmar B, Dridi H, Akakba A. A GIS-BASED MULTICRITERIA SPATIAL DECISION SUPPORT SYSTEM MODEL TO HANDLE HEALTH FACILITIES RESOURCES. CASE OF CRISIS MANAGEMENT IN BATNA, ALGERIA. Geographia Technica. 2020;15(1).
https://doi.org/10.21163/GT_2020.151.16

[26] Alabbad Y, Mount J, Campbell AM, Demir I. A web-based decision support framework for optimizing road network accessibility and emergency facility allocation during flooding. Urban Informatics. 2024;3(1):10.
https://doi.org/10.1007/s44212-024-00040-0

[27] Maharjan R, Hanaoka S. Fuzzy multi-attribute group decision making to identify the order of establishing temporary logistics hubs during disaster response. Journal of Humanitarian Logistics and Supply Chain Management. 2019;9(1):2–21.
https://doi.org/10.1108/JHLSCM-02-2018-0013

[28] Salvadó LL, Luras M, Comes T, editors. Sustainable Performance Measurement for Humanitarian Supply Chain Operations. ISCRAM; 2017.

[29] Sahebjamnia N, Torabi SA, Mansouri SA. A hybrid decision support system for managing humanitarian relief chains. Decision Support Systems. 2017;95:12–26.
https://doi.org/10.1016/j.dss.2016.11.006

[30] Jana S, Majumder R, Menon PP, Ghose D, editors. Decision support system (DSS) for hierarchical allocation of resources and tasks for disaster management. Operations Research Forum; 2022: Springer.
https://doi.org/10.1007/s43069-022-00148-6

[31] Di Pasquale V, Fruggiero F, Iannone R. A numerical approach for inventory pre-positioning in emergency

معرفی نویسندگان

AUTHOR(S) BIOSKETCHES



امیر پروینی ایشان دانشجوی کارشناسی ارشد رشته سیستم‌های اطلاعات مکانی دانشگاه خواجه نصیرالدین طوسی می‌باشند. ایشان مدرک کارشناسی خود را در سال ۱۴۰۲ از دانشگاه تهران اخذ نمودند و حوزه فعالیت ایشان بهینه‌سازی می‌باشد. در حال حاضر مشغول پژوهش بر روی موضوع بهینه‌سازی لجستیک بشردوستانه بعد از بحران هستند.

Parvini, A. Master of Science Student in the Department of Geospatial Information Systems, Faculty of Geodesy and Geomatics Engineering, K. N. Toosi University of Technology, Tehran, Iran

 amir.parvini@email.kntu.ac.ir



علی اصغر آل شیخ ایشان استاد تمام گروه سیستم‌های اطلاعات مکانی دانشکده مهندسی ژئودزی و ژئوماتیک دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی می‌باشند. ایشان دارای مدرک دکترای تخصصی در رشته مهندسی سیستم‌های اطلاعات مکانی (GIS) از دانشگاه کلگری کانادا در سال ۱۳۷۷ می‌باشند. همچنین

جوایز و افتخارات متعددی برای مشارک‌های صنعتی علمی و دانشگاهی کسب کرده‌اند. مقالات بسیاری در مجلات معتبر خارجی و داخلی توسط ایشان در زمینه‌های مختلف همچون سیستم‌های اطلاعات مکانی، GIS تحت وب، مکان‌یابی، هوش مصنوعی، Health GIS و ... به چاپ رسیده است.

Engineering, K. N. Toosi University of Technology, Tehran, Iran
✉ alesheikh@kntu.ac.ir

Alesheikh, A. Full Professor at the Department of Geospatial
Information Systems, Faculty of Geodesy and Geomatics

Citation (Vancouver): Parvini A, AleSheikh A.A. [Design and Development of an Intelligent Web-Based Spatial Decision Support System for Optimal Allocation of Local Disaster Response Centers]. *J. RS. GEOINF. RES.* 2025; 3(2): 345-362

 <https://doi.org/10.22061/jrsg.2025.12658.1116>



COPYRIGHTS

© 2025 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/>)



ORIGINAL RESEARCH PAPER

Multi-Class 3D Change Detection in Urban Areas Using UNet++

A. Ebrahimi, M. Hasanlou*

School of Surveying and Geospatial Engineering, College of Engineering, University of Tehran, Tehran, Iran

ABSTRACT

Received: 19 June 2025
 Reviewed: 06 August 2025
 Revised: 16 September 2025
 Accepted: 10 January 2026

KEYWORDS:

Change Detection
 Remote Sensing
 Deep Learning
 3D
 CNN

* Corresponding author

✉ hasanlou@ut.ac.ir

☎ (+9821) 88008841

Background and Objectives: With the rapid expansion of urbanization, the need for automatic updating of change maps has become increasingly important. Accurate and up-to-date spatial information is essential for monitoring construction activities and tracking the development of urban areas. Traditional approaches to change detection are mostly limited to two-dimensional analysis and often lack sensitivity to vertical changes. This shortcoming fails to identify multi-story constructions, thereby limiting the completeness of monitoring outcomes. Recent advances in remote sensing and deep learning have enabled three-dimensional urban change detection, providing superior results compared to classical methods. This study aims to improve the performance of 3D urban change detection by introducing a deep learning approach that integrates multi-source data. The primary objective is to automatically identify and distinguish four types of building-related changes—new construction, complete demolition, height increase, and height decrease—alongside unchanged areas, to generate a comprehensive 3D change map.

Methods: The dataset employed in this research consists of high-resolution RGB aerial imagery and corresponding Digital Surface Model (DSM) data acquired from two different periods over Valladolid, Spain. The input data were prepared by stacking RGB images and DSMs from both epochs into an eight-band input, allowing the network to jointly analyze spectral and elevation information. The dataset was divided into training (90%) and testing (10%) subsets. To increase variability in the training data and reduce overfitting, augmentation techniques such as horizontal and vertical flipping, random rotation, and Gaussian blurring were applied. The proposed model architecture combines a ResNet-34 backbone for feature extraction with a UNet++ decoder for pixel-level change reconstruction. Model parameters were updated using the Adam optimizer. In the first stage, the deep network was trained in a binary setting (change/no-change) and evaluated against classical approaches, including Random Forest, image differencing/ratioing, and a PCA–K-Means hybrid method. In the second stage, the network was retrained for five-class classification, including the four change categories and the unchanged class, using a loss function optimized directly for the Intersection-over-Union (IoU) metric. Model performance was assessed using Accuracy, Recall, Precision, and F1-score.

Findings: In the binary classification stage, after 50 epochs of training, the network successfully identified most real changes while maintaining a low false alarm rate. Evaluation metrics confirmed this performance, with Recall and Accuracy both reaching 98.5% and an F1-score of 0.92, considerably outperforming the classical methods. Unlike traditional approaches, the deep learning model was able to detect almost all small-scale constructions and demolitions. In the five-class stage, the model effectively identified and classified change types, achieving a Recall of 96.32%, an Accuracy of 96%, and an F1-score of 0.95. All newly constructed and fully demolished buildings were correctly labeled in the output maps, and a large proportion of unchanged areas received no misclassification.

Conclusion: The findings demonstrate that combining elevation data with 2D imagery and leveraging deep learning architectures significantly mitigates the limitations of traditional change detection approaches and enhances accuracy. The developed model is capable of detecting not only the location but also the type of change. This approach has strong potential applications in monitoring unauthorized constructions, updating spatial databases, and assessing urban development. However, its effectiveness relies on the availability of accurate DSM data, which may not be consistently accessible for all urban areas. Additionally, the

training of deep networks requires extensive labeled datasets and considerable computational resources, which could limit their applicability in operational contexts.



NUMBER OF REFERENCES

48



NUMBER OF FIGURES

7



NUMBER OF TABLES

1

مقاله پژوهشی

آشکارسازی تغییرات سه بعدی در مناطق شهری با استفاده از مدل UNet++

علیرضا ابراهیمی، مهدی حسنلو*

دانشکده مهندسی نقشه برداری و اطلاعات مکانی، دانشکده گان فنی، دانشگاه تهران، تهران، ایران

چکیده

پیشینه و اهداف: امروزه با توسعه شهر نشینی، ضرورت به روزرسانی خودکار نقشه های تغییرات بیش از پیش اهمیت یافته است. به روزرسانی نقشه های مکانی، نظارت بر ساخت و ساز و پایش مناطق توسعه یافته نیازمند اطلاعات دقیق از بافت شهری و نقشه های جدید تغییرات می باشد. از آنجا که روش های سنتی پایش اغلب به تحلیل دو بعدی تغییرات پرداخته و حساسیت کافی در ثبت تغییرات بعد سوم یا ارتفاع را ندارند، لذا این محدودیت موجب عدم تشخیص ساخت و سازهای طبقه ای شده که در نتیجه آن، نقص اطلاعات در پایش را به همراه خواهد داشت. با پیشرفت در سنجش از دور و روش های نوین یادگیری عمیق، آشکارسازی تغییرات سه بعدی شهری امکان پذیر شده است که تاکنون نتایج برتری را نسبت به روش های کلاسیک ارائه داده اند. این پژوهش با هدف بهبود عملکرد در آشکارسازی تغییرات سه بعدی شهری، رویکردی بر مبنای یادگیری عمیق با استفاده از داده هایی با منابع مختلف ارائه می دهد تا انواع تغییرات ساختمانی به طور خودکار شناسایی و تفکیک نماید. هدف اصلی تفکیک چهار نوع تغییر ساختمانی از جمله ساخت جدید، تخریب کامل، افزایش ارتفاع و کاهش ارتفاع در کنار نواحی بدون تغییر می باشد تا نقشه جامعی از تغییرات سه بعدی شهری ارائه گردد.

روش ها: مجموعه داده مورد استفاده در این پژوهش شامل تصاویر هوایی رنگی (RGB) با وضوح مکانی بالا به همراه داده های مدل رقومی سطح (DSM) مربوط به دو بازه زمانی مختلف از محدوده شهری والادولید اسپانیا می باشد. داده ورودی شامل تصاویر رنگی قبل و بعد از تغییر به همراه مدل ارتفاعی متناظر آن به صورت یک ورودی هشت بانده با یکدیگر ترکیب شده تا شبکه به طور همزمان اطلاعات طیفی و ارتفاعی را مشاهده کند و جهت ورود به فرآیند آموزش مدل، داده ها به نسبت ۹۰ به ۱۰ درصد به دو دسته آموزش و آزمایش تقسیم بندی می شوند. جهت افزایش تنوع داده های آموزش و جلوگیری از برازش بیش از حد از روش هایی چون وارون سازی افقی و عمودی، چرخش تصادفی و تارگی گausسی بهره گرفته شده است. معماری مدل متشکل از یک شبکه ی عمیق ResNet-34 به عنوان بخش ویژگی یاب و از شبکه UNet++ جهت بازسازی پیکسل به پیکسل تغییرات می باشد. همچنین برای به روزرسانی پارامترهای مدل از الگوریتم Adam بهره گرفته شده است. در مرحله نخست مدل شبکه عمیق به صورت دودویی (تغییر/عدم تغییر) آموزش داده شده و عملکرد آن در مقایسه با روش کلاسیک جنگل تصادفی، تفاضل یا نسبت گیری و روش ترکیبی تحلیل مولفه های اصلی (PCA) و خوشه بندی K-Means مقایسه می شود. پس از آن شبکه با برچسب های پنج کلاسه شامل چهار نوع تغییر گفته شده و برچسب عدم تغییر مجدداً آموزش داده و جهت بهبود فرآیند یادگیری از یک تابع هزینه ساز بر مبنای بهینه سازی مستقیم معیار (IoU) استفاده شده است. جهت مقایسه عملکرد مدل ها از معیارهایی نظیر Accuracy، Recall، F1-score و Precision استفاده شده است.

یافته ها: در مرحله نخست این شبکه پس از ۵۰ اپک آموزش اغلب تغییرات واقعی را شناسایی کرده و در عین حال نرخ هشدار غلط را پایین نگه داشته است که معیارهای ارزیابی Accuracy، Recall، F1-score و مقادیر ۹۸.۵٪ و ۹۸.۵٪ و ۰.۹۲ این نتایج را تأکید می کنند و این ارقام به طور محسوسی بهتر از روش های کلاسیک بوده. همچنین در مدل یادگیری عمیق بر خلاف دیگر روش ها تقریباً تمامی موارد ساخت و ساز یا تخریب در مقیاس های کوچک تشخیص داده شده است. در مرحله پنج کلاسه، تغییرات به خوبی توسط مدل شناسایی و طبقه بندی شده اند و معیارهای Recall،

تاریخ دریافت: ۲۹ خرداد ۱۴۰۴
تاریخ داوری: ۱۵ مرداد ۱۴۰۴
تاریخ اصلاح: ۲۵ شهریور ۱۴۰۴
تاریخ پذیرش: ۲۰ دی ۱۴۰۴

واژگان کلیدی:

آشکارسازی تغییرات
سنجش از دور
یادگیری عمیق
سه بعدی
شبکه عصبی پیچشی

* نویسنده مسئول

hasanlou@ut.ac.ir

۰۲۱-۸۸۰۰۸۸۴۱

Accuracy و F1-score به ترتیب برابر با ۹۶.۳۲٪ و ۹۶٪ و ۰.۹۵ می‌باشد. تمامی سازه‌های جدید احداث شده و ساختمان‌های کاملاً تخریب شده در نقشه خروجی مدل با برچسب درست تشخیص داده شده اند و بخش وسیعی از مناطق بدون تغییر هیچ برچسب اشتباهی دریافت نکرده‌اند.

نتیجه‌گیری: نتایج نشان‌دهنده آن است که ترکیب داده‌های ارتفاعی با تصاویر دو بعدی و به کارگیری مدل‌های یادگیری عمیق به طرز چشمگیری کاستی‌های روش سنتی تشخیص تغییرات را برطرف کرده و افزایش دقت را به همراه خواهد داشت. این مدل توسعه یافته قادر است که نه تنها مکان تغییر بلکه نوع تغییر را شناسایی کند. لازم به ذکر است که از این شیوه نوین می‌توان جهت پایش ساخت و سازهای غیر مجاز، به روز رسانی پایگاه‌های داده مکانی و ارزیابی تغییرات شهری استفاده شود. مهمترین محدودیت این پژوهش وابستگی به داده‌های ارتفاعی دقیق می‌باشد که تهیه منظم آن در تمامی شهرها امکان پذیر نمی‌باشد. به علاوه آموزش مدل‌های عمیق نیازمند داده‌های برچسب دار گسترده و توان پردازشی بالا می‌باشد که ممکن است در کاربردهای عملی محدودیت ایجاد کند.

مقدمه

سهمی لازم را جهت تشخیص تغییرات سه‌بعدی فراهم کند [۵]. به کمک اطلاعات سه‌بعدی می‌توان عوارضی نظیر ساختمان‌ها را از سطح زمین تفکیک کرده و تغییرات قائم را شناسایی نمود. ادغام تصاویر هوایی با داده‌های ارتفاعی به طرز چشمگیری دقت شناسایی ساختمان‌های جدید و سایر تغییرات سازه‌ای همچون کاهش یا افزایش ارتفاع را افزایش داده است. بدین ترتیب، تلفیق داده‌های طیفی و اطلاعات ارتفاعی این امکان را ایجاد می‌کند که نه تنها وقوع تغییر در یک مکان مشخص، شناسایی بلکه ماهیت سه‌بعدی تغییر نیز (از نظر افزایش یا کاهش ارتفاع ساختمان) مشخص گردد [۶]. این رویکرد نسبت به روش‌های دوبعدی رایج، تصویری با اطلاعات بیشتر از تحولات شهری ارائه می‌دهد و قابلیت اطمینان و دقت نتایج را بهبود می‌بخشد [۷].

همزمان با پیشرفت در بهره‌برداری از داده‌های چندمنبعی، ظهور روش‌های یادگیری عمیق تحول شگرفی در حوزه تحلیل‌های مکانی و سنجش‌ازدور به‌وجود آورده است [۸]. در سال‌های اخیر، رویکردهای مبتنی بر شبکه‌های عصبی عمیق، به‌ویژه شبکه‌های عصبی پیچشی (CNN)، جایگاه اصلی را در روش‌های تشخیص تغییرات به خود اختصاص داده است. این شبکه‌ها با یادگیری الگوهای پیچیده از داده‌های تصویری، ویژگی‌های مهم تصویر را پیدا کرده و دقت آشکارسازی تغییرات را به میزان قابل توجهی نسبت به روش‌های سنتی افزایش داده‌اند [۹]. به عنوان نمونه، به‌کارگیری مدل‌های قطعه‌بندی مانند UNet در تصاویر هوایی چندزمانه نشان داده است که شبکه‌های عمیق قادر به شناسایی دقیق نواحی تغییر یافته در ساختمان‌ها هستند و عملکردی به مراتب بهتر از روش‌های سنتی مبتنی بر آستانه‌گذاری یا مقایسه تصاویر دارند [۱۰، ۱۱]. از اواسط دهه ۲۰۱۰ میلادی به دنبال پیشرفت معماری‌های CNN و در دسترس بودن داده‌های با وضوح مکانی بالا، پژوهش‌های بسیاری در زمینه سنجش‌ازدور مبتنی بر یادگیری عمیق انجام شده است که امکان تحلیل خودکار تصاویر شهری را با جزئیات و دقت بالایی فراهم کرده‌اند [۸، ۹]. در نتیجه این پیشرفت‌ها، اکنون ابزارهای نوینی در اختیار محققان و مدیران شهری قرار گرفته که می‌توانند تغییرات را نه‌تنها سریع‌تر بلکه با دقت مکانی بالاتر و در بعد سوم (ارتفاع) شناسایی کنند [۱۲].

امروزه آشکارسازی تغییرات در مناطق شهری یکی از نیازهای اساسی مدیریت شهری می‌باشد که در زمینه‌هایی مانند نظارت بر ساخت‌وسازها، به‌روزرسانی نقشه‌ها، ارزیابی خسارات و تصمیمات مدیریتی نقشی حیاتی دارد. از آنجا که به‌روزرسانی تغییرات شهری فرایندی زمان‌بر و پرهزینه است، خودکارسازی تشخیص تغییرات ساختمانی نقش مهمی در برنامه‌ریزی شهری و مدیریت کاربری زمین دارد. هدف این فرآیند شناسایی ساخت‌وسازهای جدید، تخریب ساختمان‌ها یا تغییرات دیگر در سازه‌های شهری از طریق مقایسه تصاویر چندزمانه می‌باشد [۱]. با توجه به رشد بالای شهرنشینی و قرار داشتن بسیاری از کشورها در پهنه‌های زلزله خیز یا سایر حوادث طبیعی، اهمیت پایش تغییرات ساختمانی در سامانه‌های اطلاعات مکانی و نظارت مبتنی بر سنجش از دور به یکی از دغدغه‌های اساسی مدیریت شهری تبدیل شده است. در این میان، بهره‌گیری از تصاویر هوایی و ماهواره‌ای با توان تفکیک مکانی بالا، امکان تحلیل دقیق‌تر جزئیات تغییرات شهری همچون تغییرات سه‌بعدی را فراهم کرده است که این موضوع به افزایش دقت و کارایی نظارت خودکار منجر می‌شود [۲].

روش‌های سنتی آشکارسازی تغییرات، نظیر تفاضل یا نسبت‌گیری دو تصویر معمولاً تغییرات دو بعدی را شناسایی کرده و در تشخیص تغییرات حجمی و ارتفاعی با محدودیت‌های جدی مواجه‌اند [۳]. در پایش توسعه شهری، صرف تشخیص یک تغییر در نقشه‌ی دوبعدی کافی نیست و باید مشخص شود که آیا ساختمانی جدید احداث شده است یا یک ساختمان موجود افزایش ارتفاع داشته یا تخریب شده است؛ چنین اطلاعاتی با رویکردهای صرفاً دوبعدی به‌دست نمی‌آید. از آنجاکه نقشه‌های تغییر حاصل از این روش‌ها عمدتاً محدود به تغییرات دو بعدی هستند و اطلاعاتی در مورد تغییرات ارتفاعی سازه‌ها ارائه نمی‌دهند بنابراین در تحلیل‌های حجمی یا توپوگرافی (مانند پایش توسعه عمودی شهرها، برآورد تغییرات ارتفاع ساختمان‌ها یا بررسی حجم آوار و خاک‌برداری) مورد استفاده نمی‌باشد [۴].

برای رفع این محدودیت‌ها، بهره‌گیری همزمان از داده‌های ارتفاعی در کنار اطلاعات دوبعدی مکانی پیشنهاد شده است. ترکیب مدل رقومی ارتفاع (DEM) یا مدل رقومی سطح (DSM) با تصاویر رنگی می‌تواند دید

بر گرفته و با تفکیک بین انواع مختلف سازه‌ها، دید جامعی نسبت به تحولات شهری ارائه می‌دهد [۱۷]. برای شناسایی الگوهای پیچیده‌ی تغییرات، یک چارچوب یادگیری عمیق به کار گرفته شده است که معماری ResNet-34 را با شبکه قطعه‌بندی پیشرفته UNet++ تلفیق می‌کند. استفاده از ساختار ResNet-34 به شبکه امکان یادگیری مؤثر ویژگی‌های عمیق و آشکارسازی تغییرات را می‌دهد و معماری UNet++ با بهره‌گیری از مسیرهای چندمقیاسه و اتصالات پرشی، امکان بازسازی دقیق نقشه‌های تغییر با حفظ جزئیات مکانی را فراهم می‌کند [۱۸، ۱۹]. این شبکه با دریافت همزمان اطلاعات طیفی و ارتفاعی، نقشه تغییرات ساختمانی را به صورت پیکسلی و در قالب چهار کلاس مذکور تولید می‌کند و می‌تواند به بهبود مدیریت شهری کمک شایانی نماید. نتایج حاصل از این پژوهش، اطلاعات ارزشمندی درباره میزان و نوع ساخت‌وسازها یا تخریب‌های صورت گرفته در شهر ارائه می‌دهد که در برنامه‌ریزی توسعه‌ی شهری، ارزیابی ایمنی سازه‌ها و مدیریت بحران (نظیر برآورد خسارات بعد از حوادث) کاربرد دارد. در نهایت، این دستاوردها نشان‌دهنده پتانسیل الگوریتم‌های یادگیری عمیق و تلفیق داده‌های چندبعدی در بهبود دقت و جزئیات تحلیل تغییرات مکانی در محیط‌های شهری است [۲۰].

روش تحقیق

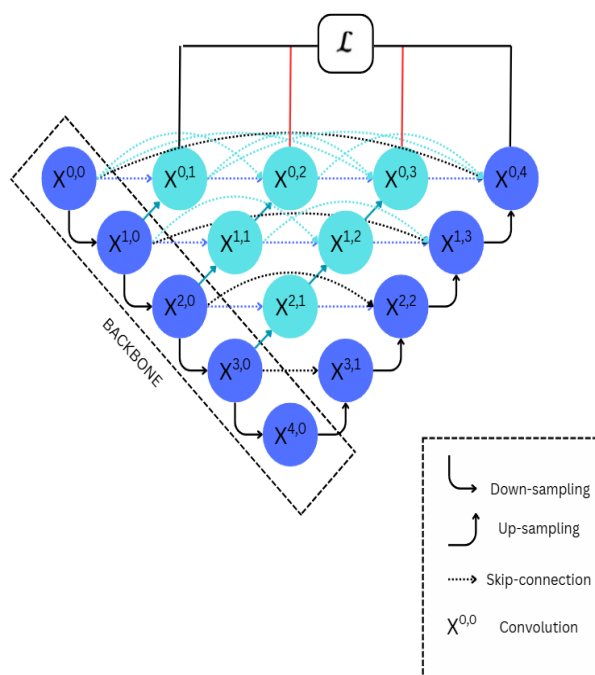
جهت انجام قطعه‌بندی با دقت بالا از ترکیب داده‌های تصویری رنگی و مدل رقومی ارتفاع استفاده شده است که از مجموعه داده 3DCD به دست آمده است. این مجموعه داده شامل تصاویر طیفی و همچنین مدل رقومی زمین در دو تاریخ ۲۰۱۰ و ۲۰۱۷ با ابعاد 400×400 پیکسل و قدرت تفکیک مکانی ۰.۵ متر می‌باشد [۴۸]. بمنظور آماده‌سازی مجموعه داده، ابتدا تصاویر رنگی و اطلاعات ارتفاعی متناظر با یکدیگر برای دو زمان قبل و بعد با یکدیگر ترکیب شده و به صورت یک ورودی هشت کاناله در آمده‌اند؛ به عبارتی برای هر زمان باندهای قرمز، آبی، سبز به همراه لایه ارتفاع روی یکدیگر قرار گرفته و در نهایت اطلاعات زمان قبل و بعد جهت ورود به مدل با یکدیگر ترکیب و به صورت یک داده یکپارچه در آمده‌اند. این ادغام موجب می‌شود که شبکه عصبی به‌طور همزمان از ویژگی‌های بصری و ارتفاعی برای درک بهتر ساختارهای موجود در تصویر استفاده کند [۲۱]. برای آماده‌سازی داده‌ها جهت ورود به مدل، تمامی تصاویر به ابعاد 512×512 پیکسل بازنمونه‌گیری شده‌اند و جهت بهبود تعمیم‌پذیری مدل و جلوگیری از بیش‌برازش، از روش‌هایی چون وارون سازی افقی و عمودی، چرخش تصادفی و تارگی گوسی بر روی داده‌های آموزشی استفاده شده است که تنوع مجموعه داده را افزایش داده و مدل را نسبت به تغییرات مختلف در داده‌ها مقاوم‌تر می‌کنند.

ونگ و همکاران [۱۳] یک معماری جدید به نام FRCD-Net برای آشکارسازی تغییرات در تصاویر سنجش‌ازدور معرفی می‌کند. هدف اصلی این پژوهش، بهبود دقت در آشکارسازی از طریق تلفیق مؤثر ویژگی‌ها و تقویت جزئیات مکانی است. در طراحی این شبکه، از رویه‌هایی برای بازنمایی بهتر ویژگی‌های با سطح بالا و پایین استفاده شده تا اطلاعات متنی و فضایی به خوبی ترکیب شوند. نتایج تجربی بر روی چندین مجموعه داده، نشان می‌دهد که FRCD در مقایسه با مدل‌های پایه و دیگر روش‌های یادگیری عمیق، عملکرد بهتری در تفکیک نواحی تغییر کرده از ثابت ارائه می‌دهد. این پیشرفت به‌ویژه در آشکارسازی تغییرات ظریف و مناطق با نویز زیاد مشهود است. مشکینی و همکاران [۱۴] مدلی مبتنی بر 3D CNN پیشنهاد داده‌اند که توانایی استخراج ویژگی‌های زمانی-مکانی را از تصاویر ماهواره‌ای با وضوح بالا دارد. این مدل از یک شبکه‌ی 2D CNN از پیش‌آمخته‌شده به عنوان استخراج‌کننده ویژگی پایه استفاده کرده و آن را با ساختار سه‌بعدی تلفیق می‌کند تا تغییرات در طول زمان به‌صورت دقیق‌تری شناسایی شود. ترکیب بین ویژگی‌های مکانی از 2D CNN و ویژگی‌های زمانی از طریق ساختار سه‌بعدی موجب بهبود قابل توجهی در عملکرد مدل به‌ویژه در داده‌هایی که شامل تغییرات تدریجی هستند، می‌شود.

در پژوهشی که توسط هوآنگ [۱۰] صورت گرفته است از یک شبکه‌ی دوقلو (Siamese) با ترکیب معماری‌های EfficientNet و MANet برای آشکارسازی ساختمانی در تصاویر با توان تفکیک مکانی متوسط بهره‌گیری شده است. استفاده از معماری EfficientNet باعث کاهش بار محاسباتی و افزایش بازدهی شده و در کنار آن، MANet به پردازش بهتر نواحی مهم تصویر کمک می‌کند. این مدل با پردازش جفت تصاویر قبل و بعد از تغییرات، تفاوت‌های ساختاری را شناسایی کرده و با کمک مکانیزم‌های قابل توجه، نواحی تغییر یافته را با دقت بالا مشخص می‌کند. نتایج آزمایش‌ها نشان‌دهنده برتری این روش در مقابل بسیاری از مدل‌های مشابه در زمینه‌ی تشخیص تغییرات ساختمانی است.

با توجه به توضیحات ذکرشده، هدف این پژوهش رویکرد جدید برای آشکارسازی تغییرات سه‌بعدی در بافت شهری می‌باشد که از ترکیب داده‌های تصویری و ارتفاعی با بهره‌گیری از روش یادگیری عمیق استفاده شده است. داده‌های مورد استفاده شامل تصاویر RGB با وضوح مکانی بالا و مدل رقومی ارتفاع از شهر والادولید اسپانیا در دو زمان متفاوت است که امکان مقایسه دقیق ساختار سه‌بعدی شهری را فراهم می‌آورد [۱۵، ۱۶]. بر خلاف بسیاری از مطالعات پیشین که صرفاً به آشکارسازی وجود یا عدم وجود تغییر بسنده می‌کنند، روش پیشنهادی تغییرات را به چهار دسته (۱) ساخت‌وساز جدید، (۲) افزایش ارتفاع ساختمان، (۳) تخریب کامل و (۴) کاهش ارتفاع ساختمان دسته‌بندی می‌کند. این دسته‌بندی به‌طور ویژه تغییرات حجمی ساختمان‌ها را در

معماری UNet معمولی دارای اتصالات مستقیم از هر لایه کدگذار به لایه‌ی متناظر در رمزگشا است تا ویژگی‌های جزئی‌تر لایه‌های کم‌عمق‌تر را به مراحل بازیابی وضوح (Decoding) منتقل کند. با این حال، تفاوت معنایی قابل توجهی بین ویژگی‌های سطح بالا (کدگذار عمیق) و ویژگی‌های سطح پایین (کدگذار کم‌عمق) وجود دارد که گاهی ادغام مستقیم آنها در UNet چالش‌برانگیز است که شبکه UNet++ با معرفی اتصالات تودرتو این مشکل را برطرف می‌کند؛ به جای یک اتصال مستقیم ساده، خروجی هر لایه‌ی کدگذار ابتدا با گذر از چند لایه‌ی پیچشی میانی در سطوح مختلف پالایش شده و سپس به لایه‌ی رمزگشا منتقل می‌گردد. بدین ترتیب، ویژگی‌های سطح پایین طی چند مرحله‌ی میانی با ویژگی‌های سطح بالاتر ترکیب شده و شکاف معنایی بین بخش کدگذار و رمزگشا پر می‌شود. علاوه بر این، UNet++ از مکانیزمی به نام نظارت عمیق (Deep Supervision) نیز بهره می‌گیرد که طی آن خروجی‌های میانی چندگانه شبکه نیز تحت نظارت تابع هزینه قرار می‌گیرند تا گرادینت‌های مؤثرتر و شبکه‌ی با قابلیت تعمیم بهتر حاصل شود [۱۱، ۲۸].



شکل ۳: معماری UNet++
Fig. 3: UNet++ architecture

شکل (۲) معماری UNet++ را نمایش می‌دهد. در این شکل، دایره‌های آبی تیره نشان‌دهنده‌ی خروجی بلوک‌های کدگذار و ویژگی‌های استخراج‌شده در اعماق شبکه‌ی backbone و دایره‌های آبی روشن نشان‌دهنده‌ی خروجی واحدهای میانی/رمزگشا در سطوح گوناگون هستند. فلش‌های توپر سیاه رو به پایین فرآیند Down-sampling یا کاهش وضوح (در مسیر کدگذار) و فلش‌های رو به بالا عملیات Up-sampling یا افزایش وضوح (در مسیر رمزگشا) را نشان

شکل ۱ معماری کلی ResNet-34 را نشان می‌دهد که یک شبکه ۳۴ لایه‌ای از خانواده ResNet است. این معماری یک شبکه‌ی نسبتاً عمیق با حدود ۲۱ میلیون پارامتر است که به خاطر به‌کارگیری ساختار باقیمانده، قدرت یادگیری ویژگی‌های پیچیده را بدون مشکل ناشی از افزایش عمق دارد. در این معماری ابتدا یک لایه پیچش با کرنل 7×7 و ۶۴ فیلتر (با اندازه گام ۲) به همراه یک لایه Pooling برای کاهش ابعاد تصویر به‌کار می‌رود. پس از آن شبکه وارد چهار مرحله‌ی متوالی بلوک‌های Conv2_x تا Conv5_x می‌شود. در هر مرحله، چند بلوک باقیمانده شامل دو لایه‌ی پیچشی 3×3 وجود دارد. در این معماری، تعداد بلوک‌های هر مرحله به ترتیب ۳، ۴، ۶ و ۳ بلوک است که مجموعاً ۳۲ لایه‌ی پیچشی را تشکیل می‌دهند. با ورود به هر مرحله‌ی جدید، تعداد فیلترها دو برابر می‌شود (به عنوان مثال از ۶۴ به ۱۲۸، ۱۲۸ به ۲۵۶ و ۲۵۶ به ۵۱۲) و اولین بلوک آن مرحله با افزایش گام اندازه‌ی ویژگی‌ها را نصف می‌کند. هر بلوک باقیمانده دارای یک اتصال میان‌بر است که خروجی دو لایه‌ی 3×3 آن بلوک را با ورودی بلوک جمع می‌کند. این اتصال مستقیم (مشخص شده با فلش‌های منحنی در شکل) موجب می‌شود خروجی هر بلوک حاوی اطلاعات لایه‌های قبلی نیز باشد و در نتیجه گرادینت خطا در جهت معکوس، بدون افت شدید، می‌تواند به لایه‌های ابتدایی برسد. در انتها نیز پس از آخرین بلوک باقیمانده، یک لایه میانگین‌گیری سراسری (Global Average Pooling) و یک لایه Fully connected قرار می‌گیرد که نقش دسته‌بندی نهایی را ایفا می‌کند [۲۷].

مزایای ResNet و نقش آن در مدل حاضر

معماری ResNet به دلیل توانایی خود در یادگیری هویت نگاشت (Identity Mapping)، این امکان را فراهم می‌سازد که لایه‌های اضافی نه تنها به مدل آسیب نزنند بلکه بهبود دهنده مدل نیز باشند. در مدل حاضر، از ResNet-34 به عنوان بخش کدگذار شبکه قطعه‌بندی استفاده شده است. نقش ResNet-34 استخراج ویژگی‌های چند مقیاسی و عمیق از تصویر ورودی که شامل اطلاعات طیفی و ارتفاعی است، می‌باشد. در سطوح اولیه این شبکه ویژگی‌های محلی و جزئی مانند بافت و لبه شناسایی می‌شوند این در حالی است که در لایه‌های عمیق‌تر روابط گسترده و الگوهای پیچیده‌تر در مقیاس بزرگتر استخراج می‌شوند. با این کار، بردارهای ویژگی نهایی که به بخش رمزگشای UNet++ تحویل داده می‌شوند، دارای اطلاعات محلی و الگوهای کلی از تصویر می‌باشند. ترکیب ResNet-34 با معماری UNet++ در این پروژه امکان یادگیری مدل با دقت بالا و تعمیم مدل را فراهم کرده است [۱۸].

شبکه UNet++ و ساختار آن

UNet++ یک ساختار پیشرفته برای شبکه‌های کدگذار-رمزگشا مخصوص قطعه‌بندی تصاویر است که نسبت به UNet کلاسیک بهبودهایی در بخش اتصالات بین کدگذار و رمزگشا ارائه می‌دهد.

بهینه‌ساز Adam

برای به‌روزرسانی وزن‌های شبکه در طی آموزش، از روش Adam (Adaptive Moment Estimation) استفاده شده است که برای هر وزن شبکه دو میانگین نمایی متحرک نگهداری می‌شود. اولین میانگین، میانگین درجه یک گرادیان‌ها بوده که نقشی مشابه Momentum دارد و نوسانات گرادیان را هموار می‌کند و دیگری میانگین درجه دوم گرادیان‌ها که نقشی شبیه RMSProp دارد و مقیاسی از بزرگی مربع گرادیان‌ها ارائه می‌دهد [۳۳].

روش Adam به‌صورت خودتنظیم برای هر پارامتر یک نرخ یادگیری موثر تعیین می‌کند؛ پارامترهایی با گرادیان‌های بزرگ نرخ یادگیری کوچک‌تری می‌گیرند و بالعکس که این ویژگی باعث می‌شود Adam در مسائل دارای داده‌های بزرگ و مدل‌های پیچیده به سرعت همگرا شود و نیاز به تنظیم دستی مکرر نرخ یادگیری یا سایر ابرپارامترها کمتر باشد. در پژوهش حاضر نیز به دلیل وجود پارامترهای فراوان و اهمیت همگرایی پایدار، از این بهینه‌ساز استفاده شده است و با نرخ یادگیری اولیه مناسب با کاهش تدریجی آن طی دوران آموزش به مدل کمک می‌کند تا به دقت بالا رسیده و از نوسانات یادگیری جلوگیری شود، به طور کلی به دلیل کارایی حافظه و تطبیق‌پذیری خود در تنظیم گام‌های حرکت در فضای پارامترها، یک انتخاب استاندارد و قدرتمند برای بهینه‌سازی شبکه‌های عمیق محسوب می‌شود [۳۴].

شاخص‌های ارزیابی

برای ارزیابی عملکرد مدل‌های شناسایی تغییرات از شاخص‌های متعددی استفاده می‌شود که در این پژوهش به سه معیار Accuracy، F1-score و Recall بهره گرفته شده است.

○ دقت کلی (Accuracy): معیاری است برای درصد پیش‌بینی‌های صحیح مدل روی کل داده‌ها به عبارتی Accuracy برابر با نسبت مجموع موارد پیش‌بینی‌شده صحیح (TP + TN) به کل موارد می‌باشد:

$$Accuracy = \frac{TP+TN}{TP+TN+FP+FN} \quad (1)$$

○ Recall: این معیار که نرخ تشخیص صحیح مثبت نیز خوانده می‌شود، نسبت تعداد موارد مثبت درست شناسایی شده به کل موارد مثبت واقعی است. این معیار مشخص می‌کند که مدل تا چه میزان در شناسایی تمامی موارد مثبت موفق بوده است.

$$Recall = \frac{TP}{TP+FN} \quad (2)$$

○ F1-score: این معیار یک شاخص کلی از عملکرد مدل ارائه می‌دهد که هم به کیفیت پیش‌بینی‌های مثبت یا precision و هم به پوشش موارد مثبت یا recall توجه دارد. این میانگین هارمونیک به گونه‌ای عمل می‌کند که در صورت پایین بودن هر کدام از معیارهای ذکر شده، مقدار F1-score نیز پایین خواهد بود.

$$F1 - Score = \frac{Precision \times Recall}{Precision + Recall} \quad (3)$$

لازم به ذکر است که به دلیل نامتوازن بودن داده‌ها و زیاد بودن تعداد پیکسل‌های بدون تغییر نسبت به پیکسل‌های تغییر، استفاده از معیار

می‌دهند. اتصالات نقطه‌چین، همان اتصالات skip سنتی UNet می‌باشند که در UNet++ تودرتو شده‌اند. خطوط نقطه‌چین مشکی اتصال مستقیم UNet اصلی بین یک لایه کدگذار و رمزگشا را نشان می‌دهد، در حالی که خطوط آبی نقطه‌چین اتصالات چندگانه‌ی جدید UNet++ هستند. همان‌طور که ملاحظه می‌شود، یک خروجی میانی (به طور مثال $x^{0,2}$) در شکل نه تنها از خروجی یک لایه‌ی کدگذار $x^{0,0}$ بهره می‌برد، بلکه خروجی لایه‌های کدگذار/رمزگشا در سطوح پایین‌تر $x^{1,1}$ و $x^{2,0}$ نیز پس از Upsample شدن و کانولوشن وارد ترکیب می‌شوند. به بیان ساده، UNet++ به جای یک اتصال منفرد بین کدگذار و رمزگشا، مسیرهای متعددی ایجاد می‌کند که به‌طور تدریجی ویژگی‌های با وضوح‌های مختلف را ترکیب کرده و اطلاعات بیشتری را به بخش رمزگشا می‌رساند [۲۹،۳۰]. در نهایت خروجی آخرین لایه‌ی رمزگشا که با دایره‌ی آبی تیره نمایش داده شده است در بالاترین سطح، مثلاً $x^{0,4}$ نقشه‌ی پیش‌بینی نهایی را تشکیل می‌دهد. تحقیقات نشان داده‌اند که این طراحی تودرتو می‌تواند دقت قطعه‌بندی را به طرز چشم‌گیری بهبود دهد و جزئیات ریزتری را در مرزبندی‌ها بازبایی نماید. در مدل حاضر، UNet++ به عنوان ساختار اصلی بخش رمزگشا مورد استفاده قرار گرفته است و خروجی ویژگی‌های عمیق ResNet-34 (با کانولوشن 1×1 برای تطبیق کانال‌ها) به عنوان ورودی این ساختار برای بازسازی نقشه‌ی قطعه‌بندی به کار می‌رود [۱۱].

تابع هزینه Lovász

در مسائل قطعه‌بندی، معمولاً معیار ارزیابی اصلی دقت ناحیه‌ای مثل IoU است اما توابع هزینه‌ی متداول مانند Cross Entropy به صورت غیرمستقیم این معیار را بهبود می‌دهند و ممکن است تحت شرایطی (مثل عدم توازن کلاس‌ها) مدل را به سمت بهینه‌ای ببرند که IoU چندان بالایی نداشته باشد. برای حل این مسئله، تابع زیان لاواژ-سافت‌مکس (Lovász-Softmax) معرفی شده است که یک جانشین قابل مشتق‌گیری برای بهینه‌سازی مستقیم IoU محسوب می‌شود [۳۱]. ایده‌ی اصلی این تابع آن است که به‌جای محاسبه‌ی مستقیم IoU (که غیرقابل مشتق است)، از مفهوم بسط لاواژ (Lovász Extension) در ریاضیات استفاده کند تا نسخه‌ای پیوسته و زیرتفاضلی (sub-differentiable) از IoU را به دست آورد. به عبارتی، طی محاسبه‌ی این زیان، پیش‌بینی‌های شبکه بر اساس احتمال تعلق به کلاس مرتب‌سازی می‌شوند و سپس اختلاف ترتیب آن‌ها با ترتیب ایده‌آل برچسب‌های واقعی سنجیده می‌شود. این عدم تطابق ترتیبی، مقدار Lovász Loss را تشکیل می‌دهد که در فرآیند یادگیری کمینه می‌گردد. ویژگی مهم Lovász-Softmax آن است که مستقیماً IoU میانگین را بهبود داده و در عمل مشاهده شده که آموزش با این تابع می‌تواند به امتیاز IoU بالاتری نسبت به Cross Entropy منجر شود. مزیت دیگر این تابع، مقاومت در برابر عدم توازن کلاس است؛ زیرا بر اساس رتبه‌بندی پیش‌بینی‌ها، تاثیر نواحی کوچک ولی مهم حفظ می‌شود [۳۲].

پایاده سازی

در این پژوهش به منظور تشخیص تغییرات سه بعدی در ساختمان‌های شهری، از مجموعه داده 3DCD استفاده شده است. این مجموعه داده شامل تصاویر هوایی با وضوح بالا به همراه داده‌های مدل رقومی سطح (DSM) مربوط به دو بازه‌ی زمانی مختلف می‌باشد. تمامی تغییرات مورد بررسی مربوط به ساختمان‌ها بوده و به پنج کلاس (۱) بدون تغییر، (۲) ساخت ساختمان جدید در مکان فاقد بنا، (۳) تخریب کامل ساختمان، (۴) افزایش ارتفاع یک ساختمان موجود و (۵) کاهش ارتفاع ساختمان تقسیم شده‌اند. هدف از این تقسیم‌بندی، استخراج جزئیات دقیق‌تر از تحولات شهری در بعد ارتفاعی می‌باشد.

مجموع کل داده‌های مورد استفاده ۴۲۳ جفت تصویر می‌باشد که شامل اطلاعات طیفی (RGB) و رقومی (DSM) در دو بازه زمانی می‌باشد. هر تصویر اولیه دارای ابعاد 400×400 پیکسل بود که به منظور افزایش سازگاری با معماری مدل و بهره‌گیری بهتر از منابع سخت‌افزاری، به ابعاد 512×512 پیکسل بازنمونه‌برداری شده‌اند. برای هر نمونه، تصاویر به همراه ارتفاع متناظر در هر تاریخ با یکدیگر ادغام شده و سپس اطلاعات دو زمان به صورت کانال‌های پیاپی روی هم قرار گرفته‌اند. در نهایت، تصویری با هشت باند به عنوان ورودی مدل ساخته شده است. برای افزایش تنوع داده‌های آموزشی و بهبود عملکرد مدل، از تکنیک‌های داده‌افزایی شامل چرخش تصادفی، وارونگی افقی و وارونگی عمودی استفاده شد و این عملیات به صورت تصادفی بر روی تصاویر آموزشی اعمال گردید تا مدل در برابر تغییرات ظاهری مقاوم‌تر عمل کند.

فرآیند پایاده‌سازی مدل در دو مرحله مجزا انجام شده است که در ادامه هر مرحله توضیح داده شده است.

مرحله اول: تشخیص دودویی تغییرات و مقایسه با روش‌های سنتی

در این مرحله، برچسب‌های داده‌ی حقیقت-زمینی (Ground Truth) به صورت دودویی تنظیم شدند؛ به این معنی که صرفاً دو کلاس «تغییر» و «عدم تغییر» در نظر گرفته شده است و مدل پیشنهادی نیز به عنوان یک طبقه‌بند دودویی آموزش داده شده است. هدف از این مرحله، بررسی عملکرد پایه‌ای مدل و مقایسه آن با روش‌های سنتی تشخیص تغییرات بوده است [۳۹].

برای ارزیابی عملکرد مدل با روش‌های سنتی از سه مدل جنگل تصادفی، تقسیم دو تصویر و روش ترکیبی PCA و KMeans استفاده شده است.

- طبقه‌بند جنگل تصادفی (Random Forest): این روش یکی از الگوریتم‌های شناخته‌شده‌ی یادگیری نظارت‌شده می‌باشد که بر پایه‌ی مجموعه‌ای از درختان تصمیم‌گیری عمل می‌کند. در این پژوهش، ویژگی‌های استخراج‌شده از تصاویر ورودی برای هر پیکسل (یا ناحیه) به عنوان ورودی به طبقه‌بندی داده شده و خروجی مدل مشخص می‌کند که آن پیکسل به کلاس «تغییر» یا «عدم تغییر» تعلق دارد.

Accuracy می‌تواند گمراه کننده باشد و در این موارد معیارهایی مثل Recall و F1-score اهمیت بیشتری پیدا می‌کنند [۳۵].

افزایش داده (Data Augmentation)

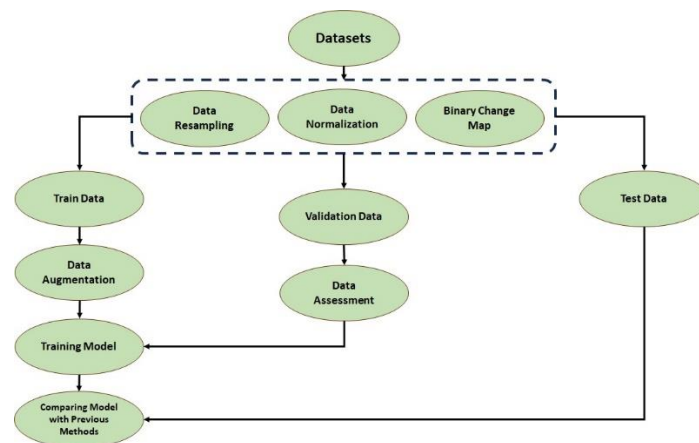
یکی از اجزای مهم در مرحله‌ی آموزش مدل، به کارگیری افزایش داده است که هدف آن بالا بردن تنوع داده‌های آموزشی و در نتیجه بهبود تعمیم‌پذیری مدل می‌باشد. با توجه به محدودیت تعداد تصاویر آموزشی، اعمال تغییرات تصادفی بر روی تصاویر موجود می‌تواند به مدل کمک کند تا نسبت به تغییرات مختلف غیرحساس‌تر شود و از حفظ شدن بیش از حد روی الگوهای خاص داده‌های آموزشی اجتناب شود [۲۲]. در این پژوهش از چند نوع تغییر داده مرسوم استفاده شده که در ادامه به توضیح آن‌ها پرداخته شده است.

○ وارون‌سازی افقی و عمودی (Horizontal/Vertical Flip): در این روش تصویر به ترتیب نسبت به محور عمودی یا افقی قرینه می‌شود. برای مثال، در وارون‌سازی افقی، سمت چپ و راست تصویر جابجا می‌شوند. این تکنیک به ویژه زمانی مفید است که جهت‌گیری اشیاء در تصاویر نباید روی برچسب تأثیر بگذارد. مدل با دیدن تصاویر پشت و رو قادر خواهد بود ویژگی‌ها را مستقل از جهت‌شناسایی کند. در این پروژه، تصاویر به طور تصادفی با احتمال مشخصی (مثلاً ۵۰٪) افقی یا عمودی برگردانده شده‌اند تا مجموعه‌ی داده آموزشی حاوی حالت‌های آینه‌ای نیز باشد [۳۶].

○ دوران (Rotation): در این روش تصویر حول مرکز خود با یک زاویه‌ی تصادفی دوران می‌یابد و این چرخش می‌تواند محدود به زوایای کوچک (مثلاً $15 \pm$ درجه) یا شامل زوایای ۹۰ درجه‌ای باشد. این افزونه باعث می‌شود مدل نسبت به چرخش شیء حساسیت کمتری داشته باشد. به عنوان نمونه، در داده‌های ماهواره‌ای یا هوایی، چرخش تصویر معادل تغییر جهت شمال نقشه است که نباید ماهیت شیء (مثلاً یک ساختمان) را برای مدل متفاوت جلوه دهد. در این پروژه از چرخش‌های کوچک استفاده شده است تا مدل انواع جهت‌ها را ببیند [۲۳].

○ تاری گاوسی (Gaussian Blur): در این روش، یک فیلتر Gaussian با سطح محوشدگی معین روی تصویر اعمال می‌شود تا تصویر کمی مات شود. اعمال تاری کنترل‌شده می‌تواند مدل را در برابر تصاویر کمی خارج از فوکوس یا نویز سنسور مقاوم کند. علاوه بر این، تا حدی مانند یک فیلتر پایین‌گذر عمل کرده و از وابستگی بیش از حد مدل به لبه‌های تیز نیز جلوگیری می‌کند [۳۷].

نتیجه‌ی کلی استفاده از افزونگی داده این است که مدل آموزش‌دیده پایدارتر می‌شود؛ به این معنی که در برابر تغییرات هندسی (مانند چرخش و معکوس شدن) و تغییرات کیفی (مانند تاری یا نویز) عملکرد خود را حفظ می‌کند و در مواجهه با تصاویر جدید (داده‌های تستی) که دقیقاً شبیه به تصاویر آموزشی نیستند، دقت بالاتری نشان خواهد داد [۳۸].



شکل ۴: فرآیند تشخیص دودویی تغییرات

Fig. 4: Binary change detection flowchart

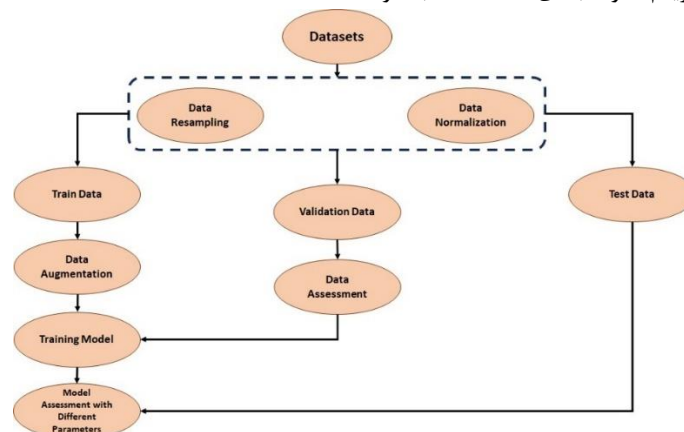
خوشه اجرا می‌شود تا پیکسل‌ها به دو دسته‌ی تغییر و عدم تغییر تفکیک شوند. این روش در مقالاتی معرفی شده و به‌عنوان یک روش مرجع در مطالعات تشخیص تغییر نظارت نشده شناخته می‌شود [۴۲].

مرحله دوم: آموزش مدل برای پنج کلاس و تنظیم ابرپارامترها در این مرحله، پس از اثبات عملکرد برتر مدل در تشخیص تغییرات دودویی، مدل نهایی برای شناسایی پنج کلاس مختلف تغییرات ساختمانی، آموزش داده شد. ساختار مدل همانند مرحله اول شامل ترکیب شبکه ResNet-34 به‌عنوان کدگذار و UNet++ به‌عنوان رمزگشا بود. ورودی مدل نیز همچنان شامل هشت باند (ترکیب RGB و DSM قبل و بعد) بوده و از داده‌افزایی مشابه مرحله اول بهره گرفته شد. برای یافتن ترکیب بهینه ابرپارامترها و تابع زیان، از مجموعه داده‌ی تست جهت ارزیابی تنظیمات مختلف استفاده شد. مقادیر گوناگونی برای نرخ یادگیری، نوع تابع زیان و سایر پارامترهای آموزش بررسی شدند و در نهایت بهترین ترکیب شامل تابع Lovasz Loss و نرخ یادگیری ۰.۰۰۰۰۱ انتخاب گردید. مدل با پارامترهای بهینه روی مجموعه آموزشی (۳۸۳ تصویر) آموزش داده شد و بر اساس عملکرد آن روی داده‌های تست (۴۰ تصویر)، نتایج نهایی مدل پنج کلاسه استخراج گردید.

استفاده از جنگل تصادفی به دلیل مقاومت بالا در برابر بیش‌برازش و قابلیت مدل‌سازی روابط غیرخطی بین ویژگی‌ها، به‌عنوان یک مرجع مناسب در مقایسه با مدل یادگیری عمیق می‌باشد [۴۰].

روش Image Ratio (یا تقسیم تصاویر): این روش یک روش ساده و نظارت نشده برای شناسایی تغییرات در تصاویر سنجش‌ازدور است. در این رویکرد، ابتدا اختلاف پیکسل‌به‌پیکسل بین تصاویر قبل و بعد به صورت نسبت‌گیری محاسبه و سپس بر روی تصویر حاصل یک آستانه‌گذاری انجام می‌شود تا مناطقی که تغییرات معنی‌داری در آن‌ها رخ داده، مشخص گردند. مزیت این روش سادگی و سرعت بالای اجرای آن است، اما ضعف اصلی آن در وابستگی آن به حدآستانه‌گذاری در تمایز بین نوع تغییر و حساسیت پایین به نویزهای تصویری می‌باشد [۴۱].

روش ترکیبی PCA و KMeans: این روش یک الگوریتم نظارت نشده مبتنی بر تحلیل تغییرات آماری بین دو تصویر است. ابتدا تفاضل بین دو تصویر (تاریخ قبل و بعد) به‌صورت پیکسل به پیکسل محاسبه می‌شود و تصویر اختلاف حاصل، نمایانگر نقاط تغییر احتمالی است. سپس برای کاهش نویز و کاهش ابعاد داده، تحلیل مؤلفه‌های اصلی (PCA) بر روی تصویر اختلافی اعمال می‌شود تا مؤثرترین مؤلفه‌ها استخراج گردند. در نهایت، بر روی خروجی PCA، الگوریتم خوشه‌بندی K-Means با دو



شکل ۵: فرآیند تشخیص چند کلاس تغییرات

Fig. 5: Multi-class change detection flowchart

نتایج و بحث

ارزیابی مرحله اول (دودویی)

در مرحله اول، مدل یادگیری عمیق پیشنهادی به صورت دودویی (دو کلاس «تغییر» و «عدم تغییر») ارزیابی شد تا توانایی آن در آشکارسازی کلی تغییرات سنجیده شود. در این مرحله مدل تنها به تعداد ۵۰ اپک آموزش داده شد و نتایج حاصل از این ارزیابی در جدول ۱ خلاصه شده است که شامل معیارهای دقت، F1-score و Recall برای مدل پیشنهادی و روش‌های مرجع می‌باشد. مدل عمیق توانست با دقت کلی بالا نواحی تغییر یافته را به خوبی از نواحی بدون تغییر تفکیک کند. به علاوه، F1-score قابل توجهی برای این مدل به دست آمد که بیانگر تعادل مناسب میان دقت آشکارسازی تغییرات و نرخ خطای پایین در اعلام تغییر نادرست است. مقدار بالای معیار Recall نیز نشان‌دهنده این است که بخش اعظم تغییرات واقعی شناسایی کرده و موارد کمتری از تغییرات از توسط مدل شناسایی نشده‌اند. از سوی دیگر، مقدار تابع زیان مدل بر روی داده‌های آزمایشی به سطح پایینی همگرا شد که نشان‌دهنده یادگیری موثر مدل و تطابق خوب خروجی‌های آن با برچسب‌های واقعی می‌باشد.

نکته حائز اهمیت آن است که به دلیل عدم توازن ذاتی داده‌ها در مسئله آشکارسازی تغییر (تعداد بسیار بیشتر پیکسل‌های بدون تغییر نسبت به پیکسل‌های تغییر کرده)، استفاده از معیار دقت کلی به تنهایی برای ارزیابی کافی نمی‌باشد؛ از این رو، استفاده از F1-score و Recall برای ارزیابی عملکرد مدل ضروری است [۴۳، ۱۳]. در مدل پیشنهادی، مقدار بالای Recall حاکی از توانایی آن در آشکارسازی اکثر تغییرات (حساسیت بالا) بوده و F1-score بالای حاصل شده تأیید می‌کند که نرخ خطا اشتباه (False Alarm) نیز پایین نگه داشته شده است. به بیان دیگر، مدل با حفظ دقت، قادر به شناسایی تغییرات جزئی در مناطق وسیع بدون تغییر بوده است. این نتایج اولیه نشان می‌دهد که روش یادگیری عمیق توسعه یافته به خوبی از عهده‌ی آشکارسازی کلی تغییرات برآمده و پایه‌ی محکمی برای مرحله بعدی (تفکیک انواع تغییر) فراهم ساخته است [۴۴].

مقایسه با روش‌های مرجع

به منظور ارزیابی دقیق‌تر عملکرد مدل یادگیری عمیق، نتایج مرحله دودویی آن با سه روش مرجع مقایسه جنگل تصادفی (Random Forest)، روش نسبت تصویری (Image Ratio) و روش ترکیبی PCA و KMeans گردید. در جدول ۱ معیارهای دقت، F1-score و Recall برای هر یک از این روش‌ها در کنار مدل پیشنهادی ارائه شده است و این مقایسه‌ها نشان می‌دهد که مدل یادگیری عمیق پیشنهادی در تمامی معیارها عملکرد برتری نسبت به روش‌های مرجع داشته است. دقت مدل پیشنهادی به طور محسوس بالاتر از سایرین بود؛ به طوری که نسبت به بهترین روش کلاسیک (جنگل تصادفی) نیز چندین درصد افزایش دقت نشان داده است. همچنین پارامتر F1-score مدل به طرز چشمگیری از

روش‌های کلاسیک بالاتر است که بیانگر کارایی بهتر آن در تشخیص تغییرات واقعی می‌باشد.

با وجود عملکرد قابل توجه جنگل تصادفی، نتیجه آن در مقایسه با مدل یادگیری عمیق به میزان معناداری ضعیف‌تر بود. روش نسبت تصویری، ضعیف‌ترین عملکرد را داشت که دقت و F1-score پایین آن نشان‌دهنده این موضوع می‌باشد که در این روش تغییرات شدت روشنایی یا سایر تغییرات غیرساختاری به اشتباه به عنوان تغییر شناسایی شده و نرخ بالایی از تشخیص‌های نادرست را موجب گردیده است. روش KMeans+PCA به عنوان یک روش تغییریابی بدون نظارت، عملکرد بهتری نسبت به روش نسبت تصویری داشت ولی همچنان در مقایسه با روش‌های یادگیری نظارت‌شده ضعیف‌تر عمل کرد. این روش در تفکیک تغییرات کوچک و جزئی ناتوان‌تر بود و برخی از تغییرات با دامنه کم (مثلاً کاهش جزئی ارتفاع) را تشخیص نداده که باعث کاهش Recall آن نسبت به مدل عمیق گردید.

با توجه به معیار Recall، مدل پیشنهادی عملکرد بسیار بالاتری را کسب کرد که نشان می‌دهد تقریباً تمامی تغییرات واقعی توسط این مدل کشف شده است این در حالی می‌باشد که روش‌های مرجع (خصوصاً روش‌های بدون نظارت) تعدادی از تغییرات را کشف نکرده و Recall کمتری داشتند. به عنوان مثال، جنگل تصادفی تعدادی از تغییرات با مقیاس کوچک را از دست داد و روش‌های بدون نظارت مانند PCA+KMeans نیز تنها تغییرات با شدت بالا را به خوبی شناسایی کردند. برتری قابل ملاحظه‌ی مدل یادگیری عمیق در این مرحله، حاکی از توانایی آن در یادگیری الگوهای پیچیده‌ی تغییرات شهری است که روش‌های سنتی فاقد آن هستند. نتایج نیز تأکید می‌کند که رویکرد یادگیری عمیق قادر است با استخراج ویژگی‌های سطح بالا و تلفیق مؤثر اطلاعات طیفی و ارتفاعی، تغییرات ساختمانی و سازه‌ای را با دقت بیشتر تشخیص دهد؛ در حالی که روش‌های مرجع مبتنی بر ویژگی‌های دستی یا آستانه‌گذاری ساده در مواجهه با پیچیدگی داده‌های شهری کارآمدی کمتری از خود نشان می‌دهند [۴۵، ۹].

جدول ۱: معیارهای ارزیابی روش‌ها بر روی داده اعتبارسنجی
Table 1: Evaluation metrics for methods based on validation dataset

F1-SCORE	ACCURACY	RECALL	METHOD NAME
0.2236	0.8353	0.3597	IMAGE RATIO
0.2800	0.8932	0.3767	KMEANS+PCA
0.2426	0.9125	0.4920	RF
0.9258	0.9850	0.9860	UNET++

نتایج مرحله دوم (پنج کلاس)

پس از اثبات عملکرد برتر مدل در تشخیص دودویی تغییرات، مدل نهایی برای طبقه‌بندی پنج‌کلاسه آموزش داده شد. در این مرحله علاوه بر آشکارسازی تغییر، نوع تغییر نیز طبقه‌بندی می‌شود. پنج کلاس تعریف‌شده شامل عدم تغییر، ظهور سازه‌های جدید مانند احداث ساختمان، تخریب کامل، افزایش ارتفاع (مثلاً اضافه شدن طبقات به

تغییرات دودویی، قابلیت تعمیم و تشخیص انواع مختلف تغییرات را نیز کسب کرده است و می‌تواند تغییرات پیچیده‌تری را در محیط شهری شناسایی و طبقه‌بندی کند [۴۷].

تحلیل کیفی نتایج (تصاویر نمونه)

علاوه بر ارزیابی‌های کمی، به منظور درک بهتر کیفیت عملکرد مدل، تحلیل کیفی نتایج نیز انجام گرفته است. بدین منظور، خروجی مدل بر روی نمونه‌هایی از داده‌های آزمایشی به صورت بصری بررسی شد. شکل ۶ و ۷ نمونه‌هایی از نقشه تغییرات پیش‌بینی شده توسط مدل را نشان می‌دهد. در این تصاویر، نواحی بدون تغییر با رنگ بنفش و سایر کلاس‌ها با رنگ‌های برجسته نمایش داده شده‌اند.

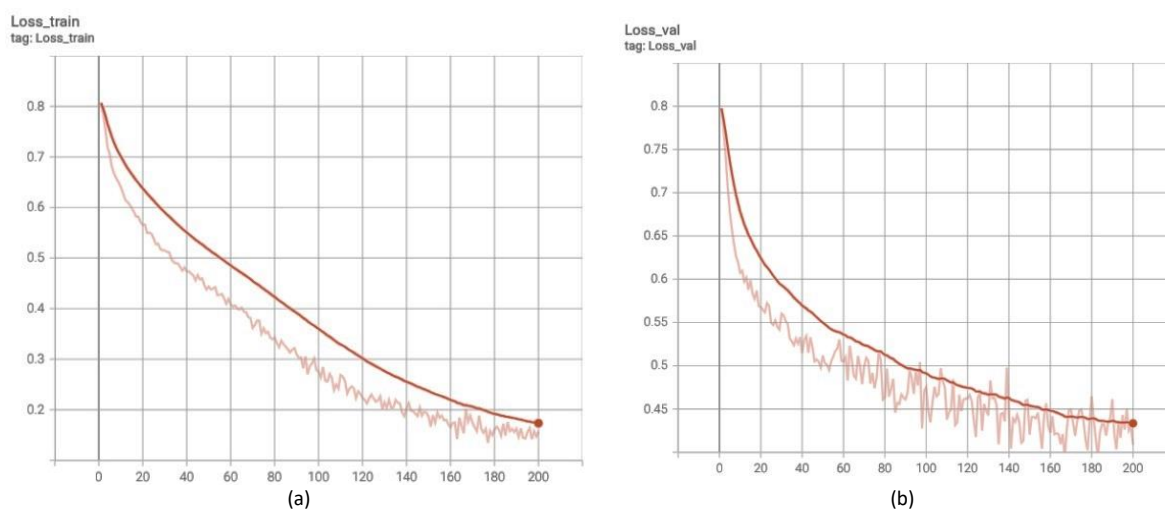
بررسی کیفی شکل ۶ نشان می‌دهد که مدل پیشنهادی به خوبی توانسته تغییرات واقعی را در تصاویر دو زمانه آشکارسازی و تفکیک کند. به عنوان نمونه، سازه‌های جدیدی که در بازه زمانی بین دو تصویر احداث شده‌اند، توسط مدل به درستی در نقشه خروجی به عنوان «ساخت جدید» مشخص شده‌اند. این سازه‌ها در تصویر مربوط به زمان اول وجود نداشته و در تصویر زمان دوم پدیدار شده‌اند که مدل دقیقاً همین نواحی را به عنوان ساخت جدید شناسایی کرده است.

بررسی شکل ۷ نشان می‌دهد که مدل تغییرات ظریف ارتفاعی را تا حد زیادی به درستی شناسایی کرده است. هرچند مرزبندی این تغییرات ارتفاعی به دلیل ماهیت تدریجی ترشان کمی پراکنده‌تر از تغییرات کاملاً متمایز (مانند ساخت یا تخریب) به نظر می‌رسد، اما حضور رنگ مربوط به افزایش ارتفاع در مکان صحیح حاکی از آن است که مدل این تغییرات را نیز تشخیص داده است. به طور مشابه، کاهش ارتفاع یا نیمه‌تخریب‌های رخ داده در برخی ساختمان‌ها نیز توسط مدل شناسایی شده و با رنگ کلاس «کاهش ارتفاع» در نقشه خروجی منعکس گردیده است.

ساختمان‌های موجود و کاهش ارتفاع می‌باشند. نتایج به دست آمده حاکی از آن است که مدل پیشنهادی در طبقه‌بندی پنج کلاسه نیز عملکرد مناسبی داشته و بیشتر الگوهای گوناگون تغییر را آموزش دیده است. معیارهای Accuracy، F1-score و Recall بر روی مجموعه اعتبارسنجی به ترتیب برابر ۹۶.۳۲، ۰.۹۵ و ۰.۹۶ می‌باشد که نشان‌دهنده توانایی تعمیم مناسب مدل و عدم بیش‌برازش است.

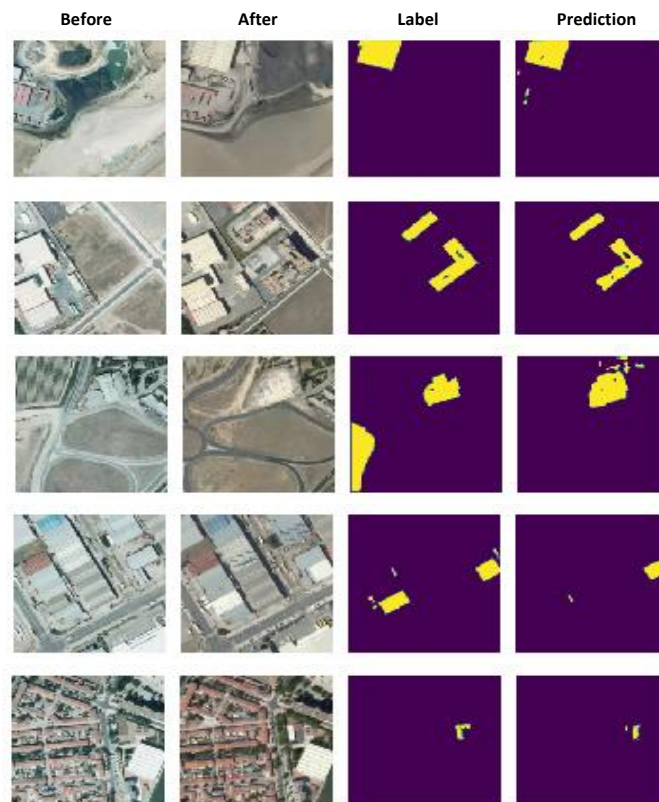
با نگاهی دقیق‌تر به عملکرد مدل در طبقه‌بندی تصاویر، مشخص می‌شود که کلاس‌های با تغییرات بارز (ساخت جدید و تخریب کامل) با دقت بالایی شناسایی شده‌اند. مدل تقریباً تمامی موارد ساخت سازه‌های جدید را به درستی برچسب‌گذاری کرده و تخریب‌های کامل را نیز با قطعیت بالا تشخیص داده است. این دو نوع تغییر به دلیل ماهیت مشخص خود (ظهور یا حذف کامل یک ساختار) به خوبی توسط مدل آموخته شده و حتی در داده‌های اعتبارسنجی نیز تقریباً بدون خطا شناسایی شده‌اند. در مقابل، در کلاس‌های افزایش ارتفاع و کاهش ارتفاع که ماهیت تغییرات جزئی‌تر و تدریجی‌تر است، عملکرد مدل اندکی ضعیف‌تر از دو کلاس مذکور بوده است.

مقادیر تابع زیان در طی آموزش مدل پنج کلاسه نشان می‌دهد که فرآیند بهینه‌سازی شبکه به خوبی صورت گرفته است. تابع زیان بر روی داده‌های آموزشی پس از چند دوره آموزش به مقدار کمی کاهش یافته و همزمان تابع زیان مجموعه اعتبارسنجی نیز به طور پایدار پایین باقی مانده است. نزدیک بودن مقادیر زیان آموزش و اعتبارسنجی بیانگر آن است که مدل دچار بیش‌برازش نشده و عملکرد آن در مواجهه با داده‌های جدید، مشابه عملکرد روی داده‌های آموزشی است. به طور کلی، اندکی کاهش در دقت و سایر شاخص‌ها در مجموعه اعتبارسنجی نسبت به آموزش طبیعی بوده و نشان‌دهنده سخت‌تر بودن مسئله چندکلاسه در مقایسه با حالت دودویی است [۴۶]. با این حال، نتایج مرحله دوم تأیید می‌کند که مدل عمیق پیشنهادی پس از یادگیری

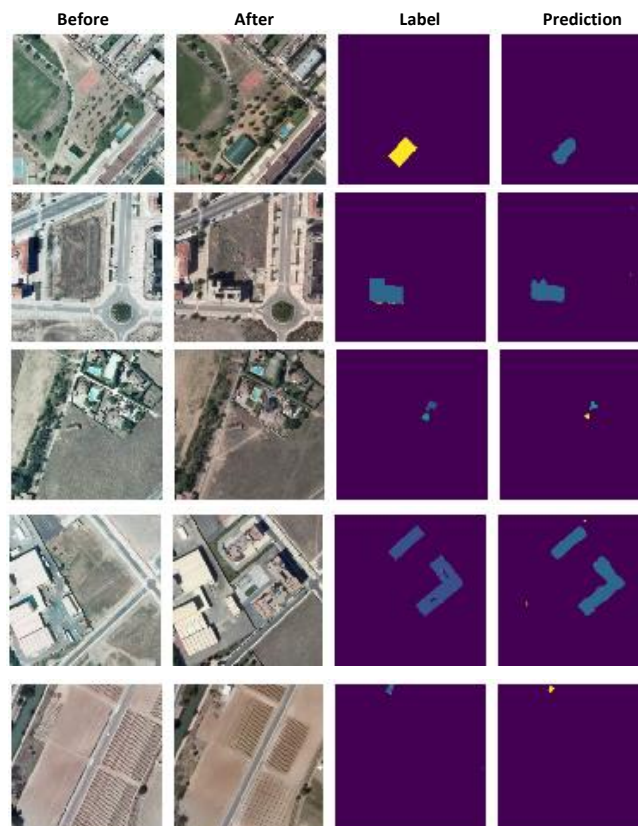


شکل ۶: نمودارهای تغییرات Loss در فرآیند آموزش مدل: (الف) آموزش (ب) اعتبارسنجی

Fig 6: Loss changes during model training: (a) Train (b) Validation



شکل ۷: نتایج خروجی شناسایی تغییرات دودویی
Fig. 7: Binary change detection results



شکل ۸: نتایج خروجی شناسایی تغییرات چند کلاس
Fig. 8: Multi-class change detection results

تغییر، بلکه در تعیین نوع کلاس آن است که برای تحلیل دقیق تغییرات شهری مزیتی قابل توجه محسوب می‌شود.

این بهبود عملکرد را می‌توان ناشی از قدرت یادگیری مدل عمیق در به دست آوردن ویژگی‌های پیچیده مکانی-طیفی دانست. الگوریتم‌های کلاسیکی نظیر جنگل تصادفی یا روش‌های مبتنی بر نسبت‌گیری یا خوشه‌بندی در استخراج خودکار الگوهای تغییر محدودیت داشته و معمولاً در مواجهه با تغییرات جزئی یا غیرخطی دقت کمتری نشان می‌دهند. از سوی دیگر، شبکه‌های عصبی عمیق به راحتی قادر به ترکیب و تحلیل همزمان انواع داده (مانند تصاویر چندزمانه و مدل‌های ارتفاعی) هستند که این موضوع باعث افزایش دقت و انعطاف‌پذیری در آشکارسازی تغییرات می‌شود [۲۰، ۹].

در راستای ارتقای مدل پیشنهادی و رفع چالش‌های مذکور، چند محور اصلی برای تحقیقات آینده پیشنهاد می‌گردد:

- بهبود دقت مدل با بازطراحی ساختار کدگذار و رمزگشا در شبکه
- ارائه معماری‌های جدید یادگیری عمیق مانند شبکه‌های تبدیل‌کننده
- بکارگیری داده‌های سری زمانی جهت آشکارسازی تغییرات در لایه شهری
- پیاده‌سازی مدل‌های Double-Stream برای استخراج ویژگی در دو لایه

مشارکت نویسندگان

علیرضا ابراهیمی در جمع‌آوری داده‌ها، تحلیل داده‌ها و نگارش پیش‌نویس متن مشارکت داشته است. مهدی حسنلو در ایده‌پردازی، طراحی پژوهش و اصلاح اساسی متن مقاله مشارکت داشته است.

تشکر و قدردانی

بدین وسیله از تمامی کسانی که ما را در انجام این تحقیق یاری نموده‌اند، تشکر و قدردانی می‌کنیم.

تعارض منافع

«هیچ‌گونه تعارض منافع توسط نویسندگان بیان نشده است.»

منابع و مأخذ

[1] Wen D, Huang X, Bovolo F, Li J, Ke X, Zhang A, et al. Change detection from very-high-spatial-resolution optical remote sensing images: Methods, applications, and future directions. *IEEE Geoscience and Remote Sensing Magazine*. 2021;9(4):68-101. DOI: 10.1109/MGRS.2021.3063465.

[2] Viana CM, Oliveira S, Oliveira SC, Rocha J. Land use/land cover change detection and urban sprawl analysis. *Spatial modeling in GIS and R for earth and environmental sciences*: Elsevier; 2019. p. 621-51. DOI: 10.1016/B978-0-12-815226-3.00029-6.

نواحی گسترده بدون تغییر در هر دو شکل به درستی توسط مدل دست‌نخورده باقی مانده‌اند و هیچ برچسب تغییری دریافت نکرده‌اند که این نشان‌دهنده نرخ پایین هشدار غلط مدل است. به بیان دیگر، مدل صرفاً در مکان‌هایی اعلام تغییر کرده که شواهد معتبری از وقوع تغییر وجود داشته و برای بخش‌های وسیعی که وضعیت سابق خود را حفظ کرده‌اند، خروجی مدل «عدم تغییر» باقی مانده است. این رفتار مطلوب، مؤید آن است که مدل یادگیری عمیق ما دچار بیش‌آشکارسازی تغییر (over-detection) نشده و به خوبی میان نواحی ثابت و نواحی متحول‌شده تمایز قائل می‌شود [۱۰].

در جمع‌بندی بخش تحلیل کیفی می‌توان گفت که مشاهدات بصری کاملاً مؤید نتایج کمی به‌دست‌آمده هستند. مدل پیشنهادی نه تنها در آمار بلکه در خروجی بصری نیز عملکرد قابل ملاحظه‌ای از خود نشان داده است و توانایی مدل در شناسایی صحیح انواع تغییرات ساختمانی در محیط شهری به صورت عینی در شکل‌های نمونه قابل مشاهده می‌باشد. این امر بیانگر آن است که مدل یادگیری عمیق توسعه‌یافته ابزار قابل اعتمادی برای پایش تغییرات سه‌بعدی شهری بوده و امکان تشخیص تغییرات گوناگون با دقت بالا و خطای پایین را دارد. برتری مدل نسبت به روش‌های کلاسیک در هر دو بعد کمی و بصری آشکار بوده و بدین ترتیب کاربرد عملی آن در مطالعات آتی پایش شهری و برنامه‌ریزی شهری نویدبخش می‌باشد.

نتیجه‌گیری

در این پژوهش، یک مدل مبتنی بر یادگیری عمیق به منظور تشخیص تغییرات سه‌بعدی در مناطق شهری توسعه داده شد. ارزیابی عملکرد مدل طی یک فرآیند دو مرحله‌ای صورت گرفته است به طوریکه در مرحله نخست، توانایی مدل در آشکارسازی دو کلاسه «تغییر» یا «عدم تغییر» ارزیابی و نتایج آن با روش‌های کلاسیک (از جمله جنگل تصادفی، روش نسبت‌گیری تصاویر و ترکیب PCA و KMeans) مقایسه گردید. در مرحله دوم، خروجی مدل به صورت تفصیلی‌تر به پنج کلاس شامل (۱) عدم تغییر، (۲) ساخت جدید، (۳) تخریب کامل، (۴) افزایش ارتفاع و (۵) کاهش ارتفاع ساختمان‌ها دسته‌بندی شد. نتایج کلیدی به دست آمده نشان داد که مدل یادگیری عمیق پیشنهادی در مرحله نخست با دقت بالایی تغییرات را شناسایی کرده و به‌طور محسوسی عملکرد بهتری نسبت به روش‌های کلاسیک یادشده از خود نشان داده است. بدین ترتیب، مدل توانست مناطق دچار تغییر را حتی در مناطق پیچیده شهری به‌خوبی تفکیک کند این درحالی است که روش‌های سنتی در آن با چالش مواجه بودند. همچنین در مرحله دوم، مدل توسعه‌یافته قادر بود نوع تغییر رخ‌داده در هر ساختمان را به‌درستی طبقه‌بندی نماید و نمونه‌های مربوط به ساخت‌وسازهای جدید، تخریب‌ها و تغییرات ارتفاعی را با صحت قابل قبولی تشخیص دهد. این عملکرد چندکلاسه نشان‌دهنده توانایی مدل نه تنها در آشکارسازی وقوع

- Transactions on Geoscience and Remote Sensing. 2013;52(1):406-17. DOI:10.1109/TGRS.2013.2240692.
- [16] Wen D, Huang X, Zhang A, Ke X. Monitoring 3D building change and urban redevelopment patterns in inner city areas of Chinese megacities using multi-view satellite imagery. *Remote Sensing*. 2019;11(7):763. DOI:10.3390/rs11070763.
- [17] Hussain M, Chen D, Cheng A, Wei H, Stanley D. Change detection from remotely sensed images: From pixel-based to object-based approaches. *ISPRS Journal of photogrammetry and remote sensing*. 2013;80:91-106. DOI:10.1016/j.isprsjprs.2013.03.006.
- [18] Gao M, Qi D, Mu H, Chen J. A transfer residual neural network based on ResNet-34 for detection of wood knot defects. *Forests*. 2021;12(2):212. DOI:10.3390/f12020212.
- [19] Brahim E, Amri E, Barhoumi W, Bouzidi S. Fusion of UNet and ResNet decisions for change detection using low and high spectral resolution images. *Signal, Image and Video Processing*. 2024;18(Suppl 1):695-702. DOI:10.1007/s11760-024-03185-2.
- [20] Zhu XX, Tuia D, Mou L, Xia G-S, Zhang L, Xu F, et al. Deep learning in remote sensing: A comprehensive review and list of resources. *IEEE geoscience and remote sensing magazine*. 2017;5(4):8-36. DOI:10.1109/MGRS.2017.2762307.
- [21] Zhang J, Lin X. Advances in fusion of optical imagery and LiDAR point cloud applied to photogrammetry and remote sensing. *International Journal of Image and Data Fusion*. 2017;8(1):1-31. DOI:10.1080/19479832.2016.1160960.
- [22] Nanni L, Paci M, Brahnam S, Lumini A. Comparison of different image data augmentation approaches. *Journal of imaging*. 2021;7(12):254. DOI:10.3390/jimaging7120254.
- [23] Van Dyk DA, Meng X-L. The art of data augmentation. *Journal of Computational and Graphical Statistics*. 2001;10(1):1-50. DOI:10.1198/10618600152418584.
- [24] Stoyanov D, Taylor Z, Carneiro G, Syeda-Mahmood T, Martel A, Maier-Hein L, et al. Deep learning in medical image analysis and multimodal learning for clinical decision support: 4th international workshop, dlmia 2018, and 8th international workshop, ml-cds 2018, held in conjunction with miccai 2018, granada, spain, september 20, 2018, proceedings: Springer; 2018. DOI:10.1007/978-3-319-67558-9.
- [25] Zhang Z, editor Improved adam optimizer for deep neural networks. 2018 IEEE/ACM 26th international symposium on quality of service (IWQoS); 2018: IEEE. DOI:10.1109/IWQoS.2018.8624183.
- [26] He K, Zhang X, Ren S, Sun J, editors. Deep residual learning for image recognition. *Proceedings of the IEEE conference on computer vision and pattern recognition*; 2016. DOI:10.1109/CVPR.2016.90.
- [27] Wu S, Zhong S, Liu Y. Deep residual learning for image steganalysis. *Multimed Tools Appl*. 2017:1-17. DOI:10.1007/s11042-017-4440-4.
- [3] Jensen JR, Im J. Remote sensing change detection in urban environments. *Geo-spatial technologies in urban environments: policy, practice, and pixels*: Springer; 2007. p. 7-31. DOI:10.1007/978-3-540-69417-5_2.
- [4] Gstaiger V, Tian J, Kiefl R, Kurz F. 2D vs. 3D change detection using aerial imagery to support crisis management of large-scale events. *Remote Sensing*. 2018;10(12):2054. DOI:10.3390/rs10122054.
- [5] Champion N, Boldo D, Pierrot-Deseilligny M, Stamon G. 2D building change detection from high resolution satellite imagery: A two-step hierarchical method based on 3D invariant primitives. *Pattern Recognition Letters*. 2010;31(10):1138-47. DOI:10.1016/j.patrec.2009.10.012.
- [6] Qin R. Change detection on LOD 2 building models with very high resolution spaceborne stereo imagery. *ISPRS journal of photogrammetry and remote sensing*. 2014;96:179-92. DOI:10.1016/j.isprsjprs.2014.07.007.
- [7] Qin R, Tian J, Reinartz P. 3D change detection—approaches and applications. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*. 2016;122:41-56. DOI:10.1016/j.isprsjprs.2016.09.013.
- [8] Jiang H, Peng M, Zhong Y, Xie H, Hao Z, Lin J, et al. A survey on deep learning-based change detection from high-resolution remote sensing images. *Remote Sensing*. 2022;14(7):1552. DOI:10.3390/rs14071552.
- [9] Song A, Choi J. Fully convolutional networks with multiscale 3D filters and transfer learning for change detection in high spatial resolution satellite images. *Remote Sensing*. 2020;12(5):799. DOI:10.3390/rs12050799.
- [10] Huang L, Tian Q, Tang B-H, Le W, Wang M, Ma X. Siam-EMNet: A Siamese EfficientNet+MANet Network for Building Change Detection in Very High Resolution Images. *Remote Sensing*. 2023;15(16):3972. DOI:10.3390/rs15163972.
- [11] Peng D, Zhang Y, Guan H. End-to-end change detection for high resolution satellite images using improved UNet++. *Remote Sensing*. 2019;11(11):1382. DOI:10.3390/rs11111382.
- [12] Lv Z, Huang H, Gao L, Benediktsson JA, Zhao M, Shi C. Simple multiscale UNet for change detection with heterogeneous remote sensing images. *IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters*. 2022;19:1-5. DOI:10.1109/LGRS.2022.3173300.
- [13] Wang Z, Pan Z, Hu Y, Lei B. FRCD: Feature Refine Change Detection Network for Remote Sensing Images. *IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters*. 2023. DOI:10.1109/LGRS.2023.3303200.
- [14] Meshkini K, Bovolo F, Bruzzone L. A 3D CNN approach for change detection in HR satellite image time series based on a pretrained 2D CNN. *The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*. 2022;43:143-50. DOI:10.5194/isprs-archives-XLIII-B3-2022-143-2022.
- [15] Tian J, Cui S, Reinartz P. Building change detection based on satellite stereo imagery and digital surface models. *IEEE*

- [40] Belgiu M, Drăguț L. Random forest in remote sensing: A review of applications and future directions. *ISPRS journal of photogrammetry and remote sensing*. 2016;114:24-31. DOI:10.1016/j.isprsjprs.2016.01.011.
- [41] Lu D, Mausel P, Brondizio E, Moran E. Change detection techniques. *International journal of remote sensing*. 2004;25(12):2365-401. DOI:10.1080/0143116031000139863.
- [42] JST C, editor Change detection from a street image pair using cnn features and superpixel segmentation. *Proc Brit Mach Vis Conf*; 2015. DOI:10.5244/C.29.61.
- [43] Maggiori E, Tarabalka Y, Charpiat G, Alliez P. Convolutional neural networks for large-scale remote-sensing image classification. *IEEE Transactions on geoscience and remote sensing*. 2016;55(2):645-57. DOI:10.1109/TGRS.2016.2612821.
- [44] Daudt RC, Le Saux B, Boulch A, editors. Fully convolutional siamese networks for change detection. 2018 25th IEEE international conference on image processing (ICIP); 2018: IEEE. DOI:10.1109/ICIP.2018.8451652.
- [45] Gharibbafghi Z, Tian J, Reinartz P, editors. Superpixel-based 3D building model refinement and change detection, using VHR stereo satellite imagery. *Proceedings of the IEEE/CVF Conference on Computer Vision and Pattern Recognition Workshops*; 2019. DOI:10.1109/CVPRW.2019.00069.
- [46] Li J, Zhu S, Gao Y, Zhang G, Xu Y. Change detection for high-resolution remote sensing images based on a multi-scale attention Siamese network. *Remote Sensing*. 2022;14(14):3464. DOI:10.3390/rs14143464.
- [47] Gholamrezaie H, Hasanlou M, Amani M, Mirmazloumi M. Automatic Mapping of Burned Areas Using Landsat 8 Time-Series Images in Google Earth Engine: A Case Study from Iran. *Remote Sensing*. 2022. DOI:10.3390/rs14246376.
- [48] Coletta, V., et al. 3DCD: A new dataset for 2D and 3D change detection using deep learning techniques. 2022, *The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences* 43: 1349-1354. DOI:10.5194/isprs-archives-XLIII-B3-2022-1349-2022.
- [28] Cardoso MJ, Arbel T, Carneiro G, Syeda-Mahmood T, Tavares JMR, Moradi M, et al. Deep Learning in Medical Image Analysis and Multimodal Learning for Clinical Decision Support: Third International Workshop, DLMIA 2017, and 7th International Workshop, ML-CDS 2017, Held in Conjunction with MICCAI 2017, Québec City, QC, Canada, September 14, Proceedings: Springer; 2017. DOI:10.1007/978-3-319-67558-9.
- [29] Zhang X, Yue Y, Gao W, Yun S, Su Q, Yin H, et al. DifUnet++: A satellite images change detection network based on Unet++ and differential pyramid. *IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters*. 2021;19:1-5. DOI:10.1109/LGRS.2021.3049370.
- [30] Deng L, Wang Y, Lan Q, Chen F. Remote sensing image building change detection based on efficient-UNet++. *Journal of Applied Remote Sensing*. 2023;17(3):034501-. DOI:10.1117/1.JRS.17.034501.
- [31] Berman M, Triki AR, Blaschko MB, editors. The lovasz-softmax loss: A tractable surrogate for the optimization of the intersection-over-union measure in neural networks. *Proceedings of the IEEE conference on computer vision and pattern recognition*; 2018. DOI: 10.1109/CVPR.2018.00464.
- [32] Bousias Alexakis E, Armenakis C. Evaluation of UNet and UNet++ architectures in high resolution image change detection applications. *The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*. 2020;43:1507-14. DOI:10.5194/isprs-archives-XLIII-B3-2020-1507-2020.
- [33] Kingma D, Ba J. Adam: A method for stochastic optimization: *International Conference on Learning Representations* 5. 2015. DOI:10.48550/arXiv.1412.6980.
- [34] Kingma DP, Ba J. Adam: A method for stochastic optimization. *arXiv preprint arXiv:14126980*. 2014. DOI:10.48550/arXiv.1412.6980.
- [35] Ji S, Wei S, Lu M. Fully convolutional networks for multisource building extraction from an open aerial and satellite imagery data set. *IEEE Transactions on geoscience and remote sensing*. 2018;57(1):574-86. DOI:10.1109/TGRS.2018.2858817.
- [36] Mikołajczyk A, Grochowski M, editors. Data augmentation for improving deep learning in image classification problem. 2018 international interdisciplinary PhD workshop (IIPhDW); 2018: IEEE. DOI:10.1109/IIPHDW.2018.8388338.
- [37] Chen H, Li W, Shi Z. Adversarial instance augmentation for building change detection in remote sensing images. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*. 2021;60:1-16. DOI:10.1109/TGRS.2021.3066802.
- [38] Wang J, Perez L. The effectiveness of data augmentation in image classification using deep learning. *Convolutional Neural Networks Vis Recognit*. 2017;11(2017):1-8. DOI:10.48550/arXiv.1712.04621.
- [39] Radke RJ, Andra S, Al-Kofahi O, Roysam B. Image change detection algorithms: a systematic survey. *IEEE transactions on image processing*. 2005;14(3):294-307. DOI:10.1109/TIP.2004.838698.

معرفی نویسندگان

AUTHOR(S) BIOSKETCHES



علیرضا ابراهیمی دارای مدرک کارشناسی در رشته مهندسی نقشه برداری و اطلاعات مکانی و دانشجوی کارشناسی ارشد سنجش از دور از دانشگاه تهران است. وی از سال ۱۴۰۱ تاکنون در زمینه هوش مصنوعی و سنجش از دور فعالیت دارد.

Ebrahimi, A. MS.c student at the School of Surveying and Geospatial Engineering, College of Engineering, University of Tehran, Tehran, Iran

✉ ebrahimi.alireza@ut.ac.ir

منابع طبیعی و پایش محیط زیست می باشد. وی سرپرست آزمایشگاه سنجش از دور چندطیفی و ابرطیفی دانشگاه تهران است و علاوه بر تدریس دروس تخصصی، در نگارش جزوات و معرفی منابع علمی متنوع در این حوزه نیز فعال می باشد.

Hasanlou, M. Associate Professor at the School of Surveying and Geospatial Engineering, College of Engineering, University of Tehran, Tehran, Iran

✉ hasanlou@ut.ac.ir



مهدی حسنلو دانشیار و عضو هیئت علمی دانشکده مهندسی نقشه برداری و اطلاعات مکانی، در دانشگاه تهران می باشند. زمینه های تخصصی ایشان به طور کلی شامل توسعه و به کارگیری الگوریتم های پیشرفته در سنجش از دور، تحلیل تغییرات محیطی، کاربردهای علمی و عملی داده های ماهواره ای در مدیریت

Citation (Vancouver): Ebrahimi A, Hasanlou M. [Multi-Class 3D Change Detection in Urban Areas Using UNet++]. *J. RS. GEOINF. RES.* 2025; 3(2): 363-378

 <https://doi.org/10.22061/jrsgr.2026.12415.1107>



COPYRIGHTS

© 2025 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/>)

Journal of Remote Sensing and Geoinformation Research

Volume 3, Issue 2, Serial Number 5, Summer & Autumn 2025

Accuracy assessment of direct georeferencing of smartphone's images in videogrammetry method <i>M. Shafiei, A. Milan, A. Vafaeinejad</i>	201-218
2D Floorplan Extraction of Indoor Spaces from Mobile Laser Scanner Point Clouds Using Deep Learning Methods <i>M. Heidarimozaffar, Z. Dalvand</i>	219-234
A Systematic Review of Machine Learning Methods for Change Detection in Radar and Optical Images with a Focus on Deep Learning <i>M.R. Zargar, A. Aghabalaei, S. Khazai, A. Mohtadi</i>	235-256
Multi-objective optimization of CCTV camera placement using artificial intelligence algorithms <i>H. Sanei arani, M. Esmaeili, M. Afshar kazimi</i>	257-270
3D Modeling of Shir-Qaleh Castle in Shahmirzad Using UAV-Based Photogrammetry; With an Approach to Documentation, Conservation, Restoration, and Cultural Heritage Zoning <i>A. Shahsavari Baboukani, S. Sadeghian, A. Vafaeinejad, D. Sedighpour</i>	271-286
Land use changes using satellite images processing and geographic information systems in Gilan province, Iran <i>Sh. Felegari, k. Moravej, A. Sharifi, A. Golchin, P. Karami</i>	287-295
A Web-Based GIS Framework for Optimal Bank Branch Selection Using MCDM Algorithms <i>A. Pourbeik, J. Saberian, S. Mohseni</i>	297-306
A Study and Investigation on the Implementation of Service-Oriented Architecture for Spatial Data Infrastructure in Urban Management <i>H. Bazalipour, Gh. Fallahi</i>	307-320
Monitoring and Analysis of Land Subsidence in Eastern Shiraz Using the DInSAR Technique <i>P. Barzabadi, A. Razaghpour, M. Aslani, A. Sharifi</i>	321-332
Monitoring methane emissions in Iran using Sentinel-P5 satellite data: Analyzing emission trends and identifying critical sources (2019-2023) <i>B. Babaei, R. Dousti, E. Javadnia, S. Kiaei, A.H Abdi, H. Karami</i>	333-344
Design and Development of an Intelligent Web-Based Spatial Decision Support System for Optimal Allocation of Local Disaster Response Centers <i>A. Parvini, A.A. AleSheikh</i>	345-362
Multi-Class 3D Change Detection in Urban Areas Using UNet++ <i>A. Ebrahimi, M. Hasanlou</i>	363-378