



نشریه پژوهش های سنجش از دور و اطلاعات مکانی

دوره ۳ شماره ۱، زمستان و بهار ۱۴۰۴



Journal of Remote Sensing and Geoinformation Research



Volume 3, Issue 1, Winter & Spring 2025

دوره ۳، شماره ۱، زمستان و بهار ۱۴۰۴

نشریه علمی پژوهش‌های سنجش از دور و اطلاعات مکانی

دوره ۳، شماره ۱، زمستان و بهار 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:	صادق حامدی نسب
ویراستار انگلیسی:	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://jrsgsr.sru.ac.ir>

پست الکترونیکی: jrsgsr@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 سنجش از دور و اطلاعات مکانی

دوره ۳، شماره ۱، زمستان و بهار ۱۴۰۴

۱-۱۴	کالیبراسیون داده‌های بخار آب سنجنده مودیس با استفاده از شبکه عصبی پرسپترون چندلایه و مشاهدات رادیوسوند کمال قبادی، اسلام جوادنیا، هادی جلیلی، آرش زندکریمی
۱۵-۳۶	تشخیص و طبقه‌بندی عوارض در تصاویر Sentinel-2 با استفاده شبکه Resnet پویا حیدری، اصغر میلان، علیرضا قراگوزلو
۳۷-۵۲	مدل‌سازی مکانی برای مدیریت بهینه آثار باستانی با استفاده از فتوگرامتری و سیستم اطلاعات مکانی (منطقه مورد مطالعه: هگمتانه همدان) مهرنوش شریف‌زاده، علیرضا قراگوزلو، سعید صادقیان
۵۳-۶۴	پیش‌بینی میزان محصول ذرت با بهره‌گیری از یادگیری گروهی، داده‌های ماهواره و هواشناسی علی سبزعلی یمقانی، علی اصغر آل شیخ
۶۵-۸۴	طراحی کاداستر چهار بعدی، مطالعه موردی: منطقه‌ای از (ایران: تهران) محمد علی ممتازی، سعید صادقیان، علیرضا وفایی نژاد
۸۵-۱۰۱	پایش محدوده‌های لغزشی در پروژه سدهای سیاه‌بیشه با استفاده از روش نقشه‌برداری زمینی و تداخل‌سنجی راداری علی بیات، محمد رضا سیف، بهنام اصغری بیرامی
۱۰۳-۱۱۸	فتوگرامتری، فناوری نوین در مستندنگاری میراث فرهنگی؛ مروری نظام‌مند بر پژوهش‌های مرتبط در ایران امیرمحمد معززی مهرطهران
۱۱۹-۱۳۸	ارزیابی پارامترهای موثر بر دقت مثلث‌بندی هوایی در نقشه‌برداری از مناطق راهگذر مبینا احمدی آسور، علیرضا آفری، عبادت قنبری پرمهر
۱۳۹-۱۵۵	توسعه مدل داده مبتنی بر مدل اطلاعات ساختمان به منظور ارزش‌گذاری و تعیین سهم مالکین از اجزای ساختمانی نیلوفر اخلاقی، اصغر میلان، علیرضا وفائی نژاد

۱۵۷-۱۷۰	مطالعه و بررسی پایگاه‌های داده مکانی برای مدلسازی و ایجاد کاداستر سه‌بعدی تأسیسات زیرزمینی مهران نورمحمدی، غلامرضا فلاحی
۱۷۱-۱۸۶	توسعه سامانه کاداستر: تدوین چارچوب ملی مدل دامنه مدیریت زمین برای ایران عارف ضمیری، علی اصغر آل‌شیخ، بهنام عطازاده، جلیل جعفری
۱۸۷-۲۰۰	راهکاری بر مبنای هوش مکانی برای نجات پس از زمین‌لرزه ناهید بهرامی، میثم ارگانی، علی درویشی بلورانی، علیرضا وفایی‌نژاد



ORIGINAL RESEARCH PAPER

Calibration of MODIS Water vapor data using multi-Layer perceptron neural network and radiosonde observations

K. Ghobadi¹, E. Javadnia^{*1}, H. Jalili², A. Zandkarimi²¹ Department of Geomatics Engineering, Faculty of Engineering, University of Zanjan, Zanjan, Iran² Iranian Space Research Center, Tehran, Iran

ABSTRACT

Received: 15 January 2025

Reviewed: 20 April 2025

Revised: 22 May 2025

Accepted: 31 May 2025

KEYWORDS:

Water Vapor

MODIS

Neural Network

Calibration

Radiosonde

* Corresponding author

✉ javadnia@znu.ac.ir

☎ (+9824) 33054504

Background and Objectives: Water vapor in the atmosphere is one of the most critical meteorological parameters, significantly influencing climate studies, weather forecasting, and climate change modeling. Precipitable Water Vapor (PWV) serves as a key indicator in atmospheric studies and is measured using satellite data, including Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer (MODIS) sensor products. MODIS provides two PWV products: Near-Infrared (NIR), which is available only during the day, and Infrared (IR), which provides data for both day and night. Due to its broader temporal coverage, the IR product is widely utilized in various applications. However, the accuracy of this product, especially under varying atmospheric conditions during day and night, remains a major challenge. This study aims to enhance the accuracy of MODIS IR PWV data using machine learning and to assess the calibration's impact on day and night conditions.

Methods: This study utilized data from 10 radiosonde stations in Iran during the 2019-2020 period as reference ground-truth data. Three datasets were prepared: raw MODIS data, fitted data, and modified data. A Multi-Layer Perceptron (MLP) model was employed for calibration and to evaluate its performance for day and night data separately. Standard machine learning methods were applied to design and implement the model. The model's accuracy was evaluated using the Root Mean Square Error (RMSE) and correlation coefficient (R) metrics.

Findings: The results demonstrated that the MLP model significantly improved the accuracy of MODIS PWV data. During the day, RMSE decreased from 3.72 mm in the raw data to 2.63 mm in the calibrated model, while the correlation coefficient increased from 0.81 to 0.86. At night, RMSE reduced from 4.9 mm to 3.16 mm, and the correlation coefficient improved from 0.76 to 0.78. Overall, RMSE in raw MODIS data was 4.48 mm, which was reduced to 2.92 mm in the fitted model and 3.03 mm in the modified model. The correlation coefficient also improved from 0.77 to 0.87 and 0.85, respectively.

Conclusion: This study confirmed that the MLP model effectively enhances the accuracy of MODIS PWV data and reduces existing errors under different atmospheric conditions. The primary innovation of this research is the application of the MLP model to calibrate satellite-derived PWV data for day and night conditions. By improving the precision of satellite data, this method enhances its reliability for practical applications, particularly in weather forecasting and climate studies. Limitations include dependency on radiosonde data as the reference and the absence of analysis on specific atmospheric factors influencing modeling. This approach can also be extended in future studies to improve the accuracy of data from other satellite sensors.



NUMBER OF REFERENCES

41



NUMBER OF FIGURES

7



NUMBER OF TABLES

4

مقاله پژوهشی

کالیبراسیون داده‌های بخار آب سنجنده مودیس با استفاده از شبکه عصبی پرسپترون چندلایه و مشاهدات رادیوسوند

کمال قبادی^۱، اسلام جوادنیا^{۱*}، هادی جلیلی^۲، آرش زندکری^۲^۱ گروه مهندسی نقشه برداری، دانشکده مهندسی، دانشگاه زنجان، زنجان، ایران^۲ پژوهشگاه فضایی ایران، تهران، ایران

چکیده

پیشینه و اهداف: بخار آب موجود در جو یکی از مهم‌ترین پارامترهای هواشناسی است که تأثیر چشمگیری بر مطالعات اقلیمی، پیش‌بینی‌های جوی و مدل‌سازی‌های مرتبط با تغییرات آب‌وهوایی دارد. بخار آب قابل بارش (PWV) به‌عنوان شاخصی اساسی در بررسی وضعیت جوی، با استفاده از داده‌های ماهواره‌ای اندازه‌گیری می‌شود. داده‌های سنجنده طیفی تصویربرداری با توان تفکیک متوسط مودیس (MODIS)، شامل محصولات مادون قرمز نزدیک (NIR) و مادون قرمز (IR)، از جمله منابع اصلی اندازه‌گیری PWV هستند. محصول IR به دلیل ارائه داده در هر دو شرایط روز و شب، در بسیاری از مطالعات کاربرد دارد. با این حال، دقت این داده‌ها به‌ویژه در شرایط جوی مختلف روز و شب همچنان چالشی مهم باقی مانده است. هدف این پژوهش، بهبود دقت داده‌های IR PWV مودیس با استفاده از رویکرد یادگیری ماشین و بررسی تأثیر کالیبراسیون بر داده‌های روز و شب است.

روش‌ها: در این مطالعه، از داده‌های ۱۰ ایستگاه رادیوسوند در ایران طی دوره زمانی ۲۰۱۹-۲۰۲۰ به‌عنوان داده‌های مرجع استفاده شد. برای تحلیل، سه مجموعه داده شامل داده‌های اصلی مودیس، داده‌های برازش‌شده (fitting) و داده‌های اصلاح‌شده (modified) ایجاد شد. سپس مدل پرسپترون چندلایه (MLP) برای کالیبراسیون داده‌ها و مقایسه عملکرد آن در شرایط روز و شب به کار گرفته شد. این مدل با استفاده از روش‌های استاندارد یادگیری ماشین طراحی و توسعه یافت. ارزیابی دقت مدل با محاسبه معیارهای ریشه میانگین مربعات خطا (RMSE) و ضریب همبستگی (R) انجام شد.

یافته‌ها: نتایج نشان داد که مدل MLP توانست دقت داده‌های PWV مودیس را به طور قابل توجهی بهبود بخشد. در شرایط روز، RMSE از ۳/۷۲ میلی‌متر در داده‌های اصلی به ۲/۶۳ میلی‌متر کاهش یافت و ضریب همبستگی از ۰/۸۱ به ۰/۸۶ افزایش پیدا کرد. در شرایط شب، RMSE از ۴/۹ میلی‌متر به ۳/۱۶ میلی‌متر کاهش یافت و ضریب همبستگی از ۰/۷۶ به ۰/۷۸ بهبود یافت. در تحلیل کلی، RMSE داده‌های اصلی برابر با ۴/۴۸ میلی‌متر بود که در مدل برازش شده به ۲/۹۲ میلی‌متر و در مدل اصلاح‌شده به ۳/۰۳ میلی‌متر کاهش یافت. ضریب همبستگی نیز از ۰/۷۷ به ۰/۸۷ و ۰/۸۵ افزایش یافت.

نتیجه‌گیری: این پژوهش نشان داد که مدل MLP توانایی بالایی در بهبود دقت داده‌های PWV مودیس دارد و می‌تواند خطاهای موجود در داده‌های این سنجنده را در شرایط مختلف جوی کاهش دهد. نوآوری اصلی این پژوهش، استفاده از مدل MLP برای کالیبراسیون داده‌های ماهواره‌ای در شرایط روز و شب است. این روش با بهبود دقت داده‌های ماهواره‌ای، قابلیت اطمینان آن‌ها را برای استفاده در پیش‌بینی‌های جوی و مطالعات اقلیمی افزایش می‌دهد. محدودیت‌های این مطالعه شامل وابستگی به داده‌های رادیوسوند به‌عنوان مرجع و عدم بررسی تأثیر عوامل جوی خاص بر مدل‌سازی است. این روش می‌تواند در مطالعات آینده برای بهبود دقت داده‌های سنجنده‌های دیگر نیز مورد استفاده قرار گیرد.

* نویسنده مسئول

javadnia@znu.ac.ir

۰۲۴-۳۳۰۵۴۵۰۴ (۱)

مقدمه

میلی‌متر، سانتی‌متر و یا اینچ بیان می‌شود [۱]. چنین ستون عمودی جو از سطح زمین آغاز و تا نقطه پایانی بخار آب در جو ادامه پیدا می‌کند. این پارامتر به‌شدت در مقیاس‌های مختلف مکانی و زمانی متغیر است و مقادیری از حدود ۸۰ میلی‌متر در نزدیکی استوا و کمتر از یک میلی‌متر در قطبین را به خود اختصاص می‌دهد [۲، ۳]. بخار آب از مهمترین گازهای گلخانه‌ای در جو زمین به شمار می‌رود و نقش کلیدی در چرخه آب، انتقال انرژی و تغییرات آب و هوایی دارد. به‌طور کلی، هر

به محتوای آب موجود در جو رطوبت گفته می‌شود که در سه فاز جامد، مایع و گاز موجود می‌باشد. فاز گازی رطوبت همان بخار آب است. پارامترهای مختلفی برای بیان میزان بخار آب جوی تعریف شده است که یکی از رایج‌ترین آن‌ها، بخار آب قابل بارش (Precipitable water Vapor -PWV) می‌باشد. ارتفاع مجموع بخار آب متراکم شده‌ی موجود در یک ستون عمودی جوی با سطح مقطع واحد را PWV گویند که برحسب

ادغام داده‌های مختلف استفاده کرده‌اند [۱۴]. با وجود نتایج قابل قبول، این روش‌ها معمولاً تنها بایاس کلی داده‌ها را اصلاح می‌کنند و قادر به درک تغییرات مکانی و زمانی بایاس نیستند، که این خود یکی از نقاط ضعف مهم در مطالعات پیشین محسوب می‌شود.

در سال‌های اخیر، استفاده از الگوریتم‌های هوش مصنوعی و یادگیری ماشین جهت اصلاح داده‌های ماهواره‌ای رشد چشمگیری داشته است. شبکه‌های عصبی و سایر تکنیک‌های یادگیری ماشین قادر به مدل‌سازی روابط پیچیده و غیرخطی بین داده‌های ورودی و خروجی هستند [۱۵]. در سالهای اخیر مطالعات مختلفی در خصوص بکارگیری تکنیک‌های یادگیری ماشین به منظور بهبود دقت داده‌های بخار آب ماهواره‌ای انجام گردیده است [۱۷-۲۱]. برای نمونه، ژیونگ و همکاران (۲۰۲۱) در چین با استفاده از داده‌های GNSS و چهار الگوریتم یادگیری ماشین به کالیبراسیون داده‌های NIR مودیس پرداختند [۱۹]. نتایج حاکی از کاهش چشمگیر خطاها و بهبود کیفیت داده‌های به دست آمده بود، به طوری که RMSE نهایی برای روش‌های مختلف در مقیاس سالانه بین ۳/۹ تا ۵ میلی‌متر و در مقیاس ماهانه بین ۲/۵ تا ۴/۶ میلی‌متر به دست آمد.

این مطالعات نشان داده‌اند که الگوریتم‌های یادگیری ماشین می‌توانند به خوبی برای تصحیح داده‌های ماهواره‌ای مورد استفاده قرار گیرند، به ویژه در مناطق با توپوگرافی پیچیده یا دسترسی محدود به داده‌های زمینی. در ایران نیز شرایط مشابهی وجود دارد؛ ناهمواری‌های زمین و اقلیم خشک، دستیابی به داده‌های دقیق را دشوار می‌سازند. با این حال، بهره‌گیری از روش‌های یادگیری ماشین برای بهبود دقت داده‌های IR مودیس که کمتر از NIR مورد توجه بوده، می‌تواند گام مهمی در ارتقای دقت مطالعات اقلیمی در کشور باشد.

برخلاف داده‌های NIR که تنها در روز در دسترس هستند و دقت بهتری دارند، داده‌های IR امکان پایش شبانه‌روزی را فراهم می‌کنند ولی دقت پایین‌تری دارند. این موضوع نیاز به تصحیح و کالیبراسیون دقیق‌تر برای داده‌های IR را دوجندان می‌سازد. در این پژوهش، از داده‌های رادیوسوند ده ایستگاه در نقاط مختلف ایران طی سال‌های ۲۰۱۹ تا ۲۰۲۰ به عنوان داده‌های هدف جهت آموزش شبکه عصبی استفاده شده است. هدف آن است که با بهبود داده‌های IR، بتوان درک بهتری از چرخه آب جوی به دست آورد.

نتایج چنین پژوهش‌هایی می‌تواند در ارتقای مدل‌سازی و پیش‌بینی دقیق‌تر آب‌وهوا در کشور مؤثر واقع شود. همچنین می‌تواند ابزار مفیدی برای سیاست‌گذاران در زمینه مدیریت منابع آب و آمادگی در برابر بلایای طبیعی فراهم کند. دقت بیشتر در اندازه‌گیری بخار آب می‌تواند در حوزه‌های متعددی نظیر تحقیقات اقلیمی، کشاورزی، ایمنی هوانوردی و مدیریت بحران نقش‌آفرین باشد. در نهایت، استفاده از تکنیک‌های پیشرفته یادگیری ماشین می‌تواند رویکردی نوین و مؤثر برای رفع محدودیت‌های گذشته و افزایش دقت داده‌های ماهواره‌ای در ایران ارائه دهد.

افزایش یک‌درجه‌ای دما می‌تواند باعث افزایش هفت درصدی محتوای آن شود، و افزایش بخار آب، به عنوان یک گاز گلخانه‌ای، گرمایش آب‌وهوا را تسریع می‌کند [۴]. بنابراین اندازه‌گیری دقیق داده‌های بخار آب برای مدل‌های پیش‌بینی آب و هوا، مطالعات اقلیمی و درک بهتر چرخه آب ضروری است.

رادیوسوند و سامانه موقعیت‌یابی جهانی (GNSS) به دلیل دقت بالای خود، به عنوان منابع مرجع در بسیاری از مطالعات شناخته می‌شوند. داده‌های رادیوسوند شامل اندازه‌گیری مستقیم رطوبت، دما و فشار است که برای محاسبه PWV حیاتی هستند. با این حال، این روش‌ها با محدودیت‌هایی چون رزولوشن زمانی پایین، عملکرد ضعیف در شرایط خاص جوی، هزینه‌های زیاد و پوشش مکانی نامنظم مواجه‌اند [۵]. در مقابل، GNSS با استفاده از اندازه‌گیری تأخیر سیگنال‌های ماهواره‌ای در هنگام عبور از جو، میزان PWV را به صورت غیرمستقیم تخمین می‌زند [۶]. هر دو روش زمینی دقت بالایی دارند، اما محدودیت‌هایی در پوشش مکانی و زمانی آن‌ها وجود دارد. در سوی دیگر، روش‌های سنجش از دور ماهواره‌ای امکان پوشش گسترده‌تر را فراهم می‌کنند و قابلیت مشاهده مناطق دورافتاده را دارند. با این حال، دقت این روش‌ها به عوامل مختلفی مانند شرایط جوی، ویژگی‌های سطح زمین و وجود ذرات معلق بستگی دارد [۷]. از این رو، عدم قطعیت این داده‌ها معمولاً بیشتر از روش‌های زمینی است [۸].

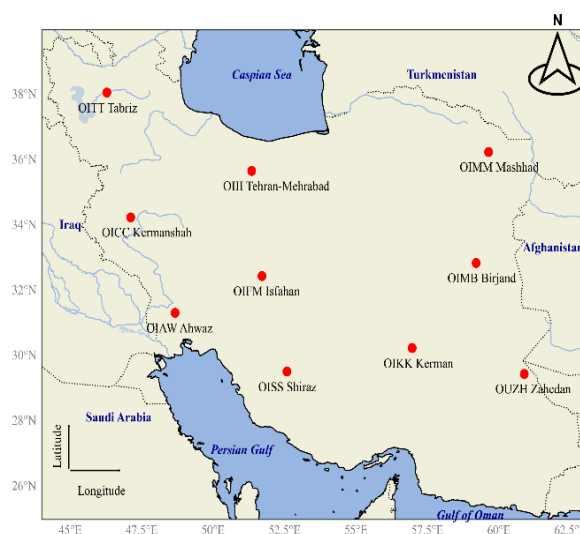
یکی از مهم‌ترین منابع داده‌های ماهواره‌ای در حوزه PWV، سنجنده مودیس (MODIS) روی ماهواره‌های ترا و آکوا است. مودیس با استفاده از باندهای مادون قرمز نزدیک (NIR) و مادون قرمز (IR)، امکان تولید محصولات بخار آب با قدرت تفکیک زمانی بالا را فراهم می‌سازد [۳، ۷]. داده‌های IR چهار بار و داده‌های NIR دو بار در روز در یک منطقه ثبت می‌شوند. با وجود گستره پوشش بالا، داده‌های ماهواره‌ای همچنان نیازمند ارزیابی و اصلاح در مقایسه با داده‌های دقیق زمینی هستند. به همین دلیل، مطالعات متعددی به مقایسه و اعتبارسنجی این داده‌ها با رادیوسوند و GPS پرداخته‌اند [۹-۱۱]. به عنوان مثال، لیو و همکاران (۲۰۱۵) با استفاده از داده‌های ۸۳ ایستگاه رادیوسوند در چین، دقت محصولات NIR و IR مودیس را مورد ارزیابی قرار دادند [۱۰]. نتایج نشان داد که هر دو محصول دارای خطای نسبی بالا هستند، اما محصول NIR دقت بهتری نسبت به IR دارد. نوروزی و جوادنیا (۱۴۰۰) نیز با استفاده از داده‌های GPS در زنجان طی سه سال، دقت محصول IR را بررسی کرده و به RMSE حدود ۳ میلی‌متر دست یافتند [۱۱]. این مطالعات اهمیت تصحیح داده‌های ماهواره‌ای به ویژه IR را که دقت کمتری دارد، نشان می‌دهند.

برای بهبود دقت داده‌های بخار آب ماهواره‌ای، روش‌های گوناگونی به کار گرفته شده‌اند. از جمله این روش‌ها می‌توان به برازش خطی با استفاده از داده‌های زمینی و درون‌یابی فضایی مانند کریجینگ و درون‌یابی فاصله وزنی اشاره کرد [۱۲، ۱۳]. همچنین، برخی مطالعات از مدل‌های پیچیده‌تری مانند هارمونیک‌های کروی و تخمین واریانس هلمرت برای

روش تحقیق

منطقه مطالعاتی و داده‌ها

ایران به دلیل قرار گرفتن در ناحیه خشک آسیا و تحت تأثیر بادهای شمال غربی، دارای آب‌وهوای نسبتاً خشک و گرم است. البته باید گفت که به دلیل وجود زمستان‌های سرد در مناطق مرتفع، همچنین دریای خزر و خلیج فارس، شرایط آب‌وهوایی در نواحی مختلف ایران متفاوت هستند [۲۲]. سرزمین ایران به شکل کلی، کوهستانی و میانگین بلندی آن، بیش از ۱۲۰۰ متر از سطح دریا می‌باشد. آب‌وهوا در این منطقه به دلیل تفاوت‌های عرض جغرافیایی، طول جغرافیایی و ارتفاع، پیچیده و متنوع است که منجر به تنوع در میزان بخارآب قابل بارش در منطقه تحقیقاتی می‌شود. رطوبت هوا در ایران به شدت متغیر و در مناطق مختلف کشور با توجه به شرایط محیطی و زمانی متفاوت است. در بسیاری از مناطق ایران، رطوبت هوا در فصول گرم به شدت پایین است و در نتیجه، شرایط آتش‌سوزی و خشک‌سالی در این فصل‌ها افزایش می‌یابد. در مناطقی که رطوبت هوا بیشتر است، به خصوص در شمال کشور، بارش بیشتری رخ می‌دهد و این مناطق دارای طبیعتی سرسبز و جنگلی هستند [۲۳]. شکل ۱، منطقه مورد مطالعه و نحوه پراکندگی ایستگاه‌های رادیوسوند در آن را نشان می‌دهد. نام ایستگاه‌های رادیوسوند مورد استفاده به همراه مشخصات جغرافیایی در جدول ۱ آورده شده است.



شکل ۱: منطقه مورد مطالعه و توزیع ایستگاه‌های رادیوسوند در آن
Fig. 1: Research area and distribution of Radiosondes stations

جدول ۱: مشخصات ایستگاه‌های رادیوسوند

Table 1: Specifications of radiosonde stations

Station Name	Station Coordinates	Station Elevation (m)	Station ID
OIII Tehran (Mehrabad)	35.68° N, 51.35° E	1191	40754
OIMB (Birjand)	32.86° N, 59.20° E	1491	40809
OIKK (Kerman)	30.25° N, 56.96° E	1754	40841
OIAW (Ahwaz)	31.33° N, 48.67° E	22	40811

داده‌های PWV

در این تحقیق دو مجموعه داده PWV مورد استفاده قرار گرفت. دسته اول داده‌های PWV استخراج شده از محصولات IR سنجنده مودیس است که با وجود فراوانی زیاد آن (چهار داده در شبانه‌روز) و دقت نسبتاً پایین آن در مقایسه با داده PWV سنتی محصول NIR، به عنوان داده هدف جهت کالیبراسیون و افزایش دقت بکار گرفته شد. بخش دوم شامل داده‌های PWV مشاهداتی در ایستگاه‌های هواشناسی مجهز به رادیوسوند است.

داده‌های PWV مودیس

محصولات بخارآب سطح دو از کالکشن ۶/۱ ماهواره آکوا (MYD05_L2) در این پژوهش مورد استفاده قرار گرفتند و از وبسایت <https://ladsweb.nascom.nasa.gov> با فرمت HDF برای منطقه مورد مطالعه و برای دوره زمانی ۲۰۱۹-۲۰۲۰ جمع‌آوری شدند. دلیل انتخاب داده‌های ماهواره آکوا در این پژوهش، تطابق زمانی آن‌ها با داده‌های رادیوسوند است که موجب افزایش همخوانی و دقت تحلیل‌ها می‌شود. سنجنده مودیس محصولات PWV مادون قرمز با قدرت تفکیک مکانی پنج کیلومتری را چهار بار و مادون قرمز نزدیک با قدرت تفکیک مکانی یک کیلومتری را دو بار در روز برای یک مکان ارائه می‌دهد. PWV باند مادون قرمز در ابتدا به عنوان یکی از محصولات MYD07 (پروفیل‌های اتمسفری مودیس) تولید شد و به منظور سهولت به محصولات بخارآب MYD05 اضافه گردید. الگوریتم بکار رفته در MYD07 توسط سیمین و همکاران (۲۰۰۳) از ۱۱ باند مادون قرمز (۲۵، ۲۷-۳۶) برای بازیابی مشخصات جوی دما و رطوبت، بخارآب قابل بارش، میزان کل ازن موجود و دمای سطح زمین استفاده می‌کند [۲۴]. پروفیل‌های دما و رطوبت مودیس در ۲۰ سطح تراز ارتفاعی تولید می‌شوند. بدین منظور یک الگوریتم بازیابی رگرسیون در شرایط آسمان صاف مورد استفاده قرار می‌گیرد، که در آن ضرایب رگرسیون با استفاده از یک مدل انتقال تابشی سریع با ویژگی‌های جوی گرفته‌شده از مجموعه داده‌های از پروفیل‌های جهانی (رادیوسوند و مدل) به دست می‌آیند. محصول بخارآب جوی، تخمینی از کل بخارآب ستون جوی است که از بازیابی یکپارچه مادون قرمز مودیس مربوط به پروفیل‌های رطوبت جوی در مناطق صاف و بدون ابر به دست می‌آید. این الگوریتم بازیابی، از داده‌های تابندگی (Radiance) اندازه‌گیری شده توسط سنجنده مودیس از زمین و اقیانوس استفاده می‌نماید [۲۵]. ارزیابی PWV باند IR با استفاده از مشاهدات

که نشان‌دهنده تغییرات گسترده این پارامتر در شرایط مختلف اقلیمی کشور است.

روشن‌شناسی

در تحقیقات پیشین، تکنیک‌های یادگیری ماشین مختلفی در حوزه علوم زمین مورد استفاده قرار گرفته است. از جمله معروف‌ترین آن‌ها می‌توان به درخت تصمیم (DT)، ماشین بردار پشتیبان (SVM)، جنگل تصادفی (RF)، الگوریتم نزدیکترین همسایه (KNN) و شبکه‌های عصبی مصنوعی (ANN) اشاره کرد [۳۰-۳۲]. این تکنیک‌ها برای کاربردهایی مانند پیش‌بینی مخاطرات طبیعی، تحلیل الگوهای اقلیمی، بررسی تغییرات کاربری زمین، و تحلیل داده‌های سنجش از دور به کار رفته‌اند. از بین این الگوریتم‌ها، معمولاً RF و ANN بیشترین دقت و کارایی را در تحلیل داده‌های پیچیده و چندبعدی علوم زمین داشته‌اند [۳۲-۳۴]. جنگل تصادفی به دلیل ساختار ترکیبی و توانایی در کاهش بیش‌برازش (Overfitting) و شبکه‌های عصبی مصنوعی به دلیل قابلیت تشخیص الگوهای پیچیده، به‌ویژه در مسائل پیش‌بینی و طبقه‌بندی، عملکرد بهتری داشته‌اند [۳۵]. در این مقاله ANN به‌منظور کالبراسیون داده‌های بخار آب مودیس استفاده شد. متناسب با صورت مسئله تحقیق، شبکه عصبی پرسپترون چند لایه (Multi-Layer Perceptron- MLP) انتخاب گردید. در ادامه جزئیات الگوریتم MLP توضیح داده خواهد شد.

شبکه عصبی پرسپترون چندلایه

شبکه عصبی پرسپترون چندلایه (MLP) شامل لایه ورودی، یک یا چند لایه مخفی و لایه خروجی است. در این شبکه، هر نورون به نورون‌های لایه بعد متصل است، و هر اتصال دارای یک وزن است که مقدار آن در طول آموزش تنظیم می‌شود تا مدل به دقت بالاتری دست یابد [۳۶].

ساختار و روابط شبکه عصبی MLP

○ لایه ورودی: در شبکه عصبی، لایه ورودی شامل نودهایی است که هر کدام یک ویژگی از داده‌های ورودی را نشان می‌دهد. به‌عنوان مثال، اگر داده ورودی شامل طول و عرض جغرافیایی، ارتفاع، زمان و مقدار بخار آب سنجنده مودیس باشد، این لایه شامل ۵ نود (ویژگی) خواهد بود.
○ لایه‌های مخفی: این لایه‌ها با استفاده از روابط غیرخطی و وزن‌های تنظیم‌شده، ویژگی‌های پیچیده‌تری را از ورودی استخراج می‌کنند. هر نود در یک لایه مخفی جمع وزنی ورودی‌های خود را به‌علاوه یک بایاس دریافت می‌کند. این مجموع سپس از یک تابع فعال‌سازی غیرخطی عبور می‌کند. یکی از رایج‌ترین توابع فعال‌سازی در این لایه‌ها، ReLU است که رابطه آن به‌صورت زیر است [۳۷].

$$g(x) = \frac{2}{1 + \exp(-2x)} - 1 \quad (4)$$

این تابع صفرمحور است و به مدل کمک می‌کند تا مقادیر ورودی منفی، خنثی و مثبت داشته باشد؛ به عبارت دیگر، مقادیر منفی، به‌شدت منفی

زمینی توسط سیمین و همکارانش (۲۰۰۸) انجام شد. نتایج به‌دست‌آمده نشان داد که RMSE این داده‌ها برابر ۱/۴ میلی‌متر در مقایسه با رادیومتر مایکروویو می‌باشد.

داده‌های PWV رادیوسوند

رادیوسوندها از ابزارهای مهم اندازه‌گیری برای اندازه‌گیری دما، رطوبت، فشار، سمت و سرعت باد در جو بالا هستند. این ابزار اندازه‌گیری توسط بالون‌های هواشناسی به اعماق جو ارسال شده و وظیفه دیده‌بانی از سطوح فوقانی جو را انجام می‌دهد. بر اساس طراحی بالن مانند رادیوسوند، می‌توان به‌طور مستقیم پارامترهای جوی مانند فشار، دما و رطوبت نسبی را در ارتفاع‌های مختلف اندازه‌گیری کرد [۲۶-۲۸].

اگر q رطوبت ویژه یا نسبت آمیختگی برحسب گرم بخار آب بر کیلوگرم هوا باشد آنگاه بخار آب قابل بارش برحسب میلی‌متر که در یک لایه محدودشده با فشارهای p_1 و p_2 قرار دارد، به‌صورت رابطه ۱ تعریف می‌شود:

$$PWV = \frac{1}{g} \int_{p_1}^{p_2} q \, dp \quad (1)$$

که در آن g شتاب جاذبه زمین برحسب متر بر مجذور ثانیه، p_1 فشار در سطح زمین و p_2 فشار در بالای جو زمین برحسب پاسکال می‌باشد. رطوبت ویژه با استفاده از معادله ۲ محاسبه می‌شود [۲۷]:

$$q = \frac{0.622e_s}{p - e_s} \quad (2)$$

که در آن e_s فشار جزئی اشباع بخار آب و p فشار هوا می‌باشند. e_s فشار جزئی اشباع بخار آب برحسب پاسکال را می‌توان با استفاده از رابطه ۳ محاسبه نمود:

$$e_s = 6.112 \exp\left(\frac{17.67T_d}{T_d + 243.15}\right) \quad (3)$$

T_d دمای نقطه‌ی شبنم برحسب درجه سانتی‌گراد می‌باشد [۲۹].

در این پژوهش از ایستگاه‌های رادیوسوند در شهرهای تهران، اصفهان، شیراز، اهواز، زاهدان، کرمان، بیرجند، تبریز، کرمانشاه و مشهد استفاده‌شده که از میان آن‌ها تنها در ایستگاه مهرآباد تهران دو بار پرتاب بالون رادیوسوند و در نتیجه دو داده بخار آب قابل بارش در شبانه‌روز وجود دارد. ایستگاه‌های اهواز، بیرجند، کرمان فقط در روز و ایستگاه‌های اصفهان، شیراز، مشهد، زاهدان، کرمانشاه و تبریز فقط در شب داده دارند. داده‌های رادیوسوند به شکل آنلاین برای ایستگاه‌های فعال در سرتاسر دنیا در پایگاه دانشگاه ویومینگ موجود و قابل استفاده است (<http://weather.uwyo.edu/upperair/sounding.html>). لذا

داده‌های موجود در این پایگاه طی سال‌های ۲۰۱۹-۲۰۲۰ به‌عنوان داده‌های هدف برای آموزش شبکه عصبی استخراج شدند. در جدول شماره ۱، اسامی ایستگاه‌های رادیوسوند به‌کاررفته همراه با ویژگی‌های جغرافیایی آن‌ها آورده شده است. بر مبنای ایستگاه‌های مطالعاتی این تحقیق، محدوده تغییرات PWV در ایران بین ۱/۴ تا ۴۶/۲ میلی‌متر است

فرایند آموزش مدل

در فرایند آموزش، هدف این است که خطای بین خروجی شبکه و مقدار واقعی به حداقل برسد. این کار با استفاده از الگوریتم پس انتشار خطا (Backpropagation) انجام می شود که به صورت زیر عمل می کند [۳۹]:

- محاسبه خطا: ابتدا مقدار خطا (تفاوت بین پیش بینی و مقدار واقعی) با استفاده از یک تابع هزینه محاسبه می شود. برای مثال، اگر از میانگین مربعات خطا (MSE) استفاده شود، رابطه به صورت زیر خواهد بود:

$$MSE = \sum_{i=1}^n \frac{1}{N} (y_i - \hat{y}_i)^2 \quad (7)$$

که y_i مقدار واقعی و $\hat{y}_i$ مقدار پیش بینی شده است.

- انتشار خطا و تنظیم وزن ها: خطا از لایه خروجی به سمت لایه های قبلی منتشر می شود و وزن ها با استفاده از گرادینت کاهشی (Gradient Descent) و الگوریتم های بهینه سازی مانند Adam به روز رسانی می شوند [۴۰].

مراحل انجام تحقیق

در این پژوهش، هدف کالیبراسیون داده های بخار آب سنجنده مودیس با استفاده از شبکه عصبی MLP و مشاهدات رادیوسوند است. داده های بخار آب از سنجنده مودیس و رادیوسوند به عنوان ورودی و خروجی به مدل شبکه عصبی وارد می شوند تا دقت برآورد بخار آب سنجنده مودیس بهبود یابد. مراحل کلی انجام کار به صورت شکل ۲ است که در بخش های بعدی مراحل به تفکیک توضیح داده می شود:

و مقادیر صفر در گراف تانژانت هایپربولیک نزدیک به صفر نگاشت می شوند [۳۸] و به شبکه کمک می کند تا ویژگی های پیچیده تری را یاد بگیرد.

○ لایه خروجی: این لایه مقدار خروجی پیش بینی شده توسط شبکه را ارائه می دهد. اگر خروجی یک مقدار پیوسته باشد (مانند پیش بینی بخار آب)، تابع فعال سازی لایه خروجی می تواند خطی باشد. در غیر این صورت، می توان از تابع سیگموئید یا تانژانت هایپربولیک برای خروجی های دسته بندی شده استفاده کرد.

روابط ریاضی در شبکه عصبی

فرض کنیم که x بردار ورودی (مثلاً شامل طول جغرافیایی، عرض جغرافیایی، ارتفاع و...) و y خروجی واقعی باشد. هر نود در یک لایه مجموع وزنی ورودی ها را محاسبه کرده و از طریق تابع فعال سازی عبور می دهد. فرمول ریاضی برای محاسبه خروجی هر نود به شرح زیر است:

- جمع ورودی ها: اگر $x_1, x_2, \dots, x_n$ ورودی ها و $w_1, w_2, \dots, w_n$ وزن های مرتبط با هر ورودی باشند، جمع وزنی به صورت زیر محاسبه می شود:

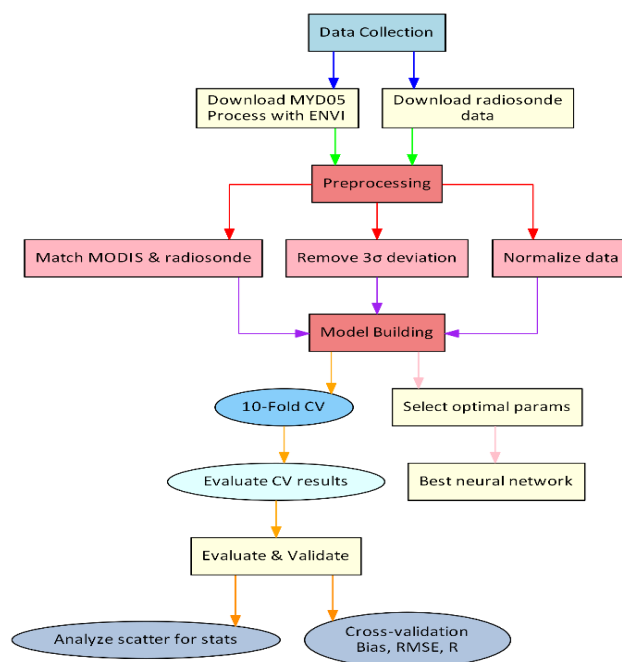
$$z = \sum_{i=1}^n x_i w_i + b \quad (5)$$

○ که b یک مقدار بایاس است.

○ تابع فعال سازی: خروجی این نود که به صورت a نشان داده می شود، با اعمال تابع فعال سازی به z محاسبه می شود:

$$f(z) = a \quad (6)$$

○ پیش بینی نهایی: پس از عبور از لایه های مختلف، مقدار نهایی که شبکه عصبی به عنوان پیش بینی ارائه می دهد از لایه خروجی به دست می آید.



شکل ۲: یک نمایش شماتیک از مراحل انجام تحقیق

Fig. 2: A schematic representation of the steps involved in this study

جمع‌آوری داده‌ها

در این پژوهش، داده‌های بخار آب سنجنده مودیس به‌عنوان داده‌های ورودی مدل مورد استفاده قرار گرفته است. همچنین از مشاهدات رادیسوند به‌عنوان داده‌های مرجع (Ground Truth) برای کالیبراسیون استفاده شده است. برای هر موقعیت جغرافیایی و زمانی خاص، داده‌های زیر به‌عنوان ورودی به مدل شبکه عصبی داده می‌شود: طول جغرافیایی (Longitude)، عرض جغرافیایی (Latitude)، ارتفاع (Altitude)، زمان (Time) و بخار آب قابل بارش مودیس (MODIS PWV).

پیش‌پردازش داده‌ها

برای افزایش دقت و کارایی مدل، مراحل پیش‌پردازش داده‌ها به‌صورت زیر انجام شد:

○ نرمال‌سازی: مقادیر ورودی شامل طول و عرض جغرافیایی، ارتفاع، زمان و بخار آب سنجنده مودیس به مقادیر بین ۰ تا ۱ نرمال‌سازی شدند تا یادگیری مدل بهبود یابد.

○ جفت‌سازی داده‌ها: داده‌های مودیس و مشاهدات رادیسوند در نقاط زمانی و مکانی یکسان مطابقت داده شدند. برای هر نمونه از داده‌های مودیس یک مقدار متناظر از بخار آب قابل بارش از مشاهدات رادیسوند به‌عنوان خروجی هدف (Target Output) تعیین شد.

طراحی مدل شبکه عصبی

برای کالیبراسیون داده‌های مودیس از یک شبکه عصبی MLP استفاده شد. این شبکه عصبی به‌گونه‌ای طراحی شد که بتواند رابطه غیرخطی بین ورودی‌ها و خروجی‌ها را یاد بگیرد. ساختار مدل شبکه عصبی به شرح زیر است:

○ لایه ورودی (Input Layer): این لایه شامل ۵ نود است که هر نود با یکی از ورودی‌های مدل (طول و عرض جغرافیایی، ارتفاع، زمان و بخار آب مودیس) مرتبط است.

• لایه‌های مخفی (Hidden Layers): برای بهینه‌سازی دقت مدل، تعداد لایه‌های مخفی و تعداد نودهای هر لایه با استفاده از روش جستجوی شبکه (Grid Search) تعیین شد. این روش به‌صورت سیستماتیک پارامترهای مختلف را بررسی کرده و بهترین ترکیب را برای دستیابی به بالاترین دقت انتخاب می‌کند. در هر لایه مخفی از تابع فعال‌سازی تانژانت هائپربولیک استفاده شد.

• لایه خروجی (Output Layer): این لایه شامل یک نود است که مقدار تخمینی بخار آب قابل بارش را ارائه می‌دهد. در اینجا از تابع فعال‌سازی غیرخطی استفاده شده است.

آموزش مدل

مدل شبکه عصبی با استفاده از داده‌های آموزش که شامل ورودی‌های مودیس و خروجی‌های متناظر رادیسوند بود، آموزش داده شد.

○ تابع هزینه (Loss Function): برای ارزیابی خطا، از میانگین مربعات خطا (MSE) به‌عنوان تابع هزینه استفاده شد.

○ الگوریتم بهینه‌سازی: از الگوریتم Adam برای بهینه‌سازی وزن‌های مدل استفاده گردید. این الگوریتم به دلیل قابلیت تطبیق خودکار نرخ یادگیری در طول آموزش، باعث سرعت و پایداری در یادگیری مدل می‌شود.

○ پارامترهای آموزشی: مدل با یک نرخ یادگیری بهینه و تعداد مناسب تکرارهای آموزشی (epoch) تنظیم شد تا به دقت مطلوب برسد و از بیش‌برازش جلوگیری شود.

ارزیابی مدل

در این تحقیق، برای ارزیابی عملکرد مدل از روش اعتبارسنجی متقابل ۱۰-تایی (10-fold) استفاده شد [۴۱]. بدین صورت که داده‌های موجود به ۱۰ بخش تقسیم شدند و در هر تکرار، ۹ بخش از داده‌ها به‌عنوان داده‌های آموزش و یک بخش به‌عنوان داده تست انتخاب شدند. این فرآیند ۱۰ بار تکرار شد به‌گونه‌ای که هر بخش داده‌ها یک‌بار به‌عنوان داده تست استفاده شد. میانگین معیارهای ارزیابی به‌دست‌آمده از ۱۰ تکرار به‌عنوان نتیجه نهایی ارزیابی مدل در نظر گرفته شد. این روش ارزیابی کمک می‌کند تا از بیش‌برازش جلوگیری شود و مدل توانایی تعمیم‌پذیری بهتری بر روی داده‌های جدید پیدا کند. شاخص‌های ارزیابی دقت مدل در هر تکرار شامل جذر میانگین مربعات خطا (RMSE)، بایاس (Bias) و ضریب همبستگی (R) می‌باشد.

تحلیل نتایج و بهینه‌سازی

مدل به‌منظور افزایش دقت با تغییر تعداد لایه‌ها و نودها تنظیم شد و مقادیر شاخص‌های ارزیابی به‌دست‌آمده با نتایج دیگر روش‌های موجود مقایسه شد. همچنین، مدل برای مکان‌ها و زمان‌های مختلف کالیبره شد تا عملکرد آن در شرایط مختلف آب‌وهوایی و جغرافیایی بررسی شود.

پردازش داده‌ها

داده‌های بخار آب قابل بارش (PWV) موردنیاز این پژوهش از محصولات سنجنده مادون قرمز مودیس ماهواره آکوا استخراج شده‌اند. برای این منظور، تصاویر روزانه MYD05 مربوط به سنجنده مودیس که شامل اطلاعات بخار آب، پوشش ابر، و ویژگی‌های جوی هستند، دریافت و به نرم‌افزار ENVI وارد شدند. با استفاده از افزونه MCTK، لایه اطلاعاتی MODIS PWV IR استخراج و زمین‌مرجع گردید. در مرحله بعد، مقادیر PWV برای بازه زمانی موردنظر در ایستگاه‌های مطالعاتی استخراج شد. پس از استخراج مقادیر PWV از تصاویر ماهواره‌ای مودیس، داده‌های روزهای ابری شناسایی و حذف شدند، زیرا حضور ابرها می‌تواند دقت برآورد بخار آب توسط الگوریتم مادون قرمز مودیس را کاهش دهد. به این منظور، از محصول ماسک ابر مودیس با نام MYD35 استفاده شد و روزهای ابری از مجموعه داده‌ها حذف گردیدند. همچنین، داده‌ها با تصاویری که ایستگاه‌های رادیسوند را شامل می‌شدند اما مقادیر NAN

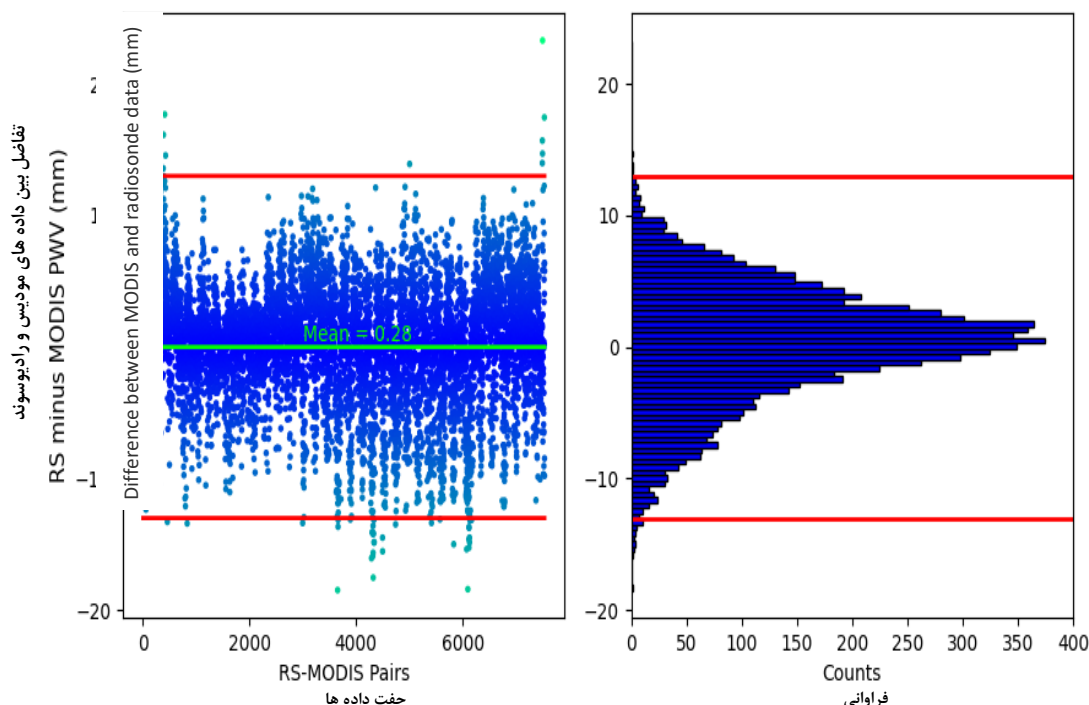
میانگین تفاوت داده‌های بخار آب قابل بارش از این دو منبع را نشان می‌دهد.

تعیین هایپرپارامترها

باید محدوده مشخصی از مقادیر مختلف برای پارامترها توسط تابع GridsearchCV بر روی داده‌ها تست و اجرا شوند تا مقادیر بهینه برای الگوریتم‌ها به دست آیند. مقدار بهینه تعداد لایه‌های پنهان در محدوده ۵ تا ۱۲ در نظر گرفته شد. به طریق مشابه، جهت تعیین بهترین پارامتر نرخ یادگیری به منظور به حداقل رساندن سرعت همگرایی الگوریتم مقادیر مختلف در محدوده ۰/۰۰۰۱ تا ۰/۱ به صورت لگاریتمی انتخاب شد. به دلیل اینکه مقدار بهینه نرخ یادگیری ممکن است در چندین مرتبه تغییر کند، لذا انتخاب یک محدوده خطی از مقادیر ممکن است مؤثر واقع نشود. استفاده از فضای لگاریتمی به جای فضای خطی، به ما اجازه می‌دهد بهترین مقدار را برای نرخ یادگیری با سرعت و دقت بیشتری یافت شود. در شکل ۴ خطای پیش‌بینی در بازه ۰/۱ تا ۰/۱۰۰۱ برای این فرا پارامتر نمایش داده شده است. بر اساس نتایج اعتبارسنجی متقابل، بهترین مقدار نرخ یادگیری حدود ۰/۰۱۶، و بهترین تعداد لایه‌های پنهان ۸، و در نهایت مقدار پارامتر لامبدا در تنظیم L2 جهت جلوگیری از بیش برازش مقدار ۰/۰۵ انتخاب شد.

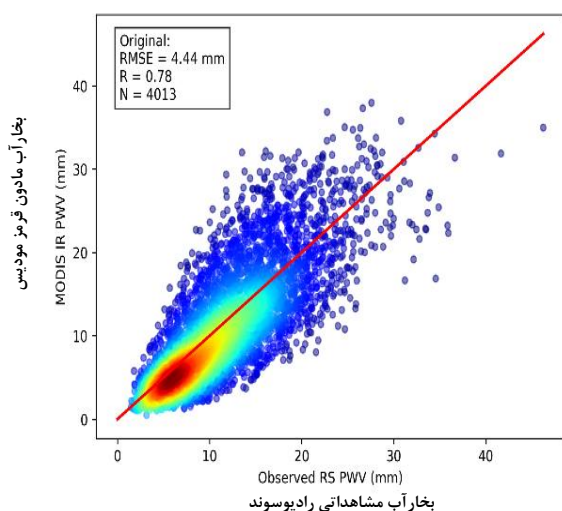
داشتند نیز از مجموعه داده‌ها حذف شدند. علاوه بر داده‌های بخار آب ماهواره‌ای، داده‌های مرجع PWV رادیوسوند نیز برای ایستگاه‌های منتخب از وبسایت آرشیو ملی مرکز پیش‌بینی محیطی دانشگاه وایومینگ دانلود شدند. سپس با استفاده از نرم‌افزار اکسل، داده‌های رادیوسوند بر اساس زمان و موقعیت مکانی با داده‌های بخار آب مودیس تطبیق داده شدند تا جفت داده‌های مکانی - زمانی مشترک از هر دو منبع داده به دست آید. این جفت داده‌ها به عنوان مبنای مقایسه و ارزیابی دقت محصولات بخار آب قابل بارش مودیس مورد استفاده قرار گرفتند. در نهایت، پس از جمع‌آوری و تطبیق داده‌های بخار آب مودیس و داده‌های رادیوسوند، کلیه داده‌ها به فرمت CSV ذخیره شدند تا در محیط برنامه‌نویسی پایتون قابل استفاده باشند.

در قدم بعدی تفاوت بین داده‌های مودیس و رادیوسوند را با استفاده از جفت‌های نمونه به دست آمده محاسبه شده و برای تبعیت از توزیع نرمال ارزیابی می‌شوند که بدین منظور انحراف معیار σ اختلاف‌های به دست آمده را محاسبه و از 3σ به عنوان آستانه برای حذف داده‌های پرت استفاده می‌شود. پس از بررسی، ۴۰۱۳ نمونه مودیس - رادیوسوند مربوط به سال‌های ۲۰۱۹ و ۲۰۲۰ برای ساخت مدل‌های پرسپترون چندلایه و جنگل تصادفی مورد استفاده قرار گرفتند. در شکل ۳ چگونگی حذف این نوع داده‌ها مشاهده می‌شود. خطوط قرمز در هر دو شکل، آستانه تفاوت داده‌ها یعنی $\pm 3\sigma$ و خط سبز در شکل سمت چپ،



شکل ۳: تفاوت بین داده‌های بخار آب قابل بارش مادون قرمز سنجنده مودیس (آکوا) با داده‌های بخار آب رادیوسوند به همراه هیستوگرام
Fig. 3: Difference between MODIS IR PWV (AQUA) data and radiosonde water vapor data, along with its histogram

این منظور داده‌های سال‌های ۲۰۱۹ و ۲۰۲۰ به‌منظور آموزش مدل استفاده شدند. دقت برازش (Fitting) مدل (دقت روی داده‌های آموزشی) و دقت اصلاح‌شده (Modified) مدل (دقت اعتبارسنجی متقابل) به همراه دقت داده‌های اصلی در جدول ۳ نمایش داده شده است.



شکل ۵: دیاگرام پراکنش داده‌های اصلی مودیس آکوا در مقایسه با داده‌های بخار آب مشاهداتی رادیوسوند (۲۰۱۹-۲۰۲۰)

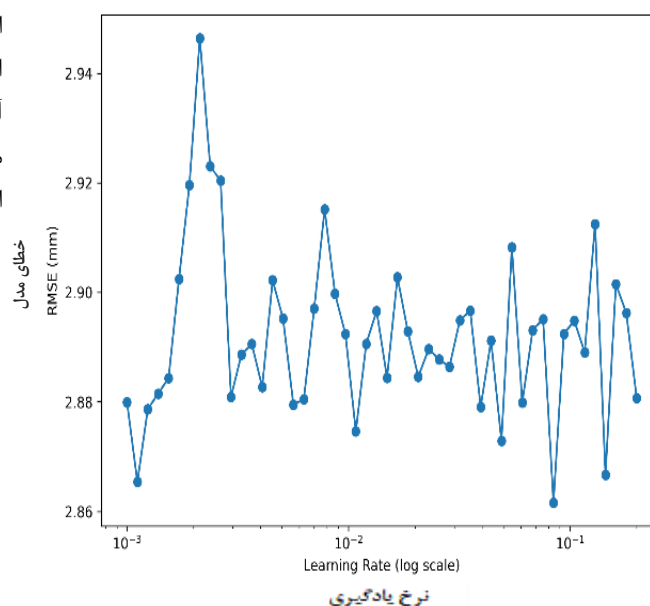
Fig. 5: Comparison of MODIS IR PWV-Aqua Data with Radiosonde-Observed Precipitable Water Vapor (2019-2020)

جدول ۳: نتایج عملکرد الگوریتم شبکه عصبی MLP بر روی داده‌های بخار آب مودیس آکوا و در مقایسه با مقادیر استخراج شده در ۱۰ ایستگاه رادیوسوند (۲۰۱۹-۲۰۲۰)

Table 3: Performance Results of the MLP Neural Network Algorithm on MODIS IR PWV-Aqua Data Compared to Radiosonde Observations

Model		Bias (mm)	RMSE (mm)	STD (mm)	R
Original		-0.37	4.44	4.42	0.78
Multi-Layer Perceptron (MLP)	Fitting	0.00	2.83	2.83	0.88
	Modified	0.01	2.91	2.91	0.87

چنانچه ملاحظه می‌گردد، دقت داده‌های اصلی دقت اولیه داده‌های بخار آب بدون کالیبراسیون یا اصلاح است. ضریب همبستگی (R) برابر با ۰/۷۸ است که نشان می‌دهد بین داده‌های اصلی و مقادیر واقعی همبستگی متوسطی وجود دارد. پس از استفاده از مدل شبکه عصبی MLP برای داده‌های آموزشی، دقت برازش مدل بهبود یافته است. کاهش RMSE به ۲/۸۳ و افزایش ضریب همبستگی به ۰/۸۸ نشان‌دهنده بهبود عملکرد مدل روی داده‌های آموزشی است. مقدار Bias نزدیک به صفر است که نشان‌دهنده عملکرد خوب مدل در یادگیری داده‌های آموزشی است. نتایج مدل اصلاح‌شده نیز نشان‌دهنده دقت مدل روی داده‌های جدید است که از طریق روش اعتبارسنجی متقابل به‌دست‌آمده است. کاهش RMSE نسبت به داده‌های اصلی (به ۲/۹۱) و ضریب همبستگی ۰/۸۷ نشان می‌دهد مدل توانسته است به‌خوبی روی داده‌های جدید عمل کند، هرچند این دقت کمی کمتر از داده‌های آموزشی است. مقدار Bias به



شکل ۴: خطای الگوریتم شبکه عصبی پرسپترون چندلایه (MLP) برای مقادیر مختلف نرخ یادگیری

Fig. 4: The error of Multi-Layer Perceptron (MLP) for different values of learning rate

نتایج و بحث

اعتبارسنجی بخار آب محصول مادون‌قرمز مودیس با استفاده از داده‌های رادیوسوند پیش از وارد شدن به مدل

جدول ۲ دقت کلی داده‌های بخار آب مادون‌قرمز مودیس در مقایسه با اندازه‌گیری‌های رادیوسوند با استفاده از معیارهای آماری را نشان می‌دهد. به‌طور کلی مقدار RMSE برابر ۴/۴۴ میلی‌متر، ضریب همبستگی ۰/۷۸ و مقدار بایاس ۰/۳۷- میلی‌متر به دست آمد. نتایج بدست‌آمده نشان می‌دهد که به‌طور متوسط، مقادیر بخار آب مودیس اندکی کمتر از اندازه‌گیری رادیوسوند برآورد شده‌اند. مقدار انحراف استاندارد تفاضل داده‌ها (STD) و میانگین داده‌های رادیوسوند (Mean) به‌ترتیب ۴/۴۲ و ۱۱/۷۴ میلی‌متر به دست آمد. شکل ۵ دیاگرام پراکنش داده‌های مودیس در برابر داده‌های رادیوسوند پیش از وارد شدن به مدل را نشان می‌دهد.

جدول ۲: خلاصه آمار مقایسه کلی داده‌های بخار آب محصولات مادون‌قرمز مودیس-آکوا و داده‌های بخار آب مشاهداتی از رادیوسوند

Table 2: Comparison of MODIS-Aqua IR Precipitable Water Vapor with Observed Data from 10 Local Radiosonde Stations

Time frame	Bias (mm)	RMSE (mm)	STD (mm)	R	Mean (mm)
2019-2020	-0.37	4.44	4.42	0.78	11.74

عملکرد مدل‌های شبکه عصبی MLP

در ابتدا مدل برآورد بخار آب قابل بارش (MODIS IR-Radiosonde PWV) با استفاده از الگوریتم پرسپترون چندلایه تشکیل گردید. برای

بررسی عملکرد مدل در گذرهای روز و شب ماهواره آکوا باتوجه به اینکه PWV استخراج به دست آمده از الگوریتم IR در زمان روز و شب می تواند دقت متفاوتی داشته باشند، لذا در این بخش به کمک روش شبکه عصبی پرسپترون چندلایه، دو مدل برآورد PWV یکی با استفاده ایستگاههایی که فقط در گذر روز ماهواره آکوا داده برداری می کنند و دیگری با استفاده ایستگاههایی که فقط در گذر شب ماهواره آکوا داده برداری می کنند، تشکیل گردید. از میان ۱۰ ایستگاه مطالعاتی رادیوسوند تعداد ۳ ایستگاه (اهواز-بیرجند-کرمان) فقط در روز، ۶ ایستگاه (اصفهان-شیراز-مشهد-زاهدان-کرمانشاه-تبریز) فقط در شب و یک ایستگاه (تهران) هم روز و هم شب داده برداری می نمایند. داده های ایستگاه تهران هم در ساخت مدل روز و هم مدل شب مورد استفاده قرار گرفتند. جدول ۴ نتایج مدل سازی PWV برای داده های شب و روز ماهواره آکوا با استفاده از شبکه عصبی MLP بر اساس پارامترهای آماری RMSE، bias، STD، R و مقایسه دقت مدل قبل و بعد از اعمال شبکه عصبی را نشان می دهد. شکل ۷ دیاگرام پراکنش داده های بخار آب استخراج شده از مدل شبکه عصبی پرسپترون چندلایه برای محصول مادون قرمز سنجندهی مودیس در مقایسه با داده های بخار آب برآورد شده ایستگاه های محلی رادیوسوند برای داده های روز و شب را نشان می دهد.

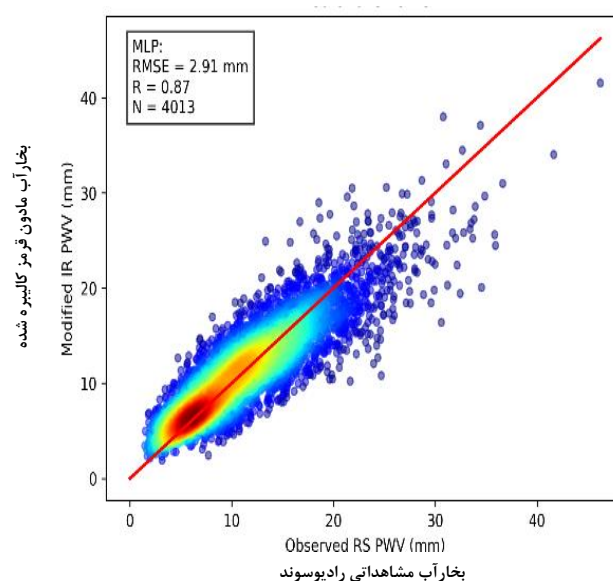
جدول ۴: نتایج به دست آمده از عملکرد مدل های شبکه عصبی MLP تشکیل شده

برای داده های روز و شب

Table 4: Results of MLP Neural Network Models for Daytime and Nighttime Data, including Correlation Coefficient (R), Standard Deviation (STD), RMSE, and Bias

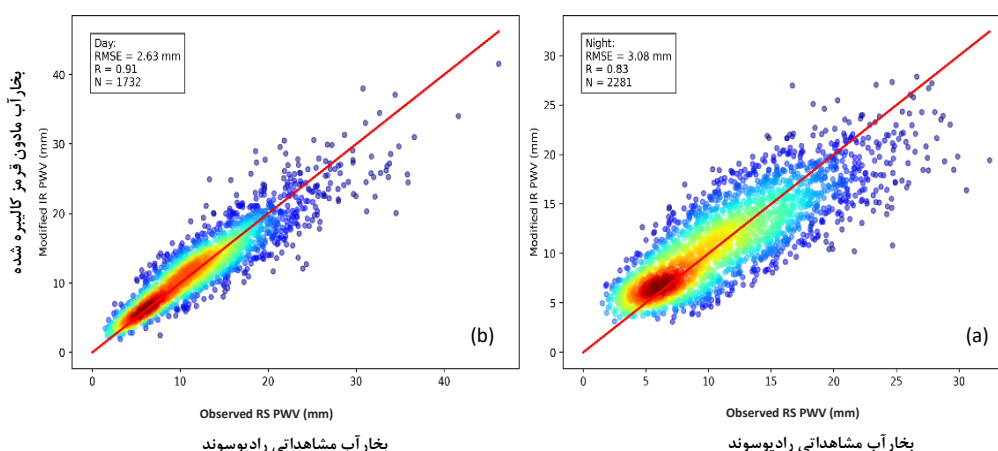
	Bias (mm)	RMSE (mm)	STD (mm)	R
Night				
Original	0.28	4.84	4.83	0.77
MLP	0.01	3.08	3.10	0.83
Day				
Original	-1.22	3.83	3.63	0.83
MLP	-0.01	2.63	2.63	0.91

۰/۰۱ افزایش یافته که نشان می دهد مدل روی داده های جدید عملکردی تقریباً بدون خطای سیستماتیک دارد. به طور کلی بر اساس RMSE، دقت مدل در داده های آموزشی حدود ۳۶/۲۶٪ و در داده های اصلاح شده حدود ۳۴/۴۶٪ افزایش یافته است. بر اساس ضریب همبستگی، مدل در داده های آموزشی حدود ۱۲/۸۲٪ و در داده های اصلاح شده حدود ۱۱/۴۹٪ بهبود یافته است. این مقادیر نشان دهنده بهبود قابل توجه مدل پس از کالیبراسیون با شبکه عصبی MLP است، به ویژه در دقت داده های آموزشی و همچنین تعمیم پذیری آن در داده های اصلاح شده. شکل ۶ دیاگرام پراکنش داده های اصلاح شده بخار آب مودیس با استفاده از الگوریتم شبکه عصبی MLP در برابر داده های رادیوسوند را نشان می دهد.



شکل ۶: دیاگرام پراکنش داده های بخار آب اصلاح شده با استفاده از الگوریتم MLP در مقایسه با داده های بخار آب مشاهداتی رادیوسوند

Fig. 6: Scatter Plot of Calibrated MODIS Water Vapor Data Using MLP Versus Radiosonde Observations



شکل ۷: دیاگرام پراکنش داده های بخار آب استخراج شده از مدل شبکه عصبی MLP برای محصول مادون قرمز سنجندهی مودیس در مقایسه با داده های بخار آب برآورد رادیوسوند در: (الف) شب (ب) روز

Fig. 7: Scatter Plot of MODIS Water Vapor Data Extracted Using the MLP Model Versus Radiosonde Observations, including: (a) Nighttime (b) Daytime

تحلیل تفاوت دقت در نتایج مدل شب و روز

○ بر اساس نتایج ارائه شده، برای داده‌های شب، RMSE مدل پس از کالیبراسیون به ۳/۰۸ رسید و ضریب همبستگی ۰/۸۳ بود، و برای داده‌های روز، RMSE مدل پس از کالیبراسیون به ۲/۶۳ رسید و ضریب همبستگی ۰/۹۱ بود. این مقادیر نشان می‌دهند که مدل شبکه عصبی در پیش‌بینی داده‌های روز عملکرد بهتری دارد. دلایل احتمالی برای این تفاوت می‌تواند شامل موارد زیر باشد:

○ داده‌های روز غنی‌تر هستند و به شبکه عصبی اجازه می‌دهند الگوهای بیشتری را یاد بگیرد، زیرا کانال‌های مختلف در طول روز داده‌های بیشتری را ارائه می‌دهند.

○ پراکندگی کمتر و خطای سیستماتیک در داده‌های روز: به نظر می‌رسد داده‌های مودیس در روز کمتر تحت تأثیر خطاهای سیستماتیک باشند و شبکه عصبی بتواند با داده‌های ورودی دقیق‌تر، مدل بهتری را آموزش دهد.

نتیجه‌گیری

این مطالعه با هدف ارزیابی دقت داده‌های بخار آب قابل بارش (PWV) حاصل از سنجنده مادون قرمز مودیس (MYD05) ماهواره آکوا، با استفاده از داده‌های رادیوسوند در ده ایستگاه محلی ایران طی سال‌های ۲۰۱۹-۲۰۲۰ انجام شد. پس از پیش‌پردازش داده‌ها و حذف مقادیر نامعتبر و پرت، نتایج نشان داد که همبستگی متوسطی ($R=0.78$) بین داده‌های مودیس و رادیوسوند وجود دارد، در حالی که RMSE برابر ۴/۴۴ میلی‌متر و بایاس اندکی منفی (۰/۳۷- میلی‌متر) مشاهده شد. با این حال، به کارگیری مدل شبکه عصبی پرسپترون چندلایه (MLP) باعث بهبود چشمگیر دقت برآورد PWV شد و خطای RMSE را به ۲/۸۳ میلی‌متر در داده‌های آموزشی و ۲/۹۱ میلی‌متر در مرحله اعتبارسنجی کاهش داد. همچنین، ضریب همبستگی به ترتیب به ۰/۸۸ و ۰/۸۷ افزایش یافت. عملکرد مدل در داده‌های روز ($RMSE=2.63\text{ mm}$) بهتر از داده‌های شب ($RMSE=3.08\text{ mm}$) بود که احتمالاً ناشی از اطلاعات غنی‌تر روز و خطاهای کمتر سیستماتیک است. در نهایت، این پژوهش نشان داد که استفاده از مدل MLP می‌تواند دقت داده‌های PWV مودیس را به طور قابل توجهی افزایش داده و بایاس سیستماتیک را کاهش دهد. این امر موجب ارتقای قابلیت اطمینان داده‌های ماهواره‌ای در مطالعات جوی و کاربردهای عملی مرتبط خواهد شد.

مشارکت نویسندگان

اسلام جوادنیا در ایده‌پردازی، طراحی پژوهش، جمع‌آوری و تحلیل داده‌ها و نگارش پیش‌نویس مقاله نقش داشته است. کمال قبادی در جمع‌آوری و تحلیل داده‌ها و اصلاح اساسی دست‌نوشته مشارکت کرده است. هادی جلیلی و آرش زندکریمی در ایده‌پردازی و اصلاح اساسی نسخه نهایی سهمیه بوده‌اند.

نتایج مدل‌سازی برای داده‌های شب به شرح زیر است:

نتایج ارزیابی داده‌های اصلی (قبل از کالیبراسیون) نشان می‌دهد که انحراف معیار، RMSE، بایاس و ضریب همبستگی به ترتیب برابر با ۴/۸۳، ۴/۸۴، ۰/۲۸، میلی‌متر و ۰/۷۷ است. این مقادیر نشان‌دهنده دقت داده‌های اصلی بخار آب در زمان شب بدون استفاده از مدل شبکه عصبی هستند. ضریب همبستگی برابر با ۰/۷۷ نشان می‌دهد که رابطه نسبی خوبی بین داده‌های اصلی و داده‌های واقعی وجود دارد، اما همچنان جا برای بهبود وجود دارد. پس از استفاده از مدل شبکه عصبی MLP برای داده‌های شب، نتایج نشان می‌دهد که انحراف معیار، RMSE، بایاس و ضریب همبستگی (R) به ترتیب به ۳/۰۸، ۳/۰۸، ۰/۰۱، میلی‌متر و ۰/۸۳ بهبود یافته است. این نتایج نشان‌دهنده افزایش دقت مدل پس از کالیبراسیون است. به طور کلی، مقدار RMSE از ۴/۸۴ به ۳/۰۸ کاهش یافته است، که معادل بهبود ۳۶/۴۰ درصدی در دقت پیش‌بینی است. همچنین، مقدار بایاس مدل از ۰/۲۸ به ۰/۰۱ کاهش یافته است که نشان‌دهنده حذف تقریباً کامل خطای سیستماتیک در پیش‌بینی داده‌های شب است. انحراف معیار نیز از ۴/۸۳ به ۳/۰۸ کاهش یافته است، و ضریب همبستگی از ۰/۷۷ به ۰/۸۳ افزایش یافته است. این نتایج به طور کلی نشان می‌دهند که استفاده از مدل شبکه عصبی MLP باعث بهبود قابل توجه دقت پیش‌بینی بخار آب قابل بارش در داده‌های شب شده است.

نتایج مدل‌سازی برای داده‌های روز به شرح زیر است:

نتایج ارزیابی داده‌های اصلی (قبل از کالیبراسیون) نشان می‌دهد که انحراف معیار، RMSE، بایاس و ضریب همبستگی به ترتیب برابر با ۳/۶۳، ۳/۸۳، ۱/۲۲-، میلی‌متر و ۰/۸۳ است. این مقادیر نشان‌دهنده دقت داده‌های اصلی بخار آب در زمان روز بدون استفاده از مدل شبکه عصبی هستند. مقدار بایاس منفی (۱/۲۲-) نشان‌دهنده وجود خطای سیستماتیک در داده‌های اصلی است. پس از استفاده از مدل شبکه عصبی MLP برای داده‌های روز، نتایج نشان می‌دهد که انحراف معیار، RMSE، بایاس و ضریب همبستگی به ترتیب به ۲/۶۳، ۲/۶۳، ۰/۰۱-، میلی‌متر و ۰/۹۱ بهبود یافته است. این نتایج نشان‌دهنده افزایش دقت مدل پس از کالیبراسیون است. به طور کلی، مقدار RMSE از ۳/۸۳ به ۲/۶۳ کاهش یافته است، که معادل بهبود ۳۱/۴۶ درصدی در دقت پیش‌بینی است. همچنین، مقدار بایاس مدل از ۱/۲۲- به ۰/۰۱- کاهش یافته است که نشان‌دهنده حذف تقریباً کامل خطای سیستماتیک در پیش‌بینی داده‌های روز است. انحراف معیار نیز از ۳/۶۳ به ۲/۶۳ کاهش یافته است، و ضریب همبستگی از ۰/۸۳ به ۰/۹۱ افزایش یافته است. این نتایج به طور کلی نشان می‌دهند که استفاده از مدل شبکه عصبی MLP باعث بهبود قابل توجه دقت پیش‌بینی بخار آب قابل بارش در داده‌های روز شده است و خطاهای سیستماتیک موجود در داده‌های اصلی را کاهش داده است.

[11] Norouzi Razieh, J.E., Validation of precipitable water vapor derived from MODIS infrared product using GPS observations, in The Second National Conference on Data Mining in Earth Sciences. 2021: Arak, Iran.

[12] Lindenbergh, R., et al. Validating time series of a combined GPS and MERIS Integrated Water Vapor product. in Proceedings 2nd MERIS/(A) ATSR User Workshop. 2008.

[13] Li, Z. Production of Regional 1 km×1 km Water Vapor Fields through the Integration of GPS and MODIS Data. in Proceedings of the 17th International Technical Meeting of the Satellite Division of The Institute of Navigation (ION GNSS 2004). 2004.

[14] Zhang, B., et al., Precipitable water vapor fusion: an approach based on spherical cap harmonic analysis and Helmert variance component estimation. *Journal of Geodesy*, 2019. 93(12): p. 2605-2620. DOI: 10.1007/s00190-019-01322-0

[15] Zhao, Q., et al., Precipitable water vapor fusion method based on artificial neural network. *Advances in Space Research*, 2022. 70(1): p. 85-95. DOI: 10.1016/j.asr.2022.04.016

[16] Zhang, B. and Y. Yao, Precipitable water vapor fusion based on a generalized regression neural network. *Journal of geodesy*, 2021. 95(3): p. 36. DOI: 10.1007/s00190-021-01482-3

[17] Xu, J. and Z. Liu, Enhanced all-weather precipitable water vapor retrieval from MODIS near-infrared bands using machine learning. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, 2022. 114: p. 103050. DOI: 10.1016/j.jag.2022.103050

[18] Ghaderi, M. and M. Rahimzadegan, Improving precipitable water vapor estimations of the Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer (MODIS) using metaheuristic algorithms. *Advances in Space Research*, 2022. DOI: 10.1016/j.asr.2022.06.046

[19] Xiong, Z., et al., Modify the accuracy of MODIS PWV in China: A performance comparison using random forest, generalized regression neural network and back-propagation neural network. *Remote Sensing*, 2021. 13(11): p. 2215. DOI: 10.3390/rs13112215

[20] Xu, J., et al., A New Machine Learning Based Calibration Scheme for MODIS Thermal Infrared Water Vapor Product Using BPNN, GBDT, GRNN, KNN, MLPNN, RF, and XGBoost. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2024. DOI: 10.1109/TGRS.2024.3350476

[21] Lee, Y., et al., Retrieval of total precipitable water from Himawari-8 AHI data: A comparison of random forest, extreme gradient boosting, and deep neural network. *Remote Sensing*, 2019. 11(15): p. 1741. DOI: 10.3390/rs11151741

[22] Amiri, M.J. and S. Eslamian, Investigation of Climate Change in Iran. *Journal of Environmental Science and Technology*, 2010. 3. <https://doi.org/10.3923/jest.2010.208.216>

تشکر و قدردانی

بدین‌وسیله از کلیه عزیزانی 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] Bevis, M., et al., GPS meteorology: Remote sensing of atmospheric water vapor using the global positioning system. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 1992. 97(D14): p. 15787-15801. DOI: 10.1029/92JD01517

[2] Mockler, S., Water vapor in the climate system, special report, American Geophysical Union (AGU), 2000 Florida Ave., NW, Washington, DC 20009. 1995, December.

[3] Gao, B.-C., et al., Measurements of water vapor and high clouds over the Tibetan Plateau with the Terra MODIS instrument. *IEEE Transactions on geoscience and remote sensing*, 2003. 41(4): p. 895-900. DOI: 10.1109/TGRS.2003.810704

[4] Held, I.M. and B.J. Soden, Water vapor feedback and global warming. *Annual review of energy and the environment*, 2000. 25(1): p. 441-475. DOI: 10.1146/annurev.energy.25.1.441

[5] urre, I., R.S. Vose, and D.B. Wuertz, Overview of the integrated global radiosonde archive. *Journal of Climate*, 2006. 19(1): p. 53-68. DOI: 10.1175/JCLI3594.1

[6] Vaquero-Martínez, J. and M. Antón, Review on the role of GNSS meteorology in monitoring water vapor for atmospheric physics. *Remote Sensing*, 2021. 13(12): p. 2287. DOI: 10.3390/rs13122287

[7] Gao, B.-C. and Y.J. Kaufman, The MODIS near-IR water vapor algorithm. *Algorithm Theoretical Basis Document, ATBD-MOD*, 1998. 5.

[8] Van Malderen, R., et al., A multi-site intercomparison of integrated water vapour observations for climate change analysis. *Atmospheric Measurement Techniques*, 2014. 7(8): p. 2487-2512. DOI: 10.5194/amt-7-2487-2014

[9] Javadnia, E., N. Beygi, and S. Abbasy, Comparison and Evaluation of MODIS and Sun photometer Integrated water vapor using GPS observations at IASBS AERONET site (Zanjan, Iran). *Journal of Geomatics Science and Technology*, 2021. 11(1): p. 117-128. <https://dor.isc.ac/dor/20.1001.1.2322102.1400.11.1.9.7>

[10] Liu, H., et al., Evaluation of MODIS water vapour products over China using radiosonde data. *International Journal of Remote Sensing*, 2015. 36(2): p. 680-690. DOI: 10.1080/01431161.2014.999880

review. International journal of remote sensing, 2018. 39(9): p. 2784-2817. DOI: 10.1080/01431161.2018.1433343

[35] Scornet, E., G. Biau, and J.-P. Vert, Consistency of random forests. 2015. DOI: 10.1214/15-AOS1321

[36] Charu C, A., Neural networks and deep learning: a textbook. 2018: Springer. DOI: 10.1214/15-AOS1321

[37] Nair, V. and G.E. Hinton. Rectified linear units improve restricted boltzmann machines. in Proceedings of the 27th international conference on machine learning (ICML-10). 2010. June 21-24, Haifa, Israel

[38] Weisstein, E.W., Hyperbolic Functions., 2003.

[39] Chauvin, Y. and D.E. Rumelhart, Backpropagation: theory, architectures, and applications. 2013: Psychology press. <https://doi.org/10.4324/9780203763247>

[40] Kingma, D.P., Adam: A method for stochastic optimization. arXiv preprint arXiv:1412.6980, 2014. <https://doi.org/10.48550/arXiv.1412.6980>

[41] Hastie, T., The elements of statistical learning: data mining, inference, and prediction. 2009, Springer. <https://doi.org/10.1007/978-0-387-84858-7>

[23] asakereh, H. and m. dostkamian, Survey of role of spatial factors on distribution- dispersion of maximums perceptible water in atmosphere of Iran. Journal of Applied Research in Geographical Sciences, 2015. 15(36): p. 7-24. <http://dori.net/dor/20.1001.1.22287736.1394.15.36.2.8>

[24] Seemann, S.W., et al., Operational retrieval of atmospheric temperature, moisture, and ozone from MODIS infrared radiances. Journal of applied meteorology, 2003. 42(8): p. 1072-1091. DOI: 10.1175/1520-0450(2003)042<1072:OROATM>2.0.CO;2

[25] Borbas, E. and P. Menzel, MODIS Atmosphere L2 Atmosphere Profile Product, NASA MODIS Adaptive Processing System, Goddard Space Flight Center [data set], USA. 2015, August. http://dx.doi.org/10.5067/MODIS/MOD07_L2.006

[26] Niell, A., et al., Comparison of measurements of atmospheric wet delay by radiosonde, water vapor radiometer, GPS, and VLBI. Journal of Atmospheric and Oceanic Technology, 2001. 18(6): p. 830-850. DOI: 10.1175/1520-0426(2001)018<0830:COMOAW>2.0.CO;2

[27] Bolton, D., The computation of equivalent potential temperature. Monthly weather review, 1980. 108(7): p. 1046-1053. DOI: 10.1175/1520-0493(1980)108<1046:TCOEPT>2.0.CO;2

[28] Wang, J. and L. Zhang, Systematic errors in global radiosonde precipitable water data from comparisons with ground-based GPS measurements. Journal of Climate, 2008. 21(10): p. 2218-2238. DOI: 10.1175/2007JCLI1944.1. DOI: 10.1016/j.atmosres.2017.07.021

[29] Gui, K., et al., Evaluation of radiosonde, MODIS-NIR-Clear, and AERONET precipitable water vapor using IGS ground-based GPS measurements over China. Atmospheric Research, 2017. 197: p. 461-473. DOI: 10.1016/j.atmosres.2017.07.021

[30] Wang, H., et al., Prediction models of soil heavy metal (loid) s concentration for agricultural land in Dongli: A comparison of regression and random forest. Ecological Indicators, 2020. 119: p. 106801. DOI: 10.1016/j.ecolind.2020.106801

[31] Vapnik, V. and A. Vashist, A new learning paradigm: Learning using privileged information. Neural networks, 2009. 22(5-6): p. 544-557. DOI: 10.1016/j.neunet.2009.06.042

[32] Larya, D.J., et al., Machine learning in geosciences and remote sensing. Geoscience Frontiers, 2015. 30: p. 1e9. DOI: 10.1016/j.gsf.2015.07.003

[33] Li, J. and A.D. Heap, A review of comparative studies of spatial interpolation methods in environmental sciences: Performance and impact factors. Ecological Informatics, 2011. 6(3-4): p. 228-241. DOI: 10.1016/j.ecoinf.2010.12.003

[34] Maxwell, A.E., T.A. Warner, and F. Fang, Implementation of machine-learning classification in remote sensing: An applied

معرفی نویسندگان

AUTHOR(S) BIOSKETCHES



کمال قبادی دارای تحصیلات کارشناسی در رشته مهندسی عمران - نقشه‌برداری و کارشناسی ارشد ژئودزی از دانشگاه زنجان است. وی از سال ۱۴۰۲ تاکنون به‌عنوان دانشجوی دکتری ژئودزی در دانشگاه تهران مشغول به تحصیل و در زمینه ی یادگیری ماشین و هوش مصنوعی در این حوزه مشغول به کار است.

Ghobadi, K. Department of Geomatics Engineering, Faculty of Engineering, University of Zanjan, Zanjan, Iran

✉ Kghobadi741@gmail.com



اسلام جوادینا استادیار گروه مهندسی نقشه‌برداری در دانشکده مهندسی دانشگاه زنجان است. ایشان مدرک کارشناسی ارشد و دکتری خود را در رشته مهندسی نقشه‌برداری - سنجش از دور به‌ترتیب در سال‌های ۱۳۸۶ و ۱۳۹۶ از دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی دریافت کرده‌اند.

فعالیت‌های پژوهشی اخیر ایشان در زمینه کاربرد یادگیری ماشین در برآورد پارامترهای جوی و همچنین به‌کارگیری سنجش از دور در پایش تغییرات اقلیمی، کشاورزی، مدیریت جنگل‌ها، مدیریت کاربری و پوشش اراضی و مدل‌سازی محیطی با استفاده از داده‌های سنجش از

Jalili, H. Assistant Professor, Iranian Space Research Center, Tehran, Iran

✉ h.jalili@isrc.ac.ir



آرش زندکریمی مدرک کارشناسی ارشد خود را در رشته GIS و سنجش از دور از دانشگاه تبریز در سال ۱۳۹۴ دریافت کرده و در حال حاضر دانشجوی دکتری سنجش از دور در دانشگاه تربیت مدرس و پژوهشگر پژوهشگاه فضایی ایران است. فعالیت‌های پژوهشی وی بر

پایش ماهواره‌ای زمین در حوزه‌های مختلفی از جمله کاربری اراضی، نقشه‌برداری محصولات کشاورزی (Crop Mapping)، پایش گردوغبار، پتانسیل‌یابی و سایر کاربردهای مرتبط متمرکز است. زمینه‌های تخصصی او شامل پردازش تصاویر ماهواره‌ای، یادگیری ماشین، توسعه کاربردهای سنجش از دور و هوش مصنوعی در مدیریت زمین می‌باشد.

Zandkarimi, A. Ph.D. Candidate in Remote Sensing, Researcher at the Iranian Space Research Center, Iran

✉ Zandkarimi.arash@gmail.com

دور متمرکز است. زمینه‌های تخصصی وی عبارت‌اند از پردازش تصاویر اپتیکی 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



هادی جلیلی استادیار پژوهشگاه فضایی ایران

است. وی مدرک کارشناسی ارشد و دکتری خود را در رشته مهندسی مکانیک از دانشگاه صنعتی شریف دریافت کرده است. فعالیت‌های پژوهشی وی در حوزه‌های مختلف از جمله پایش ماهواره‌ای زمین، کالیبراسیون تصاویر ماهواره‌ای،

مدل‌سازی، تحلیل ربات‌های میکرونی ارتعاشی و طراحی و کنترل سازه‌های انعطاف‌پذیر در سامانه‌های فضایی متمرکز است. زمینه‌های تخصصی او شامل کنترل ارتعاشات، پردازش تصاویر ماهواره‌ای، هوش مصنوعی، مدل‌سازی، شبیه‌سازی سازه‌های پیزوالکتریک و طراحی ربات‌های میکرونی با عملگرهای پیزوالکتریک می‌باشد.

Citation (Vancouver): Ghobadi K, Javadnia E, Jalili H, Zandkarimi A. [Calibration of MODIS Water vapor data using multi-Layer perceptron neural network and radiosonde observations]. *J. RS. GEOINF. RES.* 2025; 3(1): 1-14

doi <https://doi.org/10.22061/jrsgr.2025.11605.1090>



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

Object detection and classification with Sentinel-2 imagery using ResNet

P. Heidari, A. Milan*, A. Gharagozlou

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

ABSTRACT

Received: 05 December 2024
Reviewed: 30 March 2025
Revised: 16 May 2025
Accepted: 26 May 2025

KEYWORDS:

Classification
Land Cover and Land Use
Remote Sensing
Deep Learning
Convolutional Neural Network

* Corresponding author

✉ a_milan@sbu.ac.ir

☎ (+9821) 73932456

Background and Objectives: Nowadays, getting land cover and land use information is crucial due to the growing number of uses for this data. The primary method for obtaining this information is considered to be through the utilization of remote sensing images. Image classification techniques should be employed so as to extract land cover and use from these images. Deep learning techniques can be utilized effectively to the classification of land cover and land use simply because of their great potential in image classification. But there are also challenges when applying these techniques as well. Model overfitting is one of the most common issues when utilizing deep learning algorithms. Another major issue with these methods is that they demand a significant amount of data during the training stage. Additionally, gradient exploding/vanishing and determining the suitable architecture are further challenges associated with these methods for extracting land cover and use from remote sensing imagery.

Methods: The main objective of this research is to employ different techniques to overcome the challenges to achieve high classification accuracy. To solve the problem of model overfitting, dropout and early stopping approaches were utilized to ensure that the accuracy of the training and test data were close. The data augmentation strategy can prevent model overfitting in addition to addressing the lack of training data. As a result, this method was employed to augment training data and also avoiding model overfitting. The gradient clipping strategy was additionally used in this study to mitigate gradient exploding and vanishing in deep learning models. This study used the ResNet18 model to classify the EuroSat dataset, enabling us to obtain highly effective classification accuracy.

Findings: Initially, this architecture was used with with the early stopping strategy, and the model had an overall accuracy of 91.19 percent and a kappa coefficient of 0.9018. The data augmentation technique was then applied to the same model, and the model achieved an overall accuracy of 91.78 percent with a kappa coefficient of 0.9085, surpassing the previous stage. In the last stage, a dropout method with a rate of 0.5 and a gradient clipping with a threshold of 0.1 were added to the previous model, and the model achieved an overall accuracy of 93.11 percent and a kappa coefficient of 0.9233, which was more accurate than the previous two stages.

Conclusion: These results indicate that the EuroSat's land cover and land use classification accuracy in the final stage was higher than in prior stages.



NUMBER OF REFERENCES

78



NUMBER OF FIGURES

19



NUMBER OF TABLES

4

مقاله پژوهشی

تشخیص و طبقه‌بندی عوارض در تصاویر Sentinel-2 با استفاده شبکه Resnet

پویا حیدری، اصغر میلان^{*}، علیرضا قراگوزلو

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

چکیده

پیشینه و اهداف: امروزه با توجه به استفاده روز افزون از اطلاعات پوشش و کاربری اراضی در کاربردهای مختلف، کسب این اطلاعات امری ضروری می‌باشد. استفاده از تصاویر سنجنش از دوری به عنوان راهکار اصلی کسب این اطلاعات محسوب می‌شود. برای استخراج پوشش و کاربری اراضی از این تصاویر، می‌توان از تکنیک‌های طبقه‌بندی تصاویر بهره برد. با توجه به پتانسیل بالای روش‌های یادگیری عمیق در طبقه‌بندی تصاویر، این روش‌ها می‌توانند به طور موثری در طبقه‌بندی پوشش و کاربری اراضی استفاده شوند. با این حال، استفاده از این روش‌ها همراه با چالش‌هایی نیز می‌باشد. یکی از مشکلات اصلی استفاده از روش‌های یادگیری عمیق، بیش برآزش مدل می‌باشد. از دیگر معضلات اصلی این روش‌ها می‌توان به نیازمند بودن این روش‌ها به تعداد بسیار زیاد داده در مرحله آموزش اشاره نمود. همچنین ناپدید شدن و انفجار گرادیان و انتخاب معماری مناسب از دیگر مشکلات و چالش‌های این روش‌ها برای استخراج پوشش و کاربری اراضی از تصاویر سنجنش از دور می‌باشند.

روش‌ها: هدف اصلی این پژوهش استفاده از تکنیک‌های مختلف برای رفع این چالش‌ها و رسیدن به دقت‌های بالا در انجام طبقه‌بندی پوشش و کاربری اراضی می‌باشد. برای مرتفع نمودن چالش بیش برآزش مدل، از تکنیک‌های حذف تصادفی و توقف زودهنگام استفاده شد تا دقت در داده‌های آموزشی و تست نزدیک به یکدیگر باشند. استفاده از روش داده افزایی می‌تواند کمبود داده‌های آموزشی را برطرف نماید و از بیش برآزش مدل نیز جلوگیری کند. به همین علت از این روش برای افزایش داده‌های آموزشی مدل استفاده شد. تکنیک برش گرادیان نیز در این پژوهش استفاده شد تا از انفجار و ناپدید شدن گرادیان در مدل‌های یادگیری عمیق جلوگیری کند. معماری استفاده شده در این پژوهش برای طبقه‌بندی مجموعه داده EuroSat، مدل ResNet18 بوده است.

یافته‌ها: در ابتدا از این معماری به همراه تکنیک توقف زودهنگام برای انجام طبقه‌بندی استفاده شد و مدل به دقت کلی ۹۱/۱۹ درصد و ضریب کاپای ۰/۹۰۱۸ رسید. سپس به همین مدل تکنیک داده افزایی اضافه شد و مدل به دقت کلی ۹۱/۷۸ درصد و ضریب کاپای ۰/۹۰۸۵ دست یافت که نشان می‌دهد نسبت به مرحله قبلی دقت‌های بهتری حاصل شده است. در مرحله آخر تکنیک حذف تصادفی با نرخ ۰/۵، برش گرادیان با حد آستانه ۰/۱ نیز به مدل قبلی اضافه شد و مدل به دقت کلی ۹۳/۱۱ درصد و ضریب کاپای ۰/۹۲۳۳ رسید که نسبت به دو مرحله قبلی به دقت‌های بهتری رسیده است.

نتیجه‌گیری: این نتایج نشان می‌دهد که دقت طبقه‌بندی پوشش و کاربری اراضی مجموعه داده EuroSat در مرحله آخر نسبت به مراحل قبلی به دقت بهتری دست یافته است.

تاریخ دریافت: ۱۵ آذر ۱۴۰۳
تاریخ داوری: ۱۰ فروردین ۱۴۰۴
تاریخ اصلاح: ۲۶ اردیبهشت ۱۴۰۴
تاریخ پذیرش: ۰۴ خرداد ۱۴۰۴

واژگان کلیدی:

طبقه‌بندی
پوشش و کاربری اراضی
سنجنش از دور
یادگیری عمیق
شبکه عصبی پیچشی

* نویسنده مسئول
a_milan@sbu.ac.ir
۰۲۱-۷۳۹۳۲۴۵۶ ①

مقدمه

فتوگرامتری هوایی و استفاده از داده‌های سنجنش از دوری ماهواره‌ای می‌باشند. در روش نقشه‌برداری زمینی این اطلاعات با استفاده از بررسی میدانی و تفسیر سنتی انجام می‌شود که کاری بسیار فشرده، زمانبر و پرهزینه‌ای می‌باشد [۶]. قبل از اینکه تصاویر ماهواره‌ای در دسترس قرار گیرد، معمولاً از تصاویر فتوگرامتری هوایی و تفسیر سنتی برای این منظور استفاده می‌شد. تفسیر سنتی نیاز به یک اپراتور متخصص داشت. همچنین این کار زمانبر و غیر قابل تکرار بوده است [۷]. امروزه با در دسترس بودن تصاویر ماهواره‌ای سنجنش از دوری، می‌توان اطلاعات پوشش و کاربری اراضی را در یک منطقه وسیع بدست آورد [۸]. این تصاویر علاوه بر ارزان‌تر بودن نسبت به روش‌های دیگر، می‌توانند با استفاده از داده‌های چند زمانی خود، اطلاعات پوشش و کاربری اراضی

امروزه یکی از ابزارهای مهم برای نظارت زمین، اطلاعات پوشش و کاربری اراضی می‌باشد [۱]. استفاده از این اطلاعات می‌تواند برای برنامه‌ریزی در جهت توسعه اقتصادی استفاده شود. پوشش و کاربری اراضی یکی از مهم‌ترین اطلاعات برای مدیران در جهت مدیریت صحیح زمین خواهد بود [۲]. این اطلاعات در حفاظت محیط زیست نیز نقش مهمی را ایفا می‌کند [۳]. همچنین در یک شهر، برنامه‌ریزی در راستای پوشش و کاربری اراضی شهری برای برآورده نمودن نیازهای رو به رشد سریع شهروندان و تضمین توسعه پایدار شهری ضروری است [۴]. روش‌های مختلفی برای کسب اطلاعات پوشش و کاربری اراضی وجود دارد [۵]. این روش‌ها شامل نقشه‌برداری زمینی، استفاده از داده‌های

سنجش از دوری و تصاویر معمول در حوزه پردازش تصویر از لحاظ جزئیات و ساختار تفاوت‌های زیادی دارند [۲۷]. با توجه به چالش‌های مطرح شده در حوزه طبقه‌بندی تصاویر سنجش از دوری با استفاده از مدل‌های یادگیری عمیق، این موضوع یکی از تحقیقات اصلی در حوزه پردازش تصاویر سنجش از دوری است و با توجه به کاربردهای این حوزه در بحث نظارت و پایش زمین، ضرورت انجام پژوهش در این موضوع را دوچندان می‌کند. هدف اصلی این پژوهش، رفع این چالش‌ها و رسیدن به دقت‌های بالا در طبقه‌بندی پوشش و کاربری اراضی می‌باشد. در بخش بعدی به برخی از پژوهش‌های انجام شده در این حوزه پرداخته می‌شود. در بخش سوم این پژوهش به مواد و روش‌های این تحقیق اشاره می‌شود و سپس در بخش بعدی به روش پیشنهادی و نتایج بدست آمده پرداخته می‌شود. در انتها، بخش آخر متعلق به نتیجه‌گیری بدست آمده از این پژوهش خواهد بود.

مروری بر تحقیقات پیشین

استفاده از داده‌های سنجش از دوری برای طبقه‌بندی پوشش و کاربری اراضی اولین بار به سال ۱۹۴۰ میلادی برمی‌گردد، زمانی که فرانسیس جی مارشدر شروع به تهیه نقشه از کل ایالات متحده با استفاده از عکس‌برداری هوایی نمود [۲۸]. سال‌ها بعد، پس از پرتاب ماهواره مجیز به اسکنر چندطیفی در جولای ۱۹۷۲ میلادی و شروع برنامه لندست، مطالعات با استفاده از داده‌های تصاویر سنجش از دور برای طبقه‌بندی پوشش و کاربری اراضی به سطح جدیدی گام برداشت. در واقع، با تولد برنامه لندست و انتشار داده‌ها، تلفیق داده‌ها، تشخیص تغییرات زمین به صورت زمانی و کاربردهای اکولوژیکی داده‌های ماهواره‌ای به حوزه پوشش و کاربری اراضی معرفی شد [۲۹]. یکی از رایج‌ترین کاربردهای این تصاویر و داده‌های سنجش از دوری استفاده در تولید اطلاعات پوشش و کاربری اراضی می‌باشد [۳۰].

امروزه نیز برای استخراج پوشش و کاربری اراضی به طور گسترده از تصاویر سنجش از دور و طبقه‌بندی آن‌ها با استفاده از روش‌های یادگیری عمیق استفاده می‌شود [۳۱]. با وجود مزیت‌های روش‌های یادگیری عمیق در انجام این کار نسبت به سایر روش‌ها، همچنان این روش‌ها در طبقه‌بندی پوشش و کاربری اراضی دارای چالش‌ها و ضعف‌هایی هستند و با وجود تحقیقات گسترده درباره این موضوع، اما همچنان این چالش‌ها مانع اصلی رسیدن این مدل‌ها به دقت‌های بالا می‌باشد. در ادامه به برخی از تحقیقات صورت گرفته در این حوزه پرداخته خواهد شد.

لی و همکاران از یادگیری انتقالی برای طبقه‌بندی مجموعه داده UC Merced استفاده نمودند. آن‌ها از ۳ شبکه عصبی پیچشی معروف از پیش آموزش دیده VGG19، ResNet50 و InceptionV3 که از وزن‌های مجموعه داده ImageNet2015 استفاده می‌کردند، بهره بردند. برای ارزیابی عملکرد روش پیشنهادی خود، آن‌ها دقت کلی و ضریب کاپا هر

را به صورت به روز در اختیار کاربران و استفاده‌کنندگان این اطلاعات بگذارند. همچنین تفسیر و تجزیه و تحلیل اطلاعات پوشش و کاربری اراضی با استفاده از تصاویر سنجش از دوری با استفاده از روش‌های اتوماتیک و دقیق پردازش تصاویر رقومی امکان پذیر است [۹]. یکی از روش‌های استخراج اطلاعات پوشش و کاربری اراضی از تصاویر سنجش از دوری، طبقه بندی این تصاویر می‌باشد [۱۰]. الگوریتم‌های یادگیری عمیق در بسیاری از کاربردهای سنجش از دوری استفاده می‌شوند، که یکی از این کاربردها، طبقه‌بندی تصاویر می‌باشد [۱۱، ۱۲]. این روش‌ها به طور موثری طبقه‌بندی پوشش و کاربری اراضی استفاده شده‌اند و پتانسیل بالایی برای انجام این کار دارند [۱۳، ۱۴].

یادگیری عمیق قادر به مدل سازی نمایش سلسله مراتبی ویژگی‌ها است و پوشش و کاربری اراضی را می‌توان با چنین ویژگی‌هایی توصیف کرد، بنابراین مدل یادگیری عمیق یک راه بسیار موثر برای طبقه بندی پوشش و کاربری اراضی می‌باشد [۱۵]. در استخراج ویژگی‌های مکانی چندسطحی استخراج‌شده از تصاویر سنجش از دور، یادگیری عمیق از روش‌های سنتی بهتر عمل کرده و به آنها اجازه می‌دهد تا عملکرد بالایی در طبقه‌بندی تصویر ارائه دهند [۱۶].

یکی از مزیت‌های قابل توجه رویکردهای یادگیری عمیق این است که آنها می‌توانند به طور تطبیقی ویژگی‌های متمایز را از تصاویر بیاموزند [۱۷، ۱۸، ۱۹]. این الگوریتم‌ها بازدهی و انعطاف پذیری بالایی دارند، سازماندهی سطوح مختلفی از اطلاعات برای بیان روابط پیچیده بین داده‌ها را به راحتی انجام می‌دهند و می‌توانند ویژگی‌های معنایی سطح بالا را بیاموزد [۲۰، ۲۱، ۲۲]. با توجه به مزیت‌های بیان شده روش‌های یادگیری عمیق در طبقه‌بندی پوشش و کاربری اراضی، می‌توان از این روش برای این منظور استفاده نمود و به دقت‌های خوبی برای این کار رسید. با این حال مدل‌های یادگیری عمیق برای رسیدن به دقت‌های بالا با چالش‌هایی نیز مواجه هستند. برخی از این چالش‌ها عبارتند از: - از چالش‌های اصلی در استفاده از یادگیری عمیق می‌توان به مشکل بیش‌برازش مدل اشاره نمود [۲۳]. در این حالت مدل‌های یادگیری عمیق در مواجه با داده‌های تست، عملکرد ضعیف‌تری نسبت به داده‌های آموزش خواهد داشت [۲۴].

- یکی از چالش‌های مهم در مدل‌های یادگیری عمیق مسئله ناپدید شدن و انفجار گرادیان است. این مسئله باعث اختلال در پارامترها در طول فرایند آموزش مدل یادگیری عمیق می‌شود که منجر به آموزش ناپایدار مدل می‌گردد [۲۵].

- بهترین راه برای بهبود یک مدل یادگیری عمیق، آموزش آن بر روی داده‌های بسیار زیاد است [۲۶]. چالش دیگر در استفاده از مدل‌های یادگیری عمیق زمانی اتفاق می‌افتد که داده‌های بیشتری برای آموزش مدل یادگیری عمیق وجود نداشته باشد.

- انتخاب یک مدل و معماری مناسب برای انجام طبقه بندی تصاویر سنجش از دوری از چالش‌های اساسی در این حوزه است زیرا، تصاویر

استیواکتاکس و همکاران یک شبکه پیچشی که شامل ۳ لایه پیچشی بود، برای طبقه‌بندی مجموعه داده UC Merced پیشنهاد نمودند. آن‌ها در این تحقیق از تکنیک داده‌افزایی برای افزایش دقت و حل مشکل کمبود داده استفاده نمودند. معیار امتیاز F-1 در روش پیشنهادی آن‌ها ۸۹/۵۳ درصد بوده است [۳۸].

ناوشاد و همکاران از ResNet50 و VGG16 از پیش آموزش داده شده برای طبقه‌بندی تصاویر EuroSat استفاده نمودند. آن‌ها از تکنیک‌های داده‌افزایی، برش‌گردان، حذف تصادفی و توقف زودهنگام برای رسیدن به نتایج بهتر استفاده نمودند. تکنیک برش‌گردان از ناپدید شدن و انفجار گرادیان جلوگیری می‌کند تا مرحله آموزش پایدار بماند. همچنین مقدار برش‌گردان استفاده شده در این پژوهش برابر ۰/۱ بوده است [۳۹].

رنگل و همکاران از مدل‌های AlexNet، ResNet، DenseNet و برای طبقه‌بندی تصاویر سنجنش از دوری EuroSat استفاده نمودند. آن‌ها از تکنیک داده‌افزایی در تمامی مدل‌ها استفاده نمودند. دقت این مدل‌ها به ترتیب برابر ۸۳/۷، ۸۳/۵ و ۹۲/۵ بوده است [۴۰].

ژانگ و همکاران از یک مدل به نام CNN-CapsNet برای طبقه‌بندی پوشش و کاربری اراضی تصاویر استفاده نمودند. شبکه عصبی پیچشی برای استخراج نقشه‌های ویژگی و شبکه کپسولی برای طبقه‌بندی کردن تصاویر استفاده شد. برای جلوگیری از بیش‌برازش این مدل از حذف تصادفی استفاده شد. این شبکه برای طبقه‌بندی دو مجموعه داده AID و NWPU-RESISC45 به دقت کلی ۹۶/۳۲ و ۹۲/۶ درصد رسید [۴۱].

فیاض و همکاران برای انجام طبقه‌بندی مجموعه داده UC Merced از یادگیری انتقالی استفاده نمودند. مدل‌های مورد استفاده آن‌ها برای انجام این کار دو شبکه Inception-v3 و DenseNet121 بوده است. در مدل‌های استفاده شده برای انجام این کار از تکنیک داده‌افزایی استفاده شد. همچنین در میان لایه‌های کاملاً متصل استفاده شده برای انجام طبقه‌بندی از ۲ لایه حذف تصادفی استفاده نمودند. امتیاز F-1 برای این دو شبکه در این طبقه‌بندی به ترتیب برابر ۹۲ و ۹۱ درصد بوده است [۴۲].

آلبارکاتی و همکاران از یک مدل که از ترکیب دو شبکه عصبی پیچشی پیشنهادی به نام‌های IBNR-65 (شامل ۶۵ لایه پنهان) و Densenet-64 (شامل ۶۴ لایه پنهان) بود را برای طبقه‌بندی پوشش و کاربری اراضی استفاده نمودند. آن‌ها همچنین از داده‌افزایی نیز در مدل خود استفاده کردند. دقت طبقه‌بندی این شبکه برای دو مجموعه داده EuroSat و NWPU-RESISC45 به ترتیب برابر ۸۹/۵ و ۹۱/۷ بوده است [۴۳].

دستور و حسن در یک پژوهش جامع ۳۹ شبکه عصبی پیچشی که از یادگیری انتقالی برای طبقه‌بندی پوشش و کاربری اراضی استفاده می‌نمودند را بررسی کردند. آن‌ها مجموعه داده EuroSat را به ۳ بخش تقسیم نمودند. داده‌های آموزش، اعتبار سنجی و تست که به ترتیب ۸۰، ۱۰ و ۱۰ درصد این مجموعه را تشکیل می‌دادند. آن‌ها از داده‌افزایی، توقف زود هنگام نرخ یادگیری انطباقی برای افزایش دقت شبکه‌های

دو معماری بدون یادگیری انتقالی و مبتنی بر یادگیری انتقالی را محاسبه کردند. دقت کلی معماری‌های مبتنی بر یادگیری انتقالی برای معماری‌های VGG19 و ResNet50 به ترتیب ۵۳/۱، ۱۷/۹ و ۵/۴ درصد نسبت به معماری‌های اصلی که دقت آن‌ها ۳۵/۹، ۷۷/۸ و ۸۷٪ بودند افزایش یافت. به طور مشابه، ضریب کاپا معماری‌های مبتنی بر یادگیری انتقال به ترتیب برابر ۰/۹۵۶، ۰/۹۶۸ و ۰/۹۹۳ بودند که ۰/۵۹۱، ۰/۱۱۹ و ۰/۰۶ افزایش را نشان می‌دهد [۳۲].

یو و همکاران از روش داده‌افزایی برای افزایش داده‌ها و رفع مشکل کمبود داده آموزشی استفاده کردند. آن‌ها از یک شبکه عصبی پیچشی که شامل ۴ لایه پیچشی و ۲ لایه ادغام و یک لایه کاملاً متصل بود برای طبقه‌بندی مجموعه داده‌های SAT-4، SAT-6، RSSCN7 و UC Merced استفاده نمودند. در این پژوهش شبکه عصبی پیچشی که از روش داده‌افزایی استفاده می‌کرد نسبت به همان شبکه عصبی پیچشی که از روش داده‌افزایی استفاده نمی‌کرد، عملکرد بهتری داشته است [۳۳].

شاوکی و همکاران از یک مدل CNN-MLP که مزایای شبکه‌های عصبی پیچشی و پرسپترون چند لایه به صورت همزمان را دارد معرفی کردند. در این روش ویژگی‌ها با استفاده از شبکه‌های عصبی پیچشی از قبل آموزش دیده بدون لایه‌های کاملاً متصل ایجاد می‌شوند. سپس پرسپترون چند لایه برای طبقه‌بندی کلاس‌ها استفاده می‌شود. این مدل برای طبقه‌بندی مجموعه داده سنجنش از دوری UC-Merced، AID و NWPU-RESISC45 استفاده شد. همچنین برای افزایش داده برای این مجموعه داده‌ها از تکنیک داده‌افزایی استفاده شد. تکنیک داده‌افزایی دقت طبقه‌بندی این مجموعه داده‌ها را به ترتیب ۲/۶۶، ۴/۱۰ و ۳/۷۰ درصد افزایش داد. دقت نهایی این مدل با استفاده از داده‌افزایی به ترتیب برابر ۹۹/۸۶، ۹۸/۱۰ و ۹۷/۴۰ درصد بوده است [۳۴].

ژانگ و همکاران از یک روش مدل ترکیبی برای طبقه‌بندی تصاویر مجموعه داده EuroSat استفاده نمودند که در ساختار این مدل ترکیبی از شبکه ResNet برای استخراج ویژگی‌ها استفاده شد. دقت شبکه پیشنهادی آن‌ها برای طبقه‌بندی این مجموعه داده ۹۶/۶۲ درصد بوده است [۳۵].

آلم و کومار از مدل‌های از پیش آموزش دیده InceptionV3، ResNetV2 و VGG19 برای طبقه‌بندی مجموعه داده UC Merced استفاده نمودند. آن‌ها از تکنیک حذف تصادفی با مقدار ۰/۵ که یکی از روش‌های نظم دهی است برای جلوگیری از بیش‌برازش استفاده نمودند. آن‌ها از تکنیک توقف زودهنگام در همه مدل‌های خود استفاده نمودند. دقت این مدل‌ها به ترتیب برابر ۹۲/۴۶ و ۹۴/۳۸ و ۹۹/۶۴ بودند [۳۶].

خان و بسلامه یک شبکه ترکیبی که از دو شبکه یادگیری عمیق تشکیل شده بود (شامل شبکه‌های متراکم متصل و شبکه کاملاً پیچشی) را پیشنهاد نمودند. شبکه اول آن‌ها DenseNet و شبکه دوم آن‌ها VGG16 بوده است. دقت کلی طبقه‌بندی روش پیشنهادی آن‌ها برای طبقه‌بندی مجموعه داده‌های UC Merced و EuroSAT برابر با ۹۶ و ۹۱/۶۸ درصد بوده است [۳۷].

شدند. این داده‌ها در آموزش مدل شرکت ندارند و هدف استفاده از آن‌ها ارزیابی مدل در حین فرآیند آموزش با استفاده از مقدار تابع ضرر و دقت داده‌های اعتبار سنجی خواهد بود. داده‌های تست نیز که ۱۰ درصد داده‌ها را شامل می‌شوند برای ارزیابی دقت مدل و پیش‌بینی این داده‌ها با استفاده از مدل آموزش دیده استفاده خواهند شد. این داده‌ها نیز در فرآیند آموزش شبکه استفاده نخواهند شد. همچنین تکنیک توقف زود هنگام در تمامی مراحل اجرایی این تحقیق استفاده شد. در این تکنیک، اگر مقدار ضرر داده اعتبار سنجی در ۱۰ اپک آموزشی بهتر نشد فرآیند آموزش متوقف خواهد شد.

در مرحله اول این پژوهش هیچکدام از تکنیک‌های حذف تصادفی، داده‌افزایی و برش‌گردان استفاده نشد و از نرخ یادگیری ۰/۰۰۱ که مقدار پیش‌فرض بهینه سازتخمین گشتاور تطبیقی می‌باشد استفاده شد. تنها تکنیک استفاده شده در این مرحله، توقف زود هنگام بوده است. فرآیند انجام این مرحله در شکل (۱) نشان داده شده است.

در مرحله دوم، تنها از تکنیک‌های داده‌افزایی و توقف زود هنگام برای آموزش شبکه ResNet18 با استفاده از مجموعه داده EuroSat استفاده شد و مقدار نرخ یادگیری نیز همان ۰/۰۰۱ بوده است. در شکل (۲) فرآیند انجام این مرحله نشان داده شده است.

در مرحله سوم، از روش‌های داده‌افزایی، حذف تصادفی، برش‌گردان و توقف زود هنگام برای بهبود عملکرد مدل ResNet18 در طبقه‌بندی پوشش و کاربری اراضی مجموعه داده EuroSat استفاده شد. مقدار نرخ یادگیری در این مرحله نیز ۰/۰۰۱ بوده و همچنین مقدار حد آستانه برش‌گردان و نرخ حذف تصادفی در این مرحله ۰/۱ و ۰/۵ بوده‌اند. در شکل (۳) مراحل انجام این فرآیند مشخص شده است.

در ادامه به مدل استفاده شده و روش‌هایی که منجر به بهبود مدل منجر شده‌اند توضیح داده می‌شود. در انتهای این بخش به روش‌های ارزیابی دقت طبقه‌بندی نیز اشاره خواهد شد.

مدل و معماری ResNet

همانطور که گفته شد، تصاویر مورد استفاده در سنجش از دور، تفاوت‌های اساسی با تصاویر معمول مورد استفاده در بینایی کامپیوتر دارند و به همین دلیل انتخاب یک مدل مناسب برای طبقه‌بندی پوشش و کاربری اراضی می‌تواند روی دقت نهایی طبقه‌بندی تأثیر زیادی داشته باشد. معماری ResNet یکی از مدل‌های شبکه عصبی پیچشی است که در طبقه‌بندی تصاویر سنجش از دور، دقت‌های بالایی را ارائه کرده است [۴۹]. به دلیل دقت‌های بالای این معماری در کاربردهای سنجش از دور و به خصوص در حوزه طبقه‌بندی تصاویر سنجش از دور، از مدل ResNet18 در این پژوهش استفاده شد.

خود استفاده نمودند. نتایج این تحقیق نشان می‌دهد که سه شبکه عصبی پیچشی ResNet50، EfficientNetV2B0 و ResNet152 بهترین نتایج را در طبقه‌بندی مجموعه داده EuroSat حاصل می‌کند. دقت کلی و ضریب کاپای داده‌های تست برای شبکه ResNet50 برابر ۹۶/۷۸ درصد و ۰/۹۶۴۱ و برای شبکه EfficientNetV2B0 برابر ۹۶/۴۱ درصد و ۰/۹۶ بوده است. این معیارها برای شبکه ResNet152 به ترتیب برابر ۹۶/۰۴ و ۰/۹۵۵۹ می‌باشد [۴۴].

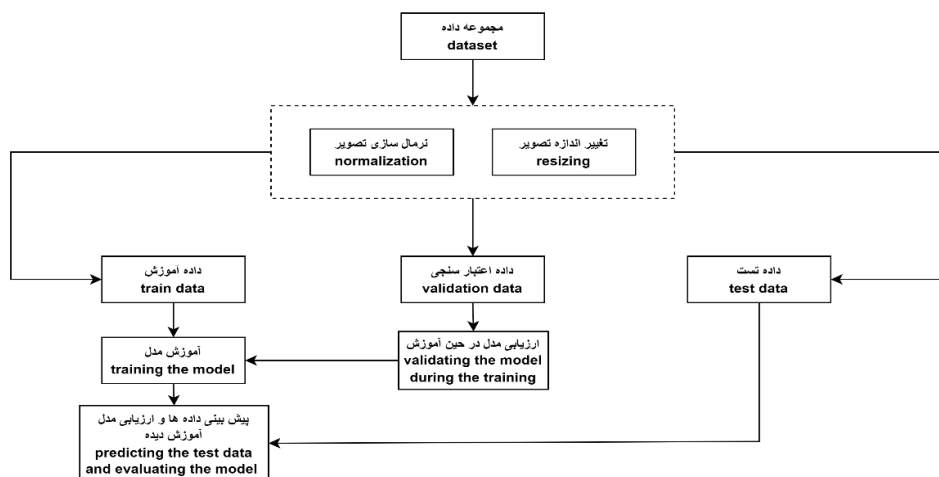
پدربیس و همکاران از معماری U-Net برای طبقه‌بندی مجموعه داده UOPNOA استفاده نمودند. این مجموعه داده، از پایگاه داده تصاویر هوایی کشور اسپانیا تولید شده است که به صورت عمومی در دسترس است. آن‌ها برای جلوگیری از ناپدید شدن و انفجار گرادیان از برش‌گردان با حد آستانه ۱ استفاده نمودند [۴۵].

در تحقیقات صورت گرفته تاکنون، محققین برای حل چالش‌های موجود از راهکارهای مختلفی استفاده نمودند. در اکثر آن‌ها برای انجام طبقه‌بندی از مدل‌های شبکه عصبی پیچشی استفاده شده است. این معماری‌ها برای انجام طبقه‌بندی تصاویر سنجش از دور، با توجه به مزیت‌های آن‌ها در انجام این کار به طور گسترده استفاده شده‌اند. در این پژوهش‌ها، برای حل مشکل بیش‌برازش این مدل‌ها از تکنیک‌های توقف زود هنگام و روش حذف تصادفی که یکی از روش‌های نظم‌دهی معروف در روش‌های یادگیری عمیق است استفاده شده است. برای حل کمبود داده و بیش‌برازش در این مدل‌ها از داده‌افزایی استفاده گردیده است که علاوه بر حل این چالش‌ها، به بهبود دقت طبقه‌بندی نیز منجر شده‌اند. همچنین از تکنیک برش‌گردان برای جلوگیری از ناپدید شدن و انفجار گرادیان استفاده شده است. با توجه به مزیت‌های این روش‌ها در حل چالش‌های ذکر شده در پژوهش حاضر برای بهبود دقت طبقه‌بندی پوشش و کاربری اراضی، استفاده از ترکیب روش‌های داده‌افزایی، حذف تصادفی، توقف زود هنگام و برش‌گردان مورد بررسی قرار گرفته است.

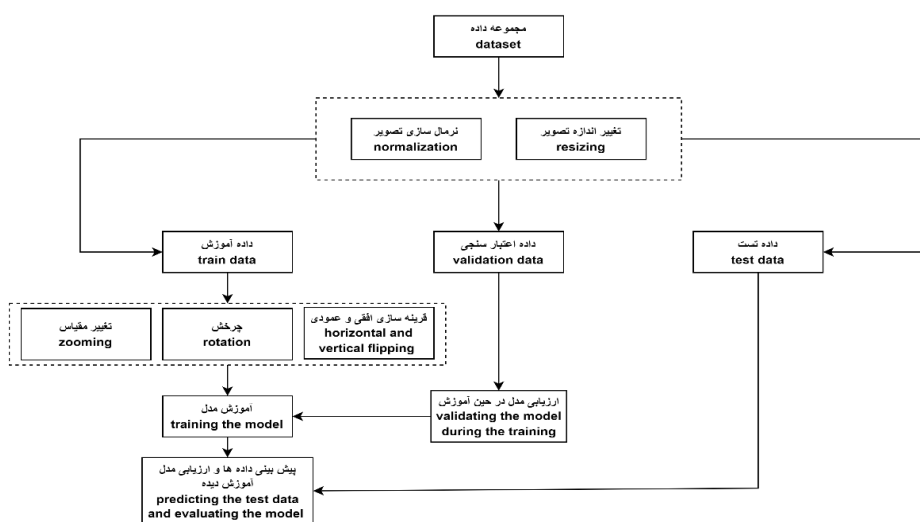
روش تحقیق

مراحل انجام شده در این پژوهش

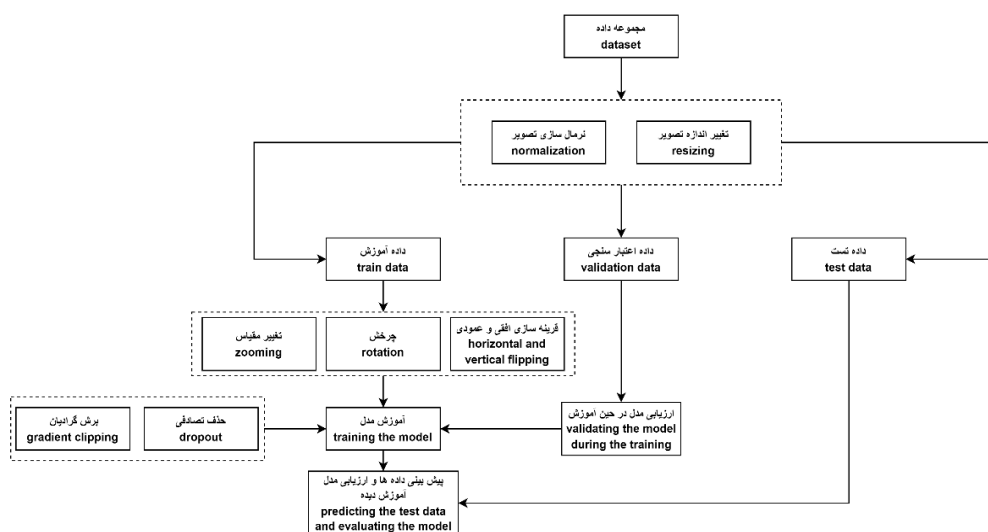
این پژوهش در ۳ مرحله انجام شد و در هر مرحله نسبت به مرحله قبل به صورت افزایشی، تکنیک‌های توقف زود هنگام، داده‌افزایی، حذف تصادفی و برش‌گردان اعمال شد. مجموعه داده در همه مراحل به سه قسمت داده‌های آموزش، اعتبارسنجی و تست تقسیم شدند. داده‌های آموزش که ۷۰ درصد داده‌های این مجموعه داده را شامل می‌شدند، برای آموزش شبکه ResNet18 استفاده شد. داده‌های اعتبار سنجی که ۲۰ درصد کل داده‌ها بودند برای ارزیابی مدل در حین آموزش استفاده



شکل ۱: فرآیند انجام طبقه‌بندی در مرحله اول
Fig. 1: The process of performing classification in the first stage



شکل ۲: مراحل انجام شده در مرحله دوم
Fig. 2: Steps taken in the second stage



شکل ۳: فرآیند انجام شده در مرحله سوم
Fig. 3: The process carried out in the third stage

است. در این بلوک، مولفه اول شامل یک لایه پیچشی دو بعدی با اندازه فیلتر (3×3) و گام ۱ به همراه یک لایه نرمال‌سازی دسته‌ای و یک تابع فعال‌ساز واحد یکسو شده خطی می‌باشد. مولفه دوم این بلوک شامل یک لایه پیچشی دو بعدی با اندازه دو بعدی با اندازه فیلتر (3×3) و گام ۱ به همراه یک لایه نرمال‌سازی دسته‌ای می‌باشد. در نهایت، اتصال میانبر و ورودی قبل از اعمال تابع فعال‌ساز واحد یکسو شده خطی با هم ترکیب می‌شوند. در لایه نرمال‌سازی دسته‌ای تکنیکی برای نرمال‌سازی داده‌ها در زمانی که از لایه پیچشی عبور می‌کند می‌باشد که با این کار داده بعد از اعمال لایه پیچشی، دارای میانگین یک و انحراف معیار واحد خواهد شد. با این کار دقت و سرعت آموزش بهبود داده خواهد شد.

بلوک Convolutional

در بلوک Convolutional ابعاد ورودی و خروجی مطابقت ندارند. اتصال میانبر با استفاده از W_s یک نگاشت خطی را برای تطابق اندازه ابعاد بین x و F با استفاده از رابطه (۲) انجام می‌دهند.

$$y = F(x, \{w_i\}) + w_s x \quad (2)$$

در رابطه (۲)، x و y به ترتیب بردارهای ورودی و خروجی لایه Convolutional هستند و تابع F نشان دهنده لایه ادغام شده است. ساختار بلوک Convolutional همانند بلوک Identity می‌باشد، با این تفاوت‌ها که در اتصال میانبر شامل یک لایه پیچشی دو بعدی با اندازه دو بعدی با اندازه فیلتر (1×1) و گام ۲ به همراه یک لایه نرمال‌سازی دسته‌ای است و اندازه گام اولین لایه پیچشی این بلوک ۲ می‌باشد. شکل کلی ساختار بلوک Convolutional در شکل (۶) نشان داده شده است.

معماری ResNet18

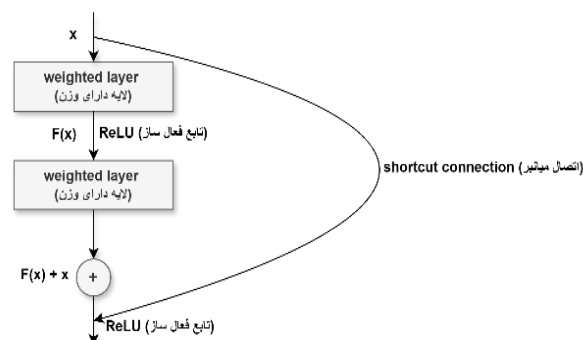
ساختار معماری ResNet18 استفاده شده در این پژوهش در شکل (۷) مشخص شده است.

مطابق شکل (۷)، در ابتدا یک لایه‌گذاری صفر به ابعاد (3×3) بر روی تصویر با ابعاد 224×224 اعمال می‌شود. در مرحله اول، تصویر از یک لایه پیچشی با ابعاد فیلتر (7×7) ، گام ۲ عبور می‌کند که تعداد ۶۴ نقشه ویژگی را تولید خواهد نمود. سپس از یک لایه نرمال‌سازی دسته‌ای با تابع فعال‌ساز واحد یکسو شده خطی عبور می‌کند و در آخر برای کاهش ابعاد تصویر از لایه تجمیع بیشینه با ابعاد (3×3) و گام ۲ استفاده می‌شود.

در مرحله دوم تصویر از یک بلوک Convolutional عبور می‌کند که در آن، لایه پیچشی اول و دوم هر کدام ۶۴ نقشه ویژگی از تصویر را تولید می‌کند. در این مرحله، استثنا از یک بلوک Convolutional که اندازه گام دو لایه پیچشی آن ۱ است، استفاده می‌شود. سپس تصویر از یک بلوک Identity که هر کدام از لایه‌های پیچشی آن ۶۴ نقشه ویژگی را ایجاد می‌کند، عبور خواهد نمود.

مدل ResNet از اصل یادگیری باقی مانده برای سهولت آموزش شبکه‌های بسیار عمیق پیروی می‌کنند [۵۰]. مدل‌های ResNet دارای چندین نسخه است که رایج‌ترین آن‌ها ۵ نسخه‌ای هستند که به صورت جداگانه دارای ۱۸، ۳۴، ۵۰، ۱۰۱ و ۱۵۲ لایه پیچشی می‌باشند. معماری ResNet از چندین لایه پیچشی با یک اتصال باقیمانده تشکیل شده است. در ResNet، یک اتصال میانبر برای رد شدن از برخی از لایه‌های پیچشی اضافه می‌شود. این اتصال میانبر اجازه می‌دهد تا خروجی یک لایه قبلی مستقیماً به خروجی لایه بعدی اضافه شود و یک بلوک باقیمانده ایجاد کند. بلوک باقیمانده از دو یا سه لایه پیچشی با یک اتصال میانبر تشکیل شده است. ساختار ResNet نشان داده است که در وظایف مختلف بینایی کامپیوتری از جمله طبقه‌بندی تصویر روشی موثر است. در سال ۲۰۱۵، مدل اصلی ResNet152 برنده چالش تشخیص تصویری در مقیاس بزرگ ImageNet (ILSVRC) شد که یکی از معتبرترین رقابت‌ها در حوزه بینایی کامپیوتر است [۵۱].

به طور کلی ResNet از اتصالات باقیمانده برای بهبود عملکرد مدل استفاده می‌کند. این مدل برای کاهش مشکل بهینه‌سازی استفاده می‌شود و امکان آموزش شبکه‌های بسیار عمیق‌تر را دارد [۵۲]. همچنین از مدل‌های ResNet می‌توان برای طبقه‌بندی پوشش و کاربری اراضی استفاده نمود [۵۳]. شکل ساختار کلی این شبکه در شکل (۴) نشان داده شده است.



شکل ۴: ساختار کلی شبکه ResNet

Fig 4: General structure of ResNet

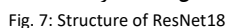
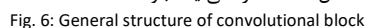
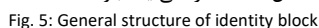
شبکه ResNet دارای ۲ بلوک اصلی Identity و Convolutional می‌باشد [۵۴]. این دو بلوک در ادامه توضیح داده خواهند شد. در آخر نیز ساختار ResNet18 توضیح داده خواهد شد.

بلوک Identity

بلوک Identity مورد استفاده در شبکه ResNet به صورت رابطه (۱) تعریف می‌شود:

$$y = F(x, \{w_i\}) + x \quad (1)$$

در رابطه (۱)، x و y به ترتیب بردارهای ورودی و خروجی لایه‌های می‌باشند و تابع $F(x, \{w_i\})$ نشان دهنده نگاشت یادگیری باقیمانده است. در شکل (۵) ساختار کلی یک بلوک Identity مشخص شده



مرحله سوم، چهارم و پنجم مشابه مرحله دوم است، اما در این مراحل بلوک‌های Convolutional و Identity هر مرحله به ترتیب شامل ۱۲۸، ۲۵۶ و ۵۱۲ نقشه ویژگی برای هر کدام از لایه‌های پیچشی داخل بلوک‌های Convolutional و Identity در هر مرحله خواهد بود.

در مرحله آخر یک لایه ادغام میانگین سراسری بر روی تصویر اعمال می‌شود که تصویر را به یک نقشه ویژگی یک بعدی تبدیل خواهد کرد. این لایه مشابه لایه کاملاً متصل عمل خواهد کرد که شامل ۵۱۲ نورون خواهد بود. و سپس در لایه آخر یک لایه کاملاً متصل که به تعداد کلاس‌های طبقه‌بندی نورون دارد استفاده می‌شود تا با استفاده از تابع فعال‌ساز بیشینه هموار یک لایه طبقه‌بندی کننده وجود داشته باشد. در جدول (۱) ابعاد تصویر بعد از عبور از هر لایه نشان داده شده است.

ارزیابی دقت طبقه بندی

ارزیابی دقت جزء کلیدی در بررسی عملکرد محصولات طبقه‌بندی شده داده‌های سنجش از دوری است، زیرا از ارزیابی عملکرد طبقه‌بندی‌کننده‌های مختلف و تأثیرات نمونه‌برداری پشتیبانی می‌کند. همچنین اعتبارسنجی و ارزیابی دقت طبقه‌بندی محصولات پوشش و کاربری اراضی برای نشان دادن کیفیت محصولات سنجش از دور برای تصمیم‌گیری ضروری است [۶۱]. با توجه به ضرورت بررسی دقت طبقه‌بندی انجام شده با مجموعه داده مورد نظر، در این بخش به معیارهای ارزیابی دقت پوشش و کاربری اراضی که در این تحقیق استفاده شد پرداخته خواهد شد.

ماتریس ابهام

روش استاندارد توصیف عدم قطعیت موضوعی در داده‌های پوشش و کاربری اراضی با استفاده از ماتریس ابهام است. این ماتریس برای بسیاری از معیارهای مختلف برای بدست آوردن شباهت بین برآوردهای داده‌ها و واقعیت زمینی استفاده شده است. این ماتریس مبنایی را برای توصیف دقت طبقه‌بندی و مشخص کردن خطاها فراهم می‌کند که به اصلاح طبقه‌بندی یا برآوردهای حاصل از آن کمک می‌کند [۶۲، ۶۳]. ارزیابی دقت با استفاده از ماتریس‌های ابهام برای نتایج طبقه‌بندی ضروری است تا اطمینان حاصل شود که تا چه حد طبقه‌بندی دقیق است [۶۴]. در قسمت بعدی به معیارهای بدست آمده با استفاده از ماتریس ابهام اشاره خواهد شد.

معیارهای ضریب کاپا و دقت مجموع

شاخص کاپا متداول ترین تکنیک مورد استفاده برای ارزیابی دقت برای ارائه صحت طبقه‌بندی تصویر است و دقت مجموع برای اعتبارسنجی طبقه‌بندی تصاویر استفاده می‌شود [۶۵]. محدوده دقت مجموع از صفر تا ۱۰۰ است، که در آن صفر نشان دهنده کمترین دقت و ۱۰۰ بالاترین است. همچنین مقدار بازه کاپا از صفر تا ۱ است، که صفر نشان دهنده کمترین دقت و ۱ بالاترین دقت است [۶۶]. رابطه ضریب کاپا به صورت رابطه (۹) تعریف می‌شود:

$$Kappa = \frac{2 \times (TP \times TN - FN \times FP)}{(TP + FP) \times (FP + TN) + (TP + FN) \times (FN + TN)} \quad (9)$$

دقت مجموع تصویر طبقه‌بندی‌شده، نحوه طبقه‌بندی هر یک از کلاس‌ها را با واقعیت زمینی مقایسه می‌کند [۶۷]. رابطه کلی آن به صورت رابطه (۱۰) می‌باشد:

$$Overall Accuracy = \frac{TP + TN}{TP + TN + FP + FN} \quad (10)$$

معیارهای صحت، بازیابی و امتیاز F1

معیار صحت به طبقه‌بندی کلاس‌هایی که در فرآیند طبقه‌بندی به صورت صحیحی پیش‌بینی شده است اشاره دارد و معیار بازیابی به نسبت کلاس‌های طبقه‌بندی‌ای که به صورت صحیح پیش‌بینی شده‌اند و کل پیش‌بینی‌های طبقه‌بندی اشاره می‌کند [۶۸]. رابطه این دو معیار در روابط (۱۱) و (۱۲) نشان داده شده است.

در این مطالعه از معماری ResNet18 برای انجام طبقه‌بندی پوشش و کاربری اراضی استفاده شد. دلیل اصلی استفاده از این معماری این است که این معماری با استفاده از اتصالات میانبر نه تنها می‌تواند بهبود عملکرد کلی شبکه بسیار عمیق را فراهم کند، بلکه این مدل می‌تواند از ناپدید شدن گرادین‌ها تا حدی نیز جلوگیری کند تا دقت شبکه کاهش پیدا نکند [۵۵].

تابع ضرر

تابع ضرر وظیفه محاسبه فاصله بین مقدار پیش‌بینی شده توسط مدل و مقدار واقعی را دارد. برای طبقه‌بندی تصاویر سنجش از دور می‌توان از تابع ضرر sparse categorical cross-entropy استفاده نمود [۵۶]. این تابع ضرر در رابطه (۳) مشخص شده است:

$$Loss = - \sum_{i=1}^M y_i \cdot \log \hat{y}_i \quad (3)$$

در رابطه (۳)، $\hat{y}_i$ مقدار پیش‌بینی شده، y_i مقدار واقعی و M تعداد کلاس‌های طبقه‌بندی می‌باشد [۵۷]. در این پژوهش از این تابع ضرر برای محاسبه فاصله مقدار پیش‌بینی شده مدل با مقدار واقعی استفاده شد.

تابع بهینه ساز

تابع بهینه ساز وظیفه به حداقل رساندن مقدار تابع ضرر را در فرآیند آموزش برعهده دارد. این کار با به روز رسانی وزن‌ها در مدل یادگیری عمیق انجام می‌شود. تخمین گشتاور تطبیقی یکی از بهینه‌سازهای پرکاربرد در حوزه یادگیری عمیق است که به طور موثری در آموزش این مدل‌ها استفاده می‌شود [۵۸]. این الگوریتم بهینه‌سازی به همگرایی سریع‌تر مدل کمک می‌کند، از نوسانات در طول فرآیند آموزش جلوگیری می‌کند و در برابر گرادین‌های دارای نویز انعطاف پذیر است [۵۹]. این تابع بهینه‌ساز در روابط (۴) تا (۸) آمده است:

$$m_t = \beta_1 m_{t-1} + (1 - \beta_1) g_t \quad (4)$$

$$v_t = \beta_2 v_{t-1} + (1 - \beta_2) g_t^2 \quad (5)$$

$$m_t = \left(\frac{m_t}{1 - \beta_1^t} \right) \quad (6)$$

$$v_t = \left(\frac{v_t}{1 - \beta_2^t} \right) \quad (7)$$

$$\theta_{t+1} = \theta_t - \frac{\eta}{\sqrt{v_t + \epsilon}} m_t \quad (8)$$

در روابط بالا m_t بیانگر گشتاور اول، v_t بیانگر گشتاور دوم و g_t مشتق تابع ضرر نسبت به وزن می‌باشند. m_t و v_t میزان تصحیحات گشتاور اول و دوم می‌باشند. β_1 و β_2 نرخ‌های کاهشی هستند که به ترتیب برابر ۰/۹۹۹ و ۰/۹ می‌باشند. θ_t وزن‌های مدل، η نرخ یادگیری و ϵ پارامتری ثابت برابر 10^{-8} است که برای صفر نشدن مخرج کسر استفاده می‌شود [۶۰]. در این مطالعه از تابع بهینه ساز تخمین گشتاور تطبیقی برای بهینه‌سازی مدل و به روز رسانی وزن‌ها استفاده شد.

روش داده‌افزایی روش اصلی حل چالش کمبود داده در مدل‌های یادگیری عمیق است که در مرحله آموزش شبکه به داده‌های آموزشی اعمال می‌شود. با استفاده از این روش می‌توان تنوع و اندازه داده‌های آموزشی را افزایش داد که نتیجه این عمل افزایش داده‌های آموزشی و جلوگیری از مشکل بیش‌برازش مدل خواهد بود. روش‌های مختلفی برای انجام تکنیک داده‌افزایی بر روی داده‌های آموزش وجود دارد که می‌توان به تغییر مقیاس، چرخش، برش، جلیبه‌جایی، قرینه‌سازی و افزودن نویز وجود اشاره نمود. استفاده از این روش‌ها بر اساس ماهیت مجموعه داده مورد استفاده برای آموزش شبکه می‌باشد [۷۴].

با توجه به ماهیت مجموعه داده مورد استفاده در این پژوهش، روش‌های قرینه‌سازی افقی و عمودی، چرخش و تغییر مقیاس از روش‌های داده‌افزایی استفاده شد.

روش‌های داده‌افزایی قرینه‌سازی افقی و عمودی، چرخش و تغییر مقیاس ماهیت داده‌های مجموعه داده مورد استفاده در این تحقیق را عوض نمی‌کنند و به همین علت از این روش‌های داده‌افزایی برای افزایش داده‌های آموزشی و جلوگیری از بیش‌برازش مدل استفاده شد.

برش‌گردایان

همانطور که در قسمت قبل توضیح داده شد، انفجار و ناپدید شدن گرادیان یکی از مشکلاتی است که می‌تواند باعث اختلال در روند آموزشی مدل گردد. یکی از روش‌های موثر برای جلوگیری از انفجار و ناپدید شدن گرادیان استفاده از تکنیک برش گرادیان می‌باشد. در این روش مقادیر گرادیان با استفاده از یک مقدار حد آستانه کنترل می‌شوند و این تکنیک اجازه نمی‌دهد که مقادیر گرادیان از این مقدار حد آستانه بیشتر شوند [۷۵]. در طول روند آموزش شبکه، زمانی که یک مقدار گرادیان بسیار زیاد می‌شود و از حد آستانه تعریف شده فراتر می‌رود، آن مقدار برش می‌خورد. بنابراین، حداکثر مقدار ممکن برای مقدار یک گرادیان، به اندازه مقدار حد آستانه است و هر مقدار بالاتر از آن حد آستانه برش می‌خورد [۷۶]. رابطه برش گرادیان در رابطه (۱۴) مشخص شده است [۷۷]:

$$G = \begin{cases} \lambda \frac{G}{\|G\|} & \text{if } \|G\| > \lambda \\ G & \text{Otherwise} \end{cases} \quad (14)$$

در رابطه (۱۴) G بیانگر گرادیان به صورت $G = \frac{\partial L}{\partial \theta}$ می‌باشد. در اینجا L نشان دهنده مقدار ضرر و θ نشان دهنده پارامترهای مدل است. همچنین λ نیز همان مقدار حد آستانه برش گرادیان می‌باشد.

برش گرادیان با حد آستانه 0.1 به مدل اضافه شد تا از انفجار و برش گرادیان جلوگیری شود.

توقف زود هنگام

در آموزش مدل‌های یادگیری عمیق، پیدا کردن اپکی که به بیشترین تعمیم پذیری مدل رسیده است یکی از موثرترین تکنیک‌هایی است که به تعمیم پذیری مدل کمک زیادی می‌کند. توقف زود هنگام روشی است که وقتی مدل در فرآیند آموزش به بیشترین تعمیم پذیری

$$Precision = \frac{TP}{TP+FP} \quad (1)$$

$$Recall = \frac{TP}{TP+FN} \quad (12)$$

امتیاز F1 از ترکیب صحت و بازیابی است و نشان دهنده تعادل در بین دو معیار قبلی می‌باشد [۶۹]. امتیاز F1 به صورت رابطه (۱۳) تعریف می‌شود:

$$F1\ Score = 2 \times \frac{Precision \times Recall}{Precision + Recall} \quad (13)$$

در این پژوهش برای ارزیابی دقت طبقه بندی از ماتریس ابهام، ضریب کاپا، دقت کلی، صحت، بازیابی و امتیاز F1 استفاده شده است.

روش‌های حل چالش‌های موجود

همانطور که بیان شد، چالش‌هایی در طبقه‌بندی پوشش و کاربری اراضی سنجش از دور با استفاده از مدل‌های یادگیری عمیق وجود دارد که باید برای رسیدن به دقت‌های قابل قبول، روش‌هایی برای رفع این چالش‌ها استفاده نمود. در این قسمت به تکنیک‌هایی که می‌توانند در حل این چالش‌ها موثر باشند اشاره خواهد شد.

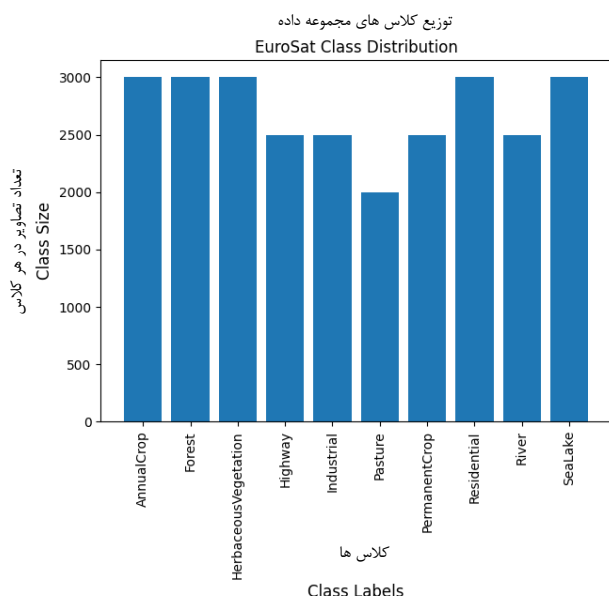
روش نظم‌دهی حذف تصادفی

یکی از فرآیندهای موثر در جلوگیری از بیش‌برازش در مدل‌های یادگیری عمیق، روش‌های نظم‌دهی می‌باشند. این روش‌ها باعث می‌شوند که مدل در طول فرآیند اعتبارسنجی با داده‌هایی که برای این امر استفاده می‌شوند عملکرد بهتری از خود نشان دهد. همچنین روش‌های نظم‌دهی باعث می‌شوند که مدل تعمیم‌پذیری بهتری داشته باشد و در نتیجه در پیش‌بینی داده‌های تست نیز دقت بهتری را ارائه کند [۷۰].

یکی از روش‌های نظم‌دهی معروف، متداول و موثر در مدل‌های یادگیری عمیق، روش حذف تصادفی می‌باشد [۷۱]. در این روش برخی از نوروها به طور تصادفی در طول آموزش شبکه حذف می‌شوند که این امر با صفر شدن این نوروها اتفاق می‌افتد. نرخ حذف تصادفی مقدار درصدی از این نوروها می‌باشند که به طور تصادفی حذف می‌شوند [۷۲]. نرخ حذف تصادفی معمولاً بین 0.2 و 0.5 تنظیم می‌شود. در این پژوهش برای جلوگیری از بیش‌برازش مدل از تکنیک حذف تصادفی با نرخ 0.5 استفاده شد.

داده‌افزایی

روش‌های یادگیری عمیق نیاز به تعداد بسیار زیادی داده آموزشی برای رسیدن به دقت‌های بالا و آموزش موثر این مدل‌ها نیاز می‌باشد. استفاده از داده‌های بیشتر در شبکه‌های یادگیری عمیق نه تنها باعث آموزش بهتر و رسیدن به دقت‌های بالاتر می‌شود، بلکه باعث جلوگیری از بیش‌برازش مدل نیز می‌شود. اما همیشه دسترسی به تعداد داده زیاد امکان پذیر نیست و آموزش شبکه نیز با تعداد داده‌های کم، مدل به دقت بالا و تعمیم پذیری مناسبی نخواهد رسید [۷۳].



شکل ۸: تعداد تصاویر موجود در هر کلاس از مجموعه داده EuroSat
Fig. 8: Number of images in each class from the EuroSat dataset

این پژوهش در ۳ مرحله انجام شد و در هر مرحله نسبت به مرحله قبل به صورت افزایشی تکنیک‌های توقف زودهنگام، داده افزایی، حذف تصادفی و برش گرادین اعمال شد. در ادامه همین قسمت به تمامی مراحل انجام شده اشاره خواهد شد.

مرحله اول

در تمامی مراحل این تحقیق، ابتدا مجموعه داده که ابعادی برابر 64×64 داشتند به تصاویری با ابعاد 224×224 تبدیل شدند. دلیل اصلی این تغییر ابعاد تصاویر این است که بتوان از این تصاویر به طور موثر تر برای آموزش مدل ResNet18 استفاده نمود. همچنین در تمامی مراحل اجرایی این پژوهش، تمامی تصاویر نرمال‌سازی شدند و بازه درجات خاکستری تصاویر که صفر تا ۲۵۵ بودند تبدیل به بازه صفر تا یک شده است تا از حجم محاسبات در فرآیند یادگیری کاسته شود. همچنین اندازه دسته استفاده شده در تمامی مراحل آموزشی برابر 64 بوده است. در شکل (۱۰) نمونه‌ای از تصاویر با اندازه دسته ۳۲ به همراه برچسب‌های آن‌ها نشان داده شده است.



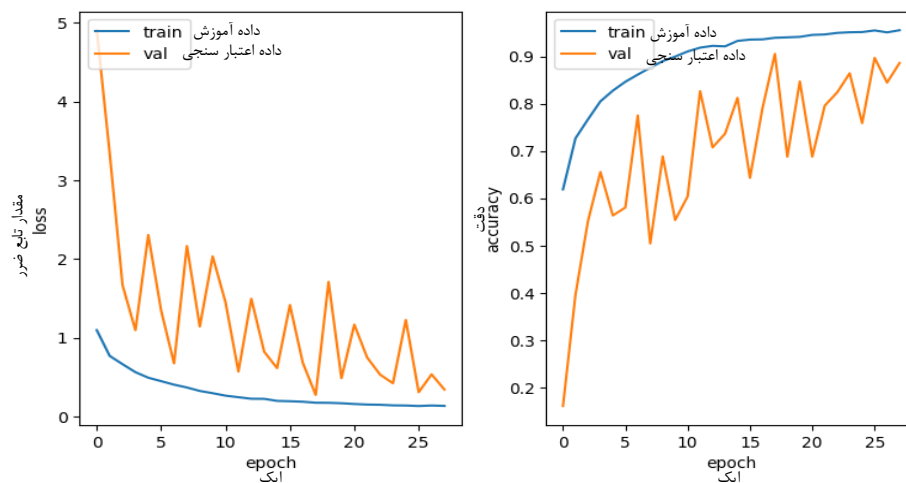
شکل ۹: نمونه ای از تصاویر مجموعه داده EuroSat به همراه برچسب‌های هر کلاس
Fig. 9: Sample of images from the EuroSat dataset with labels for each class

رسید، آموزش را متوقف می‌کند. این روش نه تنها باعث تعمیم پذیری بهتر مدل می‌شود، بلکه یکی از روش‌های غلبه بر مشکل بیش برآزش مدل نیز می‌باشد. توقف زودهنگام با نظارت بر مقدار تابع ضرر داده اعتبار سنجی دادن آموزش مدل را متوقف خواهد نمود. اگر این مقدار ضرر در طول آموزش بعد از چند اپک مشخص (که کاربر آن را تعیین می‌کند) کمتر نشد، آموزش متوقف خواهد شد [۷۸].

پیاده سازی روش تحقیق

منطقه و داده های مورد مطالعه

از آنجایی که روش یادگیری عمیق به یک مجموعه داده مناسب جهت آموزش نیاز دارند، استفاده از یک مجموعه داده مناسب تأثیر زیادی در دقت نهایی خواهد داشت. در نتیجه، برای آموزش مدل‌های کارآمد، یک مجموعه آموزشی گسترده و مقدار زیادی از تصاویر مورد نیاز است [۴۶]. اخیراً چندین مجموعه داده برای طبقه‌بندی پوشش و کاربری اراضی برای استفاده در روش‌های یادگیری عمیق ایجاد شده‌اند [۴۷]. یکی از مجموعه داده‌های مورد استفاده در یادگیری عمیق برای طبقه‌بندی پوشش و کاربری اراضی، مجموعه داده EuroSat می‌باشد. تصاویر این مجموعه داده از تصاویر ماهواره Sentinel-2A بدست آمده‌اند که به صورت رایگان در دسترس هستند. این ماهواره دارای ۱۳ باند می‌باشد که قدرت تفکیک مکانی باندهای قرمز، سبز و آبی آن ۱۰ متر می‌باشد. این مجموعه داده شامل ۲۷۰۰۰ تصویر در ۸ کلاس طبقه‌بندی است و هر کلاس شامل ۲۰۰۰ تا ۳۰۰۰ تصویر می‌باشد. در شکل (۸) توزیع تصاویر مربوط به هر کلاس این مجموعه داده مشخص شده است. کلاس‌های این مجموعه داده شامل کلاس‌های محصولات سالیانه، جنگل، گیاهان علفی، بزرگراه، مناطق صنعتی، مرتع، محصولات دائمی، مناطق مسکونی، رودخانه و دریا و دریاچه می‌باشد. ابعاد هر تصویر 64×64 پیکسل می‌باشد که تصاویر این مجموعه داده، از تصاویر Sentinel-2A که از ۳۴ کشور اروپایی اخذ شده بودند بدست آمده است [۴۸]. یک تصویر نمونه از هر کلاس در این مجموعه داده به همراه برچسب‌های آن کلاس در شکل (۹) نمایش داده شده است. این مجموعه داده، یکی از مجموعه داده‌های سنجش از دوری می‌باشد که از آن برای طبقه‌بندی پوشش و کاربری اراضی با استفاده از روش‌های یادگیری عمیق استفاده می‌شود.



شکل ۱۲: نمودارهای دقت و ضرر بر حسب اپک‌های آموزشی برای دو داده آموزش و اعتبار سنجی

Fig. 12: Accuracy and loss charts for both training and validation data

است. لایه حذف تصادفی در این مرحله بین لایه ادغام میانگین سراسری و لایه کاملاً متصل قرار داشته است. نرخ حذف تصادفی که به صورت پیش فرض مقدار ۰/۵ انتخاب شده است، مقداری معمول در کاربردهای طبقه‌بندی است. مقدار حد آستانه ۰/۱ نیز برای مقدار برش گرادیان نیز یکی از مقادیر معمول در این تکنیک است.

فرآیند آموزش در این مرحله در اپک ۳۷ توقف شده است. در اپک ۲۷ که بهترین مدل ما ذخیره شده است، مقادیر دقت و ضرر داده‌های آموزشی برابر ۹۴/۷۳ درصد و ۰/۱۵۲۶ بوده و برای داده‌های اعتبارسنجی برابر ۹۳/۳۹ و ۰/۱۹۲۰ می‌باشد. برای مقایسه و ارزیابی عملکرد این مرحله نسبت به مراحل قبلی باید مقدار دقت و ضرر را در داده‌های اعتبارسنجی مقایسه نمود. مقادیر دقت در این مرحله نسبت به دو مرحله قبلی بهتر شده و مقدار ضرر آن هم کاهش یافته است. همچنین در پیش‌بینی داده‌های تست نیز مقدار دقت این مرحله نسبت به دو مرحله قبلی بهبود داشته است که در ادامه به آن پرداخته خواهد شد.

نتایج و بحث

بعد از انجام ۳ مرحله در قسمت قبل، برای ارزیابی دقت طبقه‌بندی پوشش و کاربری اراضی از معیارهایی استفاده شده که در ادامه به آن‌ها اشاره می‌شود.

ماتریس ابهام و پیش‌بینی تصاویر تست

در شکل (۱۴) ماتریس‌های ابهام داده‌های تست در مرحله اول مشخص شده است.

از شکل (۱۴) مشخص است که این مدل در تشخیص و پیش‌بینی کلاس‌های دریا و دریاچه، بزرگراه، مناطق صنعتی، جنگل و مناطق مسکونی به خوبی عمل کرده و دقت‌های بالای ۹۶ درصد را ارائه نموده است. این مدل اما در طبقه‌بندی کلاس‌های مرتع و محصولات دائمی، پیش‌بینی‌های درست کمتری را انجام داده و به دقت‌های ۷۵/۳۹ و

فرآیند آموزش این مرحله در اپک آموزشی ۱۲۸م متوقف شده است. مقدار دقت و ضرر داده‌های اعتبار سنجی نوسان‌هایی دیده می‌شود اما دامنه این نوسان‌ها نسبت به مرحله اول کمتر است و آموزشی پایدار تر از مرحله قبلی داشته است.

علت اصلی این پایداری، استفاده از داده‌افزایی بر روی داده‌های آموزشی می‌باشد. این تکنیک با اعمال تغییرات قرینه سازی افقی و عمودی، چرخش و تغییر مقیاس بر روی داده‌های آموزشی، نه تنها باعث افزایش داده‌ها در حین آموزش داده‌ها شده است، بلکه آموزش مدل نیز با پایداری بهتری همراه بوده است. این روش دقت طبقه‌بندی را در داده‌های تست نیز بهبود داده است که در قسمت بعدی به آن اشاره خواهد شد.

در اپک ۱۸ که بهترین مدل در این مرحله بوده است، مقدار دقت و مقدار تابع ضرر در داده‌های آموزشی برابر ۹۳/۸۳ درصد و ۰/۱۷۵۷ بوده و مقدار دقت و ضرر در داده‌های اعتبار سنجی برابر ۹۰/۵۴ درصد و ۰/۲۷۴۶ بوده است.

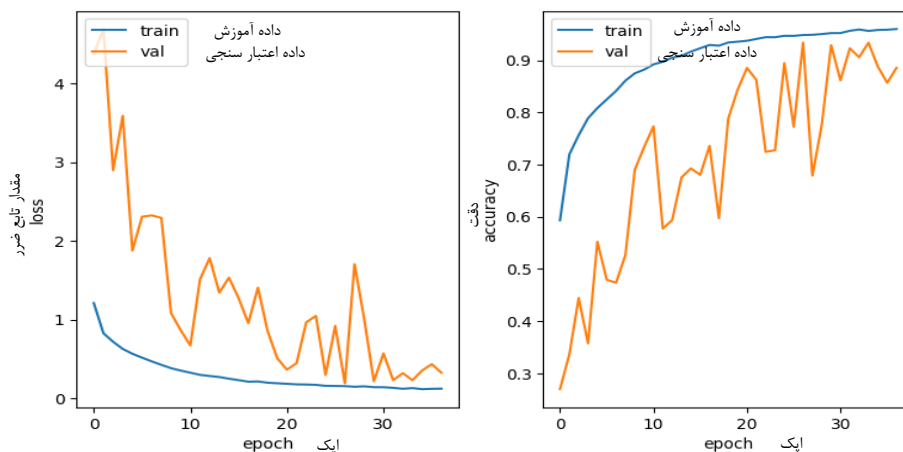
مرحله سوم

در این مرحله، از روش‌های داده‌افزایی، حذف تصادفی، برش گرادیان و توقف زودهنگام برای بهبود عملکرد مدل ResNet18 در طبقه‌بندی پوشش و کاربری اراضی مجموعه داده EuroSat استفاده شد. مقدار نرخ یادگیری در این مرحله نیز ۰/۰۰۱ بوده و همچنین مقدار حد آستانه برش گرادیان و نرخ حذف تصادفی در این مرحله ۰/۱ و ۰/۵ بوده‌اند. در شکل (۱۳) نمودار دقت و مقدار ضرر بر حسب اپک‌های آموزشی برای داده‌های آموزش و اعتبار سنجی در مرحله سوم نشان داده شده است.

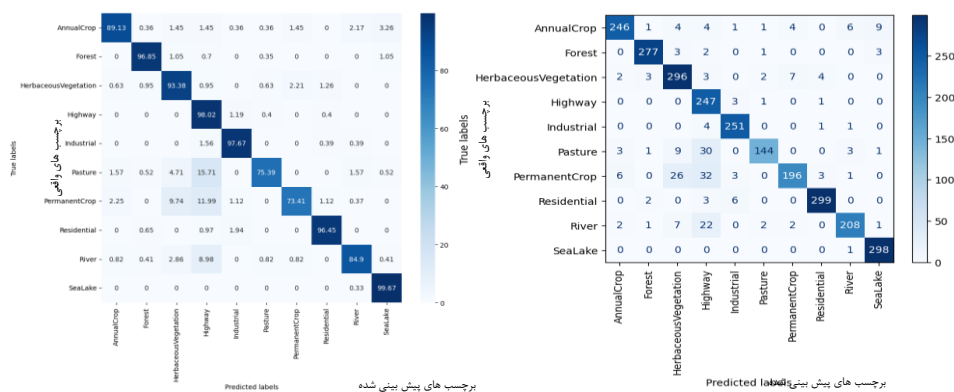
از شکل (۱۳) مشخص است که میزان نوسانات مقادیر دقت و ضرر در داده‌های آموزش و اعتبار سنجی نسبت به مرحله قبل نوسانات نرم‌تری داشته است. دلیل آن هم این است که علاوه بر داده‌افزایی، تکنیک‌های حذف تصادفی و برش گرادیان نیز به فرآیند آموزشی مدل اضافه شده

تصاویر نشان داده شده است. اگر تصاویر درست پیش بینی شده باشند، برچسب آن در بالای همان تصویر با رنگ سبز مشخص شده است و اگر مدل آن تصویر را درست پیش‌بینی نکرده باشد، در بالای آن برچسب واقعی و پیش‌بینی مدل با رنگ قرمز معلوم شده است.

۷۳/۴۱ درصد رسیده است که کمترین دقت در بین کلاس‌های دیگر می‌باشد. در شکل (۱۵) نمونه‌هایی از پیش‌بینی‌های مدل این مرحله در اندازه دسته‌ای ۳۲ داده‌های تست مشخص شده است. این نمونه‌ها به طور تصادفی از داده‌های تست انتخاب شده و برچسب‌های آن‌ها در بالای



شکل ۱۳: نمودارهای دقت و ضرر بر حسب اپک‌های آموزشی برای دو داده آموزش و اعتبار سنجی در مرحله سوم
Fig. 13: Accuracy and loss graphs for two training and validation data in the third stage



شکل ۱۴: ماتریس ابهام (شکل راست) و ماتریس ابهام نقشه حرارتی (شکل چپ) مرحله اول طبقه بندی
Fig. 14: Confusion matrix (right figure) and heat map of confusion matrix (left figure) for the first stage of classification



شکل ۱۵: تعدادی از تصاویر داده‌های تست به همراه برچسب‌هایشان که در مرحله اول پیش‌بینی شده‌اند
Fig. 15: Test data images with their predicted labels in the first stage

و بزرگراه مدل کمترین دقت را داشته است. در شکل (۱۷) پیش‌بینی داده‌های تست با استفاده از این مدل مشخص شده است.

شکل (۱۷) نشان می‌دهد که دو تصویر که متعلق به کلاس‌های مناطق صنعتی و بزرگراه بوده‌اند، مناطق مسکونی و محصولات دائمی پیش‌بینی شده‌اند. در ماتریس ابهام نیز می‌توان مشاهده نمود که مدل تعداد ۱۸ و ۷ تصویر متعلق به مناطق صنعتی و بزرگراه را به اشتباه مناطق مسکونی و محصولات دائمی تشخیص داده است.

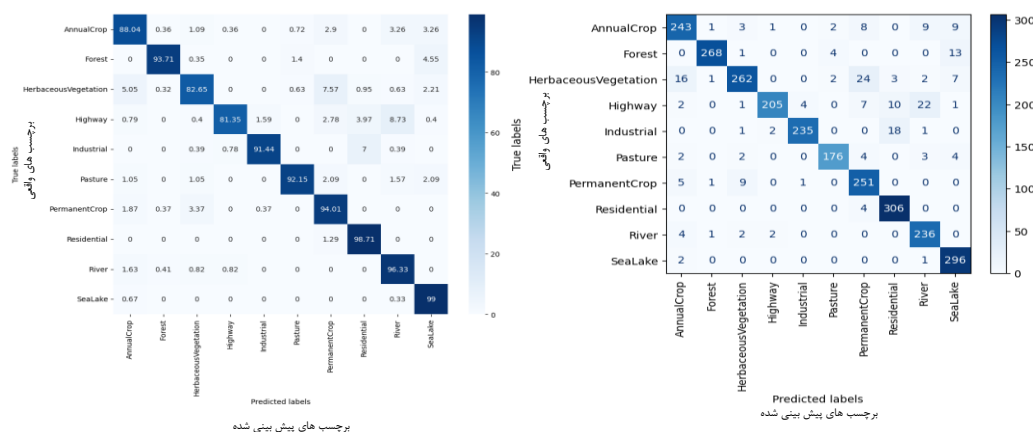
در شکل (۱۸) ماتریس‌های ابهام مرحله سوم طبقه‌بندی به دو صورت معمول و نقشه حرارتی نشان داده شده است.

این مدل در طبقه‌بندی کلاس‌های دریا و دریاچه، جنگل، مناطق مسکونی، محصولات سالیانه، بزرگراه و مناطق صنعتی به دقت‌های بالایی رسیده است اما در کلاس‌های مرتع و گیاهان علفی شکل با دقت‌های ۸۳/۷۷ و ۸۶/۱۲ درصد دقت‌های کمتری را ارائه نموده است. در شکل (۱۹) پیش‌بینی داده‌های تست با استفاده از این مدل مشخص شده است.

در شکل (۱۵) مشخص است که در بیشتر پیش‌بینی‌ها، مدل به خوبی عمل کرده است، اما در بعضی تصاویر این پیش‌بینی‌ها درست نبوده‌اند. برای مثال سه تصویری که متعلق به کلاس‌های مناطق صنعتی، محصولات دائمی و مرتع بوده را بزرگراه پیش‌بینی کرده است. این تشخیص اشتباه در ماتریس ابهام نیز مشهود است. مدل به ترتیب ۴، ۳۲ و ۳۰ تصویر که متعلق به کلاس‌های مناطق صنعتی، محصولات دائمی و مرتع بوده‌اند را بزرگراه پیش‌بینی نموده است در شکل ۱۵ ۳ تصویر از این کلاس‌ها که بزرگراه تشخیص داده شده است نشان داده شده است. همچنین یک تصویر که متعلق به کلاس محصولات دائمی می‌باشد در کلاس رودخانه پیش‌بینی شده است که همین تصویر در شکل (۱۵) مشاهده می‌شود.

در شکل (۱۶) ماتریس‌های ابهام مرحله دوم طبقه‌بندی به دو صورت معمول و نقشه حرارتی نشان داده شده است.

مدل در کلاس‌های دریا و دریاچه، مناطق مسکونی، رودخانه، محصولات دائمی، جنگل، مرتع و مناطق صنعتی به دقت‌های پیش‌بینی بالای ۹۱ درصد رسیده است و در کلاس‌های گیاهان علفی



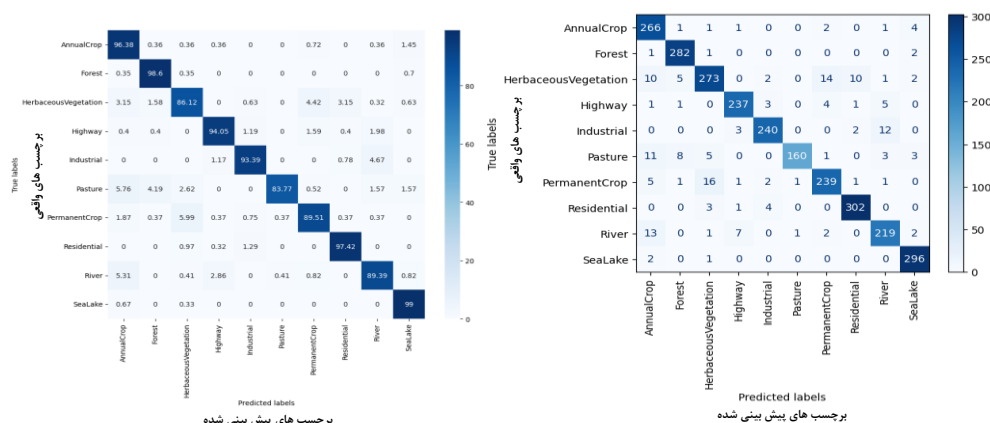
شکل ۱۶: ماتریس ابهام‌های مرحله دوم

Fig. 16: The confusion matrices of the second stage

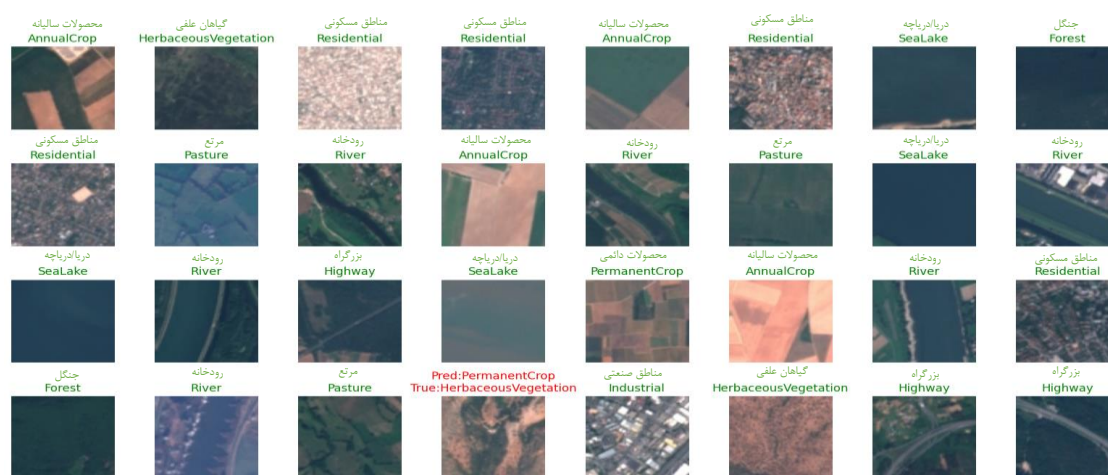


شکل ۱۷: تصاویر داده‌های تست پیش‌بینی شده در مرحله دوم

Fig. 17: Test images and their predicted labels in the second stage



شکل ۱۸: ماتریس ابهام‌های ابهام مرحله سوم
Fig. 18: The confusion matrices of the third stage



شکل ۱۹: تصاویر داده‌های تست پیش‌بینی شده به همراه برچسب‌ها در مرحله سوم
Fig. 19: Test image predictions with their labels in the third stage

همانطور که از جدول بالا مشهود است، مدل در مرحله سوم از همه مدل‌های دیگر بهتر عمل کرده است و دقت مجموع و ضریب کاپای این مرحله ۹۳/۱۱ درصد و ۰/۹۲۳۳ بوده است. این مدل نسبت به مدل‌های مراحل دیگر بهبود دقتی در حد ۱/۳۳ و ۱/۹۲ درصدی رسیده است و ضریب کاپای آن به اندازه ۰/۱۳۸ و ۰/۰۲۱۵ افزایش یافته است.

صحت، بازیابی و امتیاز $F1$

بعد از انجام کلیه مراحل بیان شده در طبقه‌بندی پوشش و کاربری اراضی مجموعه داده EuroSat، این ۳ معیار برای ارزیابی دقت ۳ مرحله طبقه‌بندی انجام شده بر روی داده‌های تست بدست آمد. جدول (۳) این معیارها را برای مدل‌های طبقه‌بندی نشان می‌دهد.

معیار صحت، بازیابی و امتیاز $F1$ در مدل سوم بهتر از تمامی مدل‌های قبلی بوده و این معیارها به ترتیب برابر ۹۳/۳۶، ۹۲/۷۶ و ۹۲/۹۵ درصد بوده است. مدل دوم هم نسبت به مدل اول در این معیارها به ترتیب ۱/۲۵، ۱/۰۲ و درصد نسبت به مدل دوم بهتر عمل کرده و

۱۴ تصویر از داده‌های تست که متعلق به داده‌های گیاهان علفی بوده‌اند، در کلاس محصولات دائمی پیش‌بینی شده‌اند که یکی از این تصاویر که اشتباه پیش‌بینی شده است در شکل (۱۹) نشان داده شده است.

دقت کلی و ضریب کاپا

در جدول (۲) دقت مجموع و ضریب کاپا مدل‌های استفاده شده در این پژوهش نشان داده شده است.

جدول ۲: معیارهای دقت مجموع و ضریب کاپا در مدل‌های اجرایی

Table 2: Overall accuracy and kappa coefficient for the implemented models

مدل (model)	دقت مجموع (overall accuracy)	ضریب کاپا (kappa coefficient)
مرحله ۱ (first stage)	91.19 %	0.9018
مرحله ۲ (second stage)	91.78 %	0.9085
مرحله ۳ (third stage)	93.11 %	0.9233

۹۷/۵۵، ۹۷/۰۲ و ۹۶/۳۵ بیشترین دقت را داشته و در کلاس‌های محصولات دائمی و بزرگراه این معیار با مقدار ۸۲/۳۵ و ۸۲/۴۷ کمترین دقت را در این معیار کسب کرده است.

در مرحله دوم، کلاس‌های جنگل، مناطق صنعتی و بزرگراه که بیشترین صحت را داشتند که مقادیر این کلاس‌ها برای این معیار به ترتیب برابر ۹۸/۵۳، ۹۷/۹۲ و ۹۷/۶۲ درصد بوده است، اما کلاس محصولات دائمی با ۸۴/۲۳ درصد پایین‌ترین صحت را در بین کلاس‌های دیگر داشته است. کلاس‌های دریا و دریاچه و مناطق مسکونی با بازیابی ۹۹ و ۹۸/۷۱ درصد با اختلاف، بیشترین مقادیر را در این معیار داشته‌اند و کلاس بزرگراه نیز با مقدار ۸۱/۳۶، کمترین مقدار صحت را داشته است. همچنین کلاس جنگل با امتیاز F1 برابر ۸۷/۰۶ درصد بیشترین مقدار و کلاس گیاهان علفی با مقدار ۸۷/۶۳ درصد کمترین مقدار امتیاز F1 را در این مرحله داشته‌اند.

در مرحله سوم، بیشترین مقدار صحت برای کلاس مرتع بوده که مقدار آن ۹۸/۷۷ می‌باشد و کمترین مقدار این معیار برابر ۸۶/۰۸ بوده است که متعلق به کلاس محصولات سالیانه بوده است. در کلاس‌های دریا و دریاچه، جنگل، مناطق مسکونی و محصولات سالیانه معیار بازیابی به ترتیب برابر ۹۹، ۹۸/۶، ۹۷/۴۲ و ۹۶/۳۸ بوده است و در کلاس مرتع، این معیار به کمترین مقدار خود که برابر ۸۳/۷۷ درصد رسیده است. همچنین برای معیار امتیاز F1 کلاس‌های دریا و دریاچه و گیاهان علفی با مقدار ۹۷/۳۷ و ۸۸/۳۵ درصد به ترتیب بیشترین و کمترین مقدار این معیار را کسب نموده‌اند.

مقدارهای معیار صحت، بازیابی و امتیاز F1 به ترتیب برابر ۹۲/۲۴، ۹۱/۷۳ و ۹۱/۷۷ درصد بوده است.

جدول ۳: معیارهای صحت، بازیابی و امتیاز F1 بدست آمده برای مدل‌های طبقه‌بندی

مدل (model)	صحت (precision)	بازیابی (recall)	امتیاز F1 (F1 score)
مرحله ۱ (first stage)	92.05 %	90.48 %	90.75 %
مرحله ۲ (second stage)	92.24 %	91.73 %	91.77 %
مرحله ۳ (third stage)	93.36 %	92.76 %	92.95 %

در جدول (۴)، این ۳ معیار ارزیابی دقت برای هر کلاس در این ۳ مدل را مشخص کرده است.

در مرحله اول، طبقه‌بندی پوشش و کاربری اراضی، صحت کلاس‌های جنگل، مناطق مسکونی، دریا و دریاچه، مرتع، مناطق صنعتی، محصولات سالیانه، رودخانه و محصولات دائمی بالای ۹۳ درصد می‌باشد اما در کلاس‌های بزرگراه و گیاهان علفی این معیار نسبت به کلاس‌های دیگر کمتر بوده و برابر ۷۱/۱۸ و ۸۵/۸۰ می‌باشد. معیار بازیابی کلاس‌های دریا و دریاچه، بزرگراه، جنگل و مناطق مسکونی به ترتیب ۹۹/۶۷، ۹۸/۰۲ و ۹۶/۸۵ و ۹۶/۴۵ درصد بوده است اما در کلاس‌های محصولات دائمی و مرتع که این معیار برابر ۷۳/۴۱ و ۷۵/۳۹ درصد بوده است، عملکرد ضعیف‌تری داشته است. در معیار امتیاز F1 کلاس‌های دریا و دریاچه، جنگل و مناطق مسکونی با

جدول ۴: معیارهای صحت، بازیابی و امتیاز F1 برای هر کلاس در طبقه‌بندی در ۳ مدل مورد استفاده

Table 4: Precision, recall and F1 score for each for the classification models

معیارها (metrics)	مدل (model)	کلاس‌ها (classes)									
		محصولات سالیانه (annual crop)	جنگل (forest)	گیاهان علفی (herbaceous vegetation)	بزرگراه (highway)	مناطق صنعتی (industrial)	مرتع (pasture)	محصولات دائمی (permanent crop)	مناطق مسکونی (residential)	رودخانه (river)	دریا و دریاچه (sea/lake)
صحت (درد) (precision)	مرحله ۱ (first stage)	94.98	97.19	85.80	71.78	95.08	95.36	93.78	97.08	94.55	95.51
	مرحله ۲ (second stage)	88.69	98.53	93.24	97.62	97.92	95.65	84.23	90.80	86.13	89.70
	مرحله ۳ (third stage)	86.08	94.63	90.70	94.80	95.62	98.77	91.22	95.57	90.50	95.79
بازیابی (درد) (recall)	مرحله ۱ (first stage)	89.13	96.85	93.38	98.02	97.67	75.39	73.41	96.45	84.90	99.67
	مرحله ۲ (second stage)	88.04	93.71	82.65	81.35	91.44	92.15	94.01	98.71	96.33	99
	مرحله ۳ (third stage)	96.38	98.60	86.12	94.05	93.39	83.77	89.51	97.42	89.39	99
امتیاز F1 (درد) (F1 score)	مرحله ۱ (first stage)	91.96	97.02	89.43	82.47	96.35	84.21	82.35	96.76	89.46	97.55
	مرحله ۲ (second stage)	88.36	96.06	87.63	88.74	94.57	93.87	88.85	94.59	90.94	94.12
	مرحله ۳ (third stage)	90.94	96.58	88.35	94.42	94.49	90.65	90.36	96.49	89.94	97.37

نتیجه‌گیری

امروزه اطلاعات پوشش و کاربری اراضی در کاربردهای مختلف، نقشی ضروری دارد. استفاده از داده‌های سنجش از دوری علاوه بر ارزان‌تر بودن نسبت به روش‌های دیگر، تفسیر و پردازش پوشش و کاربری اراضی با استفاده از روش‌های پردازش رقومی تصاویر را به صورت اتوماتیک امکان‌پذیر می‌کنند. برای استخراج این اطلاعات از تصاویر سنجش از دوری باید از تکنیک‌های طبقه‌بندی تصاویر استفاده نمود. یکی از روش‌های موثر طبقه‌بندی تصاویر، روش‌های یادگیری عمیق می‌باشند که در دهه اخیر مورد توجه جامعه سنجش از دور قرار گرفته است. این روش‌ها پتانسیل بالایی در حوزه طبقه‌بندی تصاویر سنجش از دوری از خود نشان داده و به دقت‌های قابل توجهی نیز در این کار رسیده‌اند. با این حال، استفاده از این روش‌ها در طبقه‌بندی پوشش و کاربری اراضی با چالش‌هایی نیز همراه است. اولین چالش استفاده از این روش‌ها در طبقه‌بندی پوشش و کاربری اراضی، انتخاب یک مدل مناسب برای انجام این کار می‌باشد. دو مشکل اساسی این روش‌ها در انجام این امر، مشکل بیش‌برازش مدل و نیاز به تعداد داده بسیار بالا می‌باشد. یکی دیگر از چالش‌های استفاده از این مدل‌ها، انفجار و ناپدید شدن گرادیان است. انفجار و ناپدید شدن گرادیان باعث اختلال در فرآیند آموزش مدل‌های یادگیری عمیق خواهد شد و به شدت بر دقت و عملکرد این مدل‌ها تاثیر خواهند گذاشت. هدف اصلی این پژوهش رفع این چالش‌ها با استفاده از تکنیک‌های مختلف است. برای حل چالش بیش‌برازش مدل، از روش نظم‌دهی حذف تصادفی و تکنیک توقف زودهنگام می‌توان استفاده نمود. روش داده‌افزایی با اعمال تغییرات بر روی تصویر، یک روش موثر در حل مشکل کمبود داده در روش‌های یادگیری عمیق می‌باشد. همچنین روش برش گرادیان نیز می‌تواند از مشکل انفجار و ناپدید شدن گرادیان در مدل‌های یادگیری عمیق جلوگیری کند. در این پژوهش ابتدا از مدل ResNet18 برای طبقه‌بندی پوشش و کاربری اراضی مجموعه داده EuroSat که در آن تنها از تکنیک توقف زودهنگام بهره می‌برد استفاده شد. در مرحله دوم از همین مدل برای طبقه‌بندی همین مجموعه داده که با تکنیک‌های توقف زودهنگام و داده‌افزایی بهبود داده شده بود استفاده شد. در مرحله سوم تکنیک‌های توقف زودهنگام، داده‌افزایی، حذف تصادفی با نرخ ۰/۵ و برش گرادیان با حد آستانه ۰/۱ استفاده شد. نرخ یادگیری این ۳ مرحله نیز مقدار ۰/۰۰۱ بوده است. در این مراحل، تکنیک‌های استفاده شده به صورت افزایشی به مدل یادگیری عمیق ResNet18 اضافه شد و هر مرحله نسبت به مرحله قبلی دقت‌های بهتری را ارائه میداد. برای ارزیابی دقت مدل‌های پیاده‌سازی شده از معیارهای دقت کلی، ضریب کاپا، صحت، بازیابی و امتیاز F1 استفاده شد. مدل مرحله سوم در تمامی این معیارها نسبت به مدل‌های دیگر دقت بهتری را ارائه داده و مقادیر این معیارها برای این مدل برابر ۹۳/۱۱٪، ۹۲/۳۳٪، ۹۳/۳۶٪، ۹۲/۷۶٪ و ۹۲/۹۵٪ بوده است.

پیشنهادهای تحقیقات آتی

با توجه به نتایج حاصل از این پژوهش، پیشنهاد می‌شود برای رسیدن به دقت‌های بالاتر، مقادیر ابرپارامترهایی مثل نرخ یادگیری، نرخ حذف تصادفی و حد آستانه برش گرادیان با استفاده از روش‌های بهینه‌سازی ابرپارامترها بدست آید. با این کار می‌توان به عملکرد مدل نیز کمک نمود. همچنین از دیگر مجموعه داده‌ها به همراه مدل‌های ResNet34، ResNet50، ResNet101 و ResNet152 نیز می‌توان استفاده کرد تا نتایج این تحقیق به صورت جامع‌تری مورد ارزیابی قرار گیرد. در این پژوهش از مجموعه داده EuroSat که شامل ۳ باند قرمز، سبز و آبی بوده است استفاده شد. پیشنهاد می‌شود برای رسیدن به دقت‌های بالاتر از این مجموعه داده با ۱۳ باند کامل آن استفاده شود. با این کار می‌توان کلاس‌هایی که دارای پوشش گیاهی هستند را به صورت موثرتری در طبقه‌بندی از هم تفکیک نمود. همچنین در این پژوهش، مدل‌ها از ابتدا آموزش داده شدند تا بتوانند داده‌های تست را پیش‌بینی کنند. برای رسیدن به دقت‌های بالاتر می‌توان از تکنیک Transfer Learning استفاده نمود. در این روش از یک مدل از پیش آموزش داده شده استفاده می‌شود. این تکنیک را می‌توان با روش‌های بهینه‌سازی ابرپارامترها ترکیب نمود تا ابرپارامترها نیز برای رسیدن به دقت‌های بالاتر بهینه‌سازی شوند.

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 به عنوان 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 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 مأخذ

[1] Wang, H., Zhao, X., Zhang, X., Wu, D., & Du, X. (2019). Long Time Series Land Cover Classification in China from 1982 to 2015 Based on Bi-LSTM Deep Learning. *Remote Sensing*, 11(14), 1639. <https://doi.org/10.3390/rs11141639>

analysis and review. *ISPRS journal of photogrammetry and remote sensing*, 152, 166-177.

<https://doi.org/10.1016/j.isprsjprs.2019.04.015>

[14] Yuan, Q., Shen, H., Li, T., Li, Z., Li, S., Jiang, Y., Xu, H., Tan, W., Yang, Q., Wang, J., Gao, J., & Zhang, L. (2020). Deep learning in environmental remote sensing: Achievements and challenges. *Remote Sensing of Environment*, 241, 111716.

<https://doi.org/10.1016/j.rse.2020.111716>

[15] Huang, B., Zhao, B., & Song, Y. (2018). Urban land-use mapping using a deep convolutional neural network with high spatial resolution multispectral remote sensing imagery. *Remote Sensing of Environment*, 214, 73-86.

<https://doi.org/10.1016/j.rse.2018.04.050>

[16] Digra, M., Dhir, R., & Sharma, N. (2022). Land use land cover classification of remote sensing images based on the deep learning approaches: a statistical analysis and review. *Arabian Journal of Geosciences*, 15(10).

<https://doi.org/10.1007/s12517-022-10246-8>

[17] Tong, X.-Y., Xia, G.-S., Lu, Q., Shen, H., Li, S., You, S., & Zhang, L. (2020). Land-cover classification with high-resolution remote sensing images using transferable deep models. *Remote Sensing of Environment*, 237, 111322.

<https://doi.org/10.1016/j.rse.2019.111322>

[18] Tong, X. Y., Xia, G. S., Lu, Q., Shen, H., Li, S., You, S., & Zhang, L. (2018). Learning transferable deep models for land-use classification with high-resolution remote sensing images. *arXiv preprint arXiv:1807.05713*. DOI:10.48550/arXiv.1807.05713

[19] Zhang, P., Ke, Y., Zhang, Z., Wang, M., Li, P., & Zhang, S. (2018). Urban Land Use and Land Cover Classification Using Novel Deep Learning Models Based on High Spatial Resolution Satellite Imagery. *Sensors*, 18(11), 3717.

<https://doi.org/10.3390/s18113717>

[20] Zhao, J., Wang, L., Yang, H., Wu, P., Wang, B., Pan, C., & Wu, Y. (2022). A Land Cover Classification Method for High-Resolution Remote Sensing Images Based on NDVI Deep Learning Fusion Network. *Remote Sensing*, 14(21), 5455.

<https://doi.org/10.3390/rs14215455>

[21] Zhang, L., Zhang, L., & Du, B. (2016). Deep Learning for Remote Sensing Data: A Technical Tutorial on the State of the Art. *IEEE Geoscience and Remote Sensing Magazine*, 4(2), 22-40. DOI: 10.1109/MGRS.2016.2540798

[22] Cheng, X., He, X., Qiao, M., Li, P., Hu, S., Chang, P., & Tian, Z. (2022). Enhanced contextual representation with deep neural networks for land cover classification based on remote sensing images. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, 107, 102706-102706.

<https://doi.org/10.1016/j.jag.2022.102706>

[23] Vali, A., Comai, S., & Matteucci, M. (2020). Zhang, P., Ke, Y., Zhang, Z., Wang, M., Li, P., & Zhang, S. (2018). Urban Land Use and Land Cover Classification Using Novel Deep Learning Models Based on High Spatial Resolution Satellite Imagery. *Sensors*, 18(11), 3717. <https://doi.org/10.3390/s18113717>

[24] Carranza-García, M., García-Gutiérrez, J., & Riquelme, J. C. (2019). A framework for evaluating land use and land cover

[2] Zhang, J., & Zhang, Y. (2007). Remote sensing research issues of the National Land Use Change Program of China. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 62(6), 461-472. <https://doi.org/10.1016/j.isprsjprs.2007.07.002>

[3] Cheruto, M.C., Kauti, M.K., Kisangau, P.D. and Kariuki, P. (2016) Assessment of Land Use and Land Cover Change Using GIS and Remote Sensing Techniques: A Case Study of Makueni County, Kenya. *Journal of Remote Sensing and GIS*, 5, 175. DOI: 10.4175/2469-4134.1000175

[4] Mu, L., Wang, L., Wang, Y., Chen, X., & Han, W. (2019). Urban Land Use and Land Cover Change Prediction via Self-Adaptive Cellular Based Deep Learning with Multisource Data. *IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing*, 12(12), 5233-5247.

DOI: 10.1109/JSTARS.2019.2956318

[5] Zhang, X., Han, L., Han, L., & Zhu, L. (2020). How Well Do Deep Learning-Based Methods for Land Cover Classification and Object Detection Perform on High Resolution Remote Sensing Imagery? *Remote Sensing*, 12(3), 417.

<https://doi.org/10.3390/rs12030417>

[6] Zhang, C., Harrison, P. A., Pan, X., Li, H., Sargent, I., & Atkinson, P. M. (2020). Scale Sequence Joint Deep Learning (SS-JDL) for land use and land cover classification. *Remote Sensing of Environment*, 237, 111593.

<https://doi.org/10.1016/j.rse.2019.111593>

[7] Li, C., & Shao, G. (2012). Object-oriented classification of land use/cover using digital aerial orthophotography. *International journal of remote sensing*, 33(4), 922-938.

<https://doi.org/10.1080/01431161.2010.536183>

[8] Mustafa Atasoy, Fevzi Karslı, Cemal Bıyık, & Demir, O. (2006). Determining Land Use Changes with Digital Photogrammetric Techniques. *Environmental Engineering Science*, 23(4), 712-721. <https://doi.org/10.1089/ees.2006.23.712>

[9] Mondal, Md., Sharma, N., Kappas, M., & Garg, P. (2015). Critical Assessment of Land Use Land Cover Dynamics Using Multi-Temporal Satellite Images. *Environments*, 2(4), 61-90. <https://doi.org/10.3390/environments2010061>

[10] Luo, M., & Ji, S. (2022). Cross-spatiotemporal land-cover classification from VHR remote sensing images with deep learning-based domain adaptation. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 191, 105-128.

<https://doi.org/10.1016/j.isprsjprs.2022.07.011>

[11] Lee, S.-H., Han, K.-J., Lee, K., Lee, K.-J., Oh, K.-Y., & Lee, M.-J. (2020). Classification of Landscape Affected by Deforestation Using High-Resolution Remote Sensing Data and Deep-Learning Techniques. *Remote Sensing*, 12(20), 3372.

<https://doi.org/10.3390/rs12203372>

[12] Li, W., Fu, H., Yu, L., Gong, P., Feng, D., Li, C., & Clinton, N. (2016). Stacked Autoencoder-based deep learning for remote-sensing image classification: a case study of African land-cover mapping. *International Journal of Remote Sensing*, 37(23), 5632-5646. <https://doi.org/10.1080/01431161.2016.1246775>

[13] Ma, L., Liu, Y., Zhang, X., Ye, Y., Yin, G., & Johnson, B. A. (2019). Deep learning in remote sensing applications: A meta-

- [36] Alem, A., & Kumar, S. (2022). Transfer learning models for land cover and land use classification in remote sensing image. *Applied Artificial Intelligence*, 36(1), 2014192. <https://doi.org/10.1080/08839514.2021.2014192>
- [37] Khan, S. D., & Basalamah, S. (2023). Multi-Branch Deep Learning Framework for Land Scene Classification in Satellite Imagery. *Remote Sensing*, 15(13), 3408. <https://doi.org/10.3390/rs15133408>
- [38] Stivaktakis, R., Tsagkatakis, G., & Tsakalides, P. (2019). Deep Learning for Multilabel Land Cover Scene Categorization Using Data Augmentation. *IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters*, 16(7), 1031–1035. DOI: 10.1109/LGRS.2019.2893306
- [39] Naushad, R., Kaur, T., & Ghaderpour, E. (2021). Deep Transfer Learning for Land Use and Land Cover Classification: A Comparative Study. *Sensors*, 21(23), 8083. <https://doi.org/10.3390/s21238083>
- [40] Rangel, A., Terven, J., Cordova-Esparza, D. M., & Chavez-Urbiola, E. A. (2024). Land Cover Image Classification. *arXiv preprint arXiv:2401.09607*. <https://doi.org/10.48550/arXiv.2401.09607>
- [41] Zhang, W., Tang, P., & Zhao, L. (2019). Remote Sensing Image Scene Classification Using CNN-CapsNet. *Remote Sensing*, 11(5), 494. <https://doi.org/10.3390/rs11050494>
- [42] Fayaz, M., Nam, J., Dang, L. M., Song, H.-K., & Moon, H. (2024). Land-Cover Classification Using Deep Learning with High-Resolution Remote-Sensing Imagery. *Applied Sciences*, 14(5), 1844. <https://doi.org/10.3390/app14051844>
- [43] Albarakati, H. M., Khan, M. A., Hamza, A., Khan, F., Naoufel, K., Jamel, L., Almuqren, L., & Alrooba, R. (2024). A Novel Deep Learning Architecture for Agriculture Land Cover and Land Use Classification from Remote Sensing Images Based on Network-Level Fusion of Self-Attention Architecture. *IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing*, 1–16. DOI: 10.1109/JSTARS.2024.3369950
- [44] Hatef Dastour, & Hassan, Q. K. (2023). A Comparison of Deep Transfer Learning Methods for Land Use and Land Cover Classification. *Sustainability*, 15(10), 7854–7854. <https://doi.org/10.3390/su15107854>
- [45] Pedrayes, O. D., Lema, D. G., García, D. F., Rubén Usamentiaga, & Alonso, Á. (2021). Evaluation of Semantic Segmentation Methods for Land Use with Spectral Imaging Using Sentinel-2 and PNOA Imagery. *Remote Sensing*, 13(12), 2292–2292. <https://doi.org/10.3390/rs13122292>
- [46] Cheng, G., Xie, X., Han, J., Guo, L., & Xia, G. S. (2020). Remote sensing image scene classification meets deep learning: Challenges, methods, benchmarks, and opportunities. *IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing*, 13, 3735–3756. DOI: 10.1109/JSTARS.2020.3005403
- [47] Rousset, G., Despinoy, M., Schindler, K., & Mangeas, M. (2021). Assessment of deep learning techniques for land use land cover classification in southern New Caledonia. *Remote Sensing*, 13(12), 2257. <https://doi.org/10.3390/rs13122257>
- classification using convolutional neural networks. *Remote Sensing*, 11(3), 274. <https://doi.org/10.3390/rs11030274>
- [25] Rehmer, A., & Kroll, A. (2020). On the vanishing and exploding gradient problem in Gated Recurrent Units. *IFAC-PapersOnLine*, 53(2), 1243–1248. <https://doi.org/10.1016/j.ifacol.2020.12.1342>
- [26] Simon, J. B., Karkada, D., Ghosh, N., & Belkin, M. (2023). More is better in modern machine learning: when infinite overparameterization is optimal and overfitting is obligatory. *arXiv preprint arXiv:2311.14646*. <https://doi.org/10.48550/arXiv.2311.14646>
- [27] Li, Y., Zhang, H., Xue, X., Jiang, Y., & Shen, Q. (2018). Deep learning for remote sensing image classification: A survey. *Wiley Interdisciplinary Reviews: Data Mining and Knowledge Discovery*, 8(6). <https://doi.org/10.1002/widm.1264>
- [28] Marschner, F. J., & Anderson, J. R. (1967). Major land uses in the United States. *US Geological Survey*. DOI: 10.3133/70046790
- [29] Vali, A., Comai, S., & Matteucci, M. (2020). Deep Learning for Land Use and Land Cover Classification Based on Hyperspectral and Multispectral Earth Observation Data: A Review. *Remote Sensing*, 12(15), 2495. <https://doi.org/10.3390/rs12152495>
- [30] Jozdani, S. E., Johnson, B. A., & Chen, D. (2019). Comparing Deep Neural Networks, Ensemble Classifiers, and Support Vector Machine Algorithms for Object-Based Urban Land Use/Land Cover Classification. *Remote Sensing*, 11(14), 1713. <https://doi.org/10.3390/rs11141713>
- [31] Ali, K., & Johnson, B. A. (2022). Land-Use and Land-Cover Classification in Semi-Arid Areas from Medium-Resolution Remote-Sensing Imagery: A Deep Learning Approach. *Sensors*, 22(22), 8750. <https://doi.org/10.3390/s22228750>
- [32] Li, W., Wang, Z., Wang, Y., Wu, J., Wang, J., Jia, Y., & Gui, G. (2020). Classification of High-Spatial-Resolution Remote Sensing Scenes Method Using Transfer Learning and Deep Convolutional Neural Network. *IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing*, 13, 1986–1995. DOI: 10.1109/JSTARS.2020.2988477
- [33] Yu, X., Wu, X., Luo, C., & Ren, P. (2017). Deep learning in remote sensing scene classification: a data augmentation enhanced convolutional neural network framework. *GIScience & Remote Sensing*, 54(5), 741–758. <https://doi.org/10.1080/15481603.2017.1323377>
- [34] Shawky, O. A., Hagag, A., El-Dahshan, E.-S. A., & Ismail, M. A. (2020). Remote sensing image scene classification using CNN-MLP with data augmentation. *Optik*, 221, 165356. <https://doi.org/10.1016/j.ijleo.2020.165356>
- [35] Zhang, Z., Mi, X., Yang, J., Wei, X., Liu, Y., Yan, J., Liu, P., Gu, X., & Yu, T. (2023). Remote Sensing Image Scene Classification in Hybrid Classical–Quantum Transferring CNN with Small Samples. *Sensors*, 23(18), 8010. <https://doi.org/10.3390/s23188010>

- TensorFlow Deep Neural Networks with ADAM Optimizer and GIS for Spatial Prediction of Forest Fire Danger in Tropical Areas. *Remote Sensing*, 15(14), 3458. <https://doi.org/10.3390/rs15143458>
- [60] Reyad, M., Sarhan, A. M., & Arafa, M. (2023). A modified Adam algorithm for deep neural network optimization. *Neural Computing and Applications*, 35(23), 17095-17112. <https://doi.org/10.1007/s00521-023-08568-z>
- [61] Macarringue, L. S., Bolfe, É. L., & Pereira, P. R. M. (2022). Developments in Land Use and Land Cover Classification Techniques in Remote Sensing: A Review. *Journal of Geographic Information System*, 14(01), 1–28. DOI: 10.4236/jgis.2022.141001
- [62] Abdu, H. A. (2018). Classification accuracy and trend assessments of land cover- land use changes from principal components of land satellite images. *International Journal of Remote Sensing*, 40(4), 1275–1300. <https://doi.org/10.1080/01431161.2018.1524587>
- [63] HAY, A. M. (1988). The derivation of global estimates from a confusion matrix. *International Journal of Remote Sensing*, 9(8), 1395–1398. <https://doi.org/10.1080/01431168808954945>
- [64] Layati, E., & El Ghachi, M. (2024). Oued Lakhdar watershed (Morocco), monitoring land use/cover changes: Remote sensing and GIS approach. *Geology, Ecology, and Landscapes*, 1-13. <https://doi.org/10.1080/24749508.2024.2395204>
- [65] Fan, F., Wang, Y., & Wang, Z. (2007). Temporal and spatial change detecting (1998–2003) and predicting of land use and land cover in Core corridor of Pearl River Delta (China) by using TM and ETM+ images. *Environmental Monitoring and Assessment*, 137(1-3), 127–147. <https://doi.org/10.1007/s10661-007-9734-y>
- [66] Congalton, R. G. (1991). A review of assessing the accuracy of classifications of remotely sensed data. *Remote Sensing of Environment*, 37(1), 35–46. [https://doi.org/10.1016/0034-4257\(91\)90048-B](https://doi.org/10.1016/0034-4257(91)90048-B)
- [67] Rwanga, S. S., & Ndambuki, J. M. (2017). Accuracy Assessment of Land Use/Land Cover Classification Using Remote Sensing and GIS. *International Journal of Geosciences*, 08(04), 611–622. DOI: 10.4236/ijg.2017.84033
- [68] Zhou, Y., Zhang, R., Wang, S., & Wang, F. (2018). Feature Selection Method Based on High-Resolution Remote Sensing Images and the Effect of Sensitive Features on Classification Accuracy. *Sensors*, 18(7), 2013. <https://doi.org/10.3390/s18072013>
- [69] Temenos, A., Temenos, N., Kaselimi, M., Doulamis, A., & Doulamis, N. (2023). Interpretable Deep Learning Framework for Land Use and Land Cover Classification in Remote Sensing Using SHAP. *IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters*, 20, 1–5. DOI: 10.1109/LGRS.2023.3251652
- [70] Moradi, R., Berangi, R., & Minaei, B. (2019). A survey of regularization strategies for deep models. *Artificial Intelligence Review*, 53(6), 3947–3986. <https://doi.org/10.1007/s10462-019-09784-7>
- [48] Helber, P., Bischke, B., Dengel, A., & Borth, D. (2019). Eurosat: A novel dataset and deep learning benchmark for land use and land cover classification. *IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing*, 12(7), 2217–2226. DOI: 10.1109/JSTARS.2019.2918242
- [49] Cheng, X., Li, B., Deng, Y., Tang, J., Shi, Y., & Zhao, J. (2024). MMDL-Net: Multi-Band Multi-Label Remote Sensing Image Classification Model. *Applied Sciences*, 14(6), 2226. <https://doi.org/10.3390/app14062226>
- [50] Stoimchev, M., Kocev, D., & Džeroski, S. (2023). Deep Network Architectures as Feature Extractors for Multi-Label Classification of Remote Sensing Images. *Remote Sensing*, 15(2), 538. <https://doi.org/10.3390/rs15020538>
- [51] He, K., Zhang, X., Ren, S., & Sun, J. (2016). Deep residual learning for image recognition. In *Proceedings of the IEEE conference on computer vision and pattern recognition* (pp. 770–778). <https://doi.org/10.48550/arXiv.1512.03385>
- [52] Wang, L., Wang, J., Liu, Z., Zhu, J., & Qin, F. (2022). Evaluation of a deep-learning model for multispectral remote sensing of land use and crop classification. *The Crop Journal*, 10(5), 1435–1451. <https://doi.org/10.1016/j.cj.2022.01.009>
- [53] Hosseiny, B., Abdi, A. M., & Jamali, S. (2022). Urban land use and land cover classification with interpretable machine learning – A case study using Sentinel-2 and auxiliary data. *Remote Sensing Applications: Society and Environment*, 28, 100843. <https://doi.org/10.1016/j.rsase.2022.100843>
- [54] Shehab, L. H., Fahmy, O. M., Gasser, S. M., & El-Mahallawy, M. S. (2021). An efficient brain tumor image segmentation based on deep residual networks (ResNets). *Journal of King Saud University - Engineering Sciences*, 33(6), 404–412. <https://doi.org/10.1016/j.jksues.2020.06.001>
- [55] Wang, Y., Li, K., Xu, L., Qian, W., Wang, F., & Chen, Y. (2021). A Depthwise Separable Fully Convolutional ResNet With ConvCRF for Semisupervised Hyperspectral Image Classification. *IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing*, 14, 4621–4632. DOI: 10.1109/JSTARS.2021.3073661
- [56] Safari, M. M., Sharifi, A., Mahmoodi, J., & Dariush Abbasi-Moghadam. (2024). Mesoscale eddy detection and classification from sea surface temperature maps with deep neural networks. *IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing*, 17, 10279–10290. DOI: 10.1109/JSTARS.2024.3402823
- [57] Nava, L., Monserrat, O., & Catani, F. (2022). Improving Landslide Detection on SAR Data Through Deep Learning. *IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters*, 19, 1–5. DOI: 10.1109/LGRS.2021.3127073
- [58] Bera, S., & Shrivastava, V. K. (2020). Analysis of various optimizers on deep convolutional neural network model in the application of hyperspectral remote sensing image classification. *International Journal of Remote Sensing*, 41(7), 2664–2683. <https://doi.org/10.1080/01431161.2019.1694725>
- [59] Truong, T. X., Nhu, V.-H., Phuong, D. T. N., Nghi, L. T., Hung, N. N., Hoa, P. V., & Bui, D. T. (2023). A New Approach Based on



طبقه بندی تصاویر سنجش از دور، ادغام تصاویر و کاربردهای یادگیری ماشین و یادگیری عمیق در حوزه سنجش از دور شده‌اند.

Heidari, P., M.Sc. Student in Photogrammetry, Faculty of Civil, Water, and Environmental Engineering, Shahid

Beheshti University, Tehran, Iran.

✉ po_heidari@sbu.ac.ir



اصغر میلان استادیار گروه مهندسی نقشه برداری 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 می‌باشد. 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 می‌باشد.

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

✉ a_milan@sbu.ac.ir



علیرضا قراگوزلو دانشیار گروه مهندسی نقشه برداری در دانشکده مهندسی عمران، آب و محیط زیست دانشگاه شهید بهشتی می‌باشند. ایشان عضو کمیسیون تخصصی سنجش از دور و سیستم اطلاعات جغرافیایی وزارت علوم، تحقیقات و فناوری و همچنین از اعضای هیئت مدیره انجمن محیط زیست ایران هستند. تا کنون بیش از ۵ دوره به عنوان پژوهشگر برگزیده کشوری انتخاب شده و مولف بیش از ۱۵ عنوان کتاب و نویسنده مقالات بین‌المللی و علمی پژوهشی متعددی هستند. زمینه‌های تخصصی ایشان سیستم اطلاعات مکانی، سنجش از دور، آمایش سرزمین و محیط زیست می‌باشد.

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

✉ a_gharagozlou@sbu.ac.ir

[71] Salehin, I., & Kang, D.-K. (2023). A Review on Dropout Regularization Approaches for Deep Neural Networks within the Scholarly Domain. *Electronics*, 12(14), 3106. <https://doi.org/10.3390/electronics12143106>

[72] Piotrowski, A. P., Napiorkowski, J. J., & Piotrowska, A. E. (2020). Impact of deep learning-based dropout on shallow neural networks applied to stream temperature modelling. *Earth-Science Reviews*, 201, 103076. <https://doi.org/10.1016/j.earscirev.2019.103076>

[73] Shorten, C., & Khoshgoftaar, T. M. (2019). A survey on image data augmentation for deep learning. *Journal of big data*, 6(1), 1-48. <https://doi.org/10.1186/s40537-019-0197-0>

[74] Hao, X., Liu, L., Yang, R., Yin, L., Zhang, L., & Li, X. (2023). A Review of Data Augmentation Methods of Remote Sensing Image Target Recognition. *Remote Sensing*, 15(3), 827. <https://doi.org/10.3390/rs15030827>

[75] Ceni, A. (2022). Random orthogonal additive filters: a solution to the vanishing/exploding gradient of deep neural networks. *arXiv preprint arXiv:2210.01245*. DOI: 10.1109/TNNLS.2025.3538924

[76] Li, P., Han, L., Tao, X., Zhang, X., Grecos, C., Plaza, A., & Ren, P. (2020). Hashing Nets for Hashing: A Quantized Deep Learning to Hash Framework for Remote Sensing Image Retrieval. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 58(10), 7331–7345. DOI: 10.1109/TGRS.2020.2981997

[77] Lei, S., Shi, Z., & Zou, Z. (2017). Super-Resolution for Remote Sensing Images via Local-Global Combined Network. *IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters*, 14(8), 1243–1247. DOI: 10.1109/LGRS.2017.2704122

[78] Anam, M. K., Defit, S., Haviluddin, H., Efrizoni, L., & Firdaus, M. B. (2024). Early Stopping on CNN-LSTM Development to Improve Classification Performance. *Journal of Applied Data Sciences*, 5(3), 1175–1188. <https://doi.org/10.47738/jads.v5i3.312>

معرفی نویسندگان

AUTHOR(S) BIOSKETCHES

پویا حیدری دانشجوی ورودی ۱۴۰۱ کارشناسی ارشد فتوگرامتری دانشگاه شهید بهشتی می‌باشند. ایشان تاکنون موفق به چاپ مقالات متعدد در مجلات و کنفرانس‌های داخلی و بین‌المللی در زمینه‌های

Citation (Vancouver): Heidari P, Milan A, Gharagozlou A. [Object detection and classification with Sentinel-2 imagery using ResNet]. *J. RS. GEOINF. RES.* 2025; 3(1): 15-36

doi <https://doi.org/10.22061/jrsgr.2025.11719.1094>



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

Spatial modeling for optimal management of archaeological sites using photogrammetry and spatial information systems (Study area: Hegmataneh, Hamadan)

M. Sharifzadeh, A. Gharagozlo*, S. Sadeghian

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

ABSTRACT

Received: 17 January 2025
 Reviewed: 22 February 2025
 Revised: 13 April 2025
 Accepted: 05 May 2025

KEYWORDS:

Cultural Heritage
 Orthophoto
 Documentation
 Changes

* Corresponding author

✉ a_gharagozlo@sbu.ac.ir

☎ (+98 912) 130 9098

Background and Objectives: Archaeological artifacts, as the cultural and historical heritage of any society, play a crucial role in preserving its identity and history. Protecting and managing these artifacts requires modern technologies to accurately and non-destructively document and preserve this heritage. The use of photogrammetry and Geographic Information Systems (GIS) in managing and preserving historical sites, including archaeological areas, has increasingly gained attention. The primary aim of this research is to utilize photogrammetric technologies and GIS for the management and preservation of the ancient site of Hegmataneh in Hamadan. This research seeks to improve the accuracy and quality of data through aerial image processing, data correction, georeferencing, and precise map creation. Additionally, the research analyzes changes in the site and provides results to support planning and managerial decision-making in the field of historical site preservation. Furthermore, the goal is to analyze site changes and provide tools for planning and managerial decision-making in the preservation of historical sites.

Methods: The ancient site of Hegmataneh in Hamadan was selected as the research site and sample due to its significant historical and cultural importance from the Median and Achaemenid periods. Data was collected using 12 aerial images with a resolution of 1 to 2 meters, captured with an Ultracam-Xp camera in 2017, along with Google Earth software for measuring and determining reference points. The materials used included image data and image processing software such as Agisoft Metashape Professional and Global Mapper to generate a Digital Elevation Model (DEM) and orthophoto. The research process involved preparing and processing images, correcting data, modeling, and creating maps. These steps progressively improved data accuracy and generated more precise 3D models for analyzing site changes. This research has primarily contributed to the management and preservation of archaeological sites and serves as a valuable decision-making tool for effective site management and preservation.

Findings: This research utilized photogrammetry technologies and Geographic Information Systems (GIS) to create a spatial model of the Hegmataneh archaeological site in Hamadan. By processing aerial and satellite images, accurate 3D models were developed, enabling the analysis of structural and urban changes, as well as the creation of heritage maps for Hamadan and the Mapping Organization. The results demonstrated that combining these technologies helps in more accurate data recording, identifying threats, and supporting management planning. These methods enhance the accuracy of modeling and provide an efficient tool for decision-making in the preservation and management of cultural heritage.

Conclusion: The restoration and proper conservation of historical monuments should be based on documented evidence and in compliance with national and international standards to prevent damage to the authenticity of the structures. Additionally, the design and construction of new buildings should be harmonized with historical structures and carried out under strict supervision. The use of modern technologies, such as aerial images, satellite imagery, artificial intelligence, and augmented reality, can improve the management and protection of heritage sites. The researcher's suggestions include the need for precise documentation and continuous monitoring throughout all stages of restoration, design, and transfer of artifacts. There are limitations and challenges, such as a lack of scientific

documentation, budgetary issues, and managerial obstacles, which must be carefully considered to prevent the destruction and damage of historical sites.



NUMBER OF REFERENCES
38



NUMBER OF FIGURES
16



NUMBER OF TABLES
0

مقاله پژوهشی

مدل سازی مکانی برای مدیریت بهینه آثار باستانی با استفاده از فتوگرامتری و سیستم اطلاعات مکانی (منطقه مورد مطالعه: هگمتانه همدان)

مهرنوش شریف زاده، علیرضا قراگوزلو*، سعید صادقیان

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

چکیده

پیشینه و اهداف: آثار باستانی به عنوان میراث فرهنگی و تاریخی هر جامعه، نقشی اساسی در حفظ هویت و تاریخ آن دارند. حفاظت و مدیریت این آثار نیازمند فناوری های نوین است تا بتوان به طور دقیق و غیرمخرب، این میراث را مستندسازی و حفظ کرد. استفاده از فناوری های فتوگرامتری و سیستم های اطلاعات مکانی در مدیریت و حفاظت از آثار تاریخی، از جمله محوطه های باستانی، به طور فزاینده ای مورد توجه قرار گرفته است. هدف اصلی این پژوهش، استفاده از فناوری های فتوگرامتری و سیستم اطلاعات مکانی برای مدیریت و حفاظت از محوطه باستانی هگمتانه همدان است. این پژوهش به دنبال بهبود دقت و کیفیت داده ها از طریق پردازش تصاویر هوایی، تصحیح و زمین مرجع کردن داده ها، و تهیه نقشه های دقیق است. همچنین، پژوهش به تحلیل تغییرات محوطه و ارائه خروجی هایی برای برنامه ریزی و تصمیم گیری های مدیریتی در زمینه حفاظت از آثار تاریخی می پردازد. هدف اصلی پژوهش، استفاده از فناوری های فتوگرامتری و سیستم اطلاعات مکانی برای مدیریت و حفاظت از محوطه هگمتانه همدان است. پژوهش به دنبال بهبود دقت داده ها، پردازش تصاویر هوایی، تصحیح داده ها و تهیه نقشه های دقیق است. همچنین، هدف تحلیل تغییرات محوطه و ارائه ابزارهایی برای برنامه ریزی و تصمیم گیری های مدیریتی در حفاظت از آثار تاریخی است.

روش ها: در این پژوهش، محوطه باستانی هگمتانه همدان به عنوان جامعه و نمونه انتخاب شد، چرا که این محوطه دارای اهمیت تاریخی و فرهنگی بالا از دوره های مادها و هخامنشیان است. ابزار جمع آوری داده ها شامل ۱۲ تصویر هوایی با دقت ۱ تا ۲ متر با استفاده از دوربین التراکم ایکس پی در سال ۱۳۹۶ و نرم افزار گوگل ارث برای اندازه گیری و تعیین نقاط مرجع است. مواد استفاده شده شامل داده های تصویری و نرم افزارهای پردازش تصاویر مانند اجی ای سافت متاشیپ پرو فینشال و گلوبال میر برای تولید مدل رقومی ارتفاعی و ارتوفتو بودند. روند انجام پژوهش شامل تهیه پردازش تصاویر، تصحیح داده ها، مدل سازی و ترسیم نقشه ها بوده است. این مراحل به طور افزایشی دقت داده ها را افزایش داده و مدل های سه بعدی دقیق تری برای تحلیل تغییرات محوطه تولید کرده است. این پژوهش به طور عمده به مدیریت و حفاظت از آثار باستانی کمک کرده و به عنوان ابزار تصمیم گیری مدیریتی مورد استفاده قرار می گیرد.

یافته ها: این پژوهش با استفاده از فناوری های فتوگرامتری و سیستم اطلاعات مکانی به مدل سازی مکانی محوطه هگمتانه همدان پرداخت. با پردازش تصاویر هوایی و ماهواره ای، مدل های سه بعدی دقیقی ایجاد شد که امکان تحلیل تغییرات ساختاری و شهری همچنین نقشه های میراث همدان و سازمان نقشه برداری را فراهم کرد. نتایج نشان داد که ترکیب این فناوری ها به ثبت دقیق تر اطلاعات، شناسایی تهدیدات و برنامه ریزی مدیریتی کمک می کند. این روش ها دقت مدل سازی را افزایش داده و ابزاری کارآمد برای تصمیم گیری های حفاظتی و مدیریتی در حوزه میراث فرهنگی ارائه می دهند.

نتیجه گیری: بازسازی و مرمت اصولی آثار تاریخی باید بر اساس شواهد مستند و با رعایت ضوابط ملی و بین المللی انجام شود تا از آسیب به اصالت بناها جلوگیری شود. همچنین، طراحی و ساخت بناهای جدید باید هماهنگ با ساختارهای تاریخی و با نظارت دقیق صورت گیرد. استفاده از تکنولوژی های نوین مانند تصاویر هوایی، ماهواره ای، هوش مصنوعی و

تاریخ دریافت: ۲۸ دی ۱۴۰۳
تاریخ داوری: ۰۴ اسفند ۱۴۰۳
تاریخ اصلاح: ۲۴ فروردین ۱۴۰۴
تاریخ پذیرش: ۱۵ اردیبهشت ۱۴۰۴

واژگان کلیدی:

میراث فرهنگی
حفاظت
ارتوفتو
مستندسازی
تغییرات

* نویسنده مسئول

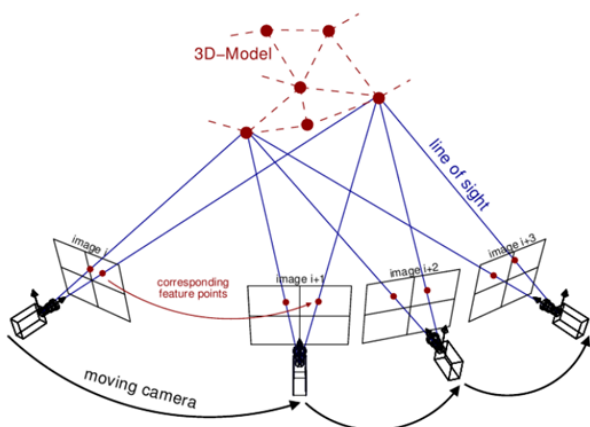
a_gharagozlo@sbu.ac.ir

① ۰۹۱۲-۱۳۰۹۰۹۸

واقعیت افزوده می‌تواند به بهبود مدیریت و حفاظت آثار کمک کند. پیشنهادهای محقق شامل نیاز به مستندسازی دقیق و نظارت مداوم در تمامی مراحل مرمت، طراحی و انتقال آثار است. محدودیت‌ها و موانعی مانند کمبود مستندات علمی، مشکلات بودجه‌ای و چالش‌های مدیریتی در راستای حفاظت از آثار تاریخی وجود دارد که باید به‌دقت مورد توجه قرار گیرد تا از تخریب و آسیب به آثار جلوگیری شود.

مقدمه

از فایل‌ها است که برای سازماندهی اطلاعات پیچیده به کار می‌رود. در این میان، فتوگرامتری به عنوان هنر و علمی شناخته می‌شود که با پردازش داده‌ها، مدل‌های سه‌بعدی دقیق ایجاد کرده و از طریق تحلیل تصاویر دوبعدی، اطلاعات و اندازه‌گیری‌های مربوط به اشیاء را استخراج می‌کند [۵]. با استفاده از فتوگرامتری رقومی و روش‌های پردازش تصویر، ثبت محوطه‌های میراث جهانی به سرعت افزایش یافته است [۶]. استفاده از فتوگرامتری در باستان‌شناسی در مقیاس‌های مختلف رایج است. روش‌ها و الگوریتم‌های متعددی برای بازسازی موقعیت و هندسه دوربین از طریق تصاویر وجود دارد. امروزه یکی از پرکاربردترین روش‌ها بر پایه الگوریتم‌های ساختار از حرکت (SFM) است. این الگوریتم‌ها که در حوزه تحقیقات بینایی ماشین قرار دارند، با بهره‌گیری از تکنیک‌های بازسازی استریو، امکان ایجاد مدل‌های سه‌بعدی دقیق از تصاویر را بدون نیاز به اطلاعات قبلی درباره موقعیت ثبت تصویر یا پارامترهای دوربین فراهم می‌کنند (شکل ۱) [۷]. با روش ساختار از حرکت، هندسه صحنه سه‌بعدی و حرکت دوربین از مجموعه‌ای از تصاویر دوبعدی که توسط دوربینی که در اطراف صحنه جابه‌جا می‌شود، بازسازی می‌گردد. الگوریتم ساختار از حرکت نقاط ویژگی مشترک را در چندین تصویر شناسایی می‌کند و از آن‌ها برای بازسازی حرکت آن نقاط در سراسر دنباله تصویر استفاده می‌کند. با این اطلاعات می‌توان مکان آن نقاط را به عنوان یک ابر نقطه سه‌بعدی محاسبه و تجسم کرد [۸].



شکل ۱: ساختار از حرکت، این الگوریتم با شناسایی نقاط ویژگی تصاویر و دنبال کردن حرکت آن‌ها در چندین تصویر، یک ابرنقاط سه‌بعدی ایجاد می‌کند. سپس با الگوریتم‌های Multiview Stereo Reconstruction، مدل‌های سه‌بعدی دقیقی تولید می‌شود. این فناوری در نرم‌افزار فتواسکن برای بازسازی صحنه‌های باستان‌شناسی از تصاویر هوایی موفق عمل کرده است [۸]

Fig. 1: This algorithm identifies image feature points and tracks their movement across multiple images to create a 3D point cloud. It then uses Multiview Stereo Reconstruction algorithms to generate accurate 3D models. This technology has been successfully used in the Photoscan software for reconstructing archaeological scenes from aerial images [8]

منابع میراث فرهنگی ملموس، اشیایی هستند که در محیط‌های ساخته‌شده، زمان، مکان و فرهنگ خاصی را نمایان می‌کنند. این آثار شکننده بخشی از هویت جمعی بشر و تاریخ او هستند و پیشرفت‌های تکنولوژیکی را نشان می‌دهند؛ بنابراین، تفسیر و حفاظت از این منابع میراث فرهنگی به‌اندازه حفاظت از منابع طبیعی حیاتی است. هنگام بررسی این منابع، متخصصان حفاظت فرهنگی و باستان‌شناسان از روش‌های مشابهی بهره می‌برند. در این فرایند، باستان‌شناسان بر شناسایی و درک افرادی که در آن مکان‌ها زندگی می‌کردند، شیوه زندگی، نگهداری و سرنوشت آن‌ها تمرکز می‌کنند. متخصصان حفاظت میراث نیز از اطلاعات جمع‌آوری شده توسط باستان‌شناسان در تصمیم‌گیری‌های مربوط به حفاظت، ارائه و مدیریت مکان‌های انتخابی برای استفاده معاصر بهره می‌برند. هر دو گروه به تاریخ و تفسیر محوطه‌ها اهمیت می‌دهند و بر مستندسازی این منابع فرهنگی ملموس و غیرقابل تجدید تأکید دارند. هر دو مشاهده می‌کنند که تأثیر انسان بر محیط فیزیکی می‌تواند زمینه‌های اجتماعی و تاریخی یک منطقه و نواحی اطراف آن را دگرگون کند [۱]. برای بررسی، تفسیر و مدیریت میراث فرهنگی و باستان‌شناسی، لازم است رویکردی دقیق و عملی اتخاذ شود. حفاظت و ثبت تصاویر جاده‌ها، شهرها و ساختمان‌های سنگی باستانی که نمایانگر تمدن‌های جهانی هستند، اهمیت بالایی دارد. از این رو، تلاش‌ها برای یافتن روشی مناسب جهت بهبود مدیریت این آثار با استفاده از فتوگرامتری و سیستم اطلاعات مکانی (GIS) آغاز شده است. ایجاد یک پایگاه داده پایدار در سیستم اطلاعات مکانی، از طریق تولید پایگاه‌های رقومی با بهره‌گیری از فتوگرامتری، داده‌های سه‌بعدی و ارتوفتو، امکان تولید داده‌هایی با هزینه کم و دقت بالا را فراهم می‌کند. این روش مزایای چشمگیری برای مدیریت و حفاظت از میراث فرهنگی، انجام مطالعات علمی، و همچنین تسهیل گردشگری ارائه می‌دهد [۲]. اکنون سی سال از معرفی اصطلاح سیستم اطلاعات مکانی در زمینه باستان‌شناسی گذشته است [۳]. امروزه بیشتر باستان‌شناسان از سیستم اطلاعات مکانی و تحلیل مکانی به عنوان ابزارهای ضروری برای کاوش، تحلیل و تفسیر داده‌های مکانی استفاده می‌کنند. این ابزارها به استاندارد در بسیاری از پروژه‌های تحقیقاتی باستان‌شناسی تبدیل شده‌اند. اطلاعات مکانی همواره با فضاهای جغرافیایی در ارتباط است. به طور کلی، مدیریت داده‌های مکانی شامل جمع‌آوری، ذخیره‌سازی، تحلیل و ارائه داده‌ها می‌شود. ایجاد یک پایگاه داده مکانی در سیستم اطلاعات مکانی، ابزاری مؤثر برای تسهیل و بهبود تصمیم‌گیری‌های مدیریتی به شمار می‌آید [۴]. پایگاه داده مجموعه‌ای

بین سال‌های ۱۹۸۹ و ۱۹۹۲، اولین کاربرد فتوگرامتری و سیستم اطلاعات مکانی برای مدل‌سازی مکانی آثار باستانی برای مدیریت بهینه در ایتالیا مورد استفاده قرار گرفته است [۹]. علاوه بر این فناوری سنجش از راه دور از دوران جنگ جهانی اول به عنوان ابزاری انقلابی در باستان‌شناسی معرفی شد [۱۰]. این فناوری با سنجنده‌های فراطیفی و چندطیفی امکان شناسایی محوطه‌های باستانی را بدون تخریب زمین فراهم می‌کند و با دقت بالا و هزینه کمتر، مستندسازی و تحقیقات باستان‌شناسی را بهبود بخشیده است. سنجش از راه دور به شناسایی فضاهای مدفون از طریق بی‌هنگاری‌های حرارتی و تغییر در پارامترهای خاک و پوشش گیاهی کمک می‌کند. تصاویر ماهواره‌ای نیز نقش مهمی در مدیریت میراث فرهنگی ایفا کرده‌اند. تحلیل تصاویر ماهواره‌ای، الگوهای طیفی مرتبط با بقایای باستانی را آشکار می‌کند و شاخص‌های زمین‌شناسی و پوشش گیاهی در تصاویر پانکروماتیک و چندطیفی قابل شناسایی هستند. تصویربرداری فراطیفی (HSI) با تحلیل بازتاب انرژی خورشید، اطلاعات ارزشمندی درباره ویژگی‌های اجسام ارائه می‌دهد و در شناسایی بقایای باستانی و خاک‌های کشاورزی موثر است [۱۱] [۱۲]. سنجنده‌های فراطیفی داده‌ها را به صورت مکعب طیفی ارائه می‌کنند که ابعاد فضایی و طیفی را باهم ترکیب کرده و اطلاعات دقیقی در اختیار محققان قرار می‌دهد [۱۳] [۱۴] [۱۵]. این فناوری برای بررسی آثار هنری بدون آسیب به کار گرفته می‌شود [۱۶] [۱۷] [۱۸] و در نظارت بر روش‌های حفاظت نیز نقش مهمی دارد [۱۹]. علاوه بر این، می‌توان از آن برای تشخیص جعل اسناد استفاده کرد [۲۰] [۲۱]. در تحقیقات پزشکی قانونی به کار برد [۲۲]. و برای کشف میراث فرهنگی زیر آب‌ها بهره گرفت [۲۳]. همچنین ناسا از دهه ۱۹۷۰ در پروژه‌های باستان‌شناسی از جمله شناسایی جاده‌های کانکچکو و محوطه‌های اکتشافی لویس و کلارک نقش داشته و با استفاده از داده‌های فراطیفی در کشف کانال باستانی هوکوکم در آریزونا موفق عمل کرده است [۲۴]. در ادامه، به بررسی پیشینه تحقیق در زمینه مدل‌سازی آثار باستانی با استفاده از با استفاده از فتوگرامتری و فناوری‌های دیگر کشورهای مختلف در پرداخته می‌شود برای بررسی پیشینه تحقیق ابتدا پژوهش‌های انجام‌شده در داخل کشور بررسی می‌شود. محمد فارسی مدان و همکاران در سال ۲۰۲۱ برای کاهش زمان، هزینه و انرژی، با استفاده از فتوگرامتری به مستندنگاری کتیبه تاریخی گنبد الله بقعه شیخ صفی‌الدین اردبیلی پرداختند [۲۵]. آن‌ها از دوربین 5300Nikon D و نرم‌افزار Capture Reality برای مدل‌سازی سه‌بعدی استفاده کردند. تصاویر با فاصله ثابت ثبت شدند و از Photoshop برای تبدیل کتیبه‌ها به تصویر دوبعدی استفاده کردند. در روش سنتی مستندسازی، مشکلاتی مانند زمان و هزینه زیاد و وابستگی به شرایط جوی وجود دارد. فتوگرامتری این مشکلات را با ارائه تصاویر دقیق و بدون اعوجاج حل می‌کند و نیازی به داربست ندارد. این روش امکان مستندسازی سریع و کم‌هزینه را فراهم کرده و حتی یک نفر می‌تواند آن را انجام دهد. همچنین، برای کتیبه‌های در ارتفاع بالا، نیازی به فاصله زیاد از

ساختمان نیست. نتایج نشان داد که استفاده از فتوگرامتری موجب کاهش زمان و هزینه‌ها و همچنین افزایش دقت در مستندسازی آثار تاریخی می‌شود. علاوه بر این، فتوگرامتری به مستندسازی آثار در مناطق صعب‌العبور و با ارتفاعات بالا کمک می‌کند بدون نیاز به تجهیزات سنگین یا دسترسی پیچیده. میثم میری‌آهو دشتی و همکارانش در سال ۲۰۲۰ با استفاده از تصاویر ماهواره‌ای سنجش از دور و تحلیل‌های مکانی با استفاده از سیستم‌های اطلاعات مکانی و روش‌های رگرسیون چندمتغیره، داده‌های موجود برای منطقه بهشهر پرداختند [۲۶]. آن‌ها برای تصاویر ماهواره‌ای سنیتل ۲ ابتدا اصلاحات اتمسفری انجام دادند و برای تصحیح هندسی از تصاویر گوگل ارث و نقشه‌های مقیاس ۱/۲۵۰۰۰ استفاده کردند. سپس با معادلات چندجمله‌ای درجه‌دو، تصحیح هندسی و نمونه‌برداری مجدد انجام دادند. برای طبقه‌بندی از الگوریتم حداکثر احتمال (MLE) استفاده کردند و نقشه پوشش اراضی با دقت ۱۰ متر تهیه کردند. برای مدل‌سازی محیطی از توابع هیدرولوژیکی و فاصله اقلیدسی به منظور شناسایی استقرارگاه‌های باستانی استفاده کردند. همچنین تحلیل‌های رگرسیونی برای ارزیابی اولویت‌بندی لایه‌های محیطی انجام دادند. نتایج نشان داد که ماهواره کوئیک برد به عنوان دقیق‌ترین گزینه برای شناسایی ساختارهای باستان‌شناسی است، ولی پیشنهاد استفاده از تصاویر ماهواره ای سنیتل ۲ به دلیل رایگان بودن و کیفیت مناسب مطرح شد. در نهایت، نقشه‌های مستعد استقرار باستانی برای منطقه بهشهر با استفاده از مدل‌سازی رگرسیونی و هم‌پوشانی وزنی لایه‌ها تهیه و مناطق شرقی و مرکزی دارای پتانسیل بالا شناسایی شد. سعید صادقیان و همکاران در سال ۲۰۱۸ با استفاده از امکانات و ابزار سنجش از دور و فتوگرامتری، تغییرات محوطه تپه باستانی هگمتانه در دوره‌های مختلف مورد بررسی قرار دادند [۲۷]. از تصاویر ماهواره‌ای لندست ۷ و ۸ پس از تصحیحات رادیومتریک و هندسی، برای تهیه نقشه تغییرات سال‌های ۲۰۰۰ و ۲۰۱۸ استفاده کردند که دقت کلی آن‌ها به ترتیب ۳۹٪ و ۵۷٪ بود. سپس برای ارزیابی روش، تصاویر گوگل ارث برای سال‌های ۲۰۰۵ و ۲۰۱۹ استفاده کردند که دقت آشکارسازی تغییرات در این تصاویر به ترتیب ۸۳٪ و ۹۰٪ بود. در ادامه با استفاده از تصاویر هوایی و نرم‌افزار سیستم اطلاعات مکانی، نقشه تغییرات سال‌های گذشته ایجاد شد که دقت آن‌ها بین ۵۸٪ تا ۸۹٪ متغیر بود. برای ارزیابی الگوریتم طبقه‌بندی، از روش ماشین بردار پشتیبان (SVM) استفاده کردند که عملکرد بهتری نسبت به الگوریتم‌های نظارت‌شده داشت. این مطالعه نشان داد که انتخاب داده‌های تک باند و محدودیت‌های تفکیک مکانی، تأثیر زیادی بر دقت نتایج دارند. در نهایت، استفاده ترکیبی از تصاویر هوایی و ماهواره‌ای بهترین گزینه برای نظارت بر محوطه‌های باستانی پیشنهاد کردند. روح‌الله سالک و همکاران در سال ۲۰۱۹ برای کشف و شناسایی میراث فرهنگی با استفاده از تصاویر فراطیفی پرداختند [۲۸]. تصاویر فراطیفی از امواج الکترومغناطیسی بازتابی از اجسام مختلف استفاده می‌کند که هر جسم را با ویژگی‌های خاص خود به صورت منحصر به فرد

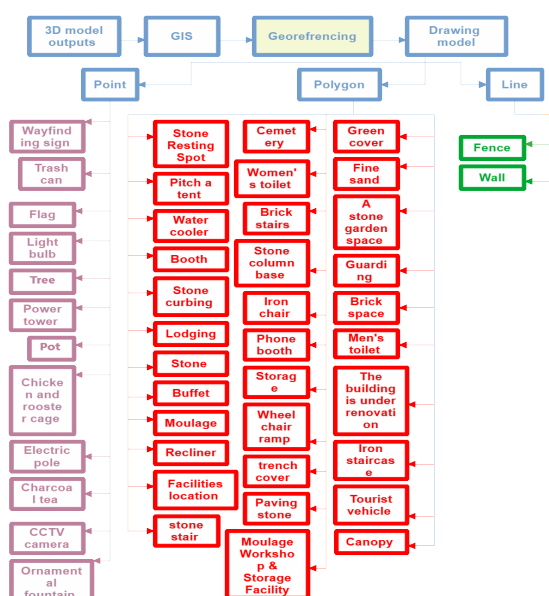
رقومی برای مستندسازی و حفاظت از محوطه‌های میراث فرهنگی بسیار مؤثرند و می‌توانند به حفظ و بازسازی سازه‌های تاریخی کمک کنند. همچنین، اهمیت آسیب‌های بادی در توسعه انرژی‌های تجدیدپذیر و افزایش آگاهی عمومی درباره حفاظت از میراث فرهنگی برجسته شد. ماتئوش سیسکی و همکاران در سال ۲۰۱۹ برای بررسی‌های قابل نگهداری در مدیریت میراث فرهنگی به استفاده از ابزارهای مختلف سیستم اطلاعات مکانی در مدل‌سازی اشیا پرداختند [۳۲]. با استفاده از داده‌های نقطه‌ای، نقشه تراکم بناهای تاریخی غیرمنقول در لهستان با روش تخمین تراکم هسته (KDE) ایجاد شد. سپس این داده‌ها با واحدهای اداری ترکیب و درون چندضلعی‌ها جمع‌آوری شدند. برای تجسم توزیع فضایی، داده‌ها به چندضلعی‌ها تبدیل شدند و با استفاده از روش‌های درون‌یابی وزن‌دهی معکوس فاصله (IDW)، درون‌یابی چندجمله‌ای جهانی (GPI)، تابع پایه شعاعی (RBF)، درون‌یابی چندجمله‌ای محلی (LPI)، کریجینگ معمولی (OK)، کریجینگ ساده (SK)، کریجینگ جهانی (UK)، کریجینگ منفصل (DK) و کریجینگ بیزی تجربی (EBK) و با استفاده از ضریب همبستگی پیرسون که برای نقشه تراکم بناهای تاریخی غیر متحرک برای نقشه‌های ایجاد شده از اندازه‌های شش بعدی محاسبه شده، به‌عنوان شاخص قابلیت اطمینان در نرم‌افزار سیستم اطلاعات مکانی تجزیه و تحلیل شدند. نتایج نشان داد که برای مدیریت مؤثر میراث، نیاز به نقشه‌های موضوعی است. روش پیشنهادی امکان ایجاد نقشه‌های تعمیم‌یافته با داده‌های کمتر را فراهم کرد. این مطالعه به‌ویژه در مدیریت پایدار میراث فرهنگی مفید است و می‌تواند به‌طور جهانی قابل‌استفاده باشد. برای شناسایی بافت محوطه‌های میراث فرهنگی ثبت جهانی‌شده و مدیریت چالش‌ها، برنامه‌هایی با استفاده از فتوگرامتری و سیستم اطلاعات مکانی طراحی شده است. هدف این برنامه‌ها، شناخت بهتر محوطه و بهبود مدیریت آنجا است. در محوطه هگمتانه، ترکیب سیستم اطلاعات مکانی و فتوگرامتری تاکنون اتفاق رخ نداده است. با استفاده از این دو فناوری، هدف شناخت دقیق‌تر و بهینه‌سازی مدیریت محوطه تاریخی مورد نظر است. در ادامه، روش تحقیق به تفصیل بیان خواهد شد.

روش تحقیق

در این مطالعه، داده‌های مورد نیاز از محوطه‌ی تاریخی هگمتانه در شهر همدان گردآوری شد. در مرحله‌ی نخست، اطلاعات اولیه از طریق تکمیل پرسش‌نامه و تصویربرداری در فاصله‌ی نزدیک با تلفن همراه سامسونگ مدل A51 ثبت گردید. در ادامه، تصاویر هوایی با وضوح بالا مربوط به سال ۱۳۹۶ که توسط سازمان نقشه‌برداری تهیه شده بودند، به همراه نقاط کنترل زمینی استخراج‌شده از Google Earth، در نرم‌افزار فتوگرامتری پردازش شده و مدل سه‌بعدی با دقت ۱ تا ۲ متر تولید شد. در مرحله‌ی بعد، به منظور اصلاح خطاهای مربوط به مقیاس و جهت در خروجی‌های مدل‌سازی، داده‌ها با تصویر ماهواره‌ای Google Earth سال ۲۰۲۴ در محیط سیستم اطلاعات مکانی (GIS) تصحیح شدند. این

نمایش می‌دهد. این تصاویر مزایای زیادی در باستان‌شناسی دارند که در مقایسه با سایر انواع تصاویر برجسته است. سنسورهای ابرطیفی قادرند عوارض مختلف را در فضای طیفی و مکانی به‌طور هم‌زمان نشان دهند. آن‌ها با ثبت واکنش‌ها در طول موج‌های مختلف و ایجاد منحنی‌های طیفی، اطلاعات را در یک بانک اطلاعاتی ذخیره کردند تا برای شناسایی ماهیت اجسام استفاده کنند. نتایج نشان داد که تصویربرداری فراطیفی ابزاری مناسب برای بهبود پژوهش‌های باستان‌شناسی، حفظ و مدیریت میراث فرهنگی است. در ادامه به بررسی پژوهش‌های انجام‌شده در ارتباط با مدل‌سازی عوارض در خارج از کشور پرداخته می‌شود. یانیس آپوستولو و همکاران در سال ۲۰۲۴ به چگونگی استفاده مجدد و تولید مجدد داده‌های قدیمی برای کشف ابعاد نامشخص پروژه‌های گذشته پرداختند [۲۹]. در این مطالعه، تیمی از کارشناسان با استفاده از سیستم اطلاعات مکانی داده‌های منطقه گرونا در شمال غربی یونان را بررسی کردند. آن‌ها ابتدا یافته‌های سطحی را فهرست کردند سپس با کمک تصاویر هوایی و مدل رقومی ارتفاعی (DEM)، توپوگرافی و تغییرات زمین را ارزیابی کردند. داده‌ها با نرم‌افزارهای فتوگرامتری و ابزارهای سیستم اطلاعات مکانی تحلیل شدند. یک بافر ۵۰ متری برای تحلیل ژئومورفومتریک ایجاد شد و داده‌ها به صورت رقومی در یک پایگاه داده ثبت شدند. نتایج نشان داد این روش برای تعیین موقعیت محوطه‌های باستانی مؤثر است، هرچند خطاهایی در اطلاعات اولیه وجود داشت. این مطالعه به پژوهشگران دیگر کمک می‌کند تا تحقیقات مشابهی انجام دهند و نخستین کاتالوگ باستان‌شناسی پروژه گرونا را ایجاد کنند. زوریانا کوزیک در سال ۲۰۲۳ به تحقیق در خرابه‌های یک بنای قرون وسطایی در مرکز تاریخی لویو پرداخت [۳۰]. در این مطالعه با استفاده از دوربین Canon EOS 350 و اسکنر Faro Focus 3D، بررسی‌های توپوگرافی و فتوگرامتری انجام شد. تصاویر ارتوفتو و مدل‌های سه‌بعدی برای مستندسازی سازه‌های تاریخی ایجاد شدند. همچنین با پهپاد DJI Phantom 3 تصویربرداری هوایی انجام شد و تصاویر با نرم‌افزار PhotoScan Agisoft پردازش شدند. یک پایگاه داده برای ذخیره اطلاعات گرافیکی و ویژگی‌های بناها ایجاد شد و نقشه‌های رقومی دوبعدی و سه‌بعدی همراه با مسیرهای گردشگری تهیه شدند. این مطالعه نشان داد که فناوری‌های مدرن رقومی و سنجش از دور، امکان مستندسازی دقیق‌تر و مؤثرتری از محوطه‌های میراث فرهنگی را فراهم می‌آورند و می‌توانند به حفظ و بازسازی این آثار کمک کنند. ماچنی اسماتچینسکی و همکاران در سال ۲۰۲۲ به گسترش و مستندسازی توپوگرافی اشیا میراث فرهنگی ثبت‌شده در نقشه‌های قرن نوزدهم پرداختند [۳۱]. آن‌ها با استفاده از تکنیک فتوگرامتری و پهپاد DJI Phantom، مدل سه‌بعدی دقیقی از یک آسیب‌بادی تاریخی ایجاد کردند. داده‌ها با سیستم‌های پیشرفته GNSS و نرم‌افزار Agisoft Metashape پردازش شدند. مدل‌سازی دستی با SketchUp، جزئیات سازه را به خوبی نمایش داد و در نهایت یک ویدئو کوتاه برای نمایش تاریخی و موقعیت آسیب تهیه شد. نتایج نشان داد روش‌های مدرن

کمتر از ۱۰ مترمربع به صورت نقطه‌ای و عوارض بزرگ‌تر به صورت سطحی ترسیم شدند. این تفکیک نه تنها بر مبنای ابعاد فیزیکی، بلکه با در نظر گرفتن نوع کاربری عوارض (مانند بناهای تاریخی، مسیرهای تردد، دیوارها و اجزای معماری) انجام شد تا از ایجاد ازدحام بصری در نقشه جلوگیری شود و خوانایی نقشه‌ها حفظ گردد. این روش ترسیم، دقت تحلیل‌های بعدی را در محیط GIS افزایش داده و امکان بررسی دقیق‌تری از توزیع فضایی عوارض، مداخلات انسانی و روند تغییرات ساختاری در گذر زمان را فراهم کرده است. این فرایند دسته‌بندی مداخلات در محوطه را بر اساس ویژگی‌های فیزیکی و کارکرد آن‌ها را نشان می‌دهد (شکل ۴).



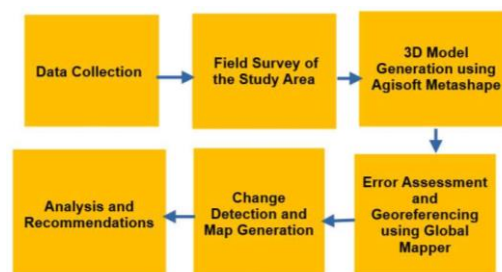
شکل ۴: فلوچارت زمین مرجع کردن و تجمیع داده‌های مکانی برای ایجاد پایگاه اطلاعاتی باستان‌شناسی

Fig. 4: Flowchart Georeferencing and integration of spatial data to create an archaeological database

تحلیل و ترسیم تغییرات ساختاری و شهری در اطراف محوطه باستان‌شناسی

تحولات مختلفی در خیابان‌های مرتبط با محوطه مجموعه هگمتانه رخ داده است. این اطلاعات از طریق گفتگوهای پژوهشی با افراد باتجربه در این مجموعه به دست آمده است. خیابان اکباتان که از میدان امام خمینی تا میدان هگمتانه امتداد داشت، حذف شده و به محوطه افزوده شده است. این تغییرات احتمالاً زمینه‌ساز کاوش‌های باستان‌شناسی در آینده خواهند شد. خیابان بلوار علویان نیز حذف و آسفالت آن برداشته شده است، که این امر بر ورودی پارکینگ و محوطه تأثیری گذاشته است. مسیر بازار آهنگران نیز پس از حذف بلوار علویان، به مسیری جدید تغییر یافته است. شهرداری به منظور ایجاد ورودی جدید برای بازار آهنگران و کاروان‌سراهای اطراف آن، اقدام به خرید و تخریب منازل مجاور کرده است. موارد ذکر شده با کمک فایل کد مجموعه هگمتانه به صورت ترسیماتی دسته‌بندی شده نمایش داده شده‌اند (شکل ۵).

فرایند منجر به تولید خروجی‌های دقیق‌تری شد. در نهایت، با استفاده از این خروجی‌ها، مداخلات انسانی در منطقه شناسایی گردید و نقشه‌های میراث فرهنگی همدان و نقشه‌های سازمان نقشه‌برداری در مقیاس‌های ۱/۵۰۰ و ۱/۱۰۰۰ مورد تحلیل و بررسی قرار گرفتند و در پی آن، نتایج و پیشنهاداتی ارائه شده است (شکل ۲).



شکل ۲: فلوچارت مراحل انجام کار.

Fig. 2: Flowchart of the work process stages

منطقه مورد مطالعه تپه باستانی هگمتانه در محدوده شهر همدان واقع شده است. این تپه به شکل بیضی، با مساحت ۳۱ هکتار و ارتفاع ۱۸۷۰ متر از سطح آب‌های آزاد قرار دارد. مختصات جغرافیایی این تپه ۵۱۷/۴۸ درجه شمالی و ۳۲/۸۰۴۶۲۹ درجه شرقی است و از تهران حدود ۳۴۰ کیلومتر فاصله دارد [۳۳]. مجموعه هگمتانه دارای معماری پیچیده‌ای با قلعه‌ای مرکزی، خانه‌های اطراف و تزئینات باشکوه بوده است. کاوش‌ها نیز سیستم آبرسانی پیشرفته و خانه‌های متقارن آن را تأیید کرده‌اند (شکل ۳).

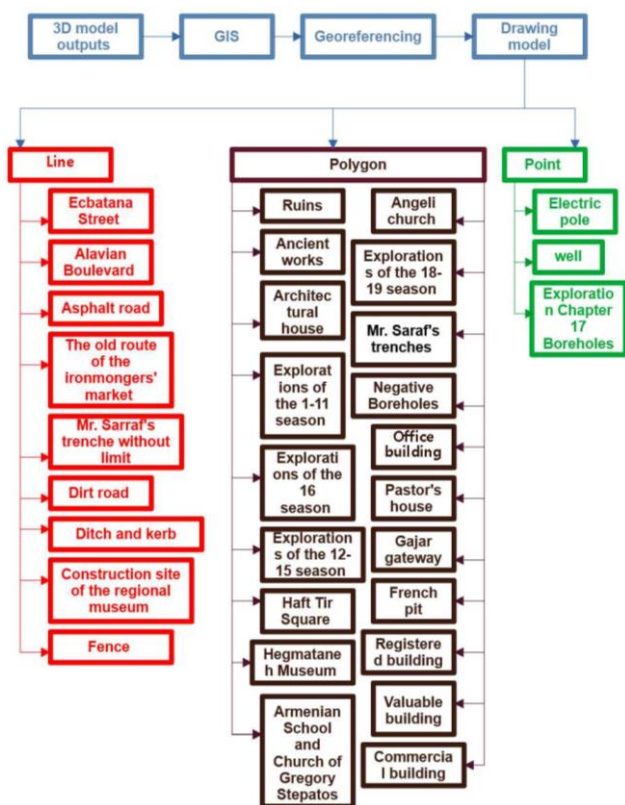


شکل ۳: معماری محوطه هگمتانه [۳۳].

Fig. 3: The architecture of hagmatana site [33]

زمین مرجع کردن و تجمیع داده‌های مکانی برای ایجاد پایگاه اطلاعاتی باستان‌شناسی محوطه هگمتانه

در این پژوهش، در بازدید میدانی از محوطه، تصاویر و ویدئوهایی با تلفن همراه تهیه شد. سپس با استفاده از نرم‌افزار گلوبال میر، ترسیم عوارض روی ارتوفتو سال ۱۳۹۶ سازمان نقشه‌برداری انجام گرفت. در این مرحله، برای ترسیم عوارض موجود در محوطه، از سیستم اطلاعات مکانی به گونه‌ای به کار گرفته شد که جزئیات فیزیکی و عملکردی عوارض با دقت بالا نمایش داده شوند. به طوری که عوارض با مساحت



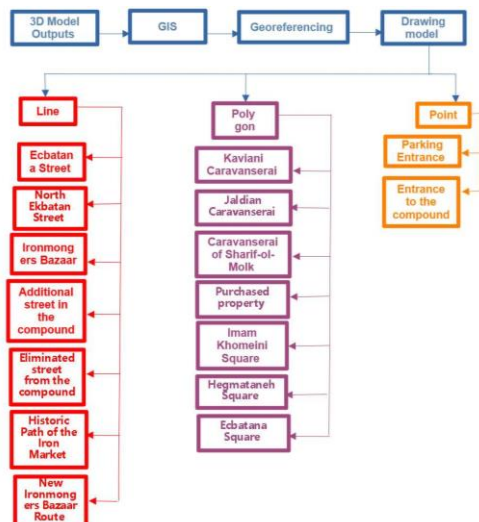
شکل ۷: فلوچارت تصحیح و ترسیم نقشه بازنگری تعیین عرصه و پیشنهاد حریم تپه هگمتانه

Fig. 7: Flowchart of the Correction and Drafting Process for the Revised Map of the Delimitation and Proposed Buffer Zone of the Hegmataneh Mound



شکل ۸: فلوچارت تصحیح و ترسیم نقشه محوطه هگمتانه - همدان

Fig. 8: Flowchart for correction and drafting of the Hagmatana site - Hamedan map

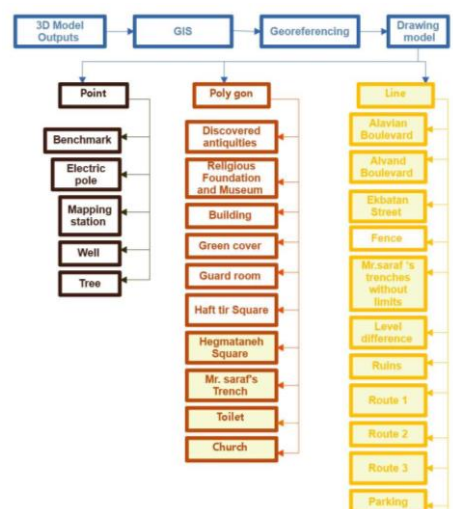


شکل ۵: فلوچارت تحلیل و ترسیم تغییرات ساختاری و شهری در اطراف محوطه باستان‌شناسی

Fig. 5: Flowchart for analyzing and mapping structural and urban changes around the archaeological site

تصحیح و ترسیم نقشه‌های توپوگرافی تپه هگمتانه و تعیین حریم محوطه هگمتانه

با استفاده از دو نقشه پایگاه میراث فرهنگی هگمتانه در قالب کد، با عنوان نقشه توپوگرافی تپه هگمتانه در مقیاس ۱/۱۰۰۰ توسط پیمانکار آقای محمود عباسی و دیگری با عنوان بازنگری تعیین عرصه و پیشنهاد حریم تپه هگمتانه در مقیاس ۱/۵۰۰ تحت سرپرستی آقای مهرداد ملک‌زاده و طراحی و ترسیم آقای ذبیح‌الله بختیاری در سال ۱۳۹۹ و همچنین چهار نقشه به‌دست‌آمده از سازمان نقشه‌برداری کشور با عنوان تپه هگمتانه - همدان در مقیاس ۱/۵۰۰ برای سال ۱۳۹۰ با سیستم تصویر جهانی مرکاتور عرضی (UTM)، مبنای مسطحاتی UTM سراسری و مبنای ارتفاعی سطح متوسط دریا (MSL)، به‌صورت ترسیماتی دسته‌بندی شده ارائه می‌شود که وضعیت توپوگرافی و جغرافیایی محوطه را نیز نشان می‌دهد (شکل ۶ و ۷).



شکل ۶: فلوچارت تصحیح و ترسیم نقشه توپوگرافی محوطه هگمتانه

Fig. 6: Flowchart for correcting and drawing the topographic map of Hegmataneh site

استفاده از تصاویر هوایی، ماهواره‌ای و سیستم اطلاعات سیستم اطلاعات مکانی در شناسایی تغییرات محوطه

محوطه تپه هگمتانه در طی سال گذشته تا امروز دستخوش تغییراتی شده است. این تغییرات از طریق فرایند زمین مرجع سازی با استفاده از تصاویر هوایی و ماهواره‌ای سال‌های ۱۳۹۶، ۱۴۰۱ و ۱۴۰۳ که توسط سازمان نقشه برداری، میراث فرهنگی همدان و منابع ماهواره‌ای تهیه شده‌اند، شناسایی شده‌اند. همچنین، با استفاده از خروجی‌های مدل سه بعدی، این تغییرات به طور دقیق تر مورد بررسی قرار گرفته‌اند. در ادامه، مهم ترین یافته‌ها و تغییرات به دست آمده از این تحلیل‌ها، به

تفکیک بازه‌های زمانی و با تأکید بر نتایج مدل‌های سه بعدی ارائه خواهد شد (شکل ۹ و ۱۰).

بررسی تصویر ارائه شده نشان دهنده تغییرات قابل توجهی در این محدوده است. یکی از این تغییرات، وجود دیوار سنگی جدید در پشت کلیسا است که با رنگ مشکی مشخص شده و نشان دهنده تحولی در ساختار منطقه است. همچنین، پله‌های جدیدی که با رنگ قرمز در اطراف کلیسا ساخته شده‌اند، به تغییرات ساختاری این بخش از محوطه اشاره دارند. این تغییرات به طور کلی تحولات قابل توجهی را در ظاهر و ساختار این منطقه به نمایش می‌گذارند.



شکل ۹: بررسی تغییرات مجموعه کلیسا با استفاده از تصاویر هوایی، الف) تصویر هوایی سیاه و سفید اشمیت، سازمان نقشه برداری سال ۱۳۱۶ [۳۴]، ب) تصویر هوایی رنگی سازمان نقشه برداری سال ۱۳۹۶ [۳۴]، پ) تصویر هوایی رنگی سال ۱۴۰۱ موجود در سایت یونسکو [۳۵]، ت) تصویر برد کوتاه رنگی نگارنده سال ۱۴۰۳

Fig. 9: Analysis of changes in the church complex using aerial images: a) Black and white aerial image of Schmidt, Mapping Organization, year 1937 [34], b) Color aerial image, Mapping Organization, year 2017 [34], c) Color aerial image from the year 2022, available on the UNESCO website. [35], d) Close range image by the author, year 2024



شکل ۱۰: بررسی تغییرات سر درب قاجاریه با استفاده از تصاویر هوایی، الف) تصویر هوایی سیاه و سفید اشمیت، سازمان نقشه‌برداری سال ۱۳۱۶ [۳۴]، ب) تصویر هوایی رنگی سازمان نقشه‌برداری سال ۱۳۹۶ [۳۴]، پ) تصویر هوایی رنگی آرشیو روابط عمومی میراث فرهنگی همدان سال ۱۴۰۲ [۳۶]، ت) تصویربرد کوتاه رنگی نگارنده سال ۱۴۰۳
 Fig. 10: Analysis of changes in the Qajar gateway using aerial images: a) Black and white aerial image of Schmidt, Mapping Organization, year 1937 [34], b) Color aerial image, Mapping Organization, year 1977 [34], c) Color aerial image from the Public Relations Archive of Hamedan Cultural Heritage, year 2023 [36], d) Close range image by the author, year 2024

باشیم و در نتیجه، بررسی کامل‌تری از اهمیت این سر درب در بافت تاریخی محوطه امکان‌پذیر نباشد. مسیر کارگاه مرمت برج در سال ۱۴۰۲ با استفاده از آرشیو روابط عمومی میراث فرهنگی همدان شناسایی و ترسیم شد. مقایسه این مسیر با تصویر ماهواره‌ای گوگل ارث از سال ۱۴۰۳ نشان داد که این مسیر برای انتقال مصالح به کارگاه مرمت مورد استفاده قرار گرفته است. علاوه بر این، اثرات تردد وسایل نقلیه در این مسیر باعث ایجاد تغییرات ظاهری در آن شده است که این تغییرات به‌وضوح در تصاویر قابل مشاهده هستند (شکل ۱۱).

نتایج و بحث

نتایج زمین مرجع کردن داده‌ها و تحلیل تغییرات ساختاری و شهری اطراف محوطه باستان‌شناسی

سر درب موجود در محوطه، علی‌رغم تغییراتی که در اطراف آن رخ داده، همچنان ساختار کلی خود را حفظ کرده است. در حال حاضر، پله‌های سنگی در مقابل آن قرار گرفته که به طور واضح نشان‌دهنده تحولی در نحوه دسترسی به این بخش از محوطه است. این پله‌ها ممکن است در گذشته وجود نداشته یا به شکل متفاوتی طراحی شده باشند. همچنین، تیرهای برق که در اطراف سر درب قرار دارند، به وضوح نمای مدرن‌تری به این منطقه افزوده‌اند که ممکن است با ویژگی‌های تاریخی محوطه تضاد ایجاد کرده باشد. با وجود این تغییرات، سر درب از نظر ساختاری هنوز به طور عمده همان ویژگی‌های اصلی و اولیه خود را حفظ کرده است و نمای آن تغییرات اساسی نداشته است. با این حال، متأسفانه اطلاعات دقیقی درباره سبک معماری این سر درب و چگونگی اجرای طرح آن در دسترس نیست. فقدان چنین اطلاعاتی باعث می‌شود که تحلیل دقیق‌تری از تاریخچه، سبک و ویژگی‌های معماری آن نداشته

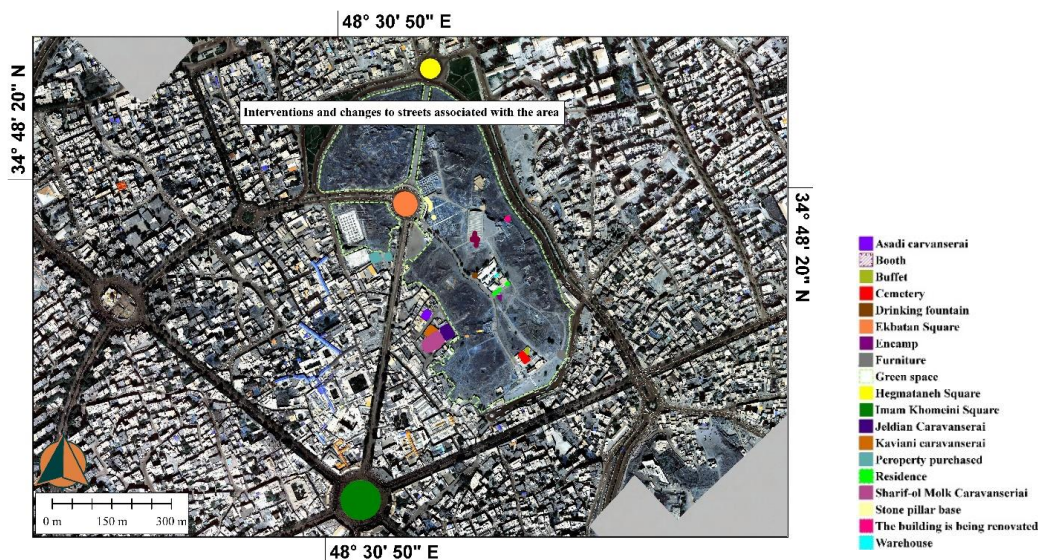
باستان‌شناسی فضایی و مطالعه ساختار شهری فراهم می‌سازد. تحلیل نحوه توزیع این عناصر در سطح فضا و ارتباط آن‌ها با مسیرهای ارتباطی تاریخی یا شرایط توپوگرافی منطقه، ممکن است به شناسایی نحوه قرارگیری و کارکرد اجزای مختلف فضا کمک کند که در دوره‌های گذشته شکل گرفته‌اند (شکل ۱۲).

بررسی نتایج ترسیمات در نرم‌افزار گلوبال می‌ر نشان می‌دهد که پس از انجام فرایندهای لازم، داده‌های مکانی به مدل‌های ترسیم مختلفی از جمله مدل سطحی تبدیل شده‌اند تا امکان تجزیه و تحلیل دقیق‌تری از ساختار و ویژگی‌های مورد نظر فراهم شود. در نهایت، خروجی این فرایندها در قالب نقشه ارائه شده است. وجود چنین داده‌هایی، بستر مناسبی برای تحلیل‌های عمیق‌تر در حوزه‌هایی نظیر معماری سنتی،



شکل ۱۱: بررسی مسیر ایجاد شده با استفاده از تصاویر هوایی و ماهواره‌ای، (الف) تصویر هوایی رنگی آرشیو روابط عمومی میراث فرهنگی همدان سال ۱۴۰۲ [۳۷]، (ب) تصویر ماهواره ای رنگی گوگل ارث سال ۱۴۰۳ [۳۸]

Fig. 11: Examination of the created path using aerial and satellite images: a) Color aerial image from the Public Relations Archive of Hamedan Cultural Heritage, year 2023 [37], b) Color satellite image from Google Earth, year 2024 [38]



شکل ۱۲: نقشه مداخلات و تغییرات خیابان‌های اطراف منطقه هگمتانه با مدل سطحی بر اساس عکس ارتوفتو سازمان نقشه برداری سال ۱۳۹۶ در نرم‌افزار گلوبال می‌ر
Fig. 12: Map of interventions and changes to streets around the Hegmataneh area with a surface model based on the 2017 orthophoto of the Mapping Organization in Global Mapper software

بررسی نتایج ترسیمات در نرم‌افزار گلوبال می‌ر نشان می‌دهد که پس از انجام مراحل پردازش، داده‌های مکانی به صورت مدل خطی ترسیم

نتایج تصحیح و ترسیم نقشه‌های میراث فرهنگی همدان و سازمان نقشه‌برداری کشور

اقدام جلوگیری از ریزش بدنه کلیسا و حفظ استحکام پی آن در برابر آسیب‌های احتمالی بوده است. با این حال، در خصوص شیوه معماری و طراحی پله‌های اطراف کلیسا اطلاعات دقیقی ارائه نشده است؛ اما آن چه از مقایسه با تصاویر سال‌های گذشته مشخص است خانه‌های اطراف کلیسا به دلیل کم بودن قدمت تاریخی نسبت به مجموعه کلیسا تخریب شدند و طراحی مسیرهای پله در اطراف کلیسا بر اساس شیب و ناهمواری‌های سطح زمین به منظور دسترسی راحت برای گردشگران قرار داده شده است (شکل ۱۴).

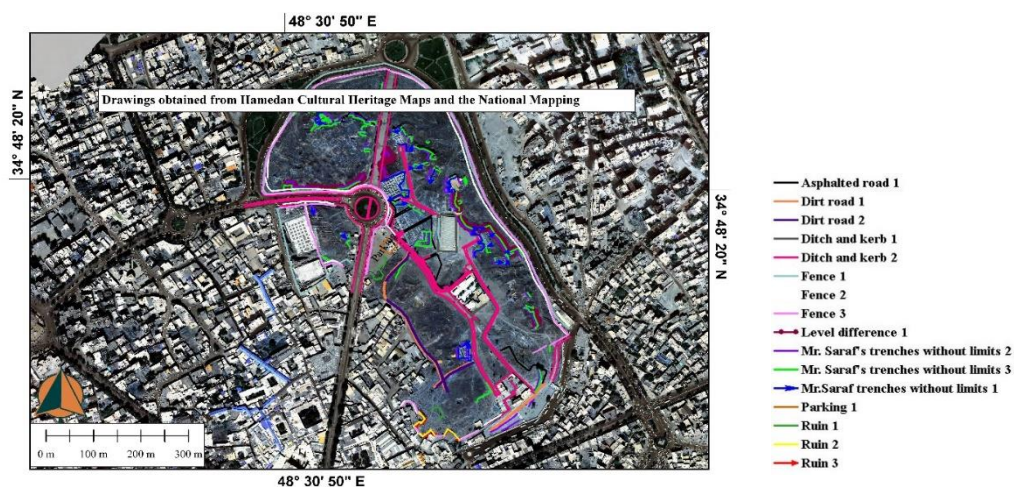
○ طبق اطلاعات به دست آمده در خصوص موجودیت سر درب قاجاریه، مشخص شد کل بافت محوطه هگمتانه در گذشته بافت مسکونی بوده است و در دهه‌های ۴۰ و ۵۰ فرایند آزادسازی و تخریب خانه‌ها انجام شده است. بخشی از ورودی یکی از این خانه‌ها که متعلق به آن زمان بوده، به عنوان سر درب قاجاریه در محوطه حفظ و نگهداری شده است. از مقایسه تصاویر سال‌های گذشته مشخص شد خانه‌های دیگر نسبت به سر درب قدمت تاریخی نداشته‌اند و بدین منظور تخریب شدند. در حال حاضر، اطراف سر درب با سنگ‌فرش پوشانده شده تا پیوندی میان گذشته و حال ایجاد شود و دسترسی گردشگران بهبود یابد. با این حال، حضور تیرهای برق در اطراف بنا با ماهیت تاریخی محوطه همخوانی ندارد و از زیبایی بصری آن کاسته است (شکل ۱۵).

○ طبق اطلاعات به دست آمده، طراحی مسیر به صورت سلیقه‌ای و بدون توجه به دسترسی خیابان کنار محوطه انجام شده که روند مناسبی نیست. روند طراحی در دو سال اخیر ثابت بوده و برنامه‌ریزی‌های مربوط به مسیر متوقف یا بدون تغییر مانده است. این ثبات ممکن است نشان‌دهنده تعادل منطقه از نظر حمل‌ونقل و دسترسی باشد، به طوری که نیاز به تغییرات اساسی احساس نشده است (شکل ۱۶).

شده‌اند. در این میان، ترسیمات شماره ۱ و ۲ که به ترتیب مربوط به نقشه توپوگرافی و نقشه بازنگری تعیین عرصه و پیشنهاد حریم محوطه میراث فرهنگی هستند، تطابق دقیقی با ارتوفتو سازمان نقشه برداری سال ۱۳۹۶ نداشته و از هم‌پوشانی کافی برخوردار نبوده‌اند. این مسئله بیانگر آن است که در فرایند ترسیم این نقشه‌ها، به‌ویژه در تطبیق آن‌ها با موقعیت واقعی زمین، خطای مکانی قابل توجهی وجود داشته است. چنین ناهماهنگی‌هایی می‌تواند در فرایند تصمیم‌گیری‌های حفاظتی و برنامه‌ریزی‌های شهری، به‌ویژه در محدوده‌های دارای ارزش تاریخی و باستان‌شناسی، چالش‌برانگیز باشد. با این حال، باید توجه داشت که داده‌های استخراج‌شده از نقشه بازنگری عرصه و حریم، نسبت به نقشه توپوگرافی از دقت توصیفی و جزئیات بیشتری برخوردار بوده و اطلاعات به‌روزتر و جامع‌تری را در خصوص محدوده مورد بررسی ارائه می‌دهد. این امر نشان‌دهنده بروز رسانی درک مکانی و فضایی از وضعیت تپه باستانی بوده و در تحلیل‌های آتی می‌تواند مرجع دقیق‌تری تلقی شود، به شرط آنکه موقعیت‌یابی مکانی نیز بهبود یابد. در مقابل، ترسیمات شماره ۳ که متعلق به سازمان نقشه‌برداری کشور بوده و مربوط به نقشه دقیق تپه هگمتانه شهر همدان است، با دقت مکانی بالایی تهیه و ترسیم شده‌اند. این ترسیمات، بدون بروز خطا بر روی تصویر ارتوفتو سال ۱۳۹۶ منطبق شده‌اند که این خود نشان‌دهنده‌ی صحت و اعتبار فنی بالای داده‌های این سازمان در مقایسه با منابع دیگر است. چنین دقتی در هم‌پوشانی، نقش مهمی در صحت تحلیل‌های مکان‌منا، تهیه گزارش‌های مستند، و تدوین طرح‌های حفاظتی و مدیریتی ایفا می‌کند (شکل ۱۳).

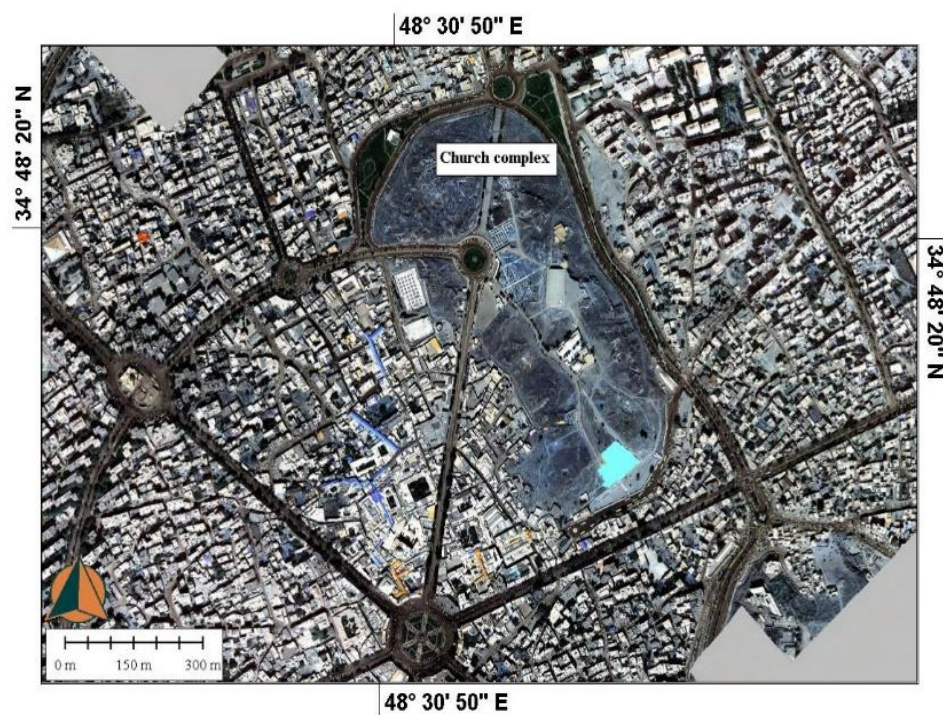
نتایج استفاده از تصاویر هوایی، ماهواره‌ای و سیستم اطلاعات محوطه

○ طبق اطلاعات به دست آمده دیوار سنگی پشت کلیسا به‌منظور استحکام‌بخشی و حفاظت از این بنا احداث شده است. هدف از این



شکل ۱۳: ترسیمات حاصل از نقشه‌های سازمان میراث فرهنگی همدان و سازمان نقشه برداری کشور بامدل خط بر روی ارتوفتو سازمان نقشه برداری سال ۱۳۹۶ در نرم افزار گلوبال مهر

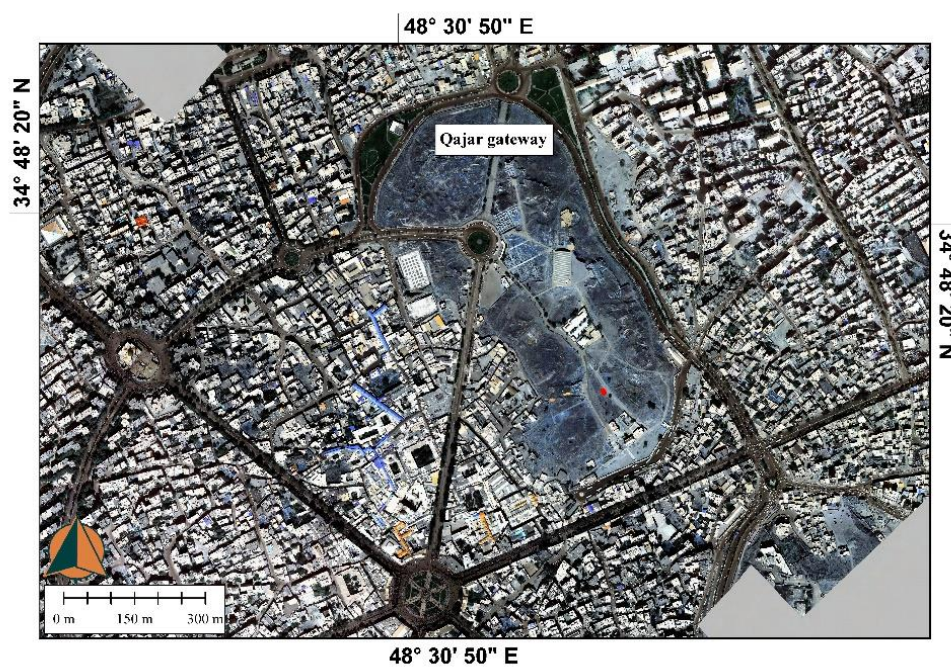
Fig. 13: Topographic map drawings of Hegmataneh site with the surface model overlaid on the 2017 orthophoto from the National Cartographic Center in Global Mapper software



 Church complex

شکل ۱۴: نقشه تغییرات مجموعه کلیسا با مدل سطح بر روی ارتوفتو سازمان نقشه‌برداری سال ۱۳۹۶ در نرم‌افزار گلوبال میپ

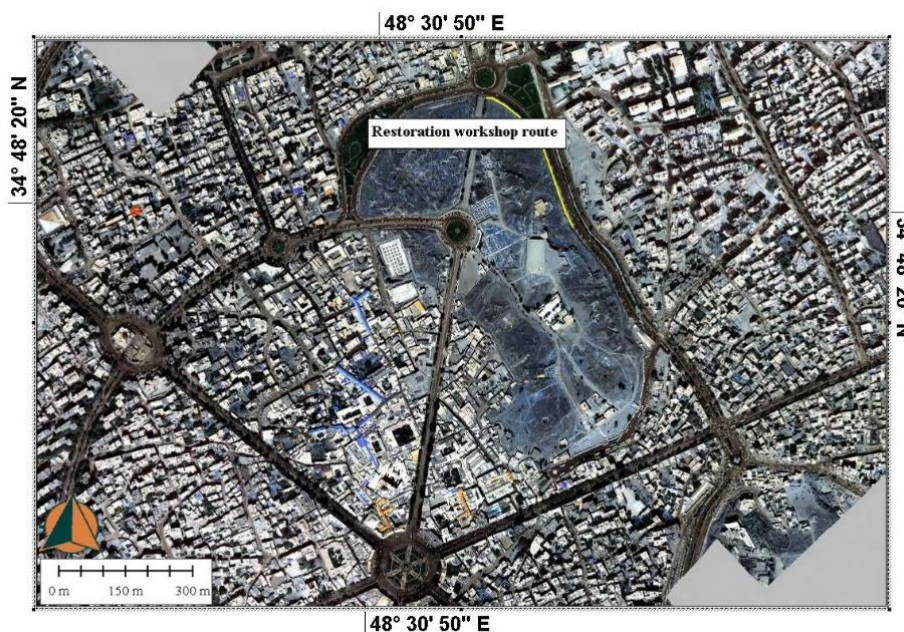
Fig. 14: The map of changes in the church complex with the surface model overlaid on the 2017 orthophoto from the National Cartographic Center in Global Mapper software



 Qajar gateway

شکل ۱۵: نقشه سر درب قاجاریه با مدل سطح بر روی ارتوفتو سازمان نقشه‌برداری سال ۱۳۹۶ در نرم‌افزار گلوبال میپ

Fig. 15: The map of the Qajar gateway with the surface model overlaid on the 2017 orthophoto from the National Cartographic Center in Global Mapper software



Restoration workshop route

شکل ۱۶: نقشه مسیر کارگاه مرمت با مدل خط روی ارتوفتو سازمان نقشه‌برداری سال ۱۳۹۶ در نرم‌افزار گلوبال مپر

Fig. 16: Restoration workshop route map with line model over the 2017 orthophoto from the National Cartographic Center in Global Mapper software

نتیجه‌گیری و پیشنهادات

مسائل فنی و حفاظتی را پوشش دهد، بلکه بتواند با نیازهای مدرن و الزامات اجرایی نیز هم‌راستا باشد. در همین راستا، استفاده از داده‌های ماهواره‌ای و تصاویر هوایی به‌ویژه در مقیاس‌های بزرگ، می‌تواند به بهبود دید کلی، برنامه‌ریزی دسترسی و هماهنگی‌های مدیریتی در سطح محوطه کمک کند. البته اجرای این رویکردها مستلزم رعایت دقیق اصول علمی، دقت در تحلیل داده‌ها و حفظ ارزش‌های فرهنگی-تاریخی است. در حالی‌که استفاده از نقشه‌های پیشنهادی GIS می‌توانست گامی مؤثر در بهبود مدیریت مجموعه باشد، به دلیل عدم دسترسی به اطلاعات زیرساختی مانند تأسیسات برقی، شبکه آبرسانی و سایر داده‌های فنی، و همچنین عدم امکان برگزاری جلسات با کارشناسان مسئول مجموعه، این برنامه به مرحله اجرا نرسید. این مسئله نشان‌دهنده اهمیت هماهنگی میان بخش‌های مختلف اجرایی، تخصصی و تصمیم‌ساز است. در نهایت، پیشنهاد می‌شود که در آینده نزدیک، از ظرفیت فناوری‌های جدید مانند هوش مصنوعی، یادگیری ماشین، واقعیت افزوده و مجازی، اینترنت اشیا، بلاک‌چین و مدل‌سازی اطلاعات ساختمان تاریخی (HBIM) استفاده شود. این فناوری‌ها می‌توانند در مستندسازی دقیق، پیگیری لحظه‌ای وضعیت، حفاظت هوشمند و مدیریت یکپارچه آثار تاریخی نقشی کلیدی ایفا کنند و موجب ارتقاء سطح بهره‌وری و کارایی در نگهداری میراث فرهنگی شوند.

مشارکت نویسندگان

در این مقاله، نویسندگان به نسبت برابر مشارکت داشته‌اند.

در این پژوهش، به‌منظور دستیابی به مدیریت بهتر محوطه تاریخی هگمتانه، مجموعه‌ای از داده‌های میدانی، شامل تصاویر دقیق و پرسش‌نامه‌ها جمع‌آوری شد. این داده‌ها به‌عنوان پایه‌ای برای تحلیل‌های بعدی، به‌ویژه در بخش نرم‌افزاری استفاده شدند. در این مرحله، موقعیت دقیق محوطه با استفاده از خروجی‌های مدل سه‌بعدی و نقشه‌های تهیه‌شده از منابع مختلف بررسی شد و مشکلات، ناهماهنگی‌ها و اشکالات موجود در تطابق اطلاعات مکانی شناسایی گردید. در این میان، استفاده از ابزارهایی مانند گلوبال مپر و اجی سافت متاشیپ به‌عنوان روش‌های کاربردی و دردسترس، نقش مهمی در تحلیل و مدیریت آثار باستانی ایفا کرده است. این رویکرد ترکیبی، اطلاعات دقیق و جامعی از وضعیت فعلی محوطه فراهم آورد که می‌تواند زمینه‌ساز تصمیم‌گیری‌های علمی در زمینه‌های مرمت، حفاظت، مدیریت و حتی برنامه‌ریزی گردشگری باشد. اطلاعات حاصل نه تنها درک بهتری از ساختار فضایی محوطه ایجاد کردند، بلکه بستری برای مستندسازی دقیق، پیگیری تغییرات و برنامه‌ریزی بلندمدت فراهم نمودند. با این حال، در کنار مزایای این روش‌ها، چالش‌هایی نیز وجود دارد؛ از جمله نیاز به نظارت پیوسته و دقیق، لزوم مستندسازی علمی و دقیق داده‌ها، حفظ اصالت و هویت تاریخی محوطه، و پاسخ‌گویی به نیازهای واقعی و به‌روز آن. این عوامل باید هم‌زمان در نظر گرفته شوند تا نتایج حاصل از پژوهش‌ها و اقدامات اجرایی از کارایی و ماندگاری لازم برخوردار باشند. برای بهره‌برداری درست و حفظ اصالت تاریخی محوطه هگمتانه، اتخاذ رویکردی جامع، علمی و میان‌رشته‌ای ضروری است؛ رویکردی که نه تنها

[11] Ross SA, Sobotkova A, Burgers GJ. Remote Sensing and Archaeological Prospection in Apulia, Italy. *Journal of Field Archaeology*. 2009; 36(3): 191–206. doi: 10.1179/009346909791070826.

[12] Buttingsrud B, A.-C. B, Laboratory I. Superresolution of Hyperspectral Images. *Chemometrics and Intelligent Laboratory Systems*. 2006; 84(1): 62–68. doi: 10.1016/j.chemolab.2006.04.014.

[13] Liu L, Jing Y. Hyperspectral Remote Sensing Images Terrain Classification in DCT SRDA Subspace. *The Journal of China Universities of Posts and Telecommunications*. 2015; 22(1): 65–71. doi: 10.1016/S1005-8885(15)60626-4.

[14] Sever TL. Remote Sensing Methods. In *Science and Technology in Historic Preservation*. New York, NY, USA: Springer. 2000; 23–40. doi: 10.1007/978-1-4615-4145-5_2.

[15] Tong Q, Xue Y, Zhang L. Progress in Hyperspectral Remote Sensing Science and Technology in China Over the Past Three Decades. *IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing*. 2014. doi: 10.1109/JSTARS.2013.2267204.

[16] Vasco G, et al. Development of a Hyperspectral Imaging Protocol for Painting Applications at the University of Seville. *Heritage*. 2024; 7(1). doi: 10.3390/HERITAGE7110281/S1.

[17] Di Benedetto A, de Almieda Nieto LM, Candeo A, Valentini G, Comelli D, Alfeld M. Multivariate Analysis on Fused Hyperspectral Datasets Within Cultural Heritage Field. *EPJ Web of Conferences*: 2024 July; EDP Sciences. pp. 14007. doi: 10.1051/EPJCONF/202430914007.

[18] Wang Y, et al. Spectral Unmixing of Pigments on Surface of Painted Artefacts Considering Spectral Variability. *ISPRS Annals of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*: 2024 July. pp. 403–410. doi: 10.5194/ISPRS-ANNALS-X-4-2024-403-2024.

[19] Martinelli E, et al. Use of Hyperspectral Imaging to Monitor the Effectiveness of Plasma-Generated Atomic Oxygen for Non-Contact Cleaning of Indigo Dyed Silk. *EPJ Web of Conferences*: 2024 July; EDP Sciences. pp. 14008. doi: 10.1051/EPJCONF/202430914008.

[20] Srivastava S, Rastogi V, Jaiswal G, Sharma A. Hyperspectral Imaging in Document Forgery. *Lecture Notes on Data Engineering and Communications Technologies*. Springer, Singapore. 2022; 105–115. doi: 10.1007/978-981-16-6289-8_11.

[21] Khan MAA, Haider G, Khan A. Hyperspectral Document Image Analysis Using Unsupervised Learning. *Authorea Preprints*. Authorea. 2023; 1–5. doi: 10.36227/TECHRXIV.23303918.V1.

[22] Pallocci M, et al. Forensic Applications of Hyperspectral Imaging Technique: A Narrative Review. *Medico-legal Journal*. 2022; 90: 216–220. doi: 10.1177/00258172221105381.

تشکر و قدرانی

بدین‌وسیله از کلیه عزیزانی که ما را در انجام این تحقیق یاری کردند، صمیمانه تشکر می‌کنیم

تعارض و منافع

«هیچ‌گونه تعارض منافع توسط نویسندگان بیان نشده است.»

منابع و مآخذ

[1] J. H. Stubbs and K. L. R. McKee, "Applications of Remote Sensing to the Understanding and Management of Cultural Heritage Sites," *Geoscience and Remote Sensing*, vol. 56, no. 4, pp. 23–30, 2014. doi: 10.1109/TGRS.2013.2277817.

[2] Uslu Koçyiğit F, Durduran SS, Alkan T. Creating Geographical Information System Database with Unmanned Aerial Vehicles in Archaeological Areas; The Case of Anemurium Ancient City. *Mühendislik Bilimleri ve Tasarım Dergisi*. 2022; 10(3): 831–843. doi: 10.21923/JESD.999829.

[3] Verhagen P. *Spatial Analysis in Archaeology: Moving into New Territories*. Springer, Cham. 2018. doi: 10.1007/978-3-319-25316-9_2.

[4] Reddy GPO. *Spatial Data Management, Analysis, and Modeling in Geographical Information System: Principles and Applications*. Springer, Cham. 2018; 127–142. doi: 10.1007/978-3-319-78711-4_7.

[5] Al-Ruzouq R, Abu Dabous S. Archaeological Site Information Modelling and Management Based on Close-Range Photogrammetry and Geographical Information System. *Conservation and Management of Archaeological Sites*. 2017; 19(3): 156–172. doi: 10.1080/13505033.2017.1343061.

[6] Ivanova K, Dobрева M, Stanchev P, Vanhoof K. Discovery and use of art images on the web: an overview. 3rd International Conference dedicated on Digital Heritage (EuroMed2010): 2010 November 8–13: Limassol, Cyprus.

[7] Van Riel S. Exploring the use of 3D GIS as an analytical tool in archaeological excavation practice [master's thesis]. Lund: Lund University; 2016.

[8] Verhoeven G. Taking Computer Vision Aloft – Archaeological Three-Dimensional Reconstructions from Aerial Photographs with Photoscan. *Archaeological Prospection*. 2011; 18: 67–73. doi: 10.1002/ARP.399.

[9] Marchi ML. The Archaeologic Map and GIS in Ancient Topography Researches: The 'Carta Archeologica d'Italia—Forma Italiae' Project. *Journal of Earth Science and Engineering*. 2015; 5(6). doi: 10.17265/2159-581x/2015.06.006.

[10] Doneus M, Verhoeven G, Atzberger C, Wess M, Ruš M. New Ways to Extract Archaeological Information from Hyperspectral Pixels. *Journal of Archaeological Science*. 2014. Elsevier.

[36] Hamedan Cultural Heritage, Tourism, and Handicrafts Department. [Accessed 19th December 2024].

[37] Public Relations of Hamedan Cultural Heritage. [Accessed 11th January 2025].

[38] Google Earth. [Accessed 11th January 2025].

معرفی نویسندگان

AUTHOR(S) BIOSKETCHES



مهرنوش شریف‌زاده دانشجوی کارشناسی‌ارشد رشته مهندسی نقشه‌برداری گرایش فتوگرامتری دانشگاه شهید بهشتی است. زمینه‌های تحقیقاتی مورد علاقه ایشان شامل فتوگرامتری و سنجش‌ازدور است که در این حوزه‌ها فعالیت‌های پژوهشی متعددی انجام داده و نتایج پژوهشی خود را در همایش‌ها و کنفرانس‌های علمی ارائه کرده است.

Sharifzadeh, M. Faculty of Civil, Water and Environmental Engineering, Shahid Beheshti University, Tehran, Iran.

mehrnoushsharifzadeh@gmail.com



علیرضا قراگوزلو دانشیار دانشکده مهندسی عمران، آب و محیط‌زیست دانشگاه شهید بهشتی، یک متخصص برجسته و فعال در زمینه محیط‌زیست و سیستم اطلاعات مکانی است. آثار او شامل بیش از ۵۵ مقاله کنفرانسی، ۲۹ مقاله ژورنالی و ۱۰ کتاب است. وی عضو هیئت مدیر انجمن متخصصان محیط‌زیست ایران و همچنین عضو کمیسیون تخصصی سنجش‌ازدور و سیستم اطلاعات جغرافیایی وزارت علوم و تحقیقات فناوری هستند.

Gharagozlo, A . Associate professor at the Department of Surveying Engineering, Faculty of civil, water and Environmental Engineering, Shahid Beheshti University, Tehran, Iran.

a_gharagozlo@sbu.ac.ir



سعید صادقیان دانشیار دانشکده مهندسی عمران، آب و محیط‌زیست دانشگاه شهید بهشتی، دارای مدرک دکتری از دانشگاه تهران در رشته مهندسی نقشه‌برداری فتوگرامتری است. وی علاوه بر تدریس در دانشگاه دارای سوابق علمی و اجرایی بسیاری نیز است. او

به‌عنوان عضو هیئت تحریریه نشریه علمی پژوهش‌های سنجش‌ازدور و اطلاعات مکانی فعالیت دارد و تجربه ریاست آموزشکده نقشه‌برداری

[23] Ludvigsen M, Johnsen G, Ødegård Ø, Mogstad AA, Sørensen AJ. Underwater Hyperspectral Imaging: A New Tool for Marine Archaeology. *Applied Optics*. 2018; 57(12): 3214-3223. doi: 10.1364/AO.57.003214.

[24] MacDonald LW, et al. Assessment of Multispectral and Hyperspectral Imaging Systems for Digitisation of a Russian Icon. *Heritage Science*. 2017. doi: 10.1186/S40494-017-0154-1/FIGURES/14.

[25] Farsi Madan M, Haji Zadeh Bastani K, Shahbazi Shirani H, Alizadeh Sola M. [Application of photogrammetry in documentation of inscriptions on historical buildings: A case study of the dome of the Sheikh Safi al-Din Ardabili shrine]. *Journal of Research on Archaeometry*. 2021; 6(2): 251. [In Persian] doi: 10.29252/jra.6.2.251.

[26] Miri Ahoodashti M, Niknami K. [Introduction to satellite remote sensing systems and their applications in archaeology: Case study of Behshahr Plain - Mazandaran]. *Journal of Research on Archaeometry*. 2020; 6(1): 1-10. [In Persian] doi: 10.29252/JRA.6.1.1.

[27] Sadeghian S, Rajabi A, Farokhi M. [Investigation of Changes in the Ancient Areas of Hegmataneh of Hamadan using Remote Sensing and Spatial Information System]. *Athar*. 2019; 40(3): 148. [In Persian] doi:10.30699/athar.40.3.148.

[28] Salek R, Sadeghian S, Javadi M. Hyperspectral images as a new approach for cultural heritage documentation. *Shaheed Rajai Teacher Training University*. 2018. [In Persian].

[29] Apostolou G, et al. Integrating Legacy Survey Data into GIS-Based Analysis: The Rediscovery of the Archaeological Landscapes in Grevena (Western Macedonia, Greece). *Archaeological Prospection*. 2024. doi: 10.1002/ARP.1926.

[30] Kuzyk Z. The Use of Modern Measurement Methods in the Inventory of Endangered Cultural Heritage Objects in Lviv. *Journal of Modern Technologies for Cultural Heritage Preservation*. 2023. doi: 10.69534/JMTCHP/191347.

[31] Smaczyński M, Lorek D, Zagata K, Horbiński T. Cultural Heritage With the Use of Low-Level Aerial Survey Techniques, Space Modelling and Multimedia Reconstruction of the Topographic Landscape (Example of a Windmill in Western Poland). *Journal of Cartography and Geographic Information*. 2022. doi: 10.1007/S42489-022-00122-6.

[32] Ciski M, Rzasa K, Ogryzek M. Use of GIS Tools in Sustainable Heritage Management—The Importance of Data Generalization in Spatial Modeling. *Sustainability*. 2019. doi: 10.3390/SU11205616.

[33] Wikipedia, The Free Encyclopedia. [Accessed 17th December 2024].

[34] National Cyberspace Center. [Accessed 19th December 2024].

[35] UNESCO World Heritage Centre. [Accessed 18th December 2024].

Sadeghian, S. Gharagozlo, A . Associate professor at the Department of Surveying Engineering, Faculty of civil, waterb and Environmental Engineering, Shahid Beheshti University, Tehran,Iran.

✉ sa_sadeghian@sbu.ac.ir

سازمان نقشه‌برداری کشور در بازه زمانی ۱۳۸۵ تا ۱۳۹۲ را نیز دارا است.

Citation (Vancouver): Sharifzadeh M, Gharagozlo A, Sadeghian S. [Spatial modeling for optimal management of archaeological sites using photogrammetry and spatial information systems (Study area: Hegmataneh, Hamadan)]. *J. RS. GEOINF. RES.* 2025; 3(1): 37-52

 <https://doi.org/10.22061/jrsgr.2025.11863.1097>



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

Predicting Corn Yield Using Ensemble Learning with Satellite and Meteorological Data

A. Sabzali Yameqani*, A. A. Alesheikh

Department of Geospatial Information Systems, Faculty of Geodesy and Geomatics Engineering, K. N. Toosi University of Technology, Tehran, Iran

ABSTRACT

Received: 31 August 2024
 Reviewed: 23 September 2024
 Revised: 22 October 2024
 Accepted: 03 December 2024

KEYWORDS:

Ensemble Learning
 Yield Prediction
 Pelican Optimization Algorithm
 Corn

* Corresponding author

✉ asabzali@mail.kntu.ac.ir

☎ (+9821) 88786212

Background and Objectives: Precise agricultural yield prediction is among the most important tools for managing agricultural resources, improving food security, and enhancing the productivity of international trade in agricultural products. The satellite remote sensing images has become widely adopted because traditional methods cannot provide the needed accurate and timely predictions, and it covers large areas while providing accurate data. The advances in machine learning and ensemble learning have identified the complex interaction of environmental variables with crop yield. In modern times, ensemble learning models have achieved much higher prediction accuracy and provided useful insights to farmers and policy makers.

This study aims to develop an innovative model that combines the XGBoost algorithm with the Pelican Optimization Algorithm (POA) to predict corn yields more accurately in the U.S. Midwest. The approach will provide an opportunity for the pre-harvest yield prediction by considering the plant phenological stages and optimal time range from July to August. The model will help the decision-makers to take effective measures on resource management to overcome the climate fluctuations and develop better agricultural policies.

Methods and Materials: This research focuses on predicting corn yields in five key corn-producing states in the U.S. Midwest (Illinois, Iowa, Minnesota, North Dakota, and South Dakota). This paper will utilize remote sensing information, including NDVI (Normalized Difference Vegetation Index), EVI (Enhanced Vegetation Index), LAI (Leaf Area Index), FPAR (Fraction of Photosynthetically Active Radiation), GPP (Gross Primary Production), and ET (Evapotranspiration); meteorological data, including temperature and precipitation; cropland data; and yield statistics during the growing season over the period 2011–2020 (May to September). XGBoost ensemble learning was used, whose hyperparameters were optimized with the Pelican Optimization Algorithm (POA) to enhance its accuracy. Filtration was performed on data using the VFI index. Nine years were used as training data, while one year was used as a test. For evaluating the performance, MAPE, MBE, MAE, RMSE, and the correlation coefficient have been used.

Findings: The evaluation results of the POA-XGBoost model demonstrated its outstanding performance in predicting corn yields. During the 2011–2020 timeframe, validation trends highlighted variations in prediction accuracy and bias. In the first period, which includes 2011–2014, the errors went down and the prediction accuracy improved: MAPE reached 6.26%, while in 2014 the correlation coefficient increased to 0.9372. During the middle period of 2015–2018, the errors and positive bias showed an upward trend, especially during 2018, where MBE rose to 0.8039 and the correlation coefficient fell to 0.8083. However, the last two years (2019–2020) revealed much improved results: MAPE comprises 6.57%, while the correlation coefficient is as high as 0.9237 in 2020.

Conclusion: The optimized POA-XGBoost model demonstrated high capability in predicting corn yields under diverse climatic conditions and can be extended to forecast other crops in the future. Advanced ensemble learning techniques combined with diverse data sources, such as satellite imagery and meteorological data, provide effective solutions for improving crop yield predictions. The study calls for the development of new hybrid models that will enable farmers and managers to better manage resources, increase productivity, and minimize risks.



NUMBER OF REFERENCES

32



NUMBER OF FIGURES

2



NUMBER OF TABLES

5

مقاله پژوهشی

پیش‌بینی میزان محصول ذرت با بهره‌گیری از یادگیری گروهی، داده‌های ماهواره و هواشناسی

علی سبزعلی یمقانی^{*}، علی اصغر آل شیخ

گروه سیستم‌های اطلاعات مکانی، دانشکده مهندسی نقشه‌برداری، دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی، تهران، ایران

چکیده

پیشینه و اهداف: پیش‌بینی دقیق میزان محصول کشاورزی یکی از ابزارهای اساسی برای مدیریت منابع کشاورزی، بهبود امنیت غذایی و افزایش بهره‌وری تجارت بین‌المللی محصولات است. با توجه به محدودیت‌های روش‌های سنتی در پیش‌بینی دقیق و سریع، تصاویر سنجنش از دور ماهواره‌ای به دلیل توانایی پوشش مناطق وسیع و ارائه داده‌های دقیق، به‌طور گسترده‌ای جایگزین شده‌اند. در این میان، پیشرفت‌های یادگیری ماشین و یادگیری گروهی نقش مهمی در شناسایی روابط پیچیده میان متغیرهای محیطی و بازده محصولات ایفا کرده‌اند. مدل‌های نوین یادگیری گروهی، توانسته‌اند دقت پیش‌بینی‌ها را به‌طور قابل توجهی افزایش دهند و اطلاعات ارزشمندی برای کشاورزان و سیاست‌گذاران فراهم کنند. این پژوهش با هدف توسعه مدلی نوآورانه مبتنی بر ترکیب مدل XGBoost و الگوریتم بهینه‌سازی پلیکان (POA) به‌منظور پیش‌بینی دقیق‌تر میزان محصول ذرت در غرب میانه ایالات متحده انجام شده است. رویکرد پیشنهادی با بررسی تأثیر بازه‌های مختلف فنولوژی گیاه و انتخاب بازه بهینه (ژوئیه تا اوت)، امکان پیش‌بینی دقیق محصول را پیش از برداشت فراهم می‌کند. این مدل می‌تواند تصمیم‌گیری‌های مؤثری در زمینه مدیریت منابع، کاهش خسارات ناشی از نوسانات اقلیمی، و ارتقای سیاست‌های کشاورزی ارائه دهد.

تاریخ دریافت: ۱۰ شهریور ۱۴۰۳
تاریخ داوری: ۰۲ مهر ۱۴۰۳
تاریخ اصلاح: ۰۱ آبان ۱۴۰۳
تاریخ پذیرش: ۱۳ آذر ۱۴۰۳

واژگان کلیدی:

یادگیری گروهی
پیش‌بینی میزان محصول
الگوریتم بهینه‌سازی پلیکان
ذرت

روش و مواد: این پژوهش با هدف پیش‌بینی میزان محصول ذرت در پنج ایالت غرب میانه کشور آمریکا (ایلینوی، آیووا، مینه‌سوتا، داکوتای شمالی و داکوتای جنوبی) که از مناطق اصلی تولید ذرت هستند، انجام شده است. داده‌های استفاده‌شده شامل اطلاعات سنجنش از دور (مانند شاخص نرمال شده تفاوت پوشش گیاهی (NDVI)، شاخص پوشش گیاهی بهبود یافته (EVI)، شاخص سطح برگ (LAI)، شاخص جزء جذب‌شده تابش فتوسنتز فعال (FPAR)، تولید اولیه ناخالص (GPP)، و تبخیر و تعرق (ET))، داده‌های آب‌وهوایی (نظیر دما و بارش)، داده‌های زمین‌های زراعی، و بازده محصول، طی بازه زمانی ۲۰۱۱ تا ۲۰۲۰ و فصل رشد (اواسط اردیبهشت تا اواسط مهر) جمع‌آوری شده‌اند. مدل‌سازی با استفاده از الگوریتم یادگیری گروهی XGBoost انجام شد و تنظیم پارامترهای آن با استفاده از الگوریتم بهینه‌سازی پلیکان (POA) برای بهبود دقت صورت گرفت. داده‌ها ابتدا با شاخص VFI فیلتر شده و از ۹ سال به‌عنوان داده آموزشی و یک سال به‌عنوان داده آزمون استفاده شد. عملکرد مدل با شاخص‌هایی نظیر MAPE، MAE، MBE، RMSE و ضریب همبستگی ارزیابی شد.

یافته‌ها: نتایج ارزیابی مدل POA-XGBoost نشان داد که این روش عملکردی برجسته در پیش‌بینی میزان محصول ذرت دارد. در بازه زمانی ۲۰۱۱ تا ۲۰۲۰، روند اعتبارسنجی پیش‌بینی میزان محصول ذرت نشان‌دهنده تغییرات در دقت پیش‌بینی‌ها و بایاس بود. در سال‌های ابتدایی (۲۰۱۱ تا ۲۰۱۴)، مقادیر خطاها کاهش و دقت پیش‌بینی‌ها بهبود یافت؛ به‌طوری‌که در سال ۲۰۱۴ مقدار MAPE به ۶/۲۶٪ و ضریب همبستگی به ۰/۹۳۷۲ رسید. در سال‌های میانی (۲۰۱۵ تا ۲۰۱۸)، افزایش خطاها و بایاس مثبت به همراه کاهش دقت پیش‌بینی‌ها مشاهده شد، به‌ویژه در سال ۲۰۱۸ که مقدار MBE به ۰/۸۰۳۹ و ضریب همبستگی به ۰/۸۰۸۳ کاهش یافت. در سال‌های پایانی (۲۰۱۹ و ۲۰۲۰)، بهبود قابل توجهی در دقت پیش‌بینی‌ها مشاهده شد؛ به‌طوری‌که در سال ۲۰۲۰ مقدار MAPE به ۶/۵۷٪ و ضریب همبستگی به ۰/۹۲۳۷ رسید.

نتیجه‌گیری: مدل بهینه POA-XGBoost توانایی بالایی در پیش‌بینی بازده محصول ذرت در شرایط مختلف آب‌وهوایی نشان داده است و می‌تواند در آینده برای پیش‌بینی سایر محصولات کشاورزی نیز گسترش یابد. استفاده از تکنیک‌های پیشرفته یادگیری گروهی و داده‌های متنوع مانند تصاویر ماهواره‌ای و داده‌های هواشناسی، راه‌حل‌های مؤثری برای بهبود پیش‌بینی بازده محصولات ارائه می‌دهد. این پژوهش بر ضرورت توسعه مدل‌های ترکیبی جدید تأکید دارد که می‌توانند به کشاورزان و مدیران در مدیریت منابع، افزایش بهره‌وری، و کاهش ریسک کمک کنند.

^{*} نویسنده مسئول
asabzali@mail.kntu.ac.ir
۰۲۱-۸۸۷۸۶۲۱۲

مقدمه

ذرت به عنوان یکی از مهم‌ترین مواد غذایی اصلی جهان، نقش حیاتی در تأمین کالری روزانه بیش از ۴.۵ میلیارد نفر ایفا می‌کند. این محصول به دلیل محتوای کالری بالا و سازگاری با شرایط زیست‌محیطی از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است و انتظار می‌رود با افزایش جمعیت جهانی، تقاضای آن در سال‌های آتی به طور چشمگیری افزایش یابد [۱، ۲]. برآورد دقیق میزان محصول، به‌ویژه برای مسائلی نظیر مدیریت کشاورزی، سیاست‌گذاری ملی مواد غذایی و تجارت بین‌المللی محصولات زراعی، امری حیاتی محسوب می‌شود. روش‌های پیش‌بینی میزان محصول، به‌ویژه کاربرد تصاویر ماهواره‌ای و تکنیک‌های سنجش از دور، به دلیل توانایی در پوشش مناطق وسیع و ارائه ارزیابی دقیق‌تر از بازده محصولات، اهمیت روزافزونی یافته‌اند [۳-۵]. برآورد عملکرد محصولات کشاورزی همچنین به کشاورزان، سازمان‌های بهبود تجاری و نهادهای دولتی امکان می‌دهد تا تصمیمات آگاهانه‌ای در جهت ارتقای سیاست‌های غذایی و تجارت بین‌المللی اتخاذ کنند [۱، ۶-۱۰].

مدل‌های پیش‌بینی بازده محصولات زراعی نقش کلیدی در مدیریت کشاورزی و امنیت غذایی ایفا می‌کنند. مدل‌های مبتنی بر فرآیند فیزیکی و یادگیری ماشینی دو روش متداول در این زمینه هستند. مدل‌های مبتنی بر فرآیند به دلیل اعتبار علمی و قابلیت تفسیر بالا بسیار ارزشمندند، اما نیاز به داده‌های دقیق حسگرهای میدانی و محلی، کاربرد آن‌ها را در مقیاس بزرگ محدود می‌کند. در مقابل، مدل‌های یادگیری ماشینی با استفاده از داده‌های تاریخی بازده محصول و شاخص‌های مرتبط، بدون نیاز به نصب حسگرهای مختلف، پیش‌بینی‌های کارآمدتری ارائه می‌دهند [۱۱]. این مدل‌ها با توانایی استخراج روابط پیچیده، به دلیل پیشرفت‌های سریع در فناوری، به‌طور گسترده‌ای در مقیاس‌های بزرگ استفاده شده‌اند. نمونه‌هایی از این روش‌ها شامل جنگل تصادفی، رگرسیون بردار پشتیبان، شبکه‌های عصبی پیچشی و بازگشتی، حافظه طولانی کوتاه‌مدت و XGBoost است که در پیش‌بینی بازده محصول موفقیت‌های چشمگیری داشته‌اند [۱۲، ۱۳].

تحقیقات متعددی در زمینه پیش‌بینی میزان محصولات کشاورزی با استفاده از تکنیک‌های سنجش از دور و یادگیری ماشینی انجام شده است. این روش‌ها به کشاورزان و محققان کمک می‌کنند تا با دقت بیشتری میزان محصولات را پیش‌بینی کنند و بدین ترتیب تصمیم‌گیری‌های بهتری در زمینه مدیریت کشاورزی اتخاذ نمایند. Kim و Lee [۱۴] با استفاده از چهار روش یادگیری ماشینی مختلف (ماشین بردار پشتیبان، جنگل تصادفی، ERT (Extremely Randomized Trees) و یادگیری عمیق) در ایالت آیووا دریافتند که روش یادگیری عمیق بیشترین دقت را در پیش‌بینی میزان محصول ذرت دارد. آن‌ها سه گروه دوره‌ای مختلف برای بررسی حساسیت‌های فصلی بازده ذرت تنظیم کردند و دریافتند که ترکیب بهینه ماه‌ها می‌تواند در مدل‌سازی آماری میزان محصول موثر باشد.

مطالعات مختلف نشان داده‌اند که تکنیک‌های یادگیری ماشینی و یادگیری عمیق به طور قابل‌توجهی دقت پیش‌بینی میزان محصولات کشاورزی را بهبود بخشیده‌اند. Shahhosseini و همکاران [۱۵] از مدل‌های مختلفی مانند جنگل تصادفی، LightGBM، XGBoost، رگرسیون لاسو (LASSO) و رگرسیون خطی برای پیش‌بینی میزان محصول ذرت استفاده کردند و با طراحی چهار مدل تجمیعی شامل رگرسیون انباشته، لاسو انباشته، جنگل تصادفی انباشته و LightGBM انباشته نشان دادند که تجمیع وزنی بهینه و تجمیع متوسط دقیق‌ترین نتایج را ارائه می‌دهند. همچنین، Sun و همکاران [۱۶] مدل جدیدی مبتنی بر ترکیب شبکه عصبی پیچشی و حافظه طولانی کوتاه‌مدت پیشنهاد کردند که با داده‌های سنجش از دور سری زمانی و خصوصیات خاک، به پیش‌بینی دقیق محصول در سطح شهرستان‌های کمربند ذرت ایالات متحده کمک کرد.

مطالعات دیگری نیز به ترکیب مدل‌های یادگیری عمیق پرداخته‌اند. Ghazaryan و همکاران [۱۷] با ترکیب مدل‌های شبکه عصبی پیچشی ۳ بعدی و حافظه طولانی کوتاه‌مدت و استفاده از داده‌های MODIS نشان دادند که می‌توان میانگین درصد خطای پیش‌بینی ذرت و سویا را به ترتیب به ۱۰/۳ و ۹/۶ درصد کاهش داد. Khaki و همکاران [۱۸] نیز چارچوب شبکه عصبی پیچشی-شبکه عصبی بازگشتی را معرفی کردند که در مقایسه با روش‌های متداول مانند جنگل تصادفی و شبکه عصبی پیشخور عمیق دقت بالاتری در پیش‌بینی محصول ذرت و سویا در کل کمربند ذرت ایالات متحده داشت.

تمرکز برخی مطالعات بر بررسی شرایط خاص بوده است. Kim و همکاران [۴] شش مدل هوش مصنوعی را برای پیش‌بینی میزان محصول ذرت در شرایط آب و هوایی شدید بررسی کردند و نشان دادند که مدل شبکه عصبی عمیق با بهینه‌سازی فرایارامترها، دقت پیش‌بینی را در شرایط موج گرما ۳۰-۷۷ درصد بهبود می‌بخشد. این نتایج مکمل یافته‌های Kim و همکاران [۵] است که مدل‌های مختلفی را برای پیش‌بینی میزان محصول ذرت و سویا در بازه زمانی ژوئیه تا اوت بررسی کرده و نشان دادند مدل شبکه عصبی عمیق بهترین عملکرد را با کمترین میانگین خطای مطلق ارائه می‌دهد.

مطالعات اخیر به طور گسترده بر توسعه روش‌های ترکیبی برای بهبود دقت پیش‌بینی محصولات زراعی تمرکز داشته‌اند. سبزیلی یمقانی و همکاران [۱۹] یک رویکرد هیبریدی مبتنی بر الگوریتم XGBoost و بهینه‌ساز عقاب طلایی را برای پیش‌بینی عملکرد سویا با استفاده از داده‌های ماهواره‌ای و هواشناسی معرفی کردند. نتایج این مطالعه نشان داد که مدل ترکیبی GEO-XGBoost در پیش‌بینی عملکرد سویا با ضریب همبستگی ۰/۹۳۷۷ و شاخص خطای ریشه میانگین مربعات ۰/۲۳۹۴ تن در هکتار عملکرد مطلوبی دارد. Kwak و همکاران [۲۰] با بررسی مدل هیبریدی شبکه عصبی پیچشی و جنگل تصادفی، دریافتند که این ترکیب در نقشه‌برداری زودهنگام محصول دقت طبقه‌بندی بالایی ارائه می‌دهد. علاوه بر این، Shahhosseini و همکاران [۲۱] با

دقت پیش‌بینی میزان محصول ذرت افزایش یابد. این رویکرد می‌تواند به بهبود مدیریت کشاورزی و کاهش خسارات ناشی از نوسانات آب‌وهوایی کمک شایانی کند.

نوآوری کلیدی این تحقیق، ادغام الگوریتم XGBoost به‌عنوان یک مدل پیش‌بینی قوی با الگوریتم POA برای بهینه‌سازی موثر پارامترهای مدل است. همچنین، در این پژوهش تأثیر مراحل مختلف فنولوژی گیاه بر دقت پیش‌بینی مورد بررسی قرار گرفته و یک دوره زمانی بهینه برای تخمین میزان محصول انتخاب شده است. این دوره شامل سه بازه زمانی مختلف است: (۱) ماه‌های مه تا سپتامبر (کل فصل رشد)، (۲) ماه‌های ژوئیه تا اوت (دوره تولید عمده)، و (۳) ترکیب‌های مختلف ماه‌ها که بالاترین همبستگی را میان متغیرهای ورودی و میزان محصول نشان می‌دهند. فرض اصلی این تحقیق این است که پیش‌بینی دقیق میزان محصول می‌تواند تنها بر اساس داده‌های مربوط به بازه ژوئیه تا اوت انجام شود. این موضوع امکان پیش‌بینی میزان محصول سال را پیش از زمان برداشت فراهم می‌کند و می‌تواند تصمیم‌گیری‌های بهینه‌تری را در مدیریت زراعت و برنامه‌ریزی کشاورزی میسر سازد.

مواد و روش‌ها

منطقه مورد مطالعه

ایالات متحده به عنوان بزرگ‌ترین صادرکننده غلات در جهان شناخته می‌شود، و این پژوهش بر پنج ایالت غرب میانه آن شامل ایلینوی، آیووا، مینه‌سوتا، داکوتای شمالی و داکوتای جنوبی، که در آن‌ها ذرت محصول غالب است، متمرکز شده است. محدوده مورد بررسی شامل ۴۰۷ شهرستان در این پنج ایالت است (۱۰۲ شهرستان در ایلینوی، ۹۹ شهرستان در آیووا، ۸۷ شهرستان در مینه‌سوتا، ۵۳ شهرستان در داکوتای شمالی و ۶۶ شهرستان در داکوتای جنوبی). این شهرستان‌ها بر اساس معیار مساحت زمین‌های زراعی، که بیش از ۵۰ درصد از سطح هر شهرستان را تشکیل می‌دهد، انتخاب شده‌اند. (شکل ۱). در قسمت پایین شکل ۱ مقادیر تصویر ماهواره‌ای (Leaf Area Index) LAI مودیس به صورت موزاییک شده (تایل‌های h11v04، h10v05، h11v05) برای تاریخ ۹ مه ۲۰۱۱ (روز ۱۲۹ از ابتدای سال) به همراه مرزبندی پنج ایالت و ۴۰۷ شهرستان ارائه شده است.

داده‌های مورد استفاده

ویژگی‌های داده‌های به‌کاررفته در این پژوهش، شامل قدرت تفکیک زمانی و مکانی، نام محصول (در صورت استفاده از داده‌های خاص یک سنجنده) و منبع آن‌ها، در جدول ۱ ارائه شده است. داده‌ها در چهار گروه اصلی طبقه‌بندی شده‌اند: سنجنش از دور (۷ نوع)، آب‌وهوایی (۴ نوع)، زمین زراعی (۱ نوع)، و بازده محصول (۱ نوع). این داده‌ها طی بازه زمانی ۲۰۱۱ تا ۲۰۲۰ و برای فصل رشد، یعنی ماه‌های مه تا سپتامبر، جمع‌آوری شده‌اند. یکی از منابع کلیدی داده‌ها، لایه داده زراعی (CDL) دپارتمان کشاورزی ایالات متحده، مجموعه‌ای از داده‌های رستری

ادغام مدل‌های یادگیری ماشین و متغیرهای مرتبط با رطوبت خاک، توانستند دقت پیش‌بینی عملکرد محصولات را در کمربند ذرت ایالات متحده بهبود بخشند. همچنین، مطالعه دیگری از Shahhosseini و همکاران [۲۲] نشان داد که مدل‌های تجمیعی، شامل شبکه عصبی پیچشی و شبکه عصبی عمیق، عملکرد بهتری نسبت به مدل‌های منفرد مانند جنگل تصادفی، XGBoost و LightGBM در پیش‌بینی بازده محصولات دارند. این نتایج بر اهمیت استفاده از رویکردهای ترکیبی در افزایش دقت و کارایی پیش‌بینی عملکرد محصولات کشاورزی تأکید می‌کند.

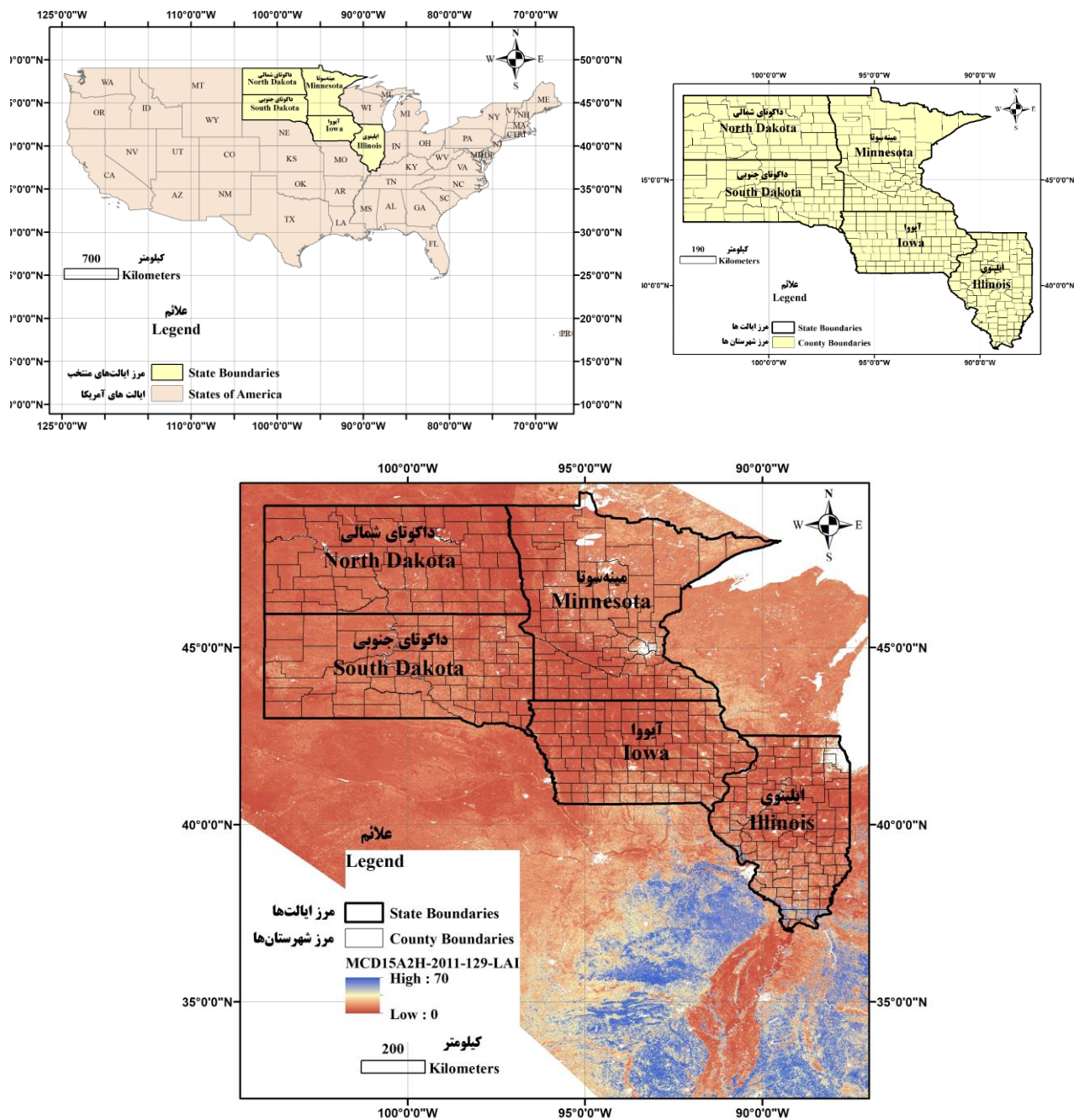
تحقیقات اخیر به استفاده از تکنیک‌های نوآورانه و داده‌های متنوع متمرکز بوده‌اند. Colombo-Mendoza و همکاران [۲۳] یک سیستم کشاورزی هوشمند مبتنی بر داده‌کاوی اینترنت اشیا برای پیش‌بینی محصولات طراحی کردند. Schmidt و همکاران [۲۴] از شبکه‌های عصبی مصنوعی برای کاهش ریسک پایه در بیمه‌های کشاورزی استفاده کردند. van Klompenburg و همکاران [۲۵] نیز مرور جامعی از مطالعات پیش‌بینی میزان محصول ارائه دادند که بر کاربرد مدل‌هایی چون رگرسیون خطی، ماشین بردار پشتیبان و شبکه‌های عصبی تأکید داشت. Meghraoui و همکاران [۲۶] نشان دادند که معماری‌های شبکه عصبی پیچشی و حافظه طولانی کوتاه‌مدت در پیش‌بینی محصولات کشاورزی غالب هستند. علاوه بر این، Oikonomidis و همکاران [۲۷] با بررسی مدل‌های هیبریدی مختلف، به برتری مدل شبکه عصبی پیچشی-شبکه عصبی عمیق در دقت پیش‌بینی محصولات اشاره کردند. این مطالعات نشان می‌دهند که استفاده از داده‌های متنوع نظیر تصاویر ماهواره‌ای، داده‌های هواشناسی و خصوصیات خاک، همراه با مدل‌های پیشرفته یادگیری عمیق و تجمیعی، دقت پیش‌بینی محصولات کشاورزی را بهبود می‌بخشد. توسعه مدل‌های ترکیبی جدید می‌تواند به کشاورزان و مدیران در مدیریت منابع و افزایش بهره‌وری کمک کند.

بر اساس بررسی پیشینه تحقیقات، می‌توان نتیجه گرفت که تکنیک‌های یادگیری ماشین و سنجنش از دور در سال‌های اخیر پیشرفت‌های چشمگیری داشته‌اند و به ابزارهای کلیدی در پیش‌بینی میزان تولیدات کشاورزی تبدیل شده‌اند. پژوهش‌ها حاکی از آن است که بهره‌گیری از داده‌های متنوع، از جمله تصاویر ماهواره‌ای، اطلاعات هواشناسی، و ویژگی‌های خاک، در کنار به‌کارگیری روش‌های پیشرفته یادگیری عمیق و الگوریتم‌های گروهی، توانسته است دقت پیش‌بینی‌ها را به میزان قابل توجهی بهبود بخشد. از این‌رو، انجام تحقیقات بیشتر در این حوزه و توسعه مدل‌های نوآورانه ترکیبی می‌تواند نقش مؤثری در کمک به کشاورزان و مدیران کشاورزی برای بهینه‌سازی فرآیند تولید و مدیریت منابع ایفا کند.

هدف اصلی این پژوهش توسعه یک رویکرد ترکیبی است که از الگوریتم XGBoost برای پیش‌بینی و الگوریتم بهینه‌سازی پلیکان (POA) برای تنظیم پارامترهای مدل استفاده می‌کند. در این مطالعه، تلاش شده است تا با بهره‌گیری از داده‌های گسترده و متنوع ماهواره‌ای و هواشناسی،

محاسباتی را کنترل کرده است. همچنین، به علت تلفیق انواع داده‌های ماهواره‌ای با قدرت تفکیک‌های مختلف (نظیر ۲۵۰ و ۵۰۰ متر)، نتایج نهایی با روش تحلیل ناحیه‌ای (Zonal Analysis) به سطح شهرستان خلاصه می‌شوند. در مقیاس‌های خردتر، می‌توان از داده‌های با تفکیک بالاتر استفاده کرد، اما در این مطالعه سطح شهرستان هدف اصلی است و این قدرت تفکیک، پاسخ‌گوی نیاز پژوهش خواهد بود.

جغرافیایی عمومی است که طبقه‌بندی پوشش زمین را با تأکید بر نقشه‌برداری مزارع و به‌روزرسانی چشم‌انداز کشاورزی در ایالات متحده ارائه می‌دهد. در این پژوهش، داده‌های آب و هوا ۴ کیلومتری PRISM به دلیل همخوانی با سطح تحلیل شهرستانی، دسترسی آسان و یکپارچه، و پشتوانه علمی معتبر انتخاب شده‌اند. تفکیک ۴ کیلومتر ضمن تأمین دقت کافی برای ارزیابی عملکرد محصول در سطح شهرستان، هزینه



شکل ۱: محدوده مورد مطالعه

Fig. 1: The study area

جدول ۱: داده‌های مورد استفاده در تحقیق

Table 1: Data used in the study

منبع Source	نام محصول Product name	قدرت تفکیک Resolution		داده Data	
		زمانی Time	مکانی Place		
NASA EOSDIS	MOD13Q1 MODIS	۱۶ روز / 16 days	۲۵۰ متر / 250 meters	NDVI (Normalized Difference Vegetation Index)	سنجش از دور Remote sensing
	MOD13Q1 MODIS	۱۶ روز / 16 days	۲۵۰ متر / 250 meters	EVI (Enhanced Vegetation Index)	
	MCD15A2H MODIS	۸ روز / 8 days	۵۰۰ متر / 500 meters	LAI (Leaf Area Index)	
	MCD15A2H MODIS	۸ روز / 8 days	۵۰۰ متر / 500 meters	FPAR (Fraction of Photosynthetically Active Radiation)	
	MYD17A2H MODIS	۸ روز / 8 days	۵۰۰ متر / 500 meters	GPP (Gross Primary Production)	
	MOD16A2 MODIS	۸ روز / 8 days	۵۰۰ متر / 500 meters	ET (Evapotranspiration)	
NASA GES DISC	GLDAS_NOAH025_M	ماهانه / Monthly	۲۵ درجه / 25°	SM (Soil Moisture)	آب و هوا Meteorological
گروه آب و هوای PRISM	-	ماهانه / Monthly	۴ کیلومتر / 4 km	PPT (Precipitation)	
		ماهانه / Monthly	۴ کیلومتر / 4 km	Tmax (Maximum Temperature)	
		ماهانه / Monthly	۴ کیلومتر / 4 km	Tmin (Minimum Temperature)	
		ماهانه / Monthly	۴ کیلومتر / 4 km	Tmean (Average Temperature)	
دپارتمان کشاورزی ایالات متحده United States Department of Agriculture	-	سالانه / Annual	۳۰ متر / 30 meters	Cropland	زمین زراعی Cropland
دپارتمان کشاورزی ایالات متحده United States Department of Agriculture	-	سالانه / Annual	شهرستان / County	ذرت / Corn	بازده محصول Crop Yield

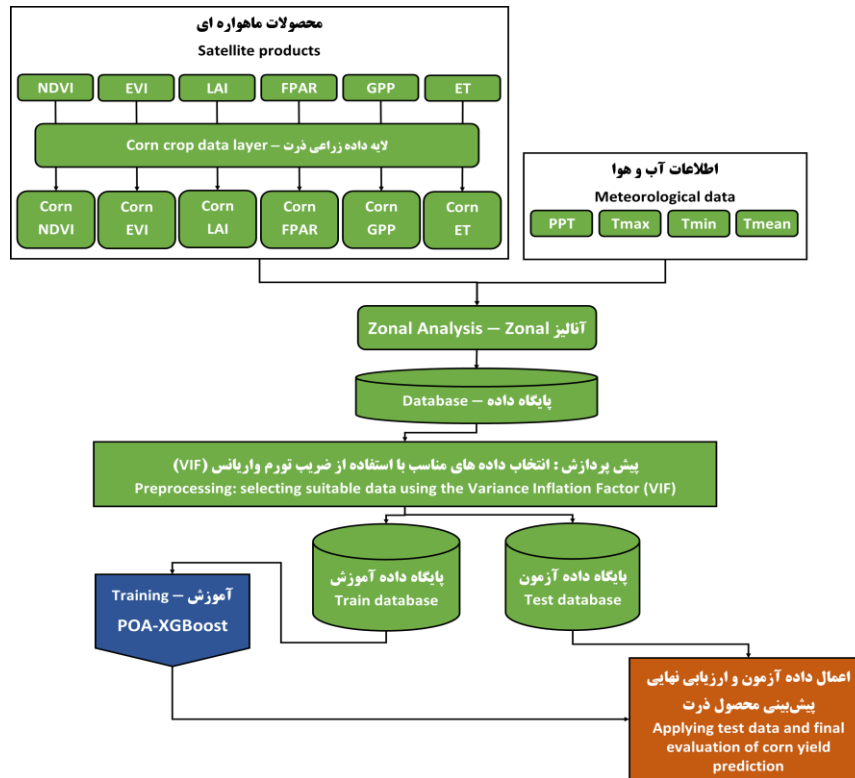
روش‌شناسی تحقیق

بررسی تحقیقات پیشین نشان داد که مجموعه داده‌های مشابه جدول ۱ در پیش‌بینی میزان محصول ذرت مورد استفاده قرار گرفته‌اند. در این پژوهش نیز از داده‌های جدول ۱ بهره‌گیری شده و با تمرکز بر الگوریتم یادگیری گروهی XGBoost، تلاش می‌شود تا مدلی بهبودیافته ارائه شود. برای این منظور، بهینه‌سازی پارامترهای الگوریتم XGBoost با استفاده از الگوریتم POA انجام می‌شود. شمای کلی فرآیند تحقیق در شکل ۲ ارائه شده است. در ابتدا، داده‌های سنجش از دور با استفاده از لایه داده‌های زراعی تفکیک شده و نواحی فاقد محصولات زراعی مدنظر در تصاویر به‌عنوان مقادیر ناموجود در نظر گرفته می‌شوند. این فرآیند برای محصول ذرت اعمال می‌شود و تنها پیکسل‌های مرتبط با این محصول دارای مقدار خواهند بود. سپس، آنالیز Zonal بر اساس سطح شهرستان برای تمامی داده‌ها انجام شده و داده‌های مجزا برای محصولات زراعی ذرت تولید می‌شود. در گام بعد، شاخص آماری VFI برای انتخاب داده‌های مناسب مدل داده‌کاوی مورد استفاده قرار می‌گیرد و داده‌های منتخب وارد فرآیند داده‌کاوی می‌شوند. الگوریتم XGBoost با استفاده از داده‌های ۹ سال برای آموزش و یک سال برای آزمون، طی بازه زمانی ۲۰۱۱ تا ۲۰۲۰، آموزش داده می‌شود. تعداد داده‌های مورد استفاده در این تحقیق به طور کلی ۳۳۷۱ مورد برای ۱۰ سال می‌باشد. برای سال‌های ۲۰۱۱ تا ۲۰۲۰ به ترتیب ۳۷۰، ۳۶۱، ۳۴۷، ۳۴۹، ۳۳۳، ۳۵۶، ۳۴۱، ۲۹۰، ۲۶۴ و ۳۶۰ مورد به عنوان داده‌های آزمون انتخاب شدند. میانگین شاخص‌های ارزیابی به‌عنوان دقت نهایی گزارش می‌شود و در

تمامی مراحل، بهینه‌سازی فرایپارامترهای XGBoost با الگوریتم POA صورت می‌گیرد.

الگوریتم XGBoost

الگوریتم XGBoost یکی از پرکاربردترین و قدرتمندترین روش‌های مبتنی بر تقویت گرادیان (Gradient Boosting) است که برای حل مسائل طبقه‌بندی و رگرسیون به کار می‌رود. این روش با ترکیب چندین درخت تصمیم (Decision Trees)، مدلی قوی و پایدار ارائه می‌دهد که در هر مرحله خطای به‌جامانده از مرحله قبل را اصلاح می‌کند. در ابتدا، گرادیان و هسیان (مشتق‌های مرتبه اول و دوم تابع هزینه) برای داده‌ها محاسبه می‌شوند تا روند کاهش خطا هدفمندتر شود. سپس یک درخت تصمیم جدید ساخته می‌شود که انشعاب‌های آن (Splits) براساس مقادیر گرادیان و هسیان انتخاب می‌گردند؛ این امر باعث می‌شود پیش‌بینی‌های نادرست مراحل قبل تصحیح شود و دقت مدل به طور تدریجی افزایش یابد. فرآیند تا زمان همگرایی یا رسیدن به تعداد معینی درخت تکرار می‌شود و در هر مرحله، برای جلوگیری از برازش بیش از حد (Overfitting)، از مکانیزم‌های منظم‌سازی (Regularization) و هرس (Pruning) استفاده می‌شود. افزون بر این، به‌واسطه پیاده‌سازی موازی و ساختار بهینه پردازشی، الگوریتم XGBoost نسبت به روش‌های مشابه، سرعت بالایی در آموزش دارد و در بسیاری از رقابت‌های علمی و کاربردهای تجاری به یک ابزار کلیدی تبدیل شده است. شبه‌کد الگوریتم XGBoost برای درک بهتر فرآیند در الگوریتم ۱ آورده شده است [۲۸].



شکل ۲: شمای کلی تحقیق
Fig. 2: General overview of the study

خود را بهینه تر می کنند. این فرآیند به طور مداوم تکرار می شود تا الگوریتم به بهترین جواب ممکن دست یابد. مزیت اصلی POA نسبت به سایر روش های بهینه سازی، تعادل مناسب بین جستجو و بهره برداری، سرعت همگرایی بالا، و توانایی فرار از بهینه های محلی (Local Optima) است که باعث می شود در بسیاری از مسائل مهندسی، پردازش تصویر، یادگیری ماشین، و بهینه سازی توابع ریاضی عملکرد موفق داشته باشد. جزئیات مربوط به این الگوریتم در قالب شبه کد در الگوریتم ۲ ارائه شده است [۲۹]

Algorithm 2. Pseudo-code of POA.

Start POA.

Input the optimization problem information.

Determine the POA population size (N) and the number of iterations (T).

Initialization of the position of pelicans and calculate the objective function.

For t = 1:T

Generate the position of the prey at random.

For l = 1:N

Phase 1: Moving towards prey (exploration phase).

For j = 1:m

Calculate new status of the jth dimension.

End.

Update the ith population member.

Phase 2: Winging on the water surface (exploitation phase).

For j = 1:m.

Calculate new status of the jth dimension.

End.

Update the ith population member.

Algorithm 1. Pseudo-code of XGBoost

Input: instance set of current nodes

Input: feature dimension

$J(p) = 0$

$G = \sum_{i \in l} g_i \quad H = \sum_{i \in l} h_i$

For k = 1 to n do

$G_L = 0 \quad H_L = 0$

For j in sorted do

$G_L = G_L + g_j \quad H_L = H_L + h_j$

$G_R = G + G_L \quad H_R = H + H_L$

 score = max(score, J(p))

End

End

Output: Split with max score

// الگوریتم POA

الگوریتم POA یک روش فراابتکاری هوشمند است که بر اساس رفتار پلیکان ها هنگام شکار طراحی شده و برای حل مسائل بهینه سازی مورد استفاده قرار می گیرد. ایده اصلی این روش از دو رفتار کلیدی پلیکان ها در طبیعت الهام گرفته شده است: شیرجه زدن به سمت طعمه که نشان دهنده فاز جستجو (Exploration) است و بال زدن روی سطح آب که نشان دهنده فاز بهره برداری (Exploitation) است. در فاز اول، پلیکان ها به صورت تصادفی در فضای جستجو حرکت می کنند تا گزینه های مناسب برای یافتن جواب بهینه را شناسایی کنند. سپس، در فاز دوم، روی بهترین موقعیت های شناسایی شده تمرکز کرده و موقعیت

ذرت ایجاد شد. به منظور بررسی وجود هم خطی بین ۱۱ متغیر توضیحی، آزمون چندخطی با استفاده از ضریب تورم واریانس (Variation Inflation Factor: VIF) انجام گرفت تا از تأثیرات احتمالی هم خطی بر دقت مدل جلوگیری شود. VIF برای ۱۱ متغیر توضیحی x_i به صورت زیر بیان می شود:

$$VIF(x_i) = \frac{1}{1 - R_i^2} \quad (۵)$$

در اینجا R_i^2 نشان دهنده ضریب تعیین معادله رگرسیون است، که در آن x_i به عنوان متغیر وابسته و سایر متغیرهای x به عنوان متغیرهای مستقل در نظر گرفته می شوند. برای محصولات ذرت، ابتدا مقدار شاخص VIF برای هر ۱۱ متغیر اولیه محاسبه شد. با توجه به اینکه مقدار برخی از این متغیرها از حد آستانه ۵ فراتر رفت [۵]، به منظور کاهش مقدار VIF، متغیرهایی با بالاترین مقدار VIF به صورت تدریجی حذف شدند و مقادیر VIF مجدداً محاسبه گردید. در این فرآیند، متغیرهای T_{MAX} ، ET ، $NDVI$ ، T_{MEAN} و $FPAR$ به ترتیب با مقادیر VFI برابر با ۷۲۳۴۲۵۷۰، ۳۳/۹۹، ۲۶/۰۴، ۱۴/۴۸ و ۶/۴۵ حذف شدند. این روند حذف تدریجی ادامه یافت تا مقدار شاخص VIF برای تمامی متغیرهای باقی مانده به مقادیر قابل قبول با حد آستانه ۵ کاهش یابد.

جدول ۲: مقدار VFI متغیرهای منتخب (مه تا سپتامبر) در برابر میزان محصول ذرت، ۲۰۱۱-۲۰۲۰

ضریب تورم واریانس	داده ها
VIF	Data
-	NDVI
3.9465	EVI
2.9043	LAI
-	FPAR
4.3388	GPP
-	ET
2.6517	SM
1.2709	PPT
-	T_{MAX}
1.7678	T_{MIN}
-	T_{MEAN}

اثر فنولوژی

به طور کلی، کاشت ذرت معمولاً بین اواخر آوریل تا اواسط مه انجام می شود، این محصول در ماه سپتامبر به بلوغ می رسد و تا اواخر اکتبر برداشت می شود. برای بررسی اثرات فنولوژی بر تولید محصول، ۱۳ ترکیب زمانی مختلف از داده ها استخراج شد. این ترکیبات شامل یک دوره نماینده برای کل فصل رشد (GS) از مه تا سپتامبر، پنج دوره برای ماه های مجزا، چهار ترکیب دوماهه متوالی، و سه ترکیب سه ماهه متوالی بودند (جدول ۳). با تحلیل ضرایب همبستگی میان متغیرهای ورودی و میزان محصول، سه دوره متمایز شناسایی شدند: (۱) کل فصل رشد (GS) از زمان کاشت تا برداشت، (۲) دوره اصلی تولید ذرت از ژوئیه تا اوت (JA)، و (۳) ترکیب بهینه ماه هایی که بیشترین همبستگی را بین متغیرهای ورودی و میزان محصول نشان دادند. ترکیب بهینه، که برای

End.

Update best candidate solution.

End.

Output best candidate solution obtained by POA.

End POA.

ارزیابی دقت

برای ارزیابی صحت و دقت روش های پیش بینی میزان محصول، پنج شاخص کلیدی شامل میانگین درصد مطلق خطا (MAPE)، میانگین انحراف خطا (MBE)، میانگین خطای مطلق (MAE)، ریشه میانگین مربعات خطا (RMSE) و ضریب تعیین (R^2) در این پژوهش به کار گرفته شده اند. شاخص RMSE معمولاً میزان پراکندگی نتایج پیش بینی را نشان می دهد، در حالی که شاخص های MAPE و MAE برای ارزیابی میزان انحراف نتایج پیش بینی از مقادیر واقعی استفاده می شوند. این شاخص ها نقش اساسی در تحلیل عملکرد مدل های پیش بینی دارند و به صورت زیر تعریف می شوند [۳۰-۳۲]:

$$MAPE = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \frac{|\hat{y}_i - y_i|}{y_i} \quad (۱)$$

$$MBE = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (\hat{y}_i - y_i) \quad (۲)$$

$$MAE = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n |\hat{y}_i - y_i| \quad (۳)$$

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (y_i - \hat{y}_i)^2} \quad (۴)$$

در این تعریف ها $\hat{y}_i$ نشان دهنده مقدار پیش بینی شده، y_i نشان دهنده مقدار واقعی و n تعداد کل نمونه ها است. هر یک از این شاخص ها به صورت خاص برای ارزیابی جنبه های مختلف عملکرد مدل مورد استفاده قرار می گیرند. در نهایت، ضریب تعیین (R^2) به عنوان یک متریک آماری عمل می کند که نشان می دهد چه مقدار از تغییرات در یک متغیر وابسته می تواند توسط متغیر (های) مستقل در یک مدل رگرسیونی توضیح داده شود. مقدار R^2 بین ۰ و ۱ متغیر است، که مقدار بالاتر آن نشان دهنده تطابق بهتر مدل با داده ها است.

نتایج پژوهش

پیش پردازش داده ها

در این پژوهش، ابتدا پیکسل های زمین زراعی که در CDL به عنوان ذرت (با شناسه ID=1) ثبت شده بودند، استخراج شدند. سپس، توزیع متغیرهای ورودی شامل NDVI، EVI، LAI، FPAR، ET، GPP، PPT، TMAX، TMIN و TMEAN از شبکه CDL استخراج شد. برای تطبیق داده ها با آمار محصول در سطح شهرستان، تمامی متغیرها با استفاده از یک عملیات میانگین گیری منطقه ای، مطابق با مرزهای چندضلعی هر شهرستان، تجمیع شدند. در نهایت، پایگاه داده ای مختص مناطق کشت

در این بخش، نتایج توسعه مدل ترکیبی XGBoost و POA برای پیش‌بینی میزان محصول ذرت با بهره‌گیری از داده‌های ماهواره‌ای و هواشناسی ارائه شده است. برای بهبود عملکرد مدل، پارامترهای مربوط به بهینه‌سازی الگوریتم XGBoost و تنظیمات الگوریتم POA مورد بررسی قرار گرفتند. جزئیات این پارامترها و مقادیر مربوطه در جدول ۴ ارائه شده است.

در این پژوهش، با توجه به اینکه دوره JA (ژوئیه تا اوت) دوره اصلی تولید ذرت محسوب می‌شود، داده‌های این بازه زمانی برای پیش‌بینی میزان محصول مورد استفاده قرار گرفت. انتخاب این دوره امکان پیش‌بینی میزان محصول را پیش از برداشت فراهم کرده و به تصمیم‌گیری‌های زراعی کمک می‌کند. جدول ۵ نتایج الگوریتم ترکیبی POA-XGBoost را برای محصولات ذرت در دوره JA طی سال‌های ۲۰۱۱ تا ۲۰۲۰ نشان می‌دهد. این نتایج عملکرد مدل در پیش‌بینی میزان محصول را با شاخص‌های ارزیابی مختلف مانند MAE، MBE، RMSE، و MAPE و ضریب همبستگی R نمایش می‌دهد.

پیش‌بینی میزان محصول ذرت مطلوب‌ترین است، در جدول ۳ با رنگ کرم مشخص شده است.

به طور کلی، ذرت بین اواخر آوریل و اواسط مه کاشته می‌شود، در سپتامبر بالغ می‌شود و تا اواخر اکتبر برداشت می‌شود. برای تجزیه و تحلیل اثرات فنولوژی، ۱۳ مورد با استفاده از ترکیب‌های مختلف ماه استخراج شد، از جمله یک مورد نماینده کل فصل رشد (GS) بین ماه‌های مه و سپتامبر، پنج مورد از ماه‌های جداگانه، چهار مورد از دو ماه متوالی، و سه مورد مربوط به سه ماه متوالی (جدول ۳). با در نظر گرفتن ضرایب همبستگی بین متغیرهای ورودی و میزان محصول، سه دوره متمایز شد: (۱) کل GS از کاشت تا برداشت، (۲) ژوئیه تا اوت (JA) که دوره اصلی تولید ذرت است و (۳) ترکیب بهینه ماه‌ها با همبستگی بالا بین متغیرهای نهاده و میزان محصول. ترکیب بهینه برای میزان محصول ذرت بر اساس ترکیب داده‌های ماه‌های مختلف در جدول ۳ با رنگ کرم مشخص شده است.

توسعه مدل پیش‌بینی میزان محصول ذرت

جدول ۳: ضرایب همبستگی بین متغیرهای انتخاب شده و میزان محصول ذرت با توجه به ترکیب ماه‌های ۲۰۲۰-۲۰۱۱

Table 3: Correlation coefficients between selected variables and corn yield considering monthly combinations, 2011-2020

GS	JAS	JJA	MJJ	AS	JA	JJ	MJ	Sep	Aug	Jul	Jun	May	
0.788	0.778	0.864	0.647	0.839	0.839	0.739	0.349	0.228	0.706	0.830	0.481	-0.015	EVI
0.521	0.626	0.580	0.290	0.651	0.652	0.372	-0.113	0.147	0.617	0.530	-0.008	-0.261	LAI
0.698	0.749	0.754	0.542	0.761	0.762	0.638	0.074	0.392	0.705	0.706	0.190	-0.087	GPP
0.501	0.436	0.449	0.425	0.421	0.421	0.369	0.308	0.266	0.334	0.320	0.218	0.236	PPT
0.383	0.360	0.314	0.301	0.209	0.209	0.284	0.378	0.472	0.323	0.057	0.459	0.293	T _{MIN}
0.556	0.578	0.550	0.513	0.562	0.563	0.536	0.463	0.550	0.536	0.565	0.479	0.423	SM

جدول ۴: مقادیر پارامترهای قابل تنظیم در الگوریتم POA-XGBoost

Table 4: Tunable parameter values in the poa-xgboost algorithm

Usage / استفاده	Values / مقادیر مربوطه	Adjustable parameter / پارامتر قابل تنظیم
الگوریتم XGBoost	20-400	n_estimators
الگوریتم XGBoost	3-18	max_depth
الگوریتم XGBoost	0-9	gamma
الگوریتم XGBoost	0-1	learning_rate
الگوریتم POA	30	جمعیت اولیه
الگوریتم POA	10	تعداد اجرا

جدول ۵: خلاصه آمار اعتبارسنجی از ۱۰ دور آزمایش برای میزان محصول ذرت در ژوئیه تا اوت (دوره تولید عمده) برای ۲۰۲۰-۲۰۱۱

Table 5: Summary statistics of validation from 10 rounds of testing for corn yield during July to August (major production period), 2011-2020

R	MAPE	RMSE	MAE	MBE	تعداد نمونه‌ها Number of samples	
0.8499	0.1004	1.1010	0.8933	0.1242	370	2011
0.8865	0.1995	1.2944	0.9704	-0.0319	361	2012
0.9067	0.0704	0.8444	0.6489	0.0067	347	2013
0.9372	0.0626	0.8102	0.6159	0.0066	349	2014
0.9097	0.0631	0.8841	0.6561	0.0862	333	2015
0.8984	0.0712	1.0081	0.7760	0.2176	356	2016
0.9071	0.0870	1.1113	0.9355	0.4457	341	2017
0.8083	0.0837	1.3113	1.0340	0.8039	290	2018

R	MAPE	RMSE	MAE	MBE	تعداد نمونه‌ها Number of samples	
0.8205	0.0790	1.0653	0.8785	0.1667	264	2019
0.9237	0.0657	0.8372	0.6434	-0.0720	360	2020
0.8848	0.0883	1.0267	0.8052	0.1754	میانگین Average	

بلکه با بررسی اثرات تغییرات آب‌وهوا، به بهبود مدیریت محصولات و امنیت غذایی کمک می‌کنند. پیشرفت‌های اخیر در تکنیک‌های یادگیری ماشین و دسترسی به داده‌های بزرگ، نظیر داده‌های سنجش از دور و داده‌های عملکرد تاریخی محصولات، تحولی در تجزیه و تحلیل کشاورزی ایجاد کرده است. این فناوری‌ها با تبدیل داده‌های پیچیده به بینش‌های کاربردی، امکان بهینه‌سازی تولید، تخصیص منابع و نظارت بر عملکرد محصولات در زمان واقعی را فراهم می‌کنند و راهکاری نوین برای مقابله با چالش‌های کشاورزی مدرن ارائه می‌دهند [۷، ۱۰، ۱۲].

در این پژوهش، یک چارچوب نوین برای پیش‌بینی میزان محصول ذرت در سطح شهرستان‌های پنج ایالت غرب میانه ایالات متحده، با استفاده از ترکیب الگوریتم‌های XGBoost و POA پیشنهاد شد. نتایج نشان داد که پیش‌بینی‌های دقیق می‌توانند با بهره‌گیری از داده‌های دوره ژوئیه تا اوت (دوره تولید عمده) و پیش از زمان برداشت انجام شوند. عملکرد چارچوب پیشنهادی این مطالعه با میانگین ضریب همبستگی ۱۰ ساله برابر ۰/۸۸۴۸ نشان‌دهنده دقت مناسب در پیش‌بینی‌ها بود. بررسی سال به سال نتایج نشان داد که دقت پیش‌بینی‌ها در سال‌های ۲۰۱۳، ۲۰۱۴، و ۲۰۲۰ به اوج خود رسیده و مقادیر خطا مانند MAE و RMSE در این سال‌ها کمترین مقدار را داشتند، در حالی که در سال‌های ۲۰۱۷ و ۲۰۱۸ دقت کاهش یافته و با یاس مثبت پیش‌بینی‌ها به بیشترین مقدار رسید. با این حال، در سال‌های پایانی، کاهش خطاها و بهبود دقت کلی، اهمیت چارچوب پیشنهادی در ارائه پیش‌بینی‌های دقیق برای کشاورزان و برنامه‌ریزان را برجسته می‌کند. همچنین، استفاده از تصاویر ماهواره‌ای با شاخص وضوح بالا می‌تواند دقت این پیش‌بینی‌ها را بیش از پیش افزایش دهد.

مشارکت نویسندگان

در این مقاله نویسندگان به نسبت برابر مشارکت داشته‌اند.

تشکر و قدردانی

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

تعارض منافع

«هیچ‌گونه تعارض منافع توسط نویسندگان بیان نشده است.»

منابع و مأخذ

[1] Sierra-Forero B-L, Baron-Velandia J, Vanegas-Ayala S-C. Assessment of the relevance of features associated with corn

در طول دوره ۲۰۱۱ تا ۲۰۲۰، روند تغییرات مقادیر خطای پیش‌بینی نشان‌دهنده الگوهای متفاوتی از دقت و بایاس در نتایج اعتبارسنجی است. در سال ۲۰۱۱، پیش‌بینی‌ها با دقت مناسبی همراه بودند، به‌طوری که MAPE برابر ۱/۰۴٪ و همبستگی (R) برابر ۰/۸۴۹۹ بود. با این حال، در سال ۲۰۱۲، دقت پیش‌بینی کاهش یافت و مقادیر خطاها مانند MAE و RMSE افزایش یافتند. سال‌های ۲۰۱۳ و ۲۰۱۴ با بهبود قابل توجهی همراه بودند؛ به‌طوری که MAPE به ترتیب به ۷/۰۴٪ و ۶/۲۶٪ کاهش یافت و مقدار همبستگی به ۰/۹۳۷۲ در سال ۲۰۱۴ رسید که بالاترین میزان همبستگی در طول دوره بود.

در سال‌های ۲۰۱۵ تا ۲۰۱۸، روند پیش‌بینی‌ها دستخوش تغییراتی شد. در سال ۲۰۱۵، مقادیر خطاها اندکی افزایش یافت، اما همچنان در محدوده قابل قبول باقی ماندند. سال ۲۰۱۶ با افزایش بایاس مثبت و مقادیر خطاها همراه بود، اما همچنان همبستگی بالایی بین مقادیر پیش‌بینی‌شده و واقعی مشاهده شد. سال ۲۰۱۷ با بدترین شرایط بایاس مثبت مواجه شد (MBE برابر ۰/۴۴۵۷)، و در سال ۲۰۱۸ این مقدار به اوج خود یعنی ۰/۸۰۳۹ رسید. کاهش تعداد نمونه‌ها در این سال‌ها ممکن است در افت دقت و افزایش خطاها تأثیرگذار بوده باشد. در این دوره، مقدار R نیز به طور قابل توجهی کاهش یافت و در سال ۲۰۱۸ به پایین‌ترین مقدار خود یعنی ۰/۸۰۸۳ رسید.

در پایان دوره، نتایج سال‌های ۲۰۱۹ و ۲۰۲۰ بهبود چشمگیری نشان دادند. مقدار MBE در سال ۲۰۱۹ به ۰/۱۶۶۷ کاهش یافت و خطاهای پیش‌بینی (MAE و RMSE) نیز روند کاهشی داشتند. سال ۲۰۲۰ با دقت بالا همراه بود؛ به‌طوری که MAPE به ۶/۵۷٪ کاهش یافت و مقدار R به ۰/۹۲۳۷ رسید. به طور کلی، میانگین مقادیر کل دوره نشان‌دهنده روندی نسبتاً پایدار با بهبودهای مقطعی در سال‌های پایانی است. این نتایج نشان می‌دهد که علی‌رغم نوساناتی در مقاطع مختلف، دقت پیش‌بینی‌ها در کل دوره در سطح قابل قبولی قرار داشته است.

نتیجه‌گیری

کشاورزی به‌عنوان یکی از بنیادی‌ترین فعالیت‌های بشری، نقشی حیاتی در تأمین امنیت غذایی و توسعه پایدار ایفا می‌کند. در این میان، فناوری سنجش از دور با ارائه نظارت جامع و دقیق بر رشد محصولات کشاورزی، داده‌هایی عینی و به‌موقع برای برآورد تولید و مدیریت منابع ارائه می‌دهد. پیش‌بینی عملکرد محصولات کشاورزی، مانند ذرت در ایالات متحده، به‌طور خاص در تجارت جهانی غذا و سیاست‌گذاری‌های امنیت غذایی اهمیت ویژه‌ای دارد. این پیش‌بینی‌ها نه تنها مبنایی برای تصمیم‌گیری‌های ملی و بین‌المللی در حوزه کشاورزی پایدار هستند،

- [12] Li Y, Zeng H, Zhang M, Wu B, Zhao Y, Yao X, et al. A county-level soybean yield prediction framework coupled with XGBoost and multidimensional feature engineering. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*. 2023;118:103269. <https://doi.org/10.1016/j.jag.2023.103269>
- [13] Muruganantham P, Wibowo S, Grandhi S, Samrat NH, Islam N. A systematic literature review on crop yield prediction with deep learning and remote sensing. *Remote Sensing*. 2022;14(9):1990. <https://doi.org/10.3390/rs14091990>
- [14] Kim N, Lee Y-W. Machine Learning Approaches to Corn Yield Estimation Using Satellite Images and Climate Data: A Case of Iowa State: A Case of Iowa State. *Journal of the Korean Society of Surveying Geodesy Photogrammetry and Cartography*. 2016;34(4):383-90. <https://doi.org/10.7848/ksgpc.2016.34.4.383>
- [15] Shahhosseini M, Hu G, Archontoulis SV. Forecasting corn yield with machine learning ensembles. *Frontiers in Plant Science*. 2020; 11: 1120. <https://doi.org/10.3389/fpls.2020.01120>
- [16] Sun J, Lai Z, Di L, Sun Z, Tao J, Shen Y. Multilevel deep learning network for county-level corn yield estimation in the us corn belt. *IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing*. 2020;13:5048-60. <https://doi.org/10.1109/JSTARS.2020.3019046>
- [17] Ghazaryan G, Skakun S, König S, Rezaei EE, Siebert S, Dubovyk O, editors. Crop yield estimation using multi-source satellite image series and deep learning. *IGARSS 2020-2020 IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium*; 2020: IEEE.
- [18] Khaki S, Wang L, Archontoulis SV. A CNN-RNN framework for crop yield prediction. *Frontiers in Plant Science*. 2020;10:1750. <https://doi.org/10.3389/fpls.2019.01750>
- [19] Sabzali Yameqani A, Alesheikh AA, Majidi M. Development of an Ensemble Learning Approach for Soybean Yield Prediction using Satellite and Meteorological Data. *Journal of Geomatics Science and Technology*. 2024;14(1):1-12. [In Persian] <https://doi.org/10.61186/jgst.14.1.1>
- [20] Kwak G-H, Park C-w, Lee K-d, Na S-i, Ahn H-y, Park N-W. Potential of hybrid CNN-RF model for early crop mapping with limited input data. *Remote Sensing*. 2021;13(9):1629. <https://doi.org/10.3390/rs13091629>
- [21] Shahhosseini M, Hu G, Huber I, Archontoulis SV. Coupling machine learning and crop modeling improves crop yield prediction in the US Corn Belt. *Scientific reports*. 2021a;11(1):1606. <https://doi.org/10.1038/s41598-020-80820-1>
- [22] Shahhosseini M, Hu G, Khaki S, Archontoulis SV. Corn yield prediction with ensemble CNN-DNN. *Frontiers in plant science*. 2021b;12:709008. <https://doi.org/10.3389/fpls.2021.709008>
- [23] Colombo-Mendoza LO, Paredes-Valverde MA, Salas-Zárate MdP, Valencia-García R. Internet of Things-driven data mining crop yield prediction in Colombia, a country in the Neotropical zone. *International Journal of Information Technology*. 2024;16(4):2129-38. <https://doi.org/10.1007/s41870-024-01762-9>
- [2] Ren Y, Li Q, Du X, Zhang Y, Wang H, Shi G, Wei M. Analysis of corn yield prediction potential at various growth phases using a process-based model and deep learning. *Plants*. 2023;12(3):446. <https://doi.org/10.3390/plants12030446>
- [3] Bantchina BB, Qaswar M, Arslan S, Ulusoy Y, Gündoğdu KS, Tekin Y, Mouazen AM. Corn yield prediction in site-specific management zones using proximal soil sensing, remote sensing, and machine learning approach. *Computers and Electronics in Agriculture*. 2024;225:109329. <https://doi.org/10.1016/j.compag.2024.109329>
- [4] Kim N, Na S-I, Park C-W, Huh M, Oh J, Ha K-J, et al. An artificial intelligence approach to prediction of corn yields under extreme weather conditions using satellite and meteorological data. *Applied Sciences*. 2020;10(11):3785. <https://doi.org/10.3390/app10113785>
- [5] Kim N, Ha K-J, Park N-W, Cho J, Hong S, Lee Y-W. A comparison between major artificial intelligence models for crop yield prediction: Case study of the midwestern United States, 2006–2015. *ISPRS International Journal of Geo-Information*. 2019;8(5):240. <https://doi.org/10.3390/ijgi8050240>
- [6] HeidariGholanlo M, Javanmard Alitappeh R, Ghnabari Parmehr E. Large Scale Crop Type Mapping Using Multi Temporal Sentinel-2 Imagery and a New Attention U-Net-Vit. *Journal of Remote Sensing and Geoinformation Research*. 2024;2(2):233-46. [In Persian] <https://doi.org/10.22061/jrsgr.2024.11047.1071>
- [7] Terliksiz AS, Altılar DT. Impact of large kernel size on yield prediction: a case study of corn yield prediction with SEDLA in the US Corn Belt. *Environmental Research Communications*. 2024;6(2):025011. <https://doi.org/10.1088/2515-7620/ad27fa>
- [8] Ji Z, Pan Y, Zhu X, Zhang D, Dai J. Prediction of corn yield in the USA corn belt using satellite data and machine learning: from an evapotranspiration perspective. *Agriculture*. 2022;12(8):1263. <https://doi.org/10.3390/agriculture12081263>
- [9] Ju S, Lim H, Ma JW, Kim S, Lee K, Zhao S, Heo J. Optimal county-level crop yield prediction using MODIS-based variables and weather data: A comparative study on machine learning models. *Agricultural and Forest Meteorology*. 2021; 307: 108530. <https://doi.org/10.1016/j.agrformet.2021.108530>
- [10] Xiong D. Crop growth remote sensing monitoring and its application. *Sensors & Transducers*. 2014;169(4):174
- [11] Ma Y, Zhang Z, Kang Y, Özdoğan M. Corn yield prediction and uncertainty analysis based on remotely sensed variables using a Bayesian neural network approach. *Remote Sensing of Environment*. 2021; 259: 112408. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2021.112408>

معرفی نویسندگان

AUTHOR(S) BIOSKETCHES



علی سبزعلی یمقانی دکتری مهندسی نقشه برداری گرایش سیستم‌های اطلاعات مکانی از دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی می‌باشند. ایشان مدرک کارشناسی ارشد و دکتری خود را در رشته مهندسی نقشه برداری- سیستم‌های اطلاعات مکانی در

سال‌های ۱۳۹۴ و ۱۳۹۸ از دانشگاه خواجه نصیرالدین طوسی دریافت نمودند. فعالیت‌های پژوهشی اخیر وی در حوزه شبکه‌های اجتماعی مکان مبنای کاربرد یادگیری ماشین در پردازش تصاویر ماهواره‌ای و کاربردهای تصمیم‌گیری چندمعیاره می‌باشد. در حال حاضر ایشان بیش از ۱۵ مقاله علمی در مجلات و کنفرانس‌های علمی ارائه نموده‌اند و همچنین در کمیته علمی و داوری بیش از ۵ مجله و کنفرانس علمی ملی و بین‌المللی فعالیت داشته‌اند.

Sabzali Yameqani, A. Ph.D. at the Department of Geospatial Information Systems, Faculty of Geodesy and Geomatics Engineering, K. N. Toosi University of Technology, Tehran, Iran

✉ asabzali@mail.kntu.ac.ir



علی اصغر آل شیخ استادتمام گروه سیستم اطلاعات مکانی دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی می‌باشد. ایشان دارای مدرک دکترای تخصصی در رشته مهندسی سیستم اطلاعات مکانی (GIS) از دانشگاه کلگری کانادا (۱۳۷۷) می‌باشند. همچنین،

جوایز و افتخارات متعددی برای مشارکت‌های 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.

Alesheikh, A. A. Full Professor at the Department of Geospatial Information Systems, Faculty of Geodesy and Geomatics Engineering, K. N. Toosi University of Technology, Tehran, Iran

✉ alesheikh@kntu.ac.ir

for smart crop production prediction in the peasant farming domain. *Applied Sciences*. 2022;12(4):1940. <https://doi.org/10.3390/app12041940>

[24] Schmidt L, Odening M, Schlanstein J, Ritter M. Exploring the weather-yield nexus with artificial neural networks. *Agricultural Systems*. 2022;196:103345. <https://doi.org/10.1016/j.agry.2021.103345>

[25] Van Klompenburg T, Kassahun A, Catal C. Crop yield prediction using machine learning: A systematic literature review. *Computers and electronics in agriculture*. 2020;177:105709. <https://doi.org/10.1016/j.compag.2020.105709>

[26] Meghraoui K, Sebari I, Pilz J, Ait El Kadi K, Bensiali S. Applied Deep Learning-Based Crop Yield Prediction: A Systematic Analysis of Current Developments and Potential Challenges. *Technologies*. 2024;12(4):43. <https://doi.org/10.3390/technologies12040043>

[27] Oikonomidis A, Catal C, Kassahun A. Hybrid deep learning-based models for crop yield prediction. *Applied artificial intelligence*. 2022;36(1):2031822. <https://doi.org/10.1080/08839514.2022.2031823>

[28] Luo S, Zhang S, Cong H, editors. Research on consumer purchasing prediction based on xgboost algorithm. 2021 IEEE International Conference on Artificial Intelligence and Computer Applications (ICAICA); 2021: IEEE.

[29] Trojovský P, Dehghani M. Pelican optimization algorithm: A novel nature-inspired algorithm for engineering applications. *Sensors*. 2022;22(3):855. <https://doi.org/10.3390/s22030855>

[30] Felegari S, Moravej K, Sharifi A, Golchin A, Karami P. Prediction of total soil nitrogen variations using three machine learning approaches and remote sensing data. 2023. [In Persian] <https://doi.org/10.22061/jrsgr.2024.10781.1060>

[31] Sabzali Yameqani A, Alesheikh AA. Predicting subjective measures of walkability index from objective measures using artificial neural networks. *Sustainable cities and society*. 2019;48:101560. <https://doi.org/10.1016/j.scs.2019.101560>

[32] Chen W, Zhang H, Mehlatat MK, Jia L. Mean-variance portfolio optimization using machine learning-based stock price prediction. *Applied Soft Computing*. 2021;100:106943. <https://doi.org/10.1016/j.asoc.2020.106943>

Citation (Vancouver): Sabzali Yameqani A, Alesheikh A. A. [Predicting Corn Yield Using Ensemble Learning with Satellite and Meteorological Data]. *J. RS. GEOINF. RES.* 2025; 3(1): 53-64

<https://doi.org/10.22061/jrsgr.2025.11691.1092>



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

Four-dimensional cadastre design, a case study: A region of (IRAN: Tehran)

M. Momtazi, S. Sadeghian*, A. Vafaeinejad

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

ABSTRACT

Received: 12 December 2024
 Reviewed: 19 February 2025
 Revised: 05 May 2025
 Accepted: 31 May 2025

KEYWORDS:

Four-Dimensional Cadastre
 LADM
 Land Management
 Sustainable Development
 Fourth Dimension
 Schedule Cadastre

* Corresponding author

✉ sa_sadeghian@sbu.ac.ir

☎ (+98912) 3505745

Background and Objectives: As the value of real estate and land increases, people try to define the boundaries of their property more accurately in order to prevent the smallest losses. In order to increase the accuracy of real estate boundaries, one cannot be satisfied with flat positions, and on the other hand, new cadastral systems in urban management and meeting the needs of different users require the need to record the changes in urban spaces and use timely 3D models. Today, in order to provide a model for real estate and land management in cities, the third dimension, i.e. height, and the fourth dimension, i.e. time, should also be considered.

Methods: A combination of two methods is as follows: based on the purpose, in an applied manner, based on the results of previous research in this field, and based on the method of data collection in an experimental manner with a scientometric approach

Findings: 3D modeling in cadastre should be created in the context of time to consider all aspects of land management in a country based on the passage of time. Currently, this time-based three-dimensional modeling is known as four-dimensional cadastre. In general, the applications of this research include the correct use of land and cadastre management, as well as the use of 3D cadastre height and 4D cadastre time, construction growth from different aspects, and the need to implement cadastre in the third dimension (elevation) and the fourth (time) exists, the increasing complexity and flexibility of modern use requires that cadastres must manage information related to the third and time (fourth) dimensions. In order to design a four-dimensional cadastre, it is very necessary and important to pay attention to things such as cost, time and available equipment. Land preparation, defining property boundaries, developing infrastructure facilities such as water and sewage networks, electricity and gas, managing urban green spaces and changing the use of these areas are also used in cultural heritage and reconstruction of old buildings. Preventing the phenomenon of land grabbing, along with the forgery of documents or theft and illegal possessions, is also one of the other uses.

Conclusion: The conclusion based on the studies done in this field is as follows. This study proposes a general framework for how to apply temporal information to the model, which is created by integrating cadastral information with LADM on legal objects and CityGML on physical objects. The main requirements for creating a 4D cadastral model for Iran with legal and physical views of existing cadastral objects are presented. This study was tested using real data in a case study. Therefore, this modeling of cadastral data, and management and service delivery steps, have been investigated separately in the scope of the research and are similar to manuals created for different users. The difference between our study and other studies in this field is that all the processing steps (analysis, modeling, storage, transformation and service of data, visualization) performed for 3D cadastral studies are explained and from the software Open source is used in scope



NUMBER OF REFERENCES

30



NUMBER OF FIGURES

18



NUMBER OF TABLES

3

مقاله پژوهشی

طراحی کاداستر چهار بعدی، مطالعه موردی: منطقه‌ای از (ایران: تهران)

محمد علی ممتازی، سعید صادقیان*، علیرضا وفايي نژاد

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

چکیده

پیشینه و اهداف: هر چه ارزش املاک و اراضی بیشتر شود افراد تلاش می‌کنند تا محدوده ملک خود را با دقت بیشتری مشخص کنند تا جلوی کوچک‌ترین ضررها را بگیرند. جهت افزایش دقت محدوده املاک نمی‌توان به موقعیت مسطحاتی اکتفا نمود و از سوی دیگر سیستم‌های نوین کاداستر در مدیریت شهری و تأمین نیازهای کاربران مختلف لزوم ثبت تغییرات فضاهای شهری و به کارگیری مدل‌های سه بعدی زمانمند را ایجاب می‌کند. امروزه جهت ارائه یک مدل برای مدیریت املاک و اراضی در شهرها می‌بایست بعد سوم یعنی ارتفاع و بعد چهارم یعنی زمان را نیز در نظر گرفت.

روش‌ها: تلفیقی از دو روش: بر اساس هدف به صورت کاربردی بر اساس نتایج تحقیقات پیشین در این زمینه و بر اساس روش جمع‌آوری داده به صورت آزمایشی با رویکرد علم سنجی

یافته‌ها: مدل‌سازی سه بعدی در کاداستر باید در بستر زمان ایجاد شود تا تمامی جنبه‌های مدیریت زمین را در یک کشور بر اساس گذر زمان، مورد توجه قرار دهد. در حال حاضر این مدل‌سازی سه بعدی زمانمند را با عنوان کاداستر چهار بعدی می‌شناسند. به طور کلی کاربردهایی از انجام این پژوهش متصور است بیشتر شامل استفاده صحیح از مدیریت زمین و کاداستر هم‌چنین به کارگیری ارتفاع 3D cadastre و زمان 4D cadastre، رشد ساخت و ساز از جنبه‌های مختلف شده و نیاز به اجرای کاداستر که در بعد سوم (ارتفاع) و چهارم (زمان) وجود دارد، افزایش پیچیدگی و انعطاف‌پذیری کاربری مدرن مستلزم آن است که کاداسترها باید اطلاعات مربوط به بعد سوم و زمانی (چهارم) را مدیریت کنند. به منظور طراحی کاداستر چهار بعدی توجه به مواردی از قبیل هزینه، زمان و تجهیزات در دسترس بسیار ضروری و مهم است. آمایش سرزمین، تعیین محدوده املاک، توسعه تأسیسات زیربنایی مانند شبکه‌های آب و فاضلاب، برق و گاز، مدیریت بر روی فضاهای سبز شهری و تغییر کاربری این زمین‌ها هم‌چنین در میراث فرهنگی و بازسازی بناهای قدیمی کاربرد دارد. جلوگیری از پدیده زمین‌خواری در کنار جعل اسناد و یا سرقت و تصرفات غیر قانونی نیز از دیگر کاربردهای حاصل شده است.

نتیجه‌گیری: این مطالعه یک چارچوب کلی برای نحوه اعمال اطلاعات زمانی در مدل پیشنهاد می‌کند که با ادغام اطلاعات کاداستر با LADM روی اشیاء قانونی و CityGML روی اشیاء فیزیکی ایجاد می‌شود. الزامات اصلی برای ایجاد یک مدل کاداستر ۴ بعدی برای ایران با دیدگاه‌های قانونی و فیزیکی از اشیاء کاداستر موجود ارائه شده است. این مطالعه با استفاده از داده‌های واقعی در یک مطالعه موردی مورد آزمایش قرار گرفت. بنابراین، این مدل‌سازی داده‌های کاداستر، و مراحل مدیریت و ارائه خدمات، به صورت جداگانه در محدوده تحقیق مورد بررسی قرار گرفته‌اند و شبیه به کتابچه راهنمای ایجاد شده برای کاربران مختلف است. تفاوت مطالعه ما با سایر مطالعات دیگر در این زمینه این است که کلیه مراحل پردازش (تجزیه و تحلیل، مدل‌سازی، ذخیره‌سازی، تبدیل و سرویس داده‌ها، تجسم) انجام شده برای مطالعات کاداستر سه بعدی توضیح داده شده است و از نرم‌افزار منبع باز در محدوده استفاده شده است.

تاریخ دریافت: ۲۲ آذر ۱۴۰۳
تاریخ داوری: ۰۱ اسفند ۱۴۰۳
تاریخ اصلاح: ۱۵ اردیبهشت ۱۴۰۴
تاریخ پذیرش: ۱۰ خرداد ۱۴۰۴

واژگان کلیدی:

کاداستر چهار بعدی
LADM
مدیریت زمین
توسعه پایدار
بعد چهارم
کاداستر
ر زمانبند

* نویسنده مسئول

sa_sadeghian@sbu.ac.ir

③ ۰۹۱۲-۳۵۰۵۷۴۵

مقدمه

به یاری او می‌آید. این سیستم جامع و کارآمد "کاداستر" نام دارد که به سؤالاتی نظیر چه کسی؟ کجا؟ چه مقدار؟ و چگونه؟ در مورد قطعه زمین پاسخ می‌دهد و امکان مدیریت بهتر و بهره‌وری بیشتر را از زمین برای انسان مهیا می‌سازد [۱-۱۲]. کاداستر زیربنای پیشرفت و توسعه متوازن در هر کشوری است و تا وقتی کاداستر در کشور به عنوان بانک جامعی از اطلاعات پیاده‌سازی نشود، برنامه‌های توسعه و پیشرفت برای تحقق عدالت به نتیجه مطلوب نخواهند رسید [۱-۱۳]. اساس توسعه و پیشرفت جوامع بشری مبتنی بر استفاده بهینه از زمین بوده، چرا که جزء اصلی مدیریت منابع تجدیدناپذیر، توسعه پایدار است. هدف اصلی توسعه پایدار ایجاد یک نظام سازماندهی شده برای بهره‌گیری هرچه بهتر از منابع

انسان از بدو خلقت همواره به زمین وابسته بوده و این وابستگی با گذشت زمان بیشتر شده است. با توسعه جوامع بشری و افزایش روزافزون جمعیت از یک طرف و استفاده بی‌رویه بشر از منابع زمینی و محدودیت‌های بسیاری از این منابع از طرف دیگر، لازم شد تا او طوری در این مسیر حرکت کند که آسیب کمتری متوجه زمین شود و به اصطلاح توسعه‌های پایدار داشته باشد. لازمه توسعه پایدار، داشتن سیستمی است که در مدیریت بهینه زمین به انسان کمک کند. سیستمی که با ممیزی دقیق و فهرست‌بندی صحیح از اموال و حقوق و محدودیت‌های مربوط به آن در یک سطح پیوسته به نام قطعه زمین،

LADM بهترین و پرکاربردترین استاندارد داده ISO برای مدل‌سازی داده‌های قانونی است. علاوه بر این، یکی دیگر از دلایل مهم انتخاب LADM این است که به دلیل استفاده گسترده از آن، امکان ایجاد یک هستی‌شناسی مشترک در پلتفرم بین‌المللی را فراهم می‌کند. اگرچه CityGML به‌ویژه برای نمایش جنبه فیزیکی انتخاب شده است، استانداردهای مختلفی مانند IFC، IndoorGML، LandXML و GeoJSON نیز در دسترس هستند. با این حال، CityGML پرکاربردترین استاندارد داده در جمع‌آوری داده‌های سه بعدی در تمام موسسات دولتی ترکیه است. در نتیجه، تصور می‌شد که هم جمع‌آوری و هم اشتراک‌گذاری داده‌ها آسان‌تر خواهد بود [۴].

ساختار پیاده‌سازی مدل مدیریت املاک

تنوع سازمان‌های متولی مدیریت زمین باعث تنوع کاربردهای مختلف روی املاک و زمین می‌شود، برای نمونه سازمان ثبت املاک روی حقوق، محدودیت‌ها و مسئولیت‌های املاک تأکید دارد و در همان حال توسعه زمین روی محدودیت‌های ناشی از برنامه‌های توسعه تأکید می‌کند و سازمان‌های ارزیابی زمین روی کاربردهای اقتصادی زمین تأکید می‌کند [۲-۲۹]. جهت نیل به‌سوی توسعه مدیریت املاک و زمین می‌بایست برای کاربری زمین برنامه‌ریزی کرد، که این برنامه‌ریزی مبتنی بر نوع عملکرد آن می‌تواند شامل چهار باشد: بینش اطلاعاتی، برنامه‌ریزی پیشرفته، تدوین راه حل برای مسائل، اجرای سیستم مدیریت توسعه. در مدیریت بهینه زمین می‌باید ساختارهای قانونی، سازمانی و فنی را در یک کشور همگون ساخت تا با بهره‌گیری از یک مدل جامع که دربردارنده تمامی حوزه‌ها به نتیجه مطلوبی دست پیدا کرد [۲].

مدل مدیریت املاک به‌عنوان یک مدل مفهومی در صدد است تا با ارائه الگویی یکپارچه برای هر کشور در سطح جهانی یک خط‌مشی مشترک در زمینه مدیریت املاک و زمین ایجاد کند [۲-۳۰]. از جمله ویژگی‌های برجسته مدل مدیریت املاک به‌کارگیری نرم‌افزارهای نوین در حوزه مدیریت زمین و املاک است تا توانایی ایجاد مدیریت در سطح کشور و جهان را داشته باشد. ساختار مدل مدیریت املاک مبتنی بر سه بسته نرم‌افزاری اصلی و یک بسته فرعی است که جهت تسهیل در عملکرد ساماندهی داده‌های مکانی در هر سطحی مورد نظر است. بسته اصلی مدل مدیریت املاک به چهار کلاس اصلی زیر تقسیم می‌شوند: کلاس LA_Party، بیانگر صاحبان زمین اعم از اشخاص حقیقی یا حقوقی، کلاس LA_RRR، بیانگر حقوق، محدودیت‌ها و مسئولیت‌ها در چارچوب قوانین، کلاس LA_BAUnit، بیانگر موجودیت نهادهای اداری در نظام ثبتی و قانونی، کلاس LA_SpatialUnit، بیانگر فضای قانونی قطعه زمین‌ها و شبکه‌های زیر بنایی [۲].

جنبه‌های مکانی و زمانی در LADM

LADM کاملاً با استانداردهای پذیرفته شده و موجود در هندسه و توپولوژی منتشر شده مطابقت دارد. بسته‌ها دارای توضیحات هندسی

تجدیدناپذیر است [۲]. حجم و وسعت زیاد داده‌های کاداستر و همچنین فراوانی تغییرات در آن‌ها، ضرورت بروزرسانی این داده‌ها و اعمال تغییرات در جنبه‌های مختلف این اطلاعات را آشکار می‌سازد. نکته‌ای که در این خصوص وجود دارد این است که بروزرسانی اطلاعات کاداستر به معنای پاک کردن اطلاعات قبلی و جایگزین کردن آن با اطلاعات جدید نیست، بلکه اطلاعات قدیمی اغلب لازم است به‌عنوان شجره‌نامه تغییرات املاک و حقوق ملکی مربوط به آن‌ها در بخشی فعال از پایگاه داده ثبت و ذخیره باشند. به عبارت دیگر مسئله این است که چگونه بتوان داده‌های از گذشته دور تاکنون را همزمان مدیریت کرد به‌طوری که بتوان به آسانی تغییرات را در طی دوران مدیریت کرده و در هر لحظه هم از اکنون و هم از گذشته آن‌ها اطلاعات به‌دست آورد [۱-۱۴]. به‌طور سنتی کاداسترها بر اساس نمایش تقسیم زمین به‌صورت دو بعدی (یعنی قطعات) در یک لحظه معین از زمان است، و جنبه‌های ۳ بعدی و ۴ بعدی مالکیت زمین را در فهرست‌ها و نقشه‌های کاداستر پنهان می‌کند. قطعات کاداستر دوبعدی ثبت شده در حال حاضر برای سازماندهی و مدل‌سازی اطلاعات کالاها و منافع پیچیده در زمین مناسب نیستند [۳-۲۸].

با این حال، فشار فزاینده بر زمین و افزایش ارزش زمین باعث نیاز روزافزون به اطلاعات ۴ بعدی (از جمله ۳ بعدی) در ثبت کاداستر این مشاهدات به‌ویژه برای تاسیسات زیرزمینی صادق است [۳]. از آنجایی که مدل داده، هسته مفهومی یک پایگاه داده محسوب می‌شود، برای ذخیره‌سازی، بازیابی و تجزیه و تحلیل کارا و مؤثر سوابق تغییرات قطعات زمین، نیازمند طراحی و توسعه یک مدل داده مکانی-زمانی برای کاداستر است به‌گونه‌ای که بتواند تنوع زیاد پرسش‌های مطرح و اولویت‌دار در کاداستر زمانمند را پاسخگو باشد و در آینده به‌عنوان یک بستر مناسب برای طراحی یک مدل داده مکانی-زمانی جامع برای کاداستر کشور مورد توجه قرار گیرد [۱]. ابزارها اغلب زیر سطحی هستند و بنابراین دارای یک ویژگی سه بعدی هستند. در نهایت، ثبت کاداستر شبکه‌های آب و برق شامل جنبه‌های زمانی است که عبارتند از (حداقل) ایجاد اولیه، تغییرات در طول عمر (شامل تقسیم و ادغام شبکه‌ها) و در نهایت حذف. تجزیه و تحلیل نیاز متشکل از یک مطالعه بر مبنای مفهومی برای کاداستر ۴ بعدی و در مورد نیازهای کاداستر ۴ بعدی ارائه شده است [۳]. به دلیل دسته‌بندی و جدا کردن رویدادها، این مدل می‌تواند انواع تغییرات اصلی که در محدوده املاک اتفاق افتاده است (همچون تفکیک، تجمیع، تغییر هندسه و تغییر توصیفات املاک) را ذخیره‌سازی کند. به دلیل ثبت نوع رویداد و زمان تغییر قطعه زمین، این مدل می‌تواند تاریخچه قطعه زمین و دلایل تغییرات آن را پرس و جو کند [۱].

روش تحقیق

ضرورت مطالعه مدل مدیریت املاک (LADM) در کاداستر سه و چهار بعدی

باشد، اما موارد استثنایی بسته‌های حجمی را از این مقدار کم کنید. توضیحات سه بعدی (به‌عنوان مثال به شکل چند وجهی)، شالوده مفهومی یک LA ۴ بعدی دوباره مفهوم پارتیشن است. در این مورد تنها فضا نیست که در نظر گرفته می‌شود، بلکه به موازات بعد زمانی نیز مورد توجه قرار می‌گیرد. بنابراین، هر حق به یک ابتدایی در فضای ۴ بعدی متصل است [۵-۲۱].

مرزها ناپیوستگی در روابط (حقوق) بین مردم و زمین را نشان می‌دهد. در یک حجم اولیه ۴ بعدی، حقوق همگن هستند. یک مرز می‌تواند یک مرز مکانی باشد، به‌معنای سنتی، جدایی بین ۲ قطعه، اما یک مرز می‌تواند یک مرز زمانی نیز باشد. در تئوری، در مورد اجسام پویا، مرزهای مختلط وجود دارد. به‌عنوان مثال، رودخانه متحرک به‌عنوان مرز یا حق متحرک متعلق به یک گروه عشایری. پارتیشن ۴ بعدی در واقع پایه و اساس تفکر کاداستر (حقوقی) ما در مورد سازماندهی حقوق است. سوال بعدی این است که چگونه این مفاهیم را در یک سیستم پیاده‌سازی کنیم. طبیعی‌ترین گزینه ممکن است استفاده از ساختار توپولوژیکی فضا-زمان ۴ بعدی به‌عنوان پایه باشد که ثابت را تضمین می‌کند. با این حال، این ساختارهای توپولوژیکی ۴ بعدی هنوز در بسته‌های نرم‌افزاری فعلی (سیستم‌های CAD، GIS، DBMS) موجود نیستند و ابتدا به تحقیق و توسعه بیشتری نیاز است. یک جایگزین یک راه حل فنی مبتنی بر ویژگی‌های فضایی سه بعدی و ویژگی‌های زمانی جداگانه است [۵].

در این راه حل، هیچ تضمین طبیعی وجود ندارد که نتیجه یک پارتیشن ۴ بعدی است. برای به‌دست آوردن (یا حداقل نزدیک شدن) به پارتیشن باید محدودیت‌های اضافی فرموله شود. برای مثال، اگر یک بسته حجمی سه بعدی به دو بسته حجمی جدید تقسیم شود، باید مطمئن شود که وقتی شی حجم سه بعدی قدیمی نامعتبر می‌شود، در همان لحظه دو شی حجم سه بعدی جدید معتبر می‌شوند. این را می‌توان با تعریف محدودیت‌ها بر روی ویژگی‌های فضایی و زمانی سه بعدی نمونه‌های سیستم LA اعمال کرد. بنابراین، هیچ لحظه‌ای در زمان وجود ندارد که همان مکان (نقطه) در فضا تحت پوشش هیچ یا دو یا چند حق متضاد (مانند مالکیت نامحدود/حق مالکیت آزاد) نباشد. اینکه آیا اشیاء پویا نیز می‌توانند در راه‌حل فنی ویژگی‌های فضایی و زمان سه بعدی مستقل مدل‌سازی شوند، یک مسئله باز باقی می‌ماند. به‌دلیل حرکت مداوم، دیوارهای "غیر عمودی" در بعد زمانی وجود دارد [۵].

کاداستر چهار بعدی

استفاده از زمین همیشه، حداقل به‌طور ضمنی، به مقدار معینی از فضا (3D) مربوط می‌شود و مدت زمان معینی را دربر می‌گیرد (3D + زمان، یا 4D) [۳]. تحقیقات در سال‌های گذشته نشان داده است که ثبت سه بعدی اطلاعات زمین در سیستم‌های کاداستر می‌تواند مزایای قابل توجهی برای امنیت حقوقی املاک و مستغلات ارائه دهد. بینش در مورد حقوق و محدودیت‌های مربوط به ساختارها و ویژگی‌ها در پیکربندی‌های سه بعدی را بهبود می‌بخشد اما در کنار جنبه فضایی (سه

دو بعدی یا سه بعدی هستند. در دوبعدی یک ناحیه هندسی با حداقل سه SurveyPoint تعریف می‌شود که در هر تعریف در همان صفحه افقی قرار دارند (زیرا مقدار Z ندارند، یعنی روی سطح زمین هستند). در سه بعدی یک ناحیه هندسی با حداقل چهار SurveyPoint غیرپارتیشن تعریف می‌شود. این منجر به یک چهار وجهی، ساده‌ترین شی حجم سه بعدی می‌شود. از محدودیت‌ها برای نشان دادن نمایش‌های معتبر در حالت دو بعدی و سه بعدی استفاده می‌شود. درک این نکته مهم است که بین خود جسم فیزیکی سه بعدی و فضای قانونی مربوط به این شی تفاوت وجود دارد. LADM فقط "فضای قانونی" را پوشش می‌دهد. یعنی فضایی که مربوط به LA (پوشش محدود کننده شی) است، که معمولاً بزرگ‌تر از وسعت فیزیکی خود شی است (به‌عنوان مثال شامل یک منطقه ایمنی). هنگام مدل‌سازی تغییرات زمانی دو رویکرد متفاوت وجود دارد: مدل‌سازی مبتنی بر رویداد و حالت. LADM هم رویداد (از طریق SourceDocuments) و هم مدل‌سازی زمانی مبتنی بر حالت (از طریق VersionedObject) را پوشش می‌دهد [۵].

در مدل‌سازی مبتنی بر رویداد، تراکنش‌ها به‌عنوان موجودیت‌های مجزا در سیستم (با هویت و مجموعه‌ای از ویژگی‌های خاص خود) مدل‌سازی می‌شوند. هنگامی که حالت شروع شناخته شده باشد و همه رویدادها شناخته شوند، می‌توان هر حالت در گذشته را با طی کردن کل زنجیره رویدادها بازسازی کرد. از سوی دیگر، در مدل‌سازی مبتنی بر حالت، حالت‌ها (یعنی نتایج) به‌صراحت مدل‌سازی می‌شوند. هر شی (حداقل) دو تاریخ/زمان دریافت می‌کند که نشان‌دهنده بازه زمانی است که این شیء معتبر است. از طریق مقایسه دو حالت بعدی، می‌توان آنچه را که در نتیجه یک رویداد خاص اتفاق افتاده بازسازی کرد. با انتخاب شیء بر اساس فاصله زمانی آن‌ها (tmin-tmax) می‌توان وضعیت را در یک لحظه معین از زمان به‌دست آورد. در LADM، هر کلاس شی که نیاز به نسخه-سازی دارد، از کلاس VersionedObject ارث می‌برد. بنابراین، نیازی به افزودن صریح ویژگی‌های tmin و tmax به کلاس‌های اصلی RegisterObject، RRR و Person نیست [۵-۱۹].

از نقطه نظر مفهومی، یکی از پایه‌های LA ۲ بعدی این است که هیچ شکاف یا همپوشانی در قطعه‌ای که حقوق بر آن استوار است، وجود نداشته باشد، یعنی یک پارتیشن مسطح از سطح (به‌معنای حجم‌های دارای تعریف شده توسط ستون‌های فضایی در بالا و زیر قطعه سطح زمین). همین پایه (پارتیشنی از فضا بدون همپوشانی یا شکاف) نیز اساس تفکر مفهومی با توجه به LA سه بعدی است. [۵-۲۰]. این دیدگاه مفهومی به‌خودی خود مستقیماً به یک پیاده‌سازی فنی سه بعدی یکسان ترجمه نمی‌شود. پیشرفته‌ترین ترجمه، داشتن یک سیستم مبتنی بر ساختار توپولوژیکی کامل سه بعدی بر اساس حجم‌ها، چهره‌ها، لبه‌ها و گره‌ها (به‌عنوان توسعه سیستم‌های فعلی مبتنی بر توپولوژی دو بعدی با چهره‌ها، لبه‌ها و گره‌ها) است. با این حال، در کوتاه مدت، یک راه حل فنی عملی برای پیاده‌سازی می‌تواند: استفاده از بسته‌های دوبعدی به‌عنوان پایه (با حجم ستون‌های ضمنی آن‌ها) برای تقسیم فضا

عوارض مختلف از جمله ساختمان‌ها را فراهم کند؛ بنابراین دقت داده‌ها ارتباط مستقیمی با هزینه تولید مدل‌های مورد استفاده در کاداستر چهار بعدی دارد. طی سال‌های اخیر بارها شاهد مطالعات و پژوهش‌هایی در مورد اصول و زمینه‌های مربوط به سیستم اطلاعات مکانی بوده‌ایم اما مسئله مهم ایجاد یک سیستم اطلاعات مکانی زمانمند برای سیستم کاداستر است و باید توجه داشت که کاداستر چهار بعدی به معنای تعیین قوانین و تقسیم فضاها بدون همپوشانی و جدادگی به موازات زمان است [۷].

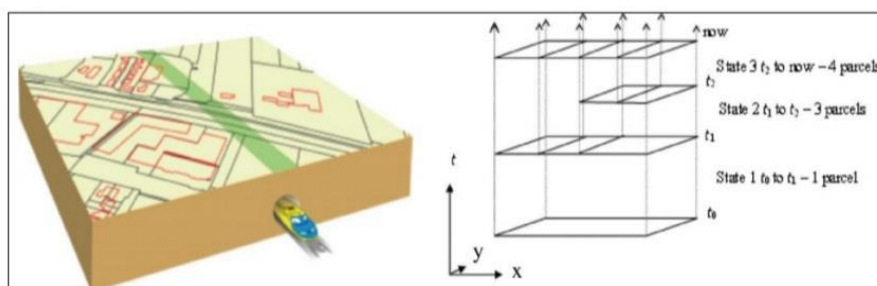
رابطه مردم و زمین ماهیتی بسیار پویا دارد که انگیزه بحث در مورد کاداستر چهار بعدی در این مقاله است. مردم ظاهر می‌شوند و می‌روند (به‌ویژه در مناطق شهری)، مردم زمان محدودی برای زندگی دارند، برنامه‌ریزی دولت‌ها برای تغییر محیط (برنامه‌ریزی فضایی) یا توسعه‌های فضایی می‌تواند حتی کاملاً کنترل نشده باشد. علایق مردم در زمین همیشه دارای یک جزء زمانی ضمنی یا آشکار است. نمونه‌هایی از حقوق و محدودیت‌های دارای عنصر زمانی عبارتند از: اجاره نامه، سهام زمانی، امتیازات معدنی، حقوق مربوط به فصل (چریدن، چیدن/جمع‌آوری گیاهان، شکار/ماهگیری...)، حتی حق مالکیت که در حوزه‌های قضایی قانون مدنی شناخته می‌شود دارای یک عنصر زمانی مرتبط است: نامحدود یا نامحدود در زمان (تحت صلاحیت موجود)، اما مرزهای شی می‌تواند در زمان متفاوت باشد [۶].

یک مثال بسیار پویا موردی است که در آن مرزهای بسته از حرکات ویژگی‌های طبیعی مانند خطوط ساحلی یا مرزهای رودخانه پیروی می‌کنند. دسته دیگری از نمونه‌هایی که انگیزه بحث در مورد کاداستر چهار بعدی را تشکیل می‌دهند، زمانی است که ثبت تاریخی در یک ملک خاص مورد نیاز است ("چه انتقال مالکیت بین سال‌های ۱۹۰۰ و ۲۰۰۳ اتفاق افتاد؟" "محل مرز در سال ۱۹۸۰ کجا بود؟") یا زمانی که اطلاعات تاریخی در مورد توسعه کاربری زمین در یک منطقه خاص برای حمایت از سیاست زمین در آینده مورد نیاز است (به کاداستر چند منظوره، توزیع مجدد زمین بر اساس روابط قبلی مردم و زمین، یکپارچه‌سازی زمین و غیره فکر کنید). دسته آخر جایی است که باید تاریخی‌های از محتوای پایگاه داده نگهداری شود [۶-۲۲].

بعدی (حقوق و محدودیت‌ها، جنبه زمانی، بعد چهارم منافع در املاک، جنبه مهم ثبت کاداستر است. حقوق، مسئولیت‌ها و محدودیت‌ها یک عنصر زمانی دارند. دسته دیگری از نمونه‌های نیاز به اطلاعات کاداستر ۴ بعدی زمانی است که ثبت تاریخی در یک ملک خاص مورد نیاز است یا زمانی که اطلاعات تاریخی در مورد توسعه کاربری زمین در یک منطقه خاص برای حمایت از سیاست زمین در آینده مورد نیاز است. این جنبه زمان دنیای واقعی است. دسته آخر جایی است که تاریخی‌ها محتوای پایگاه داده مورد نیاز است. این جنبه زمان سیستم است. واضح است که زمان همیشه نقش مهمی در سیستم‌های کاداستر ایفا کرده است، اما تاکنون این جنبه زمانی کاملاً مستقل از جنبه مکانی (دو بعدی یا سه بعدی) مورد بررسی قرار گرفته است [۶-۲۲].

سیستم‌های کاداستر فعلی با موقعیت‌های سه بعدی و جنبه‌های زمانی ۴ بعدی به صورت موقت در رویه‌های کاداستر موجود سروکار دارند. از آنجایی که این اطلاعات به صورت یکنواخت ثبت نمی‌شوند، بینش در همه جنبه‌های مربوطه (چه کسی در یک لحظه خاص، برای چه مکان و برای چه دوره‌ای از چه حقوقی برخوردار است) اغلب مشکل‌ساز است. اساس کاداستر معمولاً یک بسته دو بعدی است و ثبت بر اساس چهار بعدی تنظیم نشده است. یک رویکرد یکپارچه‌تر از جنبه‌های زمانی و مکانی باید مورد بررسی قرار گیرد تا ببینیم آیا می‌توان پیشرفت‌هایی را به دست آورد یا خیر. درزهای کاداستر ۴ بعدی بسیار جذاب است زیرا همه موارد دیگر (دو بعدی با بسته‌های ثابت بیشتر، ۲ بعدی با بسته‌های متحرک/حقوق، بسته‌های حجم ایستا ۳ بعدی بیشتر) همه در یک سیستم کلی قرار می‌گیرند [۶].

کاداستر چهار بعدی نیرو محرکه سیستم‌های مدیریت زمین در امر برآورده ساختن نیازهای زیرساخت اطلاعات مکانی در هر کشور به شمار می‌رود [۷-۲۳]. همچنین یک سیستم کاداستر چهار بعدی باید قابلیت برقراری ارتباط بین سه مؤلفه: الف) قانونی: تنظیم قوانین مالکیت در کاداستر، ب) سازمانی: ارتباط و نقش ارگان‌های مختلف در کاداستر، پ) فنی: فراهم کردن سیستم عاملی برای تحقق کاداستر چهار بعدی را داشته باشد [۷-۲۴]. یک مدل‌سازی بهینه باید تمامی نیازهای کاربران مختلف مدیریت زمین را تشخیص دهد تا بتواند هماهنگی بهتری میان اجزای مختلف آن ایجاد کند [۷-۲۵]. جمع‌آوری داده‌ها در کاداستر چهار بعدی باید به گونه‌ای باشد تا دقت لازم را برای آنالیز و تحلیل بر روی



تصویر ۱: سمت چپ تصویر سه بعدی (عبور تونل مترو از زیر تعدادی پارسل) و سمت راست مفهوم زمان (تغییر از یک زیر بخش) در ثبت کاداستر [۳ و ۸].

Fig. 1: The left side of the 3D image (passing the subway tunnel under a number of parcels) and the right side of the concept of time (change from a sub-section) in the cadastral registration [3,8]

زنجیره رویدادها امکان پذیر است. همچنین می توان وضعیت فعلی را نشان داد و حالت شروع را حفظ نکرد (و از طریق آن به گذشته برگردید معکوس وقایع).

○ در مدل سازی مبتنی بر حالت، فقط حالت ها (یعنی نتایج) به صراحت مدل سازی می شوند: هر شی (حداقل) دو تاریخ/زمان دریافت می کند که نشان دهنده بازه زمانی در طول که این شی معتبر است. از طریق مقایسه دو حالت بعدی، می توان آنچه را که در نتیجه یک رویداد خاص اتفاق افتاده بازسازی کرد. به دست آوردن حالت در یک لحظه معین از زمان بسیار آسان است، فقط با انتخاب شیء بر اساس فاصله زمانی آن ها ($t_{min}-t_{max}$) [۶].

موارد کاداستر ۴ بعدی

مورد «اشیاء پویا»، مورد «اشتراک گذاری زمان»، و ثبت موردی شرکت ها اشیاء پویا شامل تحرک مرزها به عنوان مثال: در صورت پیچ خوردگی رودخانه شامل مرزهای بسته در مزرعه می توانند در طول زمان به دلیل فعالیت های انسانی به عنوان شخم زدن یک مزرعه، قرار دادن حصارهای جدید یا به دلیل پدیده های طبیعی، حرکت کنند. تصرف نامطلوب (که جزء زمانی دارد) را می توان به این موضوع مربوط کرد. ابزار گردآوری اطلاعات در این تحقیق مقالات و پژوهش های ارائه شده در این زمینه بوده و استفاده کنندگان شامل: شهرداری ها، سازمان ثبت اسناد و املاک کشور و سازمان میراث فرهنگی و آثار باستانی همچنین وزارت مسکن و شهرسازی است. همچنین لازم است تاکید شود این روش کار و بررسی کاداستر در زمینه ۳ بعدی + زمان (۴ بعدی) تاکنون در ایران انجام نشده است و این مطالعه، نوآوری در این زمینه خواهد بود [۶].

درزهای کاداستر ۴ بعدی بسیار جذاب است زیرا همه موارد دیگر (دوبعدی با بسته های ثابت بیشتر، ۲ بعدی با بسته های متحرک/حقوق، بسته های حجم ایستا ۳ بعدی بیشتر) همه در یک سیستم کلی قرار می گیرند. همانطور که کاداستر با تاریخچه زمانی تراکنش نشان داده شده است. این مطالعه آنچه را که برای تکمیل طرحواره لازم است در نظر می گیرد. به طور مشخص: (۱) ذخیره سازی دنیای واقعی (زمان معتبر)، (تاریخ). (۲) ذخیره سازی داده های زمانی "زمان آزمایشی" برای پیشرفت های پیشنهادی. (۳) بهبود دقت گوشه های کاداستر، هم در واحدهای فضایی دوبعدی و سه بعدی و هم در تعریف واحدهای فضایی تاریخی. (۴) نماهای دوبعدی و سه بعدی داده ها و به روز رسانی دو بعدی و سه بعدی داده ها. (۵) در دسترس قرار دادن داده ها از طریق خدمات مقیاس پذیر، از جمله دسترسی به موارد تاریخی، و تاریخچه به روزرسانی [۹].

الزامات ثبت شبکه های تاسیساتی در کاداستر ۴ بعدی

برای ثبت شبکه های آب و برق، تمایز بین ثبت قانونی و فیزیکی شبکه ها مهم است، زیرا این ثبت ها الزامات مختلفی را برآورده می کنند. در ثبت فیزیکی نیاز به اطلاعات دقیق در مورد مکان شبکه ها و شخص/شرکت مدیریت کننده شبکه دارد. ثبت قانونی باید نمای کلی روشنی از حقوق

در کاداستر ۳ بعدی علاوه بر جنبه های، حقوق، محدودیت ها، مسئولیت ها شامل یک بعد زمانی است. برای اینکه بتوانیم مدیریت زمین را مدیریت پویایی کنیم، باید زمان به عنوان بعد چهارم به کار گرفته شود. رشد فشار بر زمین و افزایش ارزش زمین منجر به استفاده بیش تر و پیچیده تر زمین می شود، که باعث افزایش نیاز برای اطلاعات ۴ بعدی (شامل ۳ بعدی) در ثبت کاداستر شده است [۸]. این مشاهده به ویژه برای ابزارهای زیر زمینی درست است. این عوارض زیر بنایی بیشتر در قسمتی از پارسل قرار دارند و شاید از مرز خیلی از پارسل ها عبور می کنند. بسیاری از این پارسل ها متعلق به اشخاصی غیر از مدیران شبکه های خدمات رفاهی زیر زمینی که ماهیت ۳ بعدی دارند خواهد بود (تصویر ۱ سمت چپ). ثبت کاداستر شبکه های خدماتی شامل جنبه های زمانی که شامل ایجاد اولیه، تغییرات در طول زمان عمر (شامل جداسازی و پیوند شبکه ها) و حذف پایانی است (تصویر ۱ سمت راست). عدم اطلاع از عمق و مکان این شبکه های زیر زمینی باعث بروز مسائل ناگوار جانی و مالی بسیار زیادی در حوادث طبیعی و غیرطبیعی شده است [۳].

این امر در تقسیم پارسل ها در طول زمان به قطعات کوچک تر با مالکین متفاوت و نیز همچنین تبدیل دو یا چند پارسل با مالکین متفاوت به یک پارسل با چندین مالک یا یک مالک نیز شامل بعد زمانی با قوانین و حقوق و مسئولیت های لازم است که باید در بحث کاداستر در نظر گرفته شود [۸]. مفاهیم سازمانی و قانونی کاداسترهای سه بعدی و چهار بعدی ثابت شده است که استفاده از بعد سوم به ویژه برای نمایش فضای قانونی در اطراف اشیاء فیزیکی که از بالا یا زیر زمین ها عبور می کنند. مانند تونل ها (تصویر ۱ سمت چپ). علاوه بر این، بعد زمانی مورد نیاز است تا بتوان نحوه تغییر وضعیت حقوقی زمین در زمان را ثبت کرد. در اکثر ثبت های کاداستر، بعد زمان با نسخه سازی اشیاء (مدل مبتنی بر حالت) نشان داده می شود. توسط مهرهای زمانی که نشان دهنده ایجاد و حذف اشیاء نشان داده شده در سیستم کاداستر است، (تصویر ۱ سمت راست) ایجاد یک کاداستر ۴ بعدی که تمام اطلاعات چهار بعدی املاک را ثبت می کند و دسترسی به آن ها را فراهم می کند. یک کاداستر ۴ بعدی بر اساس مدل دامنه مدیریت زمین برای شبکه های ابزار مورد مطالعه قرار گرفته است تا ویژگی های نمایندگی های فیزیکی و قانونی را توضیح دهد. هدف LADM استانداردسازی در حوزه کاداستر است، تعاریف مشترکی را برای اطلاعات زمین ارائه می کند و استفاده مؤثر، درک و اتوماسیون داده های مرتبط با زمین را برای افزایش اشتراک داده ها تسهیل می کند. این مدل دیدگاهی از رابطه بین اشیاء فیزیکی و حقوقی ارائه می دهد [۳]. هنگام مدل سازی نتیجه سیستم های پویا (تغییرات گسسته در وضعیت سیستم) دو رویکرد متفاوت وجود دارد، این ها مدل سازی مبتنی بر رویداد و/یا حالت هستند:

○ در مدل سازی مبتنی بر رویداد، تراکنش ها به عنوان یک موجودیت جداگانه در سیستم (با هویت و مجموعه ای از ویژگی ها) مدل سازی می شوند. هنگامی که حالت شروع شناخته شده باشد و همه رویدادها شناخته شوند، بازسازی هر حالت در گذشته از طریق پیمایش کل

اگرچه ثبت قطعات طبق قانون کاداستر انجام می‌شود، اما ثبت بخش‌های مستقل تابع قانون مالکیت است. ضمناً علاوه بر اینکه هر بخش مستقل در یک ساختمان متعلق به مالک آن است، اما قسمت‌های مشترک (آسانسور، پله و پارکینگ) در محدوده همکاری قرار می‌گیرد. در ترکیه، قانون اساسی به اندازه کافی مرزهای بعد سوم را شرح نمی‌دهد. بر اساس قانون مدنی ترکیه، مرزهای ملک بر روی قطعه به عمق و ارتفاع معینی محدود می‌شود (تصویر ۳) [۴]. با این حال، برخی از حقوق در قانون اساسی ترکیه (به‌عنوان مثال، حق ارتفاق، حق انتفاع، حق عبور، رهن) برای محدود کردن این ارتفاع و عمق استفاده می‌شود. بنابراین، این حقوق واقعی با اعمال بعد سوم همراه است. با این حال، اطلاعات مربوط به حقوق واقعی به‌صورت متنی در حاشیه عنوان ثبت می‌شود و نمایش گرافیکی دو بعدی تا حد زیادی امکان‌پذیر است.

انواع تغییرات در اشیاء زمین مرجع در پایگاه داده مکانی-زمانی
اصل اساسی پایگاه داده مکانی-زمانی، مسئله ثبت تغییرات در اشیاء زمین مرجع است. بنابراین در ابتدا باید به بررسی اینکه چه چیزی می‌تواند موجب تغییر در یک شیء شود، بپردازیم. همانطور که گفته شد یک شیء زمین مرجع، یک پدیده گسترش یافته در سه جهت زمانی، مکانی و توصیفی است. از آنجایی که تغییر در جنبه زمانی یک پدیده جغرافیایی به‌طور مداوم و پیوسته است، ردیابی آن بدون مفهوم است. بنابراین ما فقط روی تغییرات دو جزء دیگر متمرکز می‌شویم تصویر ۴ یک دیدی از انواع تغییرات در اشیاء زمین مرجع را ارائه می‌دهد [۱-۱۶].

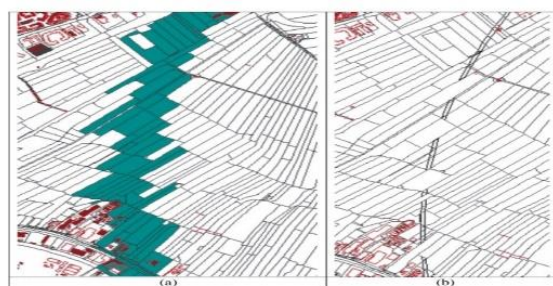
انواع تغییرات قطعه زمین در کاداستر
اگرچه بسیاری از هستنده‌ها در مدیریت کاداستر وجود دارند، قطعه زمین مهم‌ترین هستنده‌ای است که واحد اساسی کاداستر به‌شمار می‌رود. تغییر در قطعات زمین در تغییر داده‌های ثبت زمین مؤثر است که می‌تواند به سه نوع تغییر کلی تقسیم شود. در ادامه به بررسی این سه نوع تغییر می‌پردازیم.

○ تغییرات مکانی قطعات زمین: داده‌های مکانی قطعات زمین ممکن است به دلیل تفکیک، تجمع، بازسازی مرزهای قطعات زمین و همچنین تخصیص یک قطعه جدید از قسمت مرز مشترک چند قطعه تغییر کند. در تصویر ۵ نمونه‌ای از این نوع تغییرات نشان داده شده است.

○ تغییر توصیفی (غیر مکانی) قطعه زمین: از جمله این تغییرات می‌توان تغییر مالکیت املاک و مستغلات از طریق برخی معاملات از قبیل خرید، فروش، اجاره، میراث‌بری و... تغییرات حقوق ملکی در نتیجه برخی معاملات از قبیل رهن، اجاره، محدودیت‌ها و مسئولیت‌ها و همچنین تغییر کاربری قطعات زمین را نام برد [۱-۱۷].

○ هر دو تغییر مکانی و تغییر توصیفات: در این حالت با اعمال یک تغییر هر دو خصوصیات مکانی و توصیفی قطعات زمین تغییر می‌کند. این سه حالت می‌توانند به ۶ نوع عملیات اساسی تغییر تقسیم شوند که در ادامه به توضیح آن‌ها می‌پردازیم:

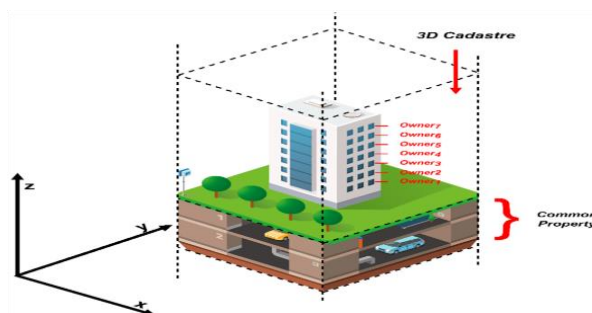
مالکیت درگیر ارائه دهد. حقوق در شبکه از یک طرف مانند مالکیت و حقوق در زمینی که به نفع شبکه ایجاد شده است از سوی دیگر (به‌عنوان مثال حق ارتفاق، اجاره نامه) توجه داشته باشید. این امکان وجود دارد که فضای قانونی قبلاً در ثبت کاداستر گنجانده شده است، قبل از اینکه شبکه تاسیسات واقعاً ساخته و در ثبت فیزیکی لحاظ شود. ثبت فیزیکی می‌تواند با ارائه اطلاعات مکان شبکه‌ها از ثبت قانونی پشتیبانی کند، اما ثبت نام قانونی بر اساس یک لحظه از زمان ثبت فیزیکی است. بنابراین، ثبت فیزیکی شرکت‌ها ممکن است با ثبت قانونی همان شبکه، مغایرت داشته باشد [۳].



تصویر ۲: حقوق شبکه آب و برق بر روی قطعات متقاطع ایجاد شده است (وضعیت خیالی). در (الف) حقوق بر روی بسته‌های کامل ایجاد می‌شود. در (ب) برخی از بسته‌ها برای محدود کردن حقوق شبکه آب و برق به بخشی از بسته که در آن شبکه واقع شده است [۳]

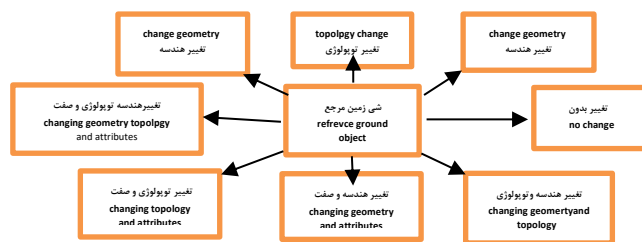
Fig. 2: Water and electricity network rights are created on intersecting parts (imaginary situation). In (a) rights are created on complete packages. in (b) some parcels to limit the rights of the water and electricity network to the part of the parcel where the network is located [3]

ثبت قانونی نمی‌تواند برای تعیین محل دقیق شبکه (به‌عنوان مثال برای جلوگیری از آسیب‌های فیزیکی ناشی از کارهای ساختمانی در زمین) استفاده شود. در بهینه‌ترین حالت، در صورت به‌روز رسانی (یعنی تغییرات) در ثبت فیزیکی، یک سیگنال باید به سیستم قانونی ارسال شود، که سپس باید تصمیم بگیرد که از نسخه قانونی موجود شبکه ابزار به نسخه جدید منتقل شود (یا نه). شناسه‌ها و مهرهای زمانی اهمیت حیاتی دارند. بنابراین، نقشه کاداستر هم در کوئینزلند و هم در ترکیه یک نمای کلی از تمام شبکه‌های برق ارائه نمی‌کند، زیرا بستگی به موقعیت خاصی دارد که چگونه مالکیت شبکه ایجاد می‌شود. این حتی ممکن است برای یک شبکه متفاوت شود [۳].



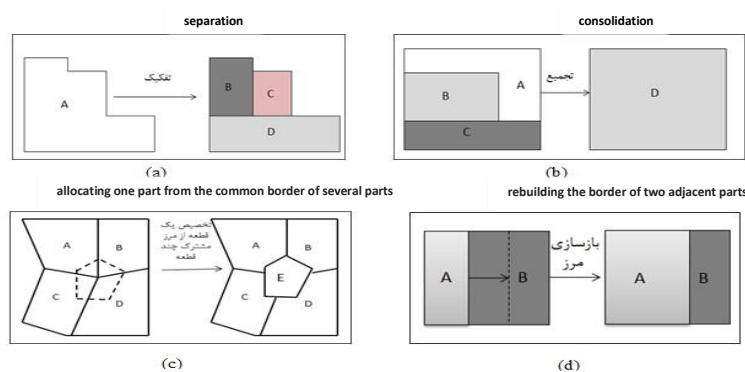
تصویر ۳: استفاده از ویژگی سه بعدی را نشان می‌دهد [۴]

Fig. 3: shows the use of the three-dimensional feature [4]



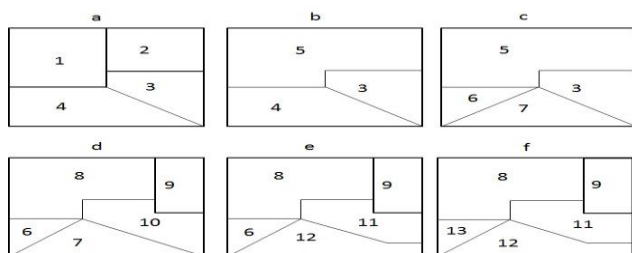
تصویر ۴: آنچه میتواند باعث تغییر یک شی جغرافیایی شود [۱]

Fig. 4: What can change a geographical object [1]



تصویر ۵: تغییر مکانی قطعات در ثبت زمین: a تفکیک، b تجميع، c تخصیص یک قطعه از مرز مشترک چند قطعه، d بازسازی مرز دو قطعه مجاور [۱]

Fig. 5: The spatial change of parts in land registration: a separation, b consolidation, c allocating one part from the common border of several parts, d rebuilding the border of two adjacent parts [1]



تصویر ۶: فرآیند تغییر قطعه [۱]

Fig. 6: The process of changing the part [1]

روند تغییرات در تصویر ۶ می‌تواند بصورت زیر شرح داده شود:

○ در زمان T_1 ، قطعه زمین‌های ۱ و ۲ و ۳ و ۴ وجود داشته‌اند (شکل a).
○ در زمان T_2 ، قطعات ۲ و ۱ ترکیب شده و قطعه جدید ۵ ایجاد شده است (شکل b).

○ در زمان T_3 ، زمین ۴ به قطعات جدید ۶ و ۷، تقسیم شده است. بنابراین زمین ۴ قطعه والد و زمین‌های ۶ و ۷، قطعات فرزند نامیده می‌شوند (شکل c).

○ در زمان T_4 ، قطعات از بخش مرزی زمین‌های ۳ و ۵، برای تولید قطعه جدید ۹ ادغام شده‌اند. زمین ۳ قبل از ادغام، به زمین ۱۰ و زمین ۵ به زمین ۸ تبدیل شده‌اند. زمین‌های ۳ و ۵ قطعات والد و زمین‌های ۸ و ۹ و ۱۰ قطعات فرزند است (شکل d).

○ در زمان T_5 ، عملیات تغییر مرز قطعه اجرا شده است به دلیل اینکه بخش مرزی زمین‌های ۷ و ۱۰ تغییر یافته است. زمین‌های ۷ و ۱۰ به زمین‌های ۱۱ و ۱۲ تبدیل شده‌اند. بنابراین زمین‌های ۷ و ۱۰ قطعات والد و زمین‌های ۱۱ و ۱۲ قطعات فرزند نامیده می‌شوند (شکل e).

○ ایجاد و حذف قطعه: عبارت است از ایجاد یک قطعه جدید و حذف قطعه موجود. قطعه جدید ایجاد شده والد ندارد زیرا خود قطعه اول است و قطعه حذف شده هم فرزند ندارد زیرا خود قطعه آخر بوده است. به همین دلیل هیچ ارتباط والد-فرزند، بین آن‌ها وجود ندارد.
○ ترکیب قطعات: ترکیب قطعات فرآیندی است که تعداد زیادی از قطعات P_1 و P_2 و ... و P_n ترکیب شده و تبدیل به یک قطعه جدید p می‌شوند. قبل از ترکیب n قطعه، قطعات والد بودند و قطعه جدید ایجاد شده قطعه فرزند نامیده می‌شود.

○ تقسیم قطعات: تقسیم قطعات به این صورت است که قطعه p به چندین قطعه P_1 و P_2 و ... و P_n تقسیم می‌شود که یک فرآیند مقابل فرآیند ترکیب است. قطعه ابتدایی، قطعه والد است و قطعات تقسیم شده قطعه‌های فرزند است.

○ ادغام قطعات: ادغام و ترکیب قطعات به هم شبیه است. معمولاً ادغام قطعات، جدا نمودن یک قطعه از بخش‌های هم مرز چندین قطعه است. بعد از ادغام ارتباط منطقی والد-فرزند، $n:1$ است و هنگامی که ادغام قطعه به همه قطعات گسترش یابد، ادغام به ترکیب تبدیل می‌شود.

○ اصلاح مکان مرز قطعه: به این معنی است که خصوصیات تغییر نمی‌کند و فقط موقعیت خط مرزی اصلاح می‌شود. ارتباط منطقی والد-فرزند، $n:n$ است و ارتباط مکانی آن‌ها از نوع تقاطع است.

○ تغییر توصیفات قطعه: تغییر توصیفات به این معناست که فقط صفت تغییر می‌کند و شکل مکانی قطعه تغییر نخواهد یافت. این نوع تغییرات را می‌توان بصورت زیر تقسیم کرد: تغییر مالکیت، تغییر حقوق مالکیت و تغییر نوع [۱].

قطعات در نتیجه تفکیک آپارتمانی قطعه با شناسه b ایجاد شده‌اند؟ کدام یک از قطعات زمین در سال ۷۰۱۰ در اثر تجمیع ایجاد شده‌اند؟ روند تغییر قطعه زمین با شناسه b در طی سال‌های متوالی چگونه بوده است؟ کدام یک از قطعات بین سال‌های T_1 تا T_2 تفکیک شده‌اند؟

○ Q۴: پرسش‌های مبتنی بر ردیابی تاریخچه قطعه زمین: این مورد یک تابع مهم در مدیریت کاداستر است. برای مثال ممکن است کاربران بخواهند قطعه/ قطعات والد یا فرزند یک قطعه زمین را ردیابی کنند. نمونه‌ای از این پرسش‌ها عبارتند از: قطعه/ قطعات والد و فرزند قطعه زمین با شناسه a کدام قطعات هستند؟ [۱].

یکی از مهم‌ترین پارامترهایی که در ارائه مدل داده مکانی-زمانی برای کاداستر باید به آن توجه کرد، رویدادهای مکانی و غیر مکانی بوجود آورنده تغییرات در کاداستر هستند که در اثر این رویدادها حالت‌های متفاوتی در شرایط ذخیره‌سازی این تغییرات در پایگاه داده پیش خواهد آمد. یکی از مهم‌ترین بخش‌هایی که در زمینه کاداستر زمانمند می‌تواند مورد بحث قرار گیرد رویدادهایی است که در محدوده املاک اتفاق می‌افتد، هم‌چون تفکیک، تجمیع، رویدادهایی که موجب تغییر ماهیت و همین‌طور تغییر توصیفات املاک می‌شوند [۱]. مهم‌ترین اطلاعات توصیفی در این تحقیق، اطلاعات مربوط به ارتفاع هستند. زیرا کاداستر چهاربعدی ترکیب کاداستر سه بعدی + زمان و ارتفاع پارامتر مهم در کاداستر سه بعدی است. بدین منظور می‌توانیم از اطلاعات مربوط به داده‌های تاریخی و اطلاعات بدست آمده از مقایسه تصاویر تاریخی در google earth و google map مربوط به محدوده مورد مطالعه خود استفاده کرده و عوارضی که تغییر ارتفاعی داشته‌اند را با ارتفاع جدید وارد کنیم.

نتایج و بحث

ضرورت پیاده‌سازی کاداستر سه و چهار بعدی در ایران

از جمله توابع مختلف جهت ایجاد یک سیستم اطلاعات مکانی زمانمند شامل: اطلاعات ثبتی کامل، آنالیز، به‌روز رسانی، کنترل کیفیت، زمان‌بندی و نمایش مناسب است. برای آنکه با مؤلفه‌های زمان بیش‌تر آشنا شویم نیاز است تا الگوهای مختلف زمانی در سیستم اطلاعات مکانی از جمله کاداستر را بشناسیم. در تصویر ۷ الف، مثلث فضا، زمان و توصیف را برای یک شی مانند یک پارسل قطعه زمین نشان داده است. یکی از مفاهیم مهم، موضوع سیر تحول زمانی است که باید به آن توجه زیادی شود (تصویر ۷-ب) و هم‌چنین ایجاد یک توپولوژی زمانمند که به‌واسطه آن بتوان تعریفی برای زمانمندی یک شی ارائه داد (تصویر ۷-پ). با توجه به اینکه توپولوژی یکی از زمینه‌های پر اهمیت در علوم مهندسی و ریاضی به‌شمار می‌رود، به همین علت بهره‌گیری از توپولوژی با در نظر گرفتن ابعاد زمانی از اهمیت ویژه‌ای در کاداستر برخوردار است [۲].

○ در زمان T_5 ، صفت زمین ۶ تغییر یافته اما شکل آن تغییر نکرده است که این عملیات، عملیات تغییر صفت قطعه نامیده می‌شود. زمین ۶ به زمین ۱۳ تبدیل شده است بنابراین زمین‌های ۶ و ۱۳ به‌ترتیب، قطعات والد و فرزند نامیده می‌شوند (شکل f) [۱].

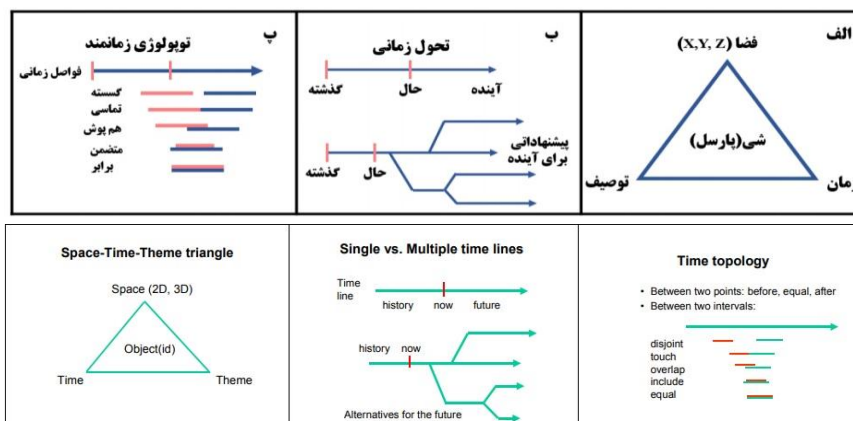
مدل‌سازی کاداستر مکانی-زمانی

مدل داده در واقع نشان دهنده هسته مفهومی یک سیستم اطلاعاتی است. مدل داده مکانی-زمانی یک مدل داده جغرافیایی شامل صفت، مکان و مفاهیم زمانی است که می‌تواند به شکل مؤثری داده‌های جغرافیایی را مدیریت و سازمان‌دهی کند. یکی از مهم‌ترین اهداف مدل‌سازی مکانی-زمانی بازسازی وضعیت‌ها در لحظه‌های تاریخی مختلف از طریق به‌روز رسانی داده‌ها به‌صورت پویا و پیش‌بینی تغییرات آینده با در نظر گرفتن قوانین مربوط به تغییرات است. تلفیق داده‌های مکانی-زمانی کلید ساختن مدل است به سبب اینکه تأثیر مستقیمی روی وضعیت و کارایی پرسش و پاسخ داده‌ها در پایگاه داده خواهد داشت. بنابراین تلفیق مکان و زمان و چگونگی وارد کردن زمان در پایگاه داده مکانی، یک نکته مهم برای مطالعه است زیرا این امر تأثیر مستقیمی روی وضعیت و کارایی پرسش و پاسخ داده‌ها در پایگاه داده خواهد گذاشت [۱۸-۱]. به‌منظور ارزیابی این مدل‌ها، تحقیقات انجام شده در زمینه کاداستر زمانمند را مبنای کار قرار داده و بر اساس آن‌ها انواع پرسش و پاسخ‌های زمانمند اصلی در زمینه تغییرات در محدوده املاک را از چهار جنبه به‌صورت زیر شرح است:

○ Q۱: پرسش‌های مبتنی بر نقطه زمانی: به‌عنوان مثال ما می‌خواهیم اطلاعات یک قطعه زمین را در نقطه زمانی T پرس و جو کنیم. این نوع پرسش‌ها، پرسش‌های ساده زمانی هستند که به یک نقطه ثابت در زمان مربوط می‌شوند و شامل یک بازبازی ساده اطلاعات است. نمونه‌ای از این پرسش‌ها مثل: کدام قطعات در زمان T دارای کاربری فضای سبز هستند؟

○ Q۲: پرسش‌های مبتنی بر بازه زمانی: به‌عنوان مثال ما می‌خواهیم اطلاعات یک قطعه زمین را از زمان T_1 تا زمان T_2 برای مثال از ۱۳۸۵/۰۲/۰۲ تا ۱۴۰۱/۱۰/۱۰ پرس و جو کنیم. این نوع پرسش‌ها به وقایع مربوط به یک محدوده زمانی مربوط می‌شوند و نیازمند دسترسی و بررسی به اطلاعات مربوط به زمان‌های مختلف هستند و در واقع نیاز به ردیابی کردن اطلاعات است. نمونه‌ای از این پرسش‌ها عبارتند از: کاربری قطعه زمین با شناسه A از زمان T_1 تا T_2 چه بوده است؟ کاربری کدام یک از قطعات بین زمان‌های T_2 تا T_3 از فضای سبز به زمین تغییر یافته است؟ کدام یک از قطعات زمین در بین سال‌های ۷۰۱۳ تا ۷۰۱۳ کاربری مسکونی داشته‌اند؟

○ Q۳: پرسش‌های رویداد مبنای این نوع پرسش‌ها در مورد چگونگی اتفاق افتادن یک پدیده پرسش می‌کنند و در یک GIS زمانمند می‌بایست در نظر گرفته شوند. نمونه‌ای از این پرسش‌ها عبارتند از: کدام یک از



تصویر ۷: قاعده کلی اصول زمانی در سیستم‌های اطلاعات مکانی همچون کاداستر [۷۶]

Fig. 7: The general rule of time principles in spatial information systems such as cadaster [6,7]

وضعیت «لمسی» ممکن است در مورد معرفی یک سیستم تصدی جدید یا تجدید شده، به‌عنوان مثال معرفی یک قانون مدنی جدید است. «همپوشانی» در رویه‌های یکپارچه‌سازی زمین ظاهر می‌شود؛ در اینجا یک قطعه‌بندی «قدیمی» و «جدید» به‌طور موقت و به موازات همه تأثیرات آن وجود دارد. «شامل» به این معنا است که در صورت ادعاهای همپوشانی زمانی نسبت به یک قطعه زمین در صورت تضاد زمین است. «برابر» در صورت وجود دوره‌های اعتراض برابر برای مناطق مختلف یا «مناطق دفتر کاداستر» است. به‌عنوان مثال مربوط به ثبت اولیه معنی دارد. به‌طور معمول، یک جدول زمانی در تاریخ وجود دارد، اما احتمالاً تعداد زیادی در آینده مربوط به سناریوهای جایگزین است (شکل ۷، وسط). مدل‌سازی این خطوط زمانی متعدد آینده با توپولوژی پیچیده است [۶].

اگر بخواهیم گذشته ناشناخته (جزئی) را بازسازی کنیم، اصولاً خطوط زمانی متعدد نیز می‌توانند رخ دهند. به‌عنوان مثال، در زمین‌شناسی ممکن است سناریوهای متفاوتی از توسعه گذشته وجود داشته باشد. در چنین حالتی گذشته نیز می‌تواند دارای خطوط زمانی متعدد باشد. نیازهای اساسی جهت پیاده‌سازی کاداستر چهار بعدی در سه دسته طبقه‌بندی می‌شوند که شامل ثبت عوارض متحرک، مسئله اشتراک زمانی و ثبت شبکه‌های زیربنایی در منطقه مورد مطالعه است [۷].

بررسی ابعاد پیاده‌سازی کاداستر سه و چهار بعدی در ایران

جدول ۱: سیر تحول قوانین مربوط به کاداستر در ایران [۷]

اهداف (goals)	اقدامات (actions)	سال (years)
کاهش تعارضات ملکی reducing civil conflicts	اولین بخشنامه‌های کاداستر کشور	۱۳۳۴ (۱۹۵۵)
استقرار سیستم مالیاتی عادلانه establishment of a fair tax system	the country's first cadastral circulars	
تولید نقشه‌های کاداستری مبتنی بر نقشه‌های بزرگ مقیاس production of cadastral maps based on large-scale maps	قانون ثبت املاک در قالب کاداستر	۱۳۵۱ (۱۹۷۲)
تعیین محدوده‌های قانونی مالکیت مستحدثات و اراضی	law on registration of real estate in the form of cadastre	
	تصویب طرح کاداستر	۱۳۶۸ (۱۹۸۹)

تصویر ۷ برخی از اصول زمانی در GIS را نشان می‌دهد. هر شی مکانی-زمانی دارای یک هویت (شناسه شی) و ویژگی‌های موضوعی است که در مثلث فضا-زمان-موضوع نشان داده شده است (تصویر ۹ سمت راست). یک مفهوم مهم در مدل‌سازی زمانی، خط زمانی است (تصویر ۷-۱ وسط)، که در آن مشخص می‌شود که جهتی وجود دارد که زمان همیشه در آن حرکت می‌کند. یک نقطه زمانی یا لحظه‌ای در زمان توسط یک نقطه در این خط زمانی تعریف می‌شود و یک نقطه بسیار ویژه وجود دارد و آن «اکنون» است که همیشه در حال تغییر است. بازه زمانی یک بازه زمانی است که توسط زمان شروع و پایان در جدول زمانی تعریف می‌شود. کوچک‌ترین واحد زمان «کرونوس» نامیده می‌شود (که می‌تواند با وضوح یا اندازه پیکسل در یک GIS شطرنجی مقایسه شود). برخی از الگوهای رویدادهای تکرارشونده ممکن است نیاز به مدل‌سازی داشته باشند و فرکانس نشان می‌دهد که این اتفاق چقدر (سریع) رخ می‌دهد [۶].

"واحد زمان" در مورد کاداستر و ثبت اراضی "انعطاف‌پذیر" است: گاهی تاریخ و مکان ثبت می‌شود، گاهی تاریخ و زمان (در مورد ثبت تراکنش‌های دریافتی زمان می‌تواند بر حسب دقیقه باشد، در صورت تمبر زمانی در زمان پایگاه داده می‌تواند بر حسب ثانیه باشد). در اینجا لازم به‌ذکر است که تاریخ به نوع تقویم و زمان به مکان بستگی دارد. در صورت اشتراک زمانی آپارتمان‌ها واحد می‌تواند یک هفته باشد. جدای از این مهم است که بدانید چه زمانی ثبت شده است: چه زمانی در دنیای واقعی اتفاق افتاده است (مثلاً تاریخ توافق)، زمانی که در واقعیت مشاهده شد (تاریخ بررسی یا تاریخ عکس)، زمانی که در پایگاه داده گنجانده شد (مهر زمان)؛ زمانی که آخرین بار در واقعیت بررسی شد (به‌روز رسانی نقشه)؛ زمان امضا/ثبت/علامت پست (مربوط به فرآیندهای نگهداری و به‌روز رسانی) یا زمان نمایش (در صورت تحویل اطلاعات به مشتری). مشابه روابط توپولوژیکی حوزه فضایی ممکن است بین اولیه‌های زمانی تعریف شود. تصویر ۷ (چپ) برخی از روابط توپولوژیکی ممکن را بین دو بازه زمانی نشان می‌دهد. یک نمای کلی از موقعیت‌هایی را ارائه می‌کند که ممکن است بین دو بازه زمانی ظاهر شوند: گسست، لمسی، همپوشانی، شامل و برابر [۶].

جامع در چارچوب توسعه کاداستر در ابعاد مختلف و با در نظر گرفتن موانع قانونی و فنی کشور، این سیستم را فراگیر کنند [۷].

- بعد فنی: وجود یک نقشه سه بعدی زمانمند که دارای اطلاعات کاداستری (کاداستر چهار بعدی) است می‌تواند مدیران مسئول را در امر برنامه‌ریزی برای اجرای پروژه‌های مختلف در سطح شهر با کم‌ترین هزینه و با بالاترین سرعت راهنمایی کند [۷-۲۶]. بعد فنی کاداستر در ایران بر پایه تهیه نقشه‌های بزرگ مقیاس از مناطق مختلف به شیوه نقشه‌برداری زمینی و فتوگرامتری بوده است. توسعه روش‌های تولید داده‌های سه بعدی و پیشرفت فناوری‌های مدل‌سازی نظیر داده‌های لیدار و فتوگرامتری رقومی موجب شده است تا فعالیت‌ها برای پیاده‌سازی کاداستر در ابعاد مختلف گسترش یابد. هدف اصلی سیستم کاداستر کشور در حوزه فنی ایجاد یک نظام دقیق و کارآمد با قابلیت بهنگام شدن نسبت به پیشرفت کشور بوده است که تا حدی می‌توان این موضوع را موفق دانست به‌طوری که با گذشت زمان، تجهیزات و فناوری نوین وارد عرصه نقشه‌برداری ایران شده‌اند که به‌واسطه‌ی آن می‌توان اطلاعات را ساده‌تر، سریع‌تر و دقیق‌تر برداشت کرد، اما به‌دلیل ناسازگاری قوانین ثبتی و همچنین ضعف فناوری‌های موجود در مسئله ثبت املاک در سه بعد این موضوع همچنان یک مشکل اساسی در سیستم کاداستر کشور به‌شمار می‌رود [۷].

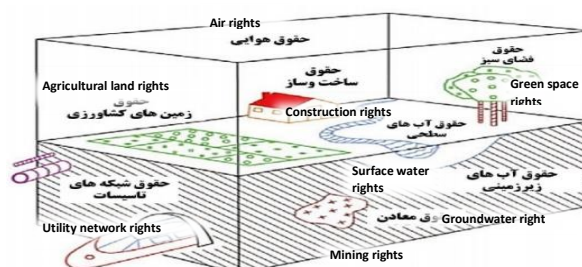
فرآیند پیاده‌سازی کاداستر سه و چهار بعدی در منطقه مورد مطالعه جهت پیاده‌سازی یک سیستم کاداستر چهار بعدی نیاز به یک پایگاه داده سه بعدی زمانمند داریم، جهت ایجاد یک پایگاه داده باید چهار مرحله اساسی را طی کرد، این چهار مرحله شامل تهیه داده، پردازش، تولید مدل و ارزیابی دقت مدل است [۷-۲۷]. تصویر ۹ مدل مفهومی جریان پیاده‌سازی کاداستر چهار بعدی در منطقه مورد مطالعه را نشان می‌دهد. لازم به‌ذکر است که این مدل مفهومی تغییر یافته مدل پیشنهادی Van Oosterom, ۲۰۱۰ برای پیاده‌سازی کاداستر چهار بعدی بوده است [۷].

- تهیه داده: یکی از مهم‌ترین مراحل پیاده‌سازی کاداستر چهار بعدی، مرحله جمع‌آوری داده‌های سه بعدی است، داده‌های تهیه شده بایستی دارای دقت لازم برای مدل‌سازی در سه بعد است تا بتوانند نیازهای فنی کاداستر را برآورده کند. جدول ۲ اطلاعات جمع‌آوری شده از منطقه مورد مطالعه را نشان می‌دهد [۷].

- پردازش داده: در این مرحله نیاز است تا اطلاعات جمع‌آوری شده را متناسب با هدف موردنظر پردازش کنیم، بنابر این مراحل زیر را طی می‌کنیم: (۱) پردازش اولیه و آماده‌سازی داده‌ها برای تولید نقشه (۲) تولید نقشه اولیه شامل اطلاعات مسطحاتی و ارتفاعی هر یک از عوارض با فرمت CAD و Shapefile (۳) تلفیق اطلاعات توصیفی با نقشه تولید شده (۴) تلفیق نقشه شبکه انتقال آب با مدل تولید شده (۵) آماده‌سازی داده‌های موجود برای ورود به مرحله تبدیل سه بعدی [۷].

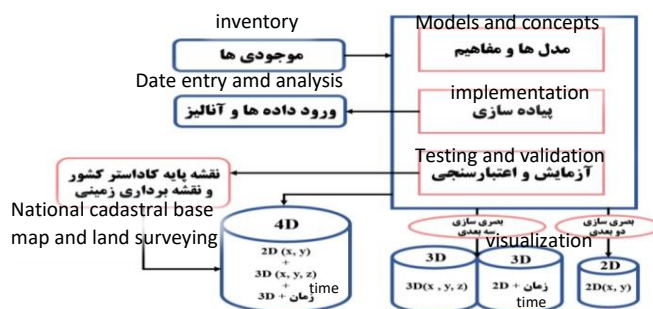
سال (years)	اقدامات (actions)	اهداف (goals)
	approval of the cadastral plan	determining the legal boundaries of ownership of new properties and lands
۱۳۸۹ (۲۰۱۰)	صدور سند مالکیت جدید تک برگ issuance of a new single-page document	improving the security factor -تکمیل بانک جامع اطلاعات املاک و کاداستر
۱۳۹۳ (۲۰۱۴)	تصویب قانون جامع کاداستر (حدنگار) approval of the comprehensive cadastre law	شفاف‌سازی در امر صدور سند املاک و اراضی transparency in the issuance of real estate and land documents

- بعد قانونی: جدول ۱ سیر تحول قوانین کاداستر ایران را طی شصت سال اخیر نشان می‌دهد. توسعه سیستم کاداستر در ایران تنها به موقعیت مسطحاتی قطعه زمین‌ها توجه داشته و برای تعیین حق مالکیت سازه‌های زیرزمینی و یا بالای سطح زمین چاره‌ای اندیشیده نشده است (تصویر ۸). جهت نقشه‌برداری برای هر قطعه زمین باید همراه با موقعیت مسطحاتی سازه، بعد سوم یعنی ارتفاع را نیز ثبت کرد، اما این بدان معنی نیست با داشتن تنها یکسری اطلاعات ارتفاعی از عوارض می‌توان کاداستر سه بعدی را در منطقه پیاده کرد. ارتباط مؤلفه سوم با بعد مسطحاتی در چارچوب یک نظام زمانمند کار بسیار دشواری است و همچنین به‌دلیل خلأهای قانونی نمی‌توان چنین حق مالکیتی را متصور شد؛ بنابراین لازم است تا فعالیت‌هایی جهت تصویب قوانینی مبتنی بر بعد سوم صورت گیرد [۷].



تصویر ۸: مفهوم حق مالکیت در سه بعد برای عوارض بالا و زیر سطح زمین [۷]
Fig. 8: The concept of property rights in three dimensions for above and below ground easements [7]

- بعد سازمانی: سازمان ثبت اسناد و املاک کشور به‌عنوان یکی از قدیمی‌ترین و گسترده‌ترین دستگاه‌های حاکمیتی، مأموریت تثبیت و حمایت از حقوق مالکیت مشروع و قانونی اشخاص حقیقی و حقوقی جامعه را عهده داشته و نقش مؤثری در روابط و مناسبات اقتصادی، اجتماعی، استقرار و تثبیت مالکیت ایفاء می‌کند. در سال ۱۳۶۸، با تصویب نمایندگان مجلس شورای اسلامی، اداره کل کاداستر به‌عنوان زیر مجموعه سازمان ثبت اسناد و املاک کشور تأسیس شد. بر این مبنا، کار مطالعاتی کاداستر با تشکیل شورای فنی در سال ۱۳۶۹ آغاز شد. در حال حاضر سیستم مدیریت زمین در ایران رو به رشد بوده است چرا که سازمان‌های مرتبط با این امر در تلاش هستند تا با ارائه الگوهای

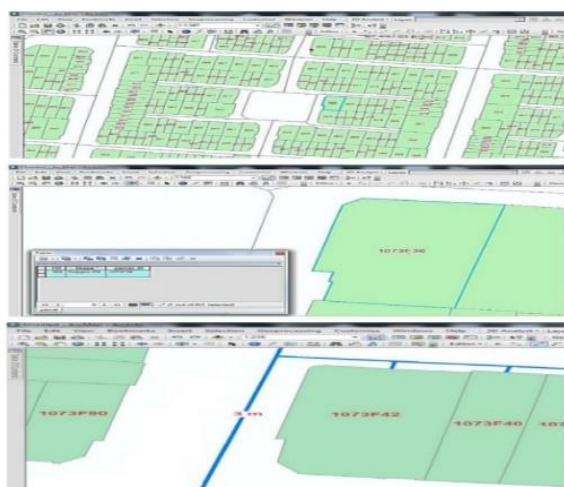


تصویر ۹: مدل مفهومی جریان پیاده‌سازی کاداستر چهاربعدی در منطقه مورد مطالعه [۷]
Fig. 9: Conceptual model of the 4D cadastre implementation flow in the study area [7]

جدول ۲: اطلاعات جمع‌آوری شده از منطقه مورد مطالعه [۷]

Table 2: Information collected from the study area [7]

هدف purpose	ویژگی feature	منابع داده data sources	نوع اطلاعات type of information
تولید مدل سه بعدی 3d model production	مقیاس ۱:۳۰۰۰ 1:3000 scale	تصاویر هوایی رقومی digital aerial images	
انطباق مدل با نقشه (زمان سنجی) matching the model to the map (time measurement)	نقشه پایه کاداستر کشور country cadastral base map	نقشه رقومی ۱:۲۰۰۰ digital map 1:2000	
تولید نقاط کنترل زمینی با دقت کمتر از ۱ سانتی متر / production of ground control systems with an accuracy of less than 1cm	سرعت بالا و سهولت در جمع‌آوری GCPs ⁸ high speed and ease of collection GCPs ⁸	داده‌های GPS دو فرکانسه dual frequency GPS data	اطلاعات مکانی location information
تلفیق با مدل ۳ بعدی integration with 3d model	طراحی با توجه به شرایط منطقه desing according to regional conditions		
ارزیابی دقت ارتفاعی مدل / model elevation accuracy assessment	بالا بردن دقت مدل سه بعدی / increasing the accuracy of the 3d model	نقشه شبکه انتقال آب map of water transmission network	
طبقه‌بندی مدل / model classification	براساس استاندارد تدوین شده کاداستر / based om the developed cadastral standard	نقشه برداری زمینی land mapping	
ایجاد بانک جامع املاک برای منطقه creating a comprehensive property bank for the region	نمایش اطلاعات مانند حدود ملک، مالکیت display information such as property boundaries, ownership	پلاک‌های ثبتی registration plates	اطلاعات توصیفی descriptive information
		داده‌های آمایی اطلاعات information gathering data	



تصویر ۱۰: کدگذاری کاداستر قطعات ملکی و لایه مربوط به شبکه انتقال آب در

منطقه مورد مطالعه [۷]

Fig. 10: Cadastral coding of real estate parcels and the layer related to the water transmission network in the study area [7]

تصویر ۱۰ خروجی مرحله پردازش حاصل از داده‌های موجود را نشان می‌دهد. همان‌طور که مشخص است نقشه تولید شده دوبعدی بوده و تنها قادر است تا مرزهای هریک از قطعه زمین‌ها و ساختمان‌ها و سایر عوارض موردنظر را نشان دهد، به همین منظور لازم است تا جهت دستیابی به یک مدل سه بعدی مرحله تبدیل سه بعدی را بر روی داده‌ها اعمال کنیم. پس از مرحله کدگذاری قطعات ملکی نوبت به ادغام نقشه‌های تأسیسات با نقشه مورد نظر می‌رسد که در اینجا به‌عنوان نمونه نقشه شبکه انتقال آب که به‌صورت فرضی طراحی شده است را در نظر می‌گیریم. لازم به‌ذکر است عبارت “3 m” به معنای آن است که این شبکه در عمق ۳ متری زمین قرار دارد [۷].

- تولید مدل سه بعدی: در این مرحله به‌دلیل عدم وجود یک دستورالعمل تبدیل برای عوارض سه بعدی، از مدلی فرضی که مبتنی بر دستورالعمل تهیه نقشه‌های کاداستر رقومی و تهیه نقشه‌های توپوگرافی بوده، استفاده شده است [۲۴]. با این ویژگی که نقاط ارتفاعی نیز به نقاط نظیر گوشه‌ای هریک از عوارض متصل شد تا مدلی سه بعدی تولید شود.

تولید شده در مقایسه با داده‌های مرجع، از ارزیابی آماری جذر میانگین مربعات خطا استفاده شده است (رابطه ۱ و ۲). RMSE از جمله روش‌های آماری متداول به‌شمار می‌رود که تفاوت میان مقدار پیش‌بینی شده توسط مدل مورد نظر و مقدار واقعی را نشان می‌دهد. RMSE ابزار مناسبی برای مقایسه خطاهای پیش‌بینی توسط یک مجموعه داده بوده و به همین علت از این روش جهت ارزیابی دقت مسطحاتی (X,Y) و ارتفاعی (Z) مدل استفاده شده است [۷].

$$RMSE = \sqrt{\frac{D^2}{n}} \quad (1)$$

$$D^2 = d_1^2 + d_2^2 + \dots + d_n^2 \quad (2)$$

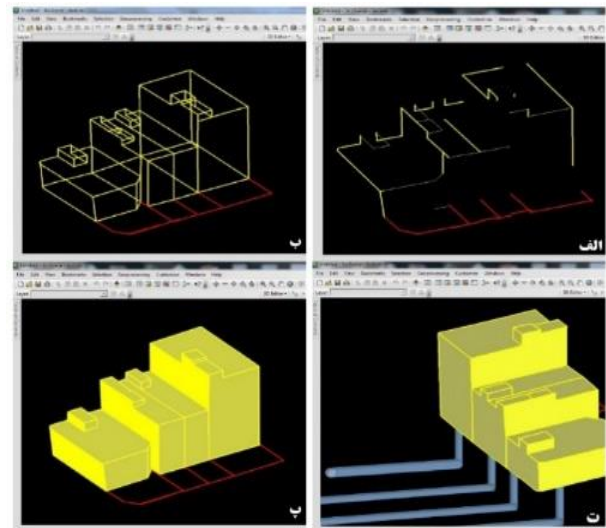
مطالعه موردی (محدوده میدان رسالت)

منطقه مورد مطالعه در شرق شهر تهران در محدوده میدان رسالت واقع شده است. میدان رسالت در منطقه هشت شهرداری تهران بوده و یکی از اصلی‌ترین بزرگراه‌های شرقی - غربی شهر را در خود جای داده است. در انتخاب منطقه مورد مطالعه عواملی نظیر تراکم جمعیت و افزایش ساخت و ساز طی بیست سال اخیر، قرار گرفتن در محدوده بافت فرسوده، متوسط رشد قیمت زمین و املاک، عبور خط ۲ مترو (نیمه شرقی)، وجود تونل رسالت و همچنین بررسی شبکه‌های تأسیسات شهری به‌ویژه شبکه انتقال آب، ملاک ارزیابی ما در این مقاله قرار گرفته‌اند. به این ترتیب با توجه به موارد ذکر شده محدوده میدان رسالت یک گزینه مناسب جهت بررسی آزمایشی برای پیاده‌سازی یک سیستم کاداستر چهار بعدی است [۷].

داده اولیه یا داده تاریخی (داده ورودی)

تصویر ۱۳ نقشه shapfile داده اولیه یا تاریخی مربوط به این محدوده در سال ۱۳۸۳-۱۳۸۹ و نقشه سه بعدی این داده است که در محیط ArcGIS نمایش داده می‌شود. این نقشه شامل مختصات دقیق است و برای هر اتصال مقدار عددی ارتفاع نیز وجود دارد. در این راستا، مدل‌سازی سه بعدی می‌تواند دارای دقت مناسبی باشد. همین‌طور که در تصویر ۱۴ قابل مشاهده است با مشاهده و مقایسه‌ی تصاویر میدان رسالت در بین سال‌های ۲۰۰۴ تا ۲۰۲۴:

در این پژوهش به‌عنوان نمونه چهار قطعه زمین که در بردارنده عرصه و اعیان است به همراه یک شبکه انتقال آب جهت مدل‌سازی در نظر گرفته شده‌اند. همچنین فرآیند مدل‌سازی در محیط ArcScene در نرم‌افزار ArcGIS10 و با ابزارهای 3D Analyst و 3D Editor صورت پذیرفته است، در تصویر ۱۱ نمونه سه بعدی تولید شده نشان داده شده است [۷].



تصویر ۱۱: الف) مدل اولیه تولید شده از منطقه مورد مطالعه با استفاده از تصاویر هوایی رقومی بزرگ مقیاس ب) مدل تکمیل شده با فرمت CAD (قرمز: مرز قطعه زمین، زرد: مرز ساختمان) پ) مدل تکمیل شده با فرمت Shapefile ت) تلفیق شبکه انتقال آب با مدل تولید شده (شبکه تأسیسات سه بعدی) [۷]

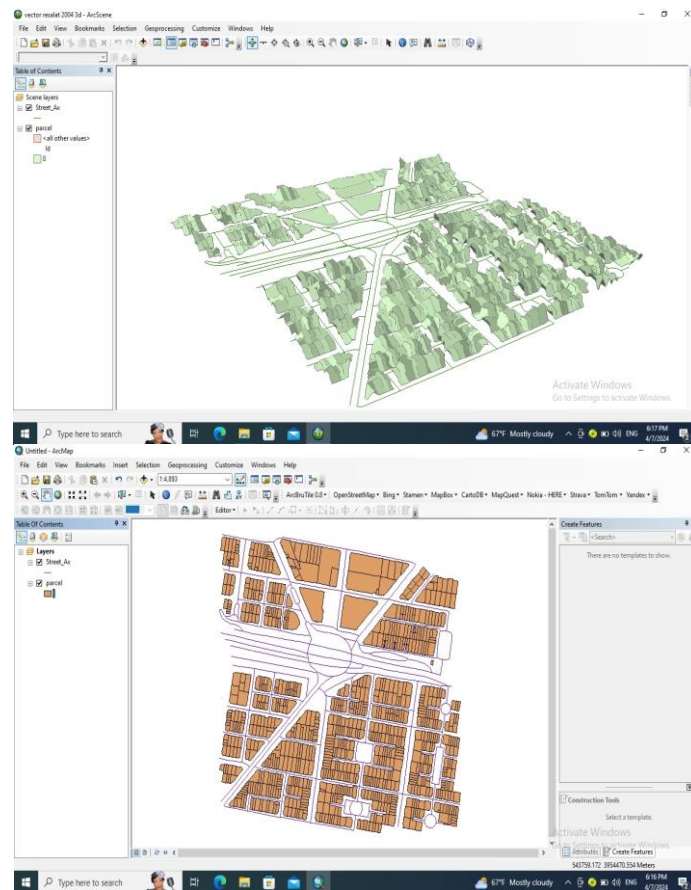
Fig. 11: a) Initial model produced from the study area using large-scale digital aerial imagery b) Completed model in CAD format (red: land plot boundary, yellow: building boundary) c) Completed model in Shapefile format d) Integration of the water transmission network with the produced model (3D facility network) [7]

- نتایج ارزیابی دقت مدل: با توجه به اینکه نقشه ۲۰۰۰: ۱ تهران که در سال ۱۳۸۳ توسط سازمان نقشه‌برداری کشور تهیه شده و به‌عنوان نقشه پایه کاداستر در کشور مورد استفاده قرار گرفته، معیار مسطحاتی و زمان‌سنجی بر مبنای آن و معیار دقت ارتفاعی، فعالیت میدانی و تولید مجموعه داده‌های ارتفاعی دقیق به روش نقشه‌برداری زمینی از مدل‌های مورد نظر بوده است. در این تحقیق به‌منظور بررسی کیفیت و دقت مدل



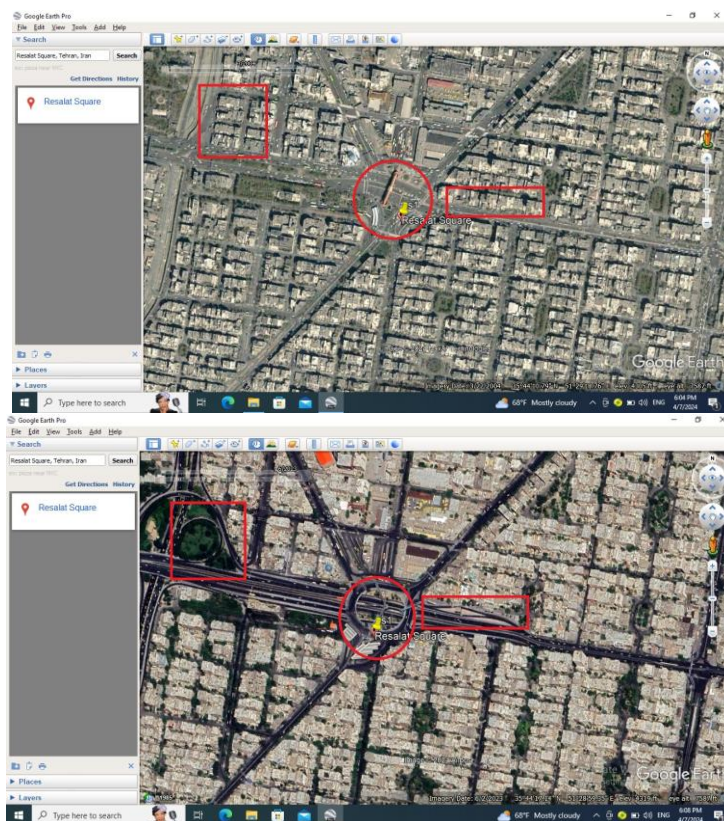
تصویر ۱۲: محدوده مورد مطالعه در شهر تهران - میدان رسالت [۷]

Fig. 12: Study area in Tehran - Resalat Square [7]



تصویر ۱۳: داده اولیه یا تاریخی محدوده رسالت و مدل ۳ بعدی

Fig. 13: Initial or historical mission scope data and 3D model



تصویر ۱۴: محدوده میدان رسالت در سال ۲۰۰۴ و تصویر پایین همین محدوده در سال ۲۰۲۴ است. مناطق مشخص شده نتیجه مقایسه این تصویر در طول این سالها

Fig. 14: The area of Resalat Square in 2004 and the image below is the same area in 2024. The marked areas are the result of comparing this image over these years.

می‌توانیم ارتفاع ساختمان‌ها را به‌صورت بازدید میدانی از عوارض به‌دست بیاوریم و یا با داشتن اطلاعات توصیفی از داده‌های تاریخی محل مورد نظر و مقایسه آن با وضعیت موجود عوارض اطلاعات ارتفاعی را وارد کنیم. داده‌های تاریخی میدان رسالت مربوط به این تحقیق، دارای اطلاعات ارتفاعی دقیقی است. اما چون این داده‌ها مربوط به گذشته بوده بعضی عوارض در طول زمان تغییرات ارتفاعی داشته‌اند که تشخیص این عوارض به کمک تصاویر تاریخی (Historical imagery) مربوط به google earth pro و مقایسه این تصاویر در طی چند سال انجام شده است. برای نشان دادن وضعیت سه بعدی عوارض وارد محیط ArcScene می‌شویم و داده مورد نظر را ADD می‌کنیم.

مقایسه و نتیجه ارزیابی

برای آنکه بتوانیم در تحلیل عوارض ساختمانی مربوط به اطراف میدان رسالت، قطعاتی از زمین را که تغییرات کاربری از جمله: تفکیک، تجمیع و هم‌چنین عوارض ساختمانی که تغییرات ارتفاعی پیدا کرده‌اند را در طی گذر زمان مشخص کنیم، لازم است دو لایه داده‌های وضعیت تاریخی (سال ۲۰۱۰) و داده‌های وضعیت موجود (سال ۲۰۲۲) را مورد مقایسه قرار دهیم. تفاوت بین تغییرات کاربری از جمله تفکیک، تجمیع و تغییرات ارتفاعی مشخص شود. تصویر ۱۷ این بخش از کار را نمایش می‌دهد. قطعات زمینی تغییر یافته در طول زمان بین سال‌های ۲۰۱۰-۲۰۲۲ روی داده‌های وضعیت موجود لایه به‌صورت دو بعدی نمایش داده شده است. قطعاتی با رنگ بنفش لایه وضع موجود با تعداد ۵۸۴ قطعه زمین، قطعاتی با رنگ زرد لایه تجمیع با تعداد ۱۷ قطعه زمین و قطعات شطرنجی لایه تغییرات ارتفاعی با تعداد ۹۰ قطعه زمین هستند. در این محدوده از میدان رسالت هیچگونه تغییر کاربری تفکیکی انجام نشده یا حداقل امکان قابل تشخیص نبوده است.

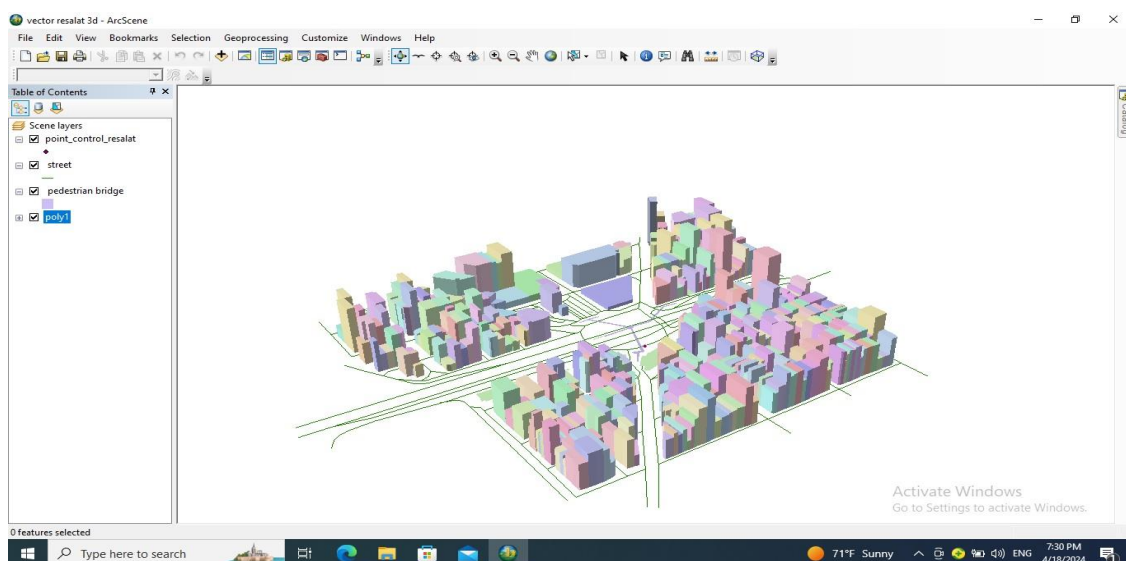
○ تخریب قطعات زمینی شمال غربی این محدوده به‌منظور احداث حریم بزرگراه و خروجی دسترسی به آزادراه قاسم سلیمانی (بزرگراه رسالت) و بزرگراه امام علی
○ احداث روگذر و بزرگراه رسالت جهت دسترسی محلی و همچنین گسترش پل عابر و احداث پایانه اتوبوسرانی و تاکسی رسالت
○ تخریب قطعات زمینی اطراف خیابان آژنگ واقع در بخش شرقی میدان رسالت به‌منظور حریم آزاد راه قاسم سلیمانی (بزرگراه رسالت) و احداث دسترسی محلی به روگذر و خیابان هنگام

داده‌های وضعیت موجود

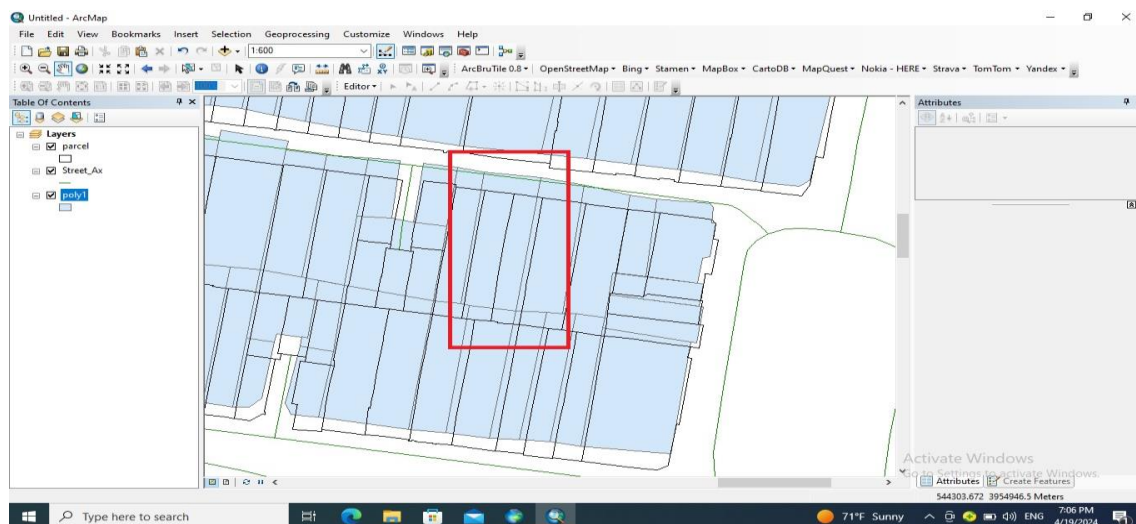
برای به‌دست آوردن این نوع داده‌ها، با استناد به داده‌های اولیه یا داده‌های تاریخی، شروع به ترسیم این داده‌ها در محیط ArcGIS می‌کنیم. برای این منظور از محیط google earth pro کمک می‌گیریم ابتدا باید حداقل یک نقطه مختصات دقیق از میدان رسالت را وارد محیط GIS کنیم تا سیستم به‌طور خودکار این منطقه را بالا بیاورد این نقطه را با فرمت KMZ یا KML ذخیره می‌کنیم. حال وارد محیط ArcMap می‌شویم و به کمک ابزار ArcBru Tile 0.8، بخش Bing، Satellite را کلیک می‌کنیم تا برنامه به‌صورت خودکار تصویر هوایی اطراف این نقطه انتخابی و محل مورد نظر را بالا بیاورد. حال با استفاده از ابزار Editor عارضه‌ی مورد نظر را با Shapfile مخصوص به خود ترسیم می‌کنیم.

تهیه مدل سه بعدی از عوارض

پس از ترسیم عوارض، نقشه دوبعدی از محل مورد نظر خواهیم داشت. اما موضوع اصلی ما کاداستر سه بعدی+ زمان است و مولفه اصلی کاداستر سه بعدی ارتفاع است. پس باید در اطلاعات توصیفی هر عارضه (که این اینجا عارضه مورد نظر ساختمان‌های اطراف میدان رسالت است)، مولفه ارتفاع مربوط به آن عارضه یا قطعه زمین را وارد کنیم. برای این کار،

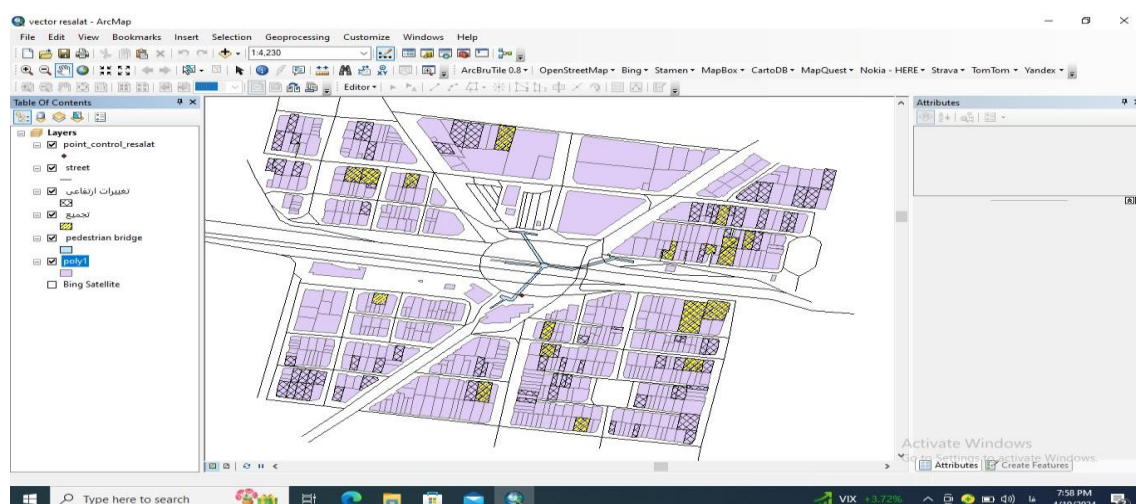


تصویر ۱۵: نمایش سه بعدی داده‌های وضع موجود، تصویر نمای غربی از محدوده میدان رسالت- تهران
Fig. 15: 3D display of current status data, image is the western view of the Resalat Square area in Tehran.



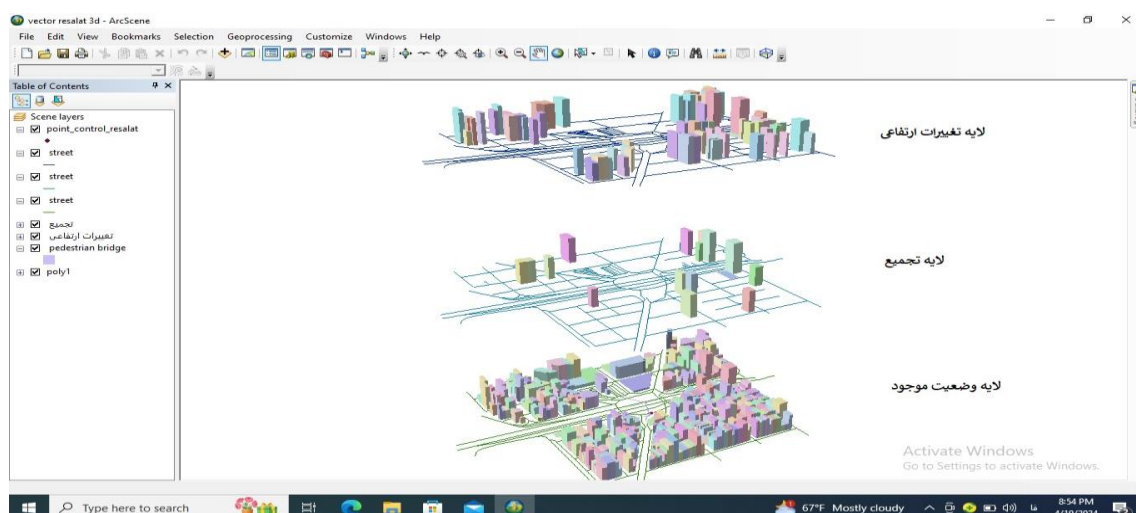
تصویر ۱۶: لایه رویی داده تاریخی و لایه زیری داده وضعیت موجود است دو قطعه زمین در طی سال ۲۰۱۰ تا ۲۰۲۲ تجمیع شده‌اند.

Fig. 16: The top layer is historical data and the bottom layer is current condition data. Two plots of land have been aggregated over the years 2010 to 2022.



تصویر ۱۷: نمایش قطعات زمینی تغییر یافته در طول زمان بین سال‌های ۲۰۱۰-۲۰۲۲ روی داده‌های وضعیت موجود، لایه بنفش: لایه وضعیت موجود، لایه زرد: لایه تجمیع و لایه شطرنجی: لایه تغییرات ارتفاعی

Fig. 17: Display of land parcels changed over time between 2010-2022 on the existing state data, purple layer: existing state layer, yellow layer: aggregation layer and checkerboard layer: elevation change layer



تصویر ۱۸: نمایش نتیجه نهایی از تحلیل تغییرات قطعات زمینی به صورت سه بعدی در طی سال‌های ۲۰۱۰-۲۰۲۲ در محدوده میدان رسالت تهران (کاداستر چهارمعدی)

Fig. 18: Displaying the final result of the analysis of changes in land plots in 3D over time between 2010-2022 within the area of Resalat Square, Tehran (4D cadastre)

جدول ۳: مقایسه ویژگی‌های بعدی کاداستر [۱۰]

Table 3: Comparison of the following cadastral features [10]

توانایی نمایش پیچیدگی‌های موجود	امکان پایش سنجی	تفسیر مناسب	ارائه حقوق، محدودیت‌ها و مسئولیت‌ها	توانایی تعیین حریم	سادگی در ایجاد پایگاه داده	هزینه
ability to display existing complexities	monitoring possibility	appropriate interpretation	providing RRRs	the ability to set privacy	simplicity in database creation	cost
کاداستر ۲ بعدی	ضعیف	ندارد	متوسط	متوسط	خوب	کم
2D cadastre	weak	have not	average	average	good	low
کاداستر ۳ بعدی	خوب	ندارد	خوب	خوب	متوسط	زیاد
3D cadastre	good	have not	good	good	average	a lot
کاداستر ۴ بعدی	خوب	دارد	خوب	خوب	متوسط	زیاد
4D cadastre	good	have	good	good	average	a lot

مقایسه کاداستر دو، سه و چهار بعدی

برای مطالعه راه‌حل‌های کاداستر ۴ بعدی، درک معادل مفاهیم "شیء حقوقی و فیزیکی در دو بعدی" مهم است. در دوبعدی، یک بسته، یک شیء حقوقی است که میزان حقوق مالکیت (مالکیت، اجاره، حق ارتفاق، حقوق واقعی محدود مانند آمفیوتیزیس در قانون مدنی) را نشان می‌دهد که مرزهای آن همیشه به راحتی در زمین قابل ردیابی نیست. فقط هنگام پوشاندن مرزهای بسته نگهداری شده در پایگاه داده کاداستر با توپوگرافی (یعنی نمایش اشیاء فیزیکی)، اشیاء املاک و مستغلات را می‌توان مکان‌یابی کرد. در یک کاداستر سه بعدی کامل، یک بسته حجمی نیز یک شیء مفهومی (قانونی) است که لزوماً در واقعیت قابل مشاهده نیست و فقط به‌طور غیرمستقیم با اشیاء فیزیکی مرتبط است. بنابراین، می‌تواند برای اهداف دیگری غیر از ثبت مالکیت اشیاء فیزیکی سه بعدی، به‌عنوان مثال، برای ثبت مالکیت منطقه ایمنی برای یک تونل یا برای ثبت مالکیت استفاده شود [۳].

نمایی از یک ساختمان در بیشتر موارد در دوبعدی، قطعات مربوط به اشیاء فیزیکی هستند زیرا مالکیت یک قطعه زمین به معنای مالکیت تمام اشیای فیزیکی متصل به آن است، اگر در محدوده‌های قطعه قرار داشته باشند. به همین ترتیب، مالکیت یک بسته سه بعدی به معنای مالکیت تمام اشیاء فیزیکی است که در داخل فضا قرار دارند، به‌عنوان مثال تونل یا شبکه تاسیسات. برای اینکه بتوان یک شیء فیزیکی را به‌عنوان یک موجودیت در نظر گرفت و آن را با شیء متناظر در کاداستر ۴ بعدی مرتبط کرد، نیاز به ایجاد بسته‌های ۴ بعدی دارد که با ابعاد فضایی و زمانی سه بعدی یکپارچه توصیف شده است [۳].

یک قطعه ۴ بعدی به‌عنوان واحد مکانی-زمانی تعریف می‌شود که در برابر آن (یک یا چند) حقوق منحصر به‌فرد و همگن (مانند حق مالکیت یا حق استفاده از زمین)، مسئولیت‌ها یا محدودیت‌ها به کل نهاد مرتبط است، همان‌طور که در یک سیستم مدیریت زمین گنجانده شده است. همگن به این معنی است که ترکیب یکسانی از حقوق به‌طور مساوی در کل واحد فضایی-زمانی ۴ بعدی اعمال می‌شود. منحصر به‌فرد یعنی که این بزرگ‌ترین واحد مکانی-زمانی است که برای آن صادق است. بزرگ‌تر کردن واحد (در فضا یا زمان سه بعدی) منجر به عدم همگن بودن ترکیب حقوق می‌شود. کوچک‌تر کردن واحد (در فضا یا زمان سه بعدی) منجر به حداقل دو بسته ۴ بعدی همسایه با ترکیبی از حقوق می‌شود [۳].

نتیجه‌گیری

رابطه بین مردم و زمین بسیار پویا است [۶]. ایران کشوری است که هم جنبه‌هایی از توسعه صنعتی و اقتصادی-اجتماعی کشورهای غربی را در خود دارد و هم به‌عنوان کشوری اسلامی دارای فرهنگ و قوانین اسلامی مربوط به موضوع املاک و حقوق ملکی است. علاوه بر آن، انواع متنوع و پیچیده‌های از حقوق ملکی مختلف در آن جاری است. با توجه به وسعت کشور، تعداد املاک، جمعیت زیاد و تنوع و پیچیدگی‌های حقوقی ملکی، حجم، تنوع و ارتباطات بین داده‌هایی که لازم است جمع‌آوری شوند بسیار زیاد است. علاوه بر آن تعداد بسیاری از سازمان‌ها و مردم به اطلاعات کاداستر نیاز دارند. به سختی می‌توان مجموعه داده‌های را پیدا کرد که وسعت و تنوع کاربرد آن به اندازه مجموعه داده‌های کاداستر است. همان‌طور که در این تحقیق گذشت، اطلاعات کاداستر به‌دلایلی که مهم‌ترین آن‌ها رشد شهرنشینی و فعالیت‌های انسان‌ها در داخل املاک است، ماهیت متغیر و پویا دارند. حجم و وسعت زیاد داده‌ها و هم‌چنین فراوانی تغییرات در این داده‌ها باعث پیچیده و پرهزینه بودن روند به‌روز رسانی داده‌ها و اعمال تغییرات در جنبه‌های مختلف این اطلاعات می‌شود. وجود مشکلات ذکر شده باعث می‌شود که در رابطه با ذخیره‌سازی و مدیریت داده‌ها به تدابیر خاص و فن‌آوری سطح بالا احتیاج است. با وجود مجموعه این شرایط، طراحی پایگاه داده مکانی-زمانی و سیستم اطلاعات کاداستر کاری بسیار دشوار و پیچیده است. می‌توان گفت که هیچ یک از مدل‌های توسعه یافته در زمینه کاداستر زمانمند از جمله مدل ارائه شده در این تحقیق، قادر به برآورده نمودن تمامی نیازمندی‌های کاداستر زمانمند ایران نمی‌شوند و در این تحقیق سعی بر رفع تنها پاره‌ای از مشکلات بوده است. در این تحقیق تعریف یک چارچوب برای بیان نحوه ذخیره‌سازی و جستجوی داده‌های مربوط به تغییرات اتفاق افتاده در محدوده املاک از جمله هندسه، توصیفات مربوط به ملک و ماهیت ملک در قالب جداول ساده مد نظر بود به‌طوری که بتوان پرسش‌های مطرح و اولویت‌دار کاداستر زمانمند را پاسخ داد در صورتی که به‌منظور طراحی یک مدل داده کامل و ایده‌آل برای کاداستر به انجام نیازسنجی کامل در تمامی حوزه‌های موجود در کاداستر، طراحی و ایجاد یک پایگاه داده کامل، مطالعه کامل و پوشش‌دهی تمامی پرسش و پاسخ‌های مطرح در کاداستر، جمع‌آوری داده‌های کامل در این زمینه و انجام بسیاری فعالیت‌های دیگر، نیاز است [۱]. مدل کاداستر کاملاً ۴ بعدی باید هم جنبه فیزیکی و هم جنبه

Temporal Cadastre Karimi. M, Sa'di Mesgari M, K.N. Toosi University of Technology Faculty of Geodesy and Geomatics, M.Sc. Thesis in Civil-Surveying Engineering In GIS, 2014 [In Persian]

[2] Khoshbrash Masoleh M, Sadeghian S, *Examining the components of the real estate management model (ISO 19152 - LADM) with an emphasis on its importance in the three- and four-dimensional cadastre during the years 2001-2017*, Country Mapping Organization and Shahid Beheshti University, 2017 [In Persian]

[3] Döner F, Thompson R, Stoter J, Lemmence C, Ploeger H, Oosterom P, Zlatanova S, *Solutions for 4D cadastre - with a case study on utility networks*. Department of Geomatics Engineering, Gümüşhane University, Gumushane, Turkey; Department of Natural Resources and Mines Landcentre, Queensland Government, Woollongabba, Queensland, Australia; "International Institute for Geo-Information Science and Earth Observation (ITC) Enschede, The Netherlands; "OTB, Delft University of Technology, Delft, The Netherlands; Kadaster, Apeldoorn, The Netherlands, Faculty of Law, VU University Amsterdam, Amsterdam, The Netherlands, 2011.

[4] Gürsoy Sürmeneli H, Alkan M, *The Application Domain Extension (ADE) 4D Cadastral Data Model and Its Application in Turkey*. 2022. Civil Engineering Faculty, Department of Geomatic Engineering, Yildiz Technical University (YTU) 34220 Istanbul, Turkey; Mila Koeva, Faculty of Geo-Information Science and Earth Observation (ITC), University of Twente, 7522 NB Enschede, The Netherlands, Citation: Gürsoy Sürmeneli H. Koeva M, Alkan M, *The Application Domain Extension (ADE) 4D Cadastral Data Model and Its Application in Turkey*. Land 2022, 11, 634. <https://doi.org/Academic Editor: Jamal Jokar Arsanjani>

[5] doner F, Thompson R, Stoter J, Lemmen C, Ploeger H, Oosterom P, *4D Land Administration Solutions in the Context of the Spatial Information Infrastructure*, the Netherlands, Turkey, Australia, 2011.

[6] Van oosterom P, Polpeger H, Stoter J, Lemmen C, *Aspects of a 4D Cadastre: A First Exploration*. the Netherlands Rod THOMPSON, Australia, the Netherlands, 2006.

[7] Khoshbrash Masoleh M, Sadeghian S, Karimi Shahi Gh. *Toward 3D and 4D Cadastre in Iran Case Study: District 8 of Tehran Municipality* Country Mapping Organization and Shahid Beheshti University, 2016 [In Persian]

[8] Ghasemi Dastgerdi N, Sadeghian S, *creating 3D, 4D and 5D cadastre using lidar data and satellite images with high resolution*, Tarbiat Debir Shahid Rajaee University and Shahid Beheshti University, 2016 [In Persian]

[9] Oosterom P, Karki S, *Towards an Implementable Data Scheme for 4D/5D Cadastre Including Bi-Temporal Support* Rod Thompson (Australia), (Netherlands), 2019.

[10] Fahami N, Javadi M, Sadeghian S, *Improving the quality of archeology using 3D and 4D cadastre in cultural heritage*, Mapping Organization and Shahid Beheshti University, 2019 [In Persian]

قانونی اشیاء کاداستر را نشان دهد. بنابراین، مدل پیشنهادی باید با مدل‌های فیزیکی مانند CityGML و BIM ادغام شود. تحقیقات بیشتر بر روی آزمایش و تجسم مدل به یک مدل کامل کاداستر ۴بعدی با جنبه‌های قانونی و فیزیکی متمرکز خواهد شد [۱۱]. برای آینده میان‌مدت تا بلندمدت، به نظر می‌رسد که اگر پایه محکم یک پارتیشن مکانی-زمانی به‌عنوان پایه کاداستر اهمیت بیشتری پیدا کند، باید انواع داده‌های ۴بعدی (هندسه/توپولوژی) در نظر گرفته شود. علاوه بر این، مبنای واقعی ۴بعدی ارزان‌ترین راه‌حل در دراز مدت به نظر می‌رسد، زیرا دیگر نیازی به رسیدگی به موارد خاص به روش دیگری نیست (زیرا همه چیز در این مدل قرار می‌گیرد). با این حال، ما باید با بیان اینکه مشخص نیست که آیا نوع داده ۴بعدی واقعی راه رو به جلو در عمل در آینده کوتاه تا میان مدت است، واقع بین باشیم. این هم‌چنین به ملاحظات فنی کمتری مانند اهمیت پارتیشن فضا-زمان ۴بعدی در رابطه با سایر جنبه‌های کاداستر بستگی دارد. در اینجا تحقیقات بیشتری در رابطه با تمام جنبه‌های کاداستر حقوقی، سازمانی و فنی مورد نیاز است. لازم به ذکر است که این نتایج از منظر فنی و آکادمیک انجام شده است [۶]. جهت تولید مدل سه بعدی از نرم‌افزار ArcGIS10 و به‌منظور ارزیابی دقت مدل تولید شده از جذر میانگین مربعات خطا (RMSE) و ضریب همبستگی استفاده شده است. نتایج حاصل از این ارزیابی نشان داد که دقت مؤلفه‌های X و Y به ترتیب با جذر میانگین مربعات خطا ۱/۴۷۴ متر و ۱/۴۵۳ متر و با ضریب همبستگی ۹۹ درصد و دقت مؤلفه Z مدل تولید شده با جذر میانگین مربعات خطا و ضریب همبستگی ۷۳ درصد به میزان قابل توجهی به معیارهای مرجع منطبق هستند. لازم به ذکر است که معیار مرجع مسطحاتی و زمان‌سنجی، نقشه رقوم ۱:۲۰۰۰ سازمان نقشه‌برداری کشور (نقشه پایه کاداستر کشور) و معیار مرجع ارتفاعی، داده‌های حاصل از نقشه‌برداری زمینی هستند.

مشارکت نویسندگان

در این مقاله، نویسندگان به نسبت برابر مشارکت داشته‌اند.

تشکر و قدردانی

مقاله ارسالی حاصل طرح تحقیقاتی از پایان‌نامه با عنوان طراحی کاداستر چهاربعدی، مطالعه موردی: منطقه‌ای از ایران است. همچنین از دکتر مهدی خوش‌برش ماسوله و مهندس رجایی که در انجام مطالعه موردی مربوط به محدوده میدان رسالت همکاری نموده‌اند قدردانی می‌شود.

تعارض منافع

«هیچ‌گونه تعارض منافع توسط نویسندگان بیان نشده است.»

منابع و مآخذ

[1] Key JG. *Design and Development Spatial Data Model of*

- [24] Ho S, Rajabifard A, *Delivering 3D Land and Property Management: A Consideration of Institutional Challenges in an Australian Context*, 3rd International Workshop on 3D Cadastres, Shenzhen, 2012.
- [25] Hassan M I, Ahmad-Nasruddin M, Yaakop I, Abdul-Rahman A, *An Integrated 3D Cadastre - Malaysia as an example*, The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences, 2008.
- [26] Vucic N, Roic M, Markovinovic D, *towards 3D and 4D Cadastre in Croatia, FIG Working*, Dubai, 2014.
- [27] Karki S, Thompson R, McDougall K, *Representing 3D data in a Cadastral database Queensland Case*, GIS and RS Research Conference University of Otago, New Zealand, 2013.
- [28] van der Molen P, *Institutional aspects of 3D cadastres*. Computers, Environment and Urban Systems, 27, 383–394, 2003.
- [29] Kitay GM, *Land Acquisition in Developing Countries: Policies and Procedures of the Public Sector*, Lincoln Institute of Land Policy, Boston, 1985.
- [30] Choon T, Kam Seng L, *towards a Malaysian Multipurpose 3D Cadastre based on the Land Administration Domain Model (LADM) - An Empirical Study*, 5th Land Administration Domain Model Workshop, Kuala Lumpur, 2013.
- [11] Gürsoy Sürmeneli H, Alkan M, Koeva M, *Design and implementation of a 4D cadastral legal model for Turkish land administration infrastructure based on LADM*. 2022.
- [12] Mehrzad M, *Cadastre*, Jangal Publications, Javedaneh, Tehran, 2013 [In Persian]
- [13] Khodavardi Darian A, *The role of location-based data infrastructure (SDI) and cadastre in sustainable development and social justice*, National Land and Property Registration Organization, Deputy for Planning and Resource Management, 2/0 edition, 2005 [In Persian]
- [14] Mesgari MS, *New technologies and methods of cadastre and mapping and its effects on sustainable development*, collection of articles of the conference commemorating the 100th anniversary of the establishment of the country's land and property registration, 2011 [In Persian]
- [15] Mumtazi M.A, Sadeghian S, *Country Cadastre and Cadastre 2014 to 2034*, 26th National Conference and Exhibition of Mapping Engineering and Geometric Spatial Information 1400, Shahid Beheshti University, Abbaspur Branch, 2021 [In Persian]
- [16] Roshannejad A, Kaniz W, *Handling Identities in Spatio - Temporal Database*, Department of Geoinformatics, ITC PO Box 6, 7500 AA Enschede, The Netherlands, 1995.
- [17] Ramiro Alberdi P, Diego A. Erba, *Modeling Legal Land Object for waterbodies in the context of 4D cadastre*. 2020 Gong L & Zhang XC, *Study of Spatio - Temporal Data Model in Parcel-Alteration and Tracing of History*. In *Geoinformatics 2008 and Joint Conference on GIS and Built. environment: Advanced Spatial Data Models and Analyses* (pp. 71460I-71460I), International Society for Optics and Photonics, 2009.

معرفی نویسندگان

AUTHOR(S) BIOSKETCHES



محمد علی ممتازی دانشجوی ارشد رشته مهندسی نقشه‌برداری گرایش سیستم‌های اداره زمین دانشکده مهندسی عمران، آب و محیط زیست دانشگاه شهید بهشتی شهر تهران ورودی سال ۱۴۰۰ است. مقاله مربوط در راستای پژوهش پایان نامه او با همین عنوان

است. فعالیت‌های پژوهشی وی شامل تعدادی مقاله پوستر در زمینه کاداستر با عنوان کاداستر کشور و کاداستر ۲۰۱۴ تا ۲۰۳۴ در بیست و ششمین همایش و نمایشگاه ملی مهندسی نقشه برداری و اطلاعات مکانی ژئوماتیک ۱۴۰۰ و همچنین ارزیابی قابلیت‌های کاداستر چهار بعدی در صنعت آب و برق در هفتمین کنفرانس ملی سیستم اطلاعات مکانی خرداد ۱۴۰۲ در تهران ارائه نموده است. همچنین مقاله همایشی در راستای کاداستر ایران با نگاهی بر کاداستر ترکیه در همایش سازمان ثبت اسناد و املاک در سال ۱۴۰۳ ترتیب داده که مقام اول در این همایش را کسب کرده است.

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

✉ Mohammadalimomtazi@gmail.com

- [18] Fan YT, Yang JY, Zhu DH, Wei KL, *A Time-Based Integration Method of Spatio-Temporal Data at Spatial Database Level*. Mathematical and Computer Modelling, 51(11), 1286-1292, 2010.
- [19] Lemmen C, van Oosterom P, *Version 1.0 of the FIG Core Cadastral Domain Model*. XXIII International FIG congress, Munich, October 2006, 18 p.
- [20] Stoter J.E, van Oosterom, Ploeger H, Aalders H, *Conceptual 3D Cadastral Model Applied in Several Countries*, FIG Working week 2004, May, Athens, Greece, 2004.
- [21] Van Oosterom P, Lemmen C, *The Core Cadastral Domain Model: A Tool for the Development of Distributed and Interoperable Cadastral Systems*. International Conference on Enhancing Land Registration and Cadastre for Economic Growth in India, New Delhi, 2006.
- [22] Oosterom van P, Maessen B, Quak W, [*Generic query tool for spatiotemporal data*], In: International Journal of Geographical Information Science, Volume 16, 8, pp. 713-748, 2002.
- [23] Aien A, *3D Cadastral Data Modelling*, Thesis (PhD), University of Melbourne, Australia, 2013.



علیرضا وفائی‌نژاد دارای مدرک دکتری تخصصی نقشه‌برداری (گرایش سیستم‌های اطلاعات مکانی) از دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی است. ایشان در حال حاضر به‌عنوان دانشیار در دانشکده مهندسی عمران، آب و محیط زیست دانشگاه شهید بهشتی

مشغول فعالیت بوده و تاکنون بیش از ۳۵ مقاله در نشریات بین‌المللی، ۷۰ مقاله در نشریات معتبر داخلی و ۵۰ مقاله در کنفرانس‌های داخلی و بین‌المللی ارائه نموده‌اند. زمینه تخصصی ایشان عبارتند از: سیستم‌های اطلاعات مکانی هوشمند، بهینه‌سازی با سیستم‌های اطلاعات مکانی و کاربردهای سیستم‌های اطلاعات مکانی در منابع آب و مدیریت بحران.

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

✉ a_vafaei@sbu.ac.ir



سعید صادقیان دانشیار دانشکده مهندسی عمران، آب و محیط زیست دانشگاه شهید بهشتی، دارای مدرک دکتری از دانشگاه تهران در رشته مهندسی نقشه برداری- فتوگرامتری است. وی علاوه بر تدریس دانشگاه، دارای سوابق علمی و اجرایی بسیاری است. او به‌عنوان عضو

هیأت تحریریه نشریه علمی پژوهش‌های سنجش از دور و اطلاعات مکانی و تجربه ریاست آموزشکده نقشه‌برداری سازمان نقشه‌برداری کشور ۱۳۸۵-۱۳۹۲ را نیز دارند. جوایز و افتخارات ایشان شامل پژوهشگر برگزیده کشوری و دریافت لوح تقدیر وزیر علوم، تحقیقات و فناوری در سال‌های ۱۳۸۱، ۱۳۸۳ و ۱۳۸۸ است.

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

Citation (Vancouver): Momtazi M, Sadeghian S, Vafaeinejad A. [Four-dimensional cadastre design, a case study: A region of (IRAN: Tehran)]. *J. RS. GEOINF. RES.* 2025; 3(1): 65-84

 <https://doi.org/10.22061/jrsg.2024.10994.1067>



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 landslide areas in the Siah Bisheh Dam Project using Surveying and radar interferometry

A. Bayat¹, M.R. Seif², B.A. Beirami^{*2}¹ Department of Civil and Surveying Engineering, North Tehran Branch, Islamic Azad University, Tehran, Iran² Department of Surveying Engineering, Imam Hossein University, Tehran, Iran

ABSTRACT

Received: 08 February 2025

Reviewed: 31 March 2025

Revised: 04 May 2025

Accepted: 02 June 2025

KEYWORDS:

Interferometry

Radar

landslide

Mapping

Siah Bisheh Dam

* Corresponding author

✉ b_asghari@ihu.ac.ir

☎ (+9821) 77105776

Background and Objectives: Landslides, as one of the most destructive natural phenomena, pose a serious threat to engineering and environmental structures. The Siah Bisheh Pumped Storage Dam, the first concrete-faced pumped storage dam in Iran, is at risk of geological displacements due to its geographical location in the Alborz Mountains and complex geological conditions (including active faults, unstable rock masses, and steep slopes). This study aimed to monitor land surface changes and manage landslide hazards within the dam area, using ground surveying and interferometric radar (InSAR) methods. The main focus was on analyzing the impact of key factors such as rapid drawdown, water level fluctuations, and construction activities on the instability of the area.

Methods: In this study, two main methods were used. In the first method, called Ground surveying, changes in critical points such as Gully 5 and areas adjacent to Chalus Road have been monitored by installing concrete targets (small benchmarks) and periodically measuring planar and elevation displacements since 2011. In the second method, changes in the land surface were examined with millimeter accuracy using Sentinel-1 satellite data from 2015 to 2022 and image processing in SNAP software. The processing steps included image alignment, removal of topographic effects with a digital elevation model, Goldstein phase filtering, and phase-to-displacement conversion.

Findings: The results showed significant agreement between the two methods. The highest displacements occurred in areas close to dam basins (such as Gully 5 with more than 60 cm of elevation displacement) and areas adjacent to Chalus Road. Rapid reservoir subsidence was identified as the main cause of instability, as sudden changes in water level accelerate the saturation and rapid depletion of soil and rock masses. The InSAR method was confirmed as a low-cost and faster tool compared to traditional land surveying methods, with displacement estimates of 0.13 to 0.5 meters in identifying changes over large areas.

Conclusion: The combination of ground and satellite methods allows for more comprehensive and continuous monitoring of unstable areas. It is suggested that radar interferometry be used for periodic monitoring and crisis management in similar projects. Also, creating a satellite database and integrating the results with dam behavior models will help reduce landslide risk. This study emphasizes the role of modern technologies in increasing the accuracy and reducing the costs of monitoring sensitive structures.



NUMBER OF REFERENCES

31



NUMBER OF FIGURES

11



NUMBER OF TABLES

10

مقاله پژوهشی

پایش محدوده‌های لغزشی در پروژه سدهای سیاه‌بیشه با استفاده از روش نقشه‌برداری زمینی و تداخل‌سنجی راداری

علی بیات^۱، محمد رضا سیف^۲، بهنام اصغری بیرامی^{۲*}^۱ گروه مهندسی عمران و نقشه‌برداری، دانشگاه آزاد واحد تهران شمال، تهران، ایران^۲ گروه مهندسی نقشه‌برداری، دانشگاه امام حسین (ع)، تهران، ایران

چکیده

پیشینه و اهداف: زمین‌لغزش‌ها به‌عنوان یکی از مخرب‌ترین پدیده‌های طبیعی، تهدیدی جدی برای سازه‌های مهندسی و محیط‌زیست محسوب می‌شوند. سد تلمبه ذخیره‌ای سیاه‌بیشه نخستین سد خاکی تلمبه ذخیره‌ای ایران با رویه بتنی، به دلیل موقعیت جغرافیایی در رشته کوه البرز و شرایط زمین‌شناسی پیچیده (شامل گسل‌های فعال، توده‌های سنگی ناپایدار، و شیب‌های تند)، در معرض خطر جابجایی‌های زمین‌شناختی قرار دارد. این پژوهش با هدف پایش تغییرات سطح زمین و مدیریت خطرات ناشی از زمین‌لغزش در محدوده این سد، با استفاده از روش‌های نقشه‌برداری زمینی و تداخل‌سنجی راداری (InSAR) انجام شد. تمرکز اصلی بر تحلیل تأثیر عوامل کلیدی مانند افت سریع مخزن (Rapid Drawdown)، نوسانات سطح آب، و فعالیت‌های عمرانی بر ناپایداری منطقه بود.

روش‌ها: در این مطالعه، دو روش اصلی به کار گرفته شده است. در روش اول که نقشه‌برداری زمینی نام دارد، با نصب تارگت‌ها بتنی (بنچمارک‌های کوچک) و اندازه‌گیری دوره‌ای جابجایی‌های مسطحاتی و ارتفاعی از سال ۱۳۹۰ تاکنون، تغییرات در نقاط بحرانی مانند گالی ۵ و مناطق مجاور جاده چالوس پایش شده است. در روش دوم با استفاده از داده‌های ماهواره سنتینل-۱ در بازه زمانی ۲۰۱۵ تا ۲۰۲۲ و پردازش تصاویر در نرم‌افزار SNAP، تغییرات سطح زمین با دقت میلیمتری بررسی شد. مراحل پردازش شامل هم‌ترازی تصاویر، حذف اثرات توپوگرافی با مدل رقومی ارتفاعی، فیلترگذاری فاز گلدشتاین، و تبدیل فاز به جابجایی بود.

یافته‌ها: نتایج نشان‌دهنده همخوانی قابل توجه بین دو روش بود. بیشترین جابجایی‌ها در مناطق نزدیک به حوضچه‌های سد (مانند گالی ۵ با بیش از ۶۰ سانتیمتر جابجایی ارتفاعی) و نواحی مجاور جاده چالوس رخ داده است. افت سریع مخزن به عنوان عامل اصلی ناپایداری شناسایی شد، به طوری که تغییرات ناگهانی سطح آب، اشباع و تخلیه سریع توده‌های خاکی و سنگی را تسریع می‌کند. روش تداخل‌سنجی راداری با تخمین جابجایی ۰.۱۳ تا ۰.۵ متر در شناسایی تغییرات پهنه‌های وسیع، به عنوان ابزاری کم هزینه و سریع نسبت به روش‌های سنتی نقشه‌برداری زمینی تأیید شد.

نتیجه‌گیری: ترکیب روش‌های زمینی و ماهواره‌ای امکان پایش جامع‌تر و مداوم مناطق ناپایدار را فراهم می‌کند. پیشنهاد می‌شود در پروژه‌های مشابه، از تداخل‌سنجی راداری برای پایش ادواری و مدیریت بحران استفاده شود. همچنین، ایجاد پایگاه داده ماهواره‌ای و یکپارچه‌سازی نتایج با مدل‌های رفتاری سد، به کاهش ریسک زمین‌لغزش کمک خواهد کرد. این مطالعه بر نقش فناوری‌های نوین در افزایش دقت و کاهش هزینه‌های پایش سازه‌های حساس تأکید دارد.

واژگان کلیدی:

تداخل‌سنجی

رادار

زمین‌لغزش

نقشه‌برداری

سد سیاه‌بیشه

* نویسنده مسئول

b_asghari@ihu.ac.ir

۰۲۱-۷۷۱۰۵۷۷۶ ①

مقدمه

به دلیل ساختار خاص خود و تغییرات مداوم در تراز آب مخازن، از جمله سازه‌هایی هستند که پایش مداوم رفتار آن‌ها ضروری است [۱]. سد تلمبه‌ذخیره‌ای سیاه‌بیشه، اولین سد خاکی تلمبه‌ذخیره‌ای با رویه بتنی در ایران، در رشته‌کوه البرز و در محدوده‌ای با زمین‌شناسی پیچیده و مستعد زمین‌لغزش قرار گرفته است. موقعیت جغرافیایی و ویژگی‌های زمین‌شناسی این منطقه، از جمله گسل‌های فعال و توده‌های ناپایدار سنگی و خاکی، این سد را در برابر مخاطرات زمین‌شناختی حساس

کنترل و مدیریت مناطق ناپایدار به‌ویژه در مناطق کوهستانی و پرجمعیت یکی از ضرورت‌های کلیدی برای کاهش خسارات ناشی از بلایای طبیعی و حفاظت از زیرساخت‌ها به شمار می‌رود. زمین‌لغزش‌ها که عمدتاً تحت تأثیر عواملی نظیر بهره‌برداری از منابع آب‌های زیرزمینی، تغییرات سطح آب‌های ذخیره‌شده در سدها، و شرایط زمین‌شناسی ناپایدار رخ می‌دهند، می‌توانند تأثیرات مخربی بر سازه‌های عمرانی و محیط‌زیست داشته باشند. در این میان، سدهای تلمبه‌ذخیره‌ای

آب ذخیره‌شده به تأمین آب شرب تهران اختصاص یافته و در نتیجه، تغذیه سفره‌های زیرزمینی در دشت کاهش یافته است [۱۷]. نتایج بررسی تغییرات سطح ایستایی، داده‌های پیژومتری و نقشه‌های راداری نشان داد که این کاهش به‌ویژه در نواحی شمالی دشت ورامین منجر به افت شدید سطح آب زیرزمینی و افزایش نرخ فرونشست زمین شده است. در پژوهشی که بر روی سد گیوی طی سال‌های ۲۰۱۷ تا ۲۰۱۹ انجام شد، برای شناسایی جابجایی‌ها و ناپایداری‌های زمین، از ترکیب تکنیک تداخل‌سنجی راداری (SBAS-InSAR) و داده‌های GPS استفاده گردید [۱۸]. نتایج نشان داد که این دو روش می‌توانند مکمل مؤثری در کشف دقیق نقاط جابجا شده باشند و تطابق خوبی در شناسایی جابجایی‌های ارتفاعی و افقی روی بدنه سد و اطراف آن ارائه دهند.

در پژوهش که بر روی سد Upper Atbara در کشور سودان از تصاویر سری زمانی سنتینل-۱ و فن تداخل‌سنجی راداری به منظور پایش جابجایی و تغییر شکل بدنه سد استفاده شد [۱۹]، نتایج نهایی نشان داد که بیشینه جابجایی در تاج سد تا ۱۹۰ میلی‌متر بوده و دقت نتایج با اندازه‌گیری‌های میدانی تطابق بالایی داشته، که کارایی بالای روش تداخل‌سنجی راداری را در پایش تغییرشکل سدها تأیید می‌کند. در پژوهش دیگری در کشور ترکیه، جابجایی بلندمدت سد آتاتورک با استفاده از تحلیل چندزمانه InSAR و تصاویر ماهواره‌ای ERS، انویست و سنتینل-۱ مورد بررسی قرار گرفت [۲۰]. نتایج نشان داد که پس از ۲۸ سال از ساخت سد، جابجایی تدریجی تا ۱۱ سانتی‌متر، به‌ویژه در تاج سد، رخ داده و جابجایی در راستای شرق-غرب بیشتر از جابجایی عمودی بوده است.

علی‌رغم مقالات موجود، مطالعات محدودی به‌طور خاص بر پایش ناپایداری‌های زمین در سدهای تلمبه‌ذخیره‌ای مانند سد سیاه‌بیشه و تأثیر عوامل خاصی چون افت سریع مخزن تمرکز کرده‌اند. در این پژوهش، از روش‌های نقشه‌برداری زمینی در کنار داده‌های ماهواره سنتینل-۱ و نرم‌افزار SNAP برای پایش جابجایی‌های محدوده سد سیاه‌بیشه استفاده شده است. داده‌های مذکور امکان بررسی تغییرات سطح زمین در بازه زمانی ۲۰۱۵ تا ۲۰۲۲ را فراهم کرده‌اند. نتایج این تحقیق به‌طور خاص بر تحلیل جابجایی‌های رخ داده در مناطقی مانند گالی ۵ و دیگر نواحی بحرانی سد متمرکز است. این پژوهش همچنین به مقایسه نتایج به‌دست‌آمده از روش تداخل‌سنجی راداری با روش‌های نقشه‌برداری زمینی پرداخته و نشان می‌دهد که این تکنیک نه تنها دقت بالایی دارد، بلکه از نظر هزینه و زمان نیز بسیار کارآمد است. هدف اصلی این مطالعه، درک الگوی رفتاری برای جابجایی‌های محدوده سد سیاه‌بیشه و شناسایی عوامل مؤثر بر این تغییرات است. به‌طور خاص، اهداف این پژوهش شامل تعیین مقادیر جابجایی‌های مسطحاتی و ارتفاعی، بررسی تأثیر افت سریع مخزن، و ارائه روشی کارآمد برای مدیریت بحران و رفتارشناسی نواحی ناپایدار است. نوآوری اصلی این تحقیق در بهره‌گیری از روش‌های نقشه‌برداری زمینی و تکنیک تداخل‌سنجی راداری برای پایش مداوم محدوده سد و تحلیل دقیق

ساخته است [۲]. افت سریع مخزن، نوسانات روزانه تراز آب، و حرکت گسل‌ها بروی یکدیگر از مهم‌ترین عواملی هستند که باعث ایجاد جابجایی‌های مسطحاتی و ارتفاعی در محدوده این سازه می‌شوند. این شرایط خاص، نیازمند مطالعه و پایشی دقیق برای جلوگیری از خسارات احتمالی و مدیریت بهتر مخاطرات است.

روش‌های سنتی برای پایش تغییرات زمین نظیر میکروژئودزی و روش قرائت زمینی مستقیم [۳، ۴]، به دلیل هزینه بالا، محدودیت زمانی و نیاز به نیروی انسانی، توانایی لازم برای پایش مداوم و گسترده را ندارند. از این‌رو، تکنیک‌های نوین سنجش از دور، به‌ویژه تداخل‌سنجی راداری (InSAR)، به‌عنوان ابزارهایی مؤثر و مقرون‌به‌صرفه مطرح شده‌اند [۵، ۶]. این تکنیک، با استفاده از داده‌های ماهواره‌ای، قادر است جابجایی‌های سطح زمین را در مقیاس میلی‌متری پایش کرده و بدون نیاز به حضور فیزیکی، اطلاعاتی گسترده و دقیق فراهم کند [۷، ۸].

تداخل‌سنجی راداری از دهه ۱۹۸۰ به‌عنوان یکی از روش‌های پیشرفته در مطالعات زمین‌شناسی معرفی شد و تاکنون کاربردهای متعددی در زمینه پایش زمین‌لغزش‌ها و فرونشست‌ها داشته است [۹، ۱۰]. برای مثال، در منطقه ماسوله از این تکنیک برای بررسی زمین‌لغزش استفاده کردند و توانایی آن در شناسایی تغییرات جزئی سطح زمین را نشان دادند [۱۱]. همچنین، به منظور رفتارنگاری سد طالقان پژوهشگران از این روش بر مبنای تصاویر تصاویر سنتینل-۱ با استفاده از نرم افزار GMTSAR بهره بردند و ضمن برجسته‌سازی مزایای آن نسبت به ابزارهای دقیق سنتی حداکثر فرونشست را ۳ میلی‌متر در سال برآورد کردند [۱۲].

همچنین گروهی دیگر از پژوهشگران از این تکنیک برای پایش تغییرات در محدوده سد گتوند علیا استفاده کردند و میزان فرونشست منطقه را حدود ۵ سانتی‌متر محاسبه کردند [۱۳]. همچنین در شهر اراک، نرخ فرونشست با استفاده از روش تداخل‌سنجی راداری حدود یک سانتی‌متر در سال را تعیین شده است و این نتایج نهایی بیانگر تأثیر عوامل زمین‌شناسی و تغییر در منابع آب زیرزمینی بر این پدیده است [۱۴]. در تحقیقات مختلفی از تکنیک تداخل‌سنجی تفاضلی راداری به‌عنوان یک روش مؤثر برای اندازه‌گیری جابجایی سطح زمین که امکان پایش حرکات کوچک را با دقت بالا فراهم می‌کند، یاد شده است [۱۵].

در پژوهش دیگری به بررسی ناپایداری دامنه‌ای در حوزه آبخیز گرم‌چای با استفاده از تصاویر راداری ماهواره ALOS پرداخته شده است و نشان داده شده است که فعالیت‌های زمین‌لغزش، به‌ویژه در نزدیکی شبکه هیدرولوژیکی، می‌تواند به‌عنوان منبع مهم رسوب‌زایی در منطقه محسوب شود [۱۵]. در تحقیق دیگری به بررسی جابجایی سطحی ناشی از زمین‌لغزش نقل در شهرستان سمیرم پرداخته شده است و نتایج نهایی نشان‌دهنده فعال بودن این توده لغزشی با جابجایی حداکثر ۸ سانتی‌متر در یک دوره ۱۵۰ روزه است [۱۶].

در پژوهش دیگری درباره تأثیر سد ماملو بر دشت ورامین، مشخص شد که با وجود هدف اولیه سد برای تأمین آب کشاورزی، بخش عمده‌ای از

این سد متشکل از یک مخزن اصلی و یک مخزن ذخیره است که از طریق تونل‌های آب‌رسان به یکدیگر متصل شده‌اند. مخزن بالایی در ارتفاعات بالاتر قرار دارد و آب را برای تولید برق به مخزن پایینی انتقال می‌دهد. سپس، در زمان کاهش تقاضای مصرف برق، آب به مخزن بالایی پمپاژ می‌شود. طراحی سد مذکور در سال ۱۳۴۹، مطالعات زمین‌شناسی سال ۱۳۵۷، طراحی فاز ۲ در سال ۱۳۶۲ شروع شد و تا سال ۱۳۷۱ به طول انجامید و نهایتاً بهار ۱۳۹۲ به صورت برخط راه اندازی شد و در شهریور ۱۳۹۴ به بهره‌برداری رسید.

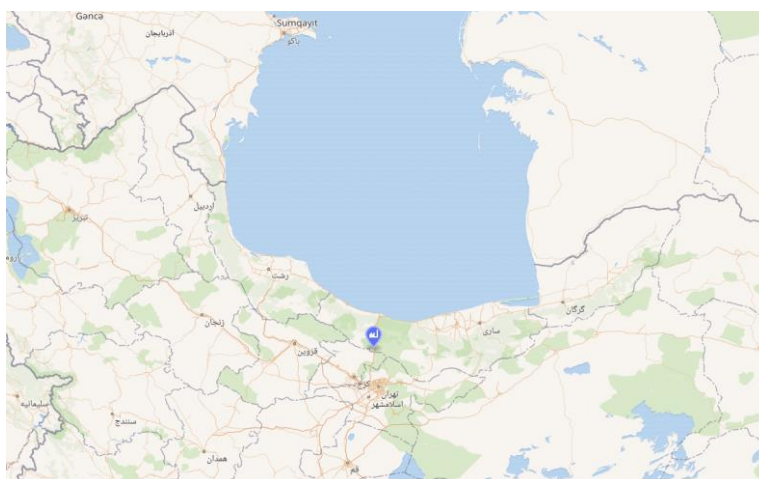
شرایط زمین‌شناسی منطقه شامل گسل‌های فعال، توده‌های خاکی و سنگی ناپایدار، و شیب‌های تند است که این منطقه را مستعد وقوع زمین‌لغزش و جابجایی‌های زمین‌شناختی کرده است. فرایندهای هیدرولوژیکی و مکانیکی، از جمله افت سریع مخزن (Rapid Drawdown)، نوسانات مداوم تراز آب، و تغییرات در توزیع بار بر روی مخازن، موجب ناپایداری‌های قابل توجه در این منطقه می‌شوند. از این رو، پایش مداوم تغییرات زمین در محدوده سد و تحلیل رفتار سازه و محیط پیرامون آن امری ضروری است.

تأثیرات زمین‌شناختی است. مقایسه این دو تکنیک در ارزیابی پدیده زمین‌لغزش با تمرکز بر مناطق بحرانی سد سیاه‌بیشه، این مطالعه را از تحقیقات پیشین متمایز کرده و الگویی برای مدیریت پایدار سدهای مشابه ارائه می‌دهد.

ساختار این مقاله به این صورت است: در بخش دوم منطقه مطالعاتی و داده‌ها معرفی می‌شود. در بخش سوم روش تحقیق معرفی می‌شود. در بخش چهارم نتایج تحلیل و آنالیز می‌شود. در بخش پنجم نیز نتیجه‌گیری انجام شده است.

منطقه مطالعاتی و داده‌ها

سد سیاه‌بیشه یک نیروگاه برق‌آبی در دامنه‌های رشته کوه البرز در مجاورت روستای سیاه‌بیشه در فاصله ۴۸ کیلومتری شهر چالوس و ۱۲۵ کیلومتری شمال شهر تهران قرار دارد (شکل-۱)، که با ظرفیت تولید ۱۰۴۰ مگاوات جزو نخستین نیروگاه تلمبه ذخیره‌ای و همچنین اولین سد خاکی تلمبه‌ذخیره‌ای با رویه بتنی در ایران است و نقش مهمی در تأمین انرژی برق‌آبی کشور در ساعات پیک مصرف ایفا می‌کند. سازه



(الف)



(ب)

شکل ۱: (الف) موقعیت مکانی سد تلمبه ذخیره‌ای سیاه‌بیشه در نقشه ایران، (ب) تصویر گوگل ارث
Fig. 1: (a) Location of the Siah Bisheh Pumped Storage Dam on the map of Iran, (b) Google Earth image

میان، و پس از تثبیت اولیه شرایط به صورت هفتگی انجام گرفت. در نهایت، در فاز پایدار، پایش ماهیانه در تاریخ‌های مشخص با انعطاف چندروزه (با توجه به شرایط دمایی شدید منطقه) ادامه یافت. این رویکرد انعطاف‌پذیر، سازگاری بالایی با تغییرات محیطی داشت. نتایج این پایش جامع که ترکیبی از نقشه‌برداری زمینی و داده‌های ابزار دقیق بود، به اجرای تمهیدات ایمنی مؤثر برای جاده چالوس منجر شد. به عنوان مثال، شناسایی نقاط مستعد نشست خاک، اصلاح مسیر تردد و نصب علائم هشداردهنده به کاهش ۴۰ درصدی حوادث ناگوار در این جاده انجامید. افزون بر این، روش پیشنهادی با بهینه‌سازی هزینه و زمان، دقت پیش‌بینی رخداد‌های غیرمترقبه (مانند رانش زمین) را بهبود بخشید. این موفقیت‌ها نشان می‌دهد که ادغام داده‌های زمین‌شناسی، مکانیک خاک و پایش هوشمند می‌تواند به مدلی استاندارد برای پروژه‌های عمرانی مشتق تبدیل شود.

تداخل‌سنجی راداری

تصاویر راداری حاصل از رادارهای روزنه مجازی سار با دارا بودن قابلیت اندازه‌گیری طول بردار از سنجنده تا سطح زمین در اندازه‌گیری‌های مربوط به تهیه نقشه رقومی ارتفاعی به طور گسترده به کار می‌روند [۲۴]. تکنیک مورد استفاده در این روش به تکنیک تداخل‌سنجی راداری ملقب است. در تداخل‌سنجی راداری فاز حاصل از دو تصویر گرفته شده از یک منطقه معین جهت تولید تداخل نگار ضرب می‌شود. در واقع تداخل‌نگار حاصل ضرب مختلط دو تصویر راداری است که این دو تصویر با هم ممکن است توسط یک سکوی فضایی یا هوایی که دارای دو آنتن با فاصله معین باشد، اخذ شده باشد یا دو تصویر با فواصل زمانی مختلف و از یک سکوی مشابه گرفته شوند. اختلاف فاز موجود در دو تصویر به صورت لبه یا حاشیه در تداخل نگار نمایش داده می‌شود که هر زوج از آنها به میزان 2π با یکدیگر اختلاف فاز دارند. تداخل‌نگار فراهم شده به روش تداخل‌سنجی راداری قابلیت نمایش تغییرات ارتفاعی و ناهمواری‌ها را دارد. دقت تغییرات مقادیر ارتفاعی dz قابل محاسبه از هر حاشیه تابع ویژگی‌های ماهواره مانند طول خط‌مبنا $B^\perp$ طول موج یا باند مورد استفاده λ زاویه برخورد θ و طول بردار مایل ارتفاع ماهواره تا زمین P است [۲۵]:

$$dz = (\lambda P \sin \theta) / 2 B^\perp \quad (1)$$

در مبحث هندسه تداخل‌سنجی تفاضلی، به طور کلی اطلاعاتی که ماهواره از زمین دریافت می‌کند، همان اطلاعات فاز موج دریافتی توسط گیرنده می‌باشد. از طرف دیگر فاصله ماهواره تا زمین تحت تأثیر پدیده Deformation دچار تغییر شده است که در واقع همان سیگنالی است که ما به دنبال آشکارسازی آن هستیم. در شکل ۲ که نشان‌دهنده هندسه تداخل‌سنجی تفاضلی می‌باشد، h فاصله سطح زمین تا سطح بیضوی یا همان ارتفاع ژئودتیک، زاویه θ زاویه راستای ماهواره با راستای

در این پژوهش، داده‌های ماهواره سنتینل-۱ برای پایش تغییرات سطح زمین در محدوده سد سیاه‌پیشه استفاده شده است. این داده‌ها شامل تصاویر با فرمت SLC (Single Look Complex) هستند که در حالت پلاریزاسیون VV و مد IW (Interferometric Wide Swath) تهیه شده‌اند [۲۱]. این تصاویر به دلیل رزولوشن مناسب (20×5 متر) و پوشش وسیع، برای مطالعات تغییرات سطح زمین و پایش زمین‌لغزش بسیار مناسب هستند [۲۲، ۲۳]. برای این مطالعه، داده‌های ماهواره‌ای در بازه زمانی ۲۰۱۵ تا ۲۰۲۲ از آرشیو Copernicus SciHub دانلود شد. این داده‌ها با استفاده از تکنیک تداخل‌سنجی راداری و نرم‌افزار SNAP مورد پردازش قرار گرفتند. انتخاب داده‌ها بر اساس معیارهایی نظیر زمان اخذ تصاویر، مسیر ماهواره (Track 35)، و میزان همبستگی فاز (Coherence) انجام شده است. داده‌های انتخابی شامل تصاویر صعودی (Ascending) هستند که بهترین پوشش و دقت را برای منطقه مطالعه فراهم می‌کنند.

روش تحقیق

روش ارائه شده در این پژوهش شامل دو تکنیک نقشه‌برداری زمینی و تداخل‌سنجی راداری است که در ادامه توضیحاتی در رابطه با آنها ارائه می‌شود.

نقشه‌برداری زمینی

جمع‌آوری داده‌های این پروژه از سال ۱۳۹۰ به صورت دوره‌ای و مبتنی بر پروتکل اجرایی مشخص آغاز شد. پیش از آگیری نهایی حوضچه سد، تارگت‌هایی با ارتفاع تعیین شده در نقاط زمینی نصب گردیدند. این فرایند با توجه به پیش‌بینی بارش سنگین برف و نیاز به سهولت قرائت داده‌ها، همراه با نشانگرهای موقعیت‌یاب پیشرفته انجام شد. طراحی فونداسیون تارگت‌ها نیز با در نظر گرفتن طبقه‌بندی خاک منطقه و جلوگیری از تداخل لایه‌های زیرسطحی، زیر نظر زمین‌شناسان پروژه اجرا گردید. تفاوت چشمگیر در ویژگی‌های مکانیک خاک سبب شد این مرحله از اهمیت فنی بالایی برخوردار باشد.

پیلارهای ثابت یا «نقاط مادر» به عنوان مبنای مرجع، با ترازبایی دقیق و تعیین مختصات ماهواره‌ای (هم‌سو با نقاط معتبر سازمان نقشه‌برداری) در سایت مستقر شدند. خطاهای اندازه‌گیری در این مرحله با روش‌های علمی سرشکن شدند تا مختصات تارگت‌ها با حداکثر دقت تعیین گردد. جانمایی تارگت‌ها در قالب شبکه‌ای از مثلث‌های مجاور در راستای طولی و عرضی انجام شد که منطبق بر نقاط شکست لایه‌های زمین‌شناسی، جنس خاک و نقاط بحرانی مانند مناطق مستعد «افت سریع مخزن سد» بود. این الگو به گونه‌ای طراحی شد که حتی در صورت تخریب برخی تارگت‌ها بر اثر عوامل طبیعی یا انسانی، تداوم پایش بلندمدت مختل نشود.

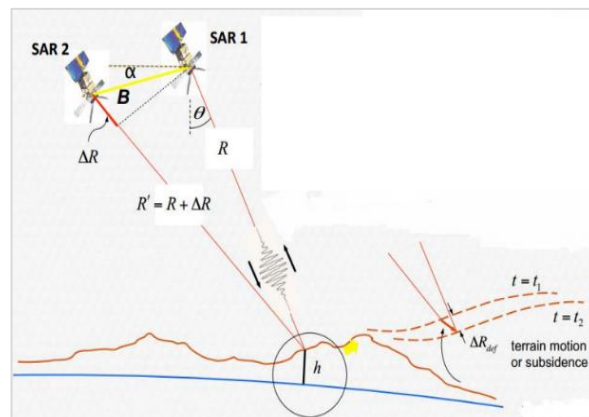
برنامه پایش داده‌ها در چهار فاز اجرا شد: در ۳۰ روز نخست پس از آگیری، قرائت‌ها به صورت روزانه، سپس تا ۲ ماه به صورت یک روز در

فیلتراسیون برداشته می‌شود که منجر به تولید تصویری می‌شود که نشان‌دهنده تغییرات فاز ناشی از Deformation می‌باشد (شکل ۳).

در این پژوهش، برای پایش تغییرات زمین و تحلیل جابجایی‌های سطحی در محدوده سد تلمبه‌ذخیره‌ای سیاه‌پیشه، از روش تداخل‌سنجی راداری با استفاده از داده‌های ماهواره‌ای سنتینل-۱ و نرم‌افزار SNAP استفاده شده است [۲۸]. این بخش شامل جزئیات مربوط به مراحل جمع‌آوری داده‌ها، پردازش تصاویر، تحلیل نتایج، و ابزارها و الگوریتم‌های استفاده‌شده در تحقیق است.

برای انتخاب زوج تصاویر مناسب، با در نظر گرفتن حجم بالای داده‌های ماهواره‌ای موجود، تصاویر را دانلود و مورد ارزیابی قرار گرفته است. در نهایت دو سری داده سنتینل-۱ که از نظر بازه زمانی و ویژگی‌های فنی مناسب بودند انتخاب شدند: تصویر اول در تاریخ ۲۰۱۵/۰۲/۱۲ و تصویر دوم در تاریخ ۲۰۲۲/۰۶/۰۴. هر ۲ تصویر از یک track یکسان که track شماره ۳۵ می‌باشد، اخذ شده‌اند. لازم به ذکر است با توجه به بازه زمانی طولانی بین ۲ تصویر اخذ شده مقادیر Coherence آنها خیلی نزدیک به هم نمی‌باشد. بعد از وارد کردن داده‌های ماهواره‌ای در نرم‌افزار از قسمت Stack Overview داده‌ها را مورد بررسی قرار داده که نرم‌افزار تصاویر قدیمی‌تر را به عنوان تصویر مبنا و دیگری را به عنوان تصویر پیرو می‌شناسد و اطلاعاتی از قبیل زمان اخذ داده شماره orbit و track و همچنین فاصله زمانی بین دو تصویر که حدوداً ۷ سال می‌باشد را استخراج می‌کند. چهار مرحله اصلی پردازش داده‌ی راداری برای تولید مقادیر جابه‌جایی شامل مراحل زیر است:

شاغولی یا همان راستای نادیر و زاویه α زاویه‌ای است که بردار خط واصل دو ماهواره با راستای افق می‌سازد.



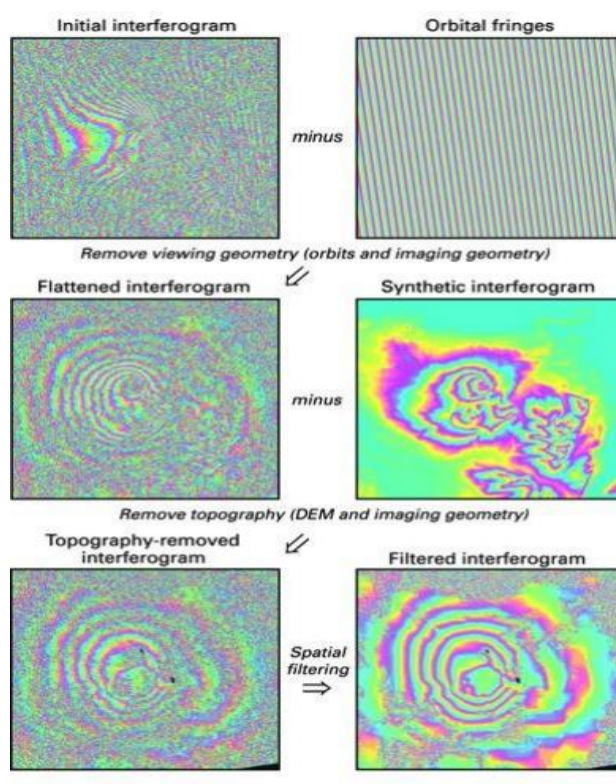
شکل ۲: هندسه تداخل‌سنجی راداری تفاضلی [۲۶]

Fig. 2: Geometry of differential radar interferometry [26]

در نهایت اختلاف فاز از رابطه زیر محاسبه می‌شود:

$$\Phi = \Phi_1 - \Phi_2 = (4\pi/\lambda) ((B \sin(\theta - \alpha)) + (B \cos(\theta - \alpha) / R \sin(\theta)) h + \Delta R_{\text{def}}) \quad (2)$$

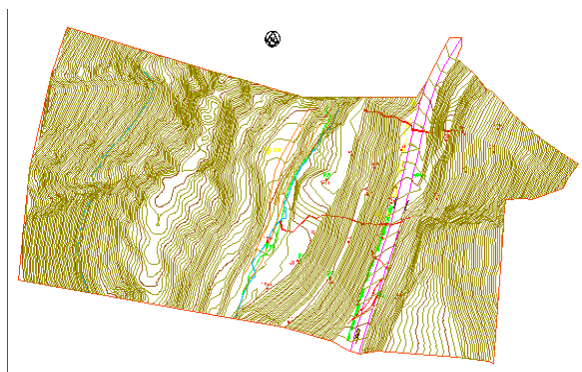
در رابطه فوق تمامی پارامترها جزء ورودی مسئله می‌باشد به جز ΔR_{def} که در واقع ما در روابط به دنبال آن هستیم. برای محاسبه میزان تغییر شکل، از تصویر اولیه ابتدا خطای مداری و سپس خطای توپوگرافی حذف می‌شود. در نهایت نیز خطای نویز و خطای اتمسفری به وسیله



شکل ۳: مراحل تداخل‌سنجی راداری [۲۷]

Fig. 3: Steps of radar interferometry [27]

بالایی برخوردار است. سد سیاه‌بیشه در ۲ بخش به فاصله تقریبی ۵ کیلومتر که توسط تونل‌های آبرسان آب را از سد بالا به سد پایین انتقال داده و پس از تولید برق مجدداً توسط همین تونل‌ها آب به سد بالا بازمی‌گردد که در حدود ۵۰۰ متر اختلاف ارتفاع دارند. محدوده رانشی مورد مطالعه در طرفین رودخانه چالوس که ساختگاه سد مورد نظر در آنجا قرار گرفته و در حال حاضر حوضچه سد سیاه‌بیشه می‌باشد، قرار گرفته است. با توجه به آبرگیری دریاچه سد و تخلیه و شارژ شدن مجدد حوضچه در طول شبانه روز شاهد نشست و جابجایی توده‌های خاکی و سنگی در منطقه مذکور هستیم که تاکنون از طریق نسب تارگت‌های ارتفاعی و قرلئت ادواری این تارگت‌ها و همچنین عملیات میکروژئودزی (بر مبنای دستورالعمل‌های همسان نقشه برداری) میزان جابجایی‌ها اعم از مسطحاتی و ارتفاعی مورد بررسی قرار گرفته است. در شکل ۴ نحوه قرارگیری بخشی از این تارگت‌ها به همراه ابزار نصب شده برای اندازه‌گیری مقدار جابجایی و همچنین تراز آب نمایش داده شده است.



شکل ۴: توپوگرافی محدوده سد بالا که به عنوان یکی از نقاط بحرانی شناخته می‌شود.

Fig. 4: Topography of the upper dam area, which is known as one of the critical areas

همچنین شکل ۵ مقدار جابجایی انجام شده از طریق داده‌های زمینی از سال ۲۰۱۴ تا کنون بدست آمده را نمایش می‌دهد. بر مبنای آن بیشترین جابجایی ارتفاعی چیزی در حدود ۶۰ سانتی‌متر است. جدول ۱ مربوط به جابجایی پیلارهای میکروژئودزی در نقاط مختلف سد اعم از توده‌های سنگی اطراف بدنه سد و سازه سرریز احداث شده است که مقدار جابجایی مسطحاتی و ارتفاعی را در برخی از نقاط نشان می‌دهد. همانطور که مشاهده می‌شود در محدوده فوق علاوه بر جابجایی‌های مسطحاتی و ارتفاعی (فرونشست) پدیده بالآمدگی نیز مشاهده می‌شود که بسیار خطرناک بوده از این رو پایش منطقه در بازه‌های زمانی مختلف در سطح وسیعی از منطقه مورد نظر را ایجاب می‌کند.

- پیش‌پردازش داده‌ها

○ هم‌مرجع‌سازی تصاویر (Coregistration)

برای هم‌تراز کردن پیکسل‌های تصاویر اولیه و ثانویه، هم‌مرجع‌سازی انجام شد. این مرحله برای اطمینان از اینکه هر پیکسل در هر دو تصویر موقعیت یکسانی را نشان دهد، ضروری است.

○ تشکیل تداخل‌نما (Interferogram Generation)

اختلاف فاز بین دو تصویر با استفاده از تداخل‌سنجی محاسبه شد و یک تداخل‌نما (Interferogram) ایجاد می‌گردد.

- حذف اثرات نامطلوب

○ حذف اثرات توپوگرافی (Topographic Phase Removal)

اثرات ارتفاعی با استفاده از مدل رقومی زمین حذف شد تا فاز تداخل‌نما تنها به جابجایی‌های سطحی مربوط باشد [۲۹].

○ اعمال فیلتر گلداشتاین (Goldstein Phase Filtering)

برای بهبود کیفیت تصویر و کاهش نویز، فیلتر گلداشتاین بر روی فاز تصاویر اعمال شد [۳۰].

- رفع گسستگی فاز (Unwrapping)

فاز تداخل‌نما به دلیل طبیعت داده‌های راداری گسسته است. با استفاده از نرم‌افزار Snaphu و روش mcf (که روش پیش‌فرض نرم‌افزار است) فاز گسسته به فاز پیوسته تبدیل شد تا بتوان جابجایی‌های سطحی را به‌صورت دقیق محاسبه کرد [۳۱].

- محاسبه جابجایی و تحلیل داده‌ها

○ محاسبه جابجایی‌ها

با استفاده از ابزار Phase to Displacement در نرم‌افزار SNAP، تغییرات فاز به جابجایی‌های سطحی تبدیل شد. این جابجایی‌ها نشان‌دهنده میزان تغییرات مسطحاتی و ارتفاعی در منطقه بودند.

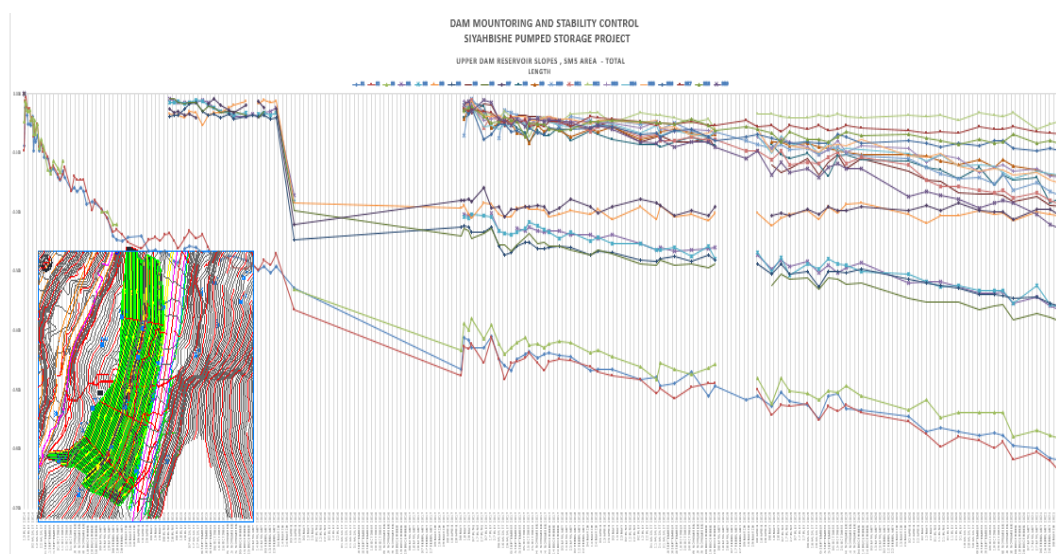
○ تصحیح هندسی (Geocoding)

تصاویر پردازش‌شده برای تطبیق دقیق با موقعیت‌های زمینی به مختصات جغرافیایی واقعی انتقال داده شدند. این مرحله امکان تحلیل دقیق تغییرات در محیط واقعی را فراهم کرد.

در نهایت پس از طی مراحل فوق نقشه جابه‌جایی در محیط نرم‌افزار SNAP تولید می‌شود.

آنالیز نتایج

منطقه مورد مطالعه در محدوده سد تلمبه ذخیره‌ای سیاه‌بیشه واقع شده است که به دلیل شرایط خاص زمین‌شناسی و ژئومورفولوژی و پتانسیل بالای منطقه در وقوع زمین‌لغزش و فرونشست از اهمیت



شکل ۵: نمودار مقادیر جابجایی تارگت‌های نصب شده در محدوده سد بالا که برای نمایش بهتر با علامت منفی اعمال شده است.

Fig. 5: Diagram of the displacement values of the targets installed within the upper dam area, which has been applied with a negative sign for better display

جدول ۱: نتایج عملیات میکروژئودزی در سال ۱۳۹۶

Table 1: Results of microgeodesy operations in 2017

حداکثر جابجایی مسطحانی (mm) (Maximum planer displacement)		حداکثر جابجایی ارتفاعی (mm) (Maximum height displacement)		شبکه Network
D(mm)	نام نقاط (Point Names)	ΔZ	نام نقاط (Point Names)	
65.54	UPR3	-27.73	UPR3	سه بعدی خارج سد 3D outside the dam
13.83	UT11	-42.37	UT14	سه بعدی بدنه سد 3D dam body
48.44	UTR11	14.49	UTL2	سه بعدی زمین لغزشی 3D Landslide
....		-33.27	UT22	شبکه تراز یابی خارج و بدنه سد External and body leveling network of the dam

طراحی شده ایجاد کنند تا آب‌های سطحی رو منحرف کرده و از فرسایش خاک و ناپایداری ترانشه‌ها جلوگیری کنند که البته مورد آخر در سد سیاه‌بیشه اجرا نشده است و عمدتاً با استفاده از خاکریزی در پای ترانشه‌ها و احداث چک دم سعی در پایداری ترانشه‌ها شده است. با تمام این تفاسیر با توجه به کوهستانی بودن منطقه و تلمبه ذخیره‌ای بودن سد مذکور لغزش و نشست امری کاملاً طبیعی است. از زمان آب‌گیری میزان تغییرات احتمالی حوضچه سد از طریق هیدروگرافی مورد پایش و بررسی قرار گرفته است. همچنین پایش محدوده‌های بیرونی حوضچه سدها با عملیات میکروژئودزی که یکی از روش‌های قابل اطمینان در رفتارسنجی هر سازه‌ای با ایجاد شبکه ژئودتیک کنترلی دقیق در اطراف و روی سازه‌ها و اندازه‌گیری پریودیک آنها جهت تعیین مقادیر جابجایی می‌باشد، صورت گرفته است (اشکال ۶ و ۷). که از سال ۱۳۹۰ تا سال ۱۴۰۰ در ۷ مرحله عملیات فوق انجام شده که حداکثر جابجایی مسطحانی و ارتفاعی را در سد بالا و پایین نشان می‌دهد (جداول ۲ و ۳).

با توجه به موقعیت ساختگاه سد برای پایداری این سازه عظیم مهندسی در قسمت‌های مختلف سد بر اساس نیاز و میزان جابجایی محیط پیرامون آن با استفاده از محاسبات زمین‌شناسی مناطق مستعد لغزش و مناطقی که نیازمند پایداری بوده شناسایی شده و با توجه به شرایط هر یک تمحیداتی در نظر گرفته شده، مانند تحکیم ترانشه‌ها با استفاده از عملیاتی چون شات‌کریت، نصب تاندون‌ها و همچنین برای جلوگیری از جابجایی ترانشه‌های مجاور حوضچه با احداث گالی در مناطق مختلف سعی در رسیدن به این مهم داشته‌اند. گالی (Gully) یک شیار یا آبراه طبیعی یا مصنوعی نسبتاً عمیق در خاک یا زمین است که توسط جریان آب‌های سطحی دوره‌ای و یا دائمی (به‌ویژه در اثر رواناب باران یا ذوب برف که در سد سیاه‌بیشه با توجه به جغرافیای منطقه امری همیشگی است) به وجود می‌آید. اگر اندازه این شیار به قدری بزرگ باشد که نتوان آن را با عملیات خاکی عادی از بین برد، به آن گالی گفته می‌شود. در سد سیاه‌بیشه، از خاک‌ریزها یا سازه‌هایی به نام "Gully plugs" یا "Check dams" برای مهار گالی‌ها استفاده شده و حتی ممکن است برای کاهش فشار رانش در کنار ترانشه‌ها، یک گالی

جدول ۲: حداکثر جابجایی‌های مسطحاتی و ارتفاعی در سد پایین (از سال خرداد ۱۳۹۰ تا تیر ۱۴۰۰)

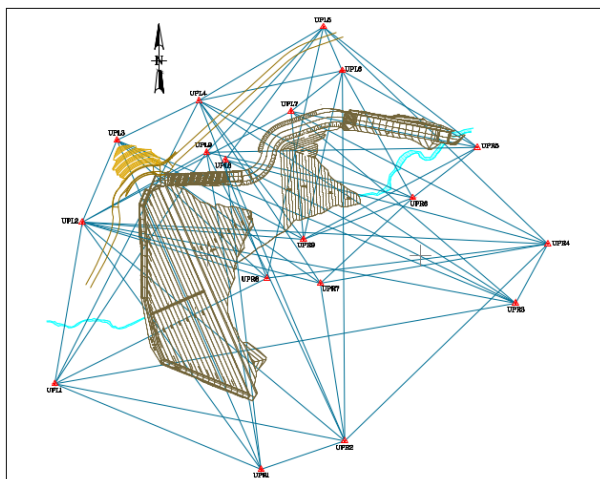
Table 2: Maximum planar and elevation displacements at the lower dam (From June 1390 to July 1400)

حداکثر جابجایی ارتفاعی (mm) (Maximum height displacement)		حداکثر جابجایی مسطحاتی (mm) (Maximum planer displacement)		شبکه
نام نقاط (Point Names)	ΔZ	نام نقاط (Point Names)	D(mm)	Network
LPL3	-32.77	LPL8	71.49	سه بعدی خارج سد 3D outside the dam
LPL7	-411.82	LPL7	479.36	
LT19	-89.54	LT14	63.09	روی بدنه سد dam body
LT38	+26.71	LT38	38.78	روی سرریز On the spillway of the dam
LTL17	-280.46	LTL16	821.48	سه بعدی زمین لغزشی 3D Landslide
BM1-2	-95.55	****	****	شبکه ترازبایی خارج و بدنه سد
LT19	-88.04	****	****	External and body leveling network of the dam

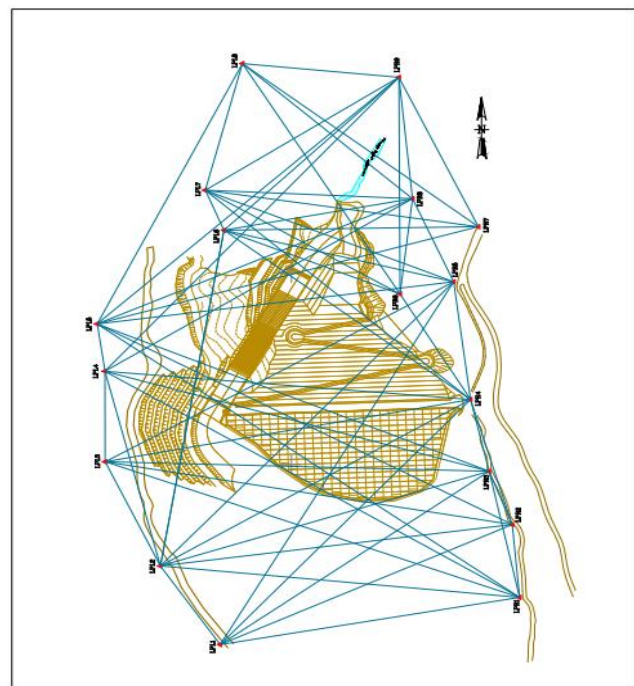
جدول ۳: حداکثر جابجایی‌های مسطحاتی و ارتفاعی در سد بالا (از سال خرداد ۱۳۹۰ تا تیر ۱۴۰۰)

Table 3: Maximum planar and elevation displacements at the upper dam (From June 1390 to July 1400)

حداکثر جابجایی ارتفاعی (mm) (Maximum height displacement)		حداکثر جابجایی مسطحاتی (mm) (Maximum planer displacement)		شبکه
نام نقاط (Point Names)	ΔZ	نام نقاط (Point Names)	D(mm)	Network
UPR3	-59.77	UPR3	128.59	سه بعدی خارج سد 3D outside the dam
UT14	-55.57	UT11	15.12	سه بعدی بدنه سد 3D dam body
UTR9	-154.33	UTR9	8080.59	سه بعدی زمین لغزشی 3D Landslide
UT22	-43.00	****	****	شبکه ترازبایی خارج و بدنه سد External and body leveling network of the dam



شکل ۷: نحوه قرارگیری پیلارهای میکروژئودزی و طراحی قرائت پیلارها در سد بالا
Fig. 7: How to place microgeodetic pillars and design pillar readings in the upper dam



شکل ۶: نحوه قرارگیری پیلارهای میکروژئودزی و طراحی قرائت پیلارها در سد پایین
Fig. 6: How to place microgeodetic pillars and design pillar readings in the lower dam

با توجه به نتایج به دست آمده به خوبی می‌توان رفتار سازه‌ها و محدوده‌های لغزشی که در مجاورت نقاط مشخص شده قرار گرفته‌اند را مورد بررسی قرار داد که البته با توجه به محدود بودن تعداد نقاط، هزینه بالا و دفعات اندازه‌گیری که بعضاً با اختلاف یک یا چند سال انجام

جدول ۴: مقادیر جابجایی نقاط بحرانی در محدوده گالی ۵

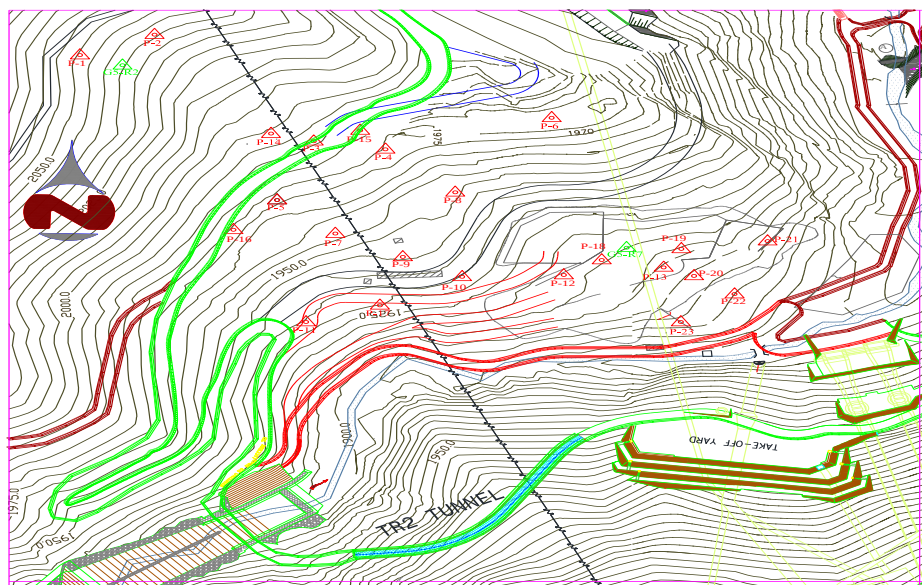
Table 4: Displacement values of critical points in the Galley 5 range

P.ID	ΔX	ΔY	ΔZ
P1	-1280.2	129.2	-1080.8
P2	-1390.6	742.2	-1148.7
P3	-1428.9	1840.4	-1140
P4	-1754.4	1965.2	-1254
P5	-1189.3	1320.4	-1046.4
P6	-30.1	42.4	-10.5
P7	-1176.1	1481.6	-975
P8	-1025	1582.9	-749.3
P9	-815	1615	-548
P10	-979.4	2012.7	-1001.5
P11	-468.9	662	-453.9
P12	-384	663	-170
P13	-299.1	331	-164
P14	-531.7	602.3	-411.7
P15	-521.6	663.3	-386.4
P16	-293.7	366.8	-404.1
P17	-174.9	350.6	-175.5
P18	-223.5	214.6	-122.7
P19	-33.8	31.9	-109.6
P20	-53.6	80.4	-68.2
P21	-2	-18	3
P22	-46.1	48.6	-67.1
P23	-92.4	65.6	-61.9

 مقادیر جابجایی نقاط بحرانی در محدوده گالی ۵
 Obtained coordinates points of land slide in lower dam on Gully 5 area in millimeters

می‌شود، نمی‌توان از آن به عنوان ابزاری برای مدیریت بحران استفاده نمود. بعد از آب‌گیری سد سیاه‌بیشه با مشاهده جابجایی در بعضی از مناطق سد که بیشتر معطوف به توده‌های سنگی و خاکی اطراف حوضچه سدها می‌باشد با احداث تارگت‌های بتنی در این مناطق که مستعد لغزش بودند، قرائت‌های ادواری به صورت ماهیانه به روش زمینی با استفاده از دوربین نقشه‌برداری از سال ۱۳۹۱ تا کنون انجام گرفته است که نتایج بدست آمده از آنها نشان‌دهنده جابجایی‌های چشمگیری در مناطق فوق‌الذکر بوده است. یکی از محدوده‌ها که به نام گالی ۵ نام‌گذاری شده است (شکل ۸)، دارای بیشترین مقدار جابجایی می‌باشد. گالی مورد نظر در انتهای مسیر رودخانه گرم رودبار می‌باشد که حاصل آب‌های زیرزمینی و بارش‌های فصلی است که در محدوده سد پایین و مجاور خروجی نیروگاه قرار گرفته است. گالی مدنظر با استفاده از ۲۳ تارگت قرائت شده است که البته با گذر زمان تعدادی از آنها از بین رفته است و با توجه به قرائت‌های انجام گرفته مقادیر جابجایی به شرح زیر می‌باشد (جدول ۴).

در محدوده سد بالا، تارگت‌های مورد مطالعه به دو ناحیه در سمت راست رودخانه (بین حوضچه سد و ارتفاعات مجاور جاده چالوس) معطوف شده است که با عناوین SM5 و SM6 شناخته می‌شوند. اهمیت این نواحی عمدتاً به دلیل عبور جاده چالوس از این منطقه است (نقشه‌های ۸ و ۹). هر دو اصطلاح SM5 و SM6 (مخفف Soil Mechanics) به محدوده‌های خاصی اشاره دارند که بر اساس ویژگی‌های مکانیک خاک، از جمله تغییرات لایه‌بندی و جنس زمین، طبقه‌بندی شده‌اند. در این پژوهش، تمرکز اصلی بر بخشی از سمت راست حوضچه سد بالا (محدوده‌های SM5 و SM6) بوده است که بیشترین میزان جابه‌جایی خاک را نشان می‌دهد

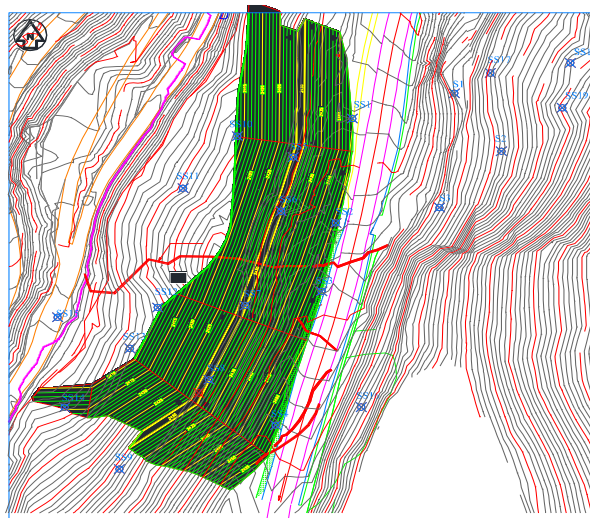


شکل ۸: نمایش محدوده گالی ۵ و چیدمان نقاط مشاهداتی

Fig. 8: Display of the Galley 5 area and the arrangement of observation points

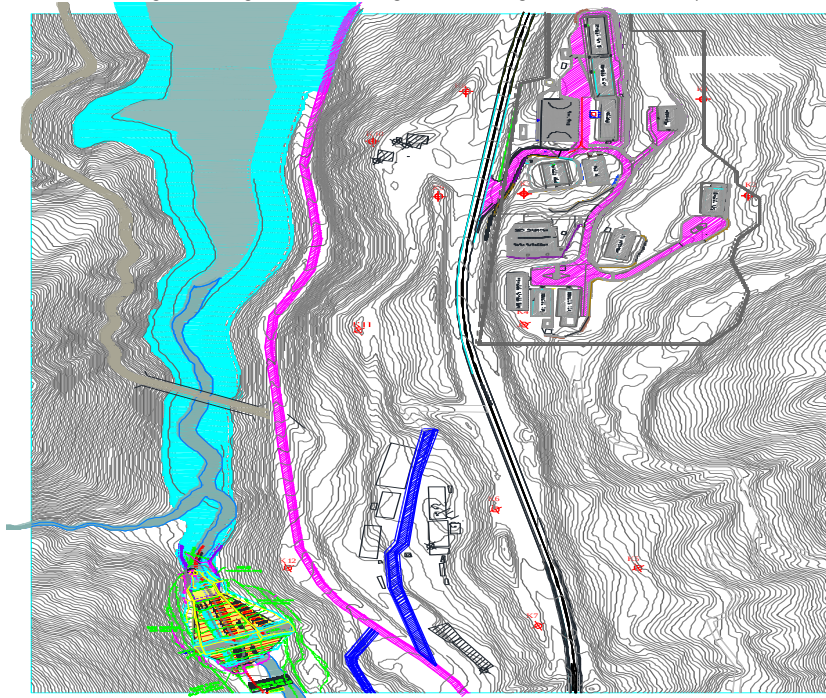
شده در محدوده و همچنین برداشت‌های زمین‌شناسی بدست آمده است. مشاهده می‌شود که زون SM5 نسبت به زون SM6 دارای تغییرات بیشتری بوده که به خاطر رانشی بودن زون SM5 می‌باشد (جدول ۵ و ۶). لازم به ذکر است در دوران ساخت در حین انتقال جاده به مسیر جدید (مسیر قدیم جاده در محدوده حوضچه سد قرار داشته است) توسط شرکت کیسون محدوده جاده جدید به دلیل رانشی بودن به روش عملیات پایدارسازی (شمع‌کوبی و تزریق) برای تحکیم و زیر سازی مسیر یاد شده و جلوگیری از رانش احتمالی صورت گرفته است. لازم به ذکر است عملیات انجام شده باعث کند شدن روند جابجایی زون یاد شده گشته لیکن عملیات صورت گرفته مشکل رانشی بودن منطقه یاد شده را به طور کامل مرتفع نمی‌کند.

هر ساله مقدار قابل توجهی از جاده آسفالت که در امتداد مناطق ذکر شده قرار دارد آسیب جدی دیده که به صورت ترک‌خوردگی‌های عرضی در سطح مسیر و همچنین نشست قابل مشاهده می‌باشد. از جمله تمهیداتی که برای مرتفع کردن مشکل فوق می‌توان نام برد، احداث شناژ با سطح مقطع بالا و عمق زیاد برای جلوگیری از حرکت توده‌های سنگی و همچنین خاکریزی از پاشنه دیواره تا تراز جاده که در حال حاضر به مرحله اجرایی نرسیده است. در ادامه توپوگرافی زون‌های یاد شده به همراه جدول مقادیر جابجایی و نحوه چینش تارگت‌های مورد نظر برای درک بهتر وضعیت موجود آورده شده است (شکل ۹ و ۱۰). همانطور که در شکل دیده می‌شود خطوط تقریباً عمودی قرمز رنگی که سطح جاده را قطع کرده است نشان‌دهنده خط شکست در محدوده مورد نظر می‌باش که از طریق قرائت ابزار نصب



شکل ۹: نمایش محدوده SM5, SM6 و چیدمان نقاط مشاهداتی

Fig. 9: Showing the SM5, SM6 range and the arrangement of observation points



شکل ۱۰: نمایش محدوده خاکک و چیدمان نقاط مشاهداتی

Fig. 10: Display of the Khakhak area and arrangement of observation points

در به وجود آمدن این جابجایی‌ها را Rapid Draw Down یا همان افت سریع مخزن عنوان نمود. توده‌های سنگی و خاکی اطراف حوضچه سد بالا و پایین زمانی که آب مخزن در تراز ماکزیمم خود قرار گرفته است چه در زمان تولید و چه در زمان پمپاژ آب در مدت زمان حدود ۴ ساعت (که البته بستگی به میزان تولید و فعال بودن هر یک از ۴ واحد نیروگاه دارد) منتقل می‌شود ولی توده‌های سنگی و خاکی زمان خیلی بیشتری نیاز دارند تا از حالت اشباع خارج شوند که همین مهم باعث سنگین شدن توده‌های فوق و در نتیجه خارج شدن از حالت پایدار شده و به نقطه بحرانی می‌رسند که با توجه به فرومولوژیک منطقه بعضاً ما شاهد جابجایی در این مناطق هستیم.

در تحقیق پیش‌رو سعی شده تا با بررسی تصاویر ماهواره‌ای مقدار جابجایی‌های صورت گرفته را اندازه‌گیری کرد تا بتوان در رفتارشناسی مناطق مورد نظر از آن به عنوان روش کارآمد و جایگزینی مناسب برای روش نقشه‌برداری زمینی استفاده کرد. لازم به ذکر است که تمامی روش‌ها و نتایج بدست آمده همگی در تأیید یکدیگر بوده و یک بینش کامل از شرایط موجود را به وجود می‌آورد. یک نکته حائز اهمیت در رابطه با تحقیق حاضر کوچک بودن منطقه‌ای است که مورد مطالعه قرار گرفته است. روش مورد استفاده برای تعیین میزان جابجایی‌ها همانطور که پیش‌تر به آن اشاره کردیم روش تداخل سنجی راداری است که با استفاده از داده‌های ماهواره‌ای سنتینل-۱ با فرمت SLC و مد IW مورد استفاده قرار می‌گیرد (جدول ۷). فرمت SLC یا همان Single look complex می‌باشد که دارای رزولوشن متفاوت در راستای رنج و آزیموت می‌باشد و برای هر پیکسل مقادیر مختلط را اندازه‌گیری می‌کند، همچنین مد IW معرف Interferometric wide Swath می‌باشد که به خاطر بهره‌گیری از تکنیک TOPSAR در اخذ داده و همچنین امکان اخذ داده در هر دو حالت پلاریزاسیون تک و دوگانه مد بسیار کاربردی برای مطالعات سطح زمین می‌باشد. مد فوق دارای رزولوشن مکانی ۵×۲۰ متر می‌باشد و متشکل از ۳ عرض پوشش برابر با ۲۵۰ کیلومتر است. داده‌های موجود قدیمی از سال ۱۳۹۱ جمع‌آوری شده‌اند بنابراین در تحقیق پیش‌رو از داده‌های ماهواره‌ای موجود و نزدیک به سال ۹۱ استفاده شده است. با توجه به متفاوت بودن شاخصه‌های خاص داده‌های ماهواره‌ای مثل شماره TRACK ماهواره که در هر دو عکس باید یکی باشد، تعیین مقادیر جابجایی به روش تداخل سنجی و همچنین مقادیر مناسب کوه‌رنسی تصاویر باید تعداد زیادی از داده‌های ماهواره‌ای چه در حالت صعودی و نزولی در تواریخ مختلف را تهیه کرد تا به زوج عکسی که مناسب می‌باشد دست پیدا کنیم.

جدول ۵: مقادیر جابجایی نقاط بحرانی در محدوده گالی SM5, SM6
Table 5: Displacement values of critical points in the SM5, SM6 Galley range

P.ID	ΔX	ΔY	ΔZ
S1	645.9	38.8	-259.3
S2	665.1	10.5	-270.1
S3	615.7	-16.9	-273.2
SS1	424.4	-39.4	99.9
SS2	427.2	-59.4	74.6
SS3	156.7	-57.8	-110.3
SS4	372.0	-174.5	110.1
SS5	250.5	-26.7	-121.9
SS6	457.1	-55.2	13.0
SS7	142.3	-60.4	-115.0
SS8	131.0	-94.3	-113.8
SS9	108.2	-135.9	-71.0
SS10	207.2	-38.9	-121.2
SS11	246.1	-29.0	-120.4
SS12	4.5	-35.4	-18.1
SS13	184.2	-86.2	-39.8
SS14	153.6	-116.2	-31.3
SS15	195.5	-86.5	-83.4
SS16	77.1	-58.2	-52.6
SS17	37.0	-59.3	-29.5
SS18	51.2	-61.2	-40.3
SS19	286.9	52.7	-137.3

جدول ۶: حداکثر جابجایی‌های مسطحانی و ارتفاعی در سد بالا محدوده خاکک
Table 6: Maximum surface and elevation displacements at the upper dam in the Khakak area

P.ID	ΔX	ΔY	ΔZ
K1	63.8	-66.0	-3.5
K2	79.7	-59.5	-14.9
K3	69.3	-60.1	11.8
K4	55.1	48.7	-64.8
K5	566.3	506.2	-313.5
K6	50.9	19.4	-84.2
K7	47.2	111.9	-102.3
K8	108.4	-94.9	86.8
K9	85.9	-48.5	10.5
K10	62.6	-54.4	6.1
K11	60.7	52.0	-51.2
K12	75.4	29.5	-96.0

با توجه به تلمبه ذخیره‌ای بودن سد سیاه‌بیشه که در ساعات اوج مصرف به تولید برق می‌پردازد و در ساعات کاهش مصرف با پمپاژ نمودن آب به سد بالا و ذخیره آن برای تولید مجدد می‌توان تأثیرگذارترین عامل

جدول ۷: مشخصات ماهواره و داده‌های ماهواره‌ای مورد استفاده

Table 7: Satellite specifications and satellite data used

نام ماهواره Satellite name	فرمت Format	مد و تکنیک بهره‌برداری از داده‌ها Mode	رزولوشن مکانی Spatial resolution	تعداد عرض پوششی Number of cover widths	طول هر عرض Length of each width
سنتینل-۱	SLC	IW و تکنیک TOPSAR	۵×۲۰	۳	۲۵۰ کیلومتر

جدول ۹: مقایسه مقادیر جابجایی نقطه‌ای و پهنه‌ای نقاط بحرانی در محدوده گالی سد بالا به میلیمتر

Table 8: Comparison of point and area displacement values of critical points in the upper dam's Gully area in millimeters

حدود Region	شماره نقاط Point number	تغییرات نقطه‌ای Point changes	تغییرات پهنه‌ای Zonal changes
بالای جاده چالوس Above Chalus Road	SS19	0.20	0.06 - 0.14
	SS18	0.06	
	SS17	0.05	
	SS16	0.07	
	S1	0.19	
کنار جاده چالوس Chalus Roadside	S2	0.14	0.13 - 0.17
	S3	0.14	
	SS1	0.30	
	SS2	0.27	
	SS3	0.05	
پایین جاده روی برم و ترانشه Down the road on the edge and the trench	SS4	0.15	0.08 - 0.14
	SS5	0.11	
	SS6	0.12	
	SS7	0.05	
	SS8	0.13	
جنب حوضچه سد Next to the dam pond	SS9	0.18	0.06 - 0.14
	SS10	0.09	
	SS11	0.12	
	SS12	0.04	
	SS13	0.19	
	SS14	0.17	
	SS15	0.07	

جدول ۱۰: مقایسه مقادیر جابجایی نقطه‌ای و پهنه‌ای نقاط بحرانی در محدوده خاکک به میلیمتر

Table 9: Comparison of point and area displacement values of critical points in the Khakak area in millimeters

حدود Region	شماره نقاط Point number	تغییرات نقطه‌ای Point changes	تغییرات پهنه‌ای Zonal changes
بالای جاده چالوس Above Chalus Road	K1	0.06	0.09 - 0.14
	K2	0.07	
	K3	0.09	
	K4	0.07	
	K5	0.50	
کنار جاده چالوس Chalus Roadside	K8	0.12	0.11 - 0.15
	K9	0.09	
	K6	0.03	
	K7	0.11	
	K10	0.07	
جنب حوضچه سد Next to the dam pond	K11	0.07	0.08 - 0.15
	K12	0.08	

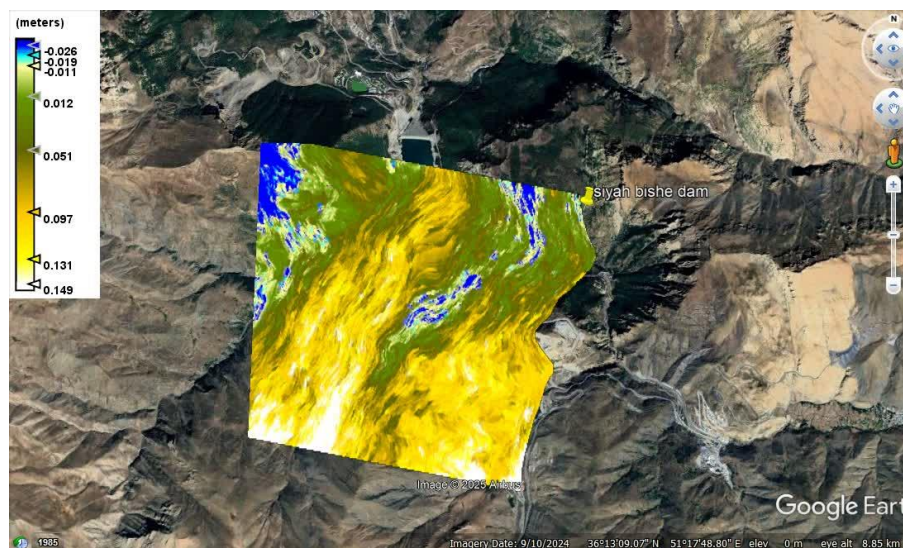
لازم به ذکر است یکی از مشکلات اساسی در انجام این روش در دسترس نبودن داده‌های ماهواره‌ای برای هر زمان دلخواه با توجه به محدودیت‌های زمانی برای دسترسی به داده‌های قدیمی می‌باشد. با توجه به این مهم که داده‌های قرائت شده در محدوده سد سیاه‌بیشه از تیر ماه سال ۱۳۹۱ در دسترس می‌باشد، داده‌های ماهواره‌ای موجود از سال ۲۰۱۵ در دسترس بوده به همین دلیل در تحقیق حاضر داده‌های موجود برای بررسی و مقایسه نیز از سال ۱۳۹۴ مورد استفاده قرار گرفته تا بتوان نتیجه‌گیری همسان‌تری نسبت به نتایج حاصله بدست آورد. داده‌های ماهواره‌ای مورد استفاده در این تحقیق از سایت <https://scihub.copernicus.eu/> دانلود و ذخیره‌سازی داده‌های ماهواره سنتینل-۱ می‌باشد. برای تحلیل داده‌های ماهواره‌ای از نرم‌افزار SNAP استفاده شده که مخفف Sentinel application platform می‌باشد. نقشه جابه‌جایی تولید شده در محدوده سد شکل ۱۱ نمایش داده شده است.

در ادامه نتایج محاسبه جابه‌جایی با روش تداخل‌سنجی راداری (تغییرات پهنه‌ای) و روش نقطه در نواحی مختلف سد آورده شده است:

جدول ۸: مقایسه مقادیر جابجایی نقطه‌ای و پهنه‌ای نقاط بحرانی در محدوده گالی ۵ به میلیمتر

Table 7: Comparison of point displacement and area values of critical points in the Gully 5 range in millimeters

حدود Region	شماره نقاط Point number	تغییرات نقطه‌ای Point changes	تغییرات پهنه‌ای Zonal changes
بالای جاده Above the road	P1	0.37	0.097 - 0.15
	P2	0.16	
	P14	0.41	
طول جاده دسترسی نیروگاه Length of power plant access road	P15	0.44	0.052 - 0.09
	P3	0.39	
	P5	0.31	
پایین جاده دسترسی نیروگاه Length of power plant access road	P16	0.25	0.065 - 0.09
	P7	0.05	
	P8	0.26	
محدوده گالی جنب مسیر رودخانه گرم رودبار Gully area next to the Garm Rudbar River route	P6	0.03	0.093 - 0.13
	P11	0.16	
	P9	تخریب شده	
روی گالی ۵ On Gully 5	P17	تخریب شده	0.035 - 0.07
	P10	0.25	
	P12	تخریب شده	
روی گالی ۵ جنب حوضچه سد On Gully 5 next to the dam pond	P18	0.21	0.07 - 0.12
	P19	0.03	
	P21	تخریب شده	
	P20	0.07	
	P22	0.05	
	P23	0.09	
	P13	0.30	



شکل ۱۱: نمایش میزان جابجایی نقاط با روش تداخل سنجی راداری در محیط گوگل ارث
Fig. 11: Displaying the amount of point displacement using radar interferometry in Google Earth

تدقیق شده با نزدیک ترین تقریب به واقعیت را برای بررسی تغییرات بوجود آمده برای مدیریت بحران و جلوگیری از اتفاقات آتی ارائه دهد. به صورت کلی مزایا و معایب روش تداخل سنجی راداری را می توان به صورت زیر جمع بندی کرد:

مزایا: تداخل سنجی راداری به عنوان یک روش پیشرفته در سنجش از دور، از پوشش گسترده و یکپارچه (حتی در مناطق صعب العبور یا فاقد دسترسی مستقیم) بهره می برد و امکان اندازه گیری جابه جایی های میلی متری سطح زمین را با دقت بالا فراهم می کند. این روش به دلیل استفاده از امواج راداری، مستقل از نور خورشید است و در شرایط ابری، شب یا حتی زیر پوشش گیاهی محدود نیز قابل اجراست. داده های ماهواره ای رایگان مانند سنیتل-۱ و امکان پایش بلندمدت تغییرات زمین، آن را به ابزاری مقرون به صرفه برای مطالعات فرونشست، زمین لرزه و فعالیت های آتشفشانی تبدیل کرده است. افزون بر این، ادغام روش تداخل سنجی راداری با فناوری هایی مانند GPS یا لیدار می تواند دقت نتایج را بهبود بخشد و محدودیت های آن را جبران کند.

معایب و چالش ها: از جمله محدودیت های اصلی روش تداخل سنجی راداری، خطای بازیافتی فاز در مناطق با توپوگرافی پیچیده (مانند کوهستان ها) است که ناشی از تغییرات ناگهانی ارتفاع و پدیده های «سایه راداری» یا «برهم نهی» می باشد. همچنین، دسترسی محدود به داده های تاریخی هماهنگ (به ویژه از ماهواره های قدیمی) و ناتوانی در رصد تغییرات سریع (کمتر از یک سال) مانند رانش های ناگهانی، از چالش های کلیدی هستند. در مناطق با پوشش گیاهی متراکم، حرکت برگ ها یا تاج درختان موجب کاهش همدوسی و خطا در اندازه گیری می شود. علاوه بر این، بررسی محدوده های بسیار کوچک به دلیل رزولوشن فضایی محدود تصاویر راداری و اثرات مخرب تغییرات رطوبت اتمسفر (به ویژه در مناطق مرطوب) بر دقت نتایج، از دیگر نقاط ضعف این روش محسوب می گردد.

با توجه به خروجی داده های ماهواره ای پردازش شده و نتایج بدست آمده و مقایسه آنها با نتایج روش های قدیمی که تا کنون برای رفتارنگاری مناطق بحرانی در سد سیاه بیشه انجام گرفته است، بدیهی است که می توان از روش تداخل سنجی راداری برای نمایش و بررسی میزان تغییرات جابجایی و تا حدی ارتفاعی در هر منطقه بسته به نوع عواملی که در بوجود آمدن این تغییرات تأثیرگذار است اعم از تغییر در شکل طبیعی زمین و خارج نمودن آن از حالت پایدار اولیه، بهره برداری از سدها و یا هر گونه سازه، حرکت گسل ها بر روی یکدیگر و همچنین عواملی مانند زلزله، تغییرات مسطحاتی و ارتفاعی به دلیل رانش زمین، هر نوع بهره برداری از منطقه برای مقاصد خاص استفاده نمود. تحقیق حاضر نمایانگر این مهم است که می توان در بازه های زمانی مختلف در صورت وجود زوج تصویر مناسب مناطق مختلف را رفتارسنجی نموده و میزان تغییرات بوجود آمده را با دقت مناسبی بدست آورد. لازم به ذکر است که به دلیل ماهیت تصاویر ماهواره ای هر چقدر تصاویر از مناطق همجوار تهیه شود نسبت به مناطق کوهستانی نتایج بدست آمده دقیق تر می باشد؛ زیرا در کوهستانی به دلیل وجود اختلاف ارتفاع زیاد در فواصل کم، اختلاف ارتفاع بدست آمده ناشی از خطای بازیافتی فاز می باشد. همچنین نتایج بدست آمده نمایانگر این است که محدوده های که با فاصله بیشتری از حوضچه سدها قرار دارند. همچنین محدوده های که در تردد روزانه مسیر اصلی جاده چالوس نیستند مخاطره و تهدید اندک تری شامل حالشان می شو و به سبب تداوم شرایط فوق در سد تلمبه ذخیره ای سیاه بیشه برای تداوم پایش و رفتارنگاری منطقه می توان از روش تداخل سنجی راداری استفاده نمود، و امکان مناسبی برای سنجش دقت نتایج حاصله از این روش و بهینه سازی آن در عرصه سدسازی فراهم آورد. روش تداخل سنجی راداری در مدت زمان کم و کمترین هزینه نسبت به روش های دیگر قادر است به بهترین شکل ممکن و دقت کافی نمایشی از میزان تغییرات بوجود آمده در هر منطقه را ارائه دهد و یک بینش کلی

نتیجه‌گیری

Measurements: Applications to "La Cohilla" Dam (Cantabria, Spain). In *Geodetic Deformation Monitoring: From Geophysical to Engineering Roles: IAG Symposium Jaén, Spain March 17–19, 2005 2006* (pp. 270-276). Springer Berlin Heidelberg. https://doi.org/10.1007/978-3-540-38596-7_34.

[4] Aldin Sadrnejad A, Nikkhah M, Aghdam MM, Tehrani ZS. Internal damage assessment of concrete arch dam by multi-laminate model upon recorded micro-geodesy data. presented at 85th Annual Meeting of International Commission on Large Dams, Prague, Czech Republic, 2017.

[5] Maltese A, Pipitone C, Dardanelli G, Capodici F, Muller JP. Toward a comprehensive dam monitoring: On-site and remote-retrieved forcing factors and resulting displacements (GNSS and PS-InSAR). *Remote Sensing*. 2021 Apr 16;13(8):1543. <https://doi.org/10.3390/rs13081543>.

[6] Aswathi J, Kumar RB, Oommen T, Bouali E, Sajinkumar K. InSAR as a tool for monitoring hydropower projects: A review. *Energy Geoscience*. 2022;3(2):160-71. <https://doi.org/10.1016/j.engeos.2021.12.007>.

[7] Yang K, Yan L, Huang G, Chen C, Wu Z. Monitoring building deformation with InSAR: Experiments and validation. *Sensors*. 2016;16(12):2182. <https://doi.org/10.3390/s16122182>.

[8] Cigna F, Esquivel Ramírez R, Tapete D. Accuracy of Sentinel-1 PSI and SBAS InSAR displacement velocities against GNSS and geodetic leveling monitoring data. *Remote Sensing*. 2021;13(23):4800. <https://doi.org/10.3390/rs13234800>.

[9] Frattini P, Crosta GB, Rossini M, Allievi J. Activity and kinematic behaviour of deep-seated landslides from PS-InSAR displacement rate measurements. *Landslides*. 2018;15:1053-70. <https://doi.org/10.1007/s10346-017-0940-6>.

[10] Bozzano F, Cipriani I, Mazzanti P, Prestininzi A. Displacement patterns of a landslide affected by human activities: insights from ground-based InSAR monitoring. *Natural hazards*. 2011;59(3):1377-96. <https://doi.org/10.1007/s11069-011-9840-6>.

[11] Sabeti H, Motagh M, Sharifi M A, Akbari B, Akbarimehr M, Fard D. Determination of the displacement rate of the Masouleh landslide for management of landslide risk by Radar Interferometry. *Iranian Journal of Watershed Management Science and Engineering*, 2019; 13 (44) :103-113. [In persian]

[12] M. Ghadimi, "Monitoring of the changes in the Taleqan dam's body by using InSAR," *Journal of Range and Watershed Management*, 72 3 (2019): 819-829, doi: 10.22059/jrwm.2019.287262.1409. In persian.

[13] Hashemi Fard, A., kardavani, P., Asadian, F. Investigating the Amount of Ground Surface Displacement in the Gotvand Olya Dam Using Differential Radar Interference Technique. *Hydrogeomorphology*, 2018; 5(15): 37-53. [In persian]

[14] Akbari M. Monitoring land subsidence due to geological and water resources factors using Differential Radar Interferometry method (Case Study: Arak city). *Journal of Water*

بررسی جابجایی‌های مسطحاتی و ارتفاعی در سد تلمبه ذخیره‌های سیاه‌بیشه با استفاده از روش تداخل‌سنجی راداری (InSAR) و روش‌های نقشه‌برداری زمینی نشان داد که ناپایداری‌های قابل توجهی در مناطق مختلف سد، از جمله گالی ۵ (با فرونشست تا ۶۰ سانتیمتر) و سد بالا (با جابجایی‌های بیش از ۳۱۳.۵- میلیمتر در ارتفاع) وجود دارد. این جابجایی‌ها ناشی از عوامل طبیعی مثل حرکت گسل‌ها و همچنین نحوه بهره‌برداری از سد (که باعث اشباع‌شدگی و تخلیه سریع توده‌های خاکی و سنگی می‌شود) و فعالیت‌های عمرانی و راه‌سازی در محدوده حوضچه‌های سد می‌باشد. روش تداخل‌سنجی راداری با شناسایی تغییرات پهنه‌ای تا ۰.۱۳- متر در گالی ۵، به عنوان ابزاری کم هزینه و کارآمد در این حوزه تأیید شد، هرچند چالش‌هایی مانند توپوگرافی کوهستانی و محدودیت داده‌های قدیمی دقت آن را تحت تأثیر قرار می‌دهد. پیشنهادات کلیدی شامل ترکیب تداخل‌سنجی راداری با روش‌های پیشرفته نقشه‌برداری زمینی، ایجاد آرشیو داده‌های ماهواره‌ای، و پایش ادواری مناطق بحرانی برای مدیریت ریسک است. این مطالعه نقش حیاتی تداخل‌سنجی راداری را در پایش مستمر و کاهش خسارات ناشی از زمین‌لغزش‌ها در پروژه‌های مشابه را برجسته می‌کند.

مشارکت نویسندگان

میزان مشارکت نویسندگان در نگارش مقاله برابر می‌باشد.

تشکر و قدردانی

نویسندگان از آژانس فضایی اروپا به منظور در دسترس قرار دادن رایگان تصاویر سنجنده سنیتل-۱ و کلیه اعضای تیم اجرایی عملیات نقشه‌برداری سد سیاه‌بیشه تشکر و قدردانی می‌نمایند.

تعارض منافع

«هیچ‌گونه تعارض منافع توسط نویسندگان بیان نشده است.»

منابع و مآخذ

[1] Moeini, H., Katibeh, H., Golaabatoonch, I. Upper Reservoir Seepage Analysis of Azad Dam Pumped Storage Power Station and Selecting the Best Sealing Method. *Amirkabir Journal of Civil Engineering*, 2012; 43(2): 35-41. [In persian] doi: 10.22060/ceej.2012.138.

[2] Entezari Amir, Urmiaei Ali, Qayyoumian Jafar, Bagheri Hamid, Haji Hassani Hamidreza. Landslide hazard zoning in the upper Siah Bisheh dam catchment area. Presented at the 2005 Iranian Geological Society Conference. Available from: [In persian]

[3] Ferrer Torío R, Piña Patón B, De Luis Ruiz JM, Ruiz Bedia ML, Castillo López E. Geodetic Inspections Using Distance

[26] Yang J, Li C. Assimilation of D-InSAR snow depth data by an ensemble Kalman filter. *Arabian Journal of Geosciences*. 2021;14:1-14. <https://doi.org/10.1007/s12517-021-06699-y>.

[27] Nobile A. Volcano deformation in different tectonic settings using InSAR and modeling. Ph.D thesis, Università degli Studi Roma Tre Dipartimento di scienze, 2013.

[28] Fomelis M, Blasco JMD, Desnos Y-L, Engdahl M, Fernández D, Veci L, et al., editors. ESA SNAP-StaMPS integrated processing for Sentinel-1 persistent scatterer interferometry. IGARSS 2018-2018 IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium; 2018. <https://doi.org/10.1109/IGARSS.2018.8519545>.

[29] Das A, Agrawal R, Mohan S. Topographic correction of ALOS-PALSAR images using InSAR-derived DEM. *Geocarto International*. 2015;30(2):145-53. <https://doi.org/10.1080/10106049.2014.883436>.

[30] Pu L, Zhang X, Zhou Z, Shi J, Wei S, Zhou Y. A phase filtering method with scale recurrent networks for InSAR. *Remote Sensing*. 2020;12(20):3453. <https://doi.org/10.3390/rs12203453>.

[31] Yu H, Lan Y, Yuan Z, Xu J, Lee H. Phase unwrapping in InSAR: A review. *IEEE Geoscience and Remote Sensing Magazine*. 2019;7(1):40-58. <https://doi.org/10.1109/MGRS.2018.2873644>.

معرفی نویسندگان

AUTHOR(S) BIOSKETCHES



علی بیات دارای مدرک کارشناسی ارشد مهندسی نقشهبرداری (گرایش ژئودزی) از دانشگاه تهران شمال، ایران است. وی از سال ۱۴۰۳ به عنوان سرپرست نقشهبرداری در تصفیه خانه ششم آب تهران مشغول به کار است. وی

۱۴ سال سابقه کار در پروژه های سدسازی از جمله سد گتوند علیا، سد رودبار لرستان و سد تلمیه ذخیره ای سیاهپیشه را در کارنامه خود دارد.

Bayat, A. Master of Geodesy, Department of Civil and Surveying Engineering, North Tehran Branch, Islamic Azad University, Tehran, 1651153311, Iran

✉ ali.bayat.799@gmail.com



محمد رضا سیف دارای مدرک دکتری مهندسی نقشهبرداری (گرایش ژئودزی) از دانشگاه تهران است. وی هم اکنون استادیار گروه نقشهبرداری دانشگاه جامع امام حسین (ع) در تهران است. ایشان تا کنون موفق به چاپ بیش از ۲۰ مقاله

علمی در مجلات و همایش های معتبر شده است و زمینه های تحقیقاتی مورد علاقه ایشان ژئودزی، سامانه های GNSS، تعیین مدار ماهواره، سنجش از دور راداری و مباحث تداخل سنجی است.

and Soil Resources Conservation. 2021;10(3):115-32. [In persian]

[15] Roustaei, S., Roustaei, M., Sharifikia, M., Yarahmadi, J. Application of differential synthetic aperture radar interferometry (D-InSAR) for detection and monitoring of landslides, Case study: Garm Chay Watershed. *Watershed Engineering and Management*, 2013; 5(3): 190-198. doi: 10.22092/ijwmse.2013.101841. In persian.

[16] Shirani, K., Khosh Baten, M. The study and monitoring of an active landslide using differential interferometry synthetic aperture RADAR (Case study: Noghol landslide, Semirom). *Quaternary Journal of Iran*, 2016; 2(1): 53-65. doi: 10.22034/irqua.2016.701900. In persian.

[17] Jamal SG, Gholami H, Rajabi M, Mobini MH. Effect of the Construction of Mamloo Dam on Land Subsidence in Varamin Plain. *Human & Environment*. 2022;20(2):171-85. [In persian]

[18] Javadi, P., Ghorbani, Z. Combining GPS and InSAR Data to Improve the Accuracy of Dams Displacement Monitoring (Case Study: Givi Dam - Iran). *New Approaches in Civil Engineering*, 2020; 4(3): 42-57. [In persian] doi: 10.30469/jnace.2020.128663.

[19] Wang Q, Huang Q, He N, He B, Wang Z, Wang Y. Displacement monitoring of upper Atbara dam based on time series InSAR. *Survey Review*. 2020;52(375):485-96. <https://doi.org/10.1080/00396265.2019.1643529>.

[20] Bayik C, Abdikan S, Arıkan M. Long term displacement observation of the Atatürk Dam, Turkey by multi-temporal InSAR analysis. *Acta Astronautica*. 2021;189:483-91. <https://doi.org/10.1016/j.actaastro.2021.09.022>.

[21] Lazecký M, Hlaváčová I, Martinovič J, Ruiz-Armenteros AM. Accuracy of Sentinel-1 interferometry monitoring system based on topography-free phase images. *Procedia computer science*. 2018;138:310-7. <https://doi.org/10.1016/j.procs.2018.10.044>.

[22] Tzouvaras M, Danezis C, Hadjimitsis DG. Small scale landslide detection using Sentinel-1 interferometric SAR coherence. *Remote Sensing*. 2020;12(10):1560. <https://doi.org/10.3390/rs12101560>.

[23] Mantovani M, Bossi G, Marcato G, Schenato L, Tedesco G, Titti G, et al. New perspectives in landslide displacement detection using sentinel-1 datasets. *Remote sensing*. 2019;11(18):2135. <https://doi.org/10.3390/rs11182135>.

[24] Yagüe-Martínez N, Prats-Iraola P, Gonzalez FR, Brcic R, Shau R, Geudtner D, et al. Interferometric processing of Sentinel-1 TOPS data. *IEEE transactions on geoscience and remote sensing*. 2016;54(4):2220-34. <https://doi.org/10.1109/TGRS.2015.2497902>.

[25] Keshavarz, S. R., Bayati Eshkaftaki, J., Almodaresi, S. A. Spatial analysis of the amount of landslides using radar interferometric technique in order to reduce hazards (Study area: Sarbaz area in Isfahan province). *Environmental Management Hazards*, 2022; 9(3): 271-288. [In persian] doi: 10.22059/jhsci.2023.347893.741.

کنون موفق به چاپ بیش از ۵۰ مقاله علمی در مجلات و همایش‌های معتبر داخلی و بین‌المللی شده است و زمینه‌های تحقیقاتی مورد علاقه ایشان سنجش از دور، پردازش تصویر، یادگیری ماشین و هوش مصنوعی، مطالعات محیط زیست و تغییر اقلیم است.

Ph.D of Remote sensing engineering, Researcher, Imam Hossein University, Tehran, 1698715461, Iran

✉ b_asghari@ihu.ac.ir

Ph.D of Geodesy, Assistant professor, Imam Hossein University, Tehran, 1698715461, Iran

✉ mrseyf@ihu.ac.ir



بهنام اصغری بیرامی دارای مدرک دکتری مهندسی نقشه‌برداری (گرایش سنجش از دور) از دانشگاه خواجه نصیرالدین طوسی است. وی هم‌اکنون پژوهشگر خبره گروه نقشه‌برداری دانشگاه جامع امام حسین (ع) در تهران است. ایشان تا

Citation (Vancouver): Bayat A, Seif M.R, Beirami B.A. [Monitoring landslide areas in the Siah Bisheh Dam Project using Surveying and radar interferometry]. *J. RS. GEOINF. RES.* 2025; 3(1): 85-101

 <https://10.22061/jrsgr.2025.11937.1098>



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

Photogrammetry, modern technology in cultural heritage documentation: A systematic review of related research in Iran

A.M. Moazezi Mehr-e-Tehran

Conservation of Architectural Heritage Department, Faculty of Architecture and Urbanism, Imam Khomeini International University, Qazvin, Iran.

ABSTRACT

Received: 19 December 2024
 Reviewed: 11 February 2025
 Revised: 04 March 2025
 Accepted: 02 June 2025

KEYWORDS:

Photogrammetry
 Systematic Review
 Documentation
 Modern Technology
 Cultural Heritage

* Corresponding author

✉ a.moazezi@arc.ikiu.ac.ir

☎ (+98912) 3936224

Background and Objectives: The first step in cultural heritage documentation is the preparation of accurate maps of the current state of the artifacts. Worldwide scientific advances have made it possible for heritage conservation to abandon traditional collection methods and use modern tools and methods. Utilizing them significantly reduces the documentation time and increases the accuracy and quality of this process. Among these methods that have received significant attention worldwide in recent years is photogrammetry. In Iran, photogrammetry has been considered in published articles for the past four decades in heritage documentation. However, the development process and attention in this area have not been studied. The brief and initial survey also does not show serious and extensive attention to this new technology in heritage and documentation. Accordingly, the present article seeks to draw an image of the status of related articles. Achieving this goal will make it possible to verify the assumption of the insignificance of research attention to the subject of heritage photogrammetry, and by systematically formulating the structural and content characteristics of these studies, it will be possible to identify research gaps in this field and guide future studies.

Methods: The present study is a secondary study, and its philosophical paradigm is interpretive. The research approach is qualitative, and the data collection method is text-based. Accordingly, 56 articles were selected from the 1990s (when the first relevant article was published in Iran) to the second half of 2024. Based on the systematic review method and qualitative meta-analysis, these articles were analyzed from the perspective of their structural and content characteristics.

Findings: The study shows that, in terms of content, Articles shifted from focusing on introducing the method and explaining the importance of digital documentation in the early years, today has on its agenda the development of a process of utilizing the photogrammetric method in heritage documentation to improve the accuracy and validity of information. On the other hand, although the method applied to account for a more significant share of the scale of architectural buildings and their related elements, attention to digital documentation of architectural complexes, ancient sites, and urban and rural settlements has also increased. From a structural perspective, a significant increase in articles is noticeable, especially in the last decade (84 percent of all articles). Similarly, civil engineering specialists have made the main contribution to the production of these studies (up to 56 percent of articles). Of course, in recent years, the participation of restoration, architectural, and archaeological experts in producing these articles has increased, which shows a desire and need for more serious attention to this topic among this group of experts.

Conclusion: However, scientific Articles in Iran on the subject of heritage documentation with new technologies such as photogrammetry are not impressive in terms of quantity or quality. The publication of the majority of these studies in national conferences (up to 68%) and the inconsequential contribution of restoration experts in writing these Articles also indicate that the subject is growing in cultural heritage and conservation and has no scientific reliability. While considering the unique benefits of this method, including no need for physical contact with historical structures in the harvesting process, the speed of data mining, and access to the expected results of documentation, which can be archived, updated, and post-processed, it is necessary to direct research trends to the important and less-attention subject of digital documentation of heritage with the help of methods such as photogrammetry, to provide the

possibility of optimal and principled protection of our country's cultural heritage and its transmission to future generations.



NUMBER OF REFERENCES

48



NUMBER OF FIGURES

3



NUMBER OF TABLES

4

مقاله پژوهشی

فتوگرامتری، فناوری نوین در مستندنگاری میراث فرهنگی؛ مروری نظام‌مند بر پژوهش‌های مرتبط در ایران

امیرمحمد معززی مهرطهران

گروه مرمت و احیاء بناهای تاریخی، دانشکده معماری و شهرسازی، دانشگاه بین‌المللی امام خمینی (ره)، قزوین، ایران

چکیده

پیشینه و اهداف: در مستندنگاری میراث فرهنگی، نخستین گام، تهیه نقشه‌های دقیق از وضعیت فعلی آثار است. پیشرفت‌های گسترده در علوم مختلف، این امکان را برای حوزه حفاظت از میراث فرهنگی فراهم کرده‌است تا با استفاده از ابزارها و روش‌های نوین سایر علوم مرتبط، روش‌های سنتی برداشت را کنار گذاشته و با بهره‌گیری از آنها علاوه بر کاهش معنادار زمان مستندنگاری، دقت و کیفیت این فرایند را نیز افزایش دهد. از جمله این روش‌ها که طی سال‌های اخیر در سطح جهانی توجه معناداری به آن شده، فتوگرامتری است. در ایران از چهاردهه پیش در مقالات انتشار یافته به روش فتوگرامتری در مستندنگاری میراث توجه شده‌است. اما روند توسعه و تعمیق در این موضوع در این بازه زمانی نامشخص است. بررسی اجمالی و اولیه صورت گرفته نیز توجه جدی و گسترده به این فناوری نوین در حوزه میراث و امر مستندنگاری را نشان نمی‌دهد. براین اساس مقاله حاضر در نتیجه مذاقه بر پژوهش‌های انجام شده تاکنون، به دنبال ترسیم نیم‌رخ از وضعیت مقالات مرتبط است. دستیابی به این هدف، این امکان را فراهم می‌کند تا ضمن راستی‌آزمایی فرض ناچیز بودن توجه پژوهشی به موضوع فتوگرامتری میراث، با صورت‌بندی منظمی از ویژگی‌های ساختاری و محتوایی این مطالعات، خلاءهای پژوهشی در این حوزه شناسایی و هدایت مطالعات آتی ممکن شود.

روش‌ها: پژوهش حاضر از نوع مطالعات ثانویه بوده و پارادایم فلسفی حاکم بر آن تفسیری است. رویکرد پژوهش نیز کیفی و روش گردآوری داده‌ها در آن از نوع متن‌پایه است. بر همین اساس ۵۶ مقاله، در بازه زمانی دهه ۷۰ شمسی (که اولین مقاله مرتبط انتشار یافته است) تا نیمه دوم سال ۱۴۰۳ انتخاب شد و با اتکا به روش مرور نظام‌مند و فراتحلیل کیفی، این مقالات از دو منظر ویژگی‌های ساختاری و محتوایی‌شان، مورد تحلیل قرار گرفت.

یافته‌ها: بررسی صورت‌گرفته، از نظر محتوایی نشان می‌دهد، پژوهش‌ها با گذر از تمرکز صرف بر معرفی روش و تبیین اهمیت مستندنگاری دیجیتال در سال‌های نخست، امروزه توسعه فرایندی بهره‌برداری از روش فتوگرامتری در مستندنگاری میراث را به‌منظور بهبود دقت و صحت اطلاعات در دستور کار دارند. از سویی دیگر گرچه کماکان استفاده از این روش در مقیاس بناهای معماری و عناصر وابسته به آن سهم بیشتری را به خود اختصاص می‌دهد اما، توجه به مستندنگاری رقومی مجموعه‌های معماری، محوطه‌های باستانی و سکونت‌گاه‌های شهری و روستایی نیز رو به فزونی گذاشته است. از منظر ساختاری، افزایش معنادار تعداد مقالات به‌خصوص در یک دهه اخیر (۸۴ درصد کل مقالات) قابل ملاحظه است. همچنان‌که سهم اصلی در تولید این پژوهش‌ها (بالغ بر ۵۶ درصد مقالات) نیز با متخصصان عمران بوده است. البته که در سال‌های اخیر مشارکت متخصصان مرمت، معماری و باستان‌شناسی در تولید این مقالات افزایش یافته است و از بروز تمایل و ضرورت توجه جدی‌تر به این مقوله در میان این گروه از متخصصان حکایت می‌کند.

نتیجه‌گیری: با این وجود تولیدات علمی در ایران در موضوع مستندنگاری میراث با فناوری‌های نوینی همچون فتوگرامتری چه از نظر کمی و چه کیفی چشم‌گیر نیست. انتشار اکثریت این پژوهش‌ها در همایش‌ها و کنفرانس‌های داخلی (بالغ بر ۶۸ درصد)، و سهم بسیار اندک متخصصان مرمت در پیشبرد این پژوهش‌ها نیز بر در حال رشد بودن

تاریخ دریافت: ۲۹ آذر ۱۴۰۳
تاریخ داوری: ۲۳ بهمن ۱۴۰۳
تاریخ اصلاح: ۱۴ اسفند ۱۴۰۳
تاریخ پذیرش: ۱۲ خرداد ۱۴۰۴

واژگان کلیدی:

فتوگرامتری
مرور نظام‌مند
مستندنگاری
فناوری نوین
میراث فرهنگی

* نویسنده مسئول

✉ a.moazezi@arc.ikiu.ac.ir

۰۹۱۲۰۳۹۳۶۲۲۴ ③

موضوع و عدم وجود استحکام علمی آن در عرصه میراث فرهنگی و امر حفاظت دلالت می‌کند. درحالی‌که با توجه به فواید منحصربه‌فرد این روش از جمله عدم نیاز به تماس فیزیکی با ساختارهای تاریخی در فرایند برداشت، سرعت داده‌کاوی و دسترسی به نتایج مورد انتظار مستندنگاری، که قابلیت بایگانی، به‌روز رسانی و پردازش‌های پسینی دارند؛ ضروری است تا گرایش‌های پژوهشی به موضوع با اهمیت و کمتر توجه‌شده مستندنگاری دیجیتال میراث با کمک روش‌هایی چون فتوگرامتری، جهت‌دهی شوند تا امکان حفاظت بهینه و اصولی از میراث فرهنگی کشورمان و انتقال آن به نسل‌های آینده مهیا شود.

مقدمه

میراث فرهنگی هر کشوری از اساسی‌ترین ارکان تحکیم هویت و خودباوری ملی آن کشور است [۱]. این میراث گران‌بها در دوره حیات خود همواره با تهدیدها و مخاطرات طبیعی و انسانی مختلفی روبه‌روست؛ مخاطراتی که آسیب‌های اساسی به میراث وارد کرده و در برخی موارد به از بین رفتن کامل آنها منجر شده است.

عدم وجود مستندات دقیق از این آثار، امکان مرمت یا در شرایطی بازسازی آنها را از بین می‌برد، این درحالی است که وجود مستندات حتی پس از تخریب، فرصت‌های مناسبی را برای اتخاذ رویکرد مواجهه در اختیار قرار می‌دهد [۲، ۳]. از این‌رو نباید از اهمیت و ضرورت مستندسازی به‌عنوان مرحله‌ای بسیار مهم در حفاظت از میراث غافل شد [۴-۶]. نخستین گام در این مسیر، تهیه نقشه‌های دقیق از وضعیت فعلی آثار است [۷]. این کار به روش‌ها و ابزارهای پیشرفته نیاز دارد تا امکان انجام برداشت‌های دقیق و همچنین گردآوری اطلاعات مورد نیاز به‌منظور مدیریت و پایش فراهم آید [۱]. چرا که روش‌های سنتی و متداول مستندسازی به علت هزینه بالا، زمان‌بر بودن، دشواری و خسته‌کننده بودن روش‌ها، محدودیت ثبت تمامی داده‌های مربوط به اثر، ناتوانی در برابر فرم‌های پیچیده، منحنی و پر جزئیات، نیاز به برداشت مجدد در صورت تعریف مسئله جدید، نیاز به نصب تجهیزات اضافی جهت فراهم‌سازی اجرای مستندسازی از قبیل نسبت داربست، تخریب اثر به علت تماس مستقیم فیزیکی، استفاده از نیروی انسانی اضافی و موارد مشابه دیگر با محدودیت‌هایی مواجه است [۸، ۹].

در دهه‌های اخیر پیشرفت‌های بسیار در علوم مختلف، این امکان را در حوزه حفاظت از میراث فرهنگی فراهم کرده که با شناسایی ابزارها و فناوری‌های نوین در حوزه‌های دانشی مرتبط، از آن‌ها برای مستندسازی میراث استفاده کند [۱۰] و علاوه بر کاهش معنادار زمان مستندسازی، دقت و کیفیت این فرایند را نیز افزایش دهد. از جمله‌ای این حوزه‌های مرتبط دانشی، حوزه ژئوماتیک است. روش‌ها و ابزارهای این حوزه، ضمن دارا بودن ارتباطی دیرین و تنگاتنگ با امر حفاظت از میراث فرهنگی، در سطحی وسیع می‌توانند پاسخگوی نیازهای موجود در موضوع مستندسازی میراث باشد [۱]. یکی از روش‌های زیرمجموعه ژئوماتیک که به حوزه میراث فرهنگی وارد شده و مورد استقبال و کاربرد قرار گرفته است، فتوگرامتری یا علم اکتساب اندازه‌های قابل اعتماد با کمک عکس نام دارد [۱۱]. فتوگرامتری طبق تعریفی از «انجمن فتوگرامتری و سنجش از راه دور آمریکا - ASPRS»، هنر، علم و فناوری بدست‌آوردن اطلاعات صحیح در مورد اجسام فیزیکی و محیط از طریق فرایندهای

ضبط، اندازه‌گیری و تفسیر تصاویر و الگوهای انرژی الکترومغناطیسی تابشی و سایر پدیده‌های ثبت‌شده است. این روش که مشهورترین روش مبتنی بر تصویر است، به‌طور غیرمستقیم یا غیرتماسی انجام می‌شود [۱۲] و می‌تواند ابعاد بسیار دقیقی را از نظر موقعیت و هندسه عناصر واقعی از طریق دو یا چند تصویر ارائه دهد [۱۳]. فتوگرامتری در اوایل قرن نوزدهم توسعه می‌یابد [۱۴] و از سال ۱۸۸۵ میلادی کاربرد آن در مستندسازی آثار تاریخی گسترش می‌یابد [۱۵]. اما نخستین پایه‌های توجه جهانی به استفاده از این روش در حوزه حفاظت به سال ۱۹۶۴ میلادی و نشستی در ونیز ایتالیا برمی‌گردد. نشستی که در آن با تاکید بر اهمیت و لزوم حفظ شکل واقعی بناهای هنری و تاریخی، تصریح می‌شود «شکل واقعی بناها باید بر حسب نیازهای فنی، هنری یا تاریخی، بی‌کم و کاست ثبت شود و لازم است این کار شامل آسیب‌های وارد شده به بنا نیز باشد» [۱۶]. پس از آن در سال ۱۹۶۸ میلادی، «سیپا - CIPA» به‌عنوان یکی از کمیته‌های علمی ایکوموس با هدف انتقال اطلاعات از حوزه مهندسی نقشه‌برداری و فتوگرامتری و اصول سیستم‌های اندازه‌گیری به حوزه کاربردی اطلاعات مکانی از جمله معماری، مرمت، باستان‌شناسی و دیگر حوزه‌های مشابه، تاسیس می‌شود [۱]. از این سال به بعد است که پروژه‌ها و پژوهش‌های زیادی در ارتباط با میراث از مسیر تهیه نقشه‌های دقیق و با اتکا به یکی از شاخه‌های فتوگرامتری هوایی - برای تهیه نقشه از شهر، بافت و محوطه‌های تاریخی - و یا فتوگرامتری برد کوتاه - برای تهیه نقشه از بناها و اشیاء تاریخی - و یا فتوگرامتری پهپاد تسهیل و انجام می‌شود [۱۷].

ظهور و توسعه فتوگرامتری این فرصت را فراهم می‌کند که مجموعه داده‌های گرافیکی بزرگ با سرعت و دقت زیادی پردازش شده و نتایج سه‌بعدی از عوارض با طرح جزئیات و متغیرهای دقیق مطابق با موارد کاربرد آنها ارائه شود [۱۸]. با اتکا به وجود چنین روش‌ها و ابزارهای نوین در مستندنگاری است که می‌توان حداقل امیدوار بود، نمونه‌هایی رقمی از آثار فرهنگی و تاریخی پیش از تخریب فراهم شود [۱۹]. چنانچه پروفیسور عدل در اولین سند و مقاله در دسترس و منتشر شده در این زمینه می‌گوید، «... فتوگرامتری به مثابه وسیله‌ای معجزه‌آور ... اگر نه بطور ملموس لاقلاً به صورت شمارگانی (دیجیتالی) امکان تامین دوام یادمان‌ها را در تصاویر سه‌بعدی فراهم می‌آورد» [۲۰].

وی در این مقاله که در دهه ۷۰ شمسی به رشته تحریر درآمده است، به معرفی اجمالی مستندنگاری با کمک فتوگرامتری می‌پردازد و در نهایت اسناد فنی بدست‌آمده در ارتباط با بناهای تاریخی زوزن و بسطام

را به تصویر کشیده است [۱۴] که از نظر جغرافیای پژوهش با مطالعه حاضر تفاوت دارد و بر حوزه میراث فرهنگی در مفهوم عام آن متمرکز نیست؛ و دیگری بر استفاده از فناوری فتوگرامتری برد کوتاه در نظارت بر تغییر شکل سازه‌های بزرگ مقیاس در مطالعات پیشین مروری اجمالی داشته است. این مطالعه گرچه از نظر روش کار تا حدودی مشابه مقاله حاضر بوده و تمرکز خود را بر تحلیل مقالات منتشر شده قرار داده است اما روشی نظام‌مند برای انتخاب و تحلیل پژوهش‌های پیشین را به خدمت نگرفته است؛ همچنانکه استفاده از فتوگرامتری را نه در حوزه میراث و امر مستندنگاری بلکه در حوزه ساختارهای کالبدی و تغییر شکل آنها دنبال کرده است [۲۵].

تحلیل محتوایی مقالات منتخب براساس پارامترهای ارزیابی و مقوله‌های مورد نظر پژوهش (جدول ۱)، زمینه استخراج اطلاعات به صورت کمی و کیفی و تحلیل‌های ثانوی را برای یافتن پاسخ پرسش‌های پژوهش فراهم کرده است که در ادامه، پس از تشریح روش انجام کار، ارائه می‌شود.

روش تحقیق

پژوهش حاضر از نوع مطالعات ثانویه بوده و پارادایم فلسفی حاکم بر آن تفسیری است [۲۶]. رویکرد پژوهش کیفی و روش گردآوری داده‌ها از نوع متن‌پایه است که براساس شیوه‌های اسنادی انتخاب شده و با اتکا به روش مرور نظام‌مند (Systematic review) و کدگذاری باز و در ادامه فراتحلیل کیفی (Meta-analysis) دنبال شده است.

در این راستا ابتدا مروری نظام‌مند بر مقاله‌های منتشرشده فارسی انجام شد. مقالات اولیه، با جستجو در پایگاه‌های اطلاعاتی داخلی شامل «مرکز اطلاعات علمی جهاد دانشگاهی (Sid)»، «مرجع دانش» ناشر تخصصی کنفرانس‌های ایران (Civilica)، «بانک اطلاعات نشریات کشور (Magiran)»، و با محوریت دو کلمه «فتوگرامتری» و «میراث [فرهنگی]» که با عملگر «AND» به هم مرتبط شده بودند؛ بدست آمد. برای توسعه و تکمیل مقالات مرتبط، بخشی از مقالات جدید نیز با رجوع به منابع پایانی مقالات اولیه، شناسایی و به چرخه مطالعه وارد شد. روی هم‌رفته ۹۴ مقاله شناسایی شد که پس مطالعه و بررسی، ۵۶ مقاله که بیشترین تناسب محتوایی را با هدف پژوهش داشتند، از میان آنها انتخاب و مورد مذاقه قرار گرفت. دامنه زمانی این جست‌وجو به مقالاتی محدود شده که تا پایان شهریور ۱۴۰۳ در مجلات و کنفرانس‌ها و همایش‌ها ارائه و منتشر شده است و از طریق الکترونیکی قابل دستیابی بودند. در فرایند تحلیل و بررسی، متن ۵۶ مقاله مذکور به‌عنوان داده کیفی انتخاب و تحلیل محتوای آنها براساس مقوله‌های مورد نظر پژوهش که در جدول ۱ معرفی شده است، دسته‌بندی و استخراج شد.

را ارائه می‌کند [۲۰]. پس از آن مقالات متعددی به موضوع فتوگرامتری پرداخته‌اند که اکثر آنها معرفی محض روش را محور کار خود قرار داده‌اند [۲۱، ۲۲] و با کاربست آن در یک نمونه مطالعاتی سعی در ترویج این فناوری نوین در امر مستندنگاری میراث داشته‌اند [۱۰، ۱۵، ۲۳].

هر چند در سال‌های اخیر در ایران، همگام با تحولات و توجهات جهانی، برخی از مهمترین آثار فرهنگی کشور به روش فتوگرامتری مستندسازی شده‌اند، و بررسی پژوهش‌های مرتبط انجام شده تا به امروز، از افزایش توجه علمی و عملی به این موضوع حکایت دارد [۱۲، ۲۴]، اما به نظر می‌رسد هنوز آنگونه که باید به استفاده از فتوگرامتری در مستندسازی میراث معماری و شهری توجه نشده است.

برای راستی‌آزمایی این ادعا، بررسی میزان توجه پژوهش‌های صورت گرفته در چهاردهه اخیر کشور - از دهه هفتاد شمسی تا نیمه دوم سال جاری (۱۴۰۳) - که به موضوع فتوگرامتری در فرایند مستندسازی میراث فرهنگی پرداخته است و تحلیل محتوای آنها، به‌عنوان هدف پژوهش حاضر در نظر گرفته شد. تا با مذاقه بر مطالعات منتشرشده داخلی و از خلال یافتن پاسخ پرسش‌های زیر وضعیت توجه به و بهره‌گیری از فناوری فتوگرامتری در مستندسازی میراث شناسایی شود. چارچوب ساختاری پژوهش‌های انجام‌شده در حوزه فتوگرامتری میراث در کشور چیست؟ و محتوای پژوهش‌های معطوف به فتوگرامتری میراث در ایران چه ویژگی‌هایی دارند؟

با در نظر داشتن این ملاحظه که قطعاً مطالعات قابل‌توجهی در زمینه مورد بحث مقاله توسط صاحب‌نظران و متخصصین داخلی صورت گرفته که به زبان انگلیسی و در مجلات و کنفرانس‌های بین‌المللی منتشر شده است و همچنین محتمل است نتایج برخی از تحقیقات پیرامون این موضوع و کاربرد آن در واقعیت، در آرشیوهای سازمانی و شخصی باقیمانده و منتشر نشده باشد، برای یافتن پاسخ پرسش‌های فوق، مروری نظام‌مند از تمام مقالات منتشرشده به زبان فارسی و نمایه‌شده در مجلات و سامانه‌های علمی داخلی در این زمینه انجام گرفت. در خلال این بررسی گرچه مشخص شد که تا کنون هیچ مطالعه‌ای با رویکرد مقاله حاضر صورت نگرفته است، اما وجود مقالاتی بر محور مستندنگاری دیجیتال میراث با استفاده از فتوگرامتری به‌خصوص در یک دهه اخیر، که در نتیجه تقریب و تعامل بین‌رشته‌ای در حوزه‌های مهندسی نقشه‌برداری و حفاظت از میراث نگارش شده‌اند، نویدبخش و قابل‌توجه بود. در میان اسناد بدست‌آمده، دو مقاله نیز که هر دو به زبان انگلیسی تبع شده‌اند از نظر رویکرد پژوهش و روش انجام کار قرابت بسیاری با این مطالعه داشتند. یکی با مروری نظام‌مند مهمترین نهادها و کشورهایایی که به موضوع استفاده از فتوگرامتری در باستان‌شناسی ورود داشته‌اند را شناسایی و معرفی کرده است؛ علاوه بر آن تحولات روشی و پیشرفت‌های فناورانه در مستندنگاری عرصه‌های باستانی با فتوگرامتری

جدول ۱: مقوله‌های مورد بررسی در مقاله‌های منتخب
Table 1: Features examined in selected articles

کد Sub category	مقوله Category	ویژگی characteristic
از دهه ۷۰ شمسی تا شهریورماه ۱۴۰۳ در بازه‌های زمانی ده ساله From the 1990s to mid-2024 in ten-year periods	پراکندگی زمانی انجام پژوهش‌ها Time dispersion of studies	ویژگی‌های ساختاری پژوهش‌ها Research structural characteristics
مجله‌های علمی و همایش یا کنفرانس Scientific journals or conferences	قالب پژوهش Research format	
نام و نام‌خانوادگی نویسندگان Authors' names and surnames	پژوهشگران حوزه موضوعی Researcher	
معماری (مطالعات معماری، معماری و معماری داخلی)، مرمت (میراث‌معماری و شهری)، باستان‌شناسی، عمران (نقشه‌برداری (گرایش‌های مختلف)، سازه و مدیریت پروژه)، Architecture (architecture study, architecture, interior architecture), Restoration (urban and architectural heritage), Archeology, Civil (surveying, structure, project management)	تخصص پژوهشگران Researchers' expertise	
تهران، آذربایجان، فارس، قم، سیستان و بلوچستان، کرمانشاه، سایر استان‌ها، بدون نمونه موردی (یا دارای نمونه خارجی یا شیء فاقد موقعیت) Tehran, Azarbyjan, Fars, Ghom, Sistan and Balochistan, Kermanshah, Other Province, Without case study (Either foreign case study or unknown context of artifact)	پراکندگی جغرافیایی (استان) Geographical dispersion of case study	ویژگی‌های محتوایی پژوهش‌ها Research content characteristics
شیء، عناصر وابسته به معماری، بنا و مجموعه معماری، محوطه تاریخی، بافت (روستایی یا شهری)، بدون نمونه مطالعاتی Artifact, Architecture elements, Monument and Complex, Historic site, Fabric (rural or urban), Without Case study	مقیاس نمونه Case study scale	
دانشگاهی، پژوهشگاه و انجمن علمی، اجرایی (سازمان‌ها و شهرداری‌ها) University, research institute and scientific association, organizations and municipalities	انتشارات پژوهش Publisher	
معرفی و کاربری روش فتوگرامتری در مستندنگاری میراث (توجه به کاربری روش در عرصه میراث) - توسعه و بهبود فرایند مستندنگاری با روش فتوگرامتری (توجه به روش) Introduction and application of the photogrammetric method in heritage documentation (focus on the application of the method in heritage discourse) - Development and improvement of the documentation process with the photogrammetric method (focus on method)	هدف و موضوع محوری پژوهش The main goal and the subject of research	
فتوگرامتری زمینی (برد کوتاه)، پهپاد، تلفیقی (پهپاد و زمینی)، عام Close range photogrammetry, Drone, combined (drone and ground), general	نوع فتوگرامتری استفاده‌شده Photogrammetry type	ویژگی‌های محتوایی پژوهش‌ها Research content characteristics
Agisoft Metashape, Photomodeler, Pix4d, Context Capture, Reality Capture, ...	نرم‌افزار مورد استفاده پژوهش Software applied in research	
تشریح کاملی از فرایند مستندنگاری با فتوگرامتری - شرح ناکافی و کلی از کاربری فتوگرامتری (وجود ابهامات در کاربری روش) A complete description of the process of documenting with photogrammetry - Insufficient description of the application of photogrammetry (ambiguities in the application of the method)	کیفیت پژوهش Quality of research	

یافته‌های پژوهش

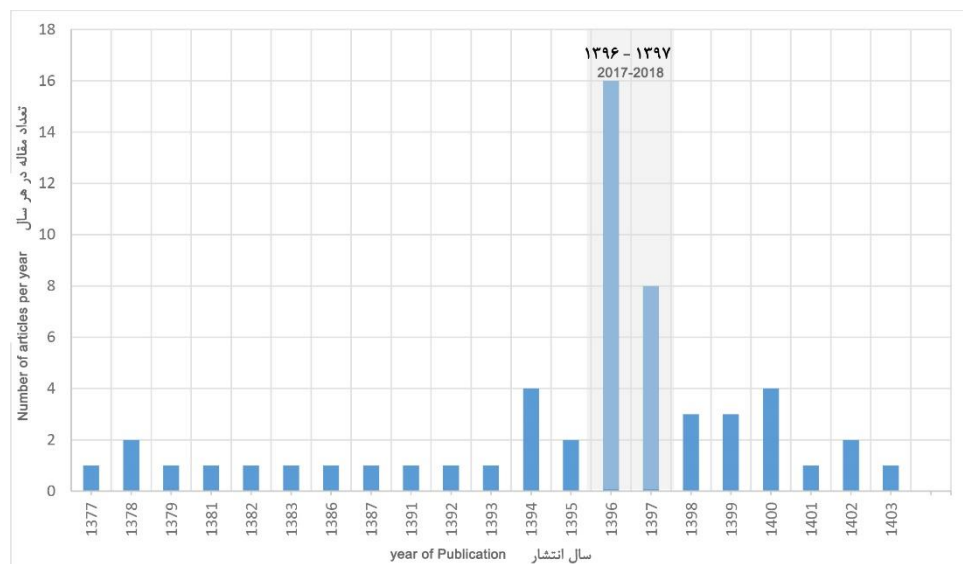
گذاشته است به‌طوری‌که حدود ۸۴ درصد پژوهش‌ها در بازه یک دهه اخیر (از سال ۹۰ تا به امروز) انجام شده است. عدل و کریمی (۱۳۷۷) که اولین مقاله منتشرشده در این حوزه را به رشته تحریر درآورده‌اند، به مستندنگاری مجموعه‌های میراثی موجود در بسطام و زوزن به کمک فتوگرامتری پرداختند و ضرورت استفاده از این روش را علاوه بر پیچیدگی فضایی موضع‌های مطالعاتی، تهدید روز افزون میراث برمی‌شمارند. آنها در جایی از مقاله تاکید دارند که فتوگرامتری اجازه می‌دهد هر اثر در لحظه ثبت و به همان شکل موجود مستند شود و تغییرات بعدی آن با رجوع به مستندات حاصل از فتوگرامتری قابل تشخیص باشد [۲۰]. پس از آن و طی سال‌های بعد، گرچه موضوع فتوگرامتری میراث مورد توجه و تبع قرار گرفته است، اما برگزاری دو همایش ملی مستندنگاری میراث فرهنگی و طبیعی در سال‌های ۱۳۹۶ و ۱۳۹۷ را باید نقطه عطفی در انجام و انتشار عمومی پژوهش‌های مرتبط به این حوزه دانست. همین بستر باعث شده است که فراوانی پژوهش‌ها در دهه ۹۰ نسبت به سایر ادوار زمانی بیشترین باشد (شکل ۱).

در پژوهش حاضر یافته‌ها در دو بخش ویژگی‌های ساختاری و محتوایی دسته‌بندی شده‌اند. در بخش اول، بررسی مشخصه‌های عام مقاله‌های انتخاب‌شده صورت می‌گیرد تا نيمرخي از وضعیت پژوهش در حوزه مستندنگاری میراث فرهنگی با استفاده از فتوگرامتری حاصل شود. در بخش محتوایی نیز تلاش شده تا هدف و موضوع اصلی مورد توجه پژوهش‌ها و کیفیت انجام مطالعات و برخی از نکات مهم آنها تحلیل شود، تا از این طریق، امکان جهت‌گیری درست برای پژوهش‌های آتی فراهم آید.

فراتحلیل ساختاری پژوهش‌ها

در این قسمت ویژگی‌های عمومی پژوهش‌های منتخب براساس مقوله‌های مختلف مطابق جدول ۱ بررسی شده و نتایج (جدول ۲) به شرح زیر است.

- پراکندگی زمانی انجام پژوهش‌ها: از دهه ۷۰ شمسی، پژوهش‌ها پیرامون موضوع فتوگرامتری میراث آغاز شده و رفته‌رفته رو به فزونی



شکل ۱: سیر تحول زمانی پژوهش‌ها - دهه ۹۰ شمسی و به خصوص سال‌های ۱۳۹۶ و ۱۳۹۷ اوج توجه پژوهشی به موضوع است.

Fig. 1: Chronology of research based on the number- The second decade of the 21st century, and especially the years 2017 and 2018, were the peak of research on the

از نیمی از پژوهشگران مشارکت‌کننده در تنظیم و تهیه پژوهش‌های منتخب، متخصصین عمرانی با گرایش‌های نقشه‌برداری، فتوگرامتری و سنجش از راه دور هستند (شکل ۲). با این وجود پژوهشگرانی با تخصص‌های معماری، مرمت و باستان‌شناسی نیز سهمی قابل توجه در این پژوهش‌ها داشته‌اند (در مجموع حدود ۴۰ درصد)؛ که نشان از تمایل و دغدغه‌مندی متخصصان این حوزه‌های دانشی به موضوع فتوگرامتری و مستندنگاری دیجیتال دارد.

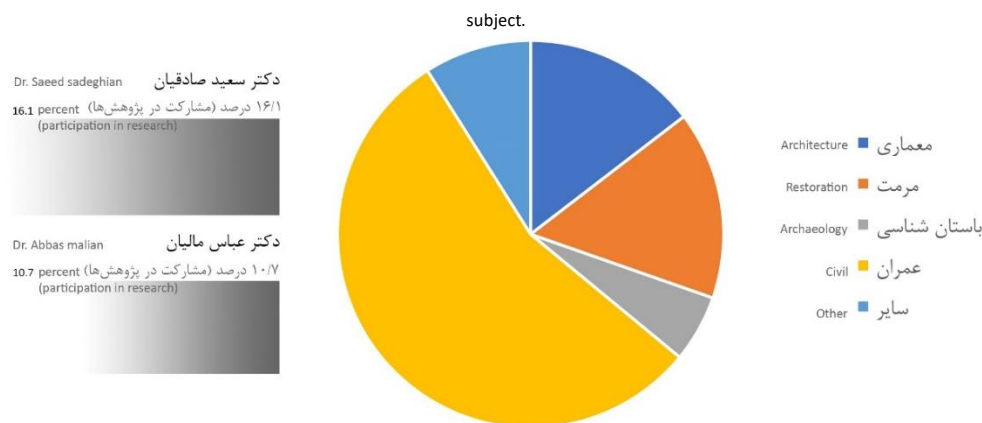
- پراکندگی جغرافیایی (استان) پژوهش‌ها: نتایج نشان می‌دهد که بیشترین نمونه‌های مطالعاتی پژوهش‌های منتخب در استان تهران واقع شده است (۸ مورد). و پس از تهران، استان‌های فارس با ۵ مورد، آذربایجان با ۴ مورد، قم با ۳ مورد و استان‌های سیستان و بلوچستان و کرمانشاه هریک با ۲ مورد قرار دارند. در سایر استان‌ها، یا نمونه‌ای مطالعاتی مورد بررسی و پژوهش نبوده است (شکل ۳، استان‌های به رنگ خاکستری) و یا تنها یک اثر از آن استان‌ها به‌عنوان نمونه مطالعاتی پژوهش، مورد بررسی قرار گرفته است (شکل ۳، استان‌های به رنگ زرد).

- مقیاس نمونه مطالعاتی: نمونه‌های مطالعاتی پژوهش‌های بررسی شده در مقیاس‌های مختلف از شیء تا بافت شهری و روستایی را دربر می‌گیرد. بیشترین آنها در مقیاس بنا و مجموعه با ۳۵/۷ درصد نمونه‌ها قرار دارند و عناصر وابسته به معماری و اشیاء به ترتیب با ۲۵ و ۱۰/۷ درصد پس از آنها جای می‌گیرند. کمترین توجه پژوهش‌ها به مقیاس محوطه تاریخی و بافت‌های باارزش شهری و روستایی با مجموعاً ۵/۴ درصد از کل نمونه‌ها مربوط می‌شود. بدیع بودن موضوع، نیاز به تجهیزات پروازی (مانند پهپاد) در مستندنگاری در این مقیاس، نیاز به هماهنگی با نهادهای مسئول برای پرواز، زمان و هزینه را از جمله دلایل این سهم اندک می‌توان برشمرد.

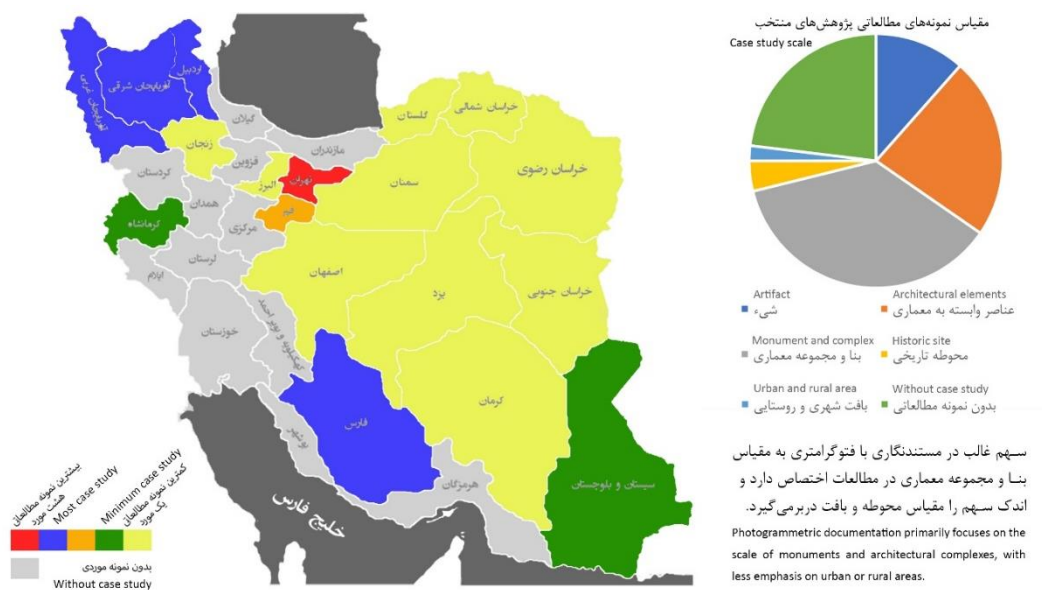
- قالب پژوهش‌ها: از میان پژوهش‌های انجام شده بالغ بر ۶۸ درصد آنها در قالب مقالات همایشی یا کنفرانسی و حدود ۳۲ درصد آنها را مقالات علمی منتشرشده در مجلات تشکیل می‌دهد. درصد بالای مقالات انتشار یافته در همایش‌ها و کنفرانس‌ها، از درحال رشد بودن توجه به موضوع فتوگرامتری میراث حکایت می‌کند و پایین بودن درصد مقالات منتشرشده در مجلات نشان از عدم وجود استحکام علمی لازم در این زمینه علمی است. مجلاتی چون پژوهش باستان‌شناسی دانشگاه هنر اسلامی تبریز، نشریه نقشه‌برداری سازمان نقشه‌برداری کشور، مجله اثر پژوهشگاه میراث فرهنگی، هنرهای زیبای دانشگاه تهران، صفه شهید بهشتی، مطالعات معماری ایران دانشگاه کاشان، پژوهش‌های باستان‌شناسی ایران دانشگاه بوعلی سینا همدان و مسکن و محیط روستا پژوهشگاه سوانح طبیعی را باید در زمره ناشران میزبان موضوع فتوگرامتری میراث دانست.

- وضعیت ناشران پژوهش‌ها: سهم توجه و حمایت ناشران دانشگاهی و پژوهشگاهی به این موضوع حدود ۸۰ درصد است. ۲۰ درصد از پژوهش‌ها نیز با حمایت دستگاه‌های اجرایی مانند شهرداری‌ها و سازمان نقشه‌برداری کشور صورت گرفته است. گرچه سهم بیشتر به نهادهای تولید علم و دانش اختصاص دارد اما همین‌که یک پنجم از پژوهش‌ها با حمایت نهادهای اجرایی تولید و انتشار یافته است، از نیاز واقعی به فتوگرامتری میراث و مستندنگاری با روش‌های نوین در کشور حکایت دارد.

- پژوهشگران حوزه موضوعی و تخصص آنها: در میان ۵۶ پژوهش بررسی‌شده، سعید صادقیان و عباس مالیان را به ترتیب با مشارکت در ۱۶/۱ و ۱۰/۷ درصد از پژوهش‌ها، باید به‌عنوان پژوهشگران اصلی موضوع فتوگرامتری میراث در سال‌های اخیر ایران شناخت. پژوهشگرانی که هر دو از تخصص نقشه‌برداری و فتوگرامتری برخوردارند. اساساً بیش



شکل ۲: پژوهشگران اصلی حوزه موضوعی و توزیع تخصص نگارندگان مقاله‌ها
Fig. 2: Main researchers in the subject area and distribution of authors expertise



شکل ۳: پراکندگی جغرافیایی نمونه‌های موردی و فراوانی گونه‌بندی آنها در پژوهش‌های منتخب

Fig. 3: Geographical distribution of case studies and their typology frequency

بیشترین نمونه‌های مستندشده با فتوگرامتری در استان تهران (رنگ قرمز) قرار دارد. استان‌هایی مانند گیلان، قزوین، همدان، خوزستان و ... با وجود حضور تعداد قابل توجه از آثار باارزش فرهنگی و طبیعی پژوهشی در این حوزه صورت نگرفته است.

The most documented with photogrammetry is in Tehran province (red). Provinces such as Gilan, Qazvin, Hamedan, and Khuzestan, despite the presence of a significant number of valuable cultural and natural monuments, have not seen any research conducted in this area.

جدول ۲: فراتحلیل ساختاری پژوهش‌ها؛ فراوانی و درصد مقوله‌های تحلیل ساختاری پژوهش‌ها

Table 2: Structural meta-analysis of research; frequency and percentage of features research

درصد Percentage	فراوانی Frequency	کدها Subcategory	مقوله‌ها Category	درصد Percentage	فراوانی Frequency	کدها Subcategory	مقوله‌ها Category
15.9	16	Architecture / معماری	تخصص پژوهشگران Researchers' expertise	7.1	4	1990-2000 / ۱۳۷۰-۱۳۸۰	پراکندگی زمانی
17.8	18	Restoration / مرمت		8.9	5	2000-2010 / ۱۳۸۰-۱۳۹۰	انجام پژوهش‌ها
5.9	6	Archaeology/ باستان‌شناسی		67.9	38	2010-2020 / ۱۳۹۰-۱۴۰۰	Time dispersion of conducting researches
55.5	56	Civil / عمران		16.1	9	2020-2023 / ۱۴۰۰-۱۴۰۳	قالب پژوهش Research format
4.9	5	other / سایر		32.1	18	Scientific journals/ مجلات علمی	
14.3	8	Tehran	پراکندگی جغرافیایی	67.9	38	همایش یا کنفرانس Conference, Symposium	انتشارات پژوهش Publisher
10.7	6	Fars	(استان)	66.1	37	دانشگاهی Academic	

مقوله‌ها Category	کدها Subcategory	فراوانی Frequency	درصد Percentage	مقوله‌ها Category	کدها Subcategory	فراوانی Frequency	درصد Percentage
پژوهشگاه و انجمن علمی Research Inst & Scientific Assn		8	14.3	Geographical dispersion of the case study	آذربایجان Azerbaijan	5	8.9
دستگاه‌های اجرایی Executive bodies		11	19.6	قم	Qom	3	5.3
سعید صادقیان s. sadeghian		9	16.1	سیستان و بلوچستان Sistan and Baluchestan		2	3.6
عباس مالیان A. Malian		6	10.7	کرمانشاه Kermanshah		2	3.6
حمید عبادی، فرید اسماعیلی H. Ebadi, F. Esmaeli		5	8.9	سایر (اصفهان، سمنان، زنجان، گلستان، کرمان، خراسان، البرز، یزد) Others (Isfahan, Semnan, Zanjan, Golestan, Kerman, Khorasan, Alborz, Yazd)		۱ مورد در هر استان One case per province	14.3
فرهاد صمدزادگان، علی حسینی - نوه‌احمدآبادیان / F. Samadzadegan, A. Hoseyni		4	7.1	بدون نمونه‌موردی، شیء، نمونه خارجی، فاقد موقعیت مکانی / No instance, / object, external instance, no location		22	39.3
الهام اندرودی، زهرا همتی پژوهشگران حوزه موضوعی Researcher		3	5.4	شیء / object		6	10.7
محمد سرپولکی، داوود صدیق‌پور، مهرداد جوادی، مسعود ورشوساز، یوسف سجادی، محمدرضا ملکلو، علی اسدی M. Sarpoulaki, D. Sedighpoor, M. Javadi, M. Varshosaz, Y. Sajadi, M. Maleklou, A. Asadi		2	3.6	عناصر وابسته به معماری Architectural elements		14	25
				بنا و مجموعه معماری Building and complex		20	35.7
				محوطه تاریخی Historical site		2	3.6
				مقیاس نمونه مطالعاتی Case study scale			
				بافت شهری یا روستایی Urban or rural Area		1	1.8
سایرین Others		1	48.2	بدون نمونه مطالعاتی No study samples		13	23.2

فرا تحلیل محتوایی پژوهش‌ها

ویژگی‌های محتوایی پژوهش‌های منتخب، در قالب مقوله‌های جدول ۱ مورد بررسی قرار گرفته و نتایج (جدول ۳) به شرح زیر ارائه می‌شود.

هدف و موضوع محوری پژوهش‌ها: برخی از پژوهش‌ها با پذیرش اهمیت علم ژئوماتیک در حوزه میراث فرهنگی، کاربرد روش‌های مختلف این علم از جمله روش فتوگرامتری را در امر حفاظت از میراث مورد تاکید قرار داده‌اند [۲، ۲۱، ۲۲، ۲۷]. این دسته از پژوهش‌ها با ناکارآمد دانستن روش‌های سنتی مستندنگاری، فتوگرامتری را امکانی در مستندنگاری دقیق و تحلیل‌های قیاسی بر می‌شمارند [۱۵، ۲۰، ۲۸] و به معرفی ارکان و مراحل مستندنگاری دیجیتال میراث [۱۹]، در مقیاس‌های مختلف - از شیء [۲۹، ۳۰] تا بافت [۱۰، ۲۳] - و با اتکا به گونه‌های مختلف فتوگرامتری می‌پردازند. این گروه از مطالعات، فتوگرامتری را فرایندی مفید و استاندارد برای دستیابی به داده‌های سه‌بعدی دقیق و تجسم مجازی آثار تاریخی برشمرده و این روش را یکی از توصیه‌شده‌ترین روش‌های غیرمزااحم و غیرمخرب معرفی می‌کنند [۳۱]؛ که امکان تولید اسنادی برای معرفی اثر و توسعه گردشگری [۳۲] همچنین تعیین عرصه اثر و حرایم حفاظتی آن [۳۳]

را مهیا می‌کند. برخی از مطالعات نیز مستندنگاری آثار با کمک فتوگرامتری را با هدف آسیب‌شناسی و آسیب‌نگاری آثار تاریخی مورد توجه قرار داده‌اند و با بی‌خطر دانستن این روش، بر پتانسیل آن در شناسایی میزان تغییرات در ساختار اصیل و اولیه آثار تاکید دارند [۴، ۲۴]. در مطالعه‌ای متاخر نیز کاربرد عملی «موبایل فتوگرامتری» به عنوان روشی در دسترس برای همگان معرفی می‌شود [۳۴]، که می‌تواند جایگزینی برای دوربین‌های حرفه‌ای و گران‌قیمت در فتوگرامتری مرسوم به شمار آید.

پژوهش‌هایی نیز با تمرکز بر فتوگرامتری به عنوان روش و ابزار مستندنگاری به توسعه فرایندی استفاده از آن و چگونگی کاربست بهینه آن در امر مستندنگاری پرداخته‌اند؛ در این مسیر بخشی از مطالعات با فراهم کردن بستر آزمایشگاهی، به یافتن راه‌حل‌هایی برای بهبود فرایند مستندنگاری از طریق توسعه و تدقیق مراحل کار فتوگرامتری همت گمارده‌اند [۳۵-۳۸]. بهینه‌سازی طراحی شبکه و تلفیق روش‌های مختلف برداشت دو راه‌حل اصلی در بهبود فرایند مستندنگاری دیجیتال معرفی شده است.

موضوعی پژوهش‌های منتخب همانطور که انتظار می‌رفت، مهمترین و پرستفاده‌ترین نوع فتوگرامتری در این مقالات، فتوگرامتری برد کوتاه است.

فتوگرامتری برد کوتاه به‌طور عمومی زمانی استفاده می‌شود که فاصله دوربین تا شیء کمتر از ۳۰۰ متر باشد [۱۵]. مطابق جدول ۳، بالغ بر ۶۴/۳ درصد پژوهش‌های بررسی‌شده از فتوگرامتری برد کوتاه یا زمینی در مستندسازی نمونه‌های مطالعاتی استفاده کرده‌اند. ۱۹/۶ درصد پژوهش‌ها نیز با استفاده از فتوگرامتری پهپاد یا به‌صورت تلفیقی با بهره‌گیری توانان از فتوگرامتری پهپاد و زمینی مستندسازی میراث را انجام داده‌اند.

فتوگرامتری پهپاد مبنای تلفیقی از فتوگرامتری هوایی و برد کوتاه است که در آن یک سنجنده‌ی اخذ داده که می‌تواند دوربین متریک یا غیرمتریک، و یا هر وسیله اخذ داده دیگر باشد، بر روی یک سکوی بدون سرنشین (UAV) نصب شده و از ارتفاع کم، داده‌ها اخذ می‌شوند [۴۵]. فتوگرامتری پهپاد مبنای قابلیت استفاده در محدوده ابعادی بین چندین متر تا چندین کیلومتر را داراست [۴۱]. همین قابلیت باعث شده امروزه از فتوگرامتری پهپاد برای مستندنگاری میراث در مقیاس‌های گوناگون، از مقیاس بنا و مجموعه معماری مانند کاروانسراها [۴۳] یا قلعه‌ها [۱۹، ۳۸] تا محوطه‌های باستانی [۴۵] و بافت‌های تاریخی شهری و روستایی [۳۹] به تنهایی یا در تلفیق با فتوگرامتری زمینی، بیشتر استفاده شود. سهولت اخذ تصویر در ارتفاع‌های مختلف به صورت قائم و مایل و کاهش زمان تصویربرداری به‌خصوص در عرصه‌های میراثی بزرگ و مرتفع، از دلایل اهمیت استفاده از فتوگرامتری پهپاد در مستندنگاری میراث به‌شمار می‌رود.

طراحی شبکه و بهینه‌سازی آن در فرایند فتوگرامتری به‌منظور کاهش زمان و هزینه در عین افزایش سرعت و کیفیت از جمله پرتکرارترین موضوعی است که مورد توجه پژوهش‌های مختلف قرار گرفته است. در این میان بهینه‌سازی طراحی شبکه تصویربرداری در فتوگرامتری پهپاد در نسبت با فتوگرامتری زمینی بیشتر مدنظر بوده است [۳۹-۴۱]. در حالی که برخی پژوهش‌ها نیز بر طراحی شبکه در فتوگرامتری زمینی و در مستندسازی آثاری با خمیدگی و شکستگی و پیچیدگی‌های فرمال (مانند مدلسازی مقرنس) [۱۱، ۴۲] یا سطوح منعکس‌کننده نور [۹] تمرکز داشته‌اند.

تلفیق فتوگرامتری با روش‌هایی چون لیزر اسکن در مرحله برداشت و اخذ داده، به‌ویژه در ارتباط با آثاری که دارای فرم‌های پیچیده بوده یا در ارتفاع واقع شده یا در نتیجه رخداد سوانح و حوادث آسیب دیده‌اند و یا در اثر وجود موانع مصنوع یا طبیعی دسترسی به آنها محدود است، از دیگر راه‌حل‌های پیشنهادی پژوهش‌های بررسی‌شده [۸، ۴۳] در توسعه فرایندی و بهبود محصول کار مستندنگاری دیجیتال است. البته که تلفیق روش‌ها و فناوری‌های دیگر با فتوگرامتری به لیزر اسکن و مرحله برداشت محدود نمی‌شود و ادغام و یکپارچه‌سازی فتوگرامتری با نرم‌افزارهای ترسیم (نظیر اتوکد) در راستای غنابخشی محصول نهایی نیز مورد توجه بوده است [۴۴]. اسدپور (۱۴۰۲) نیز در مطالعه‌ای تدوین و کاربست عملی روشی را ارائه کرده است که براساس آن می‌توان با استفاده از فتوگرامتری تک عکس، و از مسیر تصحیح عکس‌های تاریخی یا لحاظ قیود شکلی بناهای ایرانی به بازخوانی متریک این آثار پرداخت [۱۲].

- نوع فتوگرامتری/ استفاده شده در پژوهش‌ها: با توجه به تمرکز

جدول ۳: فراتحلیل محتوایی پژوهش‌ها؛ فراوانی و درصد مقوله‌های تحلیل محتوایی پژوهش‌ها
Table 3: Content Meta-analysis of researches; frequency and percentage of features research

درصد Percentage	فراوانی Frequency	کدها SubCategory	مقوله‌ها Category	درصد Percentage	فراوانی Frequency	کدها SubCategory	مقوله‌ها Category
39.3	22	Agisoft Metashape				معرفی و کاربست روش فتوگرامتری در مستندنگاری	
7.1	4	Photomodeler UAS	نرم‌افزار مورد استفاده	66.1	37	میراث / Introduction and application of photogrammetry in heritage documentation	هدف و موضوع محوری پژوهش The main goal and the subject of research
1.8	1	Pix4D Mapper				توسعه و بهبود فرایند مستندنگاری با روش فتوگرامتری / Developing and improving the documentation process using photogrammetry	
1.8	1	Bentley Context Capture	پژوهش‌ها Software applied in research	33.9	19		
1.8	1	Reality Capture					
48.2	27	سایر یا معرفی نشده Other					
		شرح کامل فرایند مستندنگاری- فتوگرامتری		64.3	36	زمینی (برد کوتاه) / Close Range	نوع فتوگرامتری استفاده‌شده یا معرفی‌شده در پژوهش Photogrammetry type
21.4	12	A complete description of the photogrammetric documentation process	کیفیت پژوهش Quality of research	10.7	6	پهپاد / Drone	
		شرح ناکافی و کلی از کاربست فتوگرامتری		8.9	5	تلفیقی (پهپاد و زمینی) Combined	
78.6	44	Insufficient and general description of the application of photogrammetry		16.1	9	فتوگرامتری به‌صورت عام Photogrammetry in general	

اما بخش بزرگی از پژوهش‌های انجام شده که سهم ۷۸/۶ درصدی از مجموع مقالات منتخب را نیز شامل می‌شود، تمرکز خود را بر معرفی روش فتوگرامتری به شیوه توصیفی و شرح سطحی فرایند کار در موضع تحقیق قرار داده است. در این پژوهش‌ها یا بر بهینه‌سازی طراحی شبکه تمرکز شده، آنهم بیشتر در مطالعاتی که از فتوگرامتری پهنپاد بهره برده‌اند، و یا با اشاره‌ای گذرا به فرایند و نرم‌افزار، بر نتایج و خروجی‌های تصویری حاصل از فرایند تاکید شده است.

بحث و تفسیر یافته‌ها

فرا تحلیل پژوهش‌های منتخب که در چهاردهه اخیر منتشر شده است، تحولات مشهودی را چه از نظر کمیت و چه از منظر کیفیت نشان می‌دهد که با نگاهی کرنولوژیک قابل توجه است.

در دهه ۷۰ شمسی که اولین تلاش‌ها در معرفی و استفاده از فتوگرامتری در امر مستندنگاری میراث صورت گرفته است، با توجه به فن‌آوری زمانه مبنای تولید نقشه، فتوگرامتری آنالوگ و تحلیلی است. در این دهه مستندنگاری که غایت آن به تولید نقشه‌های دوبعدی محدود می‌شده است، با بهره‌گیری از نرم‌افزار مایکرواستیشن (Microstation)- نرم‌افزاری که نسخه‌های متاخر آن کماکان در سازمان نقشه‌برداری کشور به‌عنوان اصلی‌ترین نهاد تولید نقشه در کشور، مورد استفاده است - در کنار نرم افزار اتوکد (Autocad) انجام شده است.

با اینکه نخستین پژوهش در این دهه توسط یک باستان‌شناس و متخصص میراث صورت می‌گیرد و بر ضرورت استفاده از آن در حوزه میراث فرهنگی کشور تاکید می‌کند، اما نهاد متولی میراث فرهنگی کشور از اهمیت توجه به این روش و توصیه در امر مستندنگاری غفلت کرده و نه تنها در دستورالعمل‌ها و شرح خدمات‌های اجرایی کارهای مرمتی بر آن تاکید نمی‌شود بلکه نسبت به تربیت کارشناسانی در این حوزه و یا بهره‌مندی از متخصصان حوزه نقشه‌برداری و درس‌خوانده‌های فتوگرامتری کشور نیز بی‌توجهی می‌شود.

در دهه ۸۰ شمسی، روش‌های آنالوگ و تحلیلی در نتیجه توسعه دانش فتوگرامتری جای خود را به روش فتوگرامتری رقومی در پژوهش‌های این دهه می‌دهند. در این دوران موضوع تولید مدل‌های سه‌بعدی نیز در کنار نقشه‌های دوبعدی به‌عنوان محصول فرایند مستندنگاری مورد توجه قرار می‌گیرد. در این دو دهه، پژوهش‌های انجام شده، در مقیاس اشیاء، عناصر وابسته به معماری و بنا، کاربردهای اجرایی می‌یابند و جز در دو پژوهش که یکی توسط متخصصین باستان‌شناسی [۲۰] و دیگری با مشارکت یک متخصص معماری [۴۷] انجام شده؛ مابقی مطالعات توسط متخصصین نقشه‌برداری صورت گرفته است.

دهه ۹۰ را به موجب افزایش تعداد پژوهش‌ها مرتبط و ارتقاء کیفیت محتوایی آنها، باید نقطه عطفی در گسترش توجه به موضوع مستندسازی دیجیتال میراث با کمک روش فتوگرامتری دانست. از این دهه تا به امروز توجه به موضوع فتوگرامتری میراث توسعه و تعمیق قابل توجهی داشته و مطالعات متعددی نیز بر بهبود فرایندی روش

- نرم‌افزار مورد استفاده پژوهش‌ها: در سال‌های اخیر نرم‌افزارهای فتوگرامتری بسیاری توسعه یافته‌اند. نرم‌افزارهایی که طی روندی تکاملی از نرم‌افزارهای تارگت‌مینا و نیمه‌اتوماتیک به نرم‌افزارهای اتوماتیک بدون تارگت رسیده‌اند [۹]. امروزه نرم‌افزارهای پرکاربرد در فتوگرامتری را می‌توان مواردی چون ای‌جی‌آی سافت متاشیپ (Agisoft metashape)، فتومودلر (Photomodeler)، پیکس‌فوردی (Pix4D Mapper)، بنتلی کانتکست کپچر (Bentley Context Capture)، ریالیتی کپچر (Reality Capture) و ... بر شمرده که با استناد به بررسی پژوهش‌های منتخب از میان موارد مذکور، نرم‌افزار ای‌جی‌آی سافت متاشیپ نسبت به سایر نرم‌افزارها، بیشترین کاربرد و استفاده را داشته است (حدود ۳۹ درصد پژوهش‌ها از این نرم‌افزار برای مدل‌سازی و تولید نقشه استفاده کرده‌اند). در این نرم‌افزار که بر پایه تکنیک بازسازی سه‌بعدی چندمنظری عمل می‌کند، به شکل هوشمندانه‌ای از فناوری فتوگرامتری رقومی با پشتیبانی بینایی ماشین (Computer vision) استفاده می‌شود و واسط کاربر مناسبی را برای استفاده کاربران معمول فراهم می‌کند [۱۵]. نرم‌افزار ای‌جی‌آی سافت متاشیپ در مدل‌سازی سه‌بعدی انواع سطوح، نتایج بهتری نسبت به سایر نرم‌افزارها دارد [۴۶]. و خمیدگی‌ها و شکستگی‌ها را به خوبی تشخیص می‌دهد و پردازش می‌کند [۱۱]؛ اما در بازسازی لبه‌ها عملکرد مناسبی ندارد [۴۶].

با توجه به اهمیت و تاثیر نرم‌افزار و الگوریتم مورد استفاده در دقت و جزئیات مدل‌سازی و مستندسازی، لازم است با آگاهی از ویژگی‌ها و قابلیت‌های هریک از نرم‌افزارها و انتظارات از محصول خروجی، نسبت به انتخاب نرم‌افزار مناسب اقدام شود.

- کیفیت پژوهش‌ها در شرح فرایندی مستندنگاری با فتوگرامتری: با توجه به نوپا بودن کاربردهای روش فتوگرامتری در امر مستندنگاری میراث در کشور، در بررسی انجام شده، تلاش شده است تا از میان پژوهش‌های منتخب، پژوهش‌هایی که شرحی دقیق و گام‌به‌گام از روش مستندنگاری میراث با استفاده از فتوگرامتری و چگونگی کاربردهای آن را ارائه کرده‌اند، شناسایی و معرفی شود و از مطالعاتی که صرفاً به معرفی کلی روش و یا تشریح ناکافی آن پرداختند، متمایز گردند. این دسته‌بندی به علاقه‌مندان و پژوهشگرانی که به مستندنگاری میراث با کمک فتوگرامتری تمایل دارند کمک می‌کند تا با آگاهی از این مطالعات و رجوع به آنها، با فرایند کار و چگونگی انجام آن در مرحله برداشت و پردازش آشنا شوند.

مطابق جدول ۳، تشریح دقیق همراه با جزئیات فرایند استفاده از فتوگرامتری در ۲۱/۴ درصد از پژوهش‌ها توضیح داده شده است. در این مقالات [۹-۱۲، ۱۵، ۲۴، ۲۸، ۳۲، ۳۴، ۳۹، ۴۳]، کلیه مراحل مستندنگاری از طراحی شبکه، عکس‌برداری، تا نحوه استفاده از نرم‌افزار و حصول خروجی‌های مختلف مقیاس‌دار، در مواضع و نمونه‌های مطالعاتی مختلف از مقیاس تزئینات و عناصر وابسته به معماری تا مقیاس بافت‌های شهری و روستایی، ارائه شده است.

به طوریکه اگر در پژوهش‌های نخستین استفاده از دوربین‌های متریک برای برداشت متداول بود، امروزه دوربین‌های غیرمتریک و از دسته DSLR و دوربین تلفن‌های همراه هوشمند هستند که اقبال فراوانی پیدا کرده‌اند. پیشرفت نرم‌افزارهای فتوگرامتری، همچنین سهولت دسترسی و کاهش هزینه‌ها در گسترده‌ی استفاده از دوربین‌های غیرمتریک برای اخذ داده تأثیر بسزایی داشته‌اند [۲۵].

در نهایت و در یک صورت‌بندی کلی می‌توان گفت که در دو دهه اول، غلبه بحث محتوایی، معرفی اجمالی روش فتوگرامتری برد کوتاه از طریق اشاره مختصر به استفاده آن در فرایند مستندنگاری و نمایش محصول خروجی بوده است. دهه ۷۰ شمسی را که توجه به فتوگرامتری در ایران صرفاً توسط چند نهاد اجرایی نظیر سازمان نقشه‌برداری و سازمان جغرافیایی نیروهای مسلح صورت گرفته است باید دوران جنینی نامید چرا که هنوز این روش در این زمان در امر مستندنگاری میراث چه در فضای پژوهشی و چه اجرایی عمومیت نیافته است. دهه ۸۰ شمسی با ورود موضوع به مباحث و پژوهش‌های دانشگاهی و طرح آن در همایش‌هایی نظیر همایش‌های ژئوماتیک، رفته‌رفته توجه بیشتری به آن صورت می‌گیرد، گرچه همچنان کمیت و کیفیت پژوهش‌های انجام شده در این بازه زمانی، حکایت از توجه اندک و سطحی به فتوگرامتری میراث دارد. براین اساس این دهه را می‌توان دوران نوزادی ورود فتوگرامتری به مستندنگاری میراث برشمرد. اما تلاش‌های مؤثری که در دهه ۹۰ به بعد برای توسعه نظری و کاربردی فتوگرامتری میراث صورت گرفته است، بستر اطلاق دوران کودکی و نوجوانی به موضوع را در این دهه فراهم می‌کند. در این دوره پذیرش کامل اهمیت و ضرورت مستندنگاری رقومی میراث با کمک فتوگرامتری مشهود است، در عین حال پژوهش‌های صورت گرفته بر بهبود و توسعه موضوع در نظر و عمل همسو با پیشرفت فناوری روز تأکید و اصرار دارند.

در یک نگاه کلی می‌توان تحولات محتوایی پژوهش‌های انجام‌شده در حوزه فتوگرامتری میراث در کشور را در قالب جدول ۴ صورت‌بندی کرد.

فتوگرامتری با هدف افزایش کیفیت محصول خروجی به سرانجام رسیده است. مطالعاتی که با تمرکز بر بخش‌های مختلف فرایند کار همچون طراحی شبکه و نحوه برداشت، همچنین تلاش‌هایی به‌منظور تلفیق فتوگرامتری با سایر فناوری‌های نوین نظیر لیزر اسکن، ضمن ارتقاء سطح آگاهی از موضوع و کاربست آن نسبت به دو دهه گذشته، در مسیر غلبه بر محدودیت‌ها نیز گام برداشته‌اند.

تلاش برای تولید اسنادی کاربردی در گردشگری نظیر تورهای مجازی، واقعیت مجازی و واقعیت افزوده، متأثر از پیشرفت‌های نرم‌افزاری و برخورداری از «الگوریتم‌هایی که با استفاده از تطبیق تصاویر و استخراج نقاط متناظر از عوارض یکسان، به صورت اتوماتیک به مدلسازی دقیق‌تر و سریع‌تر کمک می‌کنند [۴۸]»، دیگر تحول کیفی در پژوهش‌های این دهه نسبت به قبل محسوب می‌شود.

همچنین پژوهش‌های این بازه زمانی نشان‌دهنده توجه بیشتر تخصص‌های مرمت، باستان‌شناسی و معماری به موضوع فتوگرامتری میراث در کنار متخصصین نقشه‌برداری است. چنانچه پژوهش‌های انجام شده از سال ۱۴۰۰ تا کنون را می‌توان در نتیجه همکاری جدی متخصصین نقشه‌برداری، مرمت و معماری و با محوریت پژوهشگران رشته مرمت و معماری دانست. گرچه نباید فراموش کرد که چون امر مستندنگاری و تولید نقشه در وهله نخست در تخصص مهندسان نقشه‌بردار است، غفلت از برخورداری از دانش این گروه از متخصصان در فرایند مستندسازی رقومی میراث، قطعاً صحت و دقت محصول نهایی را مورد تردید قرار خواهد داد.

توجه به مستندنگاری آثار با ارزش تاریخی در مقیاس‌های محوطه [۱۹] و بافت‌های روستایی [۱۰] در این دوره از طریق توسعه استفاده تلفیقی از فتوگرامتری زمینی و پهپاد مبنا نیز از دیگر تحولات تکاملی این دوران به‌شمار می‌آید.

از منظر دیگر پژوهش‌های صورت گرفته در این چهاردهه متناسب با پیشرفت‌های زمانه، تغییر در نوع ابزار تصویربرداری را نیز نشان می‌دهد.

جدول ۴: سیر تحول محتوایی پژوهش‌های انجام‌شده در چهاردهه اخیر در حوزه فتوگرامتری میراث

Table 4: The content evolution of the research conducted in the last four decades in the field of heritage photogrammetry

دوره‌ها (periods)	دوران جنینی - دهه ۷۰ شمسی Embryonic period - The 70s SH	دوران نوزادی - دهه ۸۰ شمسی Infancy - The 80s SH	کودکی و نوجوانی - دهه ۹۰ تاکنون Childhood and adolescence - The 90s SH so far
مقوله‌ها (Categories)			
تمرکز و هدف محتوایی پژوهش‌ها Research focus and content	معرفی اجمالی روش فتوگرامتری بدون تشریح دقیق فرایند، صرف ایجاد آگاهی اولیه نسبت به روش در موضوع مستندنگاری میراث A brief introduction to the photogrammetry method without a detailed description of the process, just to create an initial awareness of the method in the field of heritage documentation.	توسعه نظری و کاربردی فتوگرامتری میراث و با تعمیق کیفی پژوهش‌ها Theoretical and practical development of heritage photogrammetry and improving the quality of research	
نوع دستگاه تبدیل فتوگرامتری Stages in development of photogrammetry	آنالوگ و تحلیلی Analogue and Analytical	رقومی Digital	رقومی Digital
فاصله عکس‌برداری در فتوگرامتری Camera distance	برد کوتاه Close-range	برد کوتاه Close-range	برد کوتاه Close-range
متداول‌ترین ابزار عکس‌برداری The most common photography tool	دوربین‌های متریک Metric camera	دوربین‌های غیرمتریک Non-metric camera	دوربین‌های غیرمتریک، تلفن همراه هوشمند، پهپاد Non-metric cameras, smartphones, drones

دوره‌ها (periods)	دوران جنینی - دهه ۷۰ شمسی Embryonic period - The 70s SH	دوران نوزادی - دهه ۸۰ شمسی Infancy - The 80s SH	کودکی و نوجوانی - دهه ۹۰ تاکنون Childhood and adolescence - The 90s SH so far
مقوله‌ها (Categories)	نقشه‌های دوبعدی 2D maps	نقشه‌های دوبعدی و مدل‌های سه بعدی 2D maps and 3D models	نقشه‌های دوبعدی و مدل‌های سه بعدی، واقعیت مجازی و افزوده 2D maps and 3D models, VR and AR
محصول و خروجی Product and output	اشیاء، عناصر وابسته به معماری و بنا Artifacts, architectural elements and monument	اشیاء، عناصر وابسته به معماری و بنا Artifacts, architectural elements and monument	اشیاء، عناصر وابسته به معماری، بنا، محوطه و بافت Artifacts, architectural elements and monument, site and urban and rural areas
مقیاس مستندنگاری Documentation scales			

جمع‌بندی و نتیجه‌گیری

هر چند آراء گوناگون و نظرات متفاوتی در شیوه پرداختن به آثار به‌جای مانده از گذشته و میراث فرهنگی کشورها و چگونگی بهره‌برداری و احیاء آنها وجود دارد و هر کس از پایگاه فکری و نظری خویش با آن مواجه می‌شود، اما برای شروع هر حرکتی در این حوزه، ثبت و مستندسازی آثار، واجد اهمیتی غیرقابل انکار است. مستندسازی این امکان را فراهم می‌کند که علاوه بر حصول آگاهی از وضعیت و شرایط فعلی آثار، و شناسایی آسیب‌ها و تغییراتی که در گذر زمان به آنها وارد آمده است زمینه اجرای انواع تحلیل‌های مورد نیاز و اخذ تصمیم و تعریف اقدام مناسب فراهم آید. در این راستا، در کشور تلاش‌های گسترده‌ای با صرف هزینه‌های هنگفت از سال ۱۳۰۹ شمسی - که اولین تاکید قانونی بر ثبت به موجب قانون حفظ آثار ملی پدیدار می‌شود- تا کنون صورت گرفته است، اما عدم موفقیت و عدم تناسب میان تلاش و نتیجه، با اندک تاملی در تعداد آثار ثبتی و کیفیت مستندسازی آنها قابل مشاهده است. از جمله دلایل چنین وضعیتی را باید، در عدم شناخت کافی متخصصان حفاظت و مرمت از فناوری‌های نوین و ابزارها و روش‌های آنها و اتکای صرف به روش‌های سنتی در مستندنگاری دانست.

نتایج بررسی انجام‌شده در حوزه تولیدات علمی در ایران نیز حکایت از توجه اندک چه از نظر کمی و چه کیفی به موضوع مستندنگاری میراث با فناوری‌های نوینی چون فتوگرامتری دارد. این کم توجهی علیرغم قدمت چهاردهه‌ای آشنایی با این روش در پژوهش‌های صورت گرفته در کشور است. با این حال روند روبه رشد توجه به موضوع فتوگرامتری میراث به خصوص از دهه ۹۰ شمسی به بعد (که ۸۴ درصد پژوهش‌ها در این بازه انجام شده است) نوید بخش آینده‌ای روشن در حوزه مستندسازی دیجیتال است. البته که سهم بیشتر پژوهش‌های ارائه شده در همایش‌ها و کنفرانس‌ها (حدود ۶۸ درصد) هنوز، بر در حال رشد بودن موضوع و عدم وجود استحکام علمی در آن حکایت می‌کند. اما با توجه به فواید منحصر به فرد این روش از جمله عدم نیاز به تماس فیزیکی با ساختار تاریخی در فرایند برداشت، سرعت داده کاوی و دسترسی به نتایج مورد انتظار مستندسازی، که قابلیت بایگانی، به‌روز رسانی و پردازش‌های پسینی دارند؛ ضروری است تا گرایشات پژوهشی به موضوع با اهمیت و کمتر توجه‌شده مستندسازی دیجیتال میراث با کمک روش‌هایی چون فتوگرامتری، جهت‌دهی شوند و امکان حفاظت

بهینه و اصولی از میراث فرهنگی کشورمان و انتقال آن به نسل‌های آینده مهیا شود.

در این مسیر با توجه به وسعت تاریخی و جغرافیایی ایران و سابقه تاریخی معماری و شهرسازی این سرزمین لازم است تا گستره جغرافیایی پژوهش‌ها به مقیاس سرزمینی توسعه یابد؛ برای این منظور لازم است وزارت میراث فرهنگی و دیگر نهادهای مرتبط با حوزه میراث، موضوع مستندنگاری دیجیتال میراث را به‌عنوان رکنی اساسی از فرایند حفاظت بیش از پیش به رسمیت شمرده و بستر تحقق آن را در عمل به کمک وضع لوایح، دستورالعمل‌ها، بخش‌نامه‌ها و امثالهم فراهم کنند. قابلیت اجرایی چنین کاری نیز برای این نهاد با عنایت به قوانینی همچون قانون تشکیل سازمان میراث (۱۳۶۴)، قانون اساسنامه تشکیل سازمان (۱۳۶۷)، و قوانین متاخری همچون قانون حمایت از مرمت و احیای بافت‌های تاریخی- فرهنگی (۱۳۹۸) مهیاست و تنها نیازمند بازنگری در دستورالعمل‌های سنتی مستندنگاری و ابلاغ آن به دستگاه‌های مجری و ارتقاء دانش و مهارت کارکنان میرا و چه مشاورین همکار با آن در امر مستندنگاری دیجیتال است.

با این اقدام مشاورین و پیمانکاران فعال در حوزه مرمت به تهیه مستندات فنی آثار به کمک روش‌های نوین مستندنگاری همچون فتوگرامتری الزام می‌یابند که این امر، علاوه بر توسعه فتوگرامتری میراث در گستره عملی حفاظت، به گسترش نظری آن و تولید اسناد پژوهشی و فنی دیجیتالی نیز منجر می‌شود و استفاده بیشتر و کارآمد از متخصصان حوزه فتوگرامتری را ضرورت می‌بخشد.

البته باید توجه داشت که فتوگرامتری میراث یک موضوع تخصصی و میان‌رشته‌ای است. به طوری که هم تخصص فنی در چگونگی و دقت برداشت مهم است و هم تخصص میراثی در ارزش‌گذاری و رعایت ملاحظات گفتمانی حفاظت. لذا با عنایت به اینکه پژوهشگران اصلی در موضوع مورد بحث - به استناد نتایج بدست‌آمده- از حوزه تخصصی نقشه‌برداری و فتوگرامتری بوده‌اند و خبرگان مرتبط با گفتمان حفاظت، سهمی کمتر در این مسیر داشته‌اند؛ ضرورت دارد تا ضمن افزایش مشارکت حوزه‌های دانشی غیر از نقشه‌برداری خصوصاً متخصصان و پژوهشگران مرمت و معماری در فعالیت‌ها و پژوهش‌های مرتبط با فتوگرامتری میراث؛ گروه‌های مستندنگاری میراث با پذیرش، تاکید و حمایت نهادهای میراثی، از مشارکت متخصصان هر دو حوزه دانشی

منابع و مآخذ

- [1] Feyzolah beygi A. Applying geomatics sciences in creating, registering, documenting, and protecting historical and cultural heritage. The 22nd National Geomatics Conference: 2014: Tehran. Iran. [In Persian]
- [2] Alitajer S, Afshariyazad, S. [Investigating the Role of Geomatics Engineering in the Applications of Cultural Heritage, Archeology and Architecture]. pazhoheshha-ye Bastan shenasi Iran. 2014; 3(5): 169-195. [In Persian]
- [3] Kacyra B. Ancient Wonders Captured in 3D [Video]. TED Conferences. Available from: [Accessed 28th June 2024].
- [4] razani M, razani M, ranjbari A, amiri A. [A new reproduction of the Urartian cuneiform inscription of Seqindel, Varzghan, East Azerbaijan, Iran]. Language Studies. 2024; 15(1): 57-80. [In Persian] <https://doi.org/10.30465/lis.2023.47346.2164>
- [5] Cabrelles M, Galcera S, Navarro S, Lerma J. L, Akasheh T, Haddad N. Combining 3D laser scans, photogrammetry, and thermography to record historical works. Translated by Tayyaba Manaqbi. Journal of Surveying. 2011; (112): 28-33. [In Persian]
- [6] Hassani F. documentation of cultural heritage techniques, potentials, and constraints. 25th International CIPA Symposium: 2015, 31 August – 04 September: Taipei, Taiwan.
- [7] Daneshpoor moghadam A. Preparation of 3D model of historical monuments with the help of 3D laser scanner. Geomatics: 2009: Tehran, Iran. [In Persian]
- [8] Khanipardanjani H, Sadeghian S. Evaluation of aerial, ground, and manual laser scanner data in cultural heritage documentation. 1st National Conference on the Documentation of Natural & Cultural Heritage: 2019: Tehran, Iran. [In Persian]
- [9] Amiriazar E, Andaroodi E, Saadatseresht M, Soltani gerdafamarzi B. Documenting the facades of historical houses in Oudlajan neighborhood of Tehran by Close-range photogrammetry method: providing a solution to remove the limitation of removing reflective tiled coverings. 2nd National Conference on the Documentation of Natural & Cultural Heritage: 2019: Tehran, Iran. [In Persian]
- [10] Farrokhi S, Sadeghi V, Tahmouresi R. [Documenting Rural Architectural Heritage Using Close-Range Photogrammetry (Case Study: Sorkhay House Entrance, Ushtabin Village, East Azerbaijan)]. JHRE. 2021; 40 (175): 63-78. [In Persian]
- [11] Abbasi maleki N, Tasdighi S, Andaroodi E. Modeling the decorations of historical buildings using close-range photogrammetry (Muqrans, the north side of Masoudiyeh Mansion). 2nd National Conference on the Documentation of Natural & Cultural Heritage: 2019: Tehran, Iran. [In Persian]
- [12] Asadpour A. [Application of Historical Photos Photogrammetry in Documenting Destroyed Buildings (Case

پیش گفته تشکیل شوند تا نتیجه امر هم از نظر فنی و هم ملزومات میراثی کارآمدی حداکثری داشته باشد.

توسعه همکاری میان این دو گروه متخصص، امکان گسترش فعالیت‌ها و مطالعات در گستره‌های بزرگتر از بنا نظیر محوطه و بافت‌های میراثی را نیز تسهیل خواهد کرد و راه‌حلی برای موضوع عدم توجه جدی به این مقیاس در امر مستندنگاری - که در این پژوهش مورد شناسایی قرار گرفت- خواهد بود. اساسا مستندنگاری در مقیاس شهری و روستایی نیازمند تعامل میان دستگاهی و میان رشته‌ای است و بیش از پیش، همکاری جدی و نزدیک نهادهای نقشه‌برداری و میراث کشور را می‌طلبد.

در نهایت نهادهای میراثی کشور و در راس آن وزارت میراث، نباید از اهمیت برنامه‌های ترویجی و مطالعاتی مرتبط با میراث دیجیتال، غافل شوند؛ چنانچه نتایج این پژوهش نشان می‌دهد، از میان پژوهش‌های مرتبط با موضوع فتوگرامتری میراث، تنها ۲۰ درصد آنها با حمایت نهادهای اجرایی آنهم شهرداری‌ها و سازمان نقشه‌برداری کشوری تولید و منتشر شده است که از حضور و نقش ناچیز وزارت میراث فرهنگی و گردشگری و دیگر سازمان‌های تابعه به‌عنوان نهاد اصلی در این حوزه، حکایت می‌کند. به همین خاطر لازم است نهادهای میراثی کشور با برنامه‌ریزی و تخصیص اعتبارات لازم نسبت به حمایت از مستندنگاری دیجیتال چه در قالب رویدادهای ترویجی همچون برگزاری نشست‌ها و همایش‌ها و چه از طریق تعریف و پیش‌بینی از مطالعات و پژوهش‌های مرتبط سهم بیشتری در این حوزه ایفا کنند. در این صورت در کنار پیمودن گام‌هایی اصولی در مسیر حفاظت از میراث این مرز و بوم می‌توان به ایجاد پایگاه داده مجازی از کلیه آثار متنوع طبیعی و فرهنگی ایران در آینده‌ای نه چندان دور امیدوار بود.

مشارکت نویسندگان

این مقاله یک نویسنده دارد که مسئولیت کامل تمامی بخش‌های مقاله را برعهده داشته است.

تشکر و قدردانی

این مقاله حاصل طرح پژوهشی به شماره ط/۱۲۳۲۵ در دانشگاه بین‌المللی امام خمینی (ره) است که از تاریخ ۲۴ اردیبهشت ۱۴۰۳ آغاز شده و کماکان در جریان است. لازم می‌دانم از حمایت‌های صمیمانه همکاران دلسوزم در معاونت پژوهشی دانشگاه تشکر کنم. در ضمن از خانم‌ها سمانه ابی‌زاده دانشجوی کارشناسی ارشد دانشگاه هنر اصفهان و کیمیا بیاتی دانشجوی کارشناسی ارشد دانشگاه هنر ایران، که در شکل‌گیری این پژوهش و گردآوری بخشی از منابع پشتیبان همراهی داشتند، صمیمانه سپاسگزارم.

تعارض منافع

«هیچ‌گونه تعارض منافع توسط نویسنده بیان نشده است.»

- Deterioration Patterns]. KCR. 2022; 5(4): 12-19. URL: [In Persian]
- [25] Esmaeili F, Ebadi H, Mohammadzade A, Saadatseresht M. [Evaluation of Close-Range Photogrammetric Technique for Deformation Monitoring of Large-Scale Structures: A review]. JGST. 2019; 8(4): 41-55.
- [26] Ghodsi N, Nastaran M, Ghasemi V. [Socio-spatial Segregation in Iran: Systematic Review and Qualitative Meta-Analysis]. Motaleate Shahri. 2022; 11(44): 79-94. [In Persian] Doi:10.34785/J011.2022.175
- [27] Sabzekar H, Sadeghian S, Javadi M. Geomatics in modern researches of cultural heritage; Background, capabilities, and challenges. 2nd National Conference on the Documentation of Natural & Cultural Heritage: 2019: Tehran, Iran. [In Persian]
- [28] Farsimadan M, Hajizadeh Bastani K, Shahbazi Shiran H, Alizadeh Sola M. [The Application of Photogrammetry in Documentation of Inscriptions on Historical Monuments; New Photogrammetry Project in Allah Allah Dome in Sheikh Safi Al-Din Shrine Complex]. JRA. 2020; 6(2): 57-73. [In Persian] Doi: 10.52547/jra.6.2.57
- [29] Jafarzadeh H. The connection of photogrammetry with archeology and architecture and its application. The International Conference on Human, Architecture, Civil Engineering and City (ICOHACC 2015): 2015: Tabriz, Iran. [In Persian]
- [30] Sadeghian S, Khoshboresh Masooleh M. Evaluation of geometric processing of semi-automatic close-range photogrammetric images for accurately documenting historical objects with complex structure. 1st National Conference on the Documentation of Natural & Cultural Heritage: 2018: Tehran, Iran. [In Persian]
- [31] Rahimi Jafari F, Habibi F, Moazen S. [Introducing the Non-Destructive Method of Photogrammetry in the Study and Survey of Historical Monuments]. JRA. 2021; 7(2): 135-158. [In Persian] Doi:10.52547/jra.7.2.135
- [32] Hojatpanah Sh, Vafae Baneh B, Forsatkar E, Vafae Baneh K. Application of photogrammetry, virtual tour and information modeling for documenting cultural heritage (Taq Bostan case study). 3rd International Conference on Building Information Modeling (BIM): 2020: Tehran, Iran. [In Persian]
- [33] Sadeghian S, Sedighpoor D. Documenting historical monuments using UAV images to restore and determine buffer zones, case study: DolatAbad Castle. 1st National Conference on the Documentation of Natural & Cultural Heritage: 2018: Tehran, Iran. [In Persian]
- [34] Asadpoor A. Application of mobile photogrammetry in architectural documentation (studied example: Shiraz Koran gate tiling). National Conference on Architecture, Civil Engineering, Urban Development and Horizons of Islamic Art in Study: Saadieh Historical Mansion]]. Pazhoheshha-ye Bastan Shenasi Iran. 2023; 13(36): 355-383. [In Persian]
- [13] Baik A, Alitany A. From architectural photogrammetry toward digital architectural heritage education, ISPRS TC II Mid-term Symposium "Towards Photogrammetry 2020": 2018 June 4–7: Riva del Garda, Italy.
- [14] Marín-Buzón C, Pérez-Romero A, López-Castro J.L, Ben Jerbania I, Manzano-Agugliaro F. Photogrammetry as a New Scientific Tool in Archaeology: Worldwide Research Trends. Sustainability. 2021; 13, 5319. <https://doi.org/10.3390/su13095319>
- [15] Andaroodi E, Koulabadi A, Mehdizadeh Seradj F. [Recognizing Decorative Elements Taken from the West in Qajar Period Façades Using Close-Range Photogrammetric Technology: The Case of Window-Pediments in the Ahmad Shahi Pavilion]. Soffeh. 2023; 33(1): 119-137. [In Persian] Doi: 10.52547/sofeh.33.1.11
- [16] Zulfaghari M, Malian A. Surveying of historical buildings by close-range photogrammetry method. Surveying Conference 78: 1999: Tehran, Iran. [In Persian]
- [17] Hejazi M, Azizi A, Yazdkhasti M. Close-range photogrammetry and geometric patterns in Islamic architecture and discussion of symbolic concepts. 6th International Conference on Civil Engineering: 2005: Isfahan, Iran. [In Persian]
- [18] Remondino F, Toschi, I, Menna, F. A Critical Review of Automated Photogrammetric Processing of Large Datasets. 26th International CIPA Symposium: 2017, 28 August–01 September: Ottawa, Canada.
- [19] Sadeghian S, Rajabi A, Sedighpoor D. [3D modeling for documentation, restoration, and determination of the area of Dolatabad Castle in Qom using UAV images]. JGST. 2021; 10 (3): 229-241. [In Persian]
- [20] Adl S, Karimi A. [A look at the numerical (digital) and photogrammetric views of Zozen and Bastam]. Athar. 1998; 19(29, 30): 90-120. [In Persian]
- [21] Enayati H. [Protection of Cultural Works Using Digital Photogrammetry Methods]. Scientific-Research Quarterly of Geographical Data (SEPEHR). 1999; 8(32): 39-42. [In Persian]
- [22] Malian A. Photogrammetry in cultural heritage registration. Journal of Surveying. 2000; 43 (2 and 3). [In Persian]
- [23] Sargazi H, Malian A. The application of geospatial information engineering in documenting for national and global registration (case study: shahr-e-sookhteh). 1st National Conference on the Documentation of Natural & Cultural Heritage: 2018: Tehran, Iran. [In Persian]
- [24] Shirvani M, Zareiyan Jahromi S. [Damage Map of Rostam and Ashkboos Relief in Divan Khaneh Building Using Photogrammetry, Based on Illustrated Glossary on Stone

[44] Sajadi S. Y. The application of close-range digital photogrammetry in the documentation of Gorgan's defense wall (principles of maintenance, research, restoration, reconstruction, preservation, and revitalization of ancient monuments). 1st National Conference on the Documentation of Natural & Cultural Heritage: 2018: Tehran, Iran. [In Persian]

[45] Hemmati Z, Ebadi H, Hosseini Naveh Ahmadabadian A, Esmaeili F. [Presented a New Algorithm for Network Design and Path Planning It Captures Drone Modeling Purposes for Archaeological Sites]. Journal of Geomatics Science and Technology. 2017; 7(2): 167-180. [In Persian]

[46] Emami H, Rostami S. G. [Analysis and comparison of the exactness of specialist drone-based software products in urban and exurban regions]. Scientific- Research Quarterly of Geographical Data (SEPEHR). 2022; 31(123): 63-87. [In Persian] doi:10.22131/sepehr.2022.699908

[47] Samadzadegan F, Farzam F. Applying the proposed techniques in close-range digital photogrammetry to monitor changes in historical buildings. Geomatics 1383: 2007: Tehran, Iran. [In Persian]

[48] Mousavi V, Khosravi M, Ahmadi M, Noori N, Haghshenas S, Hosseini Naveh A, Varshosaz M. The performance evaluation of multi-image 3D reconstruction software with different sensors. Measurement. 2018; 120: 1-10. https://doi.org/10.1016/j.measurement.2018.01.058

the Second Step Statement of the Revolution: 2021: Tabriz, Iran. [In Persian]

[35] Samadzadegan F, Sarpoolaki M, Azizi A. Extraction of geometric information and digital modeling of "Ceshm-e-Ali" relief using close-range digital photogrammetry. Geomatics 1381: 2003: Tehran, Iran. [In Persian]

[36] Samadzadegan F, Azizi A, Sarpoolaki M. [Correcting the geometric structure of non-metric digital images in photogrammetry and computer vision to extract three-dimensional information of objects]. University College of Engineering. 2005; 38(6): 873-884. [In Persian]

[37] Rostami Javid R, Ebadi H, Esmaeili F. Evaluation of close-range photogrammetry and laser scanning methods in producing 3D models of ancient objects. The 2nd National Conference on Geospatial Information Technology: 2016: Tehran, Iran. [In Persian]

[38] Sharifi A, Malian A. Evaluating the efficiency of non-parametric geometric correction methods in images obtained from unmanned aerial vehicles (case study: the historical castle of Izad Khasvet city). 1st National Conference on the Documentation of Natural & Cultural Heritage: 2018: Tehran, Iran. [In Persian]

[39] Baghani A, Valadanzoj M. J, Mokhtarzadeh M. Preparation of large-scale cadastral maps of urban areas using UAV photogrammetry method. The First National Conference on Geospatial Information Technology: 2016: Tehran, Iran. [In Persian]

[40] Hemmati Z, Ebadi H, Hosseini Naveh Ahmadabadian A, Esmaeili F. Design and implementation of UAV-based photogrammetry network for modeling ancient sites. The first geospatial information technology engineering conference: 2015: Tehran, Iran [In Persian]

[41] Hemmati Z, Ebadi H, Hosseini Naveh Ahmadabadian A, Esmaeili F. UAV-based photogrammetry application in 3D modeling of ancient sites. 2nd National Geospatial Information Technology Engineering Conference: 2016: Tehran, Iran. [In Persian]

[42] Ghafarian asadast M, Molazemalhoseini M. K, Mehrpooya S. The use of close-range photogrammetry in the preparation of inscription maps and the production of 3D models of the artistic arrays of the Holy Shrine of Imam Reza. 1st National Conference on the Documentation of Natural & Cultural Heritage: 2018: Tehran, Iran. [In Persian]

[43] Zeynalpoor Asl M, Samadzadegan F, Dadras Javan F, Talebian M. H. [3D Modeling of Architectural Heritage Using UAV Photogrammetry. Case Study: Deir-e Gachin caravansary]. Journal of Fine Arts: Architecture & Urban Planning. 2022; 26(4): 61-73. [In Persian] Doi:10.22059/jfaup.2021.325822.672644

معرفی نویسنده

AUTHOR BIOSKETCHES



امیرمحمد معززی مهرطهران استادیار گروه مرمت و احیاء بناهای تاریخی در دانشکده معماری و شهرسازی دانشگاه بین‌المللی امام خمینی (ره) است. دکتری تخصصی خود را در رشته مرمت ابنیه و بافت‌های تاریخی از دانشگاه هنر اصفهان در سال ۱۳۹۵ دریافت

کرده است. ایشان دارای دو مدرک کارشناسی ارشد در رشته‌های مرمت بناها و بافت‌های تاریخی، گرایش میراث معماری و شهرسازی، گرایش برنامه‌ریزی شهری و منطقه‌ای است که به ترتیب از دانشگاه‌های تهران و هنر اصفهان اخذ کرده است. حوزه‌های تخصصی، پژوهشی و اجرایی وی بیشتر بر محور موضوعاتی چون باززنده‌سازی میراث معماری و شهری، مدیریت میراث فرهنگی، و مستندنگاری دیجیتال میراث متمرکز است.

Moazezi Mehr-e-Tehran, A. M., Assistant Professor at the Department of Architectural Heritage Conservation, Faculty of Architecture and Urbanism, Imam Khomeini International University, Qazvin, Iran.

✉ a.moazezi@arc.ikiu.ac.ir

Citation (Vancouver): Moazezi Mehr-e-Tehran A.M. [Photogrammetry, Modern Technology in Cultural Heritage Documentation: A Systematic Review of Related Research in Iran]. *J. RS. GEOINF. RES.* 2025; 3(1): 103-118



<https://doi.org/10.22061/jrsg.2025.11559.1087>



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

Evaluation of Parameters Affecting Aerotriangulation Accuracy in Corridor Mapping

M. Ahmadi Asoor, A. Afary*, E. Ghanbari Parmehr

Department of Geomatics, Faculty of Civil Engineering, Babol Noshirvani University of Technology, Babol, Iran

ABSTRACT

Received: 15 January 2025
 Reviewed: 18 February 2025
 Revised: 05 May 2025
 Accepted: 22 May 2025

KEYWORDS:

UAV photogrammetry
 Corridor mapping
 Ground control point
 Camera calibration
 Triangulation

* Corresponding author

✉ afary@nit.ac.ir

☎ (+98912) 2894189

Background and Objectives: Using UAV photogrammetry for corridor mapping in areas with significant differences between their longitudinal and lateral dimensions reduces the geometric strength of the imaging network and introduces numerous challenges. These challenges in UAV photogrammetry lead to increased project time and costs, as well as higher errors in triangulation calculations. Several parameters—such as the distribution and number of ground control points, camera calibration methods, the number of flight strips, and the use of precise camera positions obtained from the Global Navigation Satellite System (GNSS)—affect triangulation accuracy. This study examines the impact of these parameters on triangulation accuracy in corridor areas.

Methods: The evaluation of parameters affecting triangulation accuracy was conducted on two corridor areas with lengths of two and a half and five kilometers. In this research, three parameters—distribution and number of ground control points, camera calibration methods, and photogrammetry software—were examined on a single flight strip, and multiple flight strips were used solely to evaluate the impact of the number of flight strips on triangulation accuracy. The results were assessed based on the root mean square errors of planimetric and altimetric errors at the check points. In this study, the photogrammetry software Pix4D and Agisoft Metashape were used for triangulation calculations.

Findings: The evaluation results regarding the impact of the distribution and number of control points showed that using eight control points—distributed as follows: two points at the beginning, two points at the end, two in the middle of the corridor (all opposite each other across the width), and two additional points in between—can improve triangulation accuracy compared to other configurations. Additionally, using the self-calibration method for the camera in triangulation calculations yields more accurate results than using pre-calibrated cameras. Moreover, employing more than one flight strip increases the accuracy of triangulation results.

Conclusion: By appropriately designing ground control points throughout the entire corridor and applying the self-calibration method for camera calibration—without relying on precise image center coordinates—it is possible to achieve an accuracy of less than one meter for producing engineering maps at scales of 1:500, 1:1000, and 1:2000, with contour intervals of 0.5 meters, 1 meter, and 2 meters, respectively.



NUMBER OF REFERENCES

34



NUMBER OF FIGURES

15



NUMBER OF TABLES

12

مقاله پژوهشی

ارزیابی پارامترهای موثر بر دقت مثلث‌بندی هوایی در نقشه برداری از مناطق راهگذر

مبینا احمدی آسور، علیرضا آفری^{*}، عبادت قنبری پرمهر

گروه مهندسی نقشه‌برداری، دانشکده عمران، دانشگاه صنعتی نوشیروانی بابل، بابل، ایران

چکیده

پیشینه و اهداف: استفاده از فتوگرامتری پهپاد در نقشه‌برداری راهگذر از مناطقی که تفاوت زیاد بین بعد طولی و عرضی آن وجود دارد موجب پایین آمدن استحکام هندسی شبکه تصویربرداری و چالش‌های متعددی می‌شود. بروز این چالش‌ها در فتوگرامتری پهپاد، موجب افزایش زمان و هزینه‌ی انجام پروژه و همچنین، افزایش خطا در محاسبات مثلث‌بندی خواهد شد. پارامترهای متعددی مانند نحوه توزیع و تعداد نقاط کنترل زمینی، نحوه‌ی کالیبراسیون دوربین، تعداد نوارهای پروازی و استفاده از موقعیت‌های دقیق دوربین بدست آمده از سامانه تعیین موقعیت جهانی ماهواره‌ای (GNSS)، بر دقت مثلث‌بندی تأثیر گذارند. در این تحقیق، تأثیر این پارامترها بر دقت مثلث‌بندی در مناطق راهگذر مورد بررسی قرار گرفته است.

روش‌ها: ارزیابی پارامترهای موثر بر دقت مثلث‌بندی در این تحقیق بر روی دو محدوده‌ی راهگذر با طول‌های دو و نیم و پنج کیلومتر انجام شده است. در این تحقیق سه پارامتر توزیع و تعداد نقاط کنترل زمینی، نحوه‌ی کالیبراسیون دوربین و نرم‌افزار فتوگرامتری بر روی یک نوار پروازی بررسی شده و تنها برای بررسی تأثیرگذاری تعداد نوار پروازی بر دقت مثلث‌بندی از چندین نوار پروازی استفاده شده است. ارزیابی نتایج به دست آمده بر اساس جذر میانگین مربعات خطاهای مسطحاتی و ارتفاعی در نقاط چک انجام گرفت. در این تحقیق، از نرم‌افزار فتوگرامتری Agisoft Metashape و Pix4D برای محاسبات مثلث‌بندی بهره گرفته شده است.

یافته‌ها: نتایج ارزیابی‌ها در بررسی تأثیرگذاری توزیع و تعداد نقاط کنترل نشان داد که در صورت استفاده از هشت نقطه کنترل با توزیع دو نقطه در ابتدا، دو نقطه در انتها، دو نقطه در میانه راهگذر و همگی به صورت روبروی هم در عرض راهگذر و نیز دو نقطه دیگر در بین آنها، می‌تواند دقت نتایج در محاسبات مثلث‌بندی نسبت به دیگر حالت‌ها را بهبود دهد. همچنین، استفاده از روش سلف-کالیبراسیون دوربین در محاسبات مثلث‌بندی منجر به نتایج دقیق‌تری نسبت به حالت محاسبات مثلث‌بندی با استفاده از دوربین از پیش کالیبره شده می‌گردد. علاوه بر این، استفاده از بیش از یک نوار پروازی نیز منجر به افزایش دقت در نتایج مثلث‌بندی خواهد شد.

نتیجه‌گیری: با طراحی مناسب نقاط کنترل زمینی در کل منطقه راهگذر و با استفاده از روش سلف-کالیبراسیون دوربین در محاسبات مثلث‌بندی پروژه‌های فتوگرامتری پهپاد از مناطق راهگذر و بدون استفاده از مختصات دقیق مراکز تصویر، می‌توان به دقت زیر نیم متر جهت تهیه نقشه‌های مهندسی ۱:۵۰۰، ۱:۱۰۰۰ و ۱:۲۰۰۰ به ترتیب با منحنی میزان‌های نیم متری، یک متری و دو متری دست یافت.

تاریخ دریافت: ۲۶ دی ۱۴۰۳

تاریخ داوری: ۳۰ بهمن ۱۴۰۳

تاریخ اصلاح: ۱۵ اردیبهشت ۱۴۰۴

تاریخ پذیرش: ۰۱ خرداد ۱۴۰۴

واژگان کلیدی:

فتوگرامتری پهپاد

نقشه‌برداری راهگذر

نقطه کنترل زمینی

کالیبراسیون دوربین

مثلث‌بندی

^{*} نویسنده مسئول

afary@nit.ac.ir

۰۹۱۲-۲۸۹۴۱۸۹ ①

مقدمه

مدل سه بعدی ارتفاعی و رقومی، ابر نقاط، پروفیل طولی، نقشه و ارتوفتو را تولید کرد [۳، ۴]. سطح دقت مورد نیاز برای خروجی تولیدات پهپاد بر حسب هر پروژه مشخص می‌شود. با تنظیم و تعیین برخی پارامترها قبل از پرواز، در حین پرواز و در حین پردازش می‌توان به نتایجی با کیفیت و با دقت زیر ۰/۱۰ متر برای تهیه نقشه‌های ۱:۵۰۰ رسید. این پارامترها شامل، پارامترهای طراحی پرواز با توجه به توپوگرافی منطقه مانند میزان پوشش طولی و عرضی و تعداد نوار پرواز، ارتفاع پرواز از سطح زمین، زاویه دید و فاصله‌ی کانونی دوربین و تعداد و توزیع نقاط کنترل و نیز شرایط محیطی مانند سرعت باد و شرایط آب و هوایی، اطمینان داشتن از صحت و سلامت پهپاد می‌باشد [۲، ۵]. اگر شرایط ذکر شده مناسب باشند اپراتور در پردازش داده‌های تصویری اخذ شده از منطقه مورد نظر می‌تواند به دقت ارتفاعی و مسطحاتی بالایی برسد [۵، ۶].

در دهه‌ی اخیر با پیشرفت صنعت تولید پهپاد (پرنده‌ی هدایت پذیر از دور)، استفاده از این سامانه‌ها به عنوان سکوی تصویر برداری رشد پیدا کرده. از این رو با رشد این صنعت، پهپادها به عنوان راهکاری کارآمد و کاربردی از لحاظ دقت، زمان و هزینه مطرح شده است [۱]. نقشه‌برداری با استفاده از پهپاد برخلاف فتوگرامتری با استفاده از هواپیمای با سرنشین و نیز نقشه‌برداری زمینی، محدودیتی برای استفاده در مناطق صعب‌العبور مانند مناطقی با شیب زیاد، دره و مناطق مین‌گذاری شده، ندارد و می‌تواند با صرف هزینه‌ی کم در مدت زمان کمتری نسبت به بقیه روش‌ها، محصولاتی با دقت و کیفیت بالا تولید کند. [۲]. در فتوگرامتری پهپاد، با جمع‌آوری اطلاعات تصویری که پهپاد از سطح زمین اخذ می‌کند و با پردازش این اطلاعات در نرم‌افزارهای تخصصی فتوگرامتری، می‌توان انواع محصولات داده‌های مکانی مانند:

حداقل تعداد نقاط کنترل زمینی، به دقت و صحت قابل اطمینان در نقشه تهیه شده از تصاویر پهپاد رسید [۸، ۹].

اسکارلاتوس (Skarlatos) و همکاران، تعداد و توزیع نقاط کنترل را در پنج حالت بررسی کردند. نتیجه بررسی آنها، دو برابر بودن خطای ارتفاعی نسبت به خطای مسطحاتی به دلیل هندسه‌ی طولی پروژه بود. همچنین، دقت ارتفاعی و مسطحاتی در حالتی که تمام نقاط کنترل و چک در فاصله‌ای یکسان نسبت به یکدیگر قرار گرفته بودند بهتر از توزیع‌های دیگر بوده است [۱۰]. در مطالعه‌ی هاروین (Harvin) و همکاران [۱۱] توزیع تعداد چهل و هفت نقطه کنترل و چک را بررسی کردند. نتایج مطالعه، افزایش دقت مثلثبندی نقاط کنترل و چک با توزیع مناسب در محیط پروژه با تعداد نقطه کنترل بیشتر نشان داد. جلود (Jaud) و همکاران در مطالعه‌ی [۱۲] تأثیرگذاری تعداد و توزیع نقاط کنترل بر روی منطقه راهگذر را بررسی کردند. آنها نشان دادند که دقت مثلثبندی، زمانی که توزیع نقاط کنترل در طول راهگذر به صورت یکنواخت باشد و از تصاویر مایل و قائم برای پردازش استفاده شود، نسبت به دیگر حالت‌های پردازش افزایش می‌یابد. در مطالعه‌ی توسط گونزالس (Gonzalez) و همکاران [۲]، چهار پرواز به طول ۵۲۵ متر در دو نوار پروازی (یک رفت و یک برگشت) به همراه اندازه‌گیری چهل و هفت نقطه کنترل در طول راهگذر انجام شد. آنها دریافتند که در همه حالات مورد آزمایش، با افزایش تعداد نقطه کنترل و چک، دقت مثلثبندی افزایش می‌یابد و بهترین نتیجه زمانی حاصل شد که نقاط کنترل به صورت زیگزاگی با فواصل یکسان از یکدیگر قرار گرفته باشند. در مطالعه‌ی سامارتانو (Samartano) و همکاران [۱۳] تعداد و توزیع نقاط کنترل را در دو حالت مورد ارزیابی قرار دادند. در حالت اول سی و پنج نقطه کنترل و ده نقطه چک و در حالت دوم، سه نقطه کنترل و چهل و دو نقطه چک استفاده شد. نتیجه پردازش آنها، افزایش دقت و کیفیت بصری محصولات تولید شده با نقاط کنترل بیشتر را نشان داد. در مطالعه‌ی سانتوز (Santos) و همکاران [۱۴] تأثیر تعداد و توزیع نقاط کنترل در دقت مثلثبندی را ارزیابی کردند. آنها در یک عملیات فتوگرامتری نقاط کنترل را در حالت‌های مختلف توزیع کردند و در هر حالت توزیع، تعداد نقاط کنترل را تغییر دادند. بعد از پردازش تصاویر، نتیجه پردازش را این گونه بیان کردند که کارآمدترین حالت برای افزایش دقت مثلثبندی زمانی است که نقاط در یک فاصله تقریباً همگن نسبت به یکدیگر پخش شده باشند. آنها همچنین، بیان کردند که با افزایش تعداد نقطه کنترل دقت مثلثبندی افزایش می‌یابد. در مطالعه‌ی حیدری و همکاران [۱۵] تعداد و نحوه توزیع نقاط کنترل در سراسر محدوده پروژه و شیوه تصویربرداری بهینه در تولید خروجی داده‌های پهپاد (ابر نقطه، مدل سه بعدی، نقشه) را طی شش پرواز ارزیابی کردند. در این مطالعه از هجده نقطه کنترل و هفت نقطه چک استفاده شد. نتایج حاصل از این مطالعه دقت مسطحاتی بالاتری را نسبت به دقت ارتفاعی نشان داد و علی‌رغم اینکه وجود مشاهدات مختصات مرکز تصویر با استفاده از سامانه تعیین موقعیت جهانی باعث

نقشه‌برداری راهگذر در کاربردهایی نظیر برداشت جاده‌ها و راه‌ها، خطوط ریلی، آبریزها (رودخانه، خط ساحلی)، کانال‌ها و خطوط انتقال (برق، گاز، آب، نفت) مورد استفاده قرار می‌گیرد. نقشه‌برداری با پهپاد این مزیت را به همراه دارد که اپراتور با سرعت بالاتر و زمان کمتر به تصاویر منطقه دسترسی خواهد داشت [۲، ۴]. یکی از انواع نقشه‌هایی که به صورت هوایی تهیه می‌شوند، نقشه‌های راهگذر می‌باشند که با استفاده از پهپاد انجام می‌گیرد. نقشه‌برداری راهگذر با پهپاد فرآیندی است که در آن پهپاد، اطلاعات جغرافیایی از یک مسیر یا راهگذر را تصویربرداری می‌کند [۷]. وجود تفاوت زیاد در بعد طولی مناطق راهگذر نسبت به بعد عرضی آنها، موجب تفاوت در طراحی پارامترهای پرواز مانند توزیع و تعداد نقاط کنترل، تعداد نوار پرواز، میزان همپوشانی تصاویر می‌شود. در نقشه‌برداری با پهپاد به صورت راهگذر به دلیل طولانی بودن نوار پرواز و طراحی پرواز در منطقه با عرضی اندک، خطای ناشی از تجمع خطای کالیبراسیون دوربین، در انتهای پرواز ایجاد می‌شود. برای کاهش این خطا دو راه حل توزیع متراکم نقاط کنترل و افزایش دقت پارامترهای توجیه خارجی دوربین پیشنهاد شده است [۲]. یکی دیگر از چالش‌هایی که نقشه‌برداران در عملیات پهپاد با آن مواجه می‌شوند، قطع ارتباط بین پهپاد و سامانه موقعیتیابی ماهواره‌ای است. بروز این مشکل، باعث می‌شود که مختصات مراکز تصویر یا ژئوتگ (Geotag) پهپاد که به عنوان مشاهدات اضافی مورد استفاده قرار گیرند، ثبت نشوند. این مشکل در مناطق راهگذر واقع در دره‌ها بیشتر رخ می‌دهد. از دیگر چالش‌ها در تصویربرداری از مناطق راهگذر می‌توان به عدم امکان تصویربرداری با پوشش عرضی مناسب به دلایلی مانند عرض کم محدوده پرواز در نواحی باریک مانند دره‌ها اشاره کرد که منجر به کاهش تعداد نوار پروازی و پوشش عرضی می‌شود. در صورت بروز این مسائل و چالش‌ها، عملیات فتوگرامتری پهپاد، زمان‌بر بوده و هزینه‌ی مضاعفی را ایجاد می‌کند.

مرور پژوهش‌های پیشین

عوامل متعددی بر دقت مثلثبندی تأثیرگذار هستند که از جمله این عوامل می‌توان به تعداد و توزیع نقاط کنترل زمینی، دوربین مورد استفاده در عملیات تصویربرداری، نحوه‌ی کالیبراسیون و پارامترهای کالیبراسیون، ادغام تصاویر مایل و قائم، تعداد نوار پروازی و میزان همپوشانی طولی و عرضی تصاویر، ارتفاع و سرعت پرواز پهپاد، و نیز نرم‌افزار فتوگرامتری مورد استفاده اشاره کرد. نقاط کنترل زمینی، نقایب با مختصات زمینی معلوم و دقیق هستند که جهت زمین مرجع کردن تصاویر و سایر محصولات فتوگرامتری مورد استفاده قرار می‌گیرند. تعداد و نحوه توزیع نقاط کنترل زمینی در محاسبات مثلثبندی تأثیر بسیار زیادی دارد. اندازه‌گیری نقاط کنترل زمینی مرحله‌ای پرهزینه و زمان‌بر در عملیات فتوگرامتری پهپاد می‌باشد. بنابراین، محققان در تلاش‌اند تا روش‌هایی را توسعه دهند تا بتوان بدون استفاده از این نقاط و یا با

نرم افزار Pix4D بیشتر از دیگر نرم افزارها بوده است. برخلاف Pix4D، نرم افزار 3DSurvey با مدت زمان پردازشی دو برابر بیشتر و دقتی تقریباً مشابه با Pix4D، تعداد نقاط متراکم کمی تولید کرد. در نهایت از لحاظ دقت و مدت زمان پردازشی نرم افزار Pix4D از بقیه نرم افزارها بهتر عمل کرده و از لحاظ تعداد نقاط تولید شده در ابر نقطه متراکم، 3DSurvey کمترین تعداد نقطه در ابر نقطه متراکم را تولید کرده است. در مطالعه‌ای [۲۹] بارباسوکیز (Barbasiewicz) و همکاران، ۱۲۶ تصویر را در دو نرم افزار Agisoft Metashape و Pix4D پردازش کردند. نتیجه پردازش آنها نشان داد که در هر دو نرم افزار مقدار خطا تقریباً یکسان بوده و ابر نقطه تولید شده در هر دو نرم افزار در حالتی که دقت پردازش بالا و متوسط باشد، فرق چندانی نداشته و تفاوت تنها در زمان محاسبه آنها می‌باشد. اما ابر نقطه‌ای که با دقت کم در نرم افزار Agisoft Metashape پردازش شد، دارای کیفیت بصری بهتری نسبت به ابر نقطه پردازش شده در دیگر نرم افزارها بوده است.

تاثیرگذاری پارامترهای توزیع و تعداد نقاط کنترل زمینی، کالیبراسیون دوربین و نرم افزار فتوگرامتری بر دقت مثلث‌بندی به صورت جداگانه در نقشه‌برداری با پهپاد از مناطق راهگذر در تحقیق‌های مختلف و در حالت معلوم بودن مختصات دقیق مراکز دوربین مورد مطالعه قرار گرفته است. اما هنوز ابهاماتی در تاثیرگذاری این پارامترها بر دقت مثلث‌بندی در مناطق راهگذر وجود دارد که به طور کامل بررسی نشده‌اند. در این مقاله تاثیرگذاری پارامترهای توزیع و تعداد نقاط کنترل، کالیبراسیون دوربین و نرم افزار فتوگرامتری در دقت مثلث‌بندی در شرایط چالشی تک نوار پروازی و استفاده از تصاویر بدون پارامترهای توجیه خارجی دقیق و نیز تاثیرگذاری تعداد نوارهای پروازی بر دقت مثلث‌بندی بدون استفاده از مختصات دقیق مراکز دوربین در لحظه اخذ تصاویر به طور کامل بررسی خواهند شد.

مواد و روش پژوهش

– محدوده‌ی مورد مطالعه و داده‌ها

محدوده‌ی راهگذر مورد مطالعه در این تحقیق شامل دو محدوده از رودخانه تالار در استان مازندران است. محدوده‌ی اول واقع در مختصات جغرافیایی N: 66444 m و E: 4033691 m و در زون N39 به طول پنج کیلومتر و عرض حدود ۳۵۰ متر می‌باشد. محدوده‌ی دوم نیز در مختصات جغرافیایی N: 665766 m و E: 4029258 m و در زون N39 به طول دو و نیم کیلومتر و عرض حدود ۳۵۰ متر قرار دارد. هر دو منطقه‌ی مطالعاتی علاوه بر رودخانه، دارای بافت گیاهی و تپه ماهور و بافت شهری نیز می‌باشند (شکل ۱). داده‌های تصویری این دو منطقه که در این مقاله از آنها استفاده شده است بخشی از داده‌های تصویری یک پروژه بزرگتر می‌باشند که در اینجا از آن به عنوان پروژه مرجع یاد خواهد شد. تصاویر این پروژه با استفاده از پهپاد Phantom 4 Pro (۲) برداشت شده‌اند که دوربین آن از نوع FC6310 با قدرت تفکیک ۲۰ مگا پیکسل بوده و سنسور آن از نوع CMOS با فاصله کانونی ۸/۸

بهیود دقت محصولات فتوگرامتری و افزایش سرعت و کاهش هزینه عملیات پروژه شده اما همچنان خطاهای سیستماتیک و غیر سیستماتیکی وجود دارند که برای کاهش این خطاها وجود حداقل یک نقطه کنترل در سطح پروژه الزامی است.

در مطالعه‌ی [۱۱] هاروین و همکاران محاسبات فتوگرامتری را با دو حالت کالیبراسیون دوربین به صورت سلف-کالیبراسیون و استفاده از دوربین کالیبره شده انجام دادند. نتایج مطالعه آنها نشان داد که مثلث‌بندی با استفاده از روش خود واسنجی دقت بهتری نسبت به حالت استفاده از دوربین کالیبره شده خواهد داشت. در مطالعه‌ی [۱۶] عرفان زاده و سعادت‌سرشت تأثیر روش‌های کالیبراسیون بر روی کیفیت مدل سه بعدی را بررسی کردند. نتیجه‌ی این مطالعه، دقت بالای روش سلف-کالیبراسیون را نسبت به روش استفاده از دوربین کالیبره شده در دقت نهایی مدل سه بعدی نشان می‌دهد. در مطالعه‌ی [۱۷] شهبازی و همکاران تأثیر پارامترهای قرائت عکسی، توپوگرافی نقاط کنترل و قابلیت دید و کیفیت رادیومتریکی تصاویر بر روی کیفیت هندسی مدل سه بعدی را مورد بررسی قرار داده‌اند. آنها نشان دادند که دقت کالیبراسیون در صورت قرائت تارگت‌ها در تصاویر به صورت اتوماتیک نسبت به حالتی که به صورت دستی توسط اپراتور استخراج شوند، بالاتری خواهد بود. در مطالعه‌ی [۱۸] ورشوساز و عباس‌پور تأثیرگذاری توزیع نقاط کنترل در دقت پارامترهای کالیبراسیون را بررسی کردند. آنها بیان کردند که تمرکز نقاط در نواحی مرکزی تصاویر اخذ شده برای انجام عملیات با دوربین کالیبره شده، دقت تعیین پارامترهای خارجی و داخلی دوربین را بالا می‌برد اما صحت این پارامترها مورد تأیید نمی‌باشند. در مقابل، در صورت وجود پراکندگی یکنواخت نقاط در سطح تصویر، با وجود دقت نه چندان بالا در تعیین پارامترهای کالیبراسیون، صحت آنها کاملاً قابل قبول و قابل اعتماد می‌باشد.

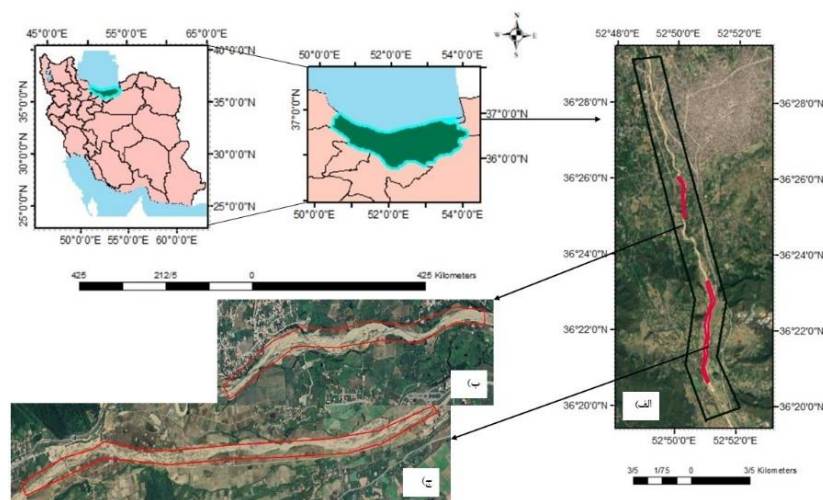
از دیگر پارامترهایی که بر دقت مدل سه بعدی و پارامترهای مثلث‌بندی تأثیر می‌گذارد، نرم افزار مورد استفاده برای پردازش تصاویر می‌باشد. در دهه اخیر نرم افزارهای مختلف فتوگرامتری تولید و توسعه داده شده‌اند که از معروف‌ترین آنها می‌توان به UasMaster [۱۹]، Agisoft Metashape [۲۰]، PhotoModeler [۲۱]، ContextCapture [۲۲]، و 3DSurvey [۲۳] اشاره کرد. در مطالعه‌ی [۲۴] بروکاس (Brucas) و همکاران دو نرم افزار تخصصی فتوگرامتری Pix4D [۲۵] و PhotoMod [۲۶] مورد بررسی قرار گرفتند. در این مطالعه مهم‌ترین تفاوت این دو نرم افزار نسبت به هم وجود قابلیت خود کالیبراسیون در نرم افزار Pix4D اعلام شده است. در Pix4D توجیه تصاویر نسبت به هم به صورت کاملاً اتوماتیک انجام می‌شود اما در PhotoMod برخی از فرآیندها باید به صورت دستی یا نیمه اتوماتیک انجام شود. در مطالعه‌ی [۲۷] علیدوست و عارفی چهار نرم افزار 3DSurvey، Agisoft Metashape، Pix4D و SURE [۲۸] را بررسی کردند. نتایج حاصل در این مطالعه، صرف زمان پردازشی کم و دقت مثلث‌بندی بالا در نرم افزار Pix4D نسبت به دیگر نرم افزارها را نشان داد. همچنین، تعداد نقاط تولید شده در ابر نقاط

تصویر بوده که با پوشش طولی حدود ۸۰ درصد و پوشش عرضی حدود ۶۰ درصد اخذ شده‌اند. ارتفاع متوسط پرواز از سطح منطقه در حین پرواز در حدود ۱۵۰ متر بوده است. در این پروژه از ۶ نقطه کنترل زمینی که دقت آنها در حدود ۲ سانتیمتر بوده، استفاده شده است. پردازش پروژه‌ی مرجع با سطح پردازش تصاویر متوسط در نرم‌افزار Agisoft Metashape استفاده شد. منظور از سطح پردازش تصویر، انجام محاسبات فتوگرامتری با نصف اندازه واقعی تصاویر می‌باشد. جدول (۱) مشخصات کلی پروژه مرجع و جدول (۲) نیز پارامترهای کالیبراسیون دوربین را که از طریق روش سلف-کالیبراسیون در حین محاسبات مثلث‌بندی بدست آمده‌اند را نشان می‌دهد. محدوده‌ی پروژه‌ی مرجع در شکل (۱-الف) نشان داده شده است.

میلیمتر می‌باشد. تعداد تصاویر در محدوده‌ی دو و نیم کیلومتری، ۴۵۸ تصویر و در محدوده پنج کیلومتری، ۱۱۵۱ تصویر می‌باشد.

- پروژه‌ی مرجع

پروژه‌ی مرجع دارای تصویری با ژئوتگ دقیق بوده که در چهار نوار پروازی و با استفاده از پهپاد Phantom 4 Pro تصویربرداری شده است. مختصات مراکز این تصاویر از طریق عملیات سامانه تعیین موقعیت جهانی (Global navigation satellite System) GNSS و به صورت محاسبات کینماتیک پس پردازش (Post Process Kinematics) PPK محاسبه شده‌اند که دقت آنها در حدود ۲ سانتیمتر می‌باشد. تصویربرداری از این پروژه به صورت راهگذر و در طول ۲۰ کیلومتر و عرض حدود ۳۵۰ متر انجام شده است. تعداد تصاویر این پروژه ۳۹۰۰



شکل ۱: منطقه‌ی مورد مطالعه (رودخانه تالار). الف) پروژه‌ی مرجع. ب) محدوده‌ی اول. ج) محدوده‌ی دوم.

Fig. 1: Study Area (Talar River). a) Reference Project. b) First Area. c) Second Area.



شکل ۲: پهپاد Phantom 4 Pro

Fig. 2: Phantom 4 pro UAV

جدول ۱: مشخصات پروژه‌ی مرجع

Table 1: Reference Project Specifications

۳۹۰۰ تصویر (3900 images)	تعداد تصاویر (Number of images)
۲۰ کیلومتر (20 km)	طول محدوده (Length of the area)
۸۰ درصد طولی و ۶۰ درصد عرضی (lengthwise and 60% widthwise %80)	پوشش تصاویر (Image coverage)
Metashape	نرم‌افزار مورد استفاده برای پردازش (Software used for processing)
متوسط (Meduim)	سطح پردازش تصاویر (Level of image processing)
خود-واسنجی (Self-calibration)	نوع کالیبراسیون (Type of calibration)
۱۵۰ متر (150 meters)	ارتفاع متوسط پرواز (Average flight altitude)
۶ نقطه (6 points)	تعداد نقاط کنترل زمینی (Number of ground control points)
۲ سانتیمتر (2 centimeters)	دقت نقاط کنترل زمینی (Accuracy of ground control points)

جدول ۲: مقادیر پارامترهای کالیبراسیون دوربین در پروژه‌ی مرجع
Table 2: Calibration Parameters Values for the Reference Project

f: 3636.71936	فاصله کانونی (میلی‌متر) Focal length (mm)
cx: 37.977 cy: 40.3151	مختصات نقاط اصلی (میلی‌متر) Coordinates of main points (millimeters)
k1:- 0.00551217 k2: 0.0039673 k3:- 0.00490452	پارامترهای اعوجاج شعاعی Radial distortion parameters
p1: 0.00384787 p2: 0.00633808	پارامترهای اعوجاج مماسی Tangential distortion parameters

دوربین، نرم‌افزار فتوگرامتری مورد استفاده برای انجام محاسبات و پردازش‌های فتوگرامتری و تعداد نوار پروازی. اغلب این بررسی‌ها بر روی یک حالت چالشی انجام شده است که داده‌های تصویری شامل تنها یک نوار پروازی (فقط رفت) بوده و در پردازش آنها از مختصات دقیق مراکز تصویر استفاده نشده است. برای این منظور سناریوهای متعددی طراحی شده است که در ادامه مشخصات هر کدام از آنها بیان می‌شود.

○ بررسی تاثیرگذاری تعداد و توزیع نقاط کنترل بر دقت مثلث‌بندی یکی از مهم‌ترین پارامترهای تاثیرگذار در دقت مثلث‌بندی، تعداد، نحوه‌ی توزیع و دقت نقاط کنترل موجود در پروژه فتوگرامتری است [۳۰]. به همین منظور، دوازده سناریوی مختلف در هر دو محدوده‌ی راهگذر دو و نیم و پنج کیلومتری به صورت تک نوار طراحی و ایجاد شدند. محاسبات مثلث‌بندی فتوگرامتری در سناریوهای طراحی شده با هدف بررسی تاثیرگذاری این پارامتر بر دقت مثلث‌بندی به دو حالت انجام می‌گردد:

- حالت اول: بدون استفاده از مختصات دقیق مراکز تصویر. در این حالت با هدف بررسی میزان دقت‌های به دست آمده در مثلث‌بندی که در آن تنها از نقاط کنترل زمینی استفاده شده است اطلاعات دقیق مراکز تصویر از متادیتای تصاویر پاک شده و تصاویر بدون هیچ گونه اطلاعات توجیه خارجی در پروژه وارد شده و محاسبات مثلث‌بندی تنها با استفاده از نقاط کنترل زمینی انجام می‌شود.

- حالت دوم: با استفاده از مختصات دقیق مراکز تصویر. در این حالت با هدف بررسی میزان بهبود و تاثیرگذاری مختصات دقیق مراکز دوربین در محاسبات مثلث‌بندی، این اطلاعات نیز در محاسبات مورد استفاده قرار گرفتند.

○ سناریوهای مختلف طراحی شده به منظور ارزیابی تاثیرگذاری پارامترهای مختلف بر روی دقت مثلث‌بندی، در هر دو محدوده‌ی راهگذر، دوازده سناریوی مختلف با تعداد و توزیع نقاط کنترل متفاوت طراحی شد. جدول (۳) تعداد نقاط کنترل و چک در سناریوهای طراحی شده را نشان می‌دهد. فاصله بین نقاط کنترل و چک مورد استفاده در این سناریو ۶۰۰ متر و ۱۲۰۰ متر بوده است.

شکل‌های (۳) و (۴) به ترتیب نحوه توزیع نقاط کنترل و چک در محدوده‌ی اول و دوم را نشان می‌دهند. در سناریوهای اول تا هشتم، ده نقطه به صورت کنترل یا چک استفاده شده است (نقاط کنترل با رنگ قرمز و نقاط چک با رنگ سبز نشان داده شده‌اند):

○ سناریو اول: برای سناریوی اول، دو نقطه کنترل در ابتدا، دو نقطه کنترل در مرکز و دو نقطه کنترل در انتهای راهگذر با فاصله ۶۰۰ متر و ۱۲۰۰ متر از هم به ترتیب در محدوده راهگذر اول و دوم طراحی شد. همچنین، به منظور ارزیابی دقت مثلث‌بندی چهار نقطه چک در بین نقاط کنترل نیز در نظر گرفته می‌شوند.

○ مشخصات داده‌های محدوده اول

محدوده‌ی اول، راهگذر به طول دو و نیم کیلومتر و عرض ۳۵۰ متر می‌باشد که با ۴۵۸ تصویر پوشش داده شده است. این محدوده دارای چهار نوار پرواز با پوشش طولی ۸۰ درصد و عرضی ۶۰ درصد بین تصاویر می‌باشد. محدوده‌ی اول در اغلب بررسی‌ها به صورت چالشی و در یک نوار پروازی و با ۱۰۳ تصویر مورد پردازش قرار گرفته است و تنها در بررسی تاثیرگذاری تعداد نوارهای پرواز بر دقت مثلث‌بندی، از تمام تصاویر پوشش دهنده هر چهار نوار پروازی استفاده می‌شود. محدوده‌ی اول دارای ده نقطه کنترل و چک است که با توجه به محدودیت اخذ نقاط به صورت زمینی، این نقاط به صورت نقشه مبنا و در محیط پروژه مرجع به صورت دستی انتخاب و ایجاد شدند. در روش اخذ نقاط به صورت نقشه مبنا، نقاط کنترل در پروژه‌ی مرجع، انتخاب شده و مختصات سه بعدی آنها با استفاده از محاسبات تقاطع چند شعاعی محاسبه گردیدند. محدوده‌ی اول در شکل (۱-ب) نشان داده شده است.

○ مشخصات داده‌های محدوده دوم

محدوده‌ی دوم، راهگذر به طول پنج کیلومتر و عرض ۳۵۰ متر می‌باشد که با ۱۱۵۱ تصویر پوشش داده شده است. این محدوده دارای چهار نوار پرواز با پوشش طولی ۸۰ درصد و عرضی ۶۰ درصد بین تصاویر می‌باشد. محدوده‌ی دوم در اغلب بررسی‌ها به صورت چالشی و در یک نوار پروازی و با ۲۷۹ تصویر مورد پردازش قرار گرفته است و تنها در بررسی تاثیرگذاری تعداد نوارهای پرواز بر دقت مثلث‌بندی، از تمام تصاویر پوشش دهنده هر چهار نوار پروازی استفاده می‌شود. محدوده‌ی دوم دارای ده نقطه کنترل و چک است که با توجه به محدودیت اخذ نقاط به صورت زمینی، این نقاط به صورت نقشه مبنا و در محیط پروژه مرجع انتخاب و ایجاد شدند. محدوده‌ی دوم در شکل (۱-ج) نشان داده شده است.

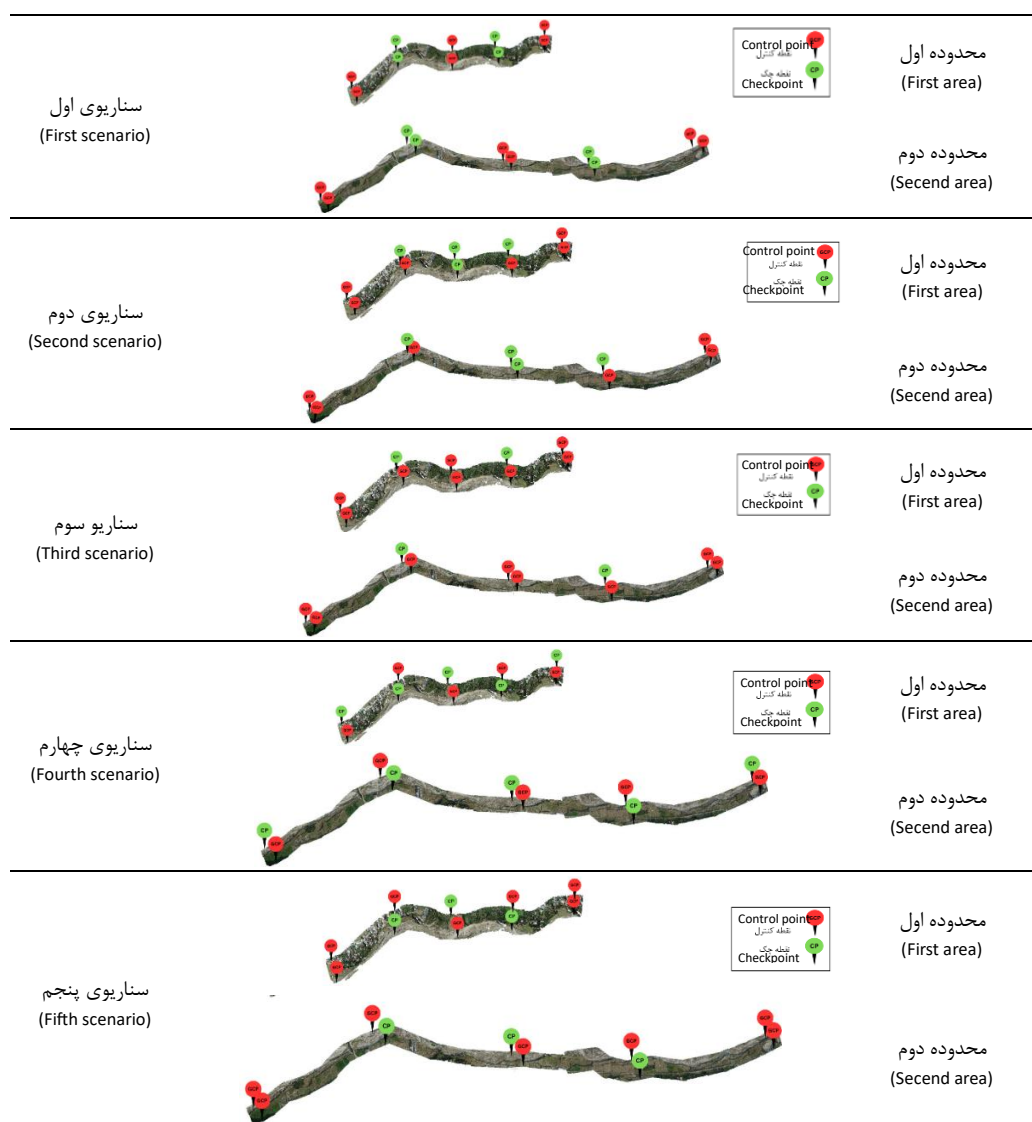
- روش پژوهش

همانطور که در مقدمه و بخش مروری بر کارهای انجام شده ذکر شد پارامترهای متعددی بر دقت مثلث‌بندی فتوگرامتری به خصوص در مناطق راهگذر تاثیرگذار هستند که در این پژوهش برخی از آنها مورد بررسی قرار می‌گیرند. پارامترهایی که برای این منظور انتخاب شده‌اند عبارتند از: نحوه توزیع و تعداد نقاط کنترل، نحوه‌ی کالیبراسیون

جدول ۳: تعداد نقاط کنترل و چک استفاده شده در هر سناریو

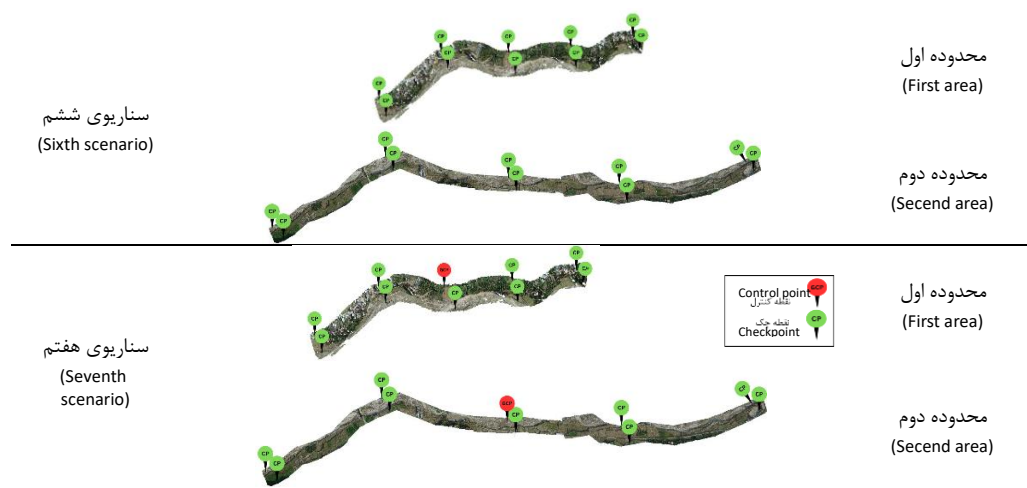
Table 3: The number of control and check points used in each scenario

Table 3: The number of control and check points used in each scenario					
محدوده‌ی پنج کیلومتری (Both corridor areas)		سناریوها (Scenarios)	هر دو محدوده‌ی راه‌گذر (Both corridor areas)		سناریوها (Scenarios)
هجده نقطه (Eighteen points)			ده نقطه (Ten points)		
تعداد نقاط چک (Number of check points)	تعداد نقاط کنترل (Number of control points)		تعداد نقاط چک (Number of check points)	تعداد نقاط کنترل (Number of control points)	
8	10	سناریوی هشتم (Scenario Eight)	4	6	سناریوی اول (First scenario)
8	10	سناریوی نهم (Scenario Ninth)	4	6	سناریوی دوم (Second scenario)
6	12	سناریوی دهم (Scenario Ten)	2	8	سناریوی سوم (Third scenario)
9	9	سناریوی یازدهم (Eleventh scenario)	5	5	سناریوی چهارم (Fourth scenario)
7	11	سناریوی دوازدهم (Scenario 12)	3	7	سناریوی پنجم (Scenario Five)
-	-	-	10	0	سناریوی ششم (Scenario Six)
-	-	-	9	1	سناریوی هفتم (Seventh scenario)



شکل ۳: نحوه‌ی توزیع نقاط کنترل و چک در سناریوهای اول تا پنجم با استفاده از ده نقطه

Fig. 3: Distribution of Control and Check Points in Scenarios One to Five Using Ten Points



شکل ۴: نحوه توزیع نقاط کنترل و چک در سناریو های شش و هفت با استفاده از ده نقطه

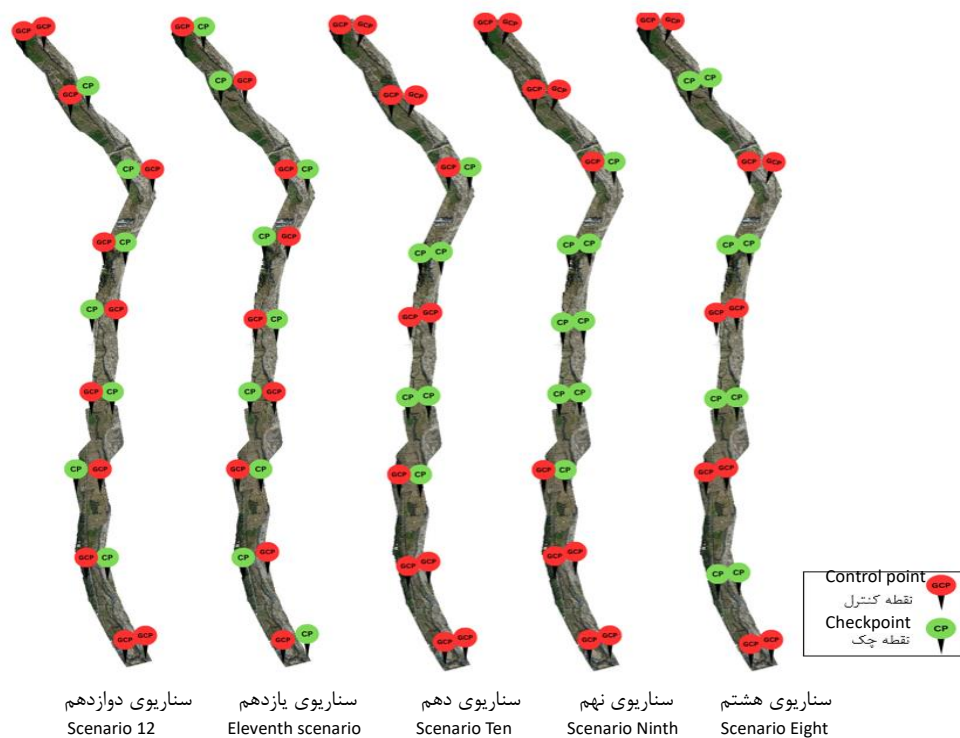
Fig. 4: Distribution of Control and Check Points in Scenarios six & seven Using Ten Points

در سناریوهای هشتم تا دوازدهم با هدف بررسی تاثیرگذاری کاهش فاصله بین نقاط کنترل بر دقت مثلث‌بندی، تعداد نقاط چک و کنترل از ده نقطه به هجده نقطه‌ای افزایش و فاصله بین آنها نیز از ۱۲۰۰ متر به ۶۰۰ متر کاهش داده شد (شکل ۵).

- سناریوی هشتم: در این سناریو، ده نقطه‌ای کنترل به صورت یک در میان در راستای عرضی در طول راهگذر طراحی شد و باقی نقاط به صورت چک در بین نقاط کنترل قرار می‌گیرند.
- سناریوی نهم: در این سناریو، پنج نقطه‌ای کنترل در ابتدای راهگذر و پنج نقطه‌ای کنترل در انتهای راهگذر طراحی شد و باقی نقاط به صورت چک در بین دو محدوده قرار می‌گیرند.
- سناریوی دهم: در این سناریو، پنج نقطه‌ای کنترل در ابتدای راهگذر و پنج نقطه‌ای کنترل در انتهای راهگذر و دو نقطه در مرکز راهگذر طراحی شد و باقی نقاط به صورت چک در بین نقاط کنترل قرار می‌گیرند.
- سناریوی یازدهم: برای این سناریو، ده نقطه‌ای کنترل به صورت زیگزاگی در طول راهگذر طراحی شد و باقی نقاط به صورت چک در بین نقاط کنترل قرار می‌گیرند.
- سناریوی دوازدهم: در این سناریو، دو نقطه‌ای کنترل در ابتدای راهگذر، دو نقطه‌ای کنترل در انتهای راهگذر و باقی نقاط کنترل به صورت زیگزاگی در طول راهگذر طراحی شد. باقی نقاط هم به عنوان نقاط چک در بین نقاط کنترل قرار می‌گیرند.

- بررسی تاثیرگذاری نحوه‌ی کالیبراسیون دوربین بر دقت مثلث‌بندی کالیبراسیون دوربین یکی از مهم‌ترین مراحل در پروژه‌های فتوگرامتری است که بر دقت مثلث‌بندی تاثیرگذار است. استفاده از کالیبراسیون مناسب موجب بهبود پارامترهای توجیه داخلی و کاهش خطای سیستماتیک داده‌های مورد استفاده برای مثلث‌بندی می‌شود. با کاهش خطای سیستماتیک، دقت مثلث‌بندی افزایش و نیاز به نقاط کنترل زمینی کاهش می‌یابد [۳۲، ۳۱]

- سناریوی دوم: برای سناریوی دوم، دو نقطه کنترل در ابتدا و انتهای راهگذر و دو نقطه کنترل در طول محدوده با فاصله ۶۰۰ متر و ۱۲۰۰ متر از هم به ترتیب در محدوده راهگذر اول و دوم طراحی شد. همچنین، به منظور ارزیابی دقت مثلث‌بندی چهار نقطه چک در بین نقاط کنترل نیز در نظر گرفته می‌شوند.
- سناریوی سوم: در سناریوی سوم، دو نقطه کنترل در ابتدا، دو نقطه کنترل در مرکز، دو نقطه کنترل در انتهای راهگذر و دو نقطه کنترل در طول محدوده با فاصله ۶۰۰ متر و ۱۲۰۰ متر از هم به ترتیب در محدوده راهگذر اول و دوم طراحی شد. همچنین، به منظور ارزیابی دقت مثلث‌بندی دو نقطه چک در بین نقاط کنترل نیز در نظر گرفته می‌شوند.
- سناریوی چهارم: برای سناریوی پنجم، نقاط کنترل به صورت زیگزاگی در هر دو محدوده راهگذر طراحی شدند. همچنین، به منظور ارزیابی دقت مثلث‌بندی پنج نقطه چک در بین نقاط کنترل در نظر گرفته می‌شوند.
- سناریوی پنجم: در این سناریو دو نقطه کنترل در ابتدا، دو نقطه کنترل در انتها راهگذر و بین دو محدوده، نقاط به صورت زیگزاگی با فاصله ۶۰۰ متر و ۱۲۰۰ متر از هم به ترتیب در محدوده راهگذر اول و دوم طراحی شد. همچنین، به منظور ارزیابی دقت مثلث‌بندی سه نقطه چک در بین نقاط کنترل در نظر گرفته می‌شوند.
- سناریوی ششم: در سناریوی هفتم تمامی نقاط به صورت چک با فاصله ۶۰۰ متر و ۱۲۰۰ متر از هم به ترتیب در محدوده راهگذر اول و دوم طراحی شد. در این سناریو، تصاویر در هر دو محدوده راهگذر با استفاده از مختصات مراکز تصویر پردازش می‌شوند.
- سناریوی هفتم: برای سناریوی هشتم تنها یک نقطه کنترل در مرکز محدوده طراحی شد. همچنین، تصاویر در هر دو محدوده راهگذر با استفاده از مختصات مراکز تصویر پردازش می‌شوند.



شکل ۵: توزیع نقاط کنترل در سناریوهای هشت تا دوازده با استفاده از هجده نقطه
Fig. 5: Distribution of control points in scenarios eight to twelve using eighteen points

○ بررسی تاثیرگذاری نرم‌افزار فتوگرامتری در دقت مثلث‌بندی
نرم‌افزارهای فتوگرامتری مختلفی برای انجام محاسبات فتوگرامتری وجود دارند که هر کدام با تنظیمات و شیوه خاصی، محاسبات فتوگرامتری را انجام می‌دهند که می‌تواند یکی از عوامل تأثیرگذار بر دقت مثلث‌بندی باشد. به منظور ارزیابی تاثیرگذاری نرم‌افزار فتوگرامتری بر دقت مثلث‌بندی، دو نرم‌افزار Agisoft Metashape و Pix4D انتخاب شدند که تاثیر آنها در دقت نتایج مثلث‌بندی مورد بررسی قرار خواهند گرفت. این بررسی بر روی دو محدوده‌ی راهگذر در حالت چالشی تک نوار پرواز و بدون مختصات دقیق مراکز تصاویر انجام می‌شود.

○ بررسی تاثیرگذاری تعداد نوار پرواز بر دقت مثلث‌بندی
منظور از نوار پروازی، یک مسیر رفت یا برگشت پهنپا در طول منطقه‌ی پرواز است. وجود تعداد نوارهای پروازی موجب استحکام شبکه فتوگرامتری می‌شود. از طرفی با کاهش تعداد نوار پروازی در عملیات پهنپا فتوگرامتری، هزینه و زمان عملیات کاهش می‌یابد. در این تحقیق برای بررسی تاثیر تعداد نوارهای پروازی در حالت فتوگرامتری راهگذر، تعداد نوارهای پروازی به تدریج از یک به چهار نوار پروازی افزایش می‌یابد. این بررسی بر روی هر دو محدوده‌ی راهگذر و بدون استفاده از مختصات دقیق مراکز تصاویر انجام می‌گیرد.

- معیارهای ارزیابی مورد استفاده

در این مقاله برای ارزیابی دقت مسطحاتی و ارتفاعی پروژه‌های فتوگرامتری از دو معیار جذر میانگین مربعات خطاها (Root mean

محاسبات مثلث‌بندی فتوگرامتری می‌تواند در سه حالت انجام شود:

الف) استفاده از دوربین کالیبره شده

ب) استفاده از پارامترهای کالیبراسیون دوربین به صورت محاسبات کالیبراسیون در حین کار (On the job calibration)

ج) استفاده از روش سلف کالیبراسیون

در این پروژه با توجه به استفاده از داده‌های تصویری از قبل اخذ شده پروژه مرجع، تنها امکان بررسی تاثیر دو حالت الف و ج از سه مورد بالا وجود دارد که در حالت الف از پارامترهای کالیبراسیون دوربین متعلق به پروژه مرجع به عنوان پارامترهای کالیبراسیون از پیش تعیین شده دوربین استفاده می‌شود. همچنین در روش کالیبراسیون در حین کار نیاز به تعداد زیادی نقاط کنترل زمینی به منظور کالیبره کردن است که در این مقاله به علت استفاده از داده‌های از قبل تهیه شده امکان پذیر نمی‌باشد [۳۳].

این ارزیابی با هدف بررسی تأثیرگذاری نوع کالیبراسیون بر دقت مثلث‌بندی انجام می‌شود. در حالت استفاده از دوربین کالیبره شده، مقادیر پارامترهای کالیبراسیون دوربین از پروژه مرجع شامل پارامترهای فاصله کانونی، مختصات نقطه اصلی، سه پارامتر اعوجاج شعاعی و دو پارامتر اعوجاج مماسی به عنوان مقادیر ثابت در محاسبات مثلث‌بندی فتوگرامتری، مورد استفاده قرار خواهند گرفت. این بررسی بر روی دو محدوده‌ی راهگذر در حالت چالشی تک نوار پروازی انجام می‌شود. همچنین، این بررسی در حالت بدون مختصات دقیق مراکز تصاویر انجام می‌شود.

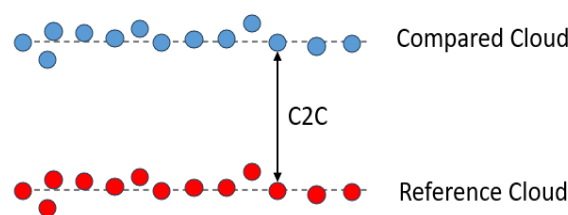
متعدد طراحی شده در هر دو منطقه راهگذر (بخش ۳-۳-۱) در محیط نرم افزار Agisoft Metashape ایجاد و مورد پردازش قرار گرفتند. این پردازش‌ها در دو حالت استفاده از مختصات‌های دقیق مراکز تصاویر (اطلاعات ژئوتگ) و نیز بدون این اطلاعات انجام شده است که در هر دو حالت کالیبراسون دوربین به صورت محاسبات سلف-کالیبراسیون انجام گرفته است. برای ایجاد هماهنگی بین نتایج به دست آمده از پردازش‌های این پروژه‌ها با داده‌های متناظر آنها در پروژه مرجع، تنظیمات سطح پردازش مورد استفاده در این پروژه‌ها مطابق با تنظیمات پروژه مرجع (جدول ۱) در سطح متوسط انجام شد.

نتایج حاصل از پردازش سناریوهای یک تا هفت در محدوده‌ی راهگذر اول در جدول (۴) و نتایج حاصل از پردازش این سناریوهای در محدوده‌ی راهگذر دوم در جدول (۵) آورده شده است. بررسی این نتایج در جدول (۴) نشان می‌دهد که در حالت استفاده از تصاویر بدون اطلاعات ژئوتگ دقیق، سناریوی سوم با خطای ارتفاعی و مسطحاتی به ترتیب ۰/۲۹ متر و ۰/۱ متر در بین سناریوهای بررسی شده، دارای کمترین خطا و بهترین دقت می‌باشد. در این سناریو از هشت نقطه‌ی کنترل در محاسبات مثلث‌بندی استفاده شده است که به صورت یکنواخت بر روی راهگذر توزیع شده بودند. برای ارزیابی صحت نتایج نیز، از دو نقطه کنترل به عنوان نقطه چک در بین این نقاط و در طول راهگذر استفاده گردید (شکل ۳-سناریوی سوم، منطقه‌ی اول). همچنین، بیشترین خطا در سناریوی اول با خطای ارتفاعی و مسطحاتی به ترتیب ۰/۵۵ و ۰/۱۴ متر رخ داده است. در این سناریو، نقاط کنترل در ابتدا، مرکز و انتهای محدوده‌ی راهگذر به صورت غیر یکنواخت توزیع شده بودند (شکل ۳-سناریوی اول). همچنین، بررسی نتایج جدول (۴) و در حالت استفاده از تصاویر با اطلاعات ژئوتگ دقیق، نشان می‌دهد که سناریوی سوم با خطای ارتفاعی و مسطحاتی به ترتیب ۰/۰۴ متر و ۰/۰۵ متر در بین سناریوهای بررسی شده، دارای کمترین خطا و بهترین دقت می‌باشد. همچنین، بیشترین خطا مربوط به سناریوی پنجم با خطای ارتفاعی و مسطحاتی به ترتیب ۰/۰۷ و ۰/۰۸ متر می‌باشد. در این سناریو، نقاط کنترل در ابتدا، مرکز و انتهای محدوده‌ی راهگذر به صورت غیر یکنواخت استفاده شده بودند (شکل ۳-سناریوی پنجم). با توجه به این که محاسبات فتوگرامتری در سناریوی ششم تنها با استفاده از اطلاعات ژئوتگ دقیق مراکز تصویر و بدون استفاده از نقاط کنترل زمینی و سناریوی هفتم نیز تنها با استفاده از اطلاعات ژئوتگ دقیق مراکز تصویر و استفاده از فقط یک نقطه کنترل زمینی انجام شده‌اند (بنا به اطلاعات آورده شده در جدول (۳) لذا، در این دو سناریو امکان انجام محاسبات فتوگرامتری تنها در حالت استفاده از تصاویر با ژئوتگ دقیق فراهم بوده و در جدول (۴) اطلاعات پردازشی مربوط به این دو سناریو در حالت استفاده از تصاویر بدون اطلاعات ژئوتگ وجود نخواهد داشت (شکل ۴). این وضعیت برای دو سطر جدول (۵) مربوط به نتایج حاصل از پردازش این سناریوهای در محدوده‌ی راهگذر دوم نیز برقرار است.

RMSE (square deviation error در نقاط چک و معیار Cloud to Cloud) استفاده می‌شود. نقاط چک، نقاط مسطحاتی و ارتفاعی هستند که دارای مختصات زمینی معلوم و دقیق می‌باشند. این نقاط تنها به عنوان نقاط گرهی در محاسبات مثلث‌بندی مورد استفاده قرار می‌گیرند و از مختصاتهای زمینی آنها در محاسبات مثلث‌بندی استفاده‌ای نمی‌شود. با توجه به معلوم بودن مختصات زمینی و دقیق این نقاط و با توجه به محاسبه مجدد مختصات زمینی برای این نقاط از محاسبات مثلث‌بندی، می‌توان از تفاوت‌های بین این دو سری مختصات در نقاط چک بر حسب رابطه (۱) به عنوان معیاری برای ارزیابی دقت محاسبات مثلث‌بندی استفاده کرد. محاسبه‌ی مقدار RMSE برای هر سه مولفه‌ی X ، Y و Z نقاط چک طبق رابطه (۱) انجام می‌شود که در آن p_i مقدار یکی از سه مولفه‌ی مولفه‌ی X ، Y و Z در نقاط چک و $\bar{p}$ مقدار میانگین آنها می‌باشند.

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (p_i - \bar{p})^2} \quad (1)$$

دومین معیار ارزیابی مورد استفاده در این مقاله، معیار C2C می‌باشد. معیار C2C، اختلاف ارتفاع بین نقاط متناظر در دو ابر نقطه را نسبت به هم بیان می‌کند. در شکل (۶) یک نمای شماتیک از این مفهوم نشان داده شده است که در آن نقاط آبی رنگ، نقاط مرتبط به ابر نقطه‌ی اول و نقاط قرمز رنگ، نقاط متناظر با آنها در ابر نقطه‌ی دوم می‌باشند که از لحاظ فاصله‌ای با هم مقایسه می‌شوند. در این مقاله محاسبات مربوط به معیار C2C در نرم‌افزار Cloud Compare انجام شده است. نرم‌افزار Cloud Compare عموماً برای نمایش و پردازش ابر نقطه سه‌بعدی مورد استفاده قرار می‌گیرد [۳۴]. با استفاده از معیار C2C می‌توان به میزان عوجاجی که بین دو ابر نقطه از نظر ارتفاعی وجود دارد، پی برد.



شکل ۶: فاصله‌ی بین نقاط متناظر در دو ابر نقطه بر اساس معیار C2C
Fig. 6: Point distances in two point clouds with C2C quality

بحث و بررسی نتایج

- ارزیابی تاثیرگذاری تعداد و توزیع نقاط کنترل در دقت مثلث‌بندی
با هدف بررسی تاثیر تعداد و توزیع‌های مختلف نقاط کنترل در دقت مثلث‌بندی و تعیین تعداد و توزیع مناسب جهت دستیابی به بهترین دقت مثلث‌بندی در مناطق راهگذر، پروژه‌های مربوط به سناریوهای

جدول ۴: مقادیر خطا در نقاط چک در محدوده‌ی اول با تصاویر دارای ژئوتگ دقیق و بدون ژئوتگ دقیق (بر حسب متر)

Table 4: Error values in check points in the first range with images with accurate geotag and without accurate geotag (in meters)

خطای ارتفاعی (Elevation error)		خطای مسطحاتی (Planimetric error)		خطای کل (Total error)		سناریوها (Scenarios)
تصاویر با ژئوتگ (Images with geotag)	تصاویر بدون ژئوتگ (Images without geotag)	تصاویر با ژئوتگ (Images with geotag)	تصاویر بدون ژئوتگ (Images without geotag)	تصاویر با ژئوتگ (Images with geotag)	تصاویر بدون ژئوتگ (Images without geotag)	
0.05	0.55	0.06	0.14	0.08	0.57	سناریوی اول (First scenario)
0.06	0.44	0.07	0.10	0.09	0.45	سناریوی دوم (Second scenario)
0.04	0.29	0.05	0.10	0.07	0.30	سناریوی سوم (Third scenario)
0.05	0.45	0.06	0.08	0.08	0.44	سناریوی چهارم (Fourth scenario)
0.07	0.45	0.08	0.03	0.11	0.48	سناریوی پنجم (Scenario Five)
0.10	-	0.08	-	0.13	-	سناریوی ششم (Scenario Six)
0.09	-	0.06	-	0.11	-	سناریوی هفتم (Seventh scenario)

جدول ۵: مقادیر خطا در نقاط چک در محدوده‌ی دوم با تصاویر دارای ژئوتگ دقیق و بدون ژئوتگ دقیق (بر حسب متر)

Table 5: Error values at check points in the second range with images with accurate geotag and without accurate geotag (in meters)

خطای ارتفاعی (Elevation error)		خطای مسطحاتی (Planimetric error)		خطای کل (Total error)		سناریوها (Scenarios)
تصاویر با ژئوتگ (Images with geotag)	تصاویر بدون ژئوتگ (Images without geotag)	تصاویر با ژئوتگ (Images with geotag)	تصاویر بدون ژئوتگ (Images without geotag)	تصاویر با ژئوتگ (Images with geotag)	تصاویر بدون ژئوتگ (Images without geotag)	
0.05	2.18	0.03	0.92	0.6	2.37	سناریوی اول (First scenario)
0.05	2.26	0.05	0.36	0.07	2.29	سناریوی دوم (Second scenario)
0.02	0.91	0.01	0.18	0.02	0.93	سناریوی سوم (Third scenario)
0.04	1.05	0.02	0.26	0.05	1.08	سناریوی چهارم (Fourth scenario)
0.05	1.23	0.03	0.23	0.06	1.25	سناریوی پنجم (Scenario Five)
0.07	-	0.06	-	0.09	-	سناریوی ششم (Scenario Six)
0.06	-	0.05	-	0.08	-	سناریوی هفتم (Seventh scenario)

مثلبندی استفاده شده است. برای ارزیابی صحت نتایج نیز، از دو نقطه کنترل به عنوان نقطه چک در بین این نقاط و در طول راهگذر استفاده شده است (شکل ۳-سناریوی اول).

نتایج حاصل از پردازش سناریوهای هشتم تا دوازدهم در محدوده‌ی راهگذر دوم با استفاده از تصاویر بدون ژئوتگ دقیق نیز در جدول (۶) آورده شده است. این سناریوها همانطور که در بخش (۳-۱-۱) ذکر شد با هدف بررسی تاثیرگذاری افزایش تعداد نقاط کنترل زمینی و کاهش فاصله بین آنها در دقت نتایج مثلبندی طراحی شده‌اند. فاصله‌ی نقاط کنترل و چک در این سناریوها از ۱۲۰۰ متر به ۶۰۰ متر کاهش و تعداد نقاط کنترل و چک از ده نقطه به هجده نقطه افزایش پیدا کرده است. مقایسه‌ی نتایج دقت مثلبندی برای این محدوده در جداول (۵) و (۶) نشان می‌دهد که با کاهش فاصله‌ی و افزایش تعداد نقاط کنترل، خطای ارتفاعی و مسطحاتی در هر سناریو کاهش می‌یابد. با توجه به اطلاعات جدول (۶) کمترین خطای ارتفاعی و مسطحاتی متعلق به سناریوی دهم با دوازده نقطه‌ی کنترل و شش نقطه‌ی چک که به صورت یکنواخت در سطح راهگذر پخش شدند، می‌باشد (شکل ۵-سناریوی دهم). این نتایج نشان می‌دهند که برای افزایش دقت مثلبندی بهتر است که در ابتدا و انتهای پروژه از چهار نقطه کنترل نزدیک به هم و در طرفین راهگذر و در روبروی هم استفاده شود.

نتایج حاصل از پردازش سناریوهای یک تا هفت در محدوده‌ی راهگذر دوم نیز در جدول (۵) آورده شده است. بررسی این نتایج در جدول (۵) نشان می‌دهد که در حالت استفاده از تصاویر بدون اطلاعات ژئوتگ دقیق، سناریوی سوم با خطای ارتفاعی و مسطحاتی به ترتیب ۰/۹۱ متر و ۰/۱۸ متر در بین سناریوهای بررسی شده، دارای کمترین خطا و بهترین دقت می‌باشد. در این سناریو از هشت نقطه‌ی کنترل در محاسبات مثلبندی استفاده شده است که به صورت یکنواخت بر روی راهگذر توزیع شده‌اند. برای ارزیابی صحت نتایج نیز، از دو نقطه کنترل به عنوان نقطه چک در بین این نقاط و در طول راهگذر استفاده گردید (شکل ۳-سناریوی سوم، منطقه‌ی اول). همچنین، بیشترین خطا در سناریوی اول با خطای ارتفاعی و مسطحاتی به ترتیب ۲/۳۷ متر و ۰/۹۲ متر رخ داده است. در این سناریو، نقاط کنترل در ابتدا، مرکز و انتهای محدوده‌ی راهگذر به صورت غیر یکنواخت توزیع شده بودند (شکل ۳-سناریوی اول). همچنین، بررسی نتایج جدول (۵) در محدوده-ی دوم و در حالت استفاده از تصاویر با اطلاعات ژئوتگ دقیق، نشان می‌دهد که سناریوی سوم با خطای ارتفاعی و مسطحاتی به ترتیب ۰/۰۲ متر و ۰/۰۱ متر در بین سناریوهای بررسی شده، دارای کمترین خطا و بهترین دقت می‌باشد. در این سناریو از هشت نقطه‌ی کنترل که به صورت یکنواخت بر روی راهگذر توزیع شده بودند در محاسبات

جدول ۶: مقادیر خطا در نقاط چک به دست آمده از توزیع هجده نقطه بر محدوده‌ی دوم با تصاویر بدون ژئوتگ دقیق (بر حسب متر)

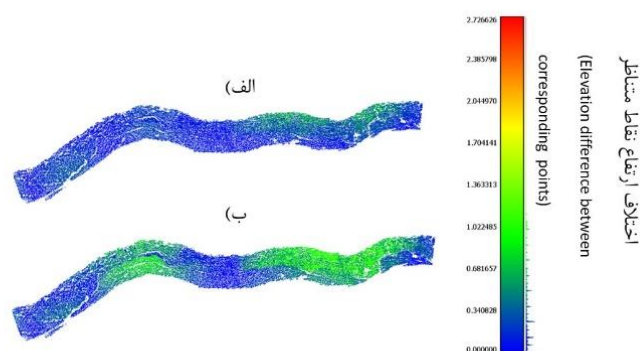
Table 6: Error values at check points obtained from the distribution of eighteen points over the second area with images without precise geotagging (in meters)

خطای X X error	خطای Y Y error	خطای Z Z error	خطای مسطحاتی (Planimetric error)	خطای کل (Total error)	سناریوها (Scenarios)
0.38	0.62	0.95	0.73	1.73	سناریوی هشتم (Scenario Eight)
0.16	1.24	1.23	1.23	1.25	سناریوی نهم (Scenario Ninth)
0.09	0.27	0.36	0.29	0.47	سناریوی دهم (Scenario Ten)
0.09	0.15	0.75	0.18	0.77	سناریوی یازدهم (Eleventh scenario)
0.16	0.22	0.41	0.28	0.50	سناریوی دوازدهم (Scenario 12)

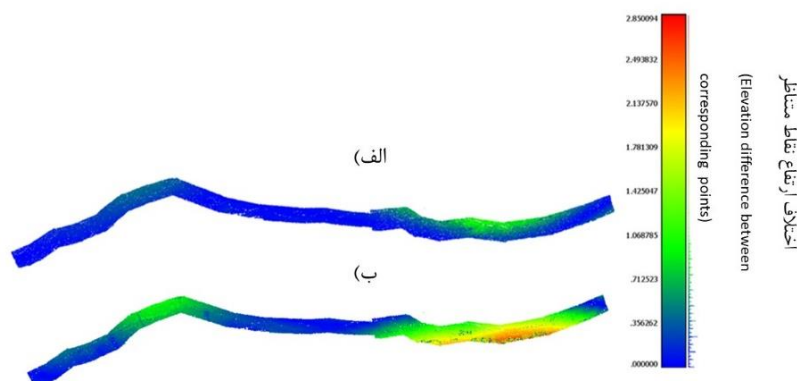
آنها در پروژه‌ی مرجع با معیار C2C مورد ارزیابی قرار گرفتند. شکل‌های (۷) و (۸) میزان معیار C2C محاسبه شده برای ابرنقاط سناریوهای اول و سوم به ترتیب در محدوده اول و دوم را نشان می‌دهند. در این شکل‌ها، رنگ آبی بیانگر فاصله‌ی حداقلی و رنگ قرمز بیانگر فاصله‌ی حداکثری بین نقاط ابر نقطه‌ی مرجع و ابرنقطه سناریوی مورد نظر می‌باشد. نتایج به دست آمده از معیار C2C در شکل‌های (۷) و (۸) با نتایج به دست آمده از جداول (۴) و (۵)، از لحاظ مقدار دقت مثلث‌بندی سناریوی سوم و اول مطابقت دارند.

- ارزیابی تاثیرگذاری تعداد و توزیع نقاط کنترل در دقت مثلث‌بندی با استفاده از معیار C2C

نتایج ارائه شده در بخش (۴-۱) نشان داد که سناریوی سوم دارای خطای ارتفاعی و مسطحاتی کمتری نسبت به دیگر سناریوها می‌باشد. به همین منظور در بخش (۴-۲)، سناریوی سوم با بهترین دقت مثلث‌بندی و سناریوی اول با کمترین دقت مثلث‌بندی، با معیار C2C ارزیابی شدند. در این بخش، نقاط متناظر دو ابر نقطه‌ی سناریوی سوم و سناریوی اول در محدوده اول و دوم نسبت به ابر نقطه‌ی متناظر



شکل ۷: ابر نقطه‌ی تولید شده با معیار C2C از سناریوی سوم و اول در محدوده اول. الف) سناریوی سوم ب) سناریوی اول
Fig. 7: The point cloud generated by the C2C criterion from the third and first scenarios in the first range. a) third scenario. b) first scenario



شکل ۸: ابر نقطه‌ی تولید شده با معیار C2C از سناریوی سوم و اول در محدوده دوم. الف) سناریوی سوم ب) سناریوی اول
Fig. 8: The point cloud generated by the C2C criterion from the third and first scenarios in the Second range. a) third scenario. b) first scenario

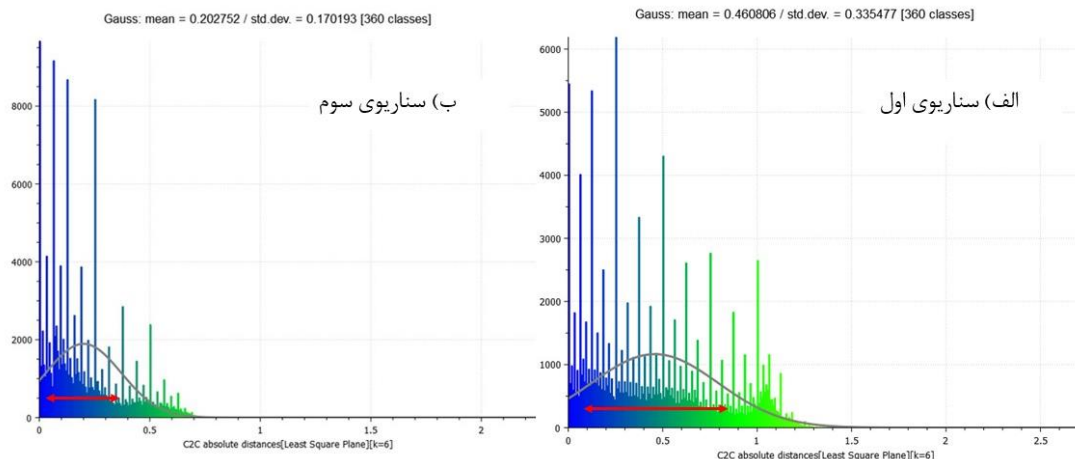
محدوده‌ی دوم به ترتیب ۱/۱۸ متر و ۰/۴۵ متر می‌باشد. در شکل‌های (۹-الف) و (۱۰-الف) نمودار گوسی پهن‌تر بوده و دارای انحراف معیار بزرگتری است که نشان‌دهنده‌ی پراکندگی زیاد مقادیر C2C نسبت به هم و در نتیجه، دقت کم ارتفاعی در سناریوی اول می‌باشد و در شکل‌های (۹-ب) و (۱۰-ب) نمودار گوسی باریک‌تر بوده و دارای انحراف معیار کوچک‌تری است که نشان‌دهنده‌ی پراکندگی کم مقادیر C2C نسبت به هم و در نتیجه، دقت بالای ارتفاعی در سناریوی سوم می‌باشد.

نمودار گوسی برازش شده به فراوانی‌های مقادیر C2C در ابر نقاط سناریوهای اول و سوم در هر دو محدوده‌ی راهگذر در شکل‌های (۹) و (۱۰) و میانگین و انحراف معیار مقادیر C2C ابرنقاط این سناریوها در جدول (۷) آورده شده است. با توجه به شکل (۹) و جدول (۷) میانگین مقادیر C2C برای ابر نقاط سناریوی اول و سوم در محدوده‌ی اول به ترتیب ۰/۴۶ متر و ۰/۲۰ متر می‌باشد. همچنین، با توجه به شکل (۹) و جدول (۷) میانگین مقادیر C2C برای ابر نقاط سناریوی اول و سوم در

جدول ۷: میانگین و انحراف معیار مقادیر C2C برای ابرنقاط در سناریوی سوم و اول (بر حسب متر)

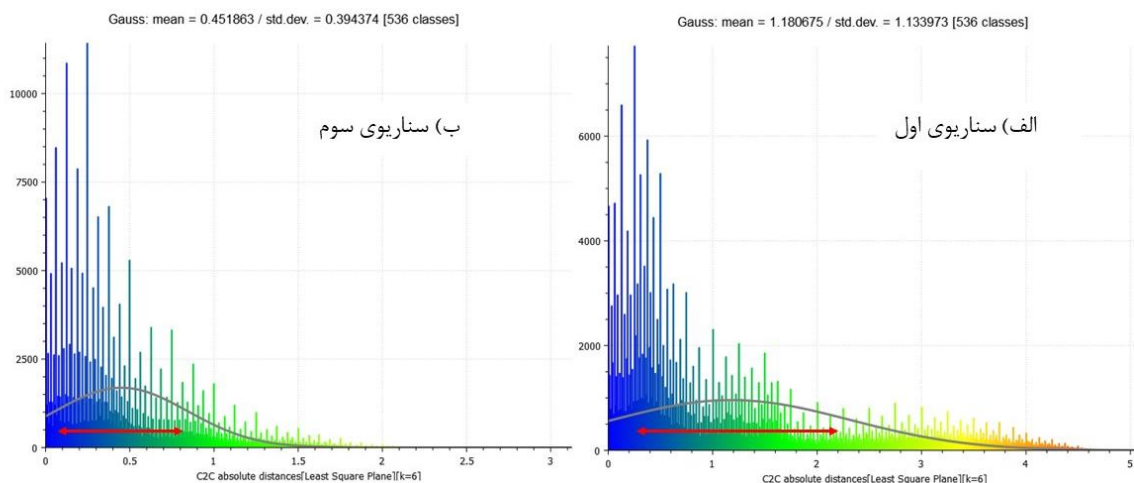
Table 7: Average values and standard deviation in the third and first scenarios (in meters)

محدوده‌ی اول (First area)		محدوده‌ی دوم (Second area)		سناریوها (Scenarios)
میانگین (Mean)	انحراف معیار (Standard deviation)	میانگین (Mean)	انحراف معیار (Standard deviation)	
0.46	0.33	1.18	1.13	سناریوی اول (First scenario)
0.20	0.17	0.45	0.39	سناریوی سوم (Third scenario)



شکل ۹: نمودار گوسی برازش شده به فراوانی‌های مقادیر C2C در ابر نقاط سناریوی اول و سوم در محدوده‌ی اول

Fig. 9: Gaussian fitted plot to the frequencies of C2C values in the point clouds of the first and third scenarios in the first range.



شکل ۱۰: نمودار گوسی برازش شده به فراوانی‌های مقادیر C2C در ابرنقاط سناریوی اول و سوم در محدوده‌ی دوم

Fig. 10: Gaussian fitted plot to the frequencies of C2C values in the point clouds of the first and third scenarios in the second range.

- ارزیابی تأثیر نحوه‌ی کالیبراسیون بر دقت مثلث‌بندی

در این قسمت نتایج حاصل از ارزیابی تأثیر نحوه‌ی کالیبراسیون دوربین بر دقت مثلث‌بندی در مناطق راهگذر با حالت چالشی آورده شده است. این ارزیابی‌ها تنها بر اساس سناریوهای اول تا پنجم در هر دو محدوده‌ی راهگذر انجام شده است. همانطور که در بخش (۳-۲) ذکر شده است در این ارزیابی، برای تعریف دوربین کالیبره شده، از پارامترهای کالیبراسیون دوربین، مربوط به پروژه‌ی مرجع استفاده شد (جدول ۲). نتایج این ارزیابی‌ها در دو حالت سلف-کالیبراسیون و استفاده از دوربین کالیبره شده برای هر دو محدوده در جدول (۸) ارائه شده است. همانطور که از نتایج این جدول مشاهده می‌شود مقدار خطای کل در حالت سلف-کالیبراسیون نسبت به حالت استفاده از دوربین کالیبره شده در هر دو محدوده‌ی راهگذر افزایش یافته است که علت آن نیز انطباق پارامترهای کالیبراسیون دوربین بر اساس مشخصات هندسی پروژه مرجع می‌باشد و با قرار دادن پارامترهای کالیبراسیون پروژه‌ی مرجع در محاسبات مثلث‌بندی مربوط به سناریوهای فوق، نتایج این محاسبات تحت تأثیر هندسه و کلیت پروژه مرجع قرار می‌گیرند. این نتایج نشان می‌دهند که استفاده از حالت سلف-کالیبراسیون در محاسبات

مثلث‌بندی می‌تواند انطباق بهتری با مشخصات هندسی پروژه فتوگرامتری داشته باشد و منجر به نتایج دقیق‌تری گردد.

- بررسی تأثیرگذاری نرم‌افزار فتوگرامتری بر دقت مثلث‌بندی

در این بخش میزان تأثیرگذاری دو نرم‌افزار فتوگرامتری Agisoft Metashape و Pix4D بر دقت مثلث‌بندی در مناطق راهگذر مورد ارزیابی قرار گرفته است. در این ارزیابی از سناریوی سوم که دارای دقت مثلث‌بندی بالاتری نسبت به دیگر سناریوها می‌باشد (بخش ۴-۱)، جهت بررسی تأثیرگذاری نرم‌افزار فتوگرامتری در دقت مثلث‌بندی استفاده شده است. این ارزیابی به صورت کمی و بصری بر روی هر دو محدوده‌ی اول و دوم انجام گرفته است. جدول (۹) نتایج کمی این ارزیابی را نشان می‌دهد. با توجه به نتایج این جدول، مقدار خطای ارتفاعی و مسطحاتی در نقاط چک در هر دو محدوده‌ی اول و دوم با استفاده از این نرم‌افزارها تقریباً با هم برابر بوده و دقت بدست آمده از آنها تفاوت معناداری نسبت به یکدیگر را نشان نمی‌دهد. مقادیر کالیبراسیون به دست آمده از محاسبات مثلث‌بندی در دو محدوده‌ی راهگذر از نرم‌افزارهای Pix4D و Agisoft MetaShape در شکل‌های (۱۱) و (۱۲) نشان داده شده است.

جدول ۸: مقادیر خطای کل محاسبه شده در نقاط چک در محدوده‌ی اول و دوم

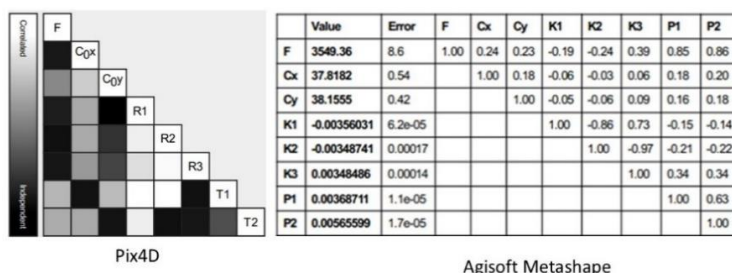
Table 8: Total error values calculated at check points in the first and second range

محدوده‌ی دوم (Secend area)		محدوده‌ی اول (First area)		سناریوها (Scenarios)
خطای کل در حالت خود-واسنجی (Total error in self-calibration)	خطای کل در حالت استفاده از دوربین کالیبره شده (Total error using a calibrated camera)	خطای کل در حالت خود-واسنجی (Total error in self-calibration)	خطای کل در حالت استفاده از دوربین کالیبره شده (Total error using a calibrated camera)	
2.37	3.4	0.57	0.57	سناریوی اول (First scenario)
2.29	2.9	0.45	0.51	سناریوی دوم (Second scenario)
0.93	0.95	0.30	0.36	سناریوی سوم (Third scenario)
1.08	1.3	0.45	0.55	سناریوی چهارم (Fourth scenario)
1.25	1.4	0.46	0.46	سناریوی پنجم (Scenario Five)

جدول ۹: مقادیر خطای ارتفاعی و مسطحاتی در نقاط چک به دست آمده از محاسبات مثلث‌بندی در هر دو نرم‌افزار Pix4D و Agisoft MetaShape

Table 9: The values of height and planar errors in check points obtained from triangulation calculations in both Pix4D and Agisoft Metashape software

محدوده‌ی دوم (Secend range)			محدوده‌ی اول (First range)			نرم‌افزارها (Softwares)
خطای Z (Z error)	خطای Y (Y error)	خطای X (X error)	خطای Z (Z error)	خطای Y (Y error)	خطای X (X error)	
0.90	0.12	0.20	0.30	0.01	0.05	Pix4D
0.91	0.16	0.08	0.29	0.07	0.07	Metashape



	Value	Error	F	Cx	Cy	K1	K2	K3	P1	P2
F	3549.36	8.6	1.00	0.24	0.23	-0.19	-0.24	0.39	0.85	0.86
Cx	37.8182	0.54		1.00	0.18	-0.06	-0.03	0.06	0.18	0.20
Cy	38.1555	0.42			1.00	-0.05	-0.06	0.09	0.16	0.18
K1	-0.00356031	6.2e-05				1.00	-0.86	0.73	-0.15	-0.14
K2	-0.00348741	0.00017					1.00	-0.97	-0.21	-0.22
K3	0.00348486	0.00014						1.00	0.34	0.34
P1	0.00368711	1.1e-05							1.00	0.63
P2	0.00565599	1.7e-05								1.00

شکل ۱۱: مقادیر پارامترهای کالیبراسیون به دست آمده از محاسبات مثلث‌بندی در هر دو نرم‌افزار Pix4D و Agisoft MetaShape در محدوده‌ی اول

Fig. 11: Calibration parameter values obtained from triangulation calculations in both Pix4D and Agisoft Metashape software in the first area.

	Value	Error	F	Cx	Cy	K1	K2	K3	P1	P2
F	3524.03	2.5	1.00	0.46	-0.34	-0.23	0.19	-0.47	0.63	0.73
Cx	45.5949	0.44		1.00	-0.00	-0.05	0.01	-0.12	0.15	0.32
Cy	104.528	0.49			1.00	0.13	-0.15	0.27	-0.24	-0.27
K1	-0.00461755	3e-05				1.00	-0.95	0.86	-0.14	-0.12
K2	0.00469739	7.5e-05					1.00	-0.94	0.12	0.11
K3	-0.00683771	6.4e-05						1.00	-0.29	-0.32
P1	0.00380903	3.7e-06							1.00	0.49
P2	0.00582252	6.1e-06								1.00

شکل ۱۲: مقادیر پارامترهای کالیبراسیون به دست آمده از محاسبات مثلث بندی در هر دو نرم افزار Pix4D و MetaShape در محدوده دوم
Fig. 12: Calibration parameter values obtained from triangulation calculations in both Pix4D and MetaShape software in the second area.

بازسازی سه بعدی تصاویر پهنپای نسبت به نرم افزار Agisoft Metashape دارد.

– ارزیابی تاثیرگذاری تعداد نوار پروازی بر دقت مثلث بندی یکی دیگر از پارامترهای تأثیرگذار بر دقت مثلث بندی، تعداد نوارهای پروازی می باشد که در این بخش تاثیرگذاری تعداد نوارهای پروازی بر دقت مثلث بندی در سناریوهای اول تا پنجم در هر دو محدوده راهگذر بدون استفاده از مختصات دقیق مراکز تصویر مورد بررسی قرار گرفته است. این ارزیابی در یک الی چهار نوار پروازی انجام شده است. نتایج این ارزیابی در هر دو محدوده راهگذر اول و دوم به ترتیب در جداول (۱۰) و (۱۱) ارائه شده است. همانطور که از نتایج این جداول مشاهده می شود با افزایش تعداد نوارهای پروازی از یک به چهار نوار، دقت مثلث بندی در تمامی سناریوهای پردازش شده بهبود یافته است.

ابر نقاط با تراکم بالای تولید شده در نرم افزارهای Pix4D و Agisoft Metashape به ترتیب در شکل های (۱۳) و (۱۴) نشان داده شده است. با توجه به این شکل ها، ابر نقطه با تراکم بالا تولید شده در نرم افزار Pix4D به خوبی نتوانسته گوشه های ساختمان، کناره های جاده و قسمتهایی از پوشش گیاهی را باز تولید کند. اما همانطور که در شکل (۱۴) قابل مشاهده است در ابر نقطه ای تولید شده در نرم افزار Agisoft Metashape گوشه های ساختمان و کناره های جاده ها واضح تر از ابر نقطه ای تولید شده در نرم افزار Pix4D می باشند ولی در قسمتهایی که پوشش گیاهی وجود داشت، این نرم افزار نیز به خوبی عمل نکرده است. از جمله ضعف های که در هر دو نرم افزار فتوگرامتری قابل مشاهده است می توان به ضعف در بازسازی کامل لبه های ساختمانها اشاره کرد. با توجه به ارزیابی های بصری انجام شده نرم افزار Pix4D توانایی کمتری در



شکل ۱۳: ابر نقطه ای تولید شده در Pix4D
Fig. 13: Point cloud generated in Pix4D



شکل ۱۴: ابر نقطه ای تولید شده در Agisoft Metashape
Fig. 14: Point cloud generated in Agisoft Metashape

جدول ۱۰: مقادیر خطا در نقاط چک در سناریوهای اول تا پنجم در محدوده‌ی اول برای تعداد نوارهای مختلف پروازی (بر حسب متر)

Table 10: Error values at check points in scenarios one to five in the first range for different flight strip numbers (in meters)

یک نوار پرواز (one flight strips)			دو نوار پرواز (Two flight strips)			سه نوار پرواز (Three flight strips)			چهار نوار پرواز (Four flight strips)			سناریوها (Scenarios)
خطا X	خطا Y	خطا Z	خطا X	خطا Y	خطا Z	خطا X	خطا Y	خطا Z	خطا X	خطا Y	خطا Z	
X error	Y error	Z error	X error	Y error	Z error	X error	Y error	Z error	X error	Y error	Z error	
0.12	0.06	0.55	0.13	0.05	0.22	0.08	0.14	0.22	0.17	0.05	0.21	سناریوی اول (First scenario)
0.09	0.04	0.44	0.15	0.08	0.24	0.13	0.14	0.20	0.15	0.10	0.17	سناریوی دوم (Second scenario)
0.07	0.07	0.29	0.04	0.01	0.19	0.11	0.12	0.14	0.03	0.05	0.13	سناریوی سوم (Third scenario)
0.07	0.04	0.45	0.05	0.06	0.20	0.14	0.14	0.17	0.09	0.11	0.16	سناریوی چهارم (Fourth scenario)
0.07	0.04	0.45	0.09	0.06	0.25	0.11	0.09	0.24	0.07	0.02	0.20	سناریوی پنجم (Scenario Five)

جدول ۱۱: مقادیر خطا در نقاط چک در سناریوهای اول تا پنجم در محدوده‌ی دوم برای تعداد نوارهای مختلف پروازی (بر حسب متر)

Table 11: Error values at check points in scenarios one to five in the second range for different flight strip numbers (in meters)

یک نوار پرواز (one flight strips)			دو نوار پرواز (Two flight strips)			سه نوار پرواز (Three flight strips)			چهار نوار پرواز (Four flight strips)			سناریوها (Scenarios)
خطا X	خطا Y	خطا Z	خطا X	خطا Y	خطا Z	خطا X	خطا Y	خطا Z	خطا X	خطا Y	خطا Z	
X error	Y error	Z error	X error	Y error	Z error	X error	Y error	Z error	X error	Y error	Z error	
0.73	0.56	2.18	0.56	0.25	1.15	0.42	0.32	0.70	0.18	0.19	0.42	سناریوی اول (First scenario)
0.14	0.34	2.26	0.54	0.78	2	0.34	0.26	0.48	0.16	0.17	0.35	سناریوی دوم (Second scenario)
0.08	0.16	0.91	0.27	0.29	0.60	0.20	0.31	0.43	0.18	0.05	0.12	سناریوی سوم (Third scenario)
0.16	0.21	1.05	0.30	0.21	1.3	0.21	0.22	0.80	0.15	0.8	0.48	سناریوی چهارم (Fourth scenario)
0.13	0.18	1.23	0.23	0.13	1.18	0.24	0.25	0.78	0.21	0.19	0.44	سناریوی پنجم (Scenario Five)

محاسبات مثلث‌بندی دارند. یافته‌های این مقاله نیز این نتایج را تأیید می‌کند، به‌گونه‌ای که توزیع نقاط کنترل در طول راه‌گذر به روش بهینه، موجب بهبود در دقت محاسبات مثلث‌بندی می‌شود. در تحقیق [۱۱] نشان داده است که روش سلف-کالیبراسیون در محاسبات مثلث‌بندی نتایج بهتری نسبت به استفاده از دوربین از پیش کالیبره شده دارد. این نتایج همسو با نتایج بدست آمده در این مقاله می‌باشد که استفاده از روش سلف-کالیبراسیون در پردازش تصاویر موجب افزایش دقت مثلث‌بندی گردید و در مقابل استفاده از پارامترهای کالیبراسیون دوربین از پروژه مرجع، منجر به افزایش خطای مثلث‌بندی شده است. نتایج بدست‌آمده از این تحقیق همچون تحقیقات [۲۴، ۲۹] نیز نشان داد که مقدار خطای مثلث‌بندی در هر دو نرم‌افزار تقریباً مشابه‌اند اما کیفیت بازسازی و تولید ابر نقاط تولید شده از نرم‌افزار متفاوت می‌باشد.

این مقاله علاوه بر تایید یافته‌های پیشین، چندین نتایج نوآورانه را نیز ارائه داد. در بیشتر مطالعات پیشین تاثیرگذاری پارامترهای موثر بر دقت محاسبات مثلث‌بندی با استفاده از تصاویر دارای مختصات دقیق مورد

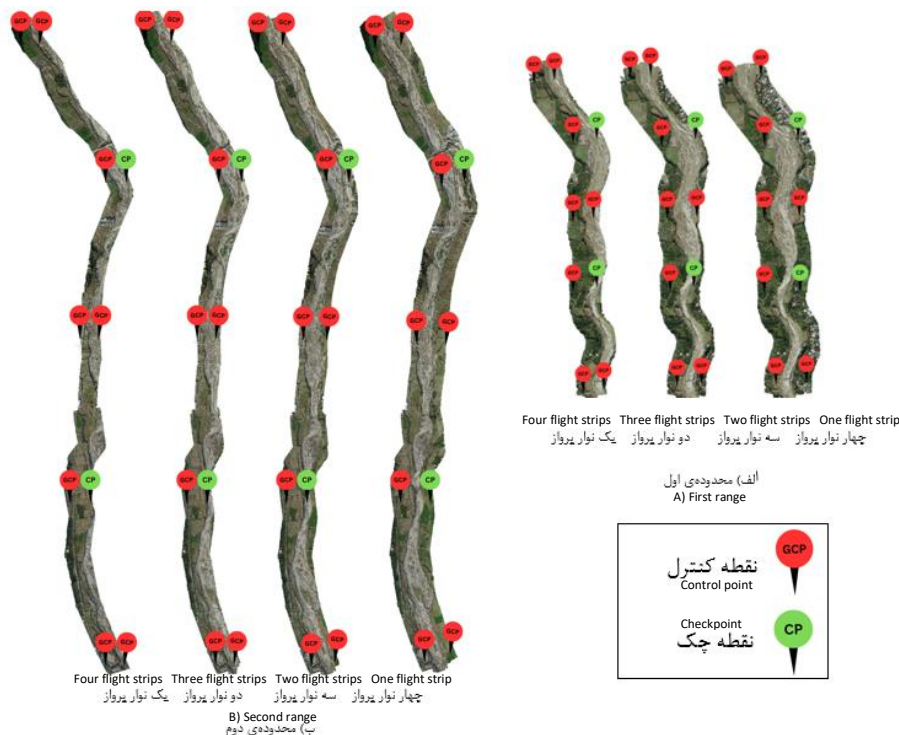
با توجه به جداول (۱۰) و (۱۱)، در بررسی تاثیر تعداد نوار پروازی نیز سناریوی سوم در همه حالت‌های استفاده از بیش از یک نوار پروازی، دارای خطای ارتفاعی و مسطحاتی کمتری نسبت به سایر سناریوهای دیگر بوده است. با توجه به نتایج این جداول، دقت مثلث‌بندی سناریوی سوم با چهار نوار پروازی در محدوده‌ی اول و دوم، به ترتیب افزایش دو برابری و سه برابری نسبت به حالت استفاده از یک نوار پروازی داشته است. علت این امر به دلیل افزایش پوشش تصاویر در چهار نوار پرواز نسبت به حالت‌های دیگر و استحکام هندسی بیشتر شبکه تصویربرداری می‌باشد. در شکل (۱۵)، سناریوی سوم در یک‌الی چهار نوار پروازی و در هر دو محدوده‌ی اول و دوم نشان داده شده است.

بحث

مقایسه‌ی نتایج این مقاله با پژوهش‌های بین‌المللی تایید‌کننده نتایج این مقاله هستند. طبق تحقیقات انجام شده [۲، ۱۰، ۱۲، ۱۴]، انتخاب مناسب تعداد و توزیع نقاط کنترل زمینی تأثیر قابل توجهی بر دقت

مقاله محدودیت‌های این افزایش را بررسی کرده و نشان داد که صرفاً افزایش نقاط موجب بهبود دقت نمی‌شود بلکه، توزیع مناسب نقاط کنترل موجب بهبود دقت مثلث‌بندی می‌شود. همچنین، این مقاله بررسی دقیقی از تاثیرگذاری افزایش تعداد نوار پرواز بر دقت محاسبات مثلث‌بندی در مسیرهای راهگذر ارائه کرد که در مطالعات پیشین بررسی کمتری در این موضوع شده است.

بررسی قرار گرفته بود اما در این مقاله، علاوه بر تاثیرگذاری پارامترها مختلف به همراه مختصات دقیق و معلوم مراکز تصاویر، تاثیرگذاری این پارامترها در هنگام فقدان مختصات دقیق مراکز تصاویر نیز ارائه شد. همچنین، تاثیرگذاری توزیع و تعداد نقاط کنترل با رویکردی جامع در این مقاله مورد بررسی قرار گرفت. تحقیق‌های پیشین نشان داده‌اند که افزایش تعداد نقاط کنترل تأثیر مثبتی بر دقت مثلث‌بندی دارد، اما این



شکل ۱۵: ابر نقاط تولید شده در طی یک تا چهار نوار پرواز در محدوده‌ی اول و دوم از سناریوی سوم

Fig. 15: Point clouds generated during one to four flight lanes in the first and second range of the third scenario

جدول ۱۲: مشخصات تعداد و نحوه توزیع نقاط کنترل برای تهیه نقشه در مقیاس‌های مختلف

Table 12: Specifications for the number and distribution of control points for mapping at different scales

مقیاس (Scale)	منحنی میزان (Contour Interval)	خطا ارتفاعی (متر) (Elevation Error)	توزیع نقاط (Point Distribution)	فاصله نقاط (متر) (Point Spacing)	کالیبراسیون (Calibration)
1:500	نیم متری Half a meter	0.15	توزیع نقاط کنترل زمینی به صورت یکنواخت و در طرفین پروژه (مانند سناریوی سوم) Distributing ground control points evenly and on both sides of the project (like the third scenario)	600	سلف-کالیبراسیون Self-calibration
1:1000	نیم متری Half a meter	0.30	توزیع نقاط کنترل زمینی به صورت یکنواخت و در طرفین پروژه (مانند سناریوی سوم) Distributing ground control points evenly and on both sides of the project (like the third scenario)	600	سلف-کالیبراسیون Self-calibration
1:2000	یک متری One meter	0.40	توزیع نقاط کنترل زمینی به صورت یکنواخت و در طرفین پروژه (مانند سناریوی سوم) Distributing ground control points evenly and on both sides of the project (like the third scenario)	600	سلف-کالیبراسیون Self-calibration
1:2000	دو متری Two meters	1	توزیع نقاط کنترل زمینی به صورت یکنواخت و در طرفین پروژه (مانند سناریوی سوم) Distributing ground control points evenly and on both sides of the project (like the third scenario)	1200	سلف-کالیبراسیون Self-calibration

منابع و مأخذ

نتیجه‌گیری

- [1] Tziavou, O., S. Pytharouli, and J. Souter, Unmanned Aerial Vehicle (UAV) based mapping in engineering geological surveys: Considerations for optimum results. *Engineering Geology*, 2018. 232: p. 12-21.
- [2] Ferrer-González E, Agüera-Vega F, Carvajal-Ramírez F, Martínez-Carricondo P. UAV photogrammetry accuracy assessment for corridor mapping based on the number and distribution of ground control points. *Remote sensing*. 2020;12(15):2447. DOI: 10.3390/rs12152447
- [3] Howard J, Murashov V, Branche CM. Unmanned aerial vehicles in construction and worker safety. *American journal of industrial medicine*. 2018;61(1):3-10. DOI: 10.1002/ajim.22782
- [4] Bethel JS, Van Gelder BH, Cetin AF, Sampath A. Corridor mapping using aerial technique. 2006. DOI: 10.5703/1288284313396
- [5] Cledat E, Jospin LV, Cucci DA, Skaloud J. Mapping quality prediction for RTK/PPK-equipped micro-drones operating in complex natural environment. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*. 2020;167:24-38. DOI: 10.1016/j.isprsjprs.2020.05.015
- [6] UAV AS Corridor Mapping Made Easy with DJI Drones. 2023.
- [7] Norouzi A. 2020 [Available from: <https://phoenix-air.ir/the-role-of-uavs-in-inspecting-power-transmission-lines/>]
- [8] Abbaspour m, Azar m, Khoshlahjeh, Varshosaz m. Impact of the number and position of ground control points in the accuracy obtained for the UAV photogrammetry based prepared. 2018. DOI:10.13140/RG.2.2.18739.68644
- [9] Martínez-Carricondo P, Agüera-Vega F, Carvajal-Ramírez F, Mesas-Carrascosa F-J, García-Ferrer A, Pérez-Porras F-J. Assessment of UAV-photogrammetric mapping accuracy based on variation of ground control points. *International journal of applied earth observation and geoinformation*. 2018;72:1-10. DOI:10.1016/j.jag.2018.05.015
- [10] Skarlatos D, Procopiou E, Stavrou G, Gregoriou M. Accuracy assessment of minimum control points for UAV photography and georeferencing: SPIE; 2013. DOI:10.1117/12.2028988
- [11] Harwin S, Lucieer A, Osborn J. The impact of the calibration method on the accuracy of point clouds derived using unmanned aerial vehicle multi-view stereopsis. *Remote Sensing*. 2015;7(9):11933-53. DOI: 10.3390/rs70911933
- [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(1):2. DOI:10.3390/drones3010002
- [13] Sammartano G, Chiabrando F, Spanò A. Oblique images and direct photogrammetry with a fixed wing platform: first test and results in Hierapolis of Phrygia (TK). *The International Archives*

در این تحقیق پارامترهای تعداد و توزیع نقاط کنترل، نحوه‌ی کالیبراسیون دوربین، نرم‌افزارهای فتوگرامتری و تعداد نوارهای پرواز که بر دقت مثلث‌بندی فتوگرامتری در مناطق کریدوری تاثیرگذار می‌باشند مورد بررسی قرار گرفت. اکثر این بررسی‌ها در حالت‌های چالشی که پروژه فتوگرامتری تنها شامل یک نوار پروازی بوده و مختصات دقیق مراکز تصاویر نیز موجود نمی‌باشند انجام گرفته است. نتایج به دست آمده در این مقاله بیان‌کننده‌ی توانایی رسیدن به دقت مثلث‌بندی بالا در محیط و شرایط چالش برانگیز در این مناطق می‌باشد. نتایج ارزیابی‌ها در بررسی تاثیرگذاری تعداد و توزیع نقاط کنترل زمین نشان داد که توزیع نقاط کنترل زمینی به صورت یکنواخت و در طرفین پروژه به صورت چهار نقطه در ابتدا و چهار نقطه در انتهای پروژه به همراه دو نقطه کنترل زمینی در میانه پروژه (شبه سناریوی سوم) می‌تواند دقت مثلث‌بندی فتوگرامتری در مناطق راهگذر را بهبود بخشد. همچنین، افزایش تعداد نقاط کنترل و کاهش فاصله آنها نیز می‌تواند در افزایش دقت ارتفاعی و مسطحانی تاثیرگذار باشد. همچنین، نتایج این ارزیابی‌ها نشان داد که استفاده از حالت سلف-کالیبراسیون در محاسبات مثلث‌بندی برای کالیبراسیون دوربین می‌تواند منجر به افزایش دقت مثلث‌بندی گردد. این ارزیابی‌ها نشان داد که در صورت امکان، استفاده از چند نوار پروازی در تصویربرداری و مثلث‌بندی فتوگرامتری می‌تواند منجر به نتایج دقیق‌تری نسبت به حالت استفاده از تک نوار پروازی در نواحی راهگذر گردد. به طور کلی، نتایج این پژوهش نشان می‌دهد با استفاده از پارامترهای مناسب در طراحی نقاط کنترل زمینی و در تنظیمات محاسبات مثلث‌بندی در مناطق راهگذر می‌توان به دقت مناسب برای مثلث‌بندی رسید.

در انتها و به عنوان یک پیشنهاد، بر اساس مقادیر دقت‌های به دست آمده از بررسی سناریوهای مختلف در این مقاله، تنظیمات مربوط به نحوه توزیع نقاط کنترل مطابق با جدول (۱۲) در تهیه‌ی نقشه در مقیاس‌های ۱:۵۰۰، ۱:۱۰۰۰ و ۱:۲۰۰۰ و با منحنی میزان‌های نیم متری، یک متری و دو متری پیشنهاد می‌گردد.

مشارکت نویسندگان

در این مقاله، نویسندگان به نسبت سهم برابر مشارکت داشته‌اند.

تشکر و قدردانی

مقاله‌ی ارسالی، استخراج شده از پایان نامه مقطع کارشناسی ارشد می‌باشد.

تعارض منافع

«هیچ‌گونه تعارض منافع توسط نویسندگان بیان نشده است.»

DOI:10.5194/isprs-annals-IV-4-W4-55-2017

[28] SURE. [Available from: <https://www.nframes.com/about-us/>]

[29] Barbasiewicz A, Widerski T, Daliga K, editors. The analysis of the accuracy of spatial models using photogrammetric software: Agisoft Photoscan and Pix4D. E3S Web of Conferences; 2018: EDP Sciences. DOI:10.1051/e3sconf/20182600012

[30] Ajeet Kumar Gond, A.O., Shishir Gaur, Nilendu Das *Accuracy Assessment and Optimization of the Photogrammetric Process Variables for 3D Mapping Using Unmanned Aerial Vehicle (Drones)*. 2025.

[31] Sadeghian s, Milan A, Ahmadi H, Karimi R. Aerial triangulation based on digital images, GPS/IMU and optimized self-calibration parameters by genetic algorithm. Scientific - Research Quarterly of Geographical Data (SEPEHR). 2020;29. DOI: 10.22131/sepehr.2020.47881

[32] Huang H, Ye Z, Zhang C, Yue Y, Cui C, Hammad A. Adaptive Cloud-to-Cloud (AC2C) Comparison Method for Photogrammetric Point Cloud Error Estimation Considering Theoretical Error Space. Remote Sensing. 2022;14(17):4289. DOI: 10.3390/rs14174289

[33] Mitishita, E., et al. *Study of stability analysis of the interior orientation parameters from the small-format digital camera using on-the-job calibration*. in *Canadian Geomatics Conference*. 2010.[34] Huang, H., et al., *Adaptive Cloud-to-Cloud (AC2C) Comparison Method for Photogrammetric Point Cloud Error Estimation Considering Theoretical Error Space*. Remote Sensing, 2022. 14(17): p. 4289.

معرفی نویسندگان

AUTHOR(S) BIOSKETCHES



مبینا احمدی آسور دارای مدرک کارشناسی ارشد مهندسی نقشه‌برداری (گرایش فتوگرامتری) از دانشگاه صنعتی نوشیروانی بابل می‌باشد. ایشان تاکنون موفق به چاپ یک مقاله در کنفرانس‌های معتبر بین‌المللی شده‌اند. زمینه‌های تخصصی ایشان عبارتند از: مهندسی نقشه‌برداری، فتوگرامتری، پردازش تصاویر هوایی، مدلسازی مبتنی بر ابرنقاط و تصاویر.

AhmadiAsoor, M. Department of Geomatics Engineering, Faculty of Civil Engineering, Babol Noshirvani University of Technology, Babol, Iran

✉ m.ahmadiasoor@gmail.com

علیرضا آفری ایشان فارغ التحصیل کارشناسی نقشه‌برداری از دانشگاه تبریز و کارشناسی ارشد گرایش ژئودزی و دکتری گرایش فتوگرامتری از دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی می‌باشد.

of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences. 2020;43:75-82.

DOI:10.5194/isprs-archives-XLIII-B2-2020-75-2020

[14] Santos Santana L, Araújo E Silva Ferraz G, Bedin Marin D, Dienevam Souza Barbosa B, Mendes Dos Santos L, Ferreira Ponciano Ferraz P, et al. Influence of flight altitude and control points in the georeferencing of images obtained by unmanned aerial vehicle. European Journal of Remote Sensing. 2021;54(1):59-71. DOI: 10.1080/22797254.2020.1845104

[15] Heidarimozaffar M, Zerafatyjamal R, Torabzadeh Khorasani H. Accuracy and Precision of Producing Topographic Maps in Linear Projects by UAV Photogrammetric Method. Scientific-Research Quarterly of Geographical Data (SEPEHR). 2023;31(124):21-38. DOI: 10.22131/sepehr.2023.555436.2879

[16] Erfanzadeh A, Saadatseresht M. Behavior analysis and the effect of UAV photogrammetric network design parameters on the quality of 3D reconstruction by Monte Carlo imulation Method. Scientific-Research Quarterly of Geographical Data (SEPEHR). 2021;30(119):27-45. DOI: 10.22131/sepehr.2021.247874

[17] Shahbazi M, Sohn G, Théau J, Menard P. Development and evaluation of a UAV-photogrammetry system for precise 3D environmental modeling. Sensors. 2015; 15(11): 27493-524. DOI: 10.3390/s151127493

[18] Abbaspour m, Varshosaz m. Studying the effect of dispersion of image target points in the resulted accuracy and precision for interior and exterior orientation parameters in camera calibration process. n National Conference on New Geomatics Technologies and Applications. 2018.

[19] UASMaster TI. [Available from: <https://geospatial.trimble.com/en>][20] Metashape. Agisoft Metashape [Available from: <https://www.agisoft.com>][21] PhotoModeler. [Available from: <https://www.photomodeler.com>][22] CONTEXTCAPTURE. [Available from: <https://www.bentley.com/brand/contextcapture/>][23] 3DSurvey. [Available from: <https://3dsurvey.si/software/industries/>]

[24] Sužiedelytė Visockienė J, Bručas D, Ragauskas U. Comparison of UAV images processing softwares. Journal of Measurements in Engineering. 2014;2(2):111-21.

[25] Pix4DMapper. [Available from: <https://www.pix4d.com>][26] PHOTOMOD. [Available from: <https://en.racurs.ru>]

[27] Alidoost F, Arefi H. Comparison of UAS-based photogrammetry software for 3D point cloud generation: a survey over a historical site. ISPRS Annals of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences. 2017;4:55-61.



پسادکتر در دانشگاه RMIT استرالیا و از سال ۱۳۹۵ تاکنون به عنوان استادیار در گروه مهندسی نقشه برداری دانشگاه صنعتی نوشیروانی بابل مشغول به فعالیت می باشند. ایشان تاکنون موفق به چاپ بیش از ۳۰ مقاله در مجلات و کنفرانس های معتبر بین المللی شده اند. زمینه های تخصصی ایشان عبارتند از: فتوگرامتری، سنجش از دور، پردازش تصاویر، کاربرد یادگیری ماشین و هوش مصنوعی در کشاورزی و سنجش از دور.

parmehr, E..G. Assistant Professor at Department of Geomatics Engineering, Faculty of Civil Engineering, Babol Noshirvani University of Technology, Babol, Iran

✉ parmehr@nit.ac.ir



ایشان تاکنون موفق به چاپ مقاله های متعدد در مجلات و کنفرانس های معتبر بین المللی شده اند. همچنین ایشان در حوزه فتوگرامتری هوایی، بینایی رایانه ای و سنجش از دور مشغول به فعالیت و تحقیق می باشد.

Afary, A. Assistant Professor at Department of Geomatics Engineering, Faculty of Civil Engineering, Babol Noshirvani University of Technology, Babol, Iran

✉ afary@nit.ac.ir

عبادت قنبری پرمهر دارای مدرک دکتری تخصصی مهندسی نقشه برداری (گرایش فتوگرامتری) از دانشگاه ملبورن استرالیا می باشد. پس از اخذ دکتری، ایشان به مدت دو سال به عنوان پژوهشگر

Citation (Vancouver): Ahmadi Asoor M, Afary A, Ghanbari Parmehr E. [Evaluation of Parameters Affecting Aerotriangulation Accuracy in Corridor Mapping]. *J. RS. GEOINF. RES.* 2025; 3(1): 119-138

 <https://doi.org/10.22061/jrsgr.2025.11645.1089>



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

Development of a BIM-based data model in order to value and determine the owners' share of building components

N. Akhlaghi, A. Milan, A. Vafaeinezhad*

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

ABSTRACT

Received: 03 February 2025

Reviewed: 09 March 2025

Revised: 14 April 2025

Accepted: 02 June 2025

KEYWORDS:

Pricing

Building Information Model

Real Estate Documentation

Cadastre

Ownership Rate

* Corresponding author

✉ a_vafaei@sbu.ac.ir

☎ (+9821) 73932452

Background and Objectives: In recent years, with the development of urbanization and the construction of apartments and complex buildings, the importance and necessity of 3D data, especially in the real estate information sector, has been given more attention. Building Information Modeling is a new technology in the construction industry that is used to create, manage and share a digital model of a building, its components and related information. In addition to increasing interoperability and collecting all building information and documents in a single model, by adapting the building information model and the structure whose construction has been completed, it can be used for demarcation purposes to specify the common areas, the boundaries and the extent of ownership of each person from the various components of the building and for property documentation, for accurate property pricing.

Methods: In this research, first, the parameters affecting the valuation of the property will be identified and the required data will be collected according to the parameters. Then, using two-dimensional architectural and structural drawings drawn in CAD (which can be obtained from engineering or engineering systems offices), the building information model has been reconstructed. After that, for each of the building components, legal enrichment (specifying common areas and building amenities) has been performed and the value of the materials used in the building has been defined based on the price list for the building components. The proposed process in this research has been modeled in three dimensions in Revit software.

Findings: The building information model is used throughout the entire life cycle of a building, from design to construction, operation, and even maintenance, but it does not actually have the ability to model ownership relations and legal information; however, with the method implemented in this study, due to the importance of clarifying ownership relations in land or buildings, especially in court cases, ownership and legal relations can be defined; in addition to defining legal relations, the modeling carried out for a sample of a constructed building has been carried out for accurate valuation according to the location and effective parameters.

Conclusion: Finally, the share of each owner of the building components is determined by defining the joint and several relationships. In addition to accurately and unambiguously recording the amount of ownership of individuals in the building, this method can also be used to accurately price the property considering effective external and internal factors and reduce legal claims. Pricing is done using a price list for all building components and materials, which can be used to obtain the total price.



NUMBER OF REFERENCES

26



NUMBER OF FIGURES

10



NUMBER OF TABLES

8

مقاله پژوهشی

توسعه مدل داده مبتنی بر مدل اطلاعات ساختمان به منظور ارزش گذاری و تعیین سهم مالکین از اجزای ساختمانی

نیلوفر اخلاقی، اصغر میلان، علیرضا وفائی‌نژاد*

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

چکیده

پیشینه و اهداف: در سال‌های اخیر، باتوجه به توسعه شهرنشینی و ساخت آپارتمان و ساختمان‌های پیچیده، اهمیت و ضرورت وجود داده‌های سه‌بعدی به‌خصوص در بخش اطلاعات املاک بیشتر مورد توجه قرار گرفته است. مدل اطلاعات ساختمان (Building Information Modeling) فناوری جدیدی در صنعت ساخت‌وساز است که برای ایجاد، مدیریت و به‌اشتراک‌گذاری مدل رقومی ساختمان، اجزا و اطلاعات مربوط به آن استفاده می‌شود. می‌توان با استفاده از مدل اطلاعات ساختمان، علاوه بر بالا بردن قابلیت همکاری و جمع‌آوری تمام اطلاعات و اسناد ساختمان در یک مدل واحد و تطبیق مدل اطلاعات ساختمان و سازه‌ای (که ساخت آن به اتمام رسیده است)، از آن به منظور اهداف حدنگاری جهت مشخص کردن قسمت‌های مشاعی، مفروز و میزان مالکیت هر فرد از اجزای مختلف سازنده ساختمان و مستندسازی املاک، جهت قیمت‌گذاری دقیق ملک استفاده کرد.

روش‌ها: در این تحقیق ابتدا به شناسایی پارامترهای مؤثر بر ارزش‌گذاری ملک پرداخته و باتوجه به پارامترها، داده‌های مورد نیاز جمع‌آوری خواهد شد. سپس با استفاده از نقشه‌های معماری و سازه‌ای دوبعدی ترسیم شده در CAD (که از دفتر فنی مهندسی یا نظام‌مهندسی می‌توان تهیه کرد) به بازسازی مدل اطلاعات ساختمان پرداخته شده است. پس از آن برای هر کدام از اجزای ساختمانی، غنی‌سازی حقوقی (مشخص کردن مشاعات و مفروزات ساختمان) انجام و ارزش مصالح استفاده شده در ساختمان بر اساس فهرست‌بها برای اجزای ساختمانی تعریف شده است. فرایند پیشنهادی در این تحقیق در نرم‌افزار Revit به صورت سه‌بعدی مدل‌سازی شده است.

یافته‌ها: مدل اطلاعات ساختمان در کل چرخه حیات ساختمان یعنی از مرحله طراحی تا ساخت و بهره‌برداری و حتی نگهداری استفاده می‌شود اما به طور بالفعل قابلیت مدل‌سازی روابط مالکیتی و اطلاعات حقوقی را دارا نمی‌باشد؛ اما با روش اجرا شده در این تحقیق به دلیل اهمیت روشن‌سازی روابط مالکیتی در زمین یا ساختمان بخصوص در دعاوی دادگاهی، می‌توان روابط مالکیتی و حقوقی را تعریف کرد؛ علاوه بر تعریف روابط حقوقی، مدل‌سازی انجام شده برای یک نمونه ساختمان احداث شده جهت ارزش‌گذاری دقیق مطابق موقعیت و پارامترهای مؤثر انجام گرفته است.

نتیجه‌گیری: در نهایت میزان سهم هر یک از مالکین از اجزای ساختمانی با تعریف روابط مفروز و مشاع تعیین می‌شود. از این روش علاوه بر ثبت دقیق و بدون ابهام میزان مالکیت افراد از ساختمان، می‌توان جهت قیمت‌گذاری دقیق املاک باتوجه به عوامل خارجی و داخلی مؤثر و کاهش دعاوی حقوقی نیز استفاده کرد. قیمت‌گذاری با استفاده از فهرست بها برای تمام اجزا و مصالح ساختمان صورت گرفته است که قیمت کل را می‌توان به دست آورد.

تاریخ دریافت: ۱۵ بهمن ۱۴۰۳
تاریخ داوری: ۱۹ اسفند ۱۴۰۳
تاریخ اصلاح: ۲۶ فروردین ۱۴۰۳
تاریخ پذیرش: ۱۲ خرداد ۱۴۰۴

واژگان کلیدی:

قیمت‌گذاری
مدل اطلاعات ساختمان
مستند سازی املاک
حدنگاری (کاداستر)
میزان مالکیت

* نویسنده مسئول

a_vafaei@sbu.ac.ir

۰۲۱-۷۳۹۳۲۴۵۲ ①

مقدمه

دقیق بهره‌برد. ارزش بازار و قیمت طبق تعریف شورای استانداردهای

ارزش‌گذاری بین‌المللی (International Valuation Standards Council, 2020)

به شرح زیر است: [۲]

ارزش بازار، مبلغ تخمینی ملکی است که باید در تاریخ ارزیابی بین خریدار مایل به خرید و فروشنده مایل به فروش در یک معامله کاملاً شفاف پس از بازاریابی مناسب که در آن هریک از طرفین آگاهانه، محتاطانه و بدون اجبار عمل کرده‌اند مبادله شود. این یک نوع تعریف «قیمت» است و به راحتی می‌توان آن را به عنوان توضیح «قیمت» تغییر داد.

قیمت، مبلغ تخمینی است که ملک در تاریخ فروش بین یک خریدار مایل و یک فروشنده مایل در یک معامله کاملاً شفاف و پس از بازاریابی

محدودیت زمین در شهرهای بزرگ، باعث رشد و توسعه آن‌ها در بعد عمودی مانند احداث ساختمان‌های چند طبقه و بلند مرتبه و چند منظوره با تراکم بالا و نیز سازه‌های تودرتو و زیرزمینی مانند مترو و پارکینگ‌های زیرزمینی شده است. تمام این موارد با توجه به کمبود زمین، باعث افزایش ارزش زمین شده و از طرف دیگر باعث به وجود آمدن مسائل فنی و حقوقی جدید و پیچیده‌ای در مباحث مربوط به حدنگاری گردیده است [۱]. یکی از وظایف متخصصان املاک، ارزش‌گذاری دقیق ملک است، چرا که مردم با توجه به دارایی خود اقدام به خرید، رهن، اجاره و سرمایه‌گذاری روی ملک می‌نمایند. ارزش‌گذار باید از روش، مدل و استاندارد مناسب برای اطمینان از ارزش‌گذاری

شود و بصورت عادلانه خدمات شهری ارائه گردد. این ارزش گذاری کلان براساس مدل‌های ارزش گذاری استاندارد است که شامل مولفه‌هایی مانند مساحت ساختمان و ملک، کیفیت ساختمان و مصالح و سال ساخت می‌باشد [۶].

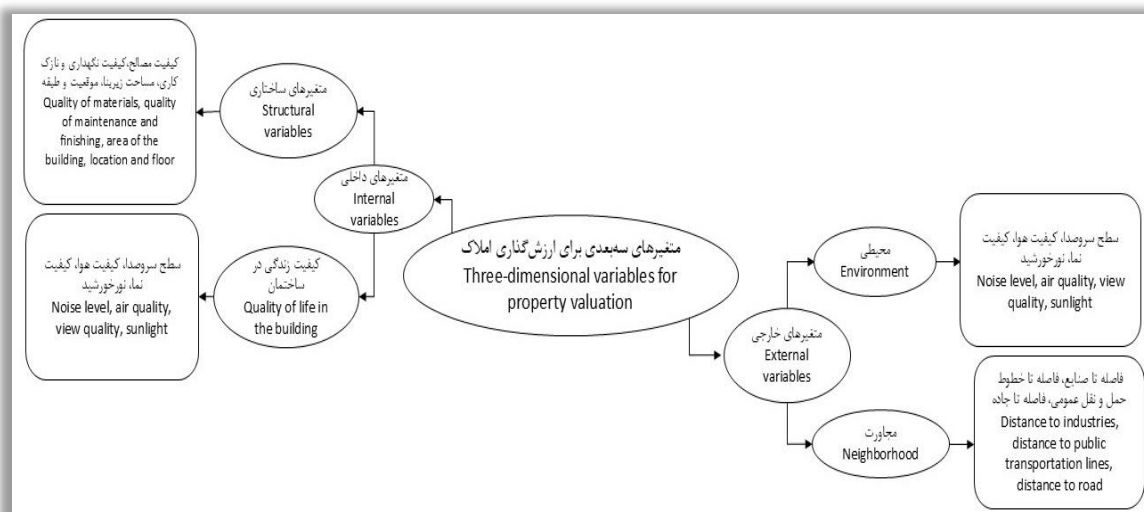
ارزش گذاری ملک باید در فضای سه بعدی و متناسب با عناصر سه بعدی داخلی ملک و فضای بیرونی آن انجام گیرد. بنابراین در ارزش گذاری هم متغیرهای داخلی و هم متغیرهای خارجی وجود دارند که هر کدام به زیر بخش‌هایی تقسیم می‌شوند. متغیرهای ساختاری به عنوان یکی از عوامل متغیرهای داخلی به فضای داخل ساختمان مثل شکل و اندازه ملک، ارتفاع ساختمان اشاره می‌کند. از انواع متغیرهای خارجی، می‌توان متغیر محیطی و مجاورت نام برد که به ترتیب شامل، کیفیت هوا و نورپردازی و میزان صدای ساختمان و موقعیت ملک از لحاظ نزدیکی به مراکز آموزشی و بهداشتی، وسایل حمل و نقل می‌شوند.

شکل (۱) این متغیرها را نشان می‌دهد که در ادامه تحقیق با عنوان پارامترهای تاثیر گذار بر قیمت ملک اشاره خواهد شد.

جدول ۱: رویکردها و روش‌های ارزش گذاری

Table 1: Valuation approaches and methods

سه رویکرد Three approaches	پنج روش Five methods
رویکرد آماری بر تعیین ارزش ملک با استفاده از نمونه گیری و تقریب تکیه دارد. The statistical approach relies on determining property value using sampling and approximation.	روش قابل مقایسه که رویکرد بازار دارد. A comparable method that has a market approach.
رویکرد درآمد بر تعیین ارزش بر اساس کل درآمد سالانه و درآمد تولیدی حاصل از دارایی متمرکز است. The income approach focuses on determining value based on the total annual income and generated income from the property.	روش هزینه یا روش پیمانکار که رویکرد هزینه دارد. Cost method or contractor method which has a cost approach.
رویکرد هزینه یابی مستقیم، جایی است که ارزش زمین باید به ارزش ساختمان اضافه شود تا ارزش کلی ملک پیدا شود. The direct costing approach is where the value of the land must be added to the value of the building to find the total value of the property.	روش سرمایه گذاری یا درآمد که رویکرد درآمد دارد. An investment or income method that takes an income approach.
	روش سود که رویکرد درآمد دارد. The profit method, which has an income approach.
	روش توسعه یا باقی مانده که رویکرد درآمد دارد. Development or residual method that has an income approach.



شکل ۱: متغیرهای سه بعدی مؤثر در ارزش گذاری

Fig. 1: Three-dimensional variables affecting valuation

این زمینه، الزامات ساخت و ساز و فاصله‌گذاری را تعیین می‌کنند تا حقوق مالکیت و محیط سالم حفظ شود.

- از لحاظ مجاورت نیز، توسعه صنعتی در ایران باید با توجه به مسائل زیست‌محیطی و اجتماعی انجام شود تا از آلودگی جلوگیری گردد. به همین منظور، آیین‌نامه‌ای برای ساماندهی و کنترل واحدهای صنعتی تدوین شده است و شامل تعاریف، تقسیم‌بندی بر اساس نوع فعالیت و نظارت سازمان‌ها می‌باشد. در این آیین‌نامه استان‌های کشور را به ۱۰ منطقه تقسیم کردند و براساس تقسیم‌بندی جدول (۳)، حداقل فواصل مجاز استقرار صنایع را نشان می‌دهد.

متغیرهای محیطی از متغیرهای خارجی، به شرایط محیطی ملک اشاره می‌کند. عوامل محیطی به چند دسته تقسیم می‌شوند که به طور مختصر توضیحاتی داده شده است:

- آلودگی صوتی ناشی از صدای بیش از حد هواپیما، ماشین و خیابان می‌باشد.

- کیفیت هوا که قانون حفاظت محیط زیست، مسئول شناسایی و کنترل منابع آلودگی است و کیفیت هوای مناطق را از طریق شاخص کیفیت هوا (AQI) ارزیابی می‌کند. (جدول ۲)

- منظره ساختمان‌ها تحت تأثیر دید، مشرفیت و سایه‌اندازی می‌باشد که بر حریم خصوصی و نور طبیعی تأثیر می‌گذارد. قوانین شهرداری در

جدول ۲: شاخص کیفیت هوا (AQI) [۷]

Table 2: Air Quality Index (AQI) [7]

نقاط شکست Breakpoints							
O ₃ ۸ ساعته	O ₃ یک ساعته	PM _{2.5} ۲۴ ساعته	PM ₁₀ ۲۴ ساعته	CO ۸ ساعته	SO ₂ ۲۴ ساعته	NO ₂ یک ساعته	طبقه بندی هوا Air quality classification
0.0-0.059	-	0.0-15.4	0-54	0.0-4.4	0.000-0.034	0-0.053	خوب Good
0.060-0.075	-	15.5-35.0	55-154	4.5-9.4	0.035-0.144	0.054-0.1	متوسط Medium
0.076-0.095	0.125-0.164	35.1-65.4	155-254	9.5-12.4	0.145-0.224	0.101-0.36	ناسالم برای گروه های حساس Unhealthy for sensitive groups
0.096-0.115	0.165-0.204	65.5-150.4	255-354	12.5-15.4	0.225-0.304	0.361-0.64	ناسالم Unhealthy
0.116-0.374	0.205-0.404	150.5-350.4	355-424	15.5-30.4	0.305-0.604	0.65-1.24	خیلی ناسالم Very unhealthy
-	0.405-0.504	250.5-350.4	425-504	30.5-40.4	0.605-0.804	1.25-1.64	خطرناک
	0.505-0.604	350.5-500.4	505-604	40.5-50.4	0.805-1.004	1.65-2.04	Dangerous

جدول ۳: حداقل فواصل مجاز جهت استقرار صنایع [۸]

Table 3: Minimum permitted distances for industrial establishment [8]

فاصله از مراکز مختلف به متر Distance from different centers in meters						
رده ۶ Category6	رده ۵ Category5	رده ۴ Category4	رده ۳ Category3	رده ۲ Category2	رده ۱ Category1	اماکن و مراکز Places and centers
2500	2000	1500	1000	500	-	مرکز استان (آخرین محدوده سکونت گاه) Provincial center (last settlement area)
2000	1500	1000	500	250	-	مرکز شهرستان (آخرین محدوده سکونت گاه) City center (last settlement area)
2000	1500	1000	500	200	-	شهر City
1500	1000	1000	500	200	-	روستا Village
1500	1000	750	500	200	-	مراکز درمانی و آموزشی Medical and educational centers
1500	1000	750	500	200	50	مراکز نظامی Military centers
2000	1500	1000	500	150	150	پارک ملی- تا لا به دریاچه- اثر طبیعی ملی National Park-Wetland-Lake-Natural Heritage
1000	500	250	200	150	-	پناه گاه حیات وحش- منطقه حفاظت شده Wildlife Sanctuary - Protected Area
500	250	150	150	100	100	رودخانه دائمی غیر شرب Permanent non-potable river
2000	1500	1000	500	150	150	رودخانه دائمی شرب Permanent river of drinking water
500	250	200	150	100	50	چاه های آب شرب- کشاورزی و قنات ها Drinking-agricultural water wells and canals

ساختمان‌های غربی برای علاقه‌مندان به نور بعدازظهر مناسب‌اند اما معمولاً ارزش کمتری دارند که انتخاب نهایی بستگی به نیازها و سلیقه خریدار دارد.

- میزان صدای داخلی ساختمان، میزان سطح سر و صدا و سکوت اهالی ساختمان است. آلودگی صوتی در مناطق شهری می‌تواند کیفیت زندگی را تحت تأثیر قرار دهد و منجر به اختلال خواب، استرس و مشکلات سلامتی شود. ساختمان‌های واقع در این مناطق معمولاً جذابیت کمتری برای خریداران دارند و قیمت آنها کاهش می‌یابد. برعکس، املاکی که در محیط‌های آرام قرار دارند، برای خریداران جذاب‌ترند و ارزش بالاتری دارند. در بازار اجاره، آپارتمان‌های ساکت نرخ اجاره بیشتری دارند، در حالی که املاک پر سر و صدا با کاهش نرخ اجاره مواجه می‌شوند و آلودگی صوتی مستقیماً بر قیمت املاک تأثیرگذار است.

- منظور از دما و تهویه داخلی ساختمان، مطلوب بودن تهویه داخلی واحدها و سطح دمای ملک است. دما و تهویه تأثیر مستقیمی بر راحتی ساکنین و ارزش ملک دارند. ساختمان‌هایی با سیستم‌های تهویه مطبوع کارآمد جذاب‌ترند و به ترغیب خریداران کمک می‌کنند. مصرف کمتر انرژی در این ساختمان‌ها هزینه‌های جاری را کاهش داده و ارزش ملک را افزایش می‌دهد. عایق‌بندی حرارتی و استفاده از مصالح مقاوم در برابر تغییرات آب و هوایی به حفظ دما و عمر ساختمان کمک می‌کند. بازار مسکن نیز تحت تأثیر دما و شرایط آب و هوایی قرار دارد. در نهایت، تهویه مناسب و دماهای مطلوب ارزش ملک را بهبود می‌بخشند.

باتوجه به پیشرفت فناوری و استفاده از روش‌های نوین در صنعت ساختمان، امروزه ادغام اطلاعات متره و برآورد و حدنگاری سه‌بعدی به عنوان یکی از روش‌های مؤثر برای مدیریت املاک موردتوجه قرار گرفته‌است. ارزش یک ملک، حاصل ارتباط عناصر داخلی مرتبط ملک به‌عنوان شی سه‌بعدی (مانند حجم و ارتفاع) و عناصر سه‌بعدی از محیط بیرون ملک (مثل نما، آلودگی و سایه) به دست می‌آید؛ در نتیجه برای رسیدن به نتیجه دقیق، ارزش‌گذاری ملک باید در فضای سه‌بعدی انجام شود [۴]. یکی از راه‌های سه‌بعدی سازی ساختمان‌ها، استفاده از مدل‌سازی اطلاعات ساختمان است.

مدل‌سازی اطلاعات ساختمان می‌تواند به‌عنوان یک منبع غنی از اطلاعات ساختاری املاک مورد استفاده قرارگیرد. از قابلیت‌های مدل‌سازی اطلاعات ساختمان می‌توان به موارد نمایش داده‌شده در شکل (۲) اشاره کرد.

در مدل‌سازی اطلاعات ساختمان می‌توان مشخصات فیزیکی و فنی ساختمان را مدل‌سازی کرد. بدیهی است که دقت محاسبات هزینه، بر اساس داده‌های تولیدشده می‌باشد و اطلاعات نادرست منجر به تخمین نادرست هزینه‌ها خواهد شد [۹]. باتوجه به اینکه ارزش/املاک در سیستم مدیریت زمین (که شامل چهار اصل تملک زمین، مالیات و معامله می‌باشد) مورد نیاز است، در نتیجه ارزش‌گذاری دقیق و به هنگام دارایی‌ها در یک سیستم اهمیت فراوانی دارد.

○ متغیرهای ساختاری یکی از متغیرهای داخلی می‌باشد و شامل چند بخش کلی است که به توضیح مختصری از هرکدام اشاره شده است:

- کیفیت ملک، شامل ساختار و نوع مصالح استفاده شده در ساختمان است. مصالح باکیفیت دوام بیشتری دارند، هزینه‌های نگهداری را کاهش می‌دهند و ارزش ملک را افزایش می‌دهند. استفاده از مصالح مرغوب و مقاوم در برابر زلزله، رطوبت و سایر شرایط محیطی از مهم‌ترین عوامل در کیفیت ساخت است.

- هزینه ملک، هزینه ساخت و تعمیر و نگهداری ساختمان می‌باشد. سازمان نظام مهندسی هر ساله هزینه ساخت و ساز به ازای هر متر مربع را اعلام می‌کند که هزینه ساخت هر متر مربع ساختمان در سال ۱۴۰۳ بین ۱۰ میلیون و ۷۰۰ تا ۱۹ میلیون و ۹۰۰ هزار تومان و بسته به مصالح و نوع سازه و منطقه متفاوت است. نگهداری مناسب نیز باعث افزایش ارزش ملک می‌شود و هزینه‌های جاری قابل توجهی دارد.

- عناصر ملک، شامل موقعیت، مساحت و ابعاد و طبقه ساختمان است. زیربنا و مساحت ساختمان بر ارزش آن تأثیر دارد. شکل‌های متعارف مانند مربع یا مستطیل شکل ارزش بیشتری دارند. واحدهای طبقات بالاتر به دلیل دید و نورگیری بهتر معمولاً با ارزش‌ترند، ولی دسترسی آسان طبقات پایین‌تر نیز مهم است. موقعیت نیز علاوه بر نوع منطقه و دسترسی، نحوه قرارگیری ساختمان از لحاظ شمالی، جنوبی، شرقی و یا غربی نیز اهمیت بالایی دارد.

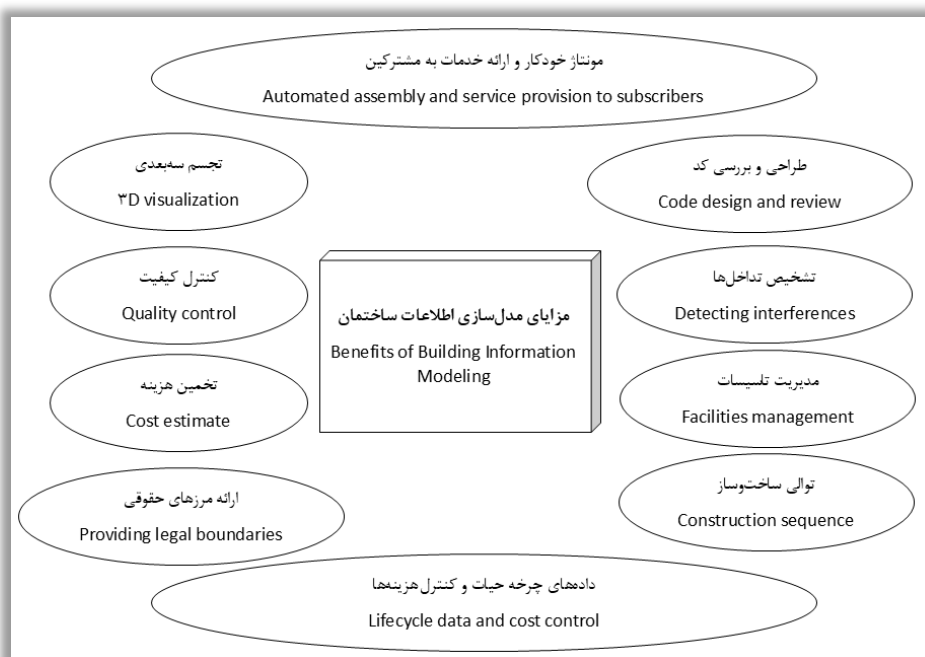
○ کیفیت زندگی در ساختمان بخش دوم متغیرهای داخلی است که به تفکیک، موارد مؤثر بر کیفیت زندگی در داخل ساختمان شرح داده شده است:

- روشنایی، نور طبیعی در ساختمان‌ها نقش مهمی در جذب خریداران و مستأجران دارد و به ایجاد فضایی دلپذیر و راحت کمک می‌کند. املاکی که دارای نورگیری مناسب هستند، معمولاً قیمت بالاتری دارند، زیرا این ویژگی کیفیت زندگی را ارتقا می‌دهد. همچنین، نور طبیعی موجب کاهش هزینه‌های انرژی و بهینه‌سازی دما در فصول مختلف می‌شود و تأثیر مثبت بر سلامت روانی ساکنان دارد. طراحی مناسب فضاها و جانمایی پنجره‌ها نیز به افزایش ارزش ملک کمک می‌کند و نورگیری جزء عوامل کلیدی در تصمیم‌گیری سرمایه‌گذاران و خریداران است.

ساختمان‌های جنوبی به دلیل نورگیری خوب و طراحی مناسب، ارزش بالاتری دارند و فضای داخلی روشن‌تری فراهم می‌کنند.

ساختمان‌های شمالی نسبت به ساختمان‌های جنوبی، نور کمتری دریافت کرده و معمولاً قیمت پایین‌تری دارند، هرچند ممکن است در موقعیت‌های خاص دارای ارزش بیشتری باشند.

ساختمان‌های شرقی صبح‌ها نور خوب دریافت می‌کنند اما در بعدازظهر ممکن است دما افزایش یابد و ارزش آن‌ها معمولاً بین ساختمان‌های شمالی و جنوبی قرار دارد.



شکل ۲: برخی از مزایای BIM [۹ و ۱۰]

Fig. 2: Some of the benefits of BIM [9 & 10]

مدل‌سازی و نمایش مرزهای حقوقی را ندارد. ادغام متره و برآورد با اطلاعات حقوقی از مرزهای مالکیتی حدنگاری، می‌تواند به بهبود کیفیت و دقت در تعیین سهم مالکین ساختمان‌های چند مالکیتی و ارزش آن کمک‌کند. از مزایای این روش می‌توان به، دقت بیشتر، کاهش خطاها از جمله محاسباتی، صرفه‌جویی در زمان و بهبود قابلیت برنامه‌ریزی اشاره نمود [۴]. در سطح بین‌المللی پژوهش‌های زیادی در زمینه قابلیت‌های مدل‌سازی اطلاعات ساختمان در ارزش‌گذاری املاک صورت گرفته‌است. راب‌هاوارد و همکاران در سال ۲۰۰۸ اهمیت استانداردسازی در مدل‌سازی اطلاعات ساختمان را مورد بررسی و ارزیابی قرار دادند [۱۳]. ازهر و همکاران در سال ۲۰۱۱ مزایا و چالش‌های مدل‌سازی اطلاعات ساختمان در صنعت معماری، مهندسی و ساخت‌وساز را بررسی نموده‌اند [۱۴]. دانیل فورگس و همکاران در سال ۲۰۱۲ به مطالعه باز اندیشی در فرآیند تخمین هزینه در مدل‌سازی اطلاعات ساختمان ۵ بعدی پرداختند و مزایای اجرای موفق مدل‌سازی اطلاعات ساختمان ۵ بعدی را گزارش کرده‌اند [۱۵]. شن‌زو و همکاران در سال ۲۰۱۳ برآورد هزینه در مدل‌سازی اطلاعات ساختمان را به عنوان یکی از جنبه‌های مهم مدیریت پروژه‌های ساختمانی مطرح نموده‌اند [۱۶].

جینگ‌چوان گو و همکاران در سال ۲۰۱۳ با ادغام رویکردهای مقایسه فروش، درآمد و هزینه توانستند دقت ارزیابی املاک را به طور مناسب بهبود بخشند [۱۷]. مایوف و همکاران در سال ۲۰۱۹ برای ارزیابی عملکرد متره از مدل‌سازی اطلاعات ساختمان استفاده نمودند و نتیجه گرفتند که با این روش می‌توان کنترل بیشتری بر پروژه داشت [۱۸]. در دهه‌های گذشته، مصرف انرژی ساختمان‌ها به دلیل افزایش جمعیت، اقتصاد رو به رشد و تقاضای بالاتر برای کیفیت زندگی به‌طور چشمگیری

روش ارزش‌گذاری با استفاده از مدل ساختمان و حدنگاری با ویژگی‌های واحد، منجر به ثبات بازار املاک و بهبود زندگی شهروندان می‌شود. از مدل‌های سه‌بعدی حدنگاری، که شامل مرزهای فیزیکی و قانونی‌اند، برای انتشار اطلاعات ارزش‌گذاری می‌توان استفاده کرد [۱۱]. از طرف دیگر در موارد مختلف برآورد قیمت ساختمان‌ها و آپارتمان‌های موجود برای مقاصد مختلف مانند اخذ وام بانکی، پرونده‌های قضایی و بحث‌های مالیاتی امری ضروری است. منظور از متره و برآورد محاسبه و اندازه‌گیری طول، سطح، حجم، وزن و کارهای مختلف برای اجرای یک پروژه احداث شده یا در حال ساخت است. به مقادیری که مهندس با فصل‌بندی‌های موردنیاز در احداث سازه از فهرست بها استخراج و قیمت‌گذاری کرده است، برآورد (برآورد ریالی یا برآورد قیمت پروژه) نامیده می‌شود [۱۲].

البته مشکلی که در این زمینه وجود دارد عدم وجود مدل‌سازی اطلاعات ساختمان برای املاک ساخته‌شده می‌باشد. یکی از روش‌های ایجاد مدل‌سازی اطلاعات ساختمان برای بناهایی که مدل‌سازی نشدند، استفاده از اسناد دوبعدی و نقشه‌های تفکیکی تهیه‌شده است. در این پژوهش از نقشه‌های تفکیکی و اسناد دوبعدی براساس پارامترهای مؤثر برای ساختن مدل‌سازی اطلاعات ساختمان استفاده شده‌است. در ادامه با در نظر گرفتن پارامترهای متره و برآورد اقدام به ایجاد سیستم قیمت‌گذاری دقیق املاک گردید که در قسمت روش انجام تحقیق این قسمت به‌طور کامل توضیح داده خواهد شد [۱۲]. در گذشته برآورد هزینه ساختمان به‌صورت دستی و با محاسبات بسیار زیاد و گاهی غیردقیق صورت می‌گرفت که ممکن است در حال حاضر هم برخی از شرکت‌ها از این روش برای برآورد هزینه‌ها استفاده کنند. با این وجود مدل‌سازی اطلاعات ساختمان به‌طور بالفعل قابلیت

ساختمان در پروژه‌های عمرانی " [۲۴ و ۲۵] گویای همین واقعیت است. در سال‌های اخیر، محققان به قابلیت مدل‌سازی اطلاعات ساختمان برای به دست آوردن مدل‌های هندسی سه بعدی، حجم فضای قانونی هر ملک از ملک و برآورد هزینه آن اشاره کردند، اما مدل‌سازی براساس همه متغیرهای تأثیرگذار در ارزش‌گذاری بررسی نشده است.

با وجود علاقه تحقیقات جهانی به قابلیت‌های مدل‌سازی اطلاعات ساختمان برای ارزش‌گذاری، تحقیقات در ایران بسیار محدود بوده و قیمت‌گذاری ملک بیشتر به روش سنتی توسط کارشناسان دادگستری و یا سازمان برنامه و بودجه انجام می‌گیرد که ممکن است همه عناصر مؤثر بر ارزش ملک مورد توجه قرار نگیرد. در صورتی که با ارزش‌گذاری دقیق و کارشناسی، با استفاده از ابزارها و سیستم‌های اتوماسیون، عملکردهای سلیقه‌ای حذف گردیده و امکان سوءاستفاده از ارزش املاک در موارد مختلف از جمله موارد حقوقی و قضایی به حداقل خواهد رسید.

براساس مطالب گفته شده در مورد اهمیت ارزش‌گذاری املاک و تعیین سهم هر یک از مالکین، هدف از این تحقیق استفاده از مزایای مدل‌سازی اطلاعات ساختمان جهت ایجاد مدل سه بعدی املاک و ادغام آن با متره و برآورد جهت قیمت‌گذاری دقیق ملک با در نظر گرفتن تمام عوامل مؤثر می‌باشد، که می‌توان در پایان، سهم دقیق مالکین را از اجزای سازنده و ارزش ملک مشخص نموده و آن را جایگزین روش‌های سنتی در زمینه ارزش‌گذاری املاک نمود.

روش تحقیق

در این تحقیق مراحل متره و برآورد املاک براساس مدل‌سازی اطلاعات ساختمان و نقشه‌های موجود و با در نظر گرفتن پارامترهای مؤثر برای قیمت‌گذاری املاک مطابق شکل (۳) انجام می‌گیرد، در ادامه هر یک از مراحل توضیح داده شده است.

در مرحله اول مطابق توضیحات متغیرهای داخلی و خارجی که در بخش مقدمه توضیح داده شده است؛ داده‌های مورد نیاز جهت مدل‌سازی ساختمان جمع‌آوری خواهند شد. در این تحقیق نقشه‌های مورد نیاز از دفتر فنی مهندسی و موقعیت دقیق ملک از محیط Google Earth استخراج شده است. شکل (۴) موقعیت منطقه را نشان می‌دهد.

براساس شکل (۳)، برای شروع مدل‌سازی، ابتدا نقشه‌های تفکیکی مطابق با موقعیت و حاوی اطلاعات حقوقی ملک و همچنین نقشه‌های معماری و سازه‌ای ساختمانی که حاوی عناصر و اجزای سازنده ساختمان‌اند تهیه شدند. سپس از لحاظ وجود خطاهای مقیاسی، ترسیمی و توپولوژی (هم‌بندی اتصال و چیدمان تجهیزات شبکه‌ای) بررسی و در صورت وجود هرگونه خطا اصلاح می‌شوند. این خطاها شامل نرسیدگی خطوط، ردشدگی‌ها، همپوشانی، ایجاد فضاهای اضافی، خطاهای مربوط به اندازه‌گیری و مقیاسی هستند.

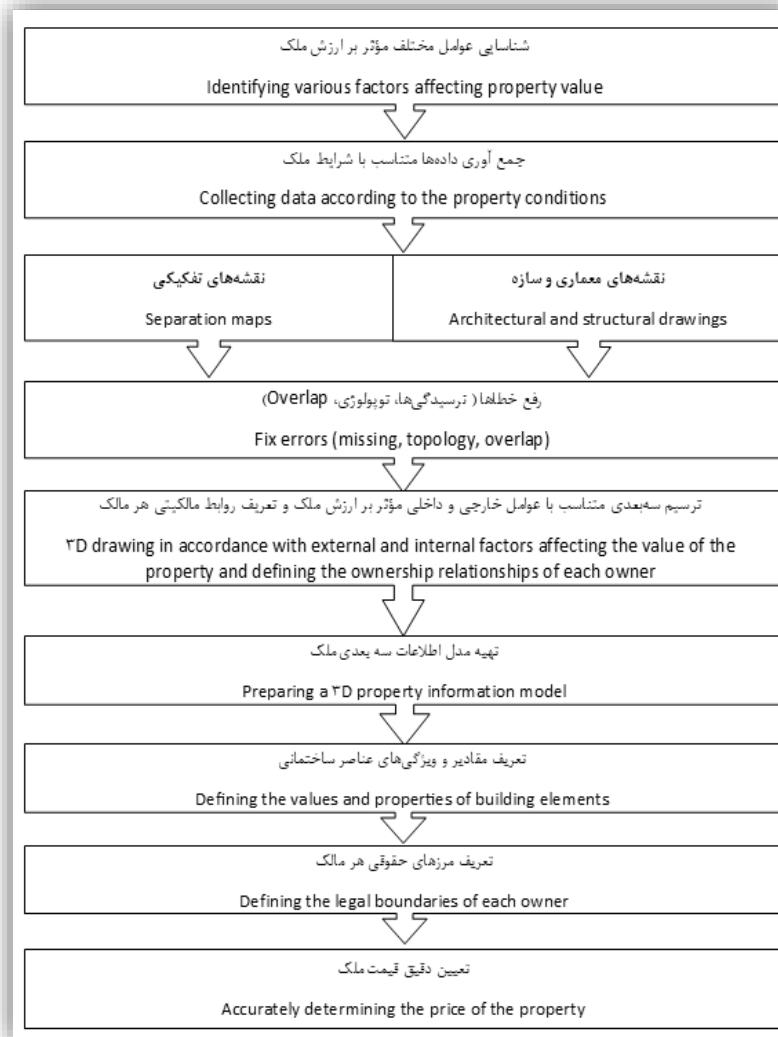
نقشه‌های تفکیکی، نقشه‌های تک خطی هستند که در آن‌ها مفروضات و مشاعات یک ساختمان مشخص شده باشد. نقشه‌های تفکیکی توسط سازمان نظام مهندسی یا شرکت‌های دارای مجوز تهیه می‌شوند.

افزایش یافته است. با این وجود، در صورتی که ساختمان‌ها به درستی طراحی، ساخته و بهره‌برداری شوند، می‌توان به صرفه جویی در مصرف انرژی دست یافت. یکی از راه‌های مؤثر برای دستیابی به بهره‌وری انرژی ساختمان، استفاده از فناوری مدل‌سازی انرژی ساختمان (BEM) است که هدف آن ارزیابی طرح‌های جایگزین است. برای این منظور هائوگائو و همکاران در سال ۲۰۱۹ برای مدل‌سازی انرژی ساختمان از مدل‌سازی اطلاعات ساختمان استفاده نمودند [۱۹]. وینیو و همکاران در سال ۲۰۲۰ به بررسی راه‌حل‌های مدل‌سازی اطلاعات ساختمان پنج‌بعدی جهت مدیریت ساخت و ساز پروژه‌ها پرداخته و مزایا و چالش‌های موجود در این زمینه را گزارش کرده‌اند [۲۰].

سیهام ال یمنی و همکاران در سال ۲۰۲۱ الزامات متغیرهای سه بعدی برای مدل‌سازی ارزش‌گذاری املاک براساس ادغام مدل‌سازی اطلاعات ساختمان و مدل‌سازی اطلاعات شهر را بررسی نمودند. در بررسی آن‌ها، برای متغیرهای داخلی از مدل‌های IFC/BIM (کلاس‌های بنیاد صنعت) و برای متغیرهای خارجی از مدل‌های سه بعدی شهر (CityGML) استفاده شده است [۴]. چلیک شیمشک و همکاران در ۲۰۲۱ از مدل‌سازی اطلاعات ساختمان به منظور ارزش‌گذاری املاک استفاده و همچنین رویکرد جدیدی برای مالکیت آپارتمان‌ها در ترکیه تعریف کردند. در این پژوهش تمامی مراحل یک پروژه ساخت و ساز واقعی (از بی تا سطح سقف) به صورت سه بعدی در مدل‌سازی اطلاعات ساختمان مشاهده و مدل‌سازی گردیده و عوامل مؤثر بر ارزش ملک بر اساس وزن آن‌ها (وزن‌ها بر اساس پرسشنامه‌ای که در منطقه انجام گرفته بود مشخص گردیده است) تعیین شده است [۲۱].

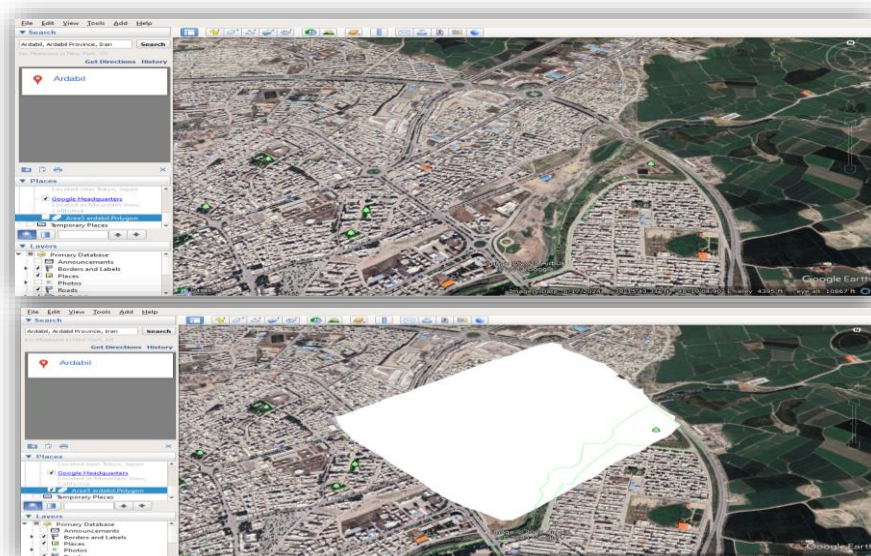
محمد اوگوژان مته و عمرعلی اغلو در سال ۲۰۲۲ معیارهایی که بر ارزش املاک و مستغلات تأثیر می‌گذارند به عنوان عوامل محیطی، فیزیکی، قانونی و اجتماعی - اقتصادی تقسیم‌بندی کرده و مدل ارزش‌گذاری دارای سه بعدی مبتنی بر کلاس‌های بنیاد صنعت طراحی نمودند. با انجام تجزیه و تحلیل مدل‌سازی اطلاعات ساختمان و GIS برای معیارهای خارجی و داخلی، ارزش‌های دارای را می‌توان با استفاده از مدل کل‌نگر ایجاد شده ارزیابی کرد. بر این اساس آن‌ها یک چارچوب ارزش‌گذاری که می‌تواند به عنوان مرجع در چندین برنامه کاربردی مبتنی بر ارزش مانند مالیات بر دارایی، نوسازی شهری و محاسبه سهم زمین مورد استفاده قرارگیرد را توسعه دادند [۲۲]. کارا و همکاران در سال ۲۰۲۱ به ادغام داده‌های هندسی سه بعدی و مدل‌سازی اطلاعات ساختمان برای توسعه شهرها و پروژه‌های ساختمانی برای بهبود و کارایی مدیریت زمین و املاک را مورد بررسی قرار داده‌اند [۲۳].

برای دستیابی به توسعه پایدار، از اجزای مهم مدل جهانی اداره زمین، ارزش املاک و مستغلات قابل توجه و مورد نیاز است. باتوجه به مزایا و امکاناتی که مدل‌سازی اطلاعات ساختمان در چرخه حیات ساختمان فراهم می‌آورد، پذیرش این تکنولوژی روزبه‌روز در حال افزایش است. "سند توسعه فناوری مدل‌سازی اطلاعات ساختمان در افق ۱۴۰۴" و "سند چشم‌انداز و برنامه بلندمدت پیاده‌سازی مدل‌سازی اطلاعات



شکل ۳: مراحل انجام تحقیق

Fig. 3: Research steps



شکل ۴: موقعیت مکانی ساختمان

Fig. 4: Location of the building

در نهایت مدل سه‌بعدی آپارتمان، ارزش‌گذاری دقیق آپارتمان و هر یک از واحدها، همراه با مرزهای حقوقی و مقادیر و نوع عناصر استفاده‌شده قابل مشاهده‌است.

یافته‌ها

یکی از روش‌های نوین قیمت‌گذاری املاک استفاده از مدل‌سازی اطلاعات ساختمانی می‌باشد. مدل‌سازی اطلاعات ساختمان، با شبیه‌سازی ساختمان بصورت سه‌بعدی به تحلیل و طراحی دقیق عناصر جهت ارزش‌گذاری کمک می‌کند.

برای پیاده‌سازی، ساختمان ۵ طبقه با ۹ واحد در نظر گرفته و داده‌های مورد نیاز برداشت شده‌است. نقشه‌ها در فایل CAD آماده و جهت انجام متره و برآورد از فهرست بهای ابنیه سال ۱۴۰۲ استفاده شده‌است.

جهت شروع مدل‌سازی نکته حائز اهمیت استخراج اطلاعات مورد نیاز برای شبیه‌سازی ملک، برآورد هزینه، مشخص کردن حقوق ارتفاعی و مشاعی هر مالک با استفاده از داده‌های حدنگاری سه‌بعدی و نقشه‌های معماری و سازه‌ای موجود در فایل CAD است. از داده حدنگاری برای تعیین مرزهای مالکیتی و از نقشه‌های معماری و سازه جهت استخراج اطلاعات هندسی مانند راه‌پله، دیوار، در، پنجره و تمامی اجزا استفاده می‌شود. شکل (۵) نقشه‌های معماری و سازه‌ای برای استخراج عناصر جهت مدل‌سازی و انجام متره و برآورد نشان می‌دهد.

روش فعلی ثبت اسناد و املاک بر پایه نقشه‌های CAD است. قبل از وارد کردن نقشه‌ها به نرم‌افزار Revit ابتدا باید نقشه‌ها را از لحاظ داشتن خطاهای احتمالی هنگام ترسیم یا اندازه‌گذاری‌ها اصلاح کرده و سپس فایل CAD را وارد نرم‌افزار کرد. نکته قابل توجه این است که واحد نقشه‌ها در CAD باید با واحد آن در نرم‌افزار Revit یکسان باشد [۱۲].

از مدل‌های، مدل‌سازی اطلاعات ساختمان که به صورت سه‌بعدی هستند می‌توان اطلاعات بسیاری در مورد، ساختار ساختمان، مشخصات معماری و اجزای خاص ساختمان برای هر واحد را استخراج کرد. شکل (۶) نمونه‌ای از عناصر ملک مطابق استاندارد IFC را نشان می‌دهد که می‌تواند برای مدل‌سازی عناصر متغیر سه‌بعدی داخلی استفاده شود.

ادغام اطلاعات مصالح، ساختار و اجزای ملک استخراج شده از مدل‌سازی اطلاعات ساختمان با هزینه‌های مربوط به مصالح می‌توان برآورد هزینه ملک را انجام داد. هزینه‌های عناصر استفاده شده در احداث ساختمان را می‌توان از فهرست بها استخراج و با توجه به توضیحات ارائه‌شده هنگام مدل‌سازی ساختمان می‌توان قیمت هر یک از اجزا را اعمال کرد.

از داده‌های حدنگاری در مدل‌سازی اطلاعات ساختمان می‌توان برای ارائه اطلاعات حقوقی مربوط به هر مالکیت اعم از مفروضات و مشاعات قسمت‌های مختلف یک ساختمان، مانند انباری، پارکینگ و دیوارها استفاده نمود.

شهرداری از این نقشه‌ها جهت صدور پایان کار و اداره ثبت اسناد و املاک جهت صدور سند استفاده می‌کنند.

نقشه‌های معماری شامل مجموعه اطلاعات و جزئیات فنی و معماری ساختمان می‌باشد که برای ساخت و ساز و مراحل اجرایی ضروری است. این نقشه‌ها شامل چند دسته مختلف اعم از: نقشه‌های زیربنایی، معماری داخلی و خارجی، مکانیکی، تأسیساتی و برق می‌باشند. این مجموعه نقشه‌های دوبعدی، دید دقیق و بهتری نسبت به خصوصیات کلی ساختمان اعم از نقشه طبقات، ابعاد و مقیاس به مهندسین ارائه می‌دهند و محل قرارگیری ساختمان و عناصر سازنده آن را مشخص می‌کنند. عناصر و ویژگی‌هایی که در این بخش باید شناخت کافی روی آن‌ها صورت گیرد عبارتند از: زمین، خاک‌برداری، پی و شناژ، عناصر باربری عمودی، سقف‌ها، کف‌سازی، در و پنجره، مجراهای ساختمان، سرویس، پله‌ها، درز انقطاع و مباحث ایمنی که جهت شناخت کارایی و عملکرد ساختمان، صرفه‌جویی در هزینه و زمان و همچنین مصرف انرژی آگاهی از آن‌ها ضروری است.

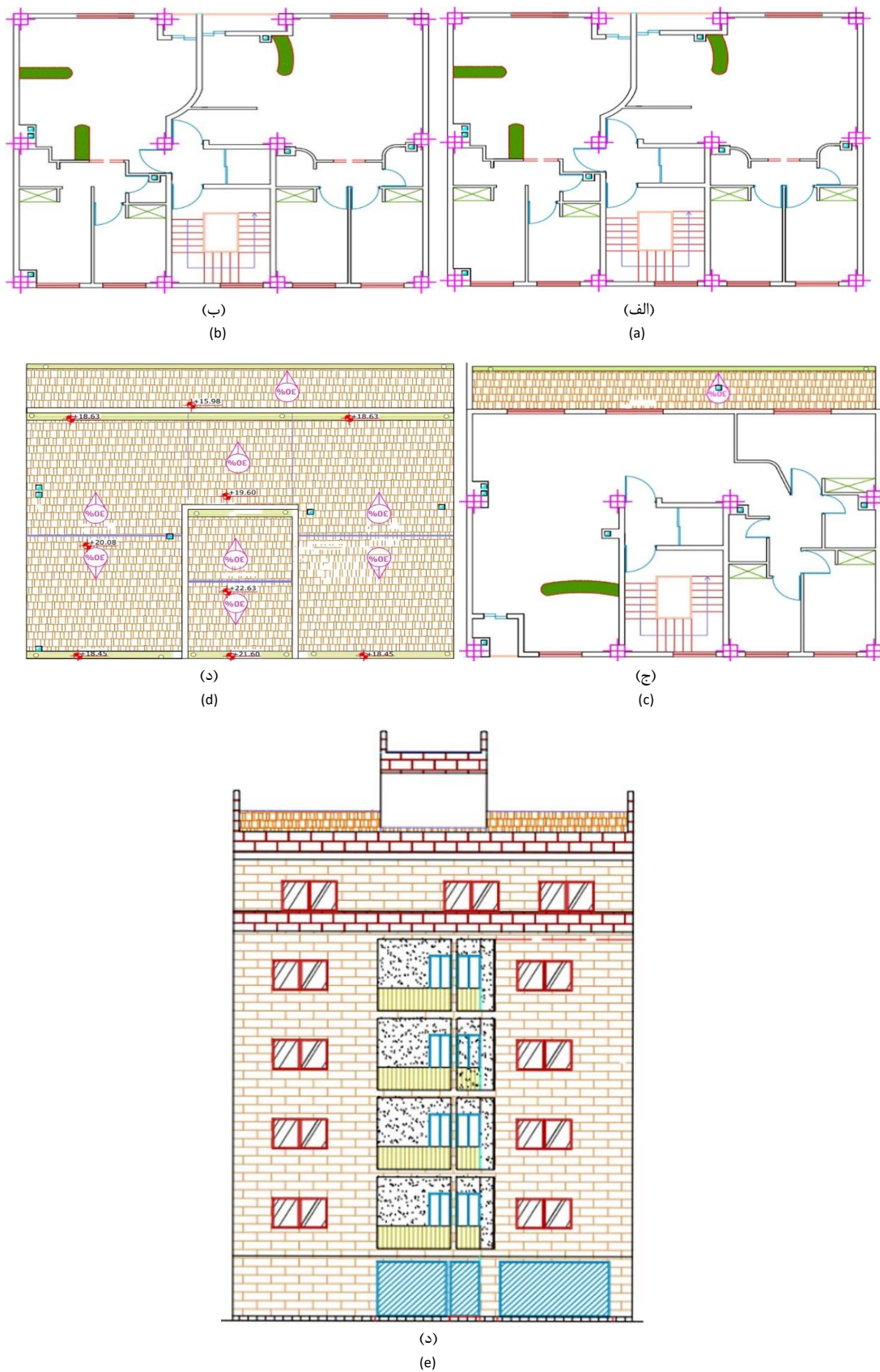
بعد از رفع خطاهای ممکن نقشه‌های تفکیکی و سازه‌ای در محیط AutoCAD در مرحله سوم، ساختمان به صورت سه‌بعدی با تمام اجزا و عناصر سازنده آن (شامل فونداسیون، میلگردگذاری، بتن‌ریزی، تأسیسات و...) در نرم‌افزار Revit رسم می‌شود.

پس از ترسیم مدل سه‌بعدی ساختمان متناسب با شرایط داخلی و خارجی، می‌توان مرزهای حقوقی را که شامل مشخص کردن حقوق تمامی عناصر ساختمان است، به روش‌های مختلف مشخص نمود که در این تحقیق بصورت عناصر رنگی مشخص شده‌اند. مرزهای حقوقی اعم از مفروضات، مشاعات و یا مشترک بین دو مالک (مانند دیوار بین دو واحد) است. در ادامه جهت قیمت‌گذاری، با استفاده از فهرست بهای ابنیه سال جاری، جداول متره و برآورد برای هر یک از عناصر به کار رفته در احداث ساختمان تشکیل و قیمت هر یک را مطابق با بخش‌های استفاده‌شده از فهرست بها انتخاب و جای‌گذاری می‌شود.

فهرست بها شامل لیست کاملی از عناصر و خدمات مورد نیاز در ساخت و ساز به همراه ارزش مالی آن‌ها می‌باشد. از مزایای استفاده از این فهرست جهت متره و برآورد یک پروژه می‌توان به موارد زیر:

- استاندارد و رسمی بودن (توسط سازمان برنامه و بودجه تدوین شده و تمامی پروژه‌های دولتی براساس آن ارزیابی می‌شوند)،
- مبنای قانونی بودن (در قراردادهای عمرانی و ساخت و ساز استفاده از این فهرست به عنوان مرجع قانونی پذیرفته شده است)،
- به‌روز رسانی سالانه و پوشش همه جانبه آیتم‌ها (تمامی هزینه‌های لازم برای ساخت و ساز از جمله مصالح، دستمزدها و ماشین آلات را پوشش می‌دهد)،

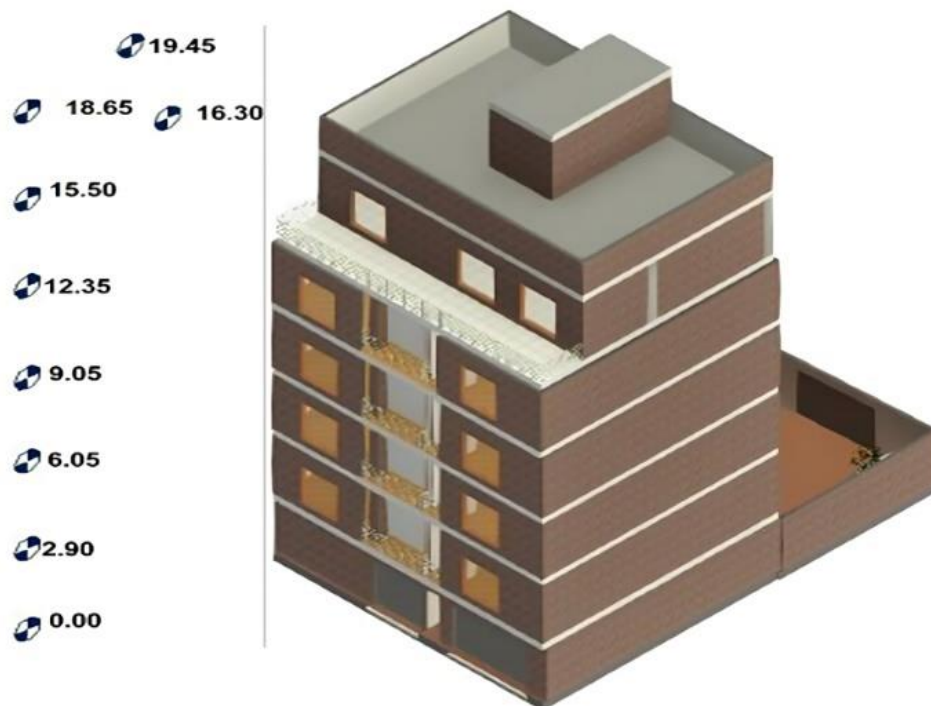
- برنامه‌ریزی دقیق بودجه و عدم سلیقه‌ای بودن قیمت‌های اقلام اشاره نمود، زیرا هر ساله طبق ماده ۲۳ قانون برنامه و بودجه تنظیم و در اختیار مهندسین قرار می‌گیرد [۲۶].



شکل ۵: نقشه‌های دوبعدی: الف) نقشه همکف، ب) نقشه تیپ طبقات (واحد ۱ الی ۸)،

ج) نقشه واحد ۹، د) نقشه بام، ه) نقشه نما

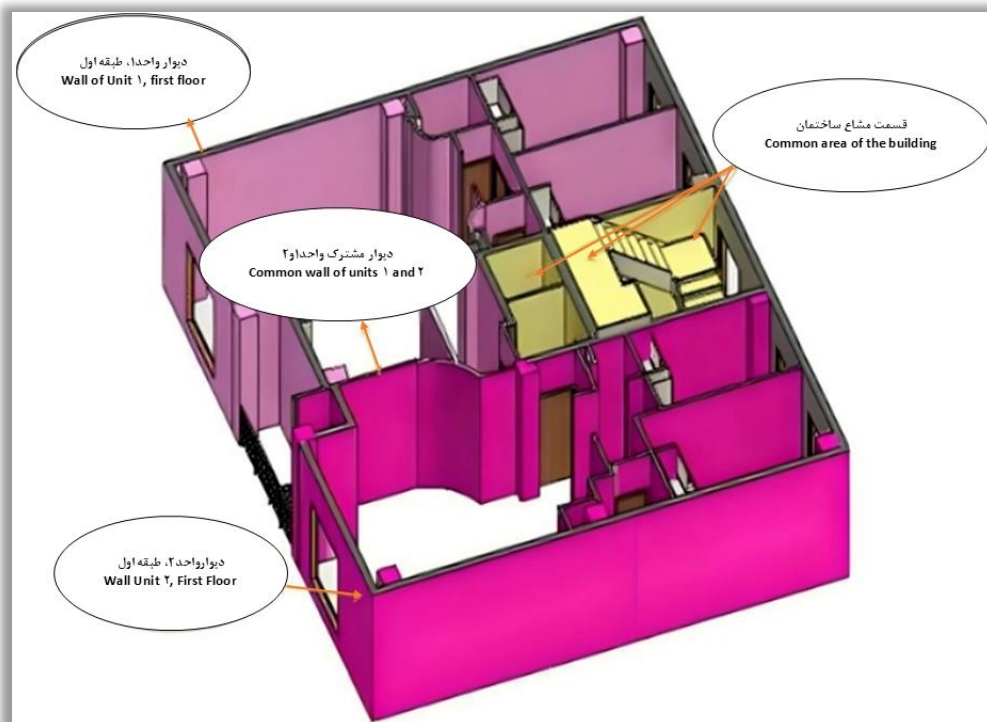
Fig. 5: 2D maps: a) Ground floor map, b) Floor type map (Units 1 to 8), c) Unit 9 map, d) Roof map, e) Elevation map



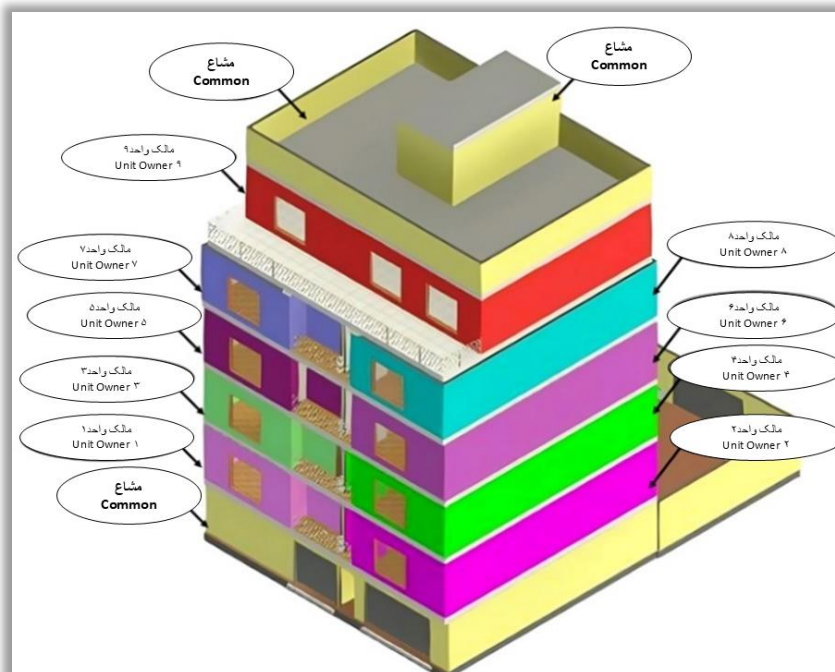
شکل ۶: نمونه‌هایی از عناصر معماری برای یک ملک مسکونی بر اساس مدل‌سازی اطلاعات ساختمان طبق استاندارد IFC
 Fig. 6: Examples of architectural elements for a residential property based on building information modeling according to the IFC standard

شکل (۸) دیوارهای بیرون ساختمان را نشان می‌دهد که مختص قطعات تفکیکی مربوطه است، همچنین در این شکل پشت‌بام و طبقه همکف که جزء مشاعات ساختمان هستند با رنگ‌های مختلف مشخص شده‌است.

بطور مثال طبق شکل (۷) مالکیت هر دیوار که مختص یک واحد است با یک رنگ و قسمت مشاعی با رنگ دیگر مشخص و تفکیک شده‌اند. در نرم‌افزار تمام حالت‌های مالکیت شرح داده شده برای کلیه طبقات به صورت شکل زیر اعمال شده‌است.



شکل ۷: تعریف مالکیت اجزا طبقه ۱
 Fig. 7: Definition of ownership of class 1 components



شکل ۸: تعریف مالکیت اجزا بیرونی ساختمان

Fig. 8: Definition of ownership of external building components

مالکیت آن‌ها مشخص نشده و سلول خالی است به‌طور مستقیم در محاسبه ارزش حقوقی و مالکیتی آپارتمان دخالت ندارد؛ ولی به عنوان جزء مؤثر در اجزای مربوط به ارزش‌گذاری آپارتمان دخالت دارند (به‌عنوان مثال شن و ماسه بکار رفته جهت تهیه بتن). براساس اجزا و مصالح مورد استفاده و فهرست بهای ابنیه، هزینه تمام‌شده قطعات تفکیکی، همکف و پشت‌بام ساختمان مورد نظر طبق جدول (۵) خواهد بود.

پس از مدل‌سازی سه‌بعدی و تعیین مالکیت برای اجزا، جداول متره و برآورد را می‌توان تشکیل داد. به عنوان مثال جدول (۴) متره و برآورد دیوار را، مطابق اجزای تشکیل‌دهنده و مالکیت‌ها بیان می‌کند.

در این تحقیق اجزای سازه‌ای و تاسیسات ساختمان در نرم‌افزار Revit طراحی و جداول متره و برآورد آن‌ها مطابق فهرست بهای ابنیه ایجاد و حق مالکیت هر جزء مشخص شده‌است. باید توجه داشت، در ستون مربوط به مالکین بخش‌های مشترک بین دو مالک و در قسمت مالکیت، مفروز یا مشاع بودن اجزا مشخص شده‌است. ردیف‌های مربوطه که نوع

جدول ۴: ارزش ریالی محاسبه‌شده براساس پارامترهای مشخص‌شده و میزان مالکیت (دیوار)

Table 4: Calculated Rial Value Based on Specified Parameters and Ownership Amount (Wall)

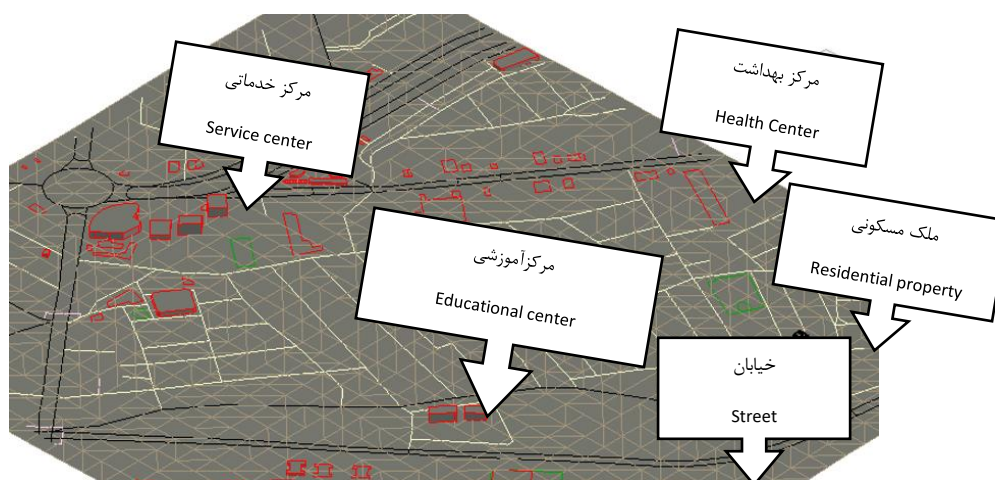
<Wall Material BRICK, COMMON>										
A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K
Material Name	Family and Type	Base Con	Material Area	Material Volume	Area	Count	Material Cost	قیمت نهایی	مالکیت 2-	مالکین 3-
Brick, Common	Basic Wall: Generic - 100mm2	001	0.03 m ²	0.00 m ³	0 m ²	1	11,342,000.0	366,570.8 m ²	مالک 2-	
Brick, Common	Basic Wall: Generic - 100mm2	002	0.03 m ²	0.00 m ³	0 m ²	1	11,342,000.0	347,277.6 m ²	مالک 4-	
Brick, Common	Basic Wall: Generic - 100mm2	003	0.03 m ²	0.00 m ³	0 m ²	1	11,342,000.0	385,864.0 m ²	مالک 6-	
Brick, Common	Basic Wall: Generic - 100mm2	004	0.03 m ²	0.00 m ³	0 m ²	1	11,342,000.0	366,570.8 m ²	مالک 8-	
0.03 m ² : 4			0.13 m ²					1,466,283.4 m ²		
Brick, Common	Basic Wall: Generic - 100mm2	002	0.34 m ²	0.02 m ³	0 m ²	1	11,342,000.0	3,822,731.2 m ²	مالک 3-	
0.34 m ² : 1			0.34 m ²					3,822,731.2 m ²		
Brick, Common	Basic Wall: Generic - 100mm2	001	0.36 m ²	0.02 m ³	0 m ²	1	11,342,000.0	4,035,105.2 m ²	مالک 1-	
Brick, Common	Basic Wall: Generic - 100mm2	004	0.36 m ²	0.02 m ³	0 m ²	1	11,342,000.0	4,035,105.2 m ²	مالک 7-	
0.36 m ² : 2			0.71 m ²					8,070,210.4 m ²		
Brick, Common	Basic Wall: Generic - 100mm2	003	0.37 m ²	0.02 m ³	0 m ²	1	11,342,000.0	4,247,479.1 m ²	مالک 5-	
0.37 m ² : 1			0.37 m ²					4,247,479.1 m ²		
Brick, Common	Basic Wall: Generic - 100mm2	001	0.40 m ²	0.02 m ³	0 m ²	1	11,342,000.0	4,525,458.0 m ²	مالک 1 و 2	مشترک
Brick, Common	Basic Wall: Generic - 100mm2	002	0.40 m ²	0.02 m ³	0 m ²	1	11,342,000.0	4,510,826.8 m ²	مالک هر دو واحد	مشترک
0.40 m ² : 2			0.80 m ²					9,036,284.8 m ²		
Brick, Common	Basic Wall: Generic - 100mm2	002	0.41 m ²	0.02 m ³	0 m ²	1	11,342,000.0	4,593,510.0 m ²	مالک 3-	
0.41 m ² : 1			0.41 m ²					4,593,510.0 m ²		
Brick, Common	Basic Wall: Generic - 100mm2	001	0.43 m ²	0.03 m ³	0 m ²	1	11,342,000.0	4,848,705.0 m ²	مالک 1-	
Brick, Common	Basic Wall: Generic - 100mm2	004	0.43 m ²	0.03 m ³	0 m ²	1	11,342,000.0	4,848,705.0 m ²	مالک 7-	
0.43 m ² : 2			0.86 m ²					9,697,410.0 m ²		

<Wall Material stone1>									
A	B	C	D	E	F	G	H	I	J
Material Name	Family and Type	Material Area	Base Constraint	Area	Material Cost	Material Volume	قیمت نهایی	مالکیت 2-	مالکین 3-
stone1	Basic Wall: Generic - 200mm	1.1 m ²	001	1 m ²	2,415,000	0.03 m ³	82,591.5 m ³		
stone1	Basic Wall: Generic - 200mm	1.1 m ²	002	1 m ²	2,415,000	0.03 m ³	78,244.6 m ³		
stone1	Basic Wall: Generic - 200mm	1.1 m ²	004	1 m ²	2,415,000	0.03 m ³	82,591.5 m ³		
stone1	Basic Wall: Generic - 200mm	1.1 m ²	005	1 m ²	2,415,000	0.03 m ³	82,593.0 m ³		
1.1 m ² : 4		4.5 m ²					326,020.7 m ³		
stone1	Basic Wall: Generic - 200mm	1.2 m ²	003	1 m ²	2,415,000	0.04 m ³	86,938.5 m ³		
1.2 m ² : 1		1.2 m ²					86,938.5 m ³		
stone1	Basic Wall: Generic - 200mm	1.6 m ²	002	2 m ²	2,415,000	0.05 m ³	118,057.6 m ³	مالک 4	
1.6 m ² : 1		1.6 m ²					118,057.6 m ³		
stone1	Basic Wall: Generic - 200mm	1.8 m ²	001	2 m ²	2,415,000	0.05 m ³	130,848.6 m ³	مالک 2	
1.8 m ² : 1		1.8 m ²					130,848.6 m ³		
stone1	Basic Wall: Generic - 200mm	1.9 m ²	002	2 m ²	2,415,000	0.06 m ³	138,886.6 m ³	مالک 3	
stone1	Basic Wall: Generic - 200mm	1.9 m ²	003	2 m ²	2,415,000	0.06 m ³	140,768.3 m ³	مالک 6	
stone1	Basic Wall: Generic - 200mm	1.9 m ²	004	2 m ²	2,415,000	0.06 m ³	136,713.6 m ³	مالک 8	
1.9 m ² : 3		5.7 m ²					416,368.6 m ³		
stone1	Basic Wall: Generic - 200mm	2.6 m ²	001	3 m ²	2,415,000	0.08 m ³	187,899.1 m ³	مالک 1	
2.6 m ² : 1		2.6 m ²					187,899.1 m ³		
stone1	Basic Wall: Generic - 200mm	2.8 m ²	003	3 m ²	2,415,000	0.08 m ³	199,962.0 m ³	مالک 5	
2.8 m ² : 1		2.8 m ²					199,962.0 m ³		

لازم به ذکر است جهت تعیین قیمت کل ملک عوامل دیگری همچون ارزش‌بازار، قیمت عرصه، تأسیسات، موقعیت ملک و پارامترهای تأثیرگذار باید در نظر گرفته‌شوند. براساس نوع اجزا و قیمت‌های مصالح بکاررفته در ساختمان طبق فهرست بهای ابنیه می‌توان با ایجاد پایگاه داده یا تغییر قیمت آن‌ها را بروز نمود. در این حالت امکان قیمت‌گذاری دقیق و بروز برای استفاده در خدمات شهری توسط شهرداری مثل اخذ مالیات و توسعه و نوسازی شهر از مالکین وجود خواهدداشت. در ادامه جهت برآورد قیمت کل ملک بر اساس پارامترهای داخلی و خارجی، بخشی از پارامترهای تأثیرگذار قابل مدل‌سازی مانند موقعیت ملک، مجاورت خیابان، اماکن آموزشی، مراکز بهداشتی و شدت تابش نور خورشید در نرم افزار اجرا شده (اشکال ۹ و ۱۰) و بخش دیگر پارامترها مانند کیفیت زندگی در ساختمان با استفاده از مصاحبه بصورت حضوری جمع‌آوری و مطابق جدول (۶) ارائه می‌شود.

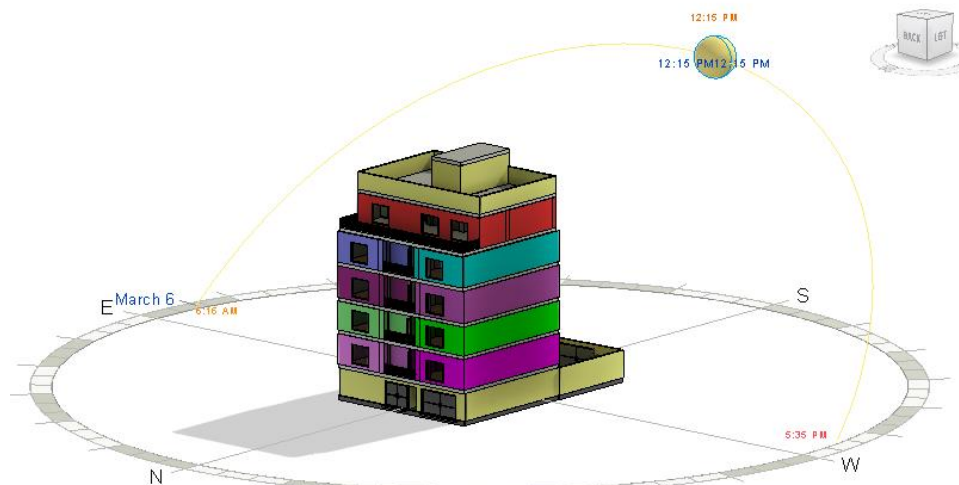
جدول ۵: ارزش ریالی محاسبه‌شده براساس اجزای دیوار، در، پنجره، سقف، کف
Table 5: Calculated Rial Value Based on the Implementation of Walls, Doors, Windows, Ceilings, and Floors

غنی‌سازی حقوقی Legal enrichment	ارزش ریالی قطعات تفکیکی Rial value of the separate parts	قطعات تفکیکی Separate parts
مفروز Shared ownership	4.445.887.445	واحد ۱ تا ۶ Units 1 to 6
مفروز Shared ownership	4.465.062.293	واحد ۷ و ۸ Units 7 to 8
مفروز Shared ownership	4.180.658.627	واحد ۹ Units 9
مشاع Common	6.458.870.503	همکف Ground floor
مشاع Common	3.046.368.864	پشت‌بام Rooftop



شکل ۹: موقعیت ملک، مجاورت از اماکن آموزشی و خدماتی و خیابان

Fig. 9: Property location, proximity to educational and service facilities, and street



شکل ۱۰: تابش نور خورشید

Fig. 10: Sunlight radiation

جدول ۶: تحلیل متغیرهای مؤثر

Table 6: Analysis of Effective Variables

Table 6: Analysis of Effective Variables			
-	آلودگی صوتی Noise pollution	محیطی Environmental	متغیرهای خارجی External variables
+	هوا Air		
+	منظره View		
+	دسترسی به خیابان Street access	مجاورت Proximity	
+	دسترسی به اماکن آموزشی Access to educational facilities		
+	دسترسی به اماکن بهداشتی Access to health facilities		
-	صنایع Industries		
+	کیفیت ملک Property quality	متغیرهای ساختاری Structural variables	متغیرهای داخلی Internal variables
۲۳.۰۰۰.۰۰۰ تومان هزینه هر مترمربع در منطقه می‌باشد. The average price per square meter in the region is 23,000,000 Tomans.			
مساحت واحد ۱: ۹۰متر Unit 1 area: 90 meters			
مساحت واحد ۲: ۸۵متر Unit 2 area: 85 meters			
مساحت قسمت مشاع: ۲۰متر Common area: 20 meters			
موقعیت جنوبی قرار دارد و نورگیری زیادی برخوردار است. It is located south and has plenty of sunlight.			
	روشنایی Lighting	کیفیت زندگی در ساختمان Quality of life in the building	
در حد مجاز: + Within the allowed limit: +	میزان صدای داخل ساختمان Sound level inside the building		
دما: مطلوب Temperature: Favorable	دما و تهویه داخل ساختمان Indoor temperature and ventilation		
تهویه: متوسط Ventilation: Medium			

نتیجه‌گیری

قیمت‌گذاری املاک از گذشته مرسوم است که توسط مشاورین املاک و در برخی موارد توسط کارشناسان دادگستری با در نظر گرفتن تعداد محدودی از ویژگی‌های اقتصادی و اجتماعی همانند موقعیت جغرافیایی ملک، معامله‌های صورت گرفته در منطقه، ابعاد و مساحت ملک، نوع کاربری و قدمت ملک جهت فروش انجام گیرد. با توسعه فناوری و زیرساخت‌ها در دهه‌های مختلف برای مدیریت زمین و ایجاد سیاست‌های بهره‌برداری صحیح از آن، از مدل‌سازی اطلاعات ساختمان به عنوان ابزاری نوین جهت مدل‌سازی سه‌بعدی و تحلیل داده‌ها استفاده نمود.

همان‌طور که در شکل (۳) اشاره شد، مدل‌سازی اطلاعات ساختمان با ایجاد مدل‌های سه‌بعدی، امکان محاسبه دقیق متره‌اژ ساختمان و تحلیل طراحی داخلی و فضاهای مفید، ارزیابی کیفیت مصالح استفاده شده، تحلیل تجهیزات و امکانات و دسترسی‌های ساختمان و در نهایت ارزش‌گذاری دقیق ساختمان کمک زیادی می‌کند. مدل‌سازی اطلاعات ساختمان با ایجاد هماهنگی بین واحدهای مختلف طراحی، امکان طراحی بهتر فضاهای مختلف ساختمان، جایگذاری صحیح پنجره و تهویه، تعبیه مناسب سیستم‌های اطفای حریق و امنیتی باعث افزایش کیفیت زندگی و مصرف بهینه انرژی خواهد شد که نتیجه آن ایجاد یک محیط زیست پایدار است.

در حالت کلی می‌توان از نتایج اجرای روش اشاره‌شده در این تحقیق به موارد زیر اشاره کرد:

- دسترسی به اطلاعات دقیق ساختار و مصالح استفاده شده و بررسی میزان انرژی مصرفی ساختمان،
- دسترسی آسان به ملک و موقعیت و توپوگرافی منطقه در یک قاب،
- قابلیت شناسایی و تحلیل داده‌های مؤثر بر ارزش ملک و در نتیجه ارزش‌گذاری دقیق ساختمان،
- ارزش‌گذاری دقیق باعث کاهش اختلافات و دعاوی در دادگاه‌ها و تسهیل در اخذ مالیات توسط دولت،
- کنترل کیفیت و زمان‌بندی ساخت‌وساز و بهبود عملکرد ساختمان و کاهش هزینه‌های پروژه،
- افزایش سودآوری، افزایش رضایت مشتری و امکان ارائه تسهیلات بانکی خواهد شد.

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 به عنوان استاد راهنمای پژوهش، در طراحی پژوهش، نظارت بر مراحل انجام آن، بررسی و کنترل نتایج و همچنین اصلاح، بازبینی و نهایی‌سازی مقاله نقش

قیمت‌گذاری واحدها توسط مشاورین املاک بصورت عرف منطقه می‌باشد یعنی برای طبقات پایین ارزش کمتر و از طبقه سوم به بعد متره‌اژ واحد کمتر، بهای تمام شده بیشتری به دست می‌آورد. اختلاف قیمت واحد متره‌اژ کم با واحد متره‌اژ بالا حدود ۲٪ می‌باشد. جهت محاسبه ارزش بالکن، بعضی از مشاورین املاک نصف متره‌اژ و بعضی تمام متره‌اژ بالکن را به قیمت واحد اضافه می‌کنند، در حالی که اگر متره‌اژ بالکن از ۳ متر بیشتر باشد باید به قیمت واحد اضافه شود. جدول (۷) بهای تمام شده به ازای هر واحد اعلام شده توسط مشاور املاک است. همچنین جدول (۸) ارزش ریالی ارائه شده هر یک از واحدها توسط مشاورین املاک و متره و برآورد در Revit را (تمام پارامترها لحاظ شده است) نشان می‌دهد.

جدول ۷: بهای تمام شده هر واحد

Table 7: Cost per unit

عنوان طبقه Category title	بهای تمام شده هر واحد Cost per unit	
	واحد ۱ Unit 1	واحد ۲ Unit 2
طبقه ۱ 1st floor	360.000.000	365.000.000
طبقه ۲ 2st floor	376.000.000	370.000.000
طبقه ۳ 3st floor	380.000.000	375.000.000
طبقه ۴ 4st floor	400.000.000	390.000.000
طبقه ۵ 5st floor	380.000.000	

جدول ۸: ارزش ریالی ارائه شده

Table 8: Rial value provided

ارزش ریالی محاسبه شده Calculated Rial Value		
عنوان طبقه Category title	مشاورین املاک Real estate consultants	متره‌وبرآورد Revit Measurement and Estimation
واحد ۱ Unit 1	26.500.000.000	8.600.000.000
طبقه ۱ 1st floor	31.400.000.000	10.200.000.000
واحد ۲ Unit 2	27.300.000.000	8.900.000.000
طبقه ۲ 2st floor	32.200.000.000	10.500.000.000
واحد ۳ Unit 3	28.300.000.000	9.200.000.000
طبقه ۳ 3st floor	33.500.000.000	10.900.000.000
واحد ۴ Unit 4	29.000.000.000	9.500.000.000
طبقه ۴ 4st floor	34.400.000.000	11.200.000.000
واحد ۵ Unit 5	49.400.000.000	15.900.000.000
طبقه ۵ 5st floor		

[10] Abobakirov, A. *Advantages of Building Information Modeling (BIM) Technologies in Construction*. HOLDERSOF REASON, 1(3) , 2023, p. 399-405.

[11] Abidoeye, R.B., et al. *Property valuation methods in practice: evidence from Australia*. Property management, 2019, 37(5), p. 701-718. <https://doi.org/10.1108/PM-04-2019-0018>

[12] Akhlaghi yengheje, N. *A proposed method to determine the owner's share of building materials with the aim of valuing properties*, the second international conference and the seventh national conference on architecture and sustainable city, 1401. [In Persian].

[13] Howard, R. and B.-C. Björk. *Building information modelling—Experts' views on standardisation and industry deployment*. Advanced engineering informatics, 2008, 22(2), p.271-280. <https://doi.org/10.1016/j.aei.2007.03.001>

[14] Azhar, S. *Building information modeling (BIM): Trends, benefits, risks, and challenges for the AEC industry*. Leadership and management in engineering, 2011, 11(3), p.241-252. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)LM.1943-5630.0000127](https://doi.org/10.1061/(ASCE)LM.1943-5630.0000127)

[15] Forgues, D., et al. *Rethinking the cost estimating process through 5D BIM: A case study*. in *Construction Research Congress: Construction Challenges in a Flat World*, 2012. <https://doi.org/10.1061/9780784412329.079>

[16] Xu, S., K. Liu, and L.C. Tang. *Cost estimation in building information models*, in *ICCREM 2013: Construction and Operation in the Context of Sustainability*, 2013, p.555-566. <https://doi.org/10.1061/9780784413135.053>

[17] Guo, J., S. Xu, and Z. Bi. *An integrated cost-based approach for real estate appraisals*. Information Technology and Management, 2014, 15, p. 131-139. <https://doi.org/10.1007/s10799-012-0152-7>

[18] Mayouf, M., M. Gerges, and S. Cox. *5D BIM: an investigation into the integration of quantity surveyors within the BIM process*. Journal of Engineering, Design and Technology, 2019, 17(3), p. 537-553. <https://doi.org/10.1108/JEDT-05-2018-0080>

[19] Gao, H., C. Koch, and Y. Wu. *Building information modelling based building energy modelling: A review*. Applied energy, 2019, 238, p. 320-343. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2019.01.032>

[20] Vigneault, M.-A., et al. *An innovative framework of 5D BIM solutions for construction cost management: a systematic review*. Archives of Computational Methods in Engineering, 2020, 27, p.1013-1030. <https://doi.org/10.1007/s11831-019-09341-z>

[21] Celik Simsek, N. and B. Uzun. *Building Information Modelling (BIM) for property valuation: A new approach for Turkish Condominium Ownership*. Survey Review, 2022, 54(384), p.187-208. <https://doi.org/10.1080/00396265.2021.1905251>

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 خود را اعلام می‌نمایند.

تعارض منافع

«هیچ‌گونه تعارض منافع توسط نویسندگان بیان نشده است.»

منابع و مآخذ

[1] Amooshahi, m., a. milan, and y. jamour. *Feasibility of using smartphones in the reconstruction of the interior architecture of the building without using interior control points*. Journal of Geomatics Science and Technology, 2023, 12(2), p. 124-135. [In Persian]. doi:10.52547/jgst.12.2.124.

[2] Gabrielli, L. and N. French. *Pricing to market: property valuation methods—a practical review*. Journal of property investment & finance, 2021, 39(5), p. 464-480. doi: 10.1108/jpif-09-2020-0101

[3] Isikdag, U., et al. *Utilizing 3D building and 3D cadastre geometries for better valuation of existing real estate*. Proceedings FIG Working Week 2015'From the wisdom of the ages to the challenges of modern world', Sofia, Bulgaria, 2015.

[4] El Yamani, S., et al. *3D variables requirements for property valuation modeling based on the integration of BIM and CIM*. Sustainability, 2021, 13(5), p. 2814. <https://doi.org/10.3390/su13052814>

[5] Kalogianni, E., et al. *3D land administration: a review and a future vision in the context of the spatial development lifecycle*. ISPRS international journal of geo-information , 2020, 9(2), p. 107. <https://doi.org/10.3390/ijgi9020107>

[6] Williamson, I., Enemark, S., Wallace, J., & Rajabifard, A. *Land administration for sustainable development* (p.487). Redlands, CA, USA: ESRI Press Academic, 2021.

[7] Rules and Criteria for Establishing Industrial and Production Units and Activities, Approval Date: 2011/03/08 ,Approval Reference: Council of Ministers' Approvals, Notification Date: 2011/04/15, Volume: 8.

[8] USEPA, 2002. Air Quality Index: A Guide to Air Quality and Your Health, Environmental Protection Agency, Washington, DC. P.14.

[9] El Yamani, S. and R. Hajji. *BIM and 3D GIS integration for real estate valuation*. Building Information Modeling for a Smart and Sustainable Urban Space, 2021, p. 95-112. <https://doi.org/10.1002/9781119885474.ch6>

 n.akhlaghiyengheje@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 تاکنون 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

[22] Mete, M.O. and T. Yomralioglu. *Mass Valuation of Real Estate Using GIS-based Nominal Valuation and Machine Learning Methods*. in *28th Annual Conference of the European Real Estate Society (ERES, 2022)*.
https://doi.org/10.15396/eres2022_177

[23] Kara, A., et al. *Requirements and opportunities for web-based 3D visualization and dissemination of property valuation information*, 2021.
<https://doi.org/10.4233/uuid:7a207ba9-7c2d-4e6d-98e0-1a0cd2363c90>

[24] Mazaheri Tehrani, Mina. *Green management model for government organizations in Iran*. Quarterly Journal of Iranian Management Sciences Association 17, 1401,(68):p.1-43.[In Persian]

[25] Budget, organization. *Country Program and Budget Organization, Management and Planning Organization of Tehran Province*, vision document and long-term plan for implementation of construction information modeling in construction project, 1402. [In Persian] .

[26] National Planning and Budget Organization: Price List.

معرفی نویسندگان

AUTHOR(S) BIOSKETCHES



نیلوفر اخلاقی دارای مدرک کارشناسی مهندسی عمران بوده و هم‌اکنون دانشجوی کارشناسی ارشد سیستم اداره زمین در دانشگاه شهید بهشتی می‌باشند. ایشان در حوزه سیستم‌های کاداستر و مدل اطلاعات ساختمان

دارای چندین مقاله کنفراسی داخلی بوده و زمینه تخصص ایشان در حوزه مدل اطلاعات ساختمان، کاداستر و ارزش‌گذاری املاک می‌باشد.

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

Citation (Vancouver): Akhlaghi N, Milan A, Vafaeinezhad A. [Development of a BIM-based data model in order to value and determine the owners' share of building components]. *J. RS. GEOINF. RES.* 2025; 3(1): 139-155

 <https://doi.org/10.22061/jrsgr.2025.11720.1095>



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

Study and investigation of spatial databases for modeling and creating 3D cadastre of underground utilities

M. Noormohamadi, Gr. Fallahi*

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

ABSTRACT

Received: 03 January 2025
 Reviewed: 05 February 2025
 Revised: 16 May 2025
 Accepted: 13 June 2025

KEYWORDS:

3D Cadastre
 Underground Objects Modeling
 CityJSON

* Corresponding author

✉ [g_fallahi\[at\]sbu.ac.ir](mailto:g_fallahi[at]sbu.ac.ir)

☎ (+98912) 2875986

Background and Objectives: The significant increase in the global population during the 20th century and the beginning of the 21st century has had profound impacts on land-use planning and development. With the rapid population growth, rising from approximately 1.6 billion people at the start of the 20th century to over 7.5 billion in the early years of the 21st century, cities and urban areas have faced immense pressures. The primary goal of LAS (Land Administration Systems) is to support land markets and facilitate land management in both developed and developing countries. These systems play a vital role in securing ownership, protecting property rights, and facilitating land transactions, which in turn have a significant impact on economic growth and sustainable development. Cadastre is one of the main tools in land administration systems. Given the rapid growth of cities and the complexities arising from land use in urban environments, land information management has become more critical than ever before. In this study, the focus is on modeling underground features. The primary objective of this research is to explore different methods for modeling underground features and the use of appropriate standards for visualizing these features in a 3D cadastre. This research examines various data models and storage formats and ultimately aims to compare and select the best method for visualizing and displaying underground data in urban environments.

Methods: For the modeling of underground features, a needs assessment and the development of a conceptual model were first undertaken, followed by an examination of data models and data storage formats. Two main data models for modeling underground features in a 3D cadastre were considered: the IFC model and the CityGML model. In the context of 3D urban environment modeling, two important standards were introduced: IFC and CityGML. In this study, CityGML was selected as the appropriate standard for visualizing underground features. Finally, three CityGML encoding methods, including XML/GML, 3DCityDB, and CityJSON, were reviewed and compared. Among them, CityJSON was chosen as the preferred encoding method for data visualization.

Findings: The results of this study show that the development of a 3D model of urban wastewater infrastructure has clarified the relationship between underground infrastructure and land ownership. This modeling, in addition to identifying and visualizing the infrastructure, helps prevent potential damage and identifies weaknesses and vulnerabilities before problems occur. Furthermore, using this model enables analysis and urban planning for the future. The use of CityJSON, due to its simpler structure compared to XML, not only facilitates working with data but also reduces data volume and increases processing speed, making it a suitable tool for web developers and WebGIS projects.

Conclusion: The implementation of this approach in developing cities, especially in cities with complex infrastructures like Tehran, could revolutionize urban management and planning. Using 3D modeling of underground features and displaying them in the CityJSON format, compared to traditional 2D cadastral methods, provides new capabilities for land and underground resource management, aiding in decision-making for urban management.



NUMBER OF REFERENCES

31



NUMBER OF FIGURES

8



NUMBER OF TABLES

3

مقاله پژوهشی

مطالعه و بررسی پایگاه‌های داده مکانی برای مدلسازی و ایجاد کاداستر سه‌بعدی تأسیسات زیرزمینی

مهران نورمحمدی، غلامرضا فلاحي*

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

چکیده

پیشینه و اهداف: افزایش چشمگیر جمعیت جهان در طول قرن بیستم و آغاز قرن بیست‌ویکم تأثیرات عمیقی بر برنامه‌ریزی و توسعه کاربری زمین داشته است. هدف اصلی LAS، حمایت از بازارهای زمین و تسهیل مدیریت زمین در این کشورهای توسعه‌یافته و در حال توسعه است. کاداستر یکی از ابزارهای اصلی در سیستم‌های اداره زمین است. در این پژوهش، به مدلسازی مفهومی و بررسی پایگاه‌های داده مکانی برای مدلسازی کاداستر سه‌بعدی تأسیسات زیرزمینی پرداخته شده است. هدف اصلی این پژوهش، بررسی روش‌های مختلف برای مدلسازی عوارض زیرزمینی و استفاده از استانداردهای مناسب برای تجسم این عوارض در کاداستر سه‌بعدی است.

روش‌ها: برای مدلسازی عوارض زیرزمینی ابتدا به نیازسنجی و توسعه مدل مفهومی پرداخته شد و سپس پایگاه‌های داده برای اجرای مدلسازی کاداستر سه‌بعدی تأسیسات زیرزمینی و فرمت‌های ذخیره‌سازی داده بررسی گردید. در این پژوهش، CityJSON به عنوان استاندارد مناسب برای تجسم عوارض زیرزمینی انتخاب شد.

یافته‌ها: نتایج این پژوهش نشان می‌دهد که استفاده از CityJSON به دلیل ساختار ساده‌تر آن نسبت به XML، نه تنها کار با داده‌ها را تسهیل کرده، بلکه با کاهش حجم داده‌ها و افزایش سرعت پردازش، آن را به ابزاری مناسب برای توسعه‌دهندگان وب و پروژه‌های WebGIS تبدیل کرده است.

نتیجه‌گیری: به کارگیری این روش در شهرهای در حال توسعه، به خصوص در شهرهایی با زیرساخت‌های پیچیده مانند تهران، می‌تواند تحولی در نحوه مدیریت و برنامه‌ریزی شهری به وجود آورد. استفاده از مدلسازی سه‌بعدی عوارض زیرزمینی و نمایش آن‌ها در فرمت CityJSON، در مقایسه با روش‌های سنتی کاداستر دویبعدی، قابلیت‌های جدیدی را برای مدیریت زمین و منابع زیرزمینی فراهم کرده و به تصمیم‌گیری در زمینه مدیریت شهری کمک می‌کند.

تاریخ دریافت: ۱۴ دی ۱۴۰۳
تاریخ داوری: ۱۷ بهمن ۱۴۰۳
تاریخ اصلاح: ۲۶ اردیبهشت ۱۴۰۴
تاریخ پذیرش: ۲۳ خرداد ۱۴۰۴

واژگان کلیدی:

کاداستر سه‌بعدی
مدلسازی عوارض زیرزمینی
CityJSON

*نویسنده مسئول

g_fallahi [at] sbu.ac.ir

۰۹۱۲-۲۸۷۵۹۸۶ ①

مقدمه

توسعه شهری تبدیل شده است. در این زمینه، سیستم‌های اداره زمین LAS به عنوان ابزاری برای مدیریت پایدار زمین و منابع معرفی شده‌اند. این سیستم‌ها که نخستین بار در سال ۱۹۹۳ توسط کمیسیون اقتصادی سازمان ملل متحد برای اروپا مطرح شدند [۳]. شامل مجموعه‌ای از فرایندها هستند که مالکیت، ارزش و استفاده از زمین را تعیین، ثبت و اطلاعات مرتبط را منتشر می‌کنند. هدف اصلی LAS، حمایت از بازارهای زمین و تسهیل مدیریت زمین در کشورهای توسعه‌یافته و در حال توسعه است [۴]. این سیستم‌ها نقشی حیاتی در تثبیت مالکیت‌ها، حفاظت از حقوق مالکیت و تسهیل معاملات زمین دارند، که به نوبه خود تأثیر به سزایی در رشد اقتصادی و توسعه پایدار دارد. کاداستر یکی از ابزارهای اصلی در سیستم‌های اداره زمین است. با توجه به رشد سریع شهرها و

افزایش چشمگیر جمعیت جهان در طول قرن بیستم و آغاز قرن بیست‌ویکم تأثیرات عمیقی بر برنامه‌ریزی و توسعه کاربری زمین داشته است. با رشد سریع جمعیت، که از حدود ۱.۶ میلیارد نفر در ابتدای قرن بیستم به بیش از ۷.۵ میلیارد نفر در سال‌های آغازین قرن بیست‌ویکم رسیده است، فشارهای شدیدی بر شهرها و مناطق شهری به وجود آمده است [۱]. این رشد نه تنها نیاز به فضای بیشتر برای سکونت و فعالیت‌های صنعتی را افزایش داده، بلکه باعث گسترش سریع شهرنشینی و نیاز به توسعه زیرساخت‌های مرتبط با آن نیز شده است [۲]. در نتیجه، برنامه‌ریزی و مدیریت منابع زمین و زیرساخت‌ها به یکی از چالش‌های کلیدی دولتها و نهادهای مرتبط با

دقت و صحت ثبت مرزهای ثبتی، از تکنیک‌های مدل‌سازی سه‌بعدی و ادغام اطلاعات جغرافیایی و ثبتی بهره برده‌است. همان‌طور که در پژوهش‌های قبل مشاهده می‌شود کاداستر سه‌بعدی در ایران تمرکز بیشتری بر روی مدل‌سازی عوارض روی سطح زمین و بالای زمین پرداخته‌اند از همین رو در این پژوهش به مدل‌سازی عوارض زیرزمینی با استفاده از مدل CityGML پرداخته خواهد شد. کزازی و حسین علی در سال ۱۳۹۷ به ارزیابی استفاده از داده‌های مکانی داوطلبانه برای تولید مدل سه‌بعدی شهر پرداختند. آنها، به کمک CityGML و داده‌های جمع‌آوری شده از طریق VGI، مدل‌های سه‌بعدی از ساختمان‌ها با جزئیات سطح ۴ ساخته شده‌اند که شامل ارتفاع ساختمان‌ها و سایر ویژگی‌های ساختاری است [۱۲].

در ادامه پژوهش به بررسی پژوهش‌های انجام‌شده در ارتباط با مدل‌سازی عوارض زیرزمینی خارج از کشور پرداخته می‌شود. کیم و همکاران در سال ۲۰۱۷ به ارائه مدل داده در ارتباط با مدل‌سازی عوارض زیرزمینی در کاداستر سه‌بعدی پرداختند. به منظور ثبت و مدیریت کارآمد یک قطعه زیرزمینی سه‌بعدی، آنها چهار مرحله پردازش را پیشنهاد کردند: تهیه اطلاعات مکانی برای داده‌های قطعات زیرزمینی سه‌بعدی، پیشنهاد مفاهیم جدید قطعات زیرزمینی سه‌بعدی، پیشنهاد یک روش نقشه‌برداری جدید برای قطعات زیرزمینی سه‌بعدی و مدیریت اطلاعات حقوقی در قطعات زیرزمینی سه‌بعدی. مدل داده کاداستر زیرزمینی سه‌بعدی پیشنهادی می‌تواند انواع مختلفی از املاک سه‌بعدی زیرزمینی از جمله مرکز خرید، پارکینگ و زیرساخت‌های عمرانی مانند مترو، جاده، فاضلاب، تأسیسات مشترک را ثبت کند. نتایج آنها نشان می‌دهد که مدل داده‌های کاداستر سه‌بعدی پیشنهادی می‌تواند برای سایر سیستم‌های اطلاعاتی مانند سیستم ارزیابی زمین و مالیات، سیستم برنامه‌ریزی شهری، سیستم مدیریت ساخت و ساز و تأسیسات قابل استفاده باشد [۱۳]. پیدا و همکاران در سال ۲۰۲۰ به مدل‌سازی سازه‌های تاریخی زیرزمینی به عنوان عوارض کاداستر سه‌بعدی پرداختند. منطقه مطالعاتی آن‌ها شهر رززو در جنوب شرقی لهستان بوده است. سازه‌های زیرزمینی مربوط به پنج خانه به طول ۴۰۰ متر است که در قرن ۱۴ تا ۱۸ میلادی ساخته شده و در زیر بازار شهر ساخته شده‌اند. نتایج آن‌ها نشان می‌دهد که معرفی عوارضی که سال‌ها پیش در زیر زمین ایجاد شده‌اند در کاداستر بسیار دشوار است [۱۴]. سعیدیان و همکاران در سال ۲۰۲۴ به ارائه طبقه بندی جدیدی از مرزهای قانونی زیرزمینی و مدل‌سازی آنها با استفاده از CityGML پرداختند. هدف سعیدیان و همکاران، توسعه یک طبقه بندی از مرزهای قانونی زیرزمینی بر اساس مطالعه موردی بود که در ایالت ویکتوریا، کشور استرالیا انجام شد [۱۵]. آنها یک مدل داده سه‌بعدی مبتنی بر CityGML را برای ایجاد و تجسم مرزهای قانونی زیرزمینی مختلف در مفهوم‌سازی، طراحی، توسعه و نمونه‌سازی ارائه کردند. این مدل زیرزمینی یکپارچه سه‌بعدی طیف وسیعی از مرزهای قانونی بررسی شده است. نتایج این تحقیق نشان‌دهنده پیشرفت‌های مستمر

پیچیدگی‌های ناشی از استفاده از زمین در محیط‌های شهری، مدیریت اطلاعات زمین از اهمیت بیشتری نسبت به گذشته برخوردار شده است. یکی از چالش‌های عمده در این زمینه، نبود سیستم‌هایی برای نمایش و مدیریت سه‌بعدی عوارض زمین است. سیستم‌های کاداستر سنتی که به صورت دو بعدی طراحی شده‌اند، نمی‌توانند اطلاعات دقیق و جامع از عوارض زیرزمینی مانند شبکه‌های فاضلاب، مترو، تونل‌ها، یا حتی ساختمان‌هایی که در سطوح مختلف زمین قرار دارند، ارائه دهند [۵]. این نارسایی به مشکلاتی در مدیریت زمین، برنامه‌ریزی زیرساخت‌ها و حفظ حقوق مالکیت منجر می‌شود. کاداستر سه‌بعدی به عنوان یک راهکار نوین برای غلبه بر این چالش‌ها معرفی شده است. این نوع کاداستر، برخلاف سیستم‌های دو بعدی، توانایی نمایش و مدیریت کامل عوارض زیرزمینی، سطحی و بالای سطح زمین را داراست [۶]. با افزودن بعد سوم یا ارتفاع، کاداستر سه‌بعدی می‌تواند فضای شهری را به طور دقیق‌تر و جامع‌تری تحلیل کند و نمایش دهد. این ویژگی به ویژه در مناطق شهری که ساخت‌وسازهای بلند مرتبه و استفاده از زیرزمین برای زیرساخت‌ها رایج است، اهمیت بیشتری دارد. عوارضی مانند آپارتمان‌ها، سازه‌های بلند مرتبه، پارکینگ‌های زیرزمینی، و شبکه‌های حمل و نقل زیرزمینی با استفاده از این سیستم قابل مدیریت و ثبت هستند [۷]. پیشرفت این پژوهش در مقایسه روش‌های مختلف مدل‌سازی به منظور شناسایی و انتخاب فرمت بهینه برای مدل‌سازی عوارض زیرزمینی با استفاده از کاداستر سه‌بعدی قابل توجه است. در ادامه، به بررسی پیشینه تحقیق در زمینه کاداستر سه‌بعدی و تجارب کشورهای مختلف در پیاده‌سازی این سیستم پرداخته می‌شود. برای بررسی پیشینه تحقیق ابتدا پژوهش‌های انجام‌شده در داخل کشور بررسی می‌شود. کاداستر سه‌بعدی در ایران یک حوزه نوظهور و در حال توسعه است. در سال ۱۳۹۷ خوش برش ماسوله و صادقیان به پیاده‌سازی کاداستر سه‌بعدی با استفاده از تصاویر هوایی پرداختند. هدف آنها تولید مدل سه‌بعدی کاداستر شهری جهت بهبود وضعیت مدیریت املاک در شهر تهران بوده است. نتایج پژوهش آنها نشان داد که مدل تولید شده با استفاده از تصاویر هوایی دارای دقت مورد قبولی برای مدل‌سازی عوارض کاداستر سه‌بعدی است [۸]. امام‌قلیان و طالعی در سال ۱۳۹۶ به مدل‌سازی روابط همسایگی در ساختمان‌ها با استفاده از GIS سه‌بعدی پرداختند [۹]. آنها با استفاده از نرم‌افزار ArcGIS و SketchUp به مدل‌سازی سه‌بعدی روابط توپولوژیکی در ساختمان‌های بلند مرتبه پرداختند. در سال ۱۴۰۱ عمو شاهی و همکاران با استفاده از گوشی همراه هوشمند به مدل‌سازی کاداستر سه‌بعدی پرداختند [۱۰]. آنها با تولید ابر نقاط مدل سه‌بعدی خود را در نرم‌افزار Revit پیاده‌سازی کردند. تمرکز اصلی این پژوهش بر روی مدل‌سازی عوارض داخل ساختمان بوده است. در سال ۱۴۰۱ عینالی و همکاران به بررسی روش‌های نوین حد نگاری مرزهای ثبتی در ایران پرداختند و بر اهمیت استفاده از فناوری‌های پیشرفته، به ویژه مدل اطلاعات ساختمان BIM در کاداستر سه‌بعدی تأکید کردند [۱۱]. این تحقیق با هدف افزایش

تحلیل فضایی و تجسم سه بعدی دارند تا از تداخلات فضایی و مشکلات ساخت و نگهداری جلوگیری شود [۲۰]. عوارض زیرزمینی به دلیل پیچیدگی‌های فضایی و تداخل با سایر زیرساخت‌ها، نیازمند مدل‌سازی دقیق هستند تا بتوان برنامه‌های توسعه شهری را به درستی تنظیم کرد و از بروز مشکلات احتمالی جلوگیری نمود. مدل‌سازی سه بعدی عوارض زیرزمینی امکان مدیریت بهینه‌تری برای تأسیسات زیرسطحی فراهم می‌کند، از جمله امکان تحلیل دقیق اطلاعات مربوط به محل، عمق و وضعیت فعلی این تأسیسات. اطلاعات دقیق از محل قرارگیری تأسیسات زیرزمینی به تصمیم‌گیران و مهندسان کمک می‌کند تا در هنگام اجرای پروژه‌های جدید از خرابی‌های ناشی از حفاری جلوگیری کنند. مدل‌سازی عوارض زیرزمینی نه تنها در نگهداری و به‌روزرسانی زیرساخت‌ها مؤثر است، بلکه به مدیران شهری این امکان را می‌دهد که پیش‌بینی‌های لازم برای توسعه‌های آینده را انجام دهند.

○ مدل‌های فیزیکی کاداستر سه بعدی

کاداستر سه بعدی یکی از ابزارهای مهم در مدیریت و برنامه‌ریزی شهری است که امکان تجزیه و تحلیل فضایی عوارض مختلف شهری را فراهم می‌آورد. در این راستا، مدل‌های مختلفی همچون IFC و CityGML به‌طور گسترده استفاده می‌شوند. مدل IFC، که بیشتر در صنعت ساختمان و مدیریت اطلاعات ساخت‌وساز BIM کاربرد دارد، به‌طور خاص برای مدل‌سازی اجزای ساختمان‌ها و زیرساخت‌های داخلی طراحی شده است و می‌تواند ویژگی‌های مختلفی از جمله دیوارها، درها، پنجره‌ها و سیستم‌های تأسیسات را نمایش دهد. از سوی دیگر، CityGML یک استاندارد است که برای مدل‌سازی داده‌های جغرافیایی سه بعدی شهری طراحی شده و به تحلیل ویژگی‌های سطح شهر، شامل ساختمان‌ها، جاده‌ها، شبکه‌های زیرساختی و فضاهای عمومی می‌پردازد. این مدل علاوه بر پشتیبانی از لایه‌های مختلف (LOD)، توانایی ذخیره‌سازی اطلاعات در دقت‌های متفاوت را فراهم می‌کند و به تحلیل‌های شهری کمک می‌کند. در حالی که مدل IFC برای پروژه‌های مرتبط با ساختمان و زیرساخت‌های داخلی مناسب است، مدل CityGML به مدل‌سازی ویژگی‌های سطحی و زیرسطحی شهر می‌پردازد و به‌ویژه برای برنامه‌ریزی شهری و مدیریت زیرساخت‌های شهری کاربرد دارد. در این پژوهش، تنها به بررسی مدل‌های فیزیکی کاداستر سه بعدی IFC و CityGML پرداخته‌ایم و مدل‌های دیگر کاداستر سه بعدی در این تحقیق مورد بررسی قرار نگرفته‌اند.

○ تجسم عوارض

تجسم داده‌ها به معنای نمایش و مشاهده مدل‌های سه بعدی به گونه‌ای است که اطلاعات پیچیده به شکلی قابل فهم برای کاربران تبدیل شوند. در کاداستر سه بعدی، تجسم اطلاعات از اهمیت بالایی برخوردار است چرا که مدیران شهری، مهندسان و تصمیم‌گیرندگان می‌توانند از طریق تجسم سه بعدی، تصمیمات بهتری در خصوص توسعه شهری، مدیریت زیرساخت‌ها و جلوگیری از مشکلات فضایی اتخاذ کنند. با استفاده از

در زمینه مدل‌سازی و تجسم عوارض زیرزمینی در کاداستر سه بعدی هستند. به همین دلیل، این پژوهش به‌طور ویژه بر مدل‌سازی و تجسم عوارض زیرزمینی در کشور ایران با استفاده از فرمت CityJSON تمرکز دارد. در ادامه، روش تحقیق به تفصیل بیان خواهد شد.

بیان مفاهیم نظری

○ مدل‌سازی

مدل‌سازی یکی از اصول اساسی در تحلیل و مدیریت داده‌های مکانی سه بعدی است که در کاداستر سه بعدی اهمیت دارد. مدل‌های مختلفی برای مدل‌سازی استفاده می‌شوند که بسته به نوع پروژه و ویژگی‌های مورد نظر می‌توانند متفاوت باشند. به‌طور خاص، مدل‌های IFC و CityGML در این تحقیق به عنوان مدل‌های فیزیکی کاداستر سه بعدی بررسی شده‌اند. مدل IFC به عنوان یک استاندارد برای صنعت ساخت‌وساز، به دقت می‌تواند اجزای ساختمان‌ها و زیرساخت‌های داخلی را مدل‌سازی کند [۱۶]. در حالی که CityGML برای مدل‌سازی داده‌های جغرافیایی سه بعدی شهری و تحلیل ویژگی‌های سطحی و زیرسطحی شهر طراحی شده است [۱۷]. این دو مدل به‌خصوص در پروژه‌های بزرگ شهری که نیاز به یکپارچگی بین لایه‌های مختلف اطلاعات دارند، کاربرد دارند.

○ کاداستر سه بعدی

کاداستر سه بعدی حقوق مالکیت، محدودیت‌ها و مسئولیت‌های (RRRs) املاک واقعی را به صورت سه بعدی مدیریت می‌کند و نمایش می‌دهد. این کاداسترها زمانی استفاده می‌شوند که حقوق تفکیک‌شده در سطح زمین، بالای زمین یا زیر سطح زمین وجود داشته باشد [۱۸]. این کاداسترها مجهز به ذخیره‌سازی داده‌های سه بعدی، تجسم سه بعدی و قابلیت‌های تحلیل فضایی سه بعدی هستند. کاداسترهای سه بعدی اطلاعات مهمی برای کاربردهای مختلف مانند مدیریت فضای شهری و مدیریت زمین و املاک در قالب سه بعدی فراهم می‌کنند [۱۹]. اولاً، این کاداسترها مرزهای مالکیت را در مناطقی که مالکیت‌های لایه‌ای وجود دارد به صورت سه بعدی نمایش می‌دهند. دوماً، ثبت توسعه‌های طبقه‌بندی شده را تسهیل می‌کنند. سوماً، از فرآیندهای توسعه زمین، از جمله صدور مجوزهای طرح‌ها در مناطق پر تراکم شهری، به‌ویژه برای پروژه‌های بزرگ مانند پل‌ها و تونل‌هایی که از بالای یا زیر دیگر قطعات زمین عبور می‌کنند، حمایت می‌کنند. چهارم، اطلاعات قابل اعتمادی برای مقامات و تصمیم‌گیران فراهم می‌کنند. و در نهایت، به عنوان یک لایه اساسی برای ادغام با دیگر لایه‌های اطلاعاتی مانند مدل‌های سه بعدی شهری CityGML، مدل اطلاعات ساختمان BIM، شبکه‌های حمل‌ونقل، شبکه‌های تأسیسات، کاربری زمین و خدمات مربوط به کاربردهای مختلف مورد استفاده قرار می‌گیرند.

○ مدل‌سازی عوارض زیرزمینی

مدل‌سازی عوارض زیرزمینی به عنوان یکی از چالش‌های اصلی در مدیریت زیرساخت‌های شهری شناخته می‌شود، زیرا این عوارض نیاز به

و سپس مدل مفهومی بر اساس یافته‌های به‌دست‌آمده توسعه داده شد. در ادامه، پایگاه‌های داده برای ایجاد اسکیمای داده و سپس فرمت‌های ذخیره‌سازی داده‌ها مورد بررسی و تحلیل قرار گرفتند. در نهایت، به ذخیره‌سازی و تجسم داده‌ها پرداخته شد. برای درک بهتر روند پژوهش، شکل ۱ فرآیند انجام تحقیق را نمایش می‌دهد (شکل ۱).

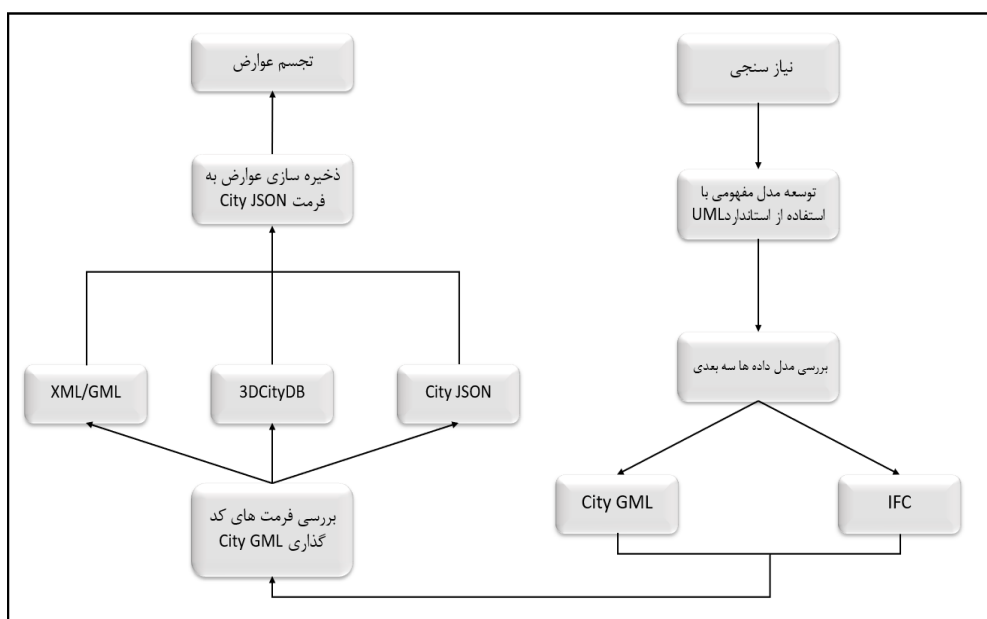
○ منطقه مورد مطالعه

مطالعاتی این پژوهش، شهر زنجان است که در شمال غربی ایران و به‌عنوان مرکز استان زنجان واقع شده‌است. این شهر در طول جغرافیایی ۴۸.۴۷۸۷ درجه شرقی و عرض جغرافیایی ۳۶.۶۷۶۵ درجه شمالی قرار دارد و ارتفاع متوسط آن از سطح دریا حدود ۱,۶۳۰ متر است.

تجسم، ویژگی‌هایی مانند موقعیت دقیق تأسیسات زیرزمینی، لایه‌های مختلف حقوق مالکیت و مرزهای تفکیک‌شده به‌صورت بصری قابل درک و تحلیل می‌شوند. به‌ویژه در مدل‌سازی عوارض زیرزمینی، تجسم سه‌بعدی به جلوگیری از تداخلات فضایی و حفاری‌های غیرضروری کمک می‌کند. این تجسم‌ها همچنین امکان ارزیابی بهتر پروژه‌های بزرگ شهری، از جمله تونل‌ها و پل‌ها، را فراهم می‌آورند [۲۱]. در این تحقیق، تجسم داده‌ها به‌کمک CityGML انجام‌شده است که با استفاده از این مدل، تجسمی از ویژگی‌های سطحی و زیرسطحی ایجاد می‌شود.

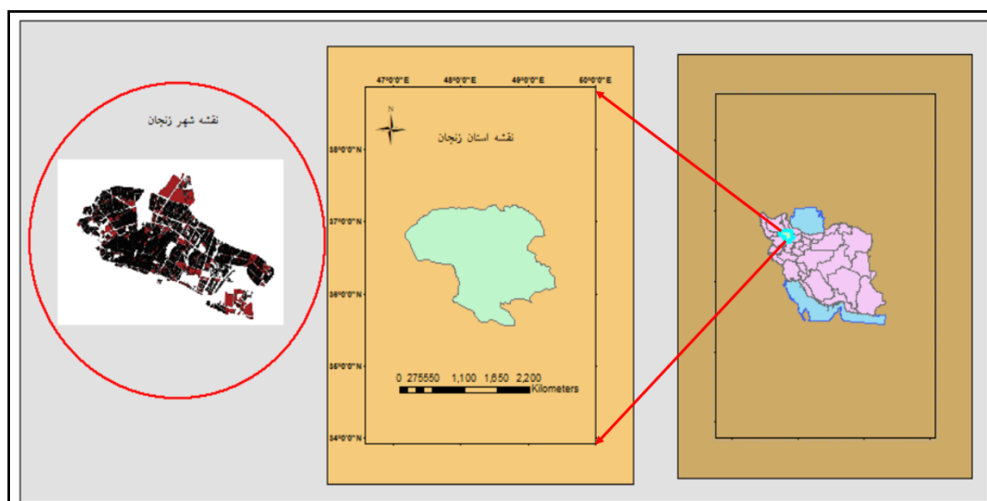
روش تحقیق

در این پژوهش، ابتدا از روش کتابخانه‌ای برای نیازسنجی استفاده شد



شکل ۱: مراحل پژوهش

Fig. 1: Flowchart of the methodology



شکل ۲: منطقه مطالعاتی

Fig. 2: Study area

عوارض فیزیکی مورد استفاده در کاداستر سه بعدی برای زیرساخت های شهری و تأسیسات زیرزمینی در این پژوهش مطرح شده است. این عوارض شامل قطعه زمین و لوله فاضلاب می باشند که هر کدام توصیفات خاص خود را دارند. عوارض فیزیکی روی سطح زمین، مانند قطعه زمین، شامل توصیفات هستند که به طور مستقیم به حقوق مالکیت و استفاده از زمین مرتبط می شوند. به عنوان مثال، قطعات زمین به عنوان واحدهای اصلی مالکیت زمین، توصیفات چگونگی نام ملک، کاربری، آدرس و مساحت را شامل می شوند که برای تعریف حدود قانونی قطعات است. از سوی دیگر، عوارض زیرسطحی مانند لوله های فاضلاب که به طور عمده در زیر زمین قرار دارند، نیازمند مدل سازی سه بعدی هستند. این تأسیسات زیرزمینی، علاوه بر موقعیت جغرافیایی، باید توصیفات مثل شناسه، تاریخ نصب و نوع کاربرد را در برداشته باشند. همچنین، مدل سازی سه بعدی لوله های زیرزمینی برای مدیریت حفاری ها، مرزهای حریم و عملیات تعمیرات و نگهداری در زیرساخت های شهری حیاتی است. در جدول ۱، توصیفات این دو نوع عارضه فیزیکی، شامل قطعه زمین و لوله، ارائه شده است (جدول ۱).

در ادامه، نیازهای مرتبط با عوارض قانونی در کاداستر سه بعدی بررسی شده است. کاداستر سه بعدی به عنوان یک سیستم جامع و پیشرفته طراحی شده است تا اطلاعات مربوط به املاک و دارایی ها را در تمامی ابعاد، از سطح زمین تا زیر و بالای آن، مدیریت و ثبت کند. این سیستم، به ویژه در حوزه زیرساخت های شهری مانند شبکه های فاضلاب، نقش به سزایی در مدیریت بهینه و شفاف سازی حقوق مالکیت ایفا می کند. نیازهای قانونی مرتبط با مالکیت در مناطق زیرزمینی شامل فضاهای مختلف قانونی تعریف شده برای دارایی های زیرسطحی است. این فضاها وابسته به مقررات و ضوابط حقوقی هر کشور هستند و به همین دلیل، برای شناسایی نیازهای عوارض قانونی، مطالعه قوانین محلی و رویه های قضائی ضروری است.

در سال های اخیر، شهر زنجان شاهد توسعه های سریع زیرساختی و گسترش مناطق مسکونی بوده است. افزایش جمعیت و توسعه مناطق جدید شهری به ویژه در حومه شهر، فشار زیادی بر زیرساخت های شهری، از جمله سیستم فاضلاب وارد کرده است. زیرساخت های فاضلاب زنجان به طور عمده زیرزمینی طراحی شده اند و مدیریت مؤثر آنها نیازمند دسترسی به اطلاعات دقیق جغرافیایی و مهندسی است.

○ داده های مورد استفاده

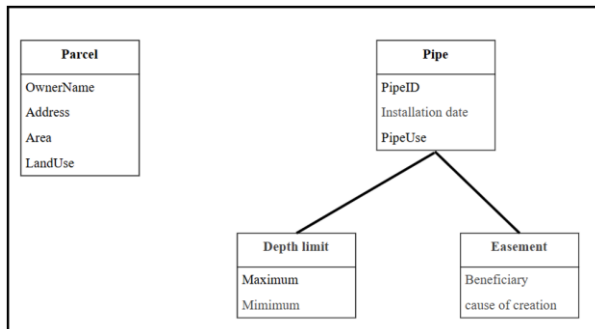
در این پژوهش، به منظور مدل سازی سه بعدی عوارض زیرزمینی با استفاده از کاداستر سه بعدی، از داده های سازمان آب و فاضلاب و نقشه های شهری با مقیاس ۱:۲۰۰۰ استفاده شده است. نقشه های ۱:۲۰۰۰ که به فرمت shape فایل از سازمان برنامه و بودجه گردآوری شده اند، برای جانمایی دقیق قطعات زمین مورد استفاده قرار گرفته اند. در این پژوهش، قطعات زمین به عنوان داده اصلی برای تعیین حقوق، محدودیت ها و مسئولیت های مرتبط با زمین در نظر گرفته شده اند. به عنوان مثال، حقوق مالکیت، محدودیت های مربوط به تأسیسات زیرزمینی و مسئولیت های مربوط به نگهداری از تأسیسات از جمله این موارد هستند. با توجه به گستردگی و پیچیدگی زیرساخت های زیرزمینی، تمرکز این پژوهش بر روی خطوط انتقال فاضلاب قرار دارد که داده های مرتبط با آن از سازمان آب و فاضلاب نیز به فرمت shape فایل تهیه شده است.

○ نیازسنجی

اولین گام در مدل سازی نیازسنجی است. عوارض در مدل سازی کاداستر سه بعدی به دودسته عوارض قانونی و عوارض فیزیکی تقسیم بندی شده اند؛ بنابراین، نیازسنجی به دو بخش نیازسنجی عوارض قانونی و فیزیکی تفکیک شده است. در ادامه ابتدا به نیازسنجی عوارض فیزیکی پرداخته شد. در این بخش، نیاز به شناسایی و تعریف

جدول ۱: نیازسنجی عوارض فیزیکی
Table 1: Need assessment of physical Objects

نام عارضه Complication name	تعریف Definition	توصیفات Descriptions
		Name نام
		Data type نوع داده
زمینی با حدود اربعه مشخص را قطعه زمین نامند.	نام مالک Owner's name	char
A piece of land with defined boundaries is called a plot of land.	کاربری User	char
	آدرس Address	char
	مساحت Area	Float
لوله یک استوانه توخالی با مقطع دایره ای است که برای انتقال سیالات استفاده می شود و مشخصات مکانی آن شامل عمق نصب و مسیر آن است.	شناسه ID	int
A pipe is a hollow cylinder with a circular cross-section that is used to transport fluids, and its spatial specifications include its installation depth and route.	تاریخ نصب Installation date	Date
	کاربری User	char



شکل ۳: نتایج نیازسنجی
Fig. 3: Needs assessment results

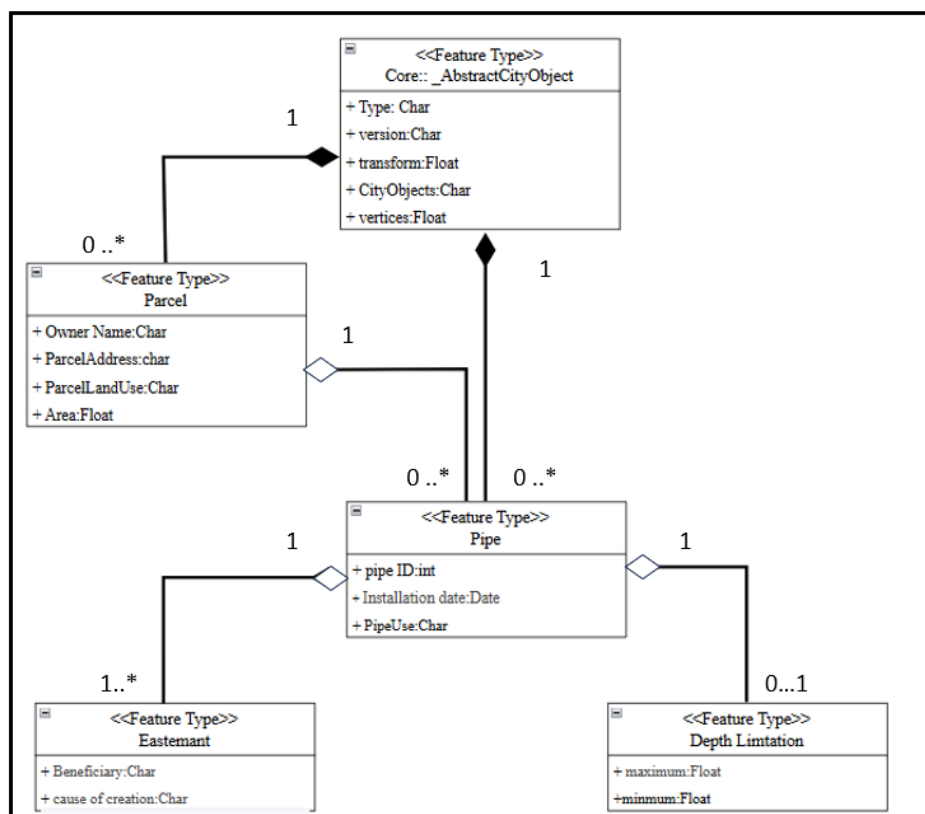
○ مدل مفهومی

مدل مفهومی این پژوهش بر اساس نیازسنجی‌های انجام‌شده در زمینه مدل‌سازی سه‌بعدی عوارض زیرزمینی و با تمرکز بر فضای زیرسطحی توسعه‌یافته است. بسیاری از مطالعات موجود تاکنون به بررسی مدل‌های مفهومی در ارتباط با فضای بالای زمین و سطح زمین پرداخته‌اند. با این حال، این پژوهش بر نیازهای مرتبط با فضای زیرزمینی و عوارض موجود در آن، تأکید دارد. برای مدیریت بهینه زمین در سه‌بعدی، لازم است عوارض قانونی در کنار عوارض فیزیکی در نظر گرفته شوند. مدل مفهومی طراحی‌شده در این پژوهش، این هدف را دنبال می‌کند که با استفاده از استاندارد CityJSON، هم عوارض فیزیکی و هم عوارض قانونی به صورت یکپارچه نمایش داده شوند. برای تجسم عوارض مرتبط با لوله‌های فاضلاب زیرزمینی و فضاهای قانونی آن‌ها، عارضه "Parcel" (قطعه زمین) به مدل CityJSON اضافه شده است. این عارضه به عنوان عنصر اصلی در نمایش دقیق مالکیت و حقوق مرتبط با فضاهای زیرسطحی عمل می‌کند. از این طریق، می‌توان عوارض قانونی مانند محدودیت‌های عمق و حقوق ارتفاقی را در کنار عوارض فیزیکی مدل‌سازی کرد (شکل ۴). با توجه به عدم پشتیبانی CityJSON از رابطه وراثت در این پژوهش از روابط ترکیب و تجمع استفاده شده است.

در این پژوهش، عوارض قانونی با توجه به قوانین جاری ایران توسعه‌یافته‌اند. بر اساس قوانین مدنی ایران، مالکیت زمین شامل مالکیت سطح زمین و زیرزمین تا هر عمقی است که استفاده از آن برای مالک مناسب باشد. این اصل قانونی به مالک حق تصرفات در سطح و زیرزمین را می‌دهد، مگر آنکه قوانین خاصی این حقوق را محدود کرده باشند. با این حال، سیستم‌های ثبت زمین در ایران به طور سنتی به صورت دوبعدی تدوین شده‌اند و تمرکز اصلی آن‌ها بر تعیین حدود اربعه و مرزهای املاک است. این رویکرد باعث شده است که فضاهای قانونی زیرزمینی و بالای سطح زمین به طور جامع و دقیق در قالب سه‌بعدی نمایش داده نشوند. این کاستی می‌تواند منجر به بروز ناهماهنگی‌ها و تداخلات حقوقی در مدیریت و بهره‌برداری از این فضاها شود. برای رفع این چالش‌ها و ارتقای دقت و شفافیت در مدیریت زیرساخت‌های زیرزمینی، در این پژوهش تلاش شده تا مدل CityJSON که یک فرمت کدگذاری برای CityGML است، برای مدل‌سازی زیرساخت‌های فاضلاب زیرزمینی غنی‌سازی شود. این غنی‌سازی به منظور بهبود مدیریت زیرساخت‌ها و شفاف‌سازی حقوق مالکیت در فضاهای زیرزمینی انجام شده است. عوارض جدیدی که در این مدل اضافه شده‌اند، به درک بهتر نیازهای قانونی کمک می‌کنند و در شرایط پیچیده شهری و زیرسطحی، امکان تصمیم‌گیری و برنامه‌ریزی بهتر را فراهم می‌آورند. جزئیات مربوط به این عوارض و نقش آن‌ها در تبیین نیازهای قانونی در جدول ۲ ارائه شده است. این جدول به معرفی توصیفات هر یک از عوارض شناسایی‌شده، می‌پردازد (جدول ۲). با توجه به مشخص شدن نیازهای عوارض قانونی و فیزیکی، در بخش بعد به تحلیل و بررسی مدل مفهومی پرداخته‌ایم. این مدل، به ما امکان می‌دهد تا عوارض مختلف را شناسایی و دسته‌بندی کنیم و ارتباطات میان آن‌ها را بهتر درک نماییم. شکل ۳ نتایج نیازسنجی و عوارض جدید را نمایش می‌دهد (شکل ۳).

جدول ۲: نیازسنجی عوارض فیزیکی
Table 2: Needs assessment of legal Objects

توصیفات Descriptions	نام عارضه Complication name	تعریف Definition	نام نام Name	نوع داده Data type
محدودیت عمق Depth limit	عنصر ایجاد شده برای محدودیت حق استفاده از املاک است.	حداکثر عمق Maximum depth	Float	
	The element is created to limit the right to use real estate.	حداقل عمق Minimum depth	Float	
حقوق ارتفاقی Easement rights	حق قانونی است که به یک شخص یا مالک ملک اجازه می‌دهد از ملک یا زمین دیگری برای یک هدف خاص استفاده کند.	ذی‌نفع Beneficiary	Char	
	A legal right that allows a person or property owner to use another person's property or land for a specific purpose	علت ایجاد Cause of creation	Char	



شکل ۴: مدل مفهومی توسعه داده شده
Fig. 4: of the developed conceptual model

کاداستر سه‌بعدی طراحی نشده‌اند، اما می‌توان آن‌ها را برای استفاده در این زمینه توسعه داد [۲۲]. مدل‌های فیزیکی توصیه شده توسط کنسرسیوم مکانی باز (OGC) به‌عنوان چارچوب‌هایی برای مدل‌سازی داده‌های مکانی سه‌بعدی به کار می‌روند. این مدل‌ها به‌طور خاص برای مدیریت بهتر اطلاعات جغرافیایی و شهری طراحی شده‌اند و در زمینه‌های مختلف مانند کاداستر سه‌بعدی، مدل‌سازی ساختمان‌ها و زیرساخت‌ها، ثبت حقوق، محدودیت‌ها و مسئولیت‌ها (RRRS) استفاده می‌شوند [۲۳]. یکی از مهم‌ترین مدل‌های فیزیکی توصیه شده توسط OGC، CityGML است که به‌عنوان یک استاندارد بین‌المللی برای نمایش و تبادل اطلاعات شهری سه‌بعدی شناخته می‌شود [۲۴]. این مدل، داده‌های فیزیکی مرتبط با ساختمان‌ها، فضاهای زیرزمینی، شبکه‌های زیرساختی و دیگر عناصر شهری را به‌صورت سه‌بعدی و دقیق ارائه می‌دهد. نسخه CityGML 3.0 برای کاربردهای کاداستر سه‌بعدی مفید است، زیرا می‌تواند هم مالکیت‌های سطحی و هم زیرسطحی را با جزئیات فیزیکی نمایش دهد. دو مدل داده برای تجسم و مدل‌سازی عوارض در کاداستر سه‌بعدی مورد توجه قرار گرفته‌اند که عبارت‌اند از مدل IFC و مدل CityGML. استاندارد کلاس‌های بنیادی صنعت به‌عنوان یک مدل داده متن‌باز برای تبادل داده در پلتفرم‌های مختلف مدل‌سازی اطلاعات ساختمان (BIM)، توسعه داده شده‌است. استاندارد IFC شیء‌گرا است و شامل مجموعه‌ای جامع از موجودیت‌ها برای مدیریت اطلاعات مکانی و معنایی در مورد عناصر ساختمان و

در شکل ۴، عوارض جدیدی که به مدل CityJSON اضافه شده‌اند نشان داده شده‌اند. این غنی‌سازی مدل کمک می‌کند تا فضاهای زیرزمینی مربوط به لوله‌های فاضلاب با استفاده از کاداستر سه‌بعدی مدیریت شوند. با ادغام عوارض فیزیکی و قانونی، می‌توان اطمینان حاصل کرد که تمامی جنبه‌های مالکیت، مسئولیت‌ها و محدودیت‌ها به‌طور همزمان و در یک مدل واحد نمایش داده شوند. این مدل مفهومی نه تنها امکان مدیریت بهتر تأسیسات زیرزمینی را فراهم می‌کند، بلکه به بهبود فرآیند تصمیم‌گیری و برنامه‌ریزی شهری نیز کمک می‌کند. از طریق این مدل، می‌توان حقوق و مالکیت‌های مرتبط با فضاهای زیرزمینی را مشخص کرد و از بروز تداخلات حقوقی و زیرساختی جلوگیری کرد. در ادامه این پژوهش، به بررسی مدل‌های داده در کاداستر سه‌بعدی می‌پردازیم.

○ مطالعه و بررسی پایگاه‌های داده برای مدل‌سازی کاداستر سه‌بعدی
کاداستر سه‌بعدی به‌عنوان یک رویکرد نوین در برنامه‌ریزی و بهره‌برداری از فضاهای شهری، به دو بخش اصلی داده‌های حقوقی و داده‌های فیزیکی تقسیم می‌شود. [۱۸]. داده‌های فیزیکی به ابعاد مکانی و معناشناسی اشاره دارند که شامل ویژگی‌های هندسی، فضایی و توصیفی عوارض موجود در محیط می‌شود. این داده‌ها به‌عنوان پایه و اساس تحلیل‌های فضایی و تصمیم‌گیری در زمینه مدیریت زمین، از اهمیت ویژه‌ای برخوردارند. مدل‌های داده‌های فیزیکی ذاتاً برای

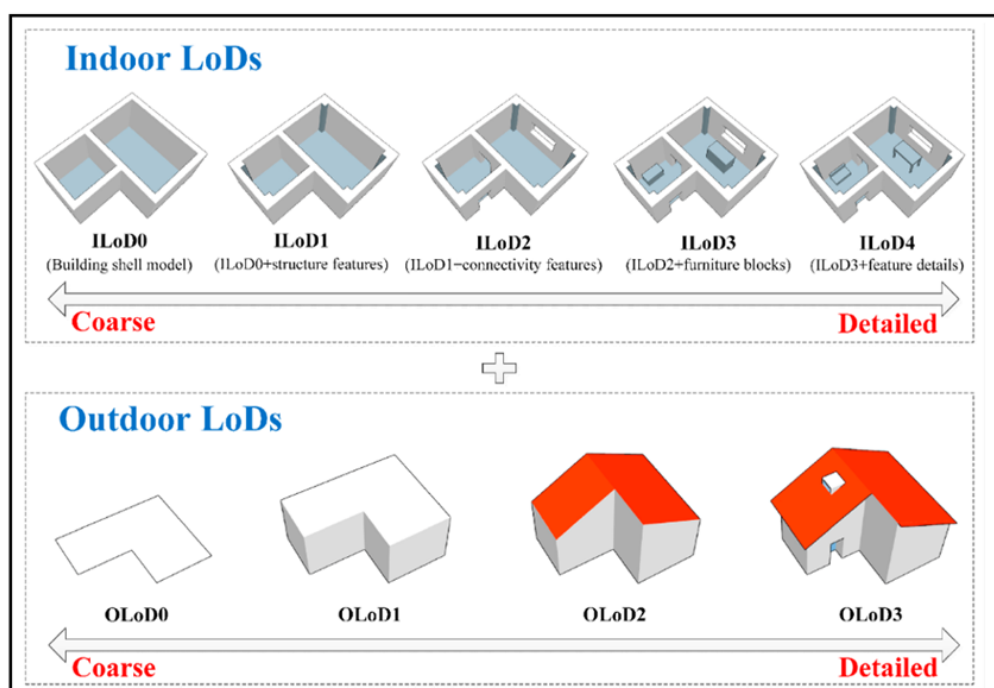
همین مسئله دلیل انتخاب نام این مدل داده‌ها را تا حدی روشن می‌کند. این امر باعث شده‌است تا به‌طور گسترده‌ای در میان کاربران و سازمان‌ها پذیرفته شود [۲۷]. یکی از بزرگ‌ترین معایب XML/GML حجم زیاد داده‌های آن است. این موضوع منجر به کاهش کارایی در تبادل داده‌ها، به‌ویژه از طریق وب، و زمان پردازش طولانی‌تر می‌شود [۲۸]. CityJSON یک فرمت کدگذاری است که برای نمایش داده‌های CityGML توسعه‌یافته و توسط OGC به‌عنوان یک استاندارد شناخته شده‌است. این فرمت باهدف ساده‌سازی، کاهش حجم داده‌ها، و بهبود تبادل داده‌های سه‌بعدی شهری (در مقایسه با XML/GML) طراحی شده‌است. یکی از بزرگ‌ترین مزیت‌های CityJSON نسبت به XML/GML، فشردگی داده‌ها است. فایل‌های CityJSON به‌طور متوسط ۶ برابر کوچک‌تر از فایل‌های XML/GML هستند [۲۹]. این کاهش حجم باعث می‌شود که تبادل داده‌ها در وب سریع‌تر انجام شود و فضای کمتری برای ذخیره‌سازی مورد نیاز باشد. 3DCityDB یک راه‌حل پایگاه‌داده مکانی برای مدیریت و ذخیره‌سازی داده‌های سه‌بعدی شهری است که از مدل داده CityGML پشتیبانی می‌کند [۳۰]. برخلاف CityJSON و XML/GML که استانداردهای رسمی توسط OGC دارند، 3DCityDB هنوز توسط OGC استاندارد نشده‌است. این ممکن است برای برخی کاربران که نیاز به تبعیت از استانداردهای رسمی دارند، محدودیت ایجاد کند. پیچیدگی نصب راه‌اندازی و استفاده از 3DCityDB به دانش فنی بیشتر نیاز دارد. کاربران باید با نصب مدیریت پایگاه‌داده رابطه‌ای آشنایی داشته‌باشند، درحالی‌که CityJSON ساختاری ساده دارد و نیاز به نصب ابزارهای پیچیده کمتر است. در جدول ۳ مقایسه‌ای بین سه روش کدگذاری CityGML بیان شده‌است.

همچنین مدل‌سازی روابط فضایی بین این عناصر است [۲۵]. استاندارد CityGML یک مدل مفهومی و فرمت تبادل برای نمایش، ذخیره‌سازی و تبادل مدل‌های مجازی سه‌بعدی شهری را تعریف می‌کند [۲۲]. این استاندارد به یکپارچه‌سازی داده‌های جغرافیایی شهری برای کاربردهای مختلف در شهرهای هوشمند و دوقلوهای دیجیتال شهری کمک می‌کند. در زمینه مدل‌سازی سه‌بعدی محیط شهری، IFC و CityGML دو استاندارد مهم با اهداف متفاوت هستند. IFC بیشتر بر طراحی و مدیریت اطلاعات ساختمان‌ها در پروژه‌های BIM تمرکز دارد [۲۶]. درحالی‌که CityGML برای مدل‌سازی شهرها و محیط‌های شهری به کار می‌رود [۲۲]. شکل ۵ تفاوت در سطح جزئیات را در دو مدل IFC و CityGML نمایش می‌دهد (شکل ۵).

همان‌طور که در شکل ۵ قابل مشاهده است تمرکز IFC بر روی عوارض داخلی ساختمان‌ها است و CityGML بر روی عوارض بیرونی تمرکز دارد. هر سطح به‌تدریج جزئیات بیشتری را اضافه می‌کند، از جمله هندسه دقیق و ویژگی‌های ظاهری. مدل CityGML برای تحلیل‌های فضایی و شهری، مانند برنامه‌ریزی شهری و مدیریت منابع، مناسب است و در کاداستر سه‌بعدی می‌تواند به درک دقیق‌تری از تعاملات بین ساختمان‌ها و زیرساخت‌ها کمک کند [۲۲].

○ روش‌های کدگذاری CityGML

مدل داده CityGML که در حال حاضر در نسخه ۳.۰ قرار دارد، دارای سه روش کدگذاری شناخته شده‌است [۲۶]. در ادامه به بررسی و مقایسه سه روش XML/GML، CityJSON و 3DCityDB می‌پردازیم. XML/GML در ابتدا تنها روش استاندارد شده برای CityGML بود که



شکل ۵: تفاوت LOD در IFC و CityGML [۱۲]

Fig. 4: LOD difference in IFC and CityGML

جدول ۳: مقایسه روش‌های کدگذاری در CITYGML
Table 3: Comparison of coding methods in CityGML

CityJSON	XML/GML	3DCityDB	معیارهای مقایسه Comparison criteria
بر پایه Json Based on Json	بر پایه XML Based on XML	بر پایه پایگاه‌داده‌های رابطه‌ای Based on relational databases	ساختار داده Data structure
به دلیل ساختار JSON کم‌حجم و مناسب برای توسعه در وب Due to its lightweight JSON structure, it is suitable for web development.	به دلیل ساختار XML حجم بالایی دارد. Due to its XML structure, it is large in size.	به دلیل ساختار پایگاه‌داده‌های رابطه‌ای، حجم بالایی دارد. Due to the structure of relational databases, they are large in size.	حجم داده Data volume
سرعت بالاتر در بارگذاری و پردازش داده‌ها Higher speed in loading and processing data	کند در پردازش و بارگذاری داده‌ها Slow in processing and loading data	کارایی بالا در پردازش داده‌های بزرگ High performance in big data processing	سرعت پردازش Processing speed
قابلیت استفاده آسان و سازگاری با وب Ease of use and web compatibility	وابسته به نرم‌افزارهای خاص و پیچیدگی نصب Dependent on specific software and installation complexity	نیاز به دانش فنی بالا برای نصب و راه‌اندازی نرم‌افزارها Requires high technical knowledge to install and launch software	سازگاری Compatibility
استاندارد شده توسط OGC Standardized by OGC	استاندارد رسمی OGC Official OGC standard	هنوز استاندارد نشده است. It is not yet standardized.	استانداردسازی Standardization

MongoDB و PostgreSQL دارای محدودیت‌هایی است. اطلاعات توصیفی و مکانی با کدنویسی به فرمت CityJSON در محیط Visual Studio به مدل افزوده شدند. شکل ۶ بخشی از کد CityJSON را نشان می‌دهد که توصیفات عوارض را در بر می‌گیرد (شکل ۶).

```

1 {
2   "cityObjects": {
3     "Parcel-1": {
4       "attributes": {
5         "Ownername": "خصوصی",
6         "LandUse": "مسکونی",
7         "address": "220 پلاک 6، کوچه بهار6، زنجان، بهارستان، کوچه بهار6",
8         "Area": "220m^2"
9       },
10      "children": ["Pipe-1", "Building-1"],
11    }
12  }
13 }
```

شکل ۶: بخشی از کد CITYJSON برای عارضه Parcel-1
Fig. 6: Part of the CityJSON code for the object Parcel-1

در شکل ۶ مشاهده می‌شود که ابتدا، عارضه Parcel-1 در کد CityJSON ایجاد شده است. سپس، توصیفات مرتبط با این عارضه به تفصیل بیان شده‌اند. پس از ارائه این توصیفات، برای پیاده‌سازی، از مفهوم فرزند و والد جهت ارتباط میان عارضه‌ها استفاده شده است. در این مدل، Parcel-1 دارای دو فرزند است: یکی Pipe-1 که در زیرزمین قرار دارد، و دیگری Building-1 که به سازه‌ای بالای سطح زمین مربوط می‌شود. برای دیگر عوارض نیز روابط پیاده سازی شده است. در هر یک از عوارض که به عنوان فرزند عارضه دیگر قرار می‌گیرد یک توصیف جدید با عنوان Parent اضافه می‌شود. با تعریف توصیف Parent، هر فرزند به طور مستقیم به والد خود ارجاع داده می‌شود. در نهایت، نتایج این مدل‌سازی با استفاده از سرویس و Ninja Viewer تجسم می‌شود. این ابزار امکان نمایش بصری مدل‌های سه‌بعدی که در فرمت CityJSON ذخیره شده‌اند، را فراهم می‌کند. با بارگذاری داده‌ها در

با توجه به جدول می‌توان گفت که CityJSON به دلیل چندین مزیت نسبت به دیگر روش‌های کدگذاری مانند 3DCityDB و XML/GML گزینه بهتری برای ذخیره و مدیریت داده‌های شهری محسوب می‌شود. CityJSON با استفاده از ساختار ساده‌تر JSON، قابلیت درک و کار با داده‌ها را تسهیل می‌کند که این امر به خصوص برای توسعه‌دهندگان وب و کاربردهای سه‌بعدی مفید است. داده‌های CityJSON معمولاً حدود ۶ برابر فشرده‌تر از XML هستند [۳۱] این فشردگی نه تنها باعث کاهش نیاز به فضای ذخیره‌سازی می‌شود بلکه زمان بارگذاری و پردازش داده‌ها را نیز بهبود می‌بخشد. با توجه به اینکه CityJSON به راحتی با محیط‌های وب سازگار است، توسعه‌دهندگان می‌توانند به راحتی از آن در پروژه‌های وب GIS و دیگر برنامه‌های مبتنی بر وب استفاده کنند. قابلیت تقسیم داده‌ها به مجموعه‌های مختلف و مدیریت مستقل آنها، موجب می‌شود که CityJSON بتواند به راحتی با تغییرات و مقیاس‌های مختلف داده‌ها سازگار باشد، در حالی که 3DCityDB به دانش فنی بالاتری برای مدیریت نیاز دارد. با توجه به این عوامل، CityJSON به عنوان یک فرمت مدرن و کارآمد برای کدگذاری داده‌ها انتخاب شد. این فرمت، با قابلیت یکپارچه‌سازی و مدیریت داده‌های متنوع از جمله اطلاعات موجود در سیستم‌های اداره زمین، امکان استفاده از داده‌های موجود را به شکلی بهینه و ساختارمند فراهم می‌کند.

○ ذخیره سازی داده در پایگاه داده

وارد کردن داده به یک پایگاه داده فرایندی است که طی آن داده‌های جدید به پایگاه داده اضافه می‌شوند. در این پژوهش، از CityJSON به عنوان فرمت ذخیره‌سازی داده استفاده شده است. هر چند CityJSON یک فرمت مناسب برای ذخیره‌سازی و نمایش داده‌های شهری سه‌بعدی است، اما در مقایسه با نرم‌افزارهای پایگاه داده‌ای مانند

کرده و هرگونه نیاز به تعمیر یا به‌روزرسانی را شناسایی کنند. به‌علاوه، اطلاعات مربوط به نوع کاربری لوله‌ها می‌تواند به ما کمک کند تا ارتباط بین زیرساخت‌های فاضلاب و کاربری‌های مختلف زمین را بهتر درک کنیم. به‌عنوان مثال، در مناطقی که کاربری‌های مسکونی، تجاری یا صنعتی وجود دارد، نیاز به مدیریت بهینه و پیشگیرانه خطوط فاضلاب بیشتر حس می‌شود. شناسه‌ها نیز به شفافیت بیشتر و پیگیری بهتر اطلاعات کمک می‌کنند و در فرآیند تصمیم‌گیری برای بهبود زیرساخت‌ها نقش مهمی ایفا می‌کنند. به‌ویژه، زمانی که نیاز به توسعه زمین یا تغییر کاربری‌ها وجود دارد، داشتن اطلاعات دقیق و قابل اعتماد از خطوط فاضلاب می‌تواند از بروز مشکلات جدی جلوگیری کند و به برنامه‌ریزی مؤثر در مدیریت زمین کمک نماید. بنابراین، این داده‌ها نه تنها برای حفظ و نگهداری زیرساخت‌ها ضروری هستند، بلکه به ایجاد یک چارچوب پایدار و مناسب برای توسعه زمین نیز کمک می‌کنند. همان‌طور که در گام اول مدل‌سازی به نیاز سنجی پرداخته شد دو عارضه فیزیکی که شامل قطعات زمین و لوله‌ها بودند در این بخش نمایش داده شد. (شکل ۸).

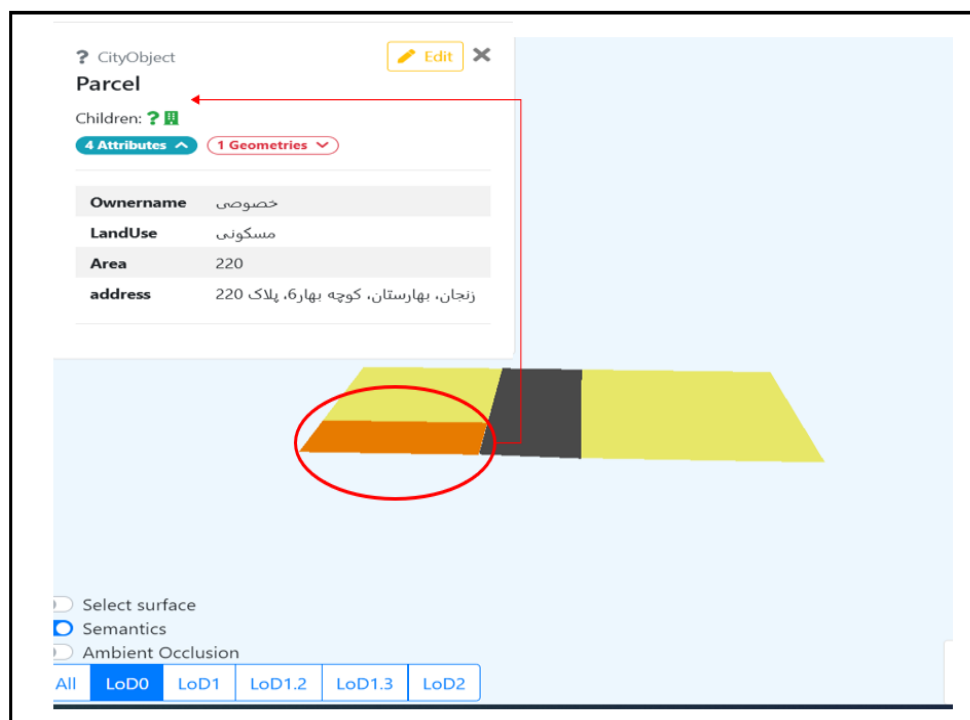
در بخش نتیجه‌گیری این پژوهش، تمرکز بر نمایش عوارض فیزیکی بوده است، زیرا این عناصر درک بهتری از محیط فیزیکی ارائه می‌دهند و تأثیر عملی بیشتری در تحلیل و تصمیم‌گیری‌ها دارند. از سوی دیگر، عوارض حقوقی موجب پیچیدگی و سردرگمی کاربران شود. به همین دلیل، در این مرحله از پژوهش، نمایش عوارض فیزیکی اولویت داشته است. این رویکرد کمک می‌کند که تمرکز روی عناصر ملموس‌تر حفظ شده و درک نهایی کاربران از نتایج بهبود یابد.

Ninja Viewer، تمامی اطلاعات مرتبط با عوارض، شامل هندسه، توصیفات و روابط بین آن‌ها، به‌صورت گرافیکی نمایش داده می‌شوند. این تجسم به کاربران امکان می‌دهد تا مدل‌های سه‌بعدی را به‌صورت تعاملی بررسی کنند. به این ترتیب، CityJSON به‌عنوان یک فرمت برای نمایش داده‌های شهری پیچیده در محیط‌های سه‌بعدی، امکان تحلیل و بررسی را فراهم می‌آورد.

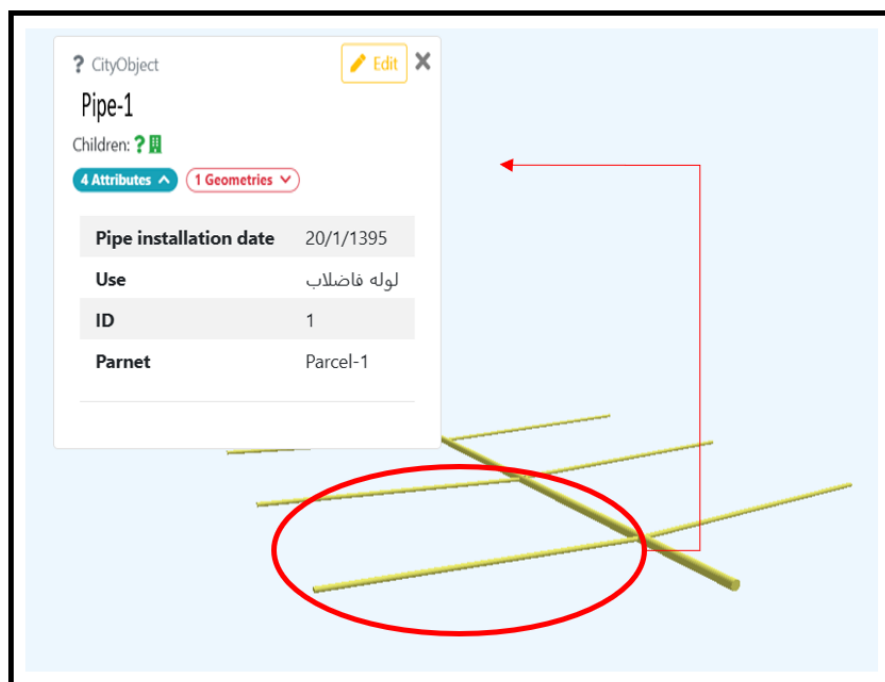
نتایج و بحث

پس از انجام فرآیندهای مختلف شامل تبدیل فایل‌های Shape به فرمت Collada و سپس تبدیل آن‌ها به فرمت CityJSON، به تجسم سه‌بعدی عوارض زیرزمینی پرداخته شد. برای این منظور، از Ninja Viewer، که ابزاری برای نمایش داده‌های CityJSON به‌صورت تحت وب است، استفاده شد. این ابزار قابلیت نمایش داده‌های شهری در سطوح مختلف جزئیات (LOD) را دارا بوده و به محققان این امکان را می‌دهد که عوارض مختلف را تجسم کنند. شکل ۷ نمونه‌ای از تجسم قطعات زمین در LOD 0 را نشان می‌دهد که توانسته است گستره و موقعیت کلی قطعات را نمایان سازد (شکل ۷).

همان‌طور که در شکل ۸ مشاهده می‌شود، لوله‌های فاضلاب به‌همراه اطلاعات توصیفی ذخیره و نمایش داده شده‌اند. این توصیفات شامل اطلاعاتی مانند نوع کاربری لوله، زمان نصب و شناسه منحصر به فرد هر لوله است. این اطلاعات برای تسهیل در مدیریت و نگهداری زیرساخت‌های شهری بسیار حیاتی هستند. زمان نصب به کارشناسان این امکان را می‌دهد تا تاریخچه و وضعیت فعلی این خطوط را بررسی



شکل ۷: نمایش قطعات زمین در LOD 0
Fig. 6: Representation of land plots at LOD 0



شکل ۸: تجسم لوله در NINJA VIEWER
Fig. 8: Pipe visualization in Ninja viewer

زیرساخت‌های زیرزمینی انجام داد. این نوآوری به شفاف‌سازی مالکیت و تسهیل فرآیندهای تصمیم‌گیری مدیریتی در زمینه مدیریت زیرساخت‌های شهری کمک می‌کند. با توجه به نتایج به‌دست آمده از این پژوهش، توصیه می‌شود که تحقیقات آینده به بررسی روش‌های ذخیره‌سازی عوارض زیرزمینی با استفاده از فرمت CityJSON در چارچوب زیرساخت‌های داده‌های مکانی بپردازند.

مشارکت نویسندگان

در این مقاله، نویسندگان به سهم برابر مشارکت داشته‌اند.

تشکر و قدردانی

بدین‌وسیله 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] Ivelja, T., & Roić, M. (2018). Usporedba normi za uvođenje 3D katastra.

[2] Shojaei D, Kalantari M, Bishop ID, Rajabifard A, Aien A. Visualization requirements for 3D cadastral systems. Comput Environ Urban Syst. 2013;41:39-54. Available from: <https://doi.org/10.1016/j.compenvurbsys.2013.04.002>

نتیجه‌گیری

مدل سه‌بعدی زیرساخت‌های فاضلاب شهری با موفقیت توسعه یافته‌است، نویدبخش ارتقا مدیریت و برنامه‌ریزی بهینه شهری است. در مرحله نخست این پژوهش، نیازسنجی به شیوه‌ای کتابخانه‌ای و با توجه به قوانین موجود در ایران انجام شد. در مرحله بعد، مدل مفهومی بر اساس نیازسنجی انجام‌شده، توسعه یافت. برای برقراری ارتباط مؤثر با کاربران، از مدل UML برای توسعه مدل مفهومی بهره‌گیری شد. علاوه بر این، استفاده از مدل UML به‌عنوان یک رویکرد توصیه‌شده توسط OGC نیز مورد تأکید قرار گرفته است. در ادامه، مدل‌های فیزیکی در کاداستر سه‌بعدی مورد بررسی قرار گرفتند و با توجه به اینکه این پژوهش در مقیاس شهری و نه صرفاً در سطح یک ساختمان، مدل CityGML به‌عنوان انتخاب مناسب در نظر گرفته شد. با استفاده از CityJSON که یک روش کدگذاری از استاندارد CityGML است داده‌ها ذخیره‌سازی شدند. CityJSON با استفاده از ساختار ساده‌تر JSON، قابلیت درک و کار با داده‌ها را تسهیل می‌کند که این امر به‌خصوص برای توسعه‌دهندگان وب و کاربردهای سه‌بعدی مفید است. داده‌های CityJSON معمولاً حدود ۶ برابر فشرده‌تر از XML هستند [۳۱]. این فشردگی نه تنها باعث کاهش نیاز به فضای ذخیره‌سازی می‌شود بلکه زمان بارگذاری و پردازش داده‌ها را نیز بهبود می‌بخشد. با توجه به اینکه CityJSON به‌راحتی با محیط‌های وب سازگار است، توسعه‌دهندگان می‌توانند به‌راحتی از آن در پروژه‌های وب GIS و دیگر برنامه‌های مبتنی بر وب استفاده کنند. با استفاده از این مدل، می‌توان تحلیل‌های لازم را انجام داد و توسعه‌های آینده شهری را با اطمینان بیشتری در راستای حفظ حقوق مالکیت و بهره‌برداری بهینه از

- [17] Saeidian B, Rajabifard A, Atazadeh B, Kalantari M. Managing underground legal boundaries in 3D-extending the CityGML standard. *Undergr Space*. 2024; 14:239-262. Available from: <https://doi.org/10.1016/j.undsp.2023.10.002>
- [18] Eastman C, Teicholz P, Sacks R, Liston K. *BIM Handbook: A Guide to Building Information Modeling for Owners, Managers, Designers, Engineers, and Contractors*. 2nd ed. Wiley; 2011.
- [19] Gröger G, Kolbe TH, Nagel C, Häfele KH. *OGC City Geography Markup Language (CityGML) encoding standard*. 2012.
- [20] Aien A. *3D cadastral data modelling [Doctoral dissertation]*. University of Melbourne; 2013.
- [21] Rajabifard A, Kalantari M, Williamson I. *Land and Property Information in 3D*. In: FIG Working Week 2012, Rome, Italy. 2012.
- [22] Biljecki F, Stoter J, Ledoux H, Zlatanova S, Çöltekin A. Applications of 3D city models: state of the art review. *ISPRS Int J Geo-Inf*. 2015;4(4):2842-2889. Available from: <https://doi.org/10.3390/ijgi4042842>
- [23] Liu X, Wang X, Wright G, Cheng JC, Li X, Liu R. A state-of-the-art review on the integration of Building Information Modeling (BIM) and Geographic Information System (GIS). *ISPRS Int J Geo-Inf*. 2017;6(2):53. Available from: <https://doi.org/10.3390/ijgi6020053>
- [24] Atazadeh B, Kalantari M, Rajabifard A, Ho S, Champion T. Extending a BIM-based data model to support 3D digital management of complex ownership spaces. *Int J Geogr Inf Sci*. 2017;31(3):499-522. Available from: <https://doi.org/10.1080/13658816.2016.1237366>
- [25] Gröger G, Kolbe TH, Nagel C, Häfele KH. *OGC City Geography Markup Language (CityGML) encoding standard*. 2012.
- [26] Kutzner T, Chaturvedi K, Kolbe TH. *CityGML 3.0: New functions open up new applications*. PFG J Photogrammetry Remote Sens Geoinf Sci. 2020;88(1):43-61. Available from: <https://doi.org/10.1007/s41064-019-00085-6>
- [27] Daum S, Borrmann A. Processing of topological BIM queries using boundary representation-based methods. *Adv Eng Inf*. 2014;28(4):272-286. Available from: <https://doi.org/10.1016/j.aei.2014.03.001>
- [28] Gilbert T, Rösndorf C, Plume J, Simmons S, Nisbet N, Gruler HC, et al. Built environment data standards and their integration: an analysis of IFC, CityGML and LandInfra. *Lehrstuhl für Geoinformatik*; 2020. Available from: <https://doi.org/10.1016/j.cities.2020.103019>
- [29] Cheng, J. C. P., Deng, Y., & Du, Q. (2013). Mapping between BIM models and 3d GIS city models of different levels of detail. Retrieved from
- [30] Powalka, L., Poon, C., Xia, Y., Meines, S., Yan, L., Cai, Y.,... & Ledoux, H. (2023, September). cjdb: a simple, fast, and lean
- [3] Olimid AP, Olimid DA. Societal challenges, population trends and human security: evidence from the public governance within the United Nations publications (2015-2019). *Revista de Stiinte Politice*. 2019;(64):53-64.
- [4] Dahiya B, Das A. *New urban agenda in Asia-Pacific: governance for sustainable and inclusive cities*. Singapore: Springer Singapore; 2020. p. 3-36.
- [5] United Nations Economic Commission for Europe. *Land administration guidelines: with special reference to countries in transition*. 1996.
- [6] Williamson I, Enemark S, Wallace J, Rajabifard A. *Land administration for sustainable development*. Redlands, CA, USA: ESRI Press Academic; 2010.
- [7] Stoter J. *3D Cadastre in an International Context (Legal, Organizational, and Technological Aspects)*. 2006.
- [8] Zlatanova S, Stoter J, Isikdag U. Standards for exchange and storage of 3D information: challenges and opportunities for emergency response. In: *Proceedings of the 4th International Conference on Cartography & GIS*; 2012; Bern, Switzerland: International Cartographic Association. p. 17-28.
- [9] Aien A, Kalantari M, Rajabifard A, Williamson I, Wallace J. Towards integration of 3D legal and physical objects in cadastral data models. *Land Use Policy*. 2013; 35:140-154. Available from: <https://doi.org/10.1016/j.landusepol.2013.05.013>
- [10] Khoshboresh Masouleh, Sadeghian S. Urban 3D cadastre implementation based on aerial images for property management in Tehran metropolis. *Sepehr Geographical Information Quarterly*. 2018;27(107):25-40.
- [11] Emamgholian S, Talee M. 3D modeling and visualization of apartment neighborhood relations using GIS. *National Geomatics Conference*. 2017.
- [12] Amoushahi M, Milan A, Jamour Y. Feasibility of using smartphones in internal architectural reconstruction without internal control points. 2022.
- [13] Einali M, Al Sheikh A, Atazadeh B. Cadastral surveying of various types of legal boundaries in Iran using BIM modeling. 2022.
- [14] Khosravi Kazazi A. Evaluation of the potential of volunteered geographic data in creating a three-dimensional urban landscape. *Spatial Planning and Development*. 2020;24(3):1-25.
- [15] Kim S, Heo J. Development of 3D underground cadastral data model in Korea: Based on land administration domain model. *Land Use Policy*. 2017; 60:123-138. Available from: <https://doi.org/10.1016/j.landusepol.2016.10.024>
- [16] Bieda A, Bydłosz J, Warchoła A, Balawejder M. Historical underground structures as 3D cadastral objects. *Remote Sens*. 2020;12(10):1547.



Noormohamadi, M. Faculty of Civil, Water and Environmental Engineering, Shahid Beheshti University, Tehran, Iran

✉ Mehrannormhd14@gmail.com



غلامرضا فلاحي استادیار گروه مهندسی نقشه‌برداری در دانشکده مهندسی عمران، آب و محیط‌زیست دانشگاه شهید بهشتی می‌باشند.

Fallahi, A. Faculty of Civil, Water and Environmental Engineering, Shahid Beheshti University, Tehran, Iran

✉ [g_fallahi\[at\]sbu.ac.ir](mailto:g_fallahi[at]sbu.ac.ir)

database solution for the CityGML data model. In International 3D GeoInfo Conference (pp. 781-796). Cham: Springer Nature Switzerland.

https://doi.org/10.1007/978-3-031-33771-7_52

[31] Ledoux, H., Arroyo Ohori, K., Kumar, K., Dukai, B., Labetski, A., & Vitalis, S. (2019). CityJSON: A compact and easy-to-use encoding of the CityGML data model. Open Geospatial Data, Software and Standards, 4(1), 1-12. <https://doi.org/10.1186/s40965-019-0064-0>

معرفی نویسندگان

AUTHOR (S) BIOSKETCHES

مهران نورمحمدی دارای مدرک کارشناسی ارشد سیستم‌های اداره زمین (LAS) از دانشگاه شهید بهشتی دانشکده عمران، آب و محیط‌زیست می‌باشد. زمینه تحقیقاتی کنونی ایشان نیز مرتبط با مدیریت زمین‌بر پایه مدل سازی کاداستر سه بعدی می باشد.

Citation (Vancouver): Noormohamadi M, Fallahi Gr. [Study and investigation of spatial databases for modeling and creating 3D cadastre of underground utilities]. *J. RS. GEOINF. RES.* 2025; 3(1): 157-170

 <https://doi.org/10.22061/jrsgr.2025.11601.1088>



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

Advancing Cadastral Systems: Development of the Land Administration Domain Model (LADM) Country Profile for Iran

A. Zamiri¹, A. A. Alesheikh^{*1}, B. Atazadeh², J. Jafari¹¹ Department of Geospatial Information Systems, Faculty of Geodesy and Geomatics Engineering, K. N. Toosi University of Technology, Tehran, Iran² The Centre for Spatial Data Infrastructure and Land Administration, Department of Infrastructure Engineering, The University of Melbourne, Australia

ABSTRACT

Received: 13 February 2025
 Reviewed: 27 March 2025
 Revised: 20 May 2025
 Accepted: 07 June 2025

KEYWORDS:

LADM
 Cadastre
 Country Profile
 LAS
 Land Registration
 ISO 19152

* Corresponding author

✉ alesheikh@kntu.ac.ir

☎ (+9821) 88888445

Background and Objectives: Land administration plays a pivotal role in sustainable development, urban planning, and protecting property rights. In Iran, land information and cadastral systems face challenges such as data fragmentation, the involvement of multiple responsible organizations, and a lack of standardization. The Land Administration Domain Model (LADM), as an international standard (ISO 19152), provides an integrated framework for modeling legal, spatial, and administrative aspects of land. Given the specific characteristics of the registration system and the governing laws of land administration in Iran, it is essential to localize this model according to national needs. LADM allows for the development of country profiles tailored to the legal and institutional structures of each nation. This domain model has been implemented in more than 40 countries worldwide, including the Netherlands, Malaysia, Poland, Brazil, Morocco, Australia, and South Korea. These countries have taken advantage of the model's flexibility to design modern land registration and three-dimensional cadastre systems, reduce costs, and accelerate registration processes. The aim of this study is to develop a country profile of LADM for Iran that, by considering the legal, institutional, and technical structures of the country, provides a comprehensive conceptual model for land administration.

Methods: This research begins with an international comparative analysis of cadastral frameworks, followed by a systematic evaluation of Iran's land registration system. Methodologically, the national profile formulation was organized into three distinct phases. First, the scope was defined, including the identification of stakeholders, legal and technical requirements. Then, the profile was designed by mapping LADM classes to Iran's cadastral elements, creating new classes and attributes tailored to national needs, developing code lists, and designing the Unified Modelling Language (UML) model. Finally, the model was evaluated using ISO 19152 conformance tests and expert surveys. Data collection tools included analysis of registration documents, expert interviews, and review of international models. The analyses were conducted based on conformance assessment at three levels: low, medium and high.

Findings: The analysis results showed that the proposed Iran country profile achieved full conformance with Level two (medium level) of the LADM standard, and several Level three (high level) components were also detected. Key accomplishments of this model include the successful mapping between classes, the addition of specialized classes and new attributes, and the redefinition of existing code lists. Alongside these technical outcomes, expert surveys likewise indicated the model's strong acceptance and its effectiveness in improving land registration processes, reducing ownership conflicts, and enhancing the efficiency of the national registration system.

Conclusion: The LADM country profile represents a fundamental step toward standardizing and advancing the national land registration system. By enabling three-dimensional cadastre implementation and integration with the Building Information Model (BIM), it can serve as a powerful tool for cadastre management. Experiences from other countries also confirm that using LADM increases transparency, reduces registration costs, and enhances coordination among executing agencies. However, achieving full compliance with the standard and operational utilization requires technical revisions, infrastructure optimization, and sustained collaboration among the involved institutions. This study recommends that the developed model be implemented in real-world environments and that its performance be evaluated under Iran's operational conditions. Furthermore, future research could explore the integration of this model with other information systems and further development of the country profile.



NUMBER OF REFERENCES

56



NUMBER OF FIGURES

15



NUMBER OF TABLES

1

مقاله پژوهشی

توسعه سامانه کاداستر: تدوین چارچوب ملی مدل دامنه مدیریت زمین برای ایران

عارف ضمیری^۱، علی اصغر آل شیخ^{۱*}، بهنام عطا زاده^۲، جلیل جعفری^۱^۱ گروه سیستم‌های اطلاعات مکانی، دانشکده مهندسی ژئودزی و ژئوماتیک، دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی، تهران، ایران^۲ گروه مرکز تحقیقات زیرساخت اطلاعات مکانی و مدیریت زمین، دانشکده مهندسی زیرساخت، دانشگاه ملیورن، استرالیا

چکیده

پیشینه و اهداف: مدیریت زمین نقشی اساسی در توسعه پایدار، برنامه‌ریزی شهری و تضمین حقوق مالکیتی ایفا می‌کند. در ایران، سیستم‌های مدیریت زمین و کاداستر با چالش‌هایی مانند پراکندگی داده، تنوع نهادهای متولی و عدم استاندارد روبرو هستند. مدل دامنه مدیریت زمین (LADM) به‌عنوان یک استاندارد بین‌المللی (ISO 19152) چارچوبی یکپارچه برای مدل‌سازی اطلاعات حقوقی، مکانی و مدیریت زمین ارائه می‌دهد. با توجه به ویژگی‌های خاص نظام ثبتی و قوانین حاکم بر مدیریت زمین در ایران، ضرورت دارد که این مدل مطابق با نیازهای ملی بومی سازی گردد. مدل LADM امکان توسعه پروفایل‌های ملی متناسب با ساختارهای قانونی و حقوقی هر کشور را فراهم می‌کند. این مدل دامنه تاکنون در بیش از ۴۰ کشور جهان از جمله هلند، مالزی، لهستان، برزیل، مراکش، استرالیا و کره جنوبی به‌کار گرفته شده است. این کشورهای پیشرو با بهره‌گیری از انعطاف‌پذیری این استاندارد، موفق به طراحی سیستم‌های نوین ثبت و کاداستر سه‌بعدی در کنار کاهش هزینه‌ها و تسریع فرآیندهای ثبتی شده‌اند. هدف این پژوهش، توسعه یک پروفایل کشوری LADM برای ایران می‌باشد که با در نظر گرفتن ساختارهای قانونی، سازمانی و فنی کشور، مدل مفهومی جامعی را برای مدیریت زمین ارائه کند.

روش‌ها: این پژوهش با تحلیل مقایسه‌ای تجارب کشورهای پیشرو آغاز شد و پس از بررسی جامع ساختار ثبتی کشور ایران، فرآیند توسعه پروفایل کشوری در سه مرحله اصلی انجام یافت. ابتدا با تعریف دامنه، شناسایی ذی‌نفعان و الزامات قانونی و فنی انجام گشت و در مرحله بعد طراحی پروفایل شامل نگاشت کلاس‌های LADM به عناصر کاداستر ایران، ایجاد کلاس‌ها و ویژگی‌های جدید متناسب با نیازهای داخلی، توسعه کد لیست‌ها و طراحی مدل UML صورت گرفت و در نهایت ارزیابی مدل با استفاده از آزمون‌های انطباق استاندارد ISO 19152 و نظرسنجی از متخصصان انجام شد. ابزار گردآوری داده شامل تحلیل مستندات ثبتی، مصاحبه با کارشناسان و بررسی مدل‌های خارجی بود. تحلیل‌ها با استفاده از سنجش انطباق در سه سطح (پایه، متوسط، پیشرفته) انجام شد.

یافته‌ها: نتایج تحلیل‌ها نشان داد که پروفایل پیشنهادی برای کشور ایران موفق به انطباق کامل با سطح دوم استاندارد LADM (سطح متوسط) گردیده است و برخی اجزای سطح سوم (سطح پیشرفته) نیز پیاده‌سازی شده‌اند. نگاشت موفق بین کلاس‌ها، افزودن کلاس‌های خاص و ویژگی‌های جدید به همراه باز تعریف کد لیست‌های موجود از دستاوردهای کلیدی این مدل هستند. در کنار نتایج فنی به‌دست آمده، نظرسنجی‌های انجام‌شده از کارشناسان نیز بیانگر پذیرش و اثربخشی بالای مدل پیشنهادی در بهبود فرآیندهای ثبت زمین، کاهش تداخل مالکیتی و ارتقای بهره‌وری سیستم ثبت کشور بوده است.

نتیجه‌گیری: پروفایل کشوری LADM، گامی اساسی برای استانداردسازی و ارتقا نظام ثبت اسناد و املاک کشور است. این مدل با فراهم‌سازی زمینه پیاده‌سازی کاداستر سه‌بعدی و تلفیق با مدل اطلاعات ساختمان می‌تواند ابزار قدرتمندی در مدیریت کاداستر باشد. تجربیات کشورهای دیگر نیز تایید می‌کنند که استفاده از LADM موجب افزایش شفافیت، کاهش هزینه‌های ثبت، بهبود کیفیت اجرای کاداستر و هماهنگی بیشتر بین نهادهای اجرایی می‌شود. با این حال، برای دستیابی به انطباق کامل با استاندارد و بهره‌برداری عملیاتی بیشتر از این مدل، انجام اصلاحات فنی، بهینه‌سازی زیرساخت‌ها و تداوم همکاری بین نهادهای مرتبط ضروری است. این تحقیق پیشنهاد می‌دهد که مدل توسعه‌یافته در محیط‌های واقعی پیاده‌سازی شده و عملکرد آن تحت شرایط اجرایی کاداستر در ایران مورد ارزیابی قرار گیرد. همچنین پژوهش‌های آتی می‌توانند به بررسی تلفیق مدل با دیگر سامانه‌های اطلاعاتی و توسعه بیشتر پروفایل کشوری بپردازند.

تاریخ دریافت: ۲۵ بهمن ۱۴۰۳
تاریخ داوری: ۰۷ فروردین ۱۴۰۴
تاریخ اصلاح: ۳۰ اردیبهشت ۱۴۰۴
تاریخ پذیرش: ۱۷ خرداد ۱۴۰۴

واژگان کلیدی:

مدل دامنه مدیریت زمین
کاداستر
پروفایل کشوری
سیستم مدیریت زمین
ثبت املاک
ایزو ۱۹۱۵۲

* نویسنده مسئول

alesheikh@kntu.ac.ir

۰۲۱-۸۸۸۸۸۴۴۵

مقدمه

مدیریت زمین را می‌توان به عنوان یکی از مهم‌ترین پایه‌های توسعه پایدار و رشد اقتصادی کشورها دانست. در همین راستا، سیستم‌های مدیریت زمین نقشی اساسی در برآورده کردن نیازهای حقوق مالکیت، کاهش اختلافات ملکی و افزایش کارایی نقل و انتقالات املاک دارند. سازمان‌های بین‌المللی همچون FIG، UN-Habitat و بانک جهانی همواره بر اهمیت استانداردسازی سیستم‌های ثبت زمین تأکید کرده‌اند [۱]. به همین جهت، سازمان بین‌المللی استاندارد، استاندارد ایزو ۱۹۱۵۲، مدل دامنه مدیریت زمین (LADM)، را برای یکپارچه‌سازی و بهبود عملکرد سیستم‌های ثبت و مدیریت زمین در سال ۲۰۱۲ معرفی نمود. این استاندارد در قالب یک مدل مفهومی وظیفه‌ی فراهم کردن یک زبان مشترک برای توصیف هرچه بهتر سیستم‌های مدیریت زمین در راستای درک بهتر شباهت‌ها و تفاوت‌های آن‌ها را دارد [۲].

استاندارد LADM این امکان را به کشورها می‌دهد که با طراحی پروفایل کشوری، سیستم‌های مدیریت زمین خود را بر اساس نیازهای محلی توسعه داده و در عین حال قابلیت تعامل‌پذیری و یکپارچگی با سایر سیستم‌های جهانی را حفظ کنند [۳]. تجربه کشورهای مختلف نشان می‌دهد که پیاده‌سازی LADM منجر به افزایش شفافیت، کاهش هزینه‌های نقل و انتقال املاک، و افزایش اطمینان در داده‌های ثبتی می‌شود [۴]. با این حال، هر کشوری با توجه به ساختار قانونی، سیستم‌های ثبتی و الزامات محلی خود، نیازمند توسعه یک پروفایل ملی برای استاندارد LADM می‌باشد [۱]. کشورهایی که در جهت پیاده‌سازی LADM گام برداشتند، بهبود چشمگیری در دسترسی به اطلاعات حقوقی املاک، کاهش دعاوی ملکی و تسهیل فرآیندهای ثبتی مشاهده کرده‌اند [۵].

اگرچه سیستم ثبت املاک و مستغلات در ایران، از قدمت بالایی برخوردار است، اما همچنان با چالش‌هایی همچون پراکندگی داده‌های ثبتی، ناهماهنگی بین نهادهای مرتبط و عدم شفافیت در حقوق مالکیت روبرو است [۶]. علاوه بر این، با توجه به افزایش جمعیت، رشد شهرنشینی و پیچیدگی‌های مربوط به استفاده از اراضی، نیاز به یک سیستم ثبت زمین کارآمد و استاندارد بیش از گذشته احساس می‌شود [۷]. به همین دلیل این پژوهش به بررسی ضرورت و چگونگی توسعه پروفایل کشوری LADM برای ایران می‌پردازد. هدف اصلی این پژوهش، تحلیل ساختار فعلی سیستم کاداستر در ایران، بررسی میزان انطباق آن با استاندارد LADM و ارائه یک پروفایل کشوری برای ایران می‌باشد. این مطالعه با بهره‌گیری از تحلیل‌های تطبیقی، بررسی تجربیات کشورهای موفق در این زمینه و مطالعه قوانین و مقررات داخلی، راهکارهایی برای پیاده‌سازی یک سیستم مدیریت زمین مبتنی بر LADM در ایران ارائه خواهد داد. همچنین، پیشنهادهایی برای توسعه بهتر مدل در آینده به‌منظور پیاده‌سازی کاداستر سه‌بعدی در ایران ارائه می‌شود.

در ادامه این پژوهش، ابتدا مبانی نظری و ادبیات تحقیق در زمینه سیستم‌های مدیریت زمین و استاندارد LADM بررسی می‌شود. پس از تعریف روش‌شناسی مورد استفاده، در بخش طراحی و توسعه، یک پروفایل کشوری LADM برای ایران ارائه می‌گردد. با استفاده از آزمون‌های از پیش تعیین‌شده در استاندارد LADM و نظرسنجی از کارشناسان مربوطه از طریق ارائه پرسش‌نامه، کارایی مدل پیشنهادی در زمینه کاداستر کشور بررسی شده و در نهایت، نتیجه‌گیری و پیشنهادهایی برای سیاست‌گذاری و اجرای این استاندارد در ایران ارائه خواهد شد.

تاکنون در بیش از ۴۰ کشور دنیا استاندارد LADM بررسی و اجرا شده است. در جدول ۱ برخی از این کشورها بر اساس قاره‌ها دسته‌بندی شده‌اند.

جدول ۱: کشور های فعال در حوزه LADM
Table 1: Countries Active in the Field of LADM

کشورها Countries	قاره Continent
بنین (Benin) [۸]، مراکش (Morocco) [۹]، موزامبیک (Mozambique) [۱۰]، نیجریه (Nigeria) [۱۱]، اتیوپی (Ethiopia) [۱۲]، کنیا (Kenya) [۱۳]، آفریقای جنوبی (South Africa) [۱۴]	آفریقا Africa
چین (China) [۱۵]، اندونزی (Indonesia) [۱۶]، ژاپن (Japan) [۱۷]، کره جنوبی (South Korea) [۱۸]، مالزی (Malaysia) [۱۹]، مغولستان (Mongolia) [۲۰]، عربستان سعودی (Saudi Arabia) [۲۱]، سنگاپور (Singapore) [۲۲]، ویتنام (Vietnam) [۲۳]	آسیا Asia
کرواسی (Croatia) [۲۴]، قبرس (Cyprus) [۲۵]، چک (Czech Republic) [۲۶]، مجارستان (Hungary) [۲۷]، لهستان (Poland) [۲۸]، پرتغال (Portugal) [۲۹]، جمهوری صرب (Serbian Republic) [۳۰]، روسیه (Russia) [۳۱]، هلند (Netherlands) [۳۲]، ترکیه (Turkey) [۳۳]، مونتنگرو (Montenegro) [۳۴]	اروپا Europe
هندوراس (Honduras) [۳۵]، ترینیداد و توباگو (Trinidad and Tobago) [۳۶]، برزیل (Brazil) [۳۷]، کلمبیا (Colombia) [۳۸]، کپ ورد (Colombia) [۳۹]	آمریکا America
استرالیا-کوئینزلند (Australia - Queensland) [۴۰]، استرالیا-ویکتوریا (Australia - Victoria) [۴۱]	اقیانوسیه Oceania

LADM به دلیل انعطاف‌پذیری بالا، در این کشورها متناسب با چارچوب‌های قانونی و نیازهای ملی، سفارشی‌سازی شده‌اند. به عنوان مثال، در کشور مالزی از قاره آسیا، با استفاده از این مدل یک سیستم سه‌بعدی برای ثبت املاک چند سطحی طراحی گردیده که امکان مدیریت بهتر املاک و مستغلات را تسهیل کرده است [۱۸]. در اروپا، کشور لهستان، با هدف توسعه سیستم کاداستر سه‌بعدی، پروفایل کشوری LADM خود را تدوین کرده که باعث افزایش دقت در ثبت املاک شده است [۲۷]. در کشور صربستان نیز، پروژه‌های متعددی برای مدرن‌سازی سیستم ثبت زمین با بهره‌گیری از این استاندارد اجرا شده

ثبت املاک با استفاده از مدل سازی سه بعدی در ایران [۴۱]، مطالعه‌ای مروری در زمینه تلفیق مدل سازی اطلاعات ساختمانی و سامانه‌های اطلاعات مکانی [۴۲] و همچنین توسعه ابزاری در جهت مدل سازی و نمایش حقوق ارتفاقی در آپارتمان‌ها اشاره کرد [۴۳]. با این حال امروزه کشورهای زیادی در راستای بومی سازی و اجرای استاندارد LADM گام برداشتند اما در ایران توجه کافی به این مدل نشده و مطالعات به صورت محدود و صرفاً در راستای معرفی [۴۴] و بررسی مولفه‌های اصلی این مدل داده بودند [۴۵]. با وجود شکاف آشکار میان مطالعات حقوقی و فنی، بررسی پژوهش‌های حقوقی موجود نیز نشان‌دهنده ضرورت به کارگیری یک مدل داده‌ای استاندارد متناسب با شرایط ایران است. اجرای کامل قانون جامع حدنگار (کاداستر) یکی از اهداف کلیدی سازمان ثبت اسناد و املاک کشور به شمار می‌رود، اما تحقق این هدف با چالش‌ها و موانع متعددی نظیر مشکلات اجرایی، نارسایی‌های فنی و مشکلات ساختاری همراه است [۴۶]. وجود چنین چالش‌هایی می‌تواند مسبب مشکلاتی مانند انجام معاملات معارض، جعل و تغییر در اسناد و ضایع شدن حقوق مالکیت شود [۴۷]. یکی از راه‌های پیشنهادی برای حل این مشکل ادغام کامل ثبت و کاداستر می‌باشد. با وجود اینکه در قانون جامع حدنگار این مسئله تجویز شده است اما به طور کامل صورت نگرفته [۴۸]. اجرای یک مدل دامنه استاندارد می‌تواند به عنوان گامی اولیه در جهت حل این مشکلات و حرکت به سوی آثار فراحقوقی کاداستر نظیر برنامه‌ریزی و مدیریت شهری، کارآمدی سازمان‌ها در خدمات‌رسانی به مردم، برنامه ریزی روستایی و همچنین دیگر آثار اقتصادی و سیاسی باشد [۴۹].

ایران به عنوان کشوری با ساختاری پیچیده در زمینه مالکیت زمین و چالش‌های متعدد در مدیریت املاک، نیازمند یک سیستم یکپارچه و کارآمد برای ثبت و مدیریت اطلاعات زمین می‌باشد. با توجه به تجربیات موفق سایر کشورها و نیازهای خاص مربوط به کشور ایران، توسعه یک پروفایل کشوری بر اساس LADM، گامی اساسی در جهت بهبود مدیریت زمین در کشور خواهد بود. استفاده از استانداردهای جهانی و تطبیق آن‌ها با شرایط داخلی ایران، می‌تواند به یکپارچه سازی داده‌های کاداستری، افزایش بهره‌وری سیستم‌های ثبت زمین و کاهش اختلافات ملکی کمک کند.

روش تحقیق

بر اساس روش‌های مورد استفاده در کشورهای مختلف [۵۰]، توسعه پروفایل کشوری LADM برای ایران را می‌توان به سه مرحله اصلی دسته‌بندی کرد که هر مرحله دارای زیرمجموعه‌هایی برای اجرای صحیح فرآیند می‌باشد.

مرحله اول: تعریف دامنه

در این مرحله، دامنه و محدوده مدل تعیین می‌شود. این بخش شامل موارد زیر می‌باشد:

است [۳۱]. در قاره آمریکا، کشور برزیل، مدل LADM را برای مدیریت حقوق زمین قبایل بومی با هدف حل مشکلات مالکیت، اختلافات حقوقی و نبود کاداستر یکپارچه به کار گرفته شده است. این مدل امکان یکپارچه سازی داده‌های زمین و بهبود فرایندهای اداری مرتبط با ثبت اراضی را در این کشور فراهم کرده است [۴]. در کشور مراکش از قاره آفریقا، پروفایل کشوری با تطبیق عناصر LADM با ساختارهای قانونی، فنی و اداری مراکش تحت عنوان MA-LADM توسعه داده شده است. این پروفایل امکان نمایش دوبعدی و سه بعدی واحدهای مکانی و ترکیب اطلاعات از منابع مختلف را فراهم می‌کند و به بهبود مدیریت زمین و کاهش هزینه‌های نگهداری داده‌ها کمک می‌نماید [۹]. در کشور استرالیا از قاره اقیانوسیه، هر ایالت دارای یک سیستم اطلاعاتی کاداستر پیشرفته می‌باشد که به تدریج به سمت کاداستر سه بعدی حرکت می‌کند. تاکنون تنها یک پروفایل ملی LADM برای ایالت کوئینزلند توسعه داده شده که به صورت UML در قالب استاندارد LADM منتشر شده است [۳۹]. اما ایالت ویکتوریا در حال بررسی ایجاد یک پروفایل مبتنی بر LADM است تا مسائل مربوط به پیاده سازی کاداستر سه بعدی را حل کند و استاندارد سازی اطلاعات مکانی را بهبود ببخشد [۴۰].

تجربیات کشورهای مذکور نشان داده که استفاده از LADM می‌تواند به افزایش دقت در ثبت املاک، کاهش اختلافات ملکی و بهبود فرآیندهای مدیریتی کمک فراوانی کند. با وجود مزایای فراوان LADM، اجرای این استاندارد در کشورهای مختلف با چالش‌هایی نیز همراه بوده است. برخی از مهم‌ترین این چالش‌ها عبارتند از:

ناهماهنگی در داده‌های موجود: در بسیاری از کشورها، داده‌های کاداستر به صورت ناهمگن و در قالب سیستم‌های ناسازگار قدیمی نگهداری می‌شوند که یکپارچه سازی آن‌ها نیازمند تغییرات ساختاری و فنی گسترده می‌باشد [۵].

چارچوب‌های قانونی متفاوت: هر کشور قوانین و مقررات مخصوص به خود را در زمینه ثبت و مدیریت زمین دارد و در برخی از موارد، این قوانین با استانداردهای بین‌المللی همخوانی ندارند. این موضوع می‌تواند مانعی برای پیاده سازی کامل LADM باشد [۴۰].

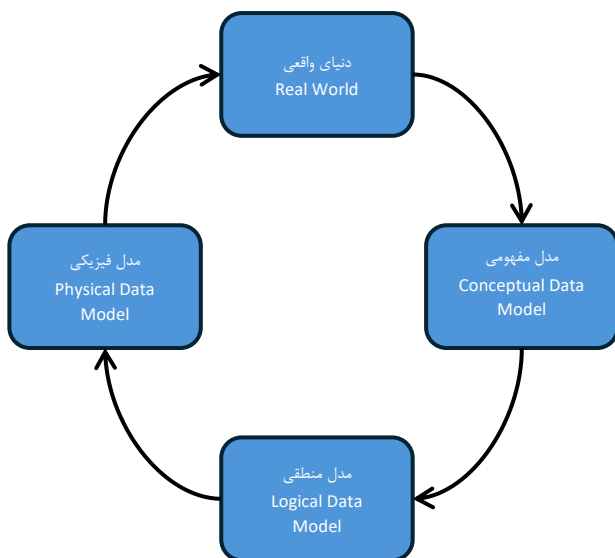
مسائل فنی و زیرساختی: ایجاد پایگاه‌های داده سه بعدی و مدیریت اطلاعات مکانی پویا، از جمله چالش‌های فنی مهم در این زمینه به شمار می‌روند. به عنوان مثال، کشور کره جنوبی در راستای تصویب قانون ویژه بازنگری کاداستر برای مدیریت کاداستر سه بعدی و کاداستر زیرزمینی، نیاز به توسعه مدل داده‌ای ویژه‌ای بر اساس LADM داشت تا بتواند اطلاعات مربوط به ساختارهای زیرسطحی را با دقت بالا ثبت کند. این مدل با فراهم کردن امکان ثبت دقیق اطلاعات ساختارهای زیرسطحی، مانند تاسیسات و ساختمان‌های زیرزمینی، داده‌های فیزیکی و حقوقی سه بعدی را در سیستم مدیریت زمین یکپارچه ساخت [۱۷].

در ایران، اگرچه سالانه مطالعات متعددی در زمینه جنبه‌های حقوقی کاداستر انجام می‌شود اما به جنبه‌های فنی آن کمتر پرداخته می‌شود. از مطالعات انجام شده در این حوزه می‌توان به بررسی امکان مدیریت و

و پس از مصاحبه با کارشناسان این دستگاه‌ها، نیازمندی‌های قانونی لازم‌الاجرا برای توسعه یک مدل داده مدیریت زمین مشخص شدند. در بخش‌هایی از این مرحله با همکاری متخصصین حوزه فناوری اطلاعات و متخصصین GIS کشور چالش‌های مربوط به داده‌های موجود حال حاضر شناسایی و برای مراحل آتی توسعه پروفایل کشوری مدنظر قرار داده شدند.

مفاهیم پایه LADM

برای طراحی پروفایل کشوری LADM، ابتدا باید مدل‌سازی داده و اجزای اصلی استاندارد ISO 19152، شامل بسته‌ها، کلاس‌ها و گدلیست‌ها، تشریح شوند [۲]. مدل‌سازی داده فرآیندی تکرارشونده است که از مدل مفهومی آغاز می‌شود، سپس به مدل منطقی برای تعریف ساختار داده‌ها و در نهایت به مدل فیزیکی برای سازماندهی داده‌ها در قالب جداول می‌رسد [۵۱]. در این پژوهش، توسعه پروفایل LADM برای ایران در مرحله مدل مفهومی انجام می‌شود. شکل ۲ چرخه توسعه مدل‌سازی داده را به صورت شماتیک نشان می‌دهد.



شکل ۲: چرخه توسعه مدل‌سازی داده [۵۱]

Fig. 2: Data modelling development cycle [51]

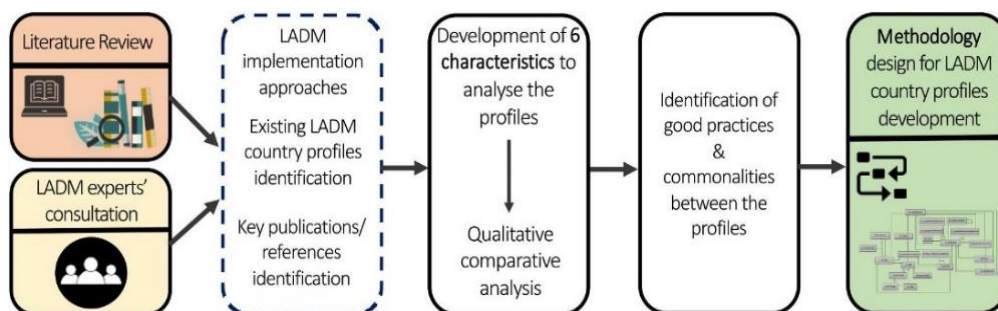
- شناسایی ذی‌نفعان کلیدی (دولت، دانشگاه‌ها، سازمان‌های مرتبط با کاداستر و مدیریت زمین).
- تعیین نیازمندی‌های قانونی و نهادی.
- تعیین چالش‌های مربوط به داده‌ها و قابلیت تعامل با سایر سیستم‌ها.

مرحله دوم: ایجاد پروفایل

- این مرحله شامل توسعه مدل مفهومی و فنی بر اساس LADM می‌باشد:
- استفاده از کلاس‌های استاندارد LADM و اعمال تغییرات مرتبط با ایران.
- توسعه مدل UML و استخراج کلاس‌های مورد نیاز.
- تعیین و توسعه کد لیست‌ها و ویژگی‌های مرتبط با نیازهای ایران.
- معرفی ساختار اثربری از کلاس‌های اصلی LADM و تعیین چندگانگی‌ها.

مرحله سوم: آزمایش و ارزیابی

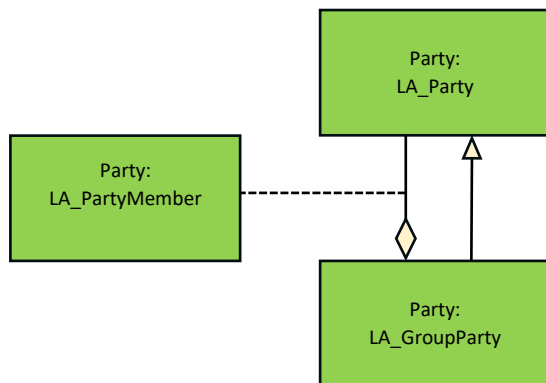
- تهیه نمونه اولیه و بررسی قابلیت اجرا در سیستم‌های اطلاعات مکانی.
- برگزاری جلسات با ذی‌نفعان جهت ارزیابی عملکرد مدل.
- بررسی انطباق مدل با استانداردهای LADM.
- برای دستیابی به این روش تحقیق، دستاوردهای مربوط به سایر پروفایل‌های کشوری مورد بررسی و تحلیل قرار گرفتند. کشورهای مختلفی از جمله استرالیا، هلند، اندونزی، جمهوری چک و لهستان تجارب ارزشمندی در توسعه پروفایل LADM ارائه داده‌اند [۵۰]. مطالعه این تجربیات منجر به تدوین مجموعه‌ای از بهترین شیوه‌ها شده است که می‌تواند در طراحی پروفایل کشور ایران مورد استفاده قرار گیرد (شکل ۱).
- مرحله اول روش تحقیق به عنوان پیش‌زمینه‌ای برای طراحی و توسعه مدل داده نقشی کلیدی در این پژوهش ایفا می‌کند. در بخش اول این مرحله با تمرکز بر قانون جامع حدنگار و مطالعه‌ی "برنامه ریزی عملیاتی در راستای اجرای قانون جامع حدنگار" که توسط دانشگاه تهران برای سازمان ثبت اسناد و املاک کشور تهیه شده، ذی‌نفعان کلیدی شناسایی



شکل ۱: فرآیند رسیدن به روش‌شناسی مورد استفاده [۵۰]

Fig. 1: The process of reaching the methodology used [50]

همچنین، کلاس‌ها می‌توانند ارتباطاتی با سایر کلاس‌ها به صورت مستقیم یا ارث‌بری داشته باشند که روابط بین داده‌ها را مشخص می‌کند [۲]. از کلاس‌های اصلی بسته Party، می‌توان کلاس LA_Party برای ثبت اشخاص حقیقی و حقوقی در سیستم کاداستر، کلاس LA_GroupParty برای ذی‌نفعانی که به صورت گروهی دارای حق و حقوقی بوده و کلاس LA_PartyMember برای مشخص کردن نوع ارتباط بین اعضای گروه‌های مالکیتی، نام برد (شکل ۴).



شکل ۴: کلاس‌های بسته Party [۲]
Fig. 4: Classes of Party Package [2]

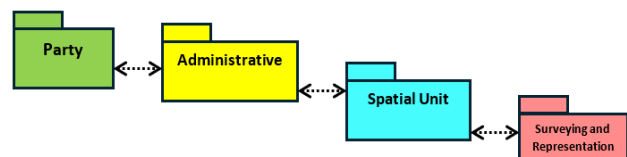
در بسته Administrative، کلاس LA_BAUnit معرف یک واحد مدیریتی پایه است که ممکن است شامل یک یا چند واحد مکانی مانند یک قطعه زمین یا یک واحد از یک آپارتمان باشد. هر حقوق مالکیتی ثبت‌شده باید در قالب یک واحد اداری پایه ثبت شود (شکل ۵). کلاس LA_RRR شامل سه زیر کلاس LA_Right، LA_Restriction و LA_Responsibility می‌باشد که به ترتیب حقوق، محدودیت‌ها و مسئولیت‌ها را مدیریت می‌کنند.

در بسته Spatial Unit، کلاس LA_SpatialUnit برای نمایش واحدهای مکانی مختلف مانند قطعات زمین، آپارتمان‌ها و غیره، کلاس LA_SpatialUnitGroup برای نمایش گروهی از واحدهای مکانی مرتبط، کلاس LA_LegalSpaceBuildingUnit برای نمایش فضای قانونی ساختمان‌ها و LA_LegalSpaceUtilityNetwork برای نمایش فضای قانونی شبکه‌های تاسیساتی به کار می‌رود (شکل ۶).

در بسته Surveying and Representation Package که به نوعی یک زیربسته از Spatial Unit می‌باشد، کلاس LA_Point برای ذخیره نقاطی مانند نقاط کنترل، نقاط برداشتی و نقاط مبنا در سیستم نقشه‌برداری می‌باشد، کلاس LA_SpatialSource منابع مختلف داده‌های مکانی را مدیریت می‌کند، کلاس LA_BoundaryFaceString نمایش مرزهای دو بعدی واحدهای مکانی را بر عهده دارد و کلاس LA_BoundaryFace برای پشتیبانی از نمایش سطوح سه‌بعدی طراحی شده است (شکل ۷).

بسته LADM

بسته‌ها در مدل‌سازی داده‌ها به مجموعه‌ای از کلاس‌های مرتبط گفته می‌شود که یک موضوع یا عملکرد خاص را در سیستم پوشش می‌دهند. در LADM، بسته‌ها برای سازماندهی داده‌های مرتبط با کاداستر و مدیریت زمین استفاده می‌شوند. هر بسته شامل مجموعه‌ای از کلاس‌ها است که اطلاعات مشخصی را درباره زمین، مالکیت، افراد مرتبط، روش‌های نقشه‌برداری و غیره ذخیره می‌کنند. مدل LADM شامل چهار بسته اصلی می‌باشد که برای کشور ایران نیز همین ساختار حفظ شده است (شکل ۳).

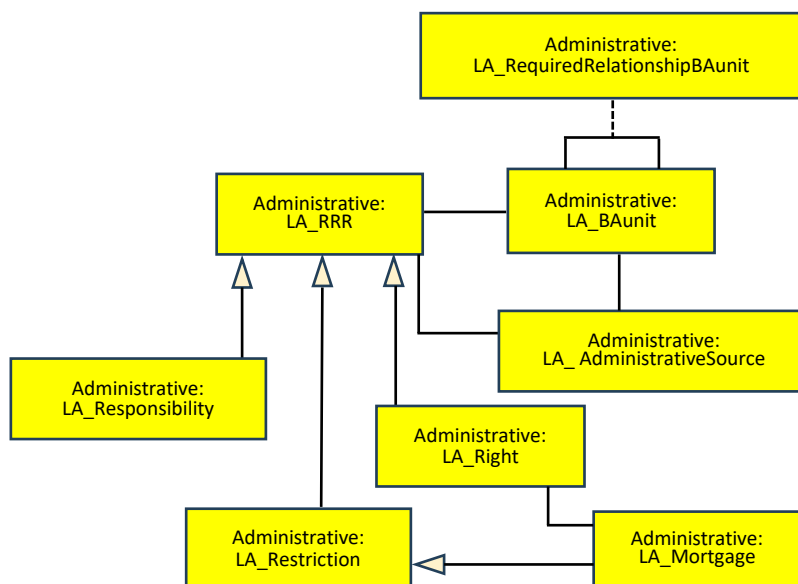


شکل ۳: بسته‌ها و زیربسته‌های اصلی LADM [۲]
Fig. 3: Packages and subpackages of the LADM [2]

بسته ذی‌نفعان (Party Package)، اطلاعات مربوط به اشخاص حقیقی و حقوقی مانند مالکان، بهره‌برداران، نقشه‌برداران، سازمان‌های متولی دولتی و خصوصی را مدیریت می‌کند که نقش مهمی در تعیین حقوق و وظایف اشخاص در فرآیندهای کاداستر دارد. بسته مدیریتی (Administrative Package)، اطلاعات مرتبط با حقوق، محدودیت‌ها و مسئولیت‌های مربوط به زمین است. حقوقی مانند مالکیت خصوصی، دولتی و غیره و محدودیت‌هایی همچون ارتفاع، اجازه ساخت و غیره و همچنین مسئولیت‌هایی مانند پرداخت مالیات زمین و نگهداری از بنا نیز در کلاس‌های این بسته تعریف می‌شوند. بسته واحد مکانی (Spatial Unit Package)، اطلاعات مکانی واحدهایی مانند قطعات زمین، آپارتمان‌ها و شبکه‌های تاسیساتی می‌باشد. برای ثبت دقیق اطلاعات مکانی کاداستر، می‌توان با استفاده از کلاس‌های این بسته و از طریق ترکیب داده‌های دو بعدی و سه‌بعدی، نمایش و ذخیره‌سازی این اطلاعات را مسیر نمود. بسته نقشه‌برداری و ارائه (Surveying and Representation Package)، به عنوان یک زیر بسته از واحد مکانی تعریف می‌شود که داده‌های نقشه‌برداری، از جمله نقاط کنترل و تصاویر هوایی، را مدیریت می‌کند.

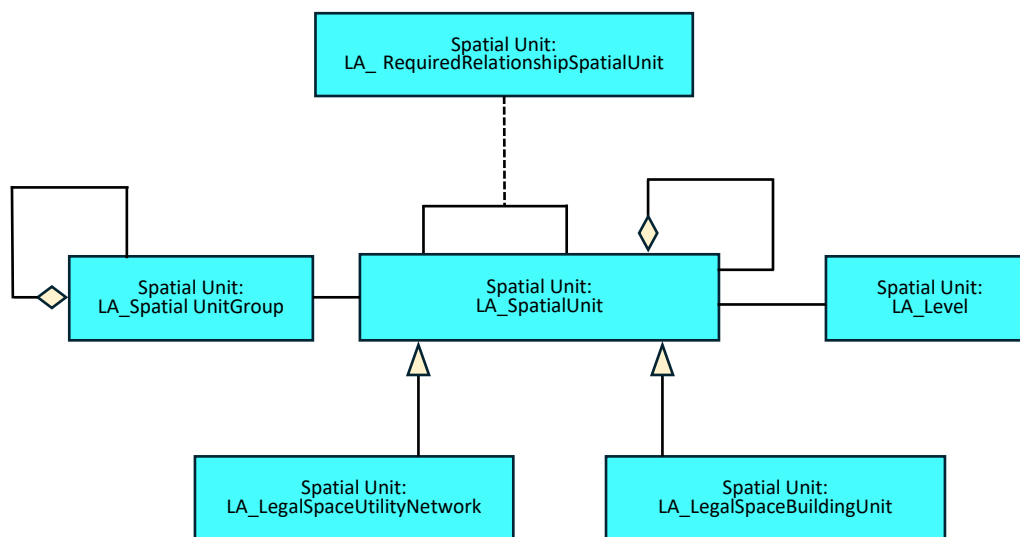
کلاس‌های LADM

کلاس نشان‌دهنده یک موجودیت در مدل داده است. هر کلاس ویژگی‌هایی دارد که اطلاعات مربوط به آن موجودیت را نگهداری می‌کنند و قالب هر یک از این ویژگی‌ها از پیش تعیین شده است.



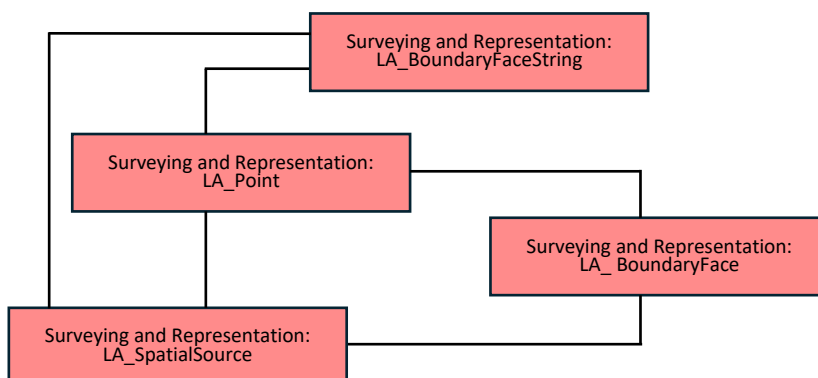
شکل ۵: کلاس های بسته Administrative [۲]

Fig. 5: Classes of Administrative Package [2]



شکل ۶: کلاس های بسته Spatial Unit [۲]

Fig. 6: Classes of Spatial Unit Package [2]



شکل ۷: کلاس های زیر بسته Surveying and Representation Package [۲]

Fig. 7: Classes of Surveying and Representation Subpackage [2]

کد لیست LADM

به کار رفته در سیستم ثبت و کاداستر ایران بررسی و مطابقت داده می‌شود. در این بخش کلاس‌های موجود در LADM همراه با ویژگی‌هایشان برای پروفایل ایران مورد استفاده قرار می‌گیرند. برای مثال، در استاندارد LADM، کلاس‌های LA_Party و LA_BAunit وجود دارند که با عناصر مشابه در سیستم کاداستر ایران تطبیق داده می‌شوند و مانند شکل ۹ تحت عنوان IR_Party (شکل ۹-الف) و IR_BAunit (شکل ۹-ب) به پروفایل کشور ایران اضافه می‌شوند.

ایجاد کلاس‌های جدید

در این مرحله با هدف توسعه مدل، کلاس‌های جدیدی در مدل ایجاد می‌شوند. این کار زمانی ضروری است که برای مدیریت سیستم کاداستر کشور ایران نیاز به عناصر خاصی باشد تا به صورت مستقیم در مدل LADM در نظر گرفته نشده باشند. برای نمونه با توجه به اینکه در سیستم حقوق ثبتی ایران، عرصه و اعیان مانند اراضی وقفی به عنوان دو مقوله مجزا مطرح و به طور جداگانه ثبت می‌شوند [۵۳]، هر یک می‌تواند مالکیت و نحوه ثبت و مدیریت مستقلی داشته باشد. در نتیجه برای هر کدام، یک زیرکلاس با رابطه ارث‌بری از کلاس اصلی IR_SpatialUnit در نظر گرفته می‌شود. کلاس IR_Parcel برای مدیریت عرصه (شکل ۱۰-ب) و کلاس IR_LandImprovement برای مدیریت اعیان در ادامه نمایش داده شده است (شکل ۱۰-ب). همچنین در کاداستر کشور ایران مسائلی مانند نوع کاداستر، نوع ملک و کاربری مطرح است که برای رفع این نیازها کلاس جدیدی تحت عنوان IR_CadastreUnit تحت عنوان یک زیر کلاس از کلاس IR_SpatialUnit طراحی و توسعه داده شده است (شکل ۱۰-ج).

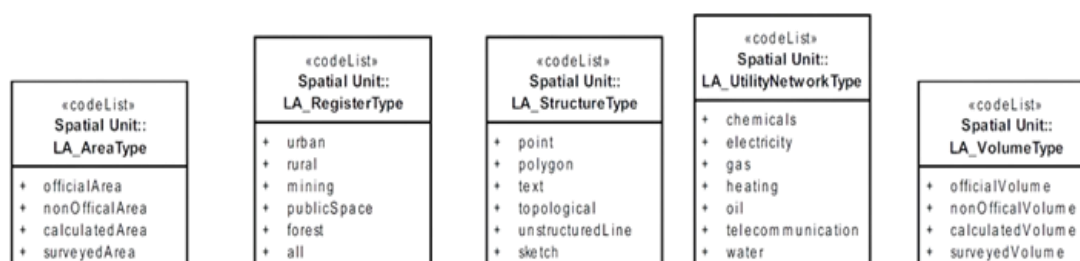
کد لیست‌ها مجموعه‌ای از مقادیر از پیش تعریف‌شده برای یک ویژگی خاص هستند. این مقادیر معمولاً برای استانداردسازی داده‌ها و کاهش خطا در ورودی اطلاعات استفاده می‌شوند (شکل ۸). کد لیست‌ها مجموعه مقادیر از پیش تعیین‌شده برای استانداردسازی داده‌ها و کاهش خطا هستند [۲]. برای نمونه، کد لیست LA_PartyRoleType نقش‌هایی مانند نقشه‌بردار، بانک و مشاورین املاک، LA_RightType حقوق از پیش تعریف شده‌ای مانند حق آب، حق انتفاع و حق چرا، LA_BuildingUnitType نوع واحد ساختمانی مانند اختصاصی و اشتراکی و LA_PointType نوع نقطه ثبت شده مانند نقطه کنترل، نقطه دارای اعتبار و نقطه بدون اعتبار را تعریف می‌کند (شکل ۸). در ایران، این کد لیست‌ها می‌توانند ثبت اطلاعات کاداستر را یکپارچه کرده و خطاها را کاهش دهند. شکل ۸ نمونه‌هایی از کد لیست‌های LADM را نشان می‌دهد.

طراحی و توسعه مدل

برای رسیدن به یک پروفایل LADM جامع برای کشور ایران پس از مطالعه و تحقیق بر روی سیستم ثبت و کاداستر ایران [۵۲] و مصاحبه با کارشناسان مربوطه و جمع‌آوری اطلاعات لازم، مراحل زیر باید طی شوند.

نگاشت بین کلاس‌ها

هدف از این مرحله تطبیق کلاس‌های LADM با سیستم فعلی کاداستر کشور ایران می‌باشد. بدین صورت که عناصر موجود در LADM با عناصر



شکل ۸: تعدادی از کد لیست‌های LADM [۲]

Fig. 8: A Selection of LADM Code Lists [2]

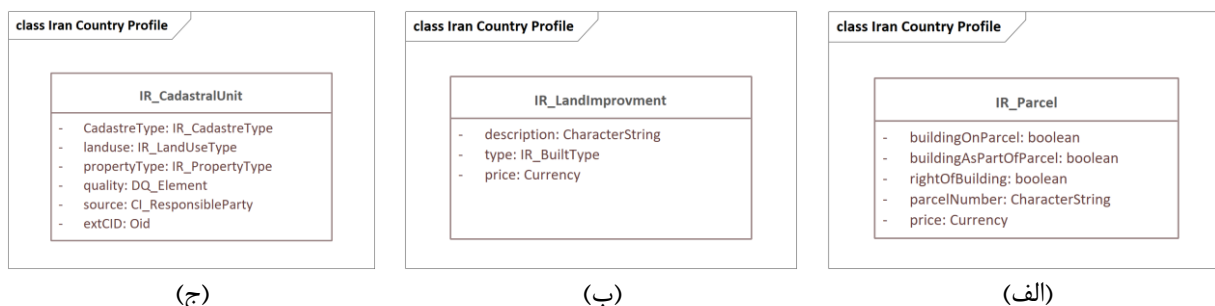


(ب)

(الف)

شکل ۹: نمونه‌هایی از کلاس‌های نگاشت شده بین استاندارد LADM و پروفایل کشوری ایران

Fig. 9: Examples of mapped Classes Between the LADM Standard and the Iran Country Profile



شکل ۱۰: کلاس‌های ایجاد شده برای پروفایل کشوری ایران
Fig. 10: Classes Created for the Iran Country Profile

ایجاد ویژگی‌های جدید

قانون جامع حدنگار" و همچنین بررسی مطالعات انجام شده در حوزه قوانین وضع شده گردآوری شدند. برای مثال، در کلاس ذی‌نفعان (IR_Party)، ویژگی PartyRoleType (شکل ۱۲-الف) مشخص‌کننده‌ی نقشی است که یک شخص حقیقی یا حقوقی در سیستم کاداستر ایران ایفا می‌کند [۵۵]. همچنین در کلاس حقوق (IR_Right)، ویژگی RightType (شکل ۱۲-ب) نشان‌دهنده‌ی نوع حقی است که در سیستم کاداستر ایران تعریف شده است و یا در کلاس محدودیت (IR_Restriction)، ویژگی RestrictionType (شکل ۱۲-ج) نشان‌دهنده انواع محدودیت‌هایی می‌باشد که به‌صورت دائمی یا در مدت زمانی مشخص برای یک ملک برقرار است، مانند قانون اجاره به شرط تملیک که بیانگر نوع محدودیت حقوقی اعمال شده بر روی ملک تا مدت زمان از پیش تعیین شده می‌باشد [۵۶]. این ویژگی‌ها باید با استفاده از کد لیست‌های از پیش تعریف‌شده تکمیل شوند.

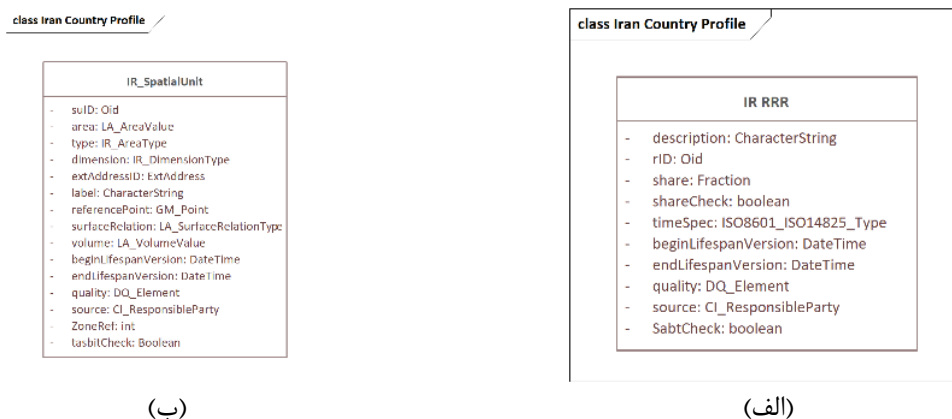
تعیین چندگانگی روابط

تعیین چندگانگی (Cardinality) در پروفایل کشوری LADM مشخص می‌کند که چند نمونه از یک کلاس می‌توانند به چند نمونه از کلاس دیگر مرتبط شوند. برای مثال، در کشور ایران یک مالک می‌تواند چندین قطعه زمین داشته باشد و از سمتی یک واحد مکانی می‌تواند متعلق به چند مالک باشد.

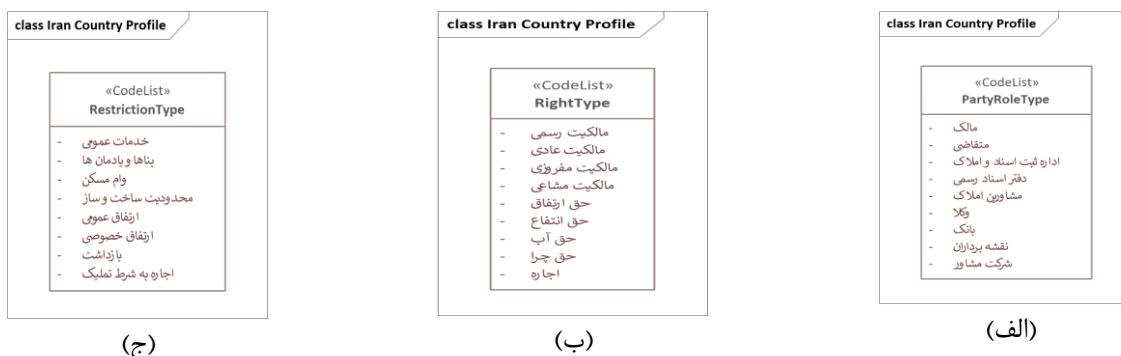
در این مرحله اگر در سیستم ثبت و کاداستر کشور ایران نیاز به ثبت اطلاعات خاصی وجود داشته باشد که در کلاس‌های LADM در نظر گرفته نشده باشند، ویژگی‌های جدید در قالب کلاس‌های تعیین شده مربوطه به مدل اضافه می‌شوند. برای مثال، در سیستم ثبت کشور ایران، هر حق و هر ملک می‌تواند در یکی از دو حالت تثبیت یا عدم تثبیت قرار داشته باشد [۵۴]. بر همین اساس، ویژگی SabtCheck برای حقوق در کلاس IR_RRR (شکل ۱۱-الف) و ویژگی TasbitCheck (شکل ۱۱-ب) برای ملک در کلاس IR_SpatialUnit تعریف می‌شوند. این دو ویژگی که به‌صورت Boolean مدل‌سازی شده‌اند، وضعیت تثبیت یا عدم تثبیت را در سیستم کاداستر کشور ایران مشخص می‌کنند.

ایجاد کد لیست‌های جدید

به منظور تعریف مقادیر از پیش تعیین شده برای برخی از ویژگی‌های مورد استفاده در مدل، کد لیست‌ها مجدداً تعریف شده‌اند که با تعریف مقادیر مجاز موجود در سیستم کاداستر کشور ایران برای یک ویژگی، باعث یکپارچگی داده‌ها و جلوگیری از خطاهای احتمالی می‌شوند (شکل ۱۳). برای این مرحله کد لیست‌های ایجاد شده از طریق مصاحبه با کارشناسان اداره ثبت اسناد و املاک، مطالعه تحقیقات صورت گرفته زیر نظر اداره کاداستر نظیر "برنامه ریزی عملیاتی در راستای اجرای



شکل ۱۱: نمونه‌هایی از ویژگی‌های ایجاد شده برای پروفایل کشوری ایران
Fig. 11: Examples of attributes Created for the Iran Country Profile



شکل ۱۲: نمونه‌هایی از کد لیست‌های ایجاد شده برای پروفایل کشوری ایران
Fig. 12: Examples of code Lists Created for the Iran Country Profile

تهیه UML پروفایل کشوری

LA_GroupParty, LA_Restriction, LA_Mortgage, LA_SpatialUnitGroup, LA_Level, LA_SpatialSource, LA_Point و LA_BoundaryFaceString را شامل می‌شود. سطح ۳ (پیشرفته)، کلاس‌های پیچیده‌تر مانند LA_Responsibility, LA_LegalSpaceBuildingUnit و LA_LegalSpaceUtilityNetwork و LA_BoundaryFace را ارزیابی می‌کند.

نتایج تست انطباق نشان می‌دهد که پروفایل کشوری LADM ایران با سطح ۲ از استاندارد بین‌المللی ISO 19152 کاملاً منطبق است. اما برخی کلاس‌های سطح ۳ هنوز به‌طور کامل پیاده‌سازی نشده‌اند (شکل ۱۵). این نشان می‌دهد که پروفایل الزامات اساسی و متداول مدیریت زمین را پوشش می‌دهد، در حالی که قابلیت‌های پیشرفته‌تر قابل توسعه‌اند. تست انطباق انجام شده به عنوان روش اول ارزیابی، پایه‌ای مطمئن برای توسعه بیشتر پروفایل کشوری LADM ایران و حرکت به سمت پیاده‌سازی کامل سطح ۳ فراهم می‌آورد.

در ارزیابی پروفایل کشوری LADM، استفاده از نظرات کارشناسان به عنوان یک روش کارآمد برای تعیین انطباق مدل با سیستم کشور مورد نظر ضروری بوده و انطباق مدل با قوانین، شرایط و نیازهای محلی یکی از مهم‌ترین معیار صحت آن می‌باشد. می‌توان گفت که یک مدل داده ممکن است از نظر فنی صحیح باشد، اما اگر با الزامات قانونی کشور انطباق نداشته باشد، نمی‌تواند به درستی عمل کند. استفاده از نظرسنجی و پرسشنامه از کارشناسان مختلف در حوزه‌های مرتبط با LADM، مانند حقوقدانان، متخصصین کاداستر و نقشه‌برداری می‌تواند به درک بهتر چالش‌ها و مزایای پیاده‌سازی این مدل در سطح کشوری کمک کند. کارشناسان می‌توانند دیدگاه‌های متنوع و متخصصانه‌ای را در مورد انطباق‌پذیری مدل با شرایط کشور ارائه دهند و به شناسایی نقاط قوت و ضعف آن کمک کنند. این روش همچنین به ارزیابی کیفی عملکرد مدل در زمینه‌های مختلف مانند ثبت املاک و مدیریت حقوق مالکیت کمک کرده و در جهت بهبود مدل راهکار ارائه می‌کند.

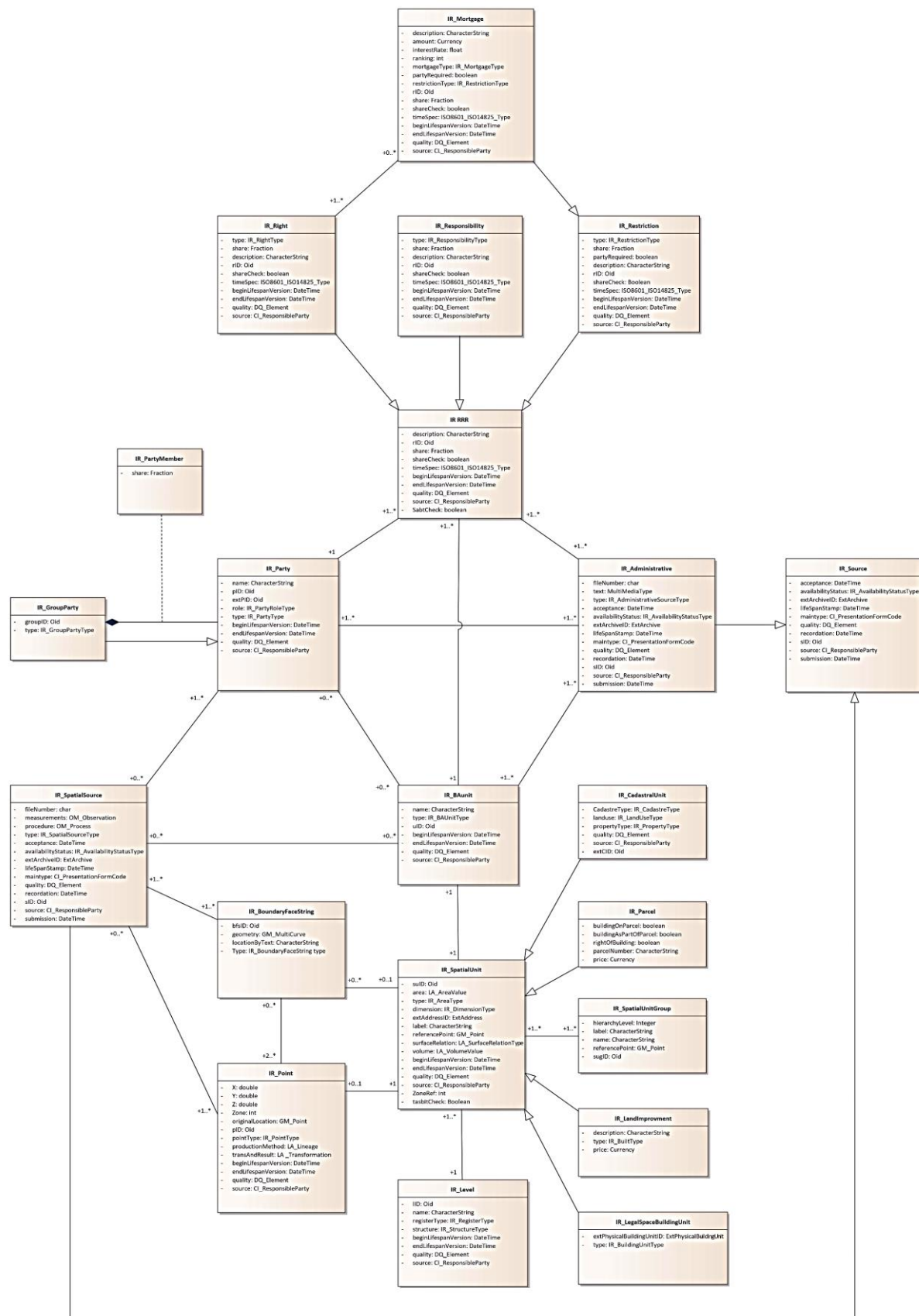
با بررسی نظرسنجی صورت گرفته که پاسخ دهندگان شامل دانشجویان دکتری از دانشگاه‌های خواجه نصیرالدین طوسی و تهران و کارشناسان و متخصصان اجرایی حوزه کاداستر در سطح کشور بودند، نتایج ارزشمندی در راستای ارزیابی انطباق پروفایل کشوری حاصل شد.

مدل UML پروفایل کشوری با ترکیب کلاس‌های استاندارد و جدید و تعیین ویژگی‌ها، روابط و چندگانگی آن‌ها در نرم‌افزار Enterprise Architect طراحی می‌شود (شکل ۱۳). این مدل چارچوبی مفهومی برای پیاده‌سازی کاداستر سه‌بعدی در ایران ارائه می‌دهد.

ارزیابی مدل

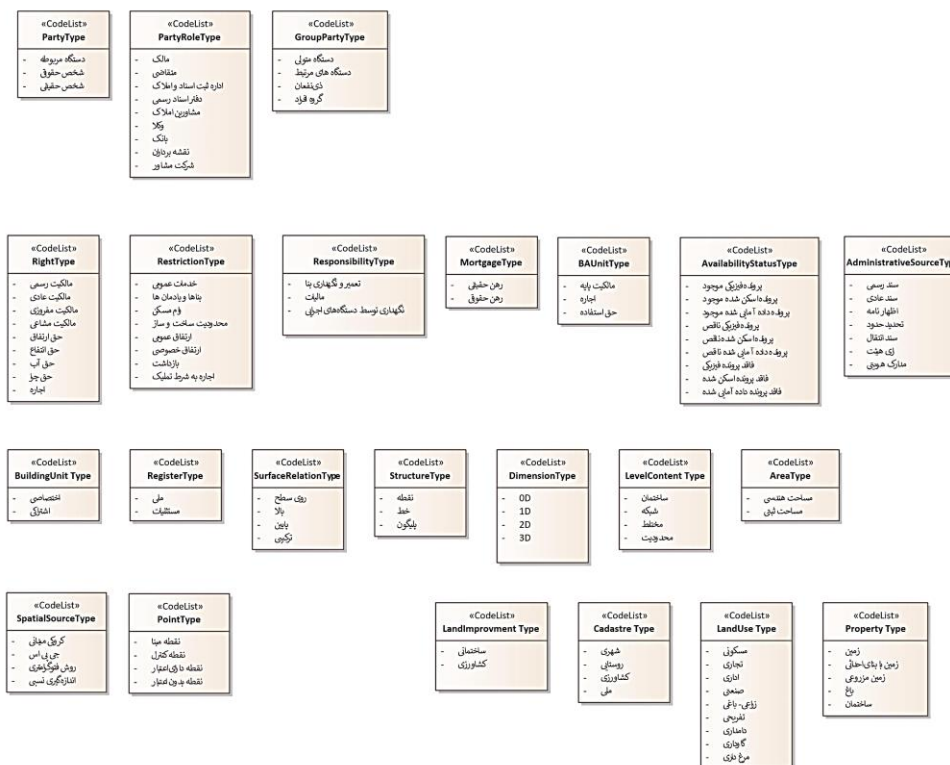
در این بخش، ارزیابی پروفایل با دو روش مستقل از هم انجام شد. روش اول میزان انطباق پروفایل کشوری ایران با مدل LADM که میزان انطباق پروفایل با مدل LADM را در سه سطح بررسی می‌کند. روش دوم به منظور اعتبارسنجی کیفی مدل، با نظرسنجی از کارشناسان این حوزه از طریق پرسشنامه، میزان انطباق این مدل با نیازهای کشور و قابلیت پیاده‌سازی آن را تحلیل می‌کند. ارزیابی انطباق مدل توسعه‌یافته با استاندارد مرجع، یکی از مهم‌ترین مراحل در فرآیند توسعه و پیاده‌سازی استانداردهای بین‌المللی در سطح ملی به شمار می‌رود. توسعه پروفایل کشوری LADM برای ایران نیز مستلزم ارزیابی دقیق انطباق آن با استاندارد اصلی است تا اطمینان حاصل شود که ضمن پاسخگویی به نیازهای ملی، همچنان با ساختار بین‌المللی سازگار است. در این پژوهش، ارزیابی انطباق پروفایل کشوری LADM ایران به عنوان اولین روش ارزیابی، با استفاده از مجموعه آزمون‌های انتزاعی تعریف شده در پیوست A استاندارد ISO 19152 انجام می‌شود که شامل سه سطح انطباق است [۲]. این ارزیابی امکان تحلیل تدریجی پروفایل و تعیین مسیر توسعه آینده آن را فراهم می‌سازد.

روش‌شناسی تست انطباق بر اساس روش‌شناسی مشخص شده در استاندارد ISO 19105 بر بررسی ساختار طرحواره کاربردی (Application Schema) تمرکز دارد شامل تحلیل ساختار وراثت، نگاشت عناصر، و مقایسه ویژگی‌ها و روابط کلاس‌های استاندارد LADM با پروفایل متناظر است [۲]. این تست در سه سطح انجام می‌شود: سطح ۱ (پایه)، کلاس‌های اصلی مانند LA_Party, LA_Right, LA_BAUnit, LA_AdministrativeSource, LA_SpatialUnit و VersionedObject را بررسی می‌کند. سطح ۲ (متوسط)، کلاس‌های رایج مانند



شکل ۱۳: پروفایل کشوری ایران

Fig. 13: Iran Country Profile



شکل ۱۴: کد لیست های تعریف شده برای پروفایل کشوری ایران

Fig. 14: Code Lists Defined for the Iran Country Profile

LADM package	LADM class	CI ^a	Dependencies
-	VersionedObject	☒	1
	LA_Source	☒	1
			Old, (as a minimum one of the specializations must be implemented [LA_AdministrativeSource or LA_SpatialSource]), LA_AvailabilityStatusType
Party Package			Exist only if Administrative Package is implemented
	LA_Party	☒	1
	LA_GroupParty	☒	2
	LA_PartyMember	☒	2
Administrative Package			Exist only if Party Package is implemented
	LA_RRR	☒	1
	LA_Right	☒	1
	LA_Restriction	☒	2
	LA_Responsibility	☒	3
	LA_BAUnit	☒	1
	LA_Mortgage	☒	2
	LA_AdministrativeSource	☒	1
	LA_RequiredRelationshipBAUnit	☒	3
Spatial Unit Package			
	LA_SpatialUnit	☒	1
	LA_SpatialUnitGroup	☒	2
	LA_LegalSpaceBuildingUnit	☒	3
	LA_LegalSpaceUtilityNetwork	☒	3
	LA_Level	☒	2
	LA_RequiredRelationshipSpatialUnit	☒	3
Surveying and Representation Subpackage			
	LA_Point	☒	2
	LA_SpatialSource	☒	2
	LA_BoundaryFaceString	☒	2
	LA_BoundaryFace	☒	3

^a CI = Conformance level.

شکل ۱۵: نتایج تست انطباق

Fig. 15: Conformance Test Results

گردد. این اقدامات می‌تواند مدیریت زمین در ایران را شفاف‌تر، کارآمدتر و پایدارتر کند.

مشارکت نویسندگان

میزان مشارکت نویسندگان در نگارش مقاله برابر می‌باشد.

تقدیر و تشکر

با تشکر از خانم دکتر فاطمه رضایی و سرکار خانم زینب نیسانی سامانی که راهنمایی‌هایشان باعث نگارش هرچه بهتر متن این پژوهش شد و همه عزیزی که برای تکمیل پرسشنامه بخش ارزیابی مساعدت نمودند.

تعارض منافع

«هیچگونه تعارض منافع توسط نویسندگان بیان نشده است.»

منابع و مأخذ

[1] Kalogianni E, Kalantari M, Dimopoulou E, Oosterom PV. LADM country profiles development: aspects to be reflected and considered. In Oosterom PV, Lemmen C, Rahman AA, editors, Proceedings of the 8th Land Administration Domain Model Workshop (LADM 2019). International Federation of Surveyors (FIG). 2019. p. 287-302.

[2] International Organization for Standardization (ISO). ISO 19152:2012 – Geographic information – Land Administration Domain Model (LADM). Geneva: ISO; 2012.

[3] Lemmen C, Van Oosterom P, Bennett R. The Land Administration Domain Model. Land Use Policy 2015;49:535–45. <https://doi.org/10.1016/j.landusepol.2015.01.014>.

[4] Paixao S, Hespanha JP, Ghawana T, Carneiro AFT, Zevenbergen J, Frederico LN. Modeling indigenous tribes' land rights with ISO 19152 LADM: A case from Brazil. Land Use Policy 2015;49:587–97. <https://doi.org/10.1016/j.landusepol.2014.12.001>.

[5] Govedarica M, Radulovic A, Sladic D, Popovic D, editors. LADM—experiences and challenges in implementation. The 7th Land Administration Domain Model Workshop, Zagreb, Croatia; 2018.

[6] Hesari NT, Azari H, Saber M. The Effect of Iranian Land Administration System in Transactions Real Properties' Security: In the Light of Public Confidence Theory. International Journal of Academic Research in Economics and Management Sciences. 2016;5(4). <http://dx.doi.org/10.6007/IJAREMS/v5-i4/2424>

[7] Tabatabai Hesari N. Basis and effects of the land registry system. Enteshar company publishing, Tehran; 2014. ISBN: 978-964-325-358-5

[8] Mekking S, Kougblenou DV, Kossou FG. Fit-For-Purpose Upscaling Land Administration—A Case Study from Benin. Land. 2021;10(5):440. <https://doi.org/10.3390/land10050440>

با توجه به نتایج به‌دست آمده، در حال حاضر کشور ایران فاقد یک مدل داده استاندارد برای مدیریت کاداستر بوده و پروفایل طراحی شده از آنجایی که سازگاری "تقریباً کاملی" با نیازهای سیستم کاداستر کشور داشته و با قانون جامع حدنگار تا حد زیادی تطابق دارد، کارشناسان امکان پیاده‌سازی این مدل در سیستم فعلی کاداستر ایران را، "زیاد" ارزیابی کردند. در بخش ارزیابی فنی این پروفایل، کارشناسان بر این نظر واقف بودند که هر چهار بسته استاندارد LADM به درستی در این پروفایل پوشش داده شده اند و تغییرات اعمال شده در این مدل را تا حد زیادی برطرف کننده نیازهای خاص کشور ایران دانستند. در ادامه این بخش از ارزیابی، کارشناسان پروفایل طراحی شده را دارای پتانسیل از جهت انعطاف‌پذیری برای تغییرات آینده در کاداستر ایران و امکان مدیریت حقوق مالکیت و داده‌های کاداستر سه‌بعدی و همچنین بهبود دهنده اجرای کاداستر در کشور دانستند. همچنین در راستای گام‌های بعدی در جهت نیل به کاداستر سه‌بعدی که طبق نظر کارشناسان از ضروریات اجرای کاداستر در کشور می‌باشد، باید از فناوری‌های جدید از جمله مدل‌سازی اطلاعات ساختمان (BIM) برای بالا بردن دقت داده‌های ورودی بهره برد.

علاوه بر نقاط قوت حاصل شده از ارزیابی، پیشنهادها و چالش‌هایی در زمینه اجرای پروفایل کشوری LADM نظیر مشخص نبودن الزامات یک مدل داده استاندارد توسط سازمان ثبت اسناد و املاک کشور به صورت رسمی، نبود زیرساخت‌های مناسب، ناهم‌آهنگی بین سازمان‌های مرتبط، عدم تخصیص بودجه مناسب و همچنین نبود متخصص کافی در این زمینه، از سمت پاسخ‌دهندگان مطرح شد.

نتیجه‌گیری

این پژوهش با هدف توسعه و تدوین یک پروفایل کشوری از استاندارد بین‌المللی LADM برای ایران انجام شد. بررسی ساختارهای حقوقی و اجرایی کشور و تحلیل تجربه‌های موفق سایر کشورها، به همراه مصاحبه با متخصصان داخلی، زمینه‌ساز طراحی مدلی پیشنهادی برای تطبیق این استاندارد با نیازهای خاص کشور ایران گردید. یافته‌ها نشان می‌دهد که استفاده از LADM می‌تواند نقش موثری در حل چالش‌های فعلی سیستم کاداستر کشور از جمله پراکندگی داده‌ها، نبود تعامل کامل بین سامانه‌های موجود و عدم وجود زبان مشترک بین نهادهای اجرایی ایفا کند.

پروفایل پیشنهادی، با تأکید بر قابلیت انطباق با وضع فعلی کاداستر در کشور و همچنین در نظر گرفتن قابلیت ادغام با کاداستر سه‌بعدی و مدل اطلاعات ساختمان (BIM)، گامی رو به جلو در جهت ایجاد زیرساخت‌های نوین مدیریت زمین محسوب می‌شود. نتایج نظرسنجی از کارشناسان نیز نشان‌دهنده پذیرش بالای نمونه اولیه این مدل و کاربردی بودن آن در پاسخ به نیازهای فنی و اجرایی کشور است. برای پیاده‌سازی موفق، پیشنهاد می‌شود این پروفایل به‌صورت آزمایشی در پروژه‌های واقعی اجرا شود و موانع فنی، سازمانی و زیرساختی بررسی

- Arabia. Land Use Policy. 2021;104:105355. <https://doi.org/10.1016/j.landusepol.2021.105355>
- [21] Yan J, Jaw SW, Soon KH, Schrotter G. THE LADM-BASED 3D UNDERGROUND UTILITY MAPPING: CASE STUDY IN SINGAPORE. *Int Arch Photogramm Remote Sens Spatial Inf Sci.* 2019;XLII-4/W15:117-22. <https://doi.org/10.5194/isprs-archives-XLII-4-W15-117-2019>
- [22] Le PT, Zevenbergen JA, Lemmen C, Uitermark H, Tran QB. Investigating the conformity between the land administration domain model and the Vietnamese land administration system. *FIG Peer Review Journal.* 2012 May 6.
- [23] Vučić N, Roić M, Mađer M, Vranić S, Van Oosterom P. Overview of the Croatian Land Administration System and the Possibilities for Its Upgrade to 3D by Existing Data. *ISPRS International Journal of Geo-Information.* 2017;6(7):223. <https://doi.org/10.3390/ijgi6070223>
- [24] Elia E, Zevenbergen J, Lemmen C, Oosterom P. The Land Administration Domain Model (LADM) as The Reference Model for The Cyprus Land Information System (CLIS). *Survey Review.* 2023;45:100-10. <https://doi.org/10.1080/17522706.2013.12287491>
- [25] Janečka K, Souček P. A Country Profile of the Czech Republic Based on an LADM for the Development of a 3D Cadastre. *ISPRS International Journal of Geo-Information.* 2017;6(5):143. <https://doi.org/10.3390/ijgi6050143>
- [26] Poulaki M, Xagoraris N, Kalogianni E, Kyriakidis C, Kara A, Dimopoulou E, editors. Developing a LADM Part 5–Spatial Plan Information country profile for Greece. 12th International FIG Workshop on the Land Administration Domain Model & 3D Land Administration; 2024: International Federation of Surveyors (FIG).
- [27] Bydłosz J. The application of the Land Administration Domain Model in building a country profile for the Polish cadastre. *Land use policy.* 2015;49:598-605. <https://doi.org/10.1016/j.landusepol.2015.02.011>
- [28] Hespanha JP, Jardim M, Paasch J, Zevenbergen J. Modelling legal and administrative cadastral domain: Implementation in the Portuguese legal framework. *J Comp L.* 2009;4:140.
- [29] Govedarica M, Radulović A, Sladić D. Designing and implementing a LADM-based cadastral information system in Serbia, Montenegro and Republic of Srpska. *Land Use Policy.* 2021;109:105732. <https://doi.org/10.1016/j.landusepol.2021.105732>
- [30] Vandyshva N, Tikhonov V, Oosterom P, Stoter J, Ploeger H, Wouters R, et al. 3D Cadastre modelling in Russia. 2011.
- [31] Radulović A, Sladić D, Govedarica M. Serbian profile of the land administration domain model. *FIG Working Week, Surveying the world of tomorrow-From digitalisation to augmented reality, Helsinki.* 2017;8698:1-13.
- [32] Kara A, Kathmann R, van Oosterom PJ, Lemmen C, Işıkdağ Ü, editors. Towards the Netherlands LADM valuation [9] Adad MA, Semlali EH, El-Ayachi M, Ibannain F. Supporting land data integration and standardization through the LADM standard: Case of Morocco's country profile MA-LADM. *Land use policy.* 2020;97:104762. <https://doi.org/10.1016/j.landusepol.2020.104762>
- [10] Balas M, Murta J, Matlava L, Marques MR, Joaquim SP, Carrilho J, et al., editors. A fit-for-purpose Land Cadastre in Mozambique. 2017 World Bank Conference on Land and Poverty; 2017.
- [11] Oyetayo BS, Rahman A, Choon L, Idowu T, Abidoye A. Land administration domain model in review towards the adoption as a reference model for land administration system in Nigeria. *American journal of geographic information system.* 2017;6(5):178-86. <https://dx.doi.org/10.5923/j.ajgis.20170605.02>
- [12] Kebede S, Orlova N, Dekeyne C, editors. Ethiopian Land Administration Domain Model. 2018 World Bank Conference on Land and Poverty the World Bank-Washington DC; 2018.
- [13] Karamesouti M, Schultz C, Chipofya M, Jan S, Galeano C, Schwering A, et al. THE MAASAI OF SOUTHERN KENYA DOMAIN MODEL OF LAND USE. *ISPRS Annals of Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences.* 2018;IV-4:105-12. <https://doi.org/10.5194/isprs-annals-IV-4-105-2018>
- [14] Tjia D, Coetzee S. Application of the Land Administration Domain Model to the city of Johannesburg land information system. *South African journal of geomatics.* 2013;2(3):260-79.
- [15] Renzhong G, Shen Y, Lin L, Ping L, editors. A multi-jurisdiction case study of 3D cadastre in Shenzhen, China as experiment using the LADM. The 2nd International Workshop on 3D Cadastres Delft, The Netherlands; 2011.
- [16] Indrajit A, Jaya V, Loenen B, Lemmen C, Oosterom P, Ploeger H, et al. THE ROLE OF THE REVISED LAND ADMINISTRATION DOMAIN MODEL AND SPATIAL DATA INFRASTRUCTURE IN IMPROVING EASE OF DOING BUSINESS IN INDONESIA2020.
- [17] Kim S, Heo J. Development of 3D underground cadastral data model in Korea: Based on land administration domain model. *Land Use Policy.* 2017;60:123-38. <https://doi.org/10.1016/j.landusepol.2016.10.020>
- [18] Rajabifard A, Agunbiade M, Kalantari M, Yip K, Atazadeh B, Badiie F, et al. An LADM-based approach to developing and implementing national 3D cadastre: A case study of Malaysia;2018.
- [19] Munkhbaatar B, Kim M-G, Lee Y, Koh J-H. A Study on the Design of LADM-based Cadastral Data Model for Mongolia. *Journal of Cadastre & Land InformatiX [Internet].* 2018 Dec 10;48(2):51–64. <https://doi.org/10.22640/LXSIRI.2018.48.2.51>
- [20] Alattas A, Kalogianni E, Alzahrani T, Zlatanova S, Oosterom P. Mapping private, common, and exclusive common spaces in buildings from BIM/IFC to LADM. A case study from Saudi

[45] Khoshboresh Masuleh M, Sadeghian S. Investigation of LADM (ISO 19152) Components with Emphasis on Their Importance in 3D and 4D Cadastre During 2001–2017. In: 24th National Geomatics Conference; 2017.

[46] Mousavizad SM. Review of Comprehensive Cadastre Law in the Islamic Republic of Iran. International Journal of Nations Research. 2019;4(42):91-105. magiran.com/p2004917

[47] Mehrasa J, Hasani A, Moghadam MR. Position of new registration of single-page documents and calligraphy in validation of official documents and sale of real estate. Journal of Studies in Islamic Law & Jurisprudence. 2021;13(24):439-56. magiran.com/p2314116

[48] eftekharjahromi g, shojaee areni s. Convergence between Cadastre and Land registration in Iranian and French law. Administrative Law. 2021;9(28):9-34. magiran.com/p2360564

[49] Dargah BH. The concept of urban cadastre, its function and its effects. Journal of Modern Research on Administrative Law. 2020;2(3):229-53. magiran.com/p2172273

[50] Kalogianni E, Janečka K, Kalantari M, Dimopoulou E, Bydłoz J, Radulović A, et al. Methodology for the development of LADM country profiles. Land use policy. 2021;105:105380. <https://doi.org/10.1016/j.landusepol.2021.105380>

[51] Aien A. 3D Cadastral Data Modelling 2013.

[52] Mehrzad M. Cadastre: Including the Comprehensive Law of Cadastre and Its Executive By-law. 2nd ed. Tehran: Jungle Publications; 2016. Persian ISBN: 978-600-214-514-4.

[53] Goleij P, Mokhtarpour A. Investigation of Land and Building Ownership. In: 2nd National Conference on Architecture and Sustainable Urban Landscape; 2015 May; Iran.

[54] Ghaffari M, Madadi P. Legal system of property registration. Journal of Modern Jurisprudence and Law. 2021;1(4):184-98. <https://doi.org/10.22034/jaml.2021.242838>

[55] Sayyadi R. A legal view on the structure of documents and real estate registration. Ghanon Yar. 2020;4(15):953–969.

[56] Taghipourian A, Talebzadeh Pinkdar N. A legal analysis of the dimensions and effects of lease contracts with the condition of ownership transfer. In: 11th International & National Conference on Management Studies, Accounting & Law; 2024 Jul 26; Tehran, Iran.

information model country profile. FIG Working Week 2019: Geospatial Information for a Smarter Life and Environmental Resilience; 2019.

[33] Alkan M, Polat Z. Design and development of LADM-based infrastructure for Turkey. Survey review. 2017;49(356):370-85. <https://doi.org/10.1080/00396265.2016.1180777>

[34] Radulović A, Sladić D, Govedarica M, Raičević D. Using LADM and BIM for property and tourist taxation in the municipality of Bar, Montenegro. Land Use Policy. 2023;131:106715. <https://doi.org/10.1016/j.landusepol.2023.106715>

[35] Koers J, Espinal RC, Lemmen C, editors. SIGIT: an information system for integral approach of land management: an LADM implementation in Honduras and Guatemala. 5th Land Administration Domain Model Workshop 2013; 2013.

[36] Griffith-Charles C, Sutherland M, Lalloo S, editors. Extensions to the LADM trinidad and tobago toward a juridical, fiscal, and marine cadastre. Proceedings 7th International FIG workshop on the Land Administration Domain Model; 2018.

[37] Jenni L, Germann M, Eisenhut C, Bajo V, Guarín A. LADM Implementation in Colombia -Process, Methodology and Tools developed and applied; 2017.

[38] B. Andrade A, Carneiro AFT, Santos JC. LADM specification of relational database to the Republic of Cape Verde. Proceedings of the 5th Land Administration Domain Model Workshop. 2013:345-60.

[39] Karki S. 3D cadastre implementation issues in Australia: University of Southern Queensland; 2013.

[40] Kalantari M, Kalogianni E. Towards LADM Victoria country profile – modelling the spatial information. In Oosterom PV, Dubbeling D, editors, Proceedings of the 6th International FIG 3D Cadastre Workshop. Delft: International Federation of Surveyors (FIG). 2018. p. 483-498.

[41] Einali M, Asghar AA, and Atazadeh B. Developing a building information modelling approach for 3D urban land administration in Iran: a case study in the city of Tehran. Geocarto International. 2022;37(26):12669-88. <https://doi.org/10.1080/10106049.2022.2071471>

[42] Hosseini H, Taleai M. A Review of Recent Researches on Integration of Building Information Modeling (BIM) and GIS. 2021;13:33-58. <https://doi.org/10.52547/gisj.13.3.33>

[43] Emamgholian S, Taleai M, Shojaei D. A Novel Approach for 3D Modeling and Geovisualization of Easement Rights in Apartments. Journal of Geospatial Information Technology. 2018;6(3):163-75. <https://doi.org/10.29252/jgit.6.3.173>

[44] Zaheri N, Jashmideh Asl P, Ghaemi SM. Introducing the Land Administration Domain Model with Emphasis on the Role of Its Spatial Units. In: The 2nd National Conference on Geospatial Information Technology (NCGIT); 2017 Jan 18; Tehran, Iran. Tehran: K.N. Toosi University of Technology, Faculty of Geomatics Engineering; 2017.

معرفی نویسندگان

AUTHOR(S) BIOSKETCHES



عارف ضمیری ایشان دانشجوی کارشناسی ارشد رشته سیستم‌های اطلاعات مکانی دانشگاه خواجه نصیرالدین طوسی می‌باشند. ایشان مدرک کارشناسی خود را در سال ۱۴۰۲ از همین دانشگاه اخذ نمودند و حوزه فعالیت ایشان کاداستر می‌باشد. در حال

توسط ایشان مقالات متعددی در حوزه‌های مدیریت زمین و کاداستر سه‌بعدی در مجلات بین‌المللی معتبر به چاپ رسیده و در سال ۱۴۰۳ به عنوان یکی از چهره‌های نوظهور جهان در حوزه ژئوانفورماتیک توسط Geospatial World شناخته شدند. از فعالیت‌های کاری ایشان میتوان به عضویت در کمیته ملی استاندارد کشور استرالیا و همچنین همکاری در پروژه توسعه و پیاده‌سازی مدل داده مدیریت زمین برای ایالت ویکتوریا، استرالیا مرسوم به ePlan اشاره کرد.

Atazadeh, B. ARC DECRA Fellow in the Centre for Spatial Data Infrastructure and Land Administration, Department of Infrastructure Engineering, The University of Melbourne, Australia

✉ behnam.atazadeh@unimelb.edu.au



جلیل جعفری ایشان دانشجوی دکتری رشته سیستم‌های اطلاعات مکانی دانشگاه خواجه نصیرالدین طوسی می‌باشند و حوزه پژوهشی ایشان کاداستر سه‌بعدی می‌باشد. ایشان مدرک کارشناسی ارشد سیستم‌های اطلاعات مکانی خود را در سال ۱۳۹۰ از همین دانشگاه اخذ نمودند و همچنین دارای مدرک کارشناسی ارشد در رشته حقوق ثبتی می‌باشند. از فعالیت‌های کاری ایشان می‌توان به سابقه ۸ سال تدریس دانشگاهی در رشته نقشه برداری و همچنین ۱۲ سال فعالیت در حوزه کاداستر کشور نام برد. ایشان در حال حاضر رئیس اداره کاداستر اداره کل ثبت اسناد و املاک استان تهران می‌باشند.

Jafari, J. Ph. D Student in Department of Geospatial Information Systems, Faculty of Geodesy and Geomatics Engineering, K. N. Toosi University of Technology, Tehran, Iran

✉ j.jafarikntu@yahoo.com

حاضر مشغول پژوهش بر روی موضوع کاداستر سه‌بعدی برای ایران هستند.

Zamiri, 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

✉ aref_zamiri@email.kntu.ac.ir



علی اصغر آل شیخ ایشان استاد تمام گروه سیستم‌های اطلاعات مکانی دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی می‌باشند. ایشان دارای مدرک دکتری تخصصی در رشته مهندسی سیستم‌های اطلاعات مکانی (GIS) از دانشگاه کلگری کانادا در سال ۱۳۷۷

می‌باشند. همچنین جوایز و افتخارات متعددی برای مشارکت‌های 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.

Alesheikh, A. Full Professor at the Department of Geospatial Information Systems, Faculty of Geodesy and Geomatics Engineering, K. N. Toosi University of Technology, Tehran, Iran

✉ alesheikh@kntu.ac.ir



بهنام عطا زاده ایشان پژوهشگر مرکز تحقیقات زیرساخت داده مکانی و اداره زمین (CSDILA) دانشگاه ملیورن می‌باشند. ایشان دوره‌ی دکتری خود را در سال ۱۳۹۶ در همین دانشگاه به اتمام رساندند.

Citation (Vancouver): Zamiri A, Alesheikh A. A, Atazadeh B, Jafari J. [Advancing Cadastral Systems: Development of the Land Administration Domain Model (LADM) Country Profile for Iran]. *J. RS. GEOINF. RES.* 2025; 3(1): 171-186

 <https://doi.org/10.22061/jrsgr.2025.12048.1099>



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 Geo-AI Approach in the Post-Earthquake Rescue

N. Bahrami¹, M. Argany^{*1}, A.D. Boloorani¹, A.R. Vafaeinejad²

¹ Department of Remote Sensing and GIS, Faculty of Geography, Tehran University, Tehran, Iran

² Department of Surveying Engineering, Faculty of Civil, Water and Environmental Engineering, Shahid Beheshti University, Tehran, Iran

ABSTRACT

Received: 14 March 2025
Reviewed: 21 April 2025
Revised: 01 June 2025
Accepted: 10 June 2025

KEYWORDS:

Geo-AI
Natural Hazards
Artificial Intelligence
Post-Earthquake
Rescue

* Corresponding author

 argany@ut.ac.ir

☎ (+9821) 61113538

Background and Objectives: Earthquakes, among the most unpredictable and devastating natural disasters, result in significant human casualties and financial losses worldwide each year. Their sudden occurrence and destructive potential categorize them as critical crises that demand efficient and innovative management strategies. Contemporary crisis management practices emphasize three key phases: preparedness (before the event), response (during the event), and recovery (after the event). Among these, rescue operations, which are part of the response phase, play a vital role in saving lives and mitigating further damage. However, given the urgency and complexity of rescue efforts, enhancing their effectiveness through innovative methods is essential. This study introduces a novel approach that leverages spatial intelligence—specifically Geo-Artificial Intelligence (Geo-AI)—to optimize rescue operations in the aftermath of an earthquake.

Methods: This research proposes a Geo-AI-based framework to enhance rescue performance following an earthquake. The approach involves simulating a hypothetical earthquake scenario in Tehran using the Japan International Cooperation Agency (JICA) floating scenario model. A total of 48 rescuers are organized into six teams within the designated study area. These teams are tasked with conducting search and rescue missions facilitated by an augmented intelligent spatial information system. Unlike traditional or manually assigned rescue operations, the proposed model employs reinforcement learning—a subfield of artificial intelligence—to dynamically allocate resources and optimize operational decisions in real-time. The design incorporates a comprehensive set of variables known to influence post-earthquake rescue effectiveness, including team location, response time, victim survivability, and route accessibility. The aim is to minimize response times and maximize the number of successful rescues using spatially informed decision-making.

Findings: Due to the inherent unpredictability of earthquakes and the logistical constraints of studying rescue operations in real-world post-disaster settings, this research relies on simulation to replicate realistic conditions. The simulation environment provides detailed spatial and descriptive information regarding both the affected area and the status of rescue teams. Furthermore, it enables estimation of structural and human damage resulting from the hypothetical earthquake. Based on these simulated conditions, rescue operations are prioritized according to urgency and resource availability. All 48 rescuers are initially positioned at the nearest crisis management center and are subsequently deployed based on the optimized task allocation strategy generated by the Geo-AI model. The simulation results show that using the proposed model significantly improves the allocation efficiency of rescue teams.

Conclusion: The Geo-AI-driven rescue model presented in this study offers a promising new avenue for enhancing the quality and efficiency of post-earthquake search and rescue efforts. Simulation results demonstrate that variables such as survival time under rubble, task completion time, proximity of rescuers to affected sites, and travel speed are critical to the effectiveness of rescue missions. Implementation of the intelligent model led to a 2.642-fold improvement in task allocation efficiency compared to traditional methods. These findings highlight the transformative potential of integrating artificial intelligence and spatial data systems into disaster response frameworks.



NUMBER OF REFERENCES

31



NUMBER OF FIGURES

9



NUMBER OF TABLES

2

مقاله پژوهشی

راهکاری بر مبنای هوش مکانی برای نجات پس از زمین لرزه

ناهید بهرامی^۱، میثم ارگانی^{۱*}، علی درویشی بلورانی^۱، علیرضا وفایی نژاد^۲^۱ گروه سنجش از دور و سامانه اطلاعات جغرافیایی، دانشکده جغرافیا، دانشگاه تهران، تهران، ایران^۲ گروه مهندسی نقشه برداری، دانشکده مهندسی عمران، آب و محیط زیست، دانشگاه شهید بهشتی، تهران، ایران

چکیده

پیشینه و اهداف: همه ساله زلزله به عنوان یک بحران و یکی از بلایای طبیعی که تقریباً غیر قابل پیش بینی به شمار می رود، خسارات جبران ناپذیر جانی و مالی را متحمل بشریت می نماید. از این رو بهتر است راهکارهایی نوین بر اساس روشهای جدید علمی و تجربیات گذشته، ارائه و پیاده سازی شود. مدیریت این گونه بحران های مخاطرات و بلایای طبیعی به سه مرحله پیش از وقوع، هنگام وقوع و پس از وقوع آن تقسیم می شود. نجات، جزو مراحل پس از وقوع حادثه است که می توان با مطالعه و بررسی پیش از وقوع حادثه به ارائه راهکاری جهت بهبود عملکرد نجات در رخداد آن در پس از وقوع زمین لرزه رسید. در این مقاله سعی می شود راهکاری با استفاده از هوش مکانی (Geo-AI) برای نجات پس از زمین لرزه ارائه شود.

روش ها: در این پژوهش با بهره گیری از هوش مکانی (Geo-AI) و شبیه سازی زمین لرزه ای فرضی راهکاری جهت ارتقا و تقویت نجات در وقوع زمین لرزه پیشنهاد می شود. در این روش زمین لرزه ای فرضی با استفاده از سناریو شناور جایکا در تهران شبیه سازی شده است و در آن ۴۸ امداد رسان در قالب ۶ تیم نجات در محدوده مطالعاتی در نظر گرفته می شود. تیم های مذکور با استفاده از یک سیستم اطلاعات مکانی هوشمند تقویتی، به گونه ای به فعالیت های جستجو و نجات اختصاص می یابند که در زمان کمتری، نجات بیشتر و کارآمدتری نسبت به حالت تجربی انجام شود. در مدل هوش مکانی ارائه شده از بخش یادگیری تقویتی هوش مصنوعی بهره گرفته می شود و به کمک مدل ایجاد شده به ارتقای عملیات جستجو و نجات در طی استفاده از مدل پیشنهادی برای بعد از رخداد زمین لرزه دست می یابد. در این مدل با استفاده از طراحی تابعی از جمیع پارامترهای موثر در نجات پس از زمین لرزه، در هوش مکانی تقویتی به بهبود عملکرد نجات در زمان رخداد زمین لرزه پرداخته می شود.

یافته ها: با توجه به ماهیت فعالیت های گروه های نجات و عدم امکان قرارگیری محققان در شرایط واقعی پس از زمین لرزه، شبیه سازی رخداد آن به منظور فراهم نمودن اطلاعات مکانی و توصیفی منطقه انجام فعالیت انجام می شود. در این شبیه سازی تعیین فعالیت های مورد نیاز نجات و تهیه اطلاعات موقعیتی و توصیفی تیم های نجات مدنظر قرار گرفته است. همچنین شبیه سازی رخداد زمین لرزه برای بدست آوردن برآورد تقریبی خسارات سازه ای و انسانی در یک بخشی از شهر تهران انجام شده است. بدیهی است که فعالیت ها دارای اولویت ها و اهمیت های مختلفی هستند. با توجه به مطالعات انجام شده و فرضیات مدنظر مدل پیشنهادی، در این پژوهش برای بررسی مدل ارائه شده ۴۸ امداد رسان مد نظر قرار گرفتند و ابتدا در نزدیکترین مرکز مدیریت بحران منطقه مطالعاتی مستقر شدند و سپس تخصیص هوشمند فعالیت های نجات به افراد نجاتگر صورت می گیرد.

نتیجه گیری: استفاده از مدل پیشنهادی در این مقاله جهت شبیه سازی های پژوهش حاضر و نیز پیاده سازی ساختار فعالیت های نجات و تیم های جستجو و نجات، راهکاری نوین در راستای بهبود کیفیت نجات پس از زمین لرزه خواهد بود. با بررسی های انجام شده، مشخص شد پارامترهایی نظیر مدت زمان زنده ماندن در زیر آوار، مدت زمان انجام فعالیت نجات، فاصله افراد تیم های نجات تا مکان فعالیت ها، سرعت افراد هنگام حرکت به سمت هدف بسیار اهمیت دارد. نتایج حاصله از اجرای مدل هوشمند پیشنهادی این پژوهش در مقایسه با عدم استفاده از مدل پیشنهادی، بهبود ۲/۴۲ برابری تخصیص صورت پذیرفته را نشان داده است.

* نویسنده مسئول

argany@ut.ac.ir

③ ۰۲۱-۶۱۱۱۳۵۳۸

واژگان کلیدی:

هوش مکانی

بلایای طبیعی

هوش مصنوعی

زمین لرزه

نجات

مقدمه

در سراسر تاریخ حیات بشر، جان و مال انسان‌ها همواره دستخوش حوادث طبیعی و سوانح پیش‌بینی نشده و گه‌گاه هولناک و مرگبار بوده است. آثار خسارات ناشی از برخی مخاطرات طبیعی مانند زمین‌لرزه، سیل و طوفان در تاریخ بشر جاودان مانده‌اند. کشور پهناور ما نیز از وقوع این حوادث مستثنی نبوده است و پیوسته در معرض حوادث طبیعی مانند زمین‌لرزه قرار داشته و محتمل زیان‌ها و خسارات زیادی ناشی از آن‌ها شده است [۱]. از این‌رو اقدامات پیشگیری، حذف و یا کاهش اثرات، بکارگیری و ارتقا امکانات و تجهیزات موجود جهت آمادگی و مقابله، پیش‌بینی و تأمین نیازهای اساسی و اضطراری آسیب دیدگان در هنگام رخدادهای طبیعی ضرورتی انکارناپذیر است [۲]. این مهم می‌تواند به ارائه خدمات جستجو و نجات و امدادرسانی فوری و از قبل سازمان‌یافته به آن‌ها و به علاوه، حفظ سلامت، ایمنی و بازگرداندن شرایط به حالت عادی، منجر شود.

با توجه به مطالب ذکر شده اهمیت بحران زمین‌لرزه در ایران مشخص می‌شود و با عنایت به اینکه نمی‌توان از وقوع آن جلوگیری نمود؛ می‌بایست برای کاهش آثار و خسارات و تلفات ناشی از آن با استفاده از شاخه‌های مختلف علمی برنامه‌ریزی نمود، که این مهم در واقع برنامه‌ریزی توسط افراد متخصص است و در نهایت بسیار مفید خواهد بود که این برنامه‌ریزی‌ها توسط مسئولین مربوطه اجرایی گردد. جهت کاهش خسارات جانی پس از رخداد زمین‌لرزه می‌بایست برنامه‌هایی به جهت جستجو و نجات بهتر در زمان وقوع بحران داشت [۳]. در این مرحله که به مرحله مقابله در مراحل مدیریت بحران معروف است [۴]، با استفاده از تجربه و تخصص نجاتگران با سابقه و صاحب نظر و تخصص‌های علمی دیگر برنامه‌ای برای کارایی بهتر ارائه شود.

در پژوهش حاضر برای بهبود این مرحله از مدیریت بحران تلاش می‌شود و نیز به جهت برنامه‌ریزی بهتر از نظرات افراد خبره در امر جستجو و نجات بهره جسته و شرح وظایف نجاتگران بررسی می‌شود. پژوهش حاضر سعی دارد تا در فاز پس از اعلام هشدار زمین‌لرزه، امکان استفاده از روش‌های به‌روز در نجات به موقع جان انسان‌ها را مدنظر قرار داده و روشهایی را برای افزایش سرعت و کیفیت خدمات جستجو و نجات پس از زمین‌لرزه ارائه کند. بدین منظور ابتدا بایستی آسیب‌های شهری متأثر از زمین‌لرزه بررسی شده، سپس وظایف نجاتگران و اثرات آنها بررسی شود. از طرف دیگر برای ایجاد مدلی مناسب، ساختارهای هوش مصنوعی و امکان استفاده آنها لازم است مورد بررسی قرار گرفته و روش مناسبی جهت ایجاد مدلی هوشمند مکانی انتخاب شود. در نهایت سعی می‌شود با رویکردی ترکیبی به موارد یاد شده، روشی به‌روز برای کمک به عملیات جستجو و نجات پس از زمین‌لرزه ارائه شود.

با عنایت به موارد یاد شده، در پژوهش حاضر ابتدا یک زمین‌لرزه فرضی شبیه‌سازی شده و سپس میزان خسارات احتمالی آن شناسایی می‌شود. سپس ساختار تیم‌های جستجو و نجات بررسی و شناسایی شده، پس از آن تمامی فعالیت‌هایی که می‌بایست توسط این تیم‌ها در زمان رخداد

زمین‌لرزه انجام شود، بررسی و لیست می‌شوند. در گام بعدی اولویت‌بندی‌های اجرای هر کدام از فعالیت‌ها و زمان حدودی انجام آن‌ها مشخص می‌شود. پس از آن، با توجه به موارد شناسایی شده و چیدمان ساختار فعالیت‌ها، نجاتگران و محیط، و نیز رابطه‌های ریاضی میان آنها پرداخته خواهد شد، به‌گونه‌ای که قابل استفاده در بخش هوش مکانی پژوهش حاضر باشند. در نهایت با بهره‌گیری از یادگیری تقویتی به عنوان زیرمجموعه‌ای از هوش مصنوعی ساختاری نوین برای کمک به عملیات جستجو و نجات پس از زمین‌لرزه ارائه و پیاده‌سازی می‌شود.

تاکنون پژوهش‌هایی در ارتباط با فعالیت‌های جستجو و نجات در بحران زمین‌لرزه و هوش مکانی صورت پذیرفته است که در ادامه به بیان و بررسی برخی از آن‌ها پرداخته می‌شود. پژوهش‌های زیادی در رابطه با اسکان اضطراری بعد از زمین‌لرزه مانند گیوه‌چی و همکاران [۵]، نوجوان، امیدوار و صالحی [۶]، مسیریابی خودروهای امدادی [۷] و همچنین پژوهش‌هایی نیز در زمینه ارزیابی خسارات با استفاده از شبیه‌سازی زمین‌لرزه [۸] انجام شده است. تحقیقاتی نیز توسط جمعیت هلال احمر انجام شده که از جمله آن می‌توان به طرح جامع جستجو و نجات کشور [۹] اشاره نمود. اغلب این تحقیقات و مطالعات صورت گرفته به بخش‌هایی نظیر اسکان اضطراری یا مسیریابی پس از بحران پرداخته‌اند. پژوهش‌هایی جهت تخصیص وظایف توسط راسخ و همکاران [۱۰]، وفایی‌نژاد و همکاران [۱۱، ۱۲] و بهرامی و همکاران [۱۳] انجام شده است که در آنها از روش‌های بهینه‌سازی تئوری صف، مدل‌سازی مکانی-زمانی، و برنامه‌ریزی غیر خطی و الگوریتم‌های هوش جمعی نظیر ازدحام ذرات استفاده شده است.

در استفاده از یادگیری تقویتی در بلایای طبیعی، پژوهشی در سال ۲۰۲۰ Li Yan و همکاران یک سیستم اعزام تیم نجات مبتنی بر تحرک انسانی به نام MobiRescue را پیشنهاد کردند، که هدف آن به حداکثر رساندن تعداد کل درخواست‌های نجات برآورده شده، به حداقل رساندن تاخیر تیم‌های نجات به موقعیت‌های درخواست‌های نجات و همچنین تعداد تیم‌های نجات اعزام‌شده است. داده‌های تحرک انسانی در مقیاس شهر را برای طوفان فلورانس مطالعه کردند و دریافتند که شدت تأثیر بلایا در مناطق مختلف کاملاً متفاوت است و حرکت مردم به طور قابل توجهی تحت تأثیر فاجعه قرار گرفته است، به این معنی که مسیرهای رانندگی تیم‌های امداد باید به طور سازگار تنظیم شود. سپس، یک روش مبتنی بر ماشین بردار پشتیبانی (SVM) برای پیش‌بینی توزیع درخواست‌های نجات بالقوه در هر بخش جاده و یک روش اعزام تیم نجات مبتنی بر یادگیری تقویتی (RL) برای دستیابی به اهداف فوق‌الذکر توسعه دادند. آزمایش‌های مبتنی بر ردیابی عملکرد برتر MobiRescue را نسبت به سایر روش‌های مقایسه نشان داده است [۱۴].

و نیز، در سال ۲۰۲۲ Zhaojia Tang و همکاران در پژوهشی برای دستیابی به هدف برنامه‌ریزی و شناسایی مسیر گام کوچک توزیع شده برای ربات پس از زلزله برای بازرسی و ارزیابی خسارت ساختمان، یک روش برنامه‌ریزی مسیر گام کوچک توزیع شده با استفاده از یادگیری

زمان بندی به دست آمده را با نتایج به دست آمده از الگوریتم DRL بر اساس مدل تک شبکه ای و الگوریتم بهینه سازی کلنی مورچه ها (ACO) مقایسه می کند. آزمایش های شبیه سازی نشان می دهد که روش پیشنهادی دقت راه حل را نزدیک به ۱۰ درصد در مقایسه با الگوریتم ACO کاهش می دهد، اما نزدیک به ۸۰ درصد در زمان حل صرفه جویی می کند [۱۸]. در پژوهش های بررسی شده هیچ کدام به ایجاد هوش مکانی تیم های جستجو و نجات با استفاده از یادگیری تقویتی برای پس از زمین لرزه نپرداخته اند. همچنین بیشتر به ارائه راهکارهایی برای مسیریابی، مسیرهای جاده های، ربات ها و داخل ساختمان ها در حوادثی مانند سیل و زمین لرزه پرداخته اند.

تعاریف واژگان کلیدی

هوش مکانی

GeoAI ادغام هوش مصنوعی (AI) با Geospatial Data & Science Technology برای افزایش درک و حل مشکلات مکانی است. GeoAI با استفاده از روش های هوش مصنوعی برای حل مشکلات مکانی از طریق تجزیه و تحلیل داده های مکانی طراحی می شود و شامل روش هایی برای تشخیص الگوها، انجام پیش بینی، پیش بینی مکانی-زمانی و غیره است. هوش مصنوعی علمی است که هدف آن ایجاد هوش به صورت مصنوعی برای غیرجاندار است، این هوش می تواند از انسان یا جانداران دیگر و محیط طبیعی الهام گرفته شده باشد. در واقع هوش مصنوعی مجموعه ای از دستورالعمل های محاسباتی برای اجرای وظایف خاص یا تصمیم گیری با تقلید از هوش جانداران است که با برنامه نویسی به زبان رایانه، طراحی و ایجاد می شود. الگوریتم های هوش مصنوعی می توانند با رویکردهای مختلفی طراحی شده و ماشین ها را قادر سازند تا رفتار هوشمندانه ای از خود نشان دهند.

برخلاف الگوریتم های سنتی که از مجموعه ای از قوانین از پیش تعیین شده پیروی می کنند، الگوریتم های هوش مصنوعی توانایی یادگیری و انطباق از داده ها را دارند و می توانند عملکرد خود را در طول زمان بهبود بخشند. این الگوریتم ها نیروی محرکه بسیاری از کاربردهای هوش مصنوعی از جمله سامانه های مدیریت و تصمیم گیری و بسیاری از موارد دیگر هستند. الگوریتم های مبتنی بر هوش مصنوعی از تکنیک هایی مانند یادگیری ماشین، یادگیری عمیق و شبکه های عصبی برای مدیریت داده های پیچیده و بدون ساختار و ارائه خروجی های احتمالی استفاده می کنند [۱۹]. به طور کلی الگوریتم های هوش مصنوعی را در سه نوع الگوریتم های یادگیری نظارت شده یا نظارتی، الگوریتم های یادگیری بدون نظارت و الگوریتم های تقویتی تقسیم بندی می کنند که تحت عنوان کلی یادگیری ماشین نیز قلمداد می شوند [۲۰] و شامل انواع الگوریتم های جستجو، بهینه سازی یا بهینه یابی، الگوریتم های فرا ابتکاری و الگوریتم های جستجوی محلی در هوش مصنوعی نیز می شوند.

تقویتی اصلاح شده (MRL) پیشنهاد شده است. فاصله محدود و ۱۲ جهت برای حرکت ربات به صورت شبکه ای اصلاح شده است. گام متحرک کوچک تضمین می کند که برنامه ریزی مسیر در یک منطقه امن همسایه بهینه است. MRL جهت را به روز می کند و مسیر را برای جلوگیری از اختلالات ناشناخته تنظیم می کند. پس از یافتن بهترین زاویه بازرسی، دوربین روی ربات می تواند تصویر را به وضوح ثبت کند و در نتیجه قابلیت تشخیص را بهبود بخشد [۱۵].

همچنین، با توجه به اینکه سیل شهری یک بلای طبیعی مخرب و پرهزینه است که به برنامه ریزی مسیر نجات موثر برای کاهش تلفات جانی و مالی نیاز دارد. عدم قطعیت و پیچیدگی ذاتی خطرات مرتبط با سیل شهری، توانایی برنامه ریزی مسیرهای نجات بهینه را که هم به موقع بودن و هم ایمنی را در اولویت قرار می دهد، محدود می کند. در پژوهشی Xiaoyan Li و همکاران سال ۲۰۲۳ یک روش ارزیابی نوآورانه برای مقادیر ریسک خروجی و احتمال نشان دهنده ایمنی و به موقع بودن در هر منطقه قابل عبور در حالی که سناریوهای سیل در دنیای واقعی را شبیه سازی می کند، ارائه دادند. علاوه بر این، این مقاله یک الگوریتم برنامه ریزی مسیر پیشگام را بر اساس یادگیری تقویتی عمیق توسعه داده است، که بهره برداری از پاداش تصادفی بهبود یافته و مکانیسم های کاوش پاداش نااهنگ را برای عملکرد در یک سناریوی برنامه ریزی مسیر نجات با عدم قطعیت و پیچیدگی ترکیب کرده است. با توجه به یافته ها، الگوریتم پیشنهادی در همگرایی به مسیر بهینه، نمونه برداری کامل و راندمان اجرا بهتر عمل کرده است [۱۶].

در سال ۲۰۲۴ Juil Jeon و همکاران در مطالعه ای نقاط قوت و ضعف انواع مختلف داده های سیگنال بی سیم را تجزیه و تحلیل کردند و یک روش مبتنی بر یادگیری عمیق جدید را برای تخمین مکان پیشنهاد کرده اند که به طور جامع این منابع داده را یکپارچه می کند. هسته اصلی این پژوهش معرفی یک تکنیک تبدیل "تصویر نقشه تطبیقی" است که به طور موثر سیگنال های LTE، WiFi و BLE را ادغام کند. این تصاویر نقشه تطبیقی تولید شده برای یک مدل یادگیری عمیق اعمال شده و تخمین موقعیت مکانی بسیار دقیق و پایدار را حتی در موقعیت های نجات اضطراری چالش برانگیز ممکن می سازد. در آزمایش های دنیای واقعی، با استفاده از داده های چند منبع، به نرخ موفقیت موقعیت یابی ۸۵،۲۷ درصدی دست یافته است که با استانداردهای FCC E911 ایالات متحده برای دقت و قابلیت اطمینان مکان در شرایط و محیط های مختلف مطابقت دارد. این باعث می شود رویکرد پیشنهادی به ویژه برای کاربردهای اضطراری مناسب باشد، جایی که هم دقت و هم سرعت بسیار مهم هستند [۱۷].

در سال ۲۰۲۵ در پژوهشی Jin Zhang و همکاران از یادگیری تقویت عمیق (DRL) برای رسیدگی به مشکل مسیریابی پویا در تدارکات اضطراری استفاده کردند. این روش از چارچوب کنشگر-انتقادی، همراه با مکانیسم های توجه، شبکه های اشاره گر و شبکه های عصبی حافظه کوتاه مدت برای تعیین مسیر موثر امداد بلافاصله استفاده می کند، و طرح

ماشین دارد، بخشی از یادگیری تقویتی شبیه یادگیری تحت نظارت است که توسعه‌دهندگان باید اهداف مشخصی را به الگوریتم‌ها بدهند و توابع پاداش و مجازات را تعریف کنند. اما در یادگیری تقویتی زمانی که این پارامترها تنظیم شوند، الگوریتم به تنهایی عمل می‌کند که این مورد شبیه یادگیری بدون نظارت عمل می‌کند. همین موضوع باعث می‌شود گاهی از الگوریتم‌های RL به‌عنوان شاخه‌ای از یادگیری نیمه نظارتی یاد شود [۲۵]. یادگیری تقویتی به طور کلی اجزایی دارد که از آن به عنوان اجزای اصلی یادگیری تقویتی یاد می‌شود که در ادامه به آن نیز اشاره می‌شود [۲۶]:

اجزای اصلی یادگیری تقویتی

عامل: موجودی که با محیط در تعامل است و از آن می‌آموزد. اقدامات عامل بر وضعیت محیط تأثیر می‌گذارد و بازخوردی را در قالب پاداش یا مجازات دریافت می‌کند.

محیط: سیستم یا دنیای بیرونی که عامل در آن فعالیت می‌کند. بر اساس اقدامات عامل بازخوردی را به او ارائه می‌دهد و عامل بر این اساس وضعیت خود را تغییر می‌دهد.

حالت: وضعیت فعلی یا نمایش محیط در یک زمان معین. اطلاعات مرتبطی را که عامل برای تصمیم‌گیری به آن نیاز دارد، بیان می‌کند. اقدام: انتخاب‌هایی که در یک زمان خاص در اختیار عامل قرار می‌گیرد. اقدامات بر وضعیت محیط و پاداش‌های بعدی تأثیر می‌گذارد. پاداش: بازخورد یا سیگنال ارزیابی عامل بر اساس اقدامات آن. هدف عامل این است که پاداش تجمعی را به حداکثر برساند.

نجات در زمین‌لرزه

جستجو و نجات به عنوان بخش عمده مقابله با بحران و حوادث شامل جستجو افراد حادثه دیده، نجات از آوار، ارائه کمک‌های اولیه به مجروحین، تغذیه، انتقال آنها تا نزدیکترین مراکز درمانی، تأمین سرپناه و اسکان اضطراری، تخلیه شهروندان از محل حادثه، تأمین امکانات اولیه زندگی و دریافت و توزیع کمک‌های مردمی و سازمان‌های غیر دولتی داخلی، خارجی و بین‌المللی است [۱] و بلافاصله بعد از بروز سانحه انجام می‌شود و شامل رفع نیازهای اولیه اسکان، آب، غذا و درمان اضطراری است. برخی مراجع این مرحله را به دو بخش تقسیم می‌کنند [۲۷]:

○ دوره اضطرار: جستجو و نجات و درمان اضطراری که حدود ۷۲ ساعت اول بعد از وقوع سانحه است.

○ دوره امداد: اسکان، آب، غذا

عملیات جستجو و نجات به ترتیب شامل مراحل جستجو، دسترسی، رهاسازی و تثبیت و در نهایت انتقال می‌باشد. هر کدام از این مراحل معیارهایی برای اجرا دارند که باید جهت دقت در اجرای بهتر امدادسانی مد نظر قرار گیرد. در ادامه معیارهای مذکور بیان می‌گردد [۲]:

بخش هوش مصنوعی پژوهش حاضر در بخش الگوریتم‌های تقویتی ماشین لرنینگ هوش مصنوعی وارد می‌شود بنابراین در ادامه به توضیح بیشتر این بخش پرداخته می‌شود. به طور کلی یادگیری تقویتی تکنیکی در یادگیری ماشین است که در آن عامل کامپیوتری یاد می‌گیرد که یک کار را از طریق تعاملات تکراری و توسط آزمون و خطا با محیط انجام دهد. چیزی که این رویکرد را مهم می‌سازد این است که به یک عامل قدرت می‌دهد تا از طریق یک سیستم بازخورد که معمولاً شامل پاداش و مجازات است یاد بگیرد در پیچیدگی‌های محیطی که برای آن ایجاد شده است اقدامات صحیحی انجام دهد و رفتارهایش را بهینه کند [۲۱]. چندین روش تصمیم‌گیری در یادگیری تقویتی وجود دارد که تفاوت آن‌ها عمدتاً به دلیل استراتژی‌های مختلفی است که برای کشف محیط خود استفاده می‌کنند. از پرکاربردترین رویکردهای تصمیم‌گیری در یادگیری تقویتی روش‌های ارزش محور، سیاست محور و مدل محور است [۲۲]. در هر یک از روش‌ها می‌توان از الگوریتم‌های فراابتکاری مانند الگوریتم‌های بهینه‌سازی بهره برد و به بهبود فرایند تصمیم‌گیری در یادگیری تقویتی دست یافت.

انواع رویکردهای یادگیری تقویتی

هدف انواع رویکردهای یادگیری تقویتی به حداکثر رساندن پاداش در طول زمان است.

○ ارزش محور

در این روش، تمرکز بر یادگیری تابع هدف و رسیدن به مقدار بهینه است. تابع هدف، ارزش پاداش‌های تجمعی مورد انتظار را برای قرار گرفتن در یک وضعیت معین با پیروی از سیاست مسئله را تخمین می‌زند.

○ سیاست محور

روش‌های یادگیری تقویتی سیاست محور به‌طور مستقیم خط مشی مدل را بهینه می‌کنند؛ درحالی‌که تکنیک‌های مبتنی بر ارزش به دنبال یافتن تابع ارزش بهینه هستند که به نوبه خود بهترین خط مشی را هم ارائه خواهد داد.

○ مدل محور

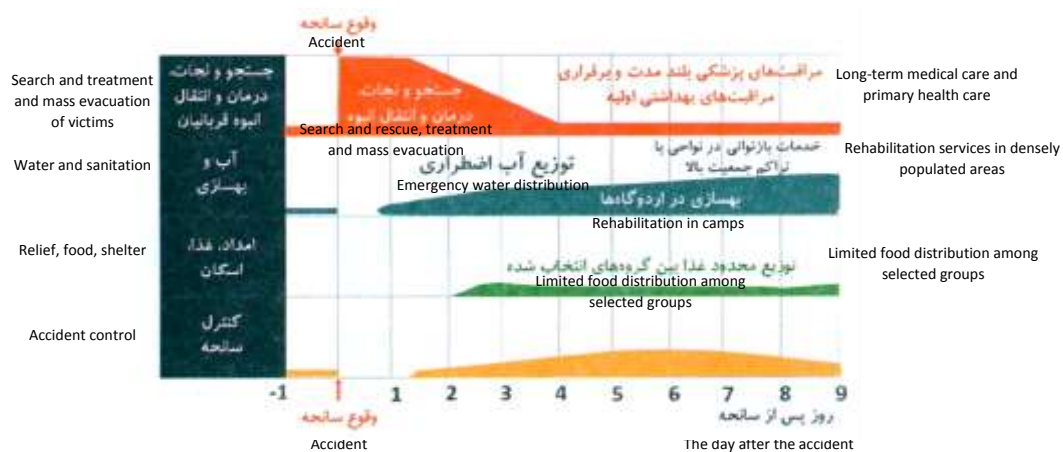
در یادگیری تقویتی مدل محور عامل بدون آگاهی و تصادفی به محیط واکنش نشان نمی‌دهد، با ایجاد نسخه کوچکی از خود تلاش دارد رویدادهای آینده را پیش‌بینی کند. این مدل حرکات مختلف را امتحان می‌کند تا ببیند در آینده چه اتفاقی می‌افتد. در این شیوه، عامل می‌تواند سناریوهایی را در مدل خود اجرا کند، بدون آن‌که نتیجه منفی بگیرد (مانند عملکرد الگوریتم‌های هوش جمعی بهینه‌سازی) [۲۳، ۲۲].

به طور کلی یادگیری تقویتی تکنیکی در یادگیری ماشین و توسعه هوش مصنوعی است که در آن عامل با انجام اقداماتی در محیط و دریافت پاداش (بازخورد مثبت) یا جریمه (بازخورد منفی) اعمال خود را با هدف به حداکثر رساندن پاداش و در واقع بهینه نمودن عملکرد یاد می‌گیرد انجام دهد [۲۴]. یادگیری تقویتی شباهت‌هایی نیز با انواع دیگر یادگیری



شکل ۱: تغییر اولویت‌ها در سوانح [۲۷]

Fig. 1: Changing priorities in disasters [27]



شکل ۲: تغییر نیازها و اولویت‌ها به دنبال زلزله [۲۷]

Fig. 2: Changing needs and priorities following the earthquake [27]

این‌گونه مصدومان کسانی هستند که هنگام رویداد، در داخل ساختمان بوده‌اند و کسانی که شخصاً خود را بیرون کشیده‌اند.

○ سرپرستی منطقه آسیب دیده گزارش خواهد داد که رسیدگی به این مصدومان صورت گرفته است.

○ فرمانده می‌بایست ترتیبی اتخاذ نماید که با بررسی کلیه نقاط محل مأموریت، اطمینان حاصل شود که مصدومان سطحی مورد رسیدگی قرار گرفته‌اند.

○ مرحله دوم: نجات فوری و کاوش در ساختمان‌هایی با آسیب کم

○ نجات اشخاصی که به طور سطحی به دام افتاده‌اند و آوار زیادی بر روی آنها قرار ندارد.

○ کاوش ساختمان‌ها برای حصول از این‌که اشخاص به‌دام افتاده بدون رسیدگی در آن مکان‌ها باقی نمانده باشند. برای نجات به‌دام افتادگان باید یک آزمایش سریع و دقیق از ساختمان‌های آسیب دیده به عمل آید تا بهترین و مؤثرترین را دسترسی به به‌دام افتادگان مشخص شود.

○ معیارهای جستجو: (۱) کسب اطلاعات (از افراد مطلع محلی)، (۲) دریافت عکس‌العمل‌های زیر آوار، (۳) ایجاد صدا به وسیله اجسام و وسایل منتقل کننده صدا، (۴) رؤیت سوزده (هدف جستجو)

○ معیارهای دسترسی: (۱) سریع‌ترین روش، (۲) ایمن‌ترین مسیر، (۳) کوتاه‌ترین مسافت

○ معیارهای کمک: (۱) زنده ماندن و زنده نگه‌داشتن، (۲) آسیب دیدن کمتر، (۳) تقویت توان روحی‌روانی

○ معیارهای رهاسازی و تثبیت: (۱) حداقل زمان، (۲) حداقل تجهیزات، (۳) حداقل نیروی انسانی، (۴) تثبیت وضعیت مصدوم

○ معیارهای انتقال: (۱) سرعت در انتقال، (۲) جلوگیری از وخامت حال مصدوم، (۳) با وسائل ابتدایی و قابل دسترسی، (۴) مناسب‌ترین و ایمن‌ترین روش حمل

می‌توان عملیات نجات را در مراحل زیر خلاصه نمود [۲۸]:

○ مرحله اول: رسیدگی به مصدومان سطحی

$r = 1/Distance$ معکوس طول مسیر پیموده‌شده توسط نجاتگر است. هر چه فاصله کوتاه‌تر باشد، مقدار پاداش بیشتر می‌شود [۱۹، ۲۱].

دیاگرام نحوه انجام تحقیق

پژوهش حاضر به صورت خلاصه مطابق دیاگرام زیر (شکل ۳) پیش رفته است.

پیاده‌سازی

یافته‌ها

با توجه به ماهیت فعالیت‌های گروه‌های جستجو و نجات و عدم امکان قرارگیری محققان در شرایط واقعی پس از زلزله، شبیه‌سازی رخداد زمین‌لرزه به منظور فراهم نمودن اطلاعات مکانی و توصیفی منطقه انجام فعالیت، تعیین فعالیت‌های مورد نیاز و تهیه اطلاعات موقعیتی و توصیفی نیروی انسانی مدنظر قرار گرفته است. شبیه‌سازی رخداد زمین‌لرزه برای بدست آوردن برآورد تقریبی از خسارات سازه‌ای و انسانی در یک قسمت کوچک از شهر تهران انجام شد. در این برآوردها، برای منطقه مطالعاتی یک سناریو دلخواه تعریف شد و با شبیه‌سازی و پیاده‌سازی آن سناریو میزان خسارات سازه‌ای و انسانی در منطقه مطالعاتی محاسبه شده است.

سناریوی انتخاب شده جهت شبیه‌سازی زلزله در این پژوهش بزرگای گشتاوری ۶ را دارا می‌باشد و در آن از داده‌های شتاب‌نگاری منطقه‌ای مورد مطالعه استفاده شد و همچنین در کنار آن اطلاعات ساختمان‌های همان منطقه نظیر تعداد طبقات، سال ساخت و نوع سازه و نیز اطلاعات جمعیتی منطقه مورد مطالعه و مکان قرارگیری افراد مدنظر قرار گرفت. در ادامه فعالیت‌های مورد نیاز و اطلاعات توصیفی آن‌ها جهت تخصیص وظایف طبق الگوریتم پیشنهادی، تعیین شده است. بدیهی است که فعالیت‌ها دارای اولویت‌ها و اهمیت‌های مختلفی هستند.

فعالیت‌های بررسی شده شامل تجسس و زنده‌یابی، ارزیابی اولیه منطقه، آواربرداری سبک، آواربرداری سنگین، ثبت تعداد فوتی‌ها و مشخصات آنها، کمک‌های اولیه، قطع آب و برق و گاز، نشانه‌گذاری، شمع‌ک‌زنی (امن‌سازی منطقه)، هوارسانی در آوار، بازسازی شبکه‌ی راه‌ها [۳۰]، که با توجه به مطالعات انجام شده و فرضیات مدنظر الگوریتم پیشنهادی، برخی از این فعالیت‌ها مانند آواربرداری سنگین و ثبت تعداد و مشخصات فوتی‌ها در مرحله ابتدایی تخصیص افراد تیم‌های جستجو و نجات به فعالیت‌ها قرار ندارد و ارزیابی اولیه منطقه انجام شده فرض می‌گردد. در این پژوهش برای بررسی مدل ارائه شده ۴۸ امدادرسان مدنظر قرارگرفتند و در نزدیکترین مرکز مدیریت بحران منطقه مطالعاتی مستقر گشتند. شکل ۲ محدوده مطالعاتی و شکل ۳ موقعیت اولیه نجاتگران را نسبت به محدوده مطالعاتی نشان می‌دهد.

همیشه می‌بایست خطر آتش‌سوزی و مسمومیت از گاز را که در نتیجه واژگونی اجاق‌ها یا شکستن بخاری‌ها و ... ممکن است پیش آید را در نظر داشت.

○ مرحله سوم: اکتشاف عمیق‌تر و جابه‌جایی محدود آوارها

چنانچه محل مصدومان پیدا شد، نجات آنها مستلزم جابه‌جا کردن آوار در محل‌های انتخاب شده است. انتخاب محل برای جابه‌جا کردن آوار به عوامل زیر بستگی دارد:

○ محل مصدومان

○ اطلاعاتی که با توجه به نقشه ساختمان به دست می‌آید.

○ بررسی دقیق وضع خرابی ساختمان‌ها که شامل موارد زیر می‌شود:

- پاک کردن آوار، تا زمانیکه مصدومان شناسایی شده و از زیر آوار بیرون کشیده شوند.

- ایجاد یک راه گریه‌رو و اتصال حفره‌ها به یکدیگر

روش‌شناسی

با بررسی‌های انجام شده، مشخص شد پارامترهایی به نام مدت زمان زنده ماندن در زیر آوار، مدت زمان، فاصله افراد تا مکان فعالیت‌ها، سرعت افراد هنگام حرکت به سمت هدف، و نیز احتمال موفقیت یک امدادرسان در انجام وظیفه محوله بسیار اهمیت دارد [۲۹]. در نهایت تابعی متشکل از آنها برای استفاده از یادگیری تقویتی (رابطه ۳) ایجاد شد که یک رابطه غیرخطی پیوسته می‌باشد. در این پژوهش ب استفاده از یادگیری تقویتی در مسئله‌ای مکانی تحت عنوان راهکاری هوشمند مکانی به تخصیص بهینه افراد به فعالیت‌ها منجر می‌شود.

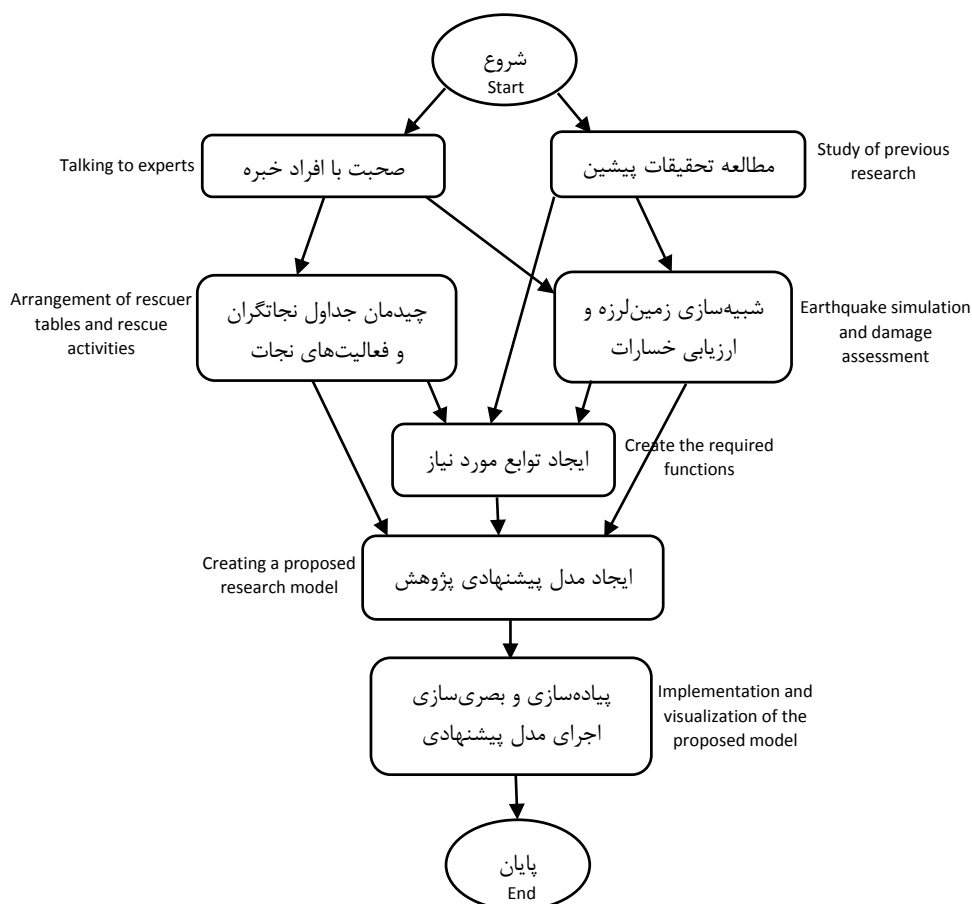
$$F = 1 / \left(\frac{MaxInjured_i}{MaxInjured} * (1 - e^{1/Area * T * Distance}) \right) \quad \text{رابطه ۱}$$

در رابطه بالا $(MaxInjured_i / MaxInjured)$ عداد مجروحان هر سازه مسونی به کل مجروحان محدوده مطالعاتی است. $Area$ مساحت هر واحد مسکونی که در این پژوهش همان مساحت ناحیه‌ای که فعالیت در آن قرار دارد می‌باشد. $Distance$ فاصله نجاتگر تا محل فعالیت و T هم مدت زمان انجام فعالیت می‌باشد. اگر امدادگری به منطقه‌ای که تخمین زده می‌شود ۲ نفر زیر آوار هستند اعزام شود، مدت زمان انجام فعالیت‌ها در عدد ۲ ضرب خواهد شد. در مدل پیشنهادی این پژوهش تابع ارزش فوق (رابطه ۱) با استفاده از تابع زیر (رابطه ۲) به صورت تقویتی به تخصیص بهینه دست می‌یابد [۱۹، ۲۰].

$$F = F_{i-1} + \alpha[r + \gamma * maxF_i - F_{i-1}] \quad \text{رابطه ۲}$$

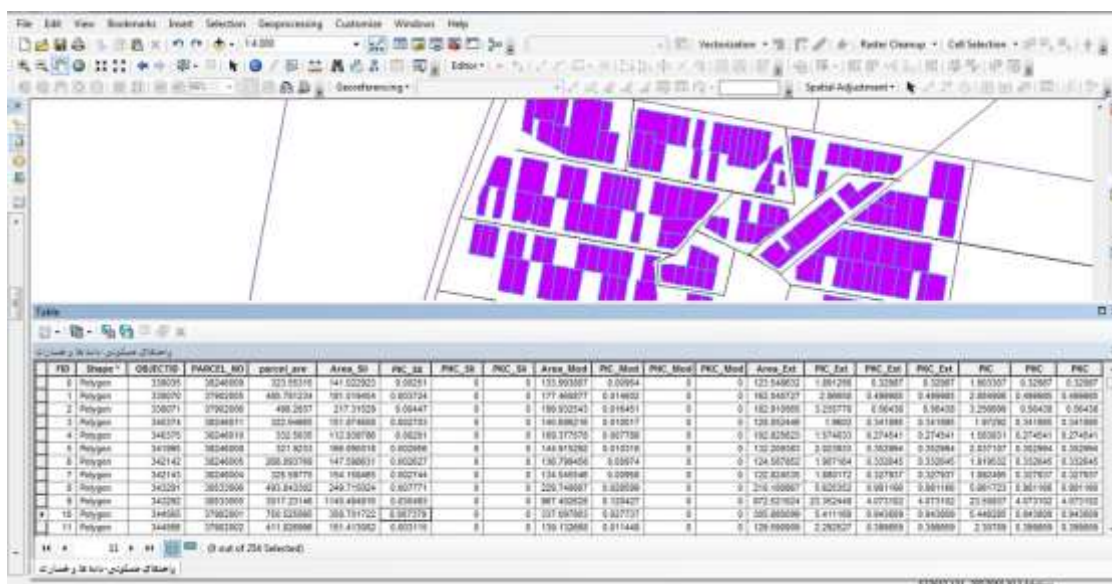
$$r = 1/Distance \quad \text{رابطه ۳}$$

در رابطه بالا (رابطه ۲) α نرخ یادگیری و r پاداش دریافت‌شده، γ ضریب کاهش ارزش پاداش آینده و $maxF_i$ بهترین ارزش قابل‌دستیابی در حالت بعدی است. r مقدار پاداش است که به صورت



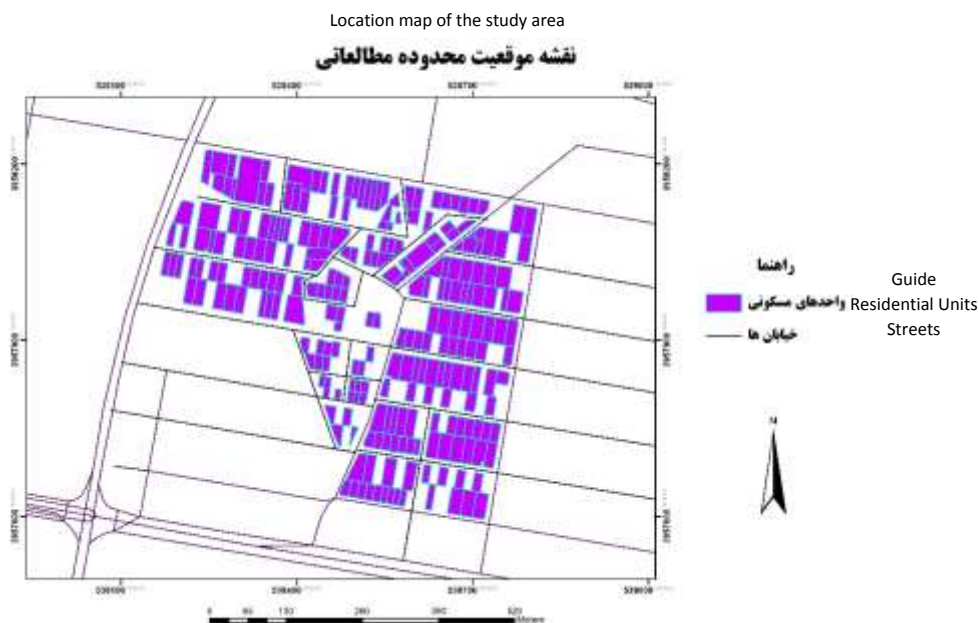
شکل ۳: دیاگرام اجرای پژوهش

Fig. 3: Diagram of the research implementation



شکل ۴: اطلاعات آسیب‌پذیری در محدوده‌ی مطالعاتی

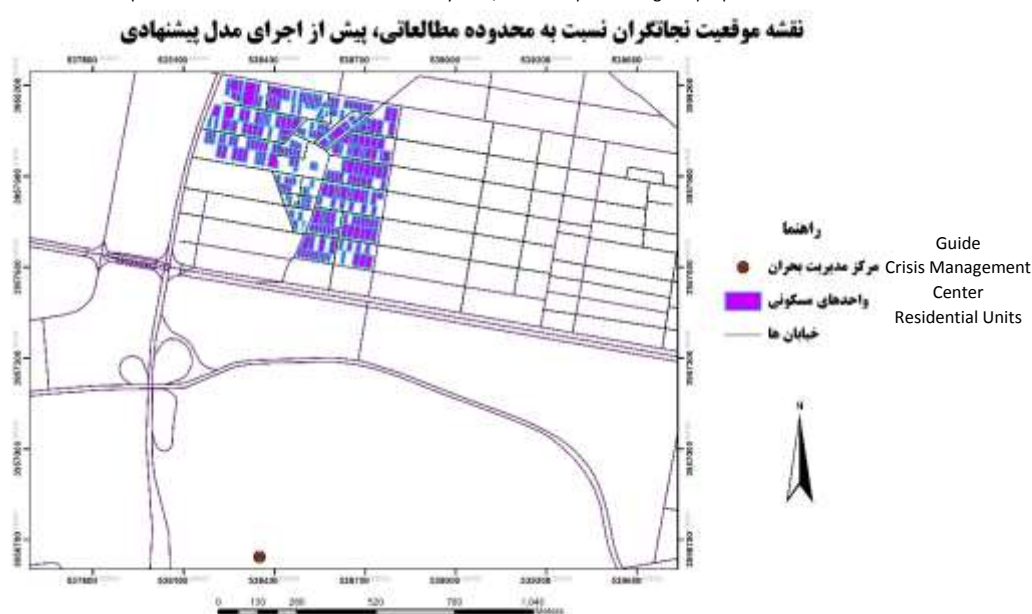
Fig. 4: vulnerability information in the study area



شکل ۵: موقعیت محدوده مطالعاتی

Fig. 5: Location of the study area

Map of rescuers' location relative to the study area, before implementing the proposed model.



شکل ۶: موقعیت نجاتگران پیش از شروع جستجو و نجات نسبت به محدوده مطالعاتی

Fig. 6: Rescuers' location before the start of search and rescue relative to the study area

اثرگذار قابل اندازه‌گیری در نجات پس از زمین‌لرزه در پژوهش حاضر و فرمول‌های ۱، ۲ و ۳ ارزش هر تخصیص و جمع تخصیص‌های انجام شده محاسبه می‌شود و با استفاده از رویکرد یادگیری تقویتی در نهایت به یک چیدمان بهینه برای تخصیص نجاتگران به واحدهای مسکونی و انجام فعالیت ضروری آن واحد مسکونی انجام می‌شود که نتایج حاصله

جدول ۱ اطلاعات فعالیت‌هایی را که هر نجاتگر می‌تواند در زمین‌لرزه فرضی شبیه‌سازی شده‌ی این پژوهش انجام دهد را برای نجاتگر شماره ۱۰ از میان ۴۸ نجاتگر نشان می‌دهد. مدل پیشنهادی این پژوهش به این گونه عمل می‌کند که ابتدا برای هر نجاتگر یکی از فعالیت‌های بیان شده در جدول شماره ۱ در نظر گرفته می‌شود و بر اساس پارامترهای

محل‌های مشخص شده اعزام شده اند. همچنین نقاط سرخابی‌رنگ نجاتگرانی هستند که به فعالیت قطع آب و برق و گاز در واحدهای مسکونی تخصیص یافته به خود پرداخته اند. افراد به فعالیت‌های اولویت‌دار ابتدا تخصیص یافته و مکان‌های مسکونی‌ای که میزان خسارت بیشتر دارند در اولویت امدادسانی هستند. در شکل زیر یک مورد از بین تخصیص‌های انجام شده با جزئیات بیشتر نمایش داده شده است که نشان می‌دهد نجاتگر شماره ۴ به فعالیت نشانه‌گذاری در محل مسکونی شماره ۲۰ از ۲۵۴ واحد مسکونی تخصیص یافته است.

در بررسی کارایی الگوریتم پیشنهادی نیز، اثر مثبت روش انتخابی در نتایج حاصله از اجرای الگوریتم پیشنهادی نمایان شد. در نهایت بهبود ۲/۶۴۲ برابری نتایج، نسبت به حالتی که از این الگوریتم استفاده نشود، حاصل شد. در جدول زیر محاسبه تابع ارزش در دو حالت اجرای الگوریتم پیشنهادی و اجرا نشدن آن، قرار داده شده است. ارزش محاسبه شده برای تخصیص صورت پذیرفته در حالت استفاده از هوش مکانی یادگیری تقویتی پیشنهادی پژوهش حاضر بهبود در نجات پس از زمین-لرزه برای کل تیم نجات نشان می‌دهد.

به صورت نقشه‌های مصور و جدول اطلاعاتی در ادامه مقاله بیان و نمایش داده می‌شود.

در این پیاده‌سازی جداول اطلاعاتی وارد الگوریتم یادگیری تقویتی ارائه شده در بخش روش شناسی شده و با نرخ یادگیری (α) ۰٫۱ و ضریب کاهش یا تعدیل (γ) ۰٫۹۵ که طبق مطالعات انجام شده مقادیر مناسبی جهت پژوهش حاضر که سعی شده پیچیدگی و حجم داده‌ها در سطح متوسط باشد و مسئله تقریباً غیر اپیزودیک می‌باشد [۳۱، ۱۹]، است و همگرایی مطلوبی را ایجاد می‌کند. در ادامه نقشه‌های ایجاد شده از محاسبات تخصیص هوش مکانی پژوهش حاضر نمایش داده می‌شود.

در محدوده مطالعاتی تصویر بالا، نقاطی مه به رنگ آبی هستند مربوط به نجاتگرانی است که مشغول به فعالیت نشانه‌گذاری شده اند و این فعالیت در این واحدهای مسکونی به آن‌ها تخصیص یافته است. نقاط به رنگ صورتی نجاتگرانی هستند که مشغول کمک‌های اولیه در واحدهای مسکونی تخصیص یافته هستند. نقاط بنفش‌رنگ نجاتگرانی هستند که آواربرداری در واحدهای مسکونی اختصاص یافته به خود را انجام می‌دهند. نقاط سبز نجاتگرانی هستند که برای جستجو و زنده‌یابی به

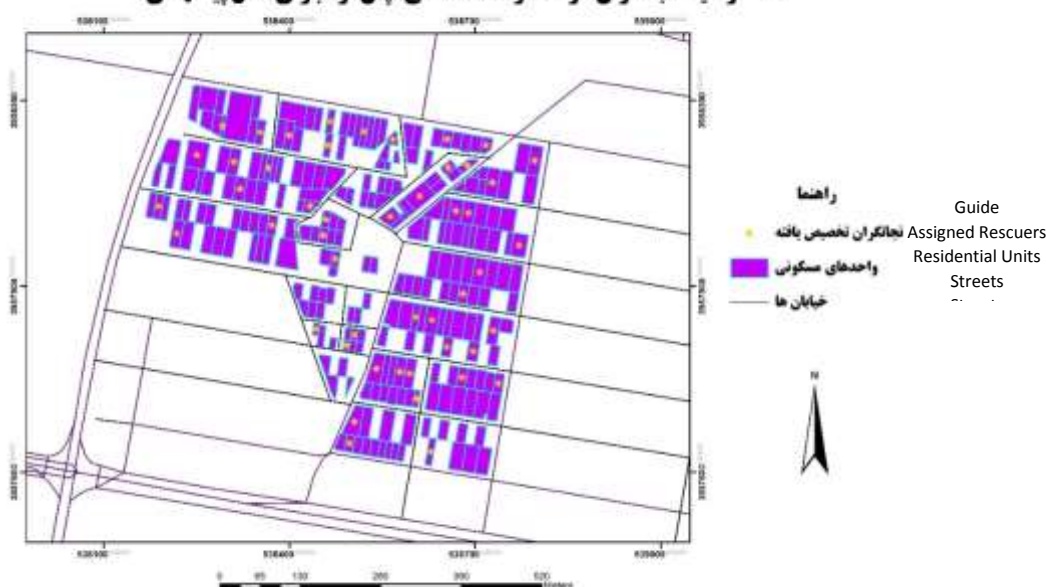
جدول ۱: جدول اطلاعات نجاتگر

Table 1: Table of Rescue Information

نام نجاتگر The name of the savior	فعالیت ۱ Activity 1	فعالیت ۲ Activity 2	فعالیت ۳ Activity 3	فعالیت ۴ Activity 4	فعالیت ۵ Activity 5
نجاتگر ۱۰ Savior 10	نشانه‌گذاری Markup	قطع آب، برق، گاز Water, electricity, gas outages	آوار برداری Debris removal	جستجو و زنده‌یابی Search and survival	کمک‌های اولیه First aid

Map of rescuers' location in the study area, after implementing the proposed model.

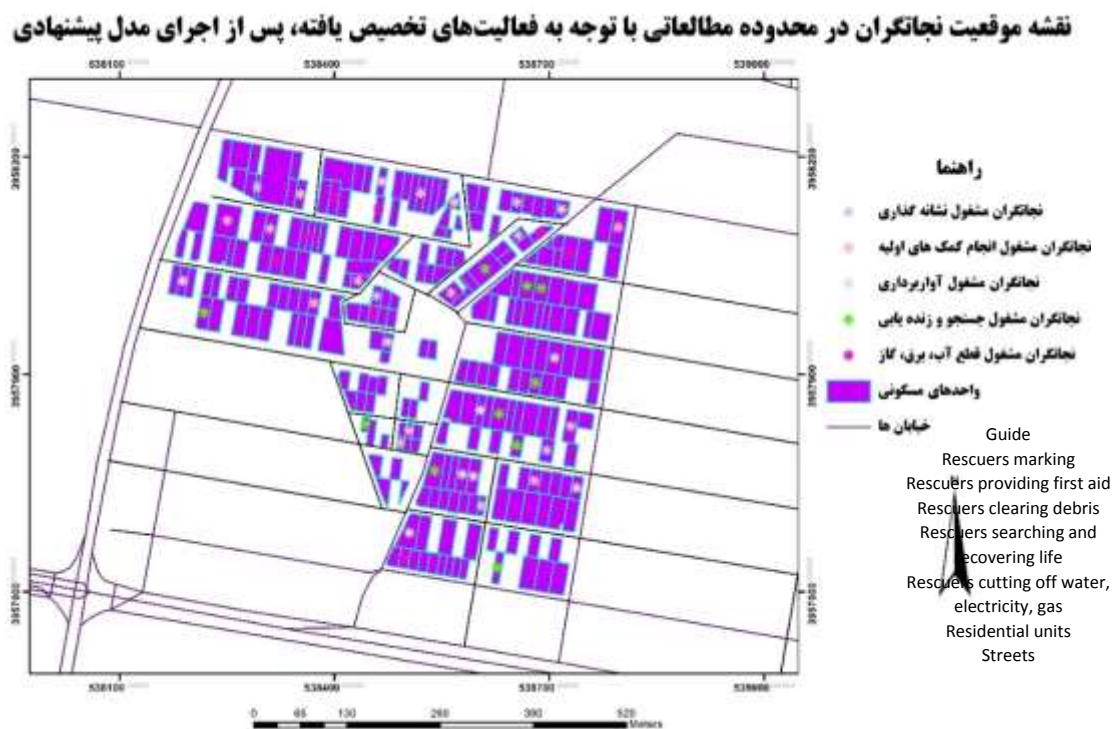
نقشه موقعیت نجاتگران در محدوده مطالعاتی، پس از اجرای مدل پیشنهادی



شکل ۷: تخصیص انجام شده با استفاده از هوش مکانی در زمین‌لرزه فرضی شبیه‌سازی شده

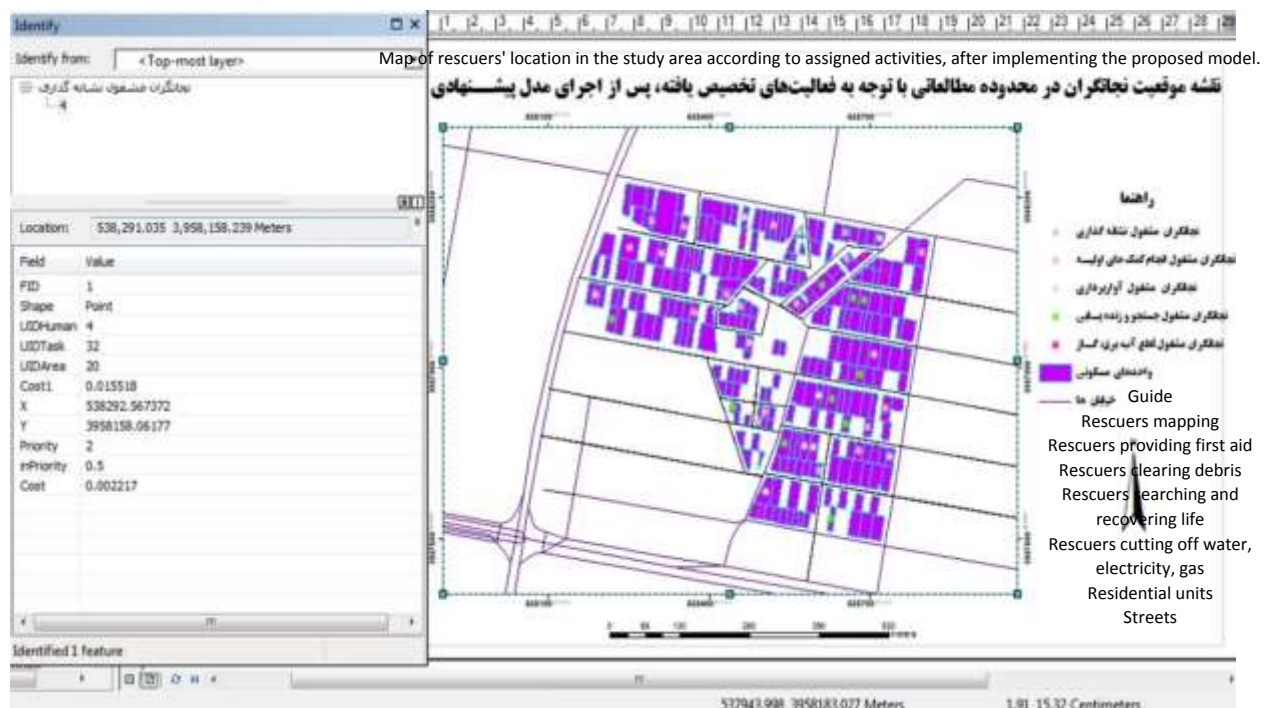
Fig. 7: Allocated using Geo-AI in a simulated earthquake

Map of rescuers' location in the study area according to assigned activities, after implementing the proposed model.



شکل ۸: تخصیص انجام شده تیم‌های جستجو و نجات به همراه فعالیت‌های اختصاص یافته با هوش مکانی

Fig. 8: Allocation of search and rescue teams with assigned activities using Geo-AI



شکل ۹: اطلاعات توصیفی تخصیص انجام شده برای یکی از نجاتگران

Fig. 9: Descriptive information of allocated for one of the rescuers

جدول ۲: مقایسه نتایج اجرای مدل پیشنهادی و اعتبارسنجی آن

Table 2: Comparison of the results of the proposed method and its validation

ارزش محاسبه شده برای تیم نجات Calculated value for the rescue team	مدل استفاده شده Model used
۱/۶۲۸۶۵۰۹ 1.6286509	استفاده از روابط و جميع پارامترها و اولویت‌بندی‌ها بدون استفاده از الگوریتم پیشنهادی و به صورت تصادفی Using relationships and all parameters and prioritizations without using the proposed algorithm and randomly
۴/۳۰۲۸۴۵۶ 4.3028456	استفاده از روابط و جميع پارامترها و اولویت‌بندی‌ها با استفاده از الگوریتم پیشنهادی Using relationships and all parameters and prioritizations using the proposed algorithm

نتیجه‌گیری

هوش مکانی راهکاری نوین در مسائل مکانی می‌باشد که با بهره‌گیری مناسب از الگوریتم‌های هوش مصنوعی و یادگیری ماشین می‌توان به بهبود حل مسائل مکانی پرداخت و به آن‌ها سرعت بخشید در حالیکه دقت مناسبی هم حفظ شود. در پژوهش حاضر که پیرامون انجام جستجو و نجات پس از رخداد زمین‌لرزه می‌باشد، پارامترهای مهم توسط مطالعه تحقیقات پیشین و صحبت با افراد خبره، شناسایی و ارزیابی شد. ابتدا یک زمین‌لرزه شبیه‌سازی شده و از نتایج آن که ارزیابی خسارات سازه‌ای و انسانی ۲۵۴ واحد مسکونی در بخشی از شهر تهران بوده است، به عنوان پارامترهای کلیدی برای تخصیص فعالیت‌های جستجو و نجات برای نجاتگران استفاده می‌شود. انواع فعالیت‌ها، نکات مهم در جستجو و نجات در آوار و زمین‌لرزه، مورد بررسی و اولویت‌بندی و مقداردهی قرار گرفت.

در ادامه با استفاده از هوش مصنوعی و یادگیری ماشین به ایجاد هوشی مکانی برای بهبود عملکرد جستجو و نجات پس از زمین‌لرزه پرداخته شد. در نهایت با تبیین روابط ریاضی متشکل از پارامترهای پژوهش حاضر و یادگیری تقویتی مدلی برای جستجو و نجات در زمین‌لرزه آماده و پیاده‌سازی شد. نقشه‌ها و فیلدهای تخصیص یافته نیز نمایش و توضیح داده شد و جهت ارزیابی مدل پیشنهادی همانطور که در قسمت یافته‌ها در جدول شماره ۲ بیان شد اجرای الگوریتم پیشنهادی با حالت تصادفی و دون استفاده از مدل پیشنهادی مقایسه شد و مشخص شد مدل پیشنهادی این پژوهش موجب بهبود ۲/۶۴ برابری نتایج حاصله از تخصیص نجاتگران نسبت به حالتی است که از این مدل استفاده نشود.

مشارکت نویسندگان

در این مقاله نویسندگان به سهم برابر مشارکت داشته‌اند.

تعارض منافع

«هیچ‌گونه تعارض منافع توسط نویسندگان بیان نشده است.»

منابع و مآخذ

[2] Mezyabadi, Shahryar. 2012. Search and rescue in collapsed buildings (rubble removal). Tehran: Nakhil [In Persian].

[3] N. Bahrami, 2019. Using Tabu Search Algorithm and Geospatial Information System for Managing of the Relief and Rescue Teams, Journal of Geomatics Science and Technology 8 (3), 179-18.

[4] N. Bahrami, M. Argany, N. Neysani Samani, A.R. Vafaei Nejad, 2021. Designing a Context-aware Recommender System in the Optimization of the Relief and Rescue by Ant Colony Optimization Algorithm and Geospatial Information System, Journal of Geomatics Science and Technology 11 (2), 153-162.

[5] Giwehchi, Saeed et al. 2013. Locating temporary housing after an earthquake using GIS and AHP technique, case study: Region Six of Shiraz. Urban and regional studies and research. Year 5. Issue 17 [In Persian].

[6] Najavan, Mehdi. Babak Omidar. Ismail Salehi. 2013. Locating temporary housing using fuzzy algorithms; Case study: District One of Tehran Municipality. Issue 31 [In Persian].

[7] Elnaz Ali Asl Khiabani Abolghasem Sadeghi Niaraki Mustafa Ghodousi, Routing of relief after an earthquake (Case study: Part of District One of Tehran) Routing of relief after an earthquake (Case study: Part of District One of Tehran), Source: Journal of Rescue and Relief, Volume 9 Winter 2017 (2018) Issue 4 (36) [In Persian].

[8] Tehran City Crisis Prevention and Management Organization, Deputy for Prevention and Risk Reduction. 2008. Rapid Earthquake Damage and Casualty Estimation System in Tehran City [In Persian].

[9] Comprehensive National Rescue and Relief Plan. 2003

[10] Rasekh, A., Vafaeinezhad, A. R. (2012), "Developing a GIS Based Decision Support System for Resource Allocation in Earthquake Search and Rescue Operation", Computational Science and Its Applications – ICCSA 2012, Volume 7334 of the series Lecture Notes in Computer Science PP. 275-285. Springer

[11] Vafaeinejad, Alireza et al. 2009. A New Method for Modeling and Planning Human Group Activities in Space-Time. Tehran: Amir Kabir, Civil Engineering. Year 41. Number 1.

[12] Vafaeinezhad, A. R.; A. A. Alesheikh, J. Nouri, 2010: Developing a spatio-temporal model of risk management for earthquake life detection rescue team. International Journal of

[1] Hosseini, Maziar. 2008. Crisis Management. Tehran: Shahr Publishing House [In Persian].

[25] Minal Shahakar, S. A. Mahajan, Lalit Patil, 2024, Optimizing System Resources and Adaptive Load Balancing Framework Leveraging ACO and Reinforcement Learning Algorithms, J. Electrical Systems 20-1s (2024): 244 – 256

[26] Cláudio Alves, Israel Mendonç, Vanessa de Almeida Guimarães, Pedro Henrique González, 2024, ACO with Reinforcement Learning applied to Rescues Operations on Urban Forests, 2024 IEEE Congress on Evolutionary Computation (CEC) | 979-8-3503-0836-5/24/\$31.00  2024 IEEE | DOI: 10.1109/CEC60901.2024.10612050

[27] Izadi, Arman. 2010. A Review of Disaster Management Fundamentals. Tehran: Rescue and Relief Organization.

[28] N Bahrami, M Argany, M Jelokhani Neyaraki, A Vafaeinezhad, Providing a spatial approach in the rescue and relief management after the earthquake, Environmental Management Hazards 6 (2), 117-129.

[29] Vafaeinezhad, A.R. Alesheikh, A.A. Hamrah, M. Reza Nourjou, R. Shad, R. (2009), "Using GIS to Develop an Efficient Spatio-temporal Task Allocation Algorithm to Human Groups in an Entirely Dynamic Environment Case Study: Earthquake Rescue Teams". Computational Science and Its Applications – ICCSA 2009. Volume 5592 of the series Lecture Notes in Computer Science. pp 66-78. 2009.

[30] Sharifi Sadeh, Mehrab. 2010. Disaster Assessment. Scientific Quarterly Journal of Rescue and Relief. Year 2. Issue 4 [In Persian].

[31] Watkins, C.J.C.H. and Dayan, P. (1992) Q-Learning. Machine Learning, 8, 279-292. <http://dx.doi.org/10.1007/BF00992698>

معرفی نویسندگان

AUTHOR(S) BIOSKETCHES

ناهید بهرامی دانشجوی دکتری دانشگاه تهران می‌باشد. در رشته مهندسی عمران- نقشه‌برداری و GIS تحصیلات خود را گذرانده است. فعالیت‌های پژوهشی وی در حوزه GIS و هوش مصنوعی و بافت آگاهی در بلایای طبیعی می‌باشد و مقالات داخلی و خارجی در این حوزه ارائه نموده است.

Bahrami, N., Faculty of Geography, Tehran University, Tehran, Iran.

 nd.bahrami@ut.ac.ir



میثم ارگانی دانشیار گروه GIS و سنجش از دور دانشگاه تهران می‌باشد. زمینه تخصصی ایشان بهینه سازی و شهرهای هوشمند می‌باشد. در حال حاضر ایشان مقالات علمی بسیاری در مجلات و کنفرانس‌های علمی ارائه نموده‌اند و همچنین در کمیته علمی و داوری مجلات و کنفرانس علمی ملی و بین‌المللی فعالیت دارند.

Environmental Science & Technology. March 2010, Volume 7, Issue 2, pp 243–250.

[13] N Bahrami, M Argany, NN Samani, AR Vafaeinejad, Designing a context-aware recommender system in the optimization of the relief and rescue. The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences. Volume 42, Pages 171-177.

[14] Li Yan, Shohaib Mahmud, Haiying Shen, Natasha Zhang Foutz and Joshua Anton, 2020, MobiRescue: Reinforcement Learning based Rescue Team Dispatching in a Flooding Disaster, 2020 IEEE 40th International Conference on Distributed Computing Systems (ICDCS)|978-1-7281-7002-2/20/\$31.00 2020IEEE| DOI: 10.1109/ICDCS47774.2020.00033

[15] Zhaojia Tang, Ping Wang, Yong Wang, Changgeng Wang, Yu Han, 2022. Distributed Small-Step Path Planning and Detection Method for Post-earthquake Robot to Inspect and Evaluate Building Damage. Published in Frontiers in Neurorobotics 15 August 2022, Engineering, Environmental Science.

[16] Xiaoyan Li, Xuedong Liang, Xia Wang, Rong Wang, Lingli Shu, Wentao Xu, 2023, Deep reinforcement learning for optimal rescue path planning in uncertain and complex urban pluvial flood scenarios, Applied Soft Computing 144 (2023) 110543

[17] Juil Jeon, Myungin Ji, Jungho Lee, Kyeong-Soo Han and Youngsu Cho, 2024, Deep Learning-Based Emergency Rescue Positioning Technology Using Matching-Map Images, Remote Sens. 2024, 16, 4014. <https://doi.org/10.3390/rs16214014>

[18] Jin Zhang, Hao Xu, Ding Liu and Qi Yu, 2025, Advancing Dynamic Emergency Route Optimization with a Composite Network Deep Reinforcement Learning Model, Systems 2025, 13, 127. <https://doi.org/10.3390/systems13020127>

[19] Sutton, R. S., & Barto, A. G. (2018). Reinforcement Learning: An Introduction (2nd ed.). MIT Press. [ISBN: 978-0262039246].

[20] Arulkumaran, K., Deisenroth, M. P., Brundage, M., & Bharath, A. A. (2017). A Brief Survey of Deep Reinforcement Learning. IEEE Signal Processing Magazine. DOI: 10.1109/MSP.2017.2743240

[21] Schulman, J., et al. (2017). Proximal Policy Optimization Algorithms. arXiv preprint arXiv:1707.06347.

[22] Mnih, V., et al. (2015). Human-level control through deep reinforcement learning. Nature. DOI: 10.1038/nature14236

[23] Lillicrap, T. P., et al. (2015). Continuous control with deep reinforcement learning. arXiv:1509.02971.

[24] Jalumuru Nalini, P. M. Khilar, 2021. Reinforced Ant Colony Optimization for Fault Tolerant Task Allocation in Cloud Environments, Wireless Personal Communications (2021) 121:2441–2459. <https://doi.org/10.1007/s11277-021-08830-4>



علیرضا وفایی نژاد دانشیار گروه مهندسی نقشه برداری در دانشگاه شهید بهشتی می باشند. ایشان مدرک دکتری خود را در رشته مهندسی نقشه برداری-GIS دریافت نمودند. فعالیت های پژوهشی اخیر وی در حوزه هوش مصنوعی و کاربردهای GIS در محیط زیست می باشد. در حال حاضر ایشان مقاله علمی بسیاری در مجلات و کنفرانس های علمی ارائه نموده اند و همچنین در کمیته علمی و داوری مجلات و کنفرانس علمی ملی و بین المللی فعالیت دارند.

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

a_vafaei@sbu.ac.ir

Argany, M., Associate Professor at Faculty of Geography, Tehran University, Tehran, Iran.

argany@ut.ac.ir



علی درویشی بلورانی دانشیار گروه GIS و سنجش از دور دانشگاه تهران می باشد. زمینه تخصصی ایشان سنجش از دور در بحران گرد و غبار می باشد. در حال حاضر ایشان مقالات علمی بسیاری در مجلات و کنفرانس های علمی ارائه نموده اند و همچنین در کمیته علمی و داوری مجلات و کنفرانس علمی ملی و بین المللی فعالیت دارند.

Boloorani, A.D., Associate Professor at Faculty of Geography, Tehran University, Tehran, Iran.

ali.darvishi@ut.ac.ir

Citation (Vancouver): Bahrami N, Argany M, Boloorani A.D, Vafaeinejad A.R. [A Geo-AI Approach in the Post-Earthquake Rescue]. *J. RS. GEOINF. RES.* 2025; 3(1): 187-200

<https://doi.org/10.22061/jrsg.2025.11338.1086>



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 1, Serial Number 5, Winter & Spring 2025

Calibration of MODIS Water vapor data using multi-Layer perceptron neural network and radiosonde observations <i>K. Ghobadi, E. Javadnia, H. Jalili, A. Zandkarimi</i>	1-14
Object detection and classification with Sentinel-2 imagery using ResNet <i>P. Heidari, A. Milan, A. Gharagozlou</i>	15-36
Spatial modeling for optimal management of archaeological sites using photogrammetry and spatial information systems (Study area: Hegmataneh, Hamadan) <i>M. Sharifzadeh, A. Gharagozlo, S. Sadeghian</i>	37-52
Predicting Corn Yield Using Ensemble Learning with Satellite and Meteorological Data <i>A. Sabzali Yameqani, A. A. Alesheikh</i>	53-64
Four-dimensional cadastre design, a case study: A region of (IRAN: Tehran) <i>M. Momtazi, S. Sadeghian, A. Vafaeinejad</i>	65-84
Monitoring landslide areas in the Siah Bisheh Dam Project using Surveying and radar interferometry <i>A. Bayat, M.R. Seif, B.A. Beirami</i>	85-101
Photogrammetry, modern technology in cultural heritage documentation: A systematic review of related research in iran <i>A.M. Moazezi Mehr-e-Tehran</i>	103-118
Evaluation of Parameters Affecting Aerotriangulation Accuracy in Corridor Mapping <i>M. Ahmadi Asoor, A. Afary, E. Ghanbari Parmehr</i>	119-138
Development of a BIM-based data model in order to value and determine the owners' share of building components <i>N. Akhlaghi, A. Milan, A.Vafaeinezhad</i>	139-155
Study and investigation of spatial databases for modeling and creating 3D cadastre of underground utilities <i>M. Noormohamadi, Gr. Fallahi</i>	157-170
Advancing Cadastral Systems: Development of the Land Administration Domain Model (LADM) Country Profile for Iran <i>A. Zamiri, A. A. Alesheikh, B. Atazadeh, J. Jafari</i>	171-186
A Geo-AI Approach in the Post-Earthquake Rescue <i>N. Bahrami, M. Argany, A.D. Boloorani, A.R. Vafaeinejad</i>	187-200