



Research Article

OPEN ACCESS

Kharazmi Journal of Earth Sciences

Journal homepage <https://gnf.khu.ac.ir>

Landuse change mapping based on drone and ultracam aerial images

Amirhosein Babaeepour¹, Asghar Milan^{2*}

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

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

Article info

Article history

Received: 8 October 2024

Accepted: 1 December 2024

Keywords:

Change Detection, Landuse, Drone Photogrammetry, Classification, High Resolution Images.



Abstract

The use of drone imagery has become widespread in studies related to various fields, including urban planning. The application of drone photogrammetry as an advanced tool for analyzing urban and construction changes is considered a novel method in spatial-based research. In this study, the potential of drone imagery, specifically DJI Phantom 4 Pro RTK with a relative accuracy of 10 cm, alongside ultra-cam aerial images with a relative accuracy of 20 cm, was explored for identifying and analyzing land-use changes in densely urbanized areas of the Tabriz region. To achieve this, two data sets were utilized, including a corrected orthomosaic image from the ultra-cam camera captured on June 9, 2013, and raw drone images from the same area on July 4, 2022. After geometric correction and the creation of orthophotos from the raw drone images, with horizontal accuracy of 8 cm and vertical accuracy of 14 cm, two classification algorithms, maximum likelihood and minimum distance, were applied to the orthomosaic image and the drone orthophoto. The next step involved using the thematic change detection method to extract land-use changes in the identified classes based on the two classification algorithms. Visual evaluation of the results revealed that the building class experienced the least change compared to other classes. Quantitative findings showed that the Kappa coefficient and overall accuracy for the maximum likelihood and minimum distance classification methods were 0.8924 and 94.17%, and 0.5273 and 93.08%, respectively. Additionally, quantitative analysis indicated that the greatest land-use change involved the conversion of buildings to roads, while the least change occurred in the transformation from roads to barren land.

Introduction

Accurate information about land use and land cover serves as a rich data source for users in various fields, such as extraction of changes for improving urban planning, monitoring vegetation cover, and even identifying military operations (Boguszewski et al., 2021). Due to the importance of urban changes and their impacts on communities and the environment, the precise and detailed analysis of these changes using advanced research methods, spatial mapping tools, aerial photogrammetry and drone is considered one of the most significant challenges and opportunities in the field of geospatial sciences (Qin, 2014). The various stages of the change detection process have different algorithms and methods. The first step is to specify the objective for

change detection in order to choose appropriate information. This is crucial for conserving time and reducing costs to attain best data. (Yao et al., 2019). After determining the purpose of studying changes and selecting suitable images and data, preprocessing is conducted to prepare the inputs for various algorithms designed to detect and analyze changes. The first and most critical step in this process is the geometric correction of the images. Geometric distortions and errors, arising from various factors during image acquisition, pose a significant challenge to the effective implementation of change detection. If left uncorrected, these distortions can lead to issues such as noise and inaccuracies in the resulting analysis (Lv Zhiyong et al., 2021). The second step of the preprocessing process is

DOI <http://doi.org/10.22034/KJES.2024.10.2.107621>*Corresponding author: Asghar Milan; E-mail: a_milan@sbu.ac.ir

How to cite this article: Babaeepour, A., Milan, A., 2025. Landuse change mapping based on drone and ultracam aerial images. Kharazmi Journal of Earth Sciences 10(2), 443- 464. <http://doi.org/10.22034/KJES.2024.10.2.107621>



the image registration. Image registration, especially, is the act of overlaying two or more photographs of the same scene obtained at various times, from different angles, and/or with different sensors (Chavis et al., 2012). After preprocessing, the change detection stage will be performed. There are different categories according to the purpose of the study, the data used and the algorithms employed for change detection. A group of researchers have divided these methods into two main categories: algebra-based change detection and classification-based change detection. Algebra change detection is a pixel based change detection method where changes are detected pixel by pixel. On the other hand, classification based change detection method is the one which involve any kind of classification for either separate image or combination of images. Classification-based change detection techniques are also categorized in two: pre-classification and post-classification methods (Makuti et al., 2018). Therefore, for change detection of dense urban area in this study, two sets of data from different times have been utilized: one set consisting of high-resolution images of the Ultracam camera for the year 2013 and the other, comprising UAV images from the same area for the year 2022. The accuracy of landuse change detection using high-resolution images, such as UAV data and high-resolution images of Ultracam camera, is a key focus of this research. Additionally, comparing the accuracy of two pixel-based classification methods in classifying high-resolution images and evaluating their efficiency in identifying land cover changes are other important aspects of this study.

Materials and Methods

In the first step, the UAV images undergo radiometric correction, followed by the process of aerial triangulation and dense point cloud generation using ground control points. Subsequently, based on the dense point cloud, the DSM of the area is produced and ultimately the orthophoto of the area is generated. In the next step, for preprocessing and improving the overlay and alignment of images, it is necessary to extract tie points from common features in the images. This task will be

performed by matching images using mutual information and applying the Moravec corner detection operator on the relevant data. Then, the process of aligning and overlaying the common areas in the images is carried out. In the subsequent stage, the classification of the Ultracam Basemap orthomosaic image and UAV orthomosaic image is performed using the maximum likelihood and the minimum distance methods. The next stage involves post-processing the outputs of the previous stages using the majority-minority method to edit and correct the classification results. Further, for detecting changes in the existing classes from Time 1 data (The Ultracam Basemap Orthomosaic) to Time 2 data (UAV orthophoto) created by the two classification algorithms, the Thematic Change Detection method is employed. Finally, the last step involves the aggregation, quantification, and accuracy assessment of the land cover change detection results. The study area is a part of the city of Tabriz. This city is located at $46^{\circ} 25'$ east longitude and $38^{\circ} 2'$ north latitude from the Greenwich meridian, with an approximate elevation ranging from 1300 to 2100 meters above sea level. Additionally, it is situated in UTM Zone 38. To identify urban changes in this study, as mentioned, two sets of data have been used: one is the base map image from the Ultracam aerial camera for the year 2013 in Tabriz, and the other consists of 585 UAV images from the year 2022 from an area of the city of Tabriz. The UAV images were captured using a SONY_ILCE2000 camera with a 16mm focal length and were taken in a vertical orientation.

Results and Discussion

After producing the UAV orthophoto and assessing its accuracy, it was determined that the planimetric accuracy of the process was approximately 8 centimeters, and the altimetric accuracy (considering the ellipsoid height separation from the geoid) was approximately 14 centimeters. As evident from the visual interpretation of the change detection map of classes and land use, many areas in the building class have remained unchanged. This is predictable given the urban nature of the study area and the high density of building areas within it. From

the analysis and review of the quantitative results of class change detection built by the maximum likelihood classification method, it is found that the highest and lowest land use changes are from the building class to the road class with 9.7660% and from the road class to barren land with 1.5627%, respectively. Additionally, from the evaluation of the quantitative results of class change detection using the minimum distance method, it can be concluded that the highest percentage of land use changes is from the building class to the road class with 8.9948%, and the lowest is from the road class to barren land with 0.9934%. Another objective of this study is to compare and analyze the kappa coefficient and overall accuracy obtained from change detection using the maximum likelihood classification and minimum distance classification algorithms. As a result, based on the findings of the study, the maximum likelihood method demonstrated better accuracy and is preferred over the other method. However, this does not imply the complete superiority of the maximum likelihood algorithm over the minimum distance algorithm, as the minimum distance method performed better in classifying features in some image areas. In this research of land use change detection, the maximum likelihood algorithm showed significantly higher accuracy and better performance compared to the minimum distance method.

Conclusions

Various methods are available for change detection in remote sensing images. The objective of this study is to evaluate the performance of two pixel-based classification methods for identifying land use changes using images acquired from aerial digital cameras and UAV data. The use of these high-resolution images obtained from such platforms provides advantages such as reducing the preprocessing operations compared to satellite images and improving the accuracy of the change detection results. The results show that the accuracy of change detection in urban areas using The Ultracam orthomosaic basemap and pixel-based classification methods is at an acceptable level. It is noteworthy that in the study area considered in this



research, the accuracy of the maximum likelihood classification is better than the other method, but there is a possibility that the minimum distance method may have superior accuracy in other study areas. Additionally, it can be stated that although the two classification methods have performed similarly in terms of providing overall change detection results, they have shown different performances in presenting statistics and Fig. s for land use changes. Another important aspect of this study was assessing the feasibility of change detection using high-resolution images obtained from various platforms with different spatial resolutions, which, according to the results of this research, is implementable. Evaluating the use of high-resolution images obtained from the same platforms and examining object-based classification methods for detecting land use changes using high-resolution images are also areas that can be explored in future research.

References

- Boguszewski, A., Batorski, D., Ziemia-Jankowska, N., Dziedzic, T., Zambrzycka, A., 2021. LandCover.ai: Dataset for automatic mapping of buildings, woodlands, water and roads from aerial imagery. In Proceedings of the IEEE/CVF Conference on Computer Vision and Pattern Recognition, 1102–1110.
- Chavis, C., Anders, K.-H., Jankowski, P., 2012. Change detection for environmental monitoring using unmanned aerial vehicle (UAV) imagery. Marshall Plan Scholarship Program Final Project Report. Retrieved from <https://www.marshallplan.at>.
- Lv, Zhiyong., Liu, T., Benediktsson, J.A., Falco, N., 2021. Land cover change detection techniques: Very-high-resolution optical images—a review. *IEEE Geoscience and Remote Sensing Magazine* 10 (1), 44–63.
- Makuti, S., Nex, F., Yang, M.Y., 2018. Multi-temporal classification and change detection using UAV images. *The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences* 42, 651–658.
- Qin, R., 2014. An object-based hierarchical method for change detection using unmanned aerial vehicle images. *Remote Sensing* 6 (9), 7911–7932.

Yao, H., Qin, R., Chen, X., 2019. Unmanned aerial vehicle for remote sensing applications—A review. *Remote Sensing*, 11(12), 1443.

CRediT authorship contribution statement

 Amirhosein Babaeepour	Conceptualization, Software Validation, Formal analysis Resources, Data Curation Writing - Original Draft
 Asghar Milan	Methodology Writing - Review & Editing Supervision



Research Article

OPEN ACCESS

Kharazmi Journal of Earth Sciences

Journal homepage <https://gnf.khu.ac.ir>

تهیه نقشه تغییرات کاربری اراضی بر اساس تصاویر پهپادی و تصاویر هوایی دوربین التراکم

امیرحسین بابائی پور^۱، اصغر میلان^{۲*}

۱. دانشکده مهندسی عمران، آب و محیط زیست دانشگاه شهید بهشتی، تهران، ایران.

۲. دانشکده مهندسی عمران، آب و محیط زیست دانشگاه شهید بهشتی، تهران، ایران.

چکیده	اطلاعات مقاله
<p>امروزه استفاده از تصاویر پهپاد در مطالعات مرتبط با حوزه‌های مختلف از جمله برنامه‌ریزی شهری بسیار گسترش یافته است. بهره‌گیری از فتوگرامتری پهپاد به عنوان یک ابزار پیشرفته در تحلیل تغییرات شهری و ساختمانی، یک روش نوین در تحقیقات مربوط به مکانیابی محسوب می‌شود. لذا در این تحقیق، استفاده از تصاویر پهپاد مدل DJI_Phantom 4 Pro_RTK با دقت نسبی ۱۰ سانتی‌متر در کنار تصاویر رقومی هوایی دوربین التراکم ایکس با دقت نسبی ۲۰ سانتی‌متر، با تمرکز بر ارزیابی ظرفیت داده‌های پهپادی در شناسایی و تحلیل تغییرات کاربری اراضی در محیط‌های پر تراکم شهری منطقه تبریز مورد بررسی قرار گرفته است. بدین منظور از دو سری داده که شامل تصویر تصحیح شده ارتوموزاییک دوربین التراکم مربوط به روز ۲۰ خرداد ماه سال ۱۳۹۲ و تصاویر خام پهپاد از همان منطقه برای روز ۱۳ تیر ماه سال ۱۴۰۱ می‌باشد، استفاده شده است. در ادامه پس از تصحیح هندسی و تهیه ارتوفتو از تصاویر خام پهپادی با دقت مسطحاتی ۸ سانتی‌متر و دقت ارتفاعی ۱۴ سانتی‌متر، دو الگوریتم طبقه‌بندی حداکثر احتمال و حداقل فاصله بر روی تصویر ارتوموزاییک التراکم و تصویر ارتوفتو پهپادی اعمال شد. در مرحله بعد، از روش شناسایی تغییرات موضوعی برای استخراج تغییرات در کلاس‌های پوشش اراضی به وجود آمده به وسیله دو الگوریتم طبقه‌بندی، استفاده گردید. ارزیابی بصری نتایج نشان داد که در هر دو روش مورد استفاده، کلاس اراضی ساختمانی کمترین تغییر را نسبت به سایر کلاس‌ها داشته است. یافته‌های کمی بیانگر این است که ضریب کاپا و دقت کلی نتایج حاصل از طبقه‌بندی حداکثر احتمال و حداقل فاصله به ترتیب، ۰/۸۹۲۴ و ۹۴/۱۱۷۶ درصد و همچنین ۰/۵۲۷۳ و ۶۹/۲۳۰۸ بوده است. علاوه بر این، تحلیل نتایج کمی حاکی از آن است که بیشترین تغییرات کاربری اراضی مربوط به تبدیل کلاس ساختمان به جاده در حدود ۹ درصد بوده، در حالی که کمترین میزان تغییرات در تبدیل کلاس جاده به زمین بایر در حدود ۱/۵ درصد مشاهده شده است.</p>	<p>تاریخچه مقاله دریافت: ۱۴۰۳/۰۷/۱۷ پذیرش: ۱۴۰۳/۱۰/۰۱</p> <p>واژه‌های کلیدی شناسایی تغییرات، کاربری اراضی، فتوگرامتری پهپاد مینا، طبقه‌بندی، تصاویر با قدرت تفکیک بالا.</p> 

شهری، نظارت بر پوشش گیاهی و یا حتی شناسایی عملیات نظامی، برای کاربران محسوب می‌شود (Boguszewski et al., 2021). با توجه به اهمیت تغییرات شهری و تأثیرات آن بر جوامع و محیط زیست، تحلیل دقیق این تغییرات با استفاده از روش‌های پیشرفته تحقیقاتی، ابزارهای نقشه‌برداری فضایی، هوایی و فتوگرامتری پهپادی به عنوان یکی از مهم‌ترین چالش‌ها و فرصت‌ها در زمینه علوم مکانی مطرح است. (Qin, 2014). در حال حاضر، آشکارسازی و تحلیل تغییرات با استفاده از تصاویر با قدرت تفکیک مکانی بالا اخذ شده به وسیله سکوی ماهواره،

مقدمه
داده‌ها و تصاویر بدست آمده از سکوهای فتوگرامتری و سنجش از دور، به کمک تکنیک‌های پردازش تصویر، به طور گسترده‌ای برای ارائه و توصیف عوارض موجود در سطح زمین و تشخیص تغییرات به وجود آمده در مناطق شهری و روستایی استفاده شده است. اطلاعات دقیق در مورد کاربری و پوشش زمین، به عنوان منبع غنی از داده‌ها در زمینه‌های مختلف مانند آشکارسازی تغییرات در راستای بهبود برنامه‌ریزی

DOI <http://doi.org/10.22034/KJES.2024.10.2.107621>

*نویسنده مسئول: اصغر میلان a_milan@sbu.ac.ir

استناد به این مقاله: بابائی پور، ا. ح.، میلان، ا. (۱۴۰۳). تهیه نقشه تغییرات کاربری اراضی بر اساس تصاویر پهپادی و تصاویر هوایی دوربین التراکم. مجله علوم زمین خوارزمی.

جلد ۱۰، شماره ۲، صفحه ۴۴۳ تا ۴۶۴. <http://doi.org/10.22034/KJES.2024.10.2.107621>

توجیه دو تصویر نسبت به هم (Image registration) است. این مرحله عموماً، انجام فرآیند همپوشانی و تناظرابی (Image Matching) دو یا چند تصویر از یک صحنه یا از یک منطقه است که در زمان‌های مختلف، از زوایای دید مختلف، یا توسط حسگرها و سکوهای گوناگون و متفاوت اخذ شده و بدست آمده‌اند (Chavis et al., 2012). گفتنی است که گروهی از محققان روش‌های توجیه تصاویر را به دو گروه ناحیه‌مبنا و عارضه‌مبنا تقسیم‌بندی کرده‌اند (Sedaghat et al., 2011a). مرحله سوم در فرایند پیش‌پردازش، اعمال تصحیحات رادیومتریکی و به دنبال آن فیلتر کردن، حذف نویز و تعدیل تغییرات ناشی از تفاوت در درخشندگی پیکسل‌ها در بخش‌های مختلف تصویر به دلیل عواملی مختلفی مانند زاویه تابش خورشید، اثرات جوی و آب و هوایی و یا همچنین رطوبت خاک است. برای حل این چالش، کالیبراسیون سنسور نیز می‌تواند تأثیر نویز سنسورهای مختلف را کاهش دهد و این اثرات را به حداقل برساند (Chavis et al., 2012).

پس از اعمال پیش‌پردازش‌های لازم، در گام بعد، پیاده‌سازی فرایند آشکارسازی تغییرات انجام می‌پذیرد. دسته‌بندی‌های مختلفی با توجه به هدف مطالعه، داده مورد استفاده و الگوریتم‌های به کار برده شده برای استخراج تغییرات وجود دارد. جمعی از محققان آن را به دو دسته اصلی بارزسازی تغییرات مبتنی بر جبر و تشخیص تغییرات مبتنی بر طبقه‌بندی تقسیم کرده‌اند. فرایند تشخیص تغییرات مبتنی بر روابط جبری و آماری، از الگوریتم‌های پیکسل مبنا و از مقایسه پیکسل به پیکسل موجود در تصاویر برای بارزسازی تغییرات به وجود آمده و شناسایی آن بهره می‌برد در حالی که روش‌های تشخیص و استخراج تغییرات مبتنی بر طبقه‌بندی تصاویر، شامل بهره‌گیری از انواع مختلف الگوریتم‌های طبقه‌بندی تصاویر موجود در تکنیک‌های پردازش تصاویر سنجش از دوری و یا ترکیب آن‌ها و سپس تفسیر و تجزیه و تحلیل خروجی می‌شود. تکنیک‌های آشکارسازی تغییرات مبتنی بر طبقه‌بندی نیز، به دو دسته روش‌های پیش از طبقه‌بندی و پس از طبقه‌بندی، تقسیم می‌شود (Lv Zhiyong et al., 2018). روش‌های پیش از

رایج‌ترین روشی است که برای انجام پژوهش و پروژه‌هایی با این مضمون مورد استفاده قرار می‌گیرد. با این حال، تصاویر ماهواره‌ای با چالش‌هایی مواجه هستند؛ از جمله عدم داشتن کنترل مستقیم بر کیفیت آنها، تحت‌تأثیر قرار گرفتن توسط شرایط آب و هوایی، عدم انعطاف‌پذیری در رابطه با مسائل مربوط به قدرت تفکیک و زمان به‌دست‌آوری تصاویر (Makuti et al., 2018). به همین دلیل، موضوع بارزسازی تغییرات بر پایه تصاویر پهنابندی به سبب قابلیت انعطاف‌پذیری قدرت تفکیک مکانی آن‌ها و همچنین کاهش محدودیت‌های مربوط به اخذ داده نسبت به تصاویر ماهواره‌ای، جایگاه ویژه‌ای در بین محققان پیدا کرده است (Liu et al., 2022). مطالعات پیشین به طور گسترده به مزایای استفاده از پهپادها در جمع‌آوری داده‌های مکانی پرداخته‌اند. از جمله این مزایا می‌توان به سرعت بالای برداشت داده‌ها و تصاویر، نظارت مؤثر بر پروژه‌ها، بروزرسانی نقشه‌ها، مدل‌سازی سه‌بعدی و دسترسی آبی به داده‌های زمینی با قدرت تفکیک هندسی بالا اشاره کرد. همچنین، پهپادها به عنوان ابزاری کارآمد در شرایطی که انجام عملیات زمینی به دلیل عوامل مختلف، مانند شرایط نامساعد جوی، با محدودیت مواجه است، مورد استفاده قرار می‌گیرند. (Lahooti et al., 2020).

مراحل مختلف فرایند آشکارسازی تغییرات دارای الگوریتم و روش‌های گوناگونی است. اولین قدم، مشخص نمودن هدف برای آشکارسازی تغییرات به منظور انتخاب داده مناسب است. این امر نقش مهمی در صرفه‌جویی در زمان و هزینه، برای دستیابی به داده بهینه دارد (Yao et al., 2019). پس از مشخص نمودن هدف از مطالعه تغییرات و انتخاب تصاویر و داده‌های مناسب، مرحله بعدی، پیش‌پردازش آن‌ها به منظور آماده شدن برای الگوریتم‌های مختلف بارزسازی و تحلیل تغییرات است. اولین و مهم‌ترین گام در این خصوص، تصحیح هندسی تصاویر می‌باشد. جابجایی‌ها و خطاهای هندسی که در اثر موارد و علل مختلف به هنگام اخذ تصویر ایجاد می‌شود، یک مشکل اساسی در پیاده‌سازی فرایند شناسایی تغییرات است که در صورت عدم تصحیح آن مشکلاتی مانند نویز در تصویر به وجود می‌آید (Lv Zhiyong et al., 2021). دومین مرحله از فرایند پیش‌پردازش،

تکنیک‌های موجود در الگوریتم استخراج تغییرات پیش از طبقه‌بندی به‌عنوان دقیق‌ترین تکنیک‌های تشخیص تغییرات در نظر گرفته می‌شود، زیرا این روش‌ها به طور مستقیم، برای شناسایی و مکان‌یابی تغییرات مؤثر هستند و به راحتی قابل اجرا می‌باشند (Al Doski et al., 2013). در جدول (۱) تعدادی از روش‌های پیش از طبقه‌بندی به تفکیک هر کدام توضیح داده شده است.

طبقه‌بندی، تغییرات حاصل از داده‌های چند زمانه را بدون تولید نقشه‌های پوشش و کاربری اراضی طبقه‌بندی شده، آشکارسازی می‌کنند. این روش‌ها ممکن است داده‌های اصلی را قبل از ایجاد نقشه تغییرات، ویرایش نموده و یا ساده نمایند ولی کلاس‌های معنی‌داری در هر کدام از تصاویر فراهم نمی‌کنند. یکی از جنبه‌های محدود کننده هر کدام از روش‌های آشکارسازی پیش از طبقه‌بندی، تعیین حدآستانه تغییر می‌باشد (Hester et al., 2008). در عین حال، بسیاری از

جدول ۱- خلاصه‌ای از روش‌های مختلف استخراج تغییرات پیش طبقه‌بندی (Al Doski et al., 2013)

Table 1. Summary of different methods for extracting pre-classification changes (Al Doski et al., 2013)

محاسبه اختلاف بین دو تصویر اخذ شده در فضای رستری، به صورت پیکسل به پیکسل انجام می‌شود. انتظار می‌رود پیکسل‌های ناحیه‌ای که در دو تصویر تغییر کرده‌اند، در اطراف انتهای هیستوگرام تصویر توزیع شوند و ناحیه‌های بدون تغییر در اطراف مقدار صفر تجمع یابند	Image Differencing (ID)
به طور گسترده به عنوان یک تبدیل مؤثر جهت استخراج اطلاعات و کاهش ابعاد تصویر مورد استفاده قرار می‌گیرد. بیشتر اطلاعات در دو مؤلفه اول متمرکز می‌شوند، به خصوص مؤلفه اول که حاوی بیشترین اطلاعات است.	Principal Component Differencing (PCD)
نسبت‌بندی نیز یک روش ساده و سریع برای شناسایی مناطق تغییر یافته می‌باشد. به این معنا که مقادیر نسبت دو تصویر اخذ شده در دو تاریخ مختلف بر اساس باند به باند محاسبه می‌شود.	Image Ratioing (IR)
دو خروجی تولید می‌کند: یک خروجی به صورت برداری که نقشه تغییرات را نشان می‌دهد و دیگری تصویر حاصل از وسعت تغییرات را توصیف می‌کند. این روش، بردار تغییر، جهت و مقدار تغییر را از تاریخ اول به دوم نشان می‌دهد.	Change Vector Analysis (CVA)

می‌تواند برای آشکارسازی تغییرات در مناطق غیرقابل دسترس نیز مؤثر باشد.

وانگ (Wang, 2018) با استفاده از مدل رقومی سطح استخراج شده از تصاویر پهپاد، تغییرات کاربری اراضی در محیط شهری را بررسی کرد. ابتدا پارامترهای توجیه خارجی تصاویر با روش مثلث‌بندی دسته اشعه و نقاط کنترل زمینی تعیین شدند. سپس مدل رقومی سطح منطقه با روش تناظریابی متراکم چندمنامی (Speeded Up Robust Features) استخراج و تغییرات کاربری از طریق تفاضل مدل‌های رقومی سطح در زمان‌های مختلف شناسایی شد. نتایج تحقیق فوق بیان‌گر این بود که در استخراج تغییرات در مناطق رودخانه‌ای و جنگلی به وسیله این روش، میزان خطای متراکم قابل توجهی وجود

در سال‌های اخیر، پژوهش‌های متعددی در زمینه شناسایی تغییرات با بهره‌گیری از داده‌های پهپادی انجام شده است. بون‌پوک و همکاران (Boonpook et al., 2018) روشی نوین برای تشخیص سریع تغییرات در داده‌های چندزمانه پهپادی ارائه کردند که بر ترکیب اطلاعات ارتفاعی مدل رقومی سطح (Digital Surface Model) و تحلیل بافت تصاویر، مبتنی بود. در این مطالعه، از هر دو نوع تصویر زمین‌مرجع شده و زمین مرجع نشده برای آشکارسازی تغییرات استفاده شد. نتایج این پژوهش نشان داد که زمین‌مرجع‌سازی تصاویر موجب افزایش دقت استخراج تغییرات می‌شود. همچنین مشخص شد که ترکیب تصاویر قائم و مورب پهپاد، حتی بدون توجیه آن‌ها نسبت به سیستم مختصات زمینی، عملکرد مناسبی در تشخیص تغییرات دارد و

در دو بازه زمانی مختلف شناسایی شدند. نتایج آن‌ها بیانگر برتری روش‌های طبقه‌بندی شی‌گرایی KNN و SVM در تهیه نقشه‌ها بوده و دقت مدل شناسایی تغییرات با ارزیابی مشاهدات محلی مطلوب بود. همچنین امروزه بهره‌گیری از الگوریتم‌های نوین یادگیری ماشین و یادگیری عمیق جهت استخراج برخی عوارض خاص کاربری و پوشش اراضی و شناسایی تغییرات آن‌ها، مورد توجه بسیاری محققان در این زمینه قرار گرفته است. در پژوهش هان و همکاران (Han, et al., 2021)، تغییرات ساخت و ساز جاده‌ای با استفاده از تصاویر پهپادی و شبکه عصبی سیامی بررسی شد. تصاویر از دو زمان مختلف تهیه و ویژگی‌های متناظر آن‌ها با استفاده از تابع فاصله اقلیدسی محاسبه گردید. سپس با استفاده از تابع هزینه تضادی، تغییرات شناسایی شد. نتایج با ارزیابی دقت کلی (۸۵/۹۸)، دقت پیش‌بینی (۸۹/۷۰) و دقت بازیابی (۸۲/۵۷) نشان‌دهنده کارایی بالای مدل در استخراج تغییرات بود.

در حوزه آشکارسازی تغییرات با بهره‌گیری از تصاویر پهپاد، جمع‌آوری داده‌های مورد نیاز از اهمیت بالایی برخوردار است. مشکلات مربوط به پرواز پهپاد برای اخذ تصاویر چندزمانه و کسب مجوز پرواز برای بعضی از کشورها، و همچنین هزینه‌های فراوان آن در راستای تامین نیروی کاری متخصص در این زمینه، جزو موارد دشوار برای محققین در پیاده‌سازی روش‌های پیشنهادی آن‌ها گردیده است. همچنین محدود بودن میدان دید منطقه مورد مطالعه در تصاویر پهپاد از دیگر نقاط ضعف آن در تحقیقات دیگر است. لذا، برای تشخیص تغییرات در این پژوهش، از ادغام دو سری داده در زمان‌های مختلف که یک سری مربوط به تصاویر التراکم برای سال ۱۳۹۲ و دیگری مربوط به تصاویر پهپاد از همان منطقه برای سال ۱۴۰۱ می‌باشد، استفاده شده است. پژوهش حاضر، با ارائه مدلی جهت شناسایی تغییرات پوشش اراضی با استفاده از تصاویری با قدرت تفکیک مکانی، طیفی و رادیومتریکی متفاوت، سعی در بررسی ظرفیت و پتانسیل داده‌های پهپادی در زمینه استخراج تغییرات دارد و این نکته از موارد نوآوری این پژوهش نسبت دیگر تحقیقات محسوب می‌شود. نکته‌ی

دارد. در پژوهشی دیگر ماکوتی و همکاران (Makuti et al., 2018) روش‌های مختلف طبقه‌بندی و تشخیص تغییرات را بر روی تصاویر پهپادی ارزیابی کردند. آن‌ها الگوریتم‌های مربوط به دو رویکرد پیش از طبقه‌بندی و پس از طبقه‌بندی را مقایسه کردند و دریافتند که رویکرد پس از طبقه‌بندی عملکرد بهتری در استخراج تغییرات دارد. همچنین نتایج نشان داد که الگوریتم جنگل تصادفی (Random Forest) موجب افزایش نویز و کاهش دقت تفسیر تصاویر می‌شود، در حالی که روش میدان تصادفی شرطی (Conditional Random Field)، نویز را کاهش داده و نقشه‌های طبقه‌بندی شده‌ای با مرزهای هموارتر ارائه می‌دهد.

علاوه بر روش‌های ذکر شده در خصوص به‌کارگیری مستقیم داده‌های رستری در راستای آشکارسازی و استخراج تغییرات، محققان بوسیله فرایندهای دیگری با استفاده غیرمستقیم از این نوع داده‌ها و تصاویر، به استخراج تغییرات می‌پردازند. تهیه محصولات برداری حاصل از پس‌پردازش طبقه‌بندی داده‌های رستری و همچنین تولید نقشه کاربری اراضی، نوع دیگری از داده‌های مورد استفاده برای شناسایی تغییرات می‌باشد. در این خصوص می‌توان به تحقیق جی‌پوپا و همکاران (GBopa et al., 2021) اشاره نمود که در آن آشکارسازی تغییرات با استفاده از تصاویر پهپادی سال ۲۰۱۹ و مقایسه آن با نقشه مبنای سال ۲۰۱۵ صورت گرفت. پس از پیش‌پردازش تصاویر، تصحیحات هندسی و رادیومتریکی اعمال و ارتوفتو تولید گردید. سپس این ارتوفتوها به نقشه تبدیل شده و تغییرات با نقشه مبنای ۲۰۱۵ مقایسه شدند. نتایج نشان داد که تصاویر ارتوفتو می‌توانند در تهیه نقشه‌های دقیق، تحلیل جابجایی‌ها، برآورد خسارت سیلاب، مدیریت بحران در صنایع نفت و گاز و ارزیابی خسارت‌های حوادث طبیعی مؤثر باشند.

عربی و همکاران (Arabi Aliabad, et al., 2022) در تحقیق خود به ارزیابی تصاویر پهپادی، ماهواره‌ای و Google Earth برای تهیه نقشه‌های پوشش اراضی و شناسایی تغییرات در نواحی ساختمانی پرداختند. عوارض ساختمانی جدید در منطقه مورد مطالعه با مقایسه منحنی‌های طیفی پیکسل‌های موجود در تصاویر ماهواره Sentinel 2

مواد و روش‌ها

منطقه مورد مطالعه

منطقه‌ی مورد مطالعه قسمتی از شهر تبریز می‌است. این شهرستان در ۴۶ درجه و ۲۵ دقیقه طول شرقی و ۳۸ درجه و ۲ دقیقه عرض شمالی از نصف‌النهار گرینویچ واقع شده‌است و ارتفاع تقریبی آن از سطح دریا ۱۳۰۰ تا ۲۱۰۰ متر متغیر می‌باشد. شهرستان تبریز از دو ناحیه کوهستانی و دشت تشکیل شده‌است که ارتفاع آن از سطح دریا در نواحی دشتی به حدود ۱۳۱۰ متر رسیده و در مناطق کوهستانی این ارتفاع تا ۲۱۰۰ متر افزایش می‌یابد. همچنین این شهرستان در زون ۳۸ یوتی‌ام قرار دارد. شکل ۱، تصویر ماهواره Airbus از منطقه مورد مطالعه که از Google Earth Pro، تهیه شده است، نشان می‌دهد.

دیگری که باید به آن توجه داشت، ارزیابی و مقایسه رفتار دو الگوریتم قدرت‌مند پیکسل‌مبنا از منظر دقت با تحلیل نتایج طبقه‌بندی تصاویری با سکوی‌های اخذ متفاوت و قدرت تفکیک مکانی بالا، در این پژوهش است. همچنین نتایج بدست آمده از این پژوهش قابل‌استفاده برای بهینه‌سازی انتخاب نوع داده در مطالعات آینده خواهد بود.

با در نظر گرفتن مطالب فوق و با توجه به اهمیت به روزرسانی نقشه کاربری اراضی در مدیریت منابع و برنامه ریزی شهری و همچنین کارآمد بودن سکوی پهپاد در شناسایی تغییرات کاربری اراضی، در این پژوهش برای تشخیص تغییرات، از تصاویر پهپاد به همراه داده‌های مربوط به تصاویر التراکم بهره گرفته شده است.



شکل ۱- تصویر ماهواره‌ای محدوده مطالعاتی توسط نرم افزار Google Earth Pro

Fig. 1. Satellite image of the study area using Google Earth Pro software

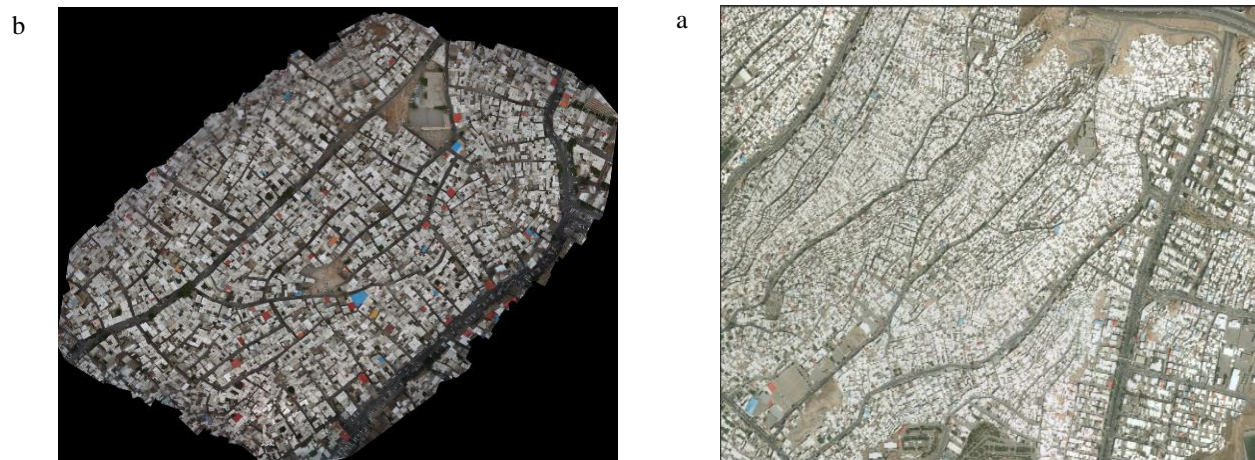
تصاویر هوایی دوربین التراکم ایکس با فاصله کانونی ۱۰۰ میلی‌متر و در ارتفاع پرواز ۹۵۰ متر و در تاریخ ۲۰ خرداد ماه سال ۱۳۹۲ اخذ شده است. لازم بذکر است دقت نسبی این تصاویر ۲۰ سانتی‌متر می‌باشد. همچنین تصاویر پهپادی این تحقیق، با استفاده پهپاد مدل

داده‌های مورد استفاده

برای شناسایی تغییرات شهری در این تحقیق، از دو سری داده، یکی تصویر نقشه‌ی مبنا دوربین التراکم ایکس مربوط به شهر تبریز و دیگری تعداد ۵۸۵ تصویر پهپاد از منطقه‌ای در شهر تبریز استفاده شده

در شکل شماره ۲-ا، تصویر ارتوموزاییک دوربین التراکم و در شکل ۲-ب، تصویر ارتوفتو پهپاد به نمایش درآمده‌اند.

DJI_Phantom 4 Pro_RTK در ارتفاع پرواز ۱۵۰ متر، با دوربین SONY_ILCE2000 دارای فاصله کانونی ۱۶ میلی‌متر و به صورت قائم تصویربرداری شده است. دقت نسبی این تصاویر ۱۰ سانتی‌متر بوده و همچنین در تاریخ ۱۳ تیر ماه سال ۱۴۰۱ برداشت شده است.



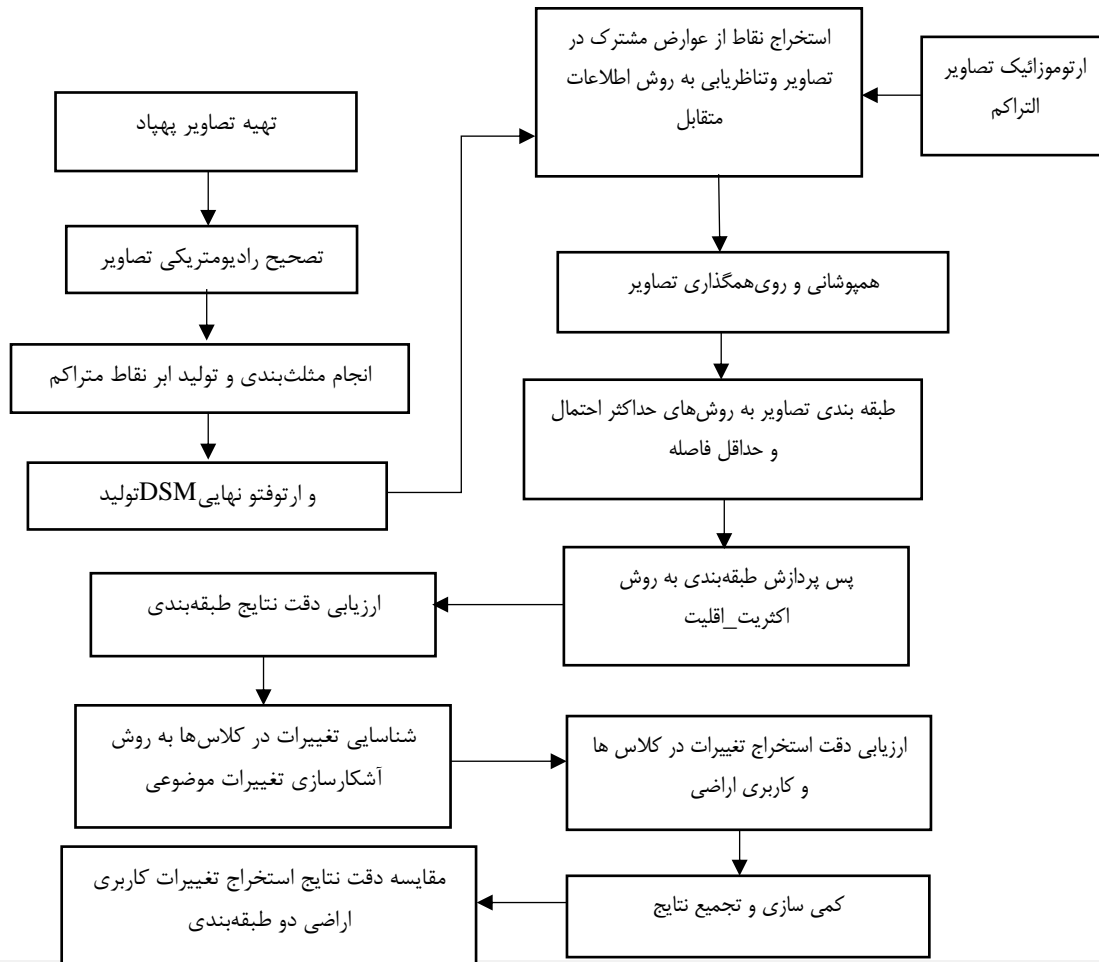
شکل ۲-ا) تصویر ارتوموزاییک التراکم تبریز مربوط به سال ۱۳۹۲ از ارتفاع ۹۵۰ متر، ب) تصویر ارتوفتو پهپاد از منطقه مطالعاتی مربوط به سال ۱۴۰۱ در ارتفاع ۱۵۰ متر

Fig. 2. a) Digital Orthomosaic Image captured by Ultracam of Tabriz from 2013 at an altitude of 950 meters, b) Digital Orthophoto Image captured by UAV of Study Area From 2022 at an altitude of 150 meters

روش تحقیق

مراحل صورت گرفته در این تحقیق در شکل ۳ آمده است. در ادامه در مورد جزئیات و مباحث تئوری مراحل مختلف این فرایند، مطالب ارائه خواهد شد.

قابل ذکر است که تصویر التراکم با پیکسل سایز ۲۰ سانتی‌متر نسبت به سیستم مختصات زمینی توجیه شده و اصطلاحاً زمین مرجع می‌باشد. تمام پیش‌پردازش‌های لازم به‌ویژه اعمال تصحیح رادیومتریکی به منظور حذف نویز و بهبود دقت تصویر در هنگام تهیه ارتوموزاییک التراکم لحاظ شده است.



شکل ۳- فلوجارت روش پیشنهادی

Fig. 3. Flowchart of the proposed method

منطقه و دقت بدست آمده پس از سرشکنی نقاط کنترل زمینی، روش بهتری برای تولید ارتوموزاییک به نظر می‌رسد و در این تحقیق از این روش استفاده می‌شود. در نهایت با توجه به قدرت تفکیک تصویر التراکم که برابر ۲۰ سانتی متر می‌باشد، از تصاویر پهپاد در همان قدرت تفکیک، خروجی ارتوموزاییک تهیه گردیده است. گام بعدی در پیاده سازی فلوجارت این پژوهش در آشکارسازی تغییرات، استخراج نقاط گرهی از عوارض مشترک تصاویر به منظور روی هم گذاری و هم پوشانی بهتر و تطابق دقیق تر آنها می‌باشد. بدین منظور با توجه سکوهی متفاوت اخذ تصاویر و داده های موجود در تحقیق و همچنین تفاوت در قدرت

در ابتدا برای تولید ارتوفتو از تصاویر پهپادی، اولین قدم انجام توجیه داخلی آنها، می‌باشد. قابل ذکر است که برای بهبود کیفیت نتایج حاصل از شناسایی تغییرات در این تحقیق، بر روی تصاویر پهپادی، تصحیح رادیومتریکی انجام گرفته است. همچنین برای توجیه تصاویر پهپاد نسبت به زمین به روش مستقیم در این تحقیق، لازم است که از نقاط کنترل زمینی کافی و سرشکن شده استفاده شود. به منظور سرشکنی نقاط کنترل زمینی از روش باندل در این پژوهش استفاده گردید که یکی از روشهای کارا در این زمینه می‌باشد. فرایند تولید ارتوموزاییک و مدل رقومی سطح از روی ابر نقطه متراکم، با توجه وسعت

اختصاص می‌یابد که احتمال وقوع آن در آن دسته بیشترین مقدار را نسبت به بقیه کلاس‌ها داشته باشد (Ahmad and Quegan, 2012). این احتمالات معمولاً بر اساس آماره‌های موجود در کلاس‌ها و همچنین اطلاعات موجود در پیکسل‌های مجاور و همسایه پیکسل اصلی محاسبه می‌شوند. به طور کلی، رویکرد حداکثر احتمال به عنوان یک روش نسبتاً دقیق برای طبقه‌بندی تصاویر سنجش از دوری و تحلیل آن‌ها و همچنین استخراج عوارض تصویری، بکار می‌رود. این روش با استفاده از آمار و احتمالات و روابط جبری، عوارض زمینی را با دقت مناسبی، طبقه‌بندی می‌کند و در مطالعات و پژوهش‌های مختلف از جمله تحلیل تغییرات شهری و مسائل محیط زیستی مورد استفاده قرار می‌گیرد و همچنین کاربرد فراوانی در مدیریت و برنامه‌ریزی شهری دارد (Soffianian and Madanian, 2015).

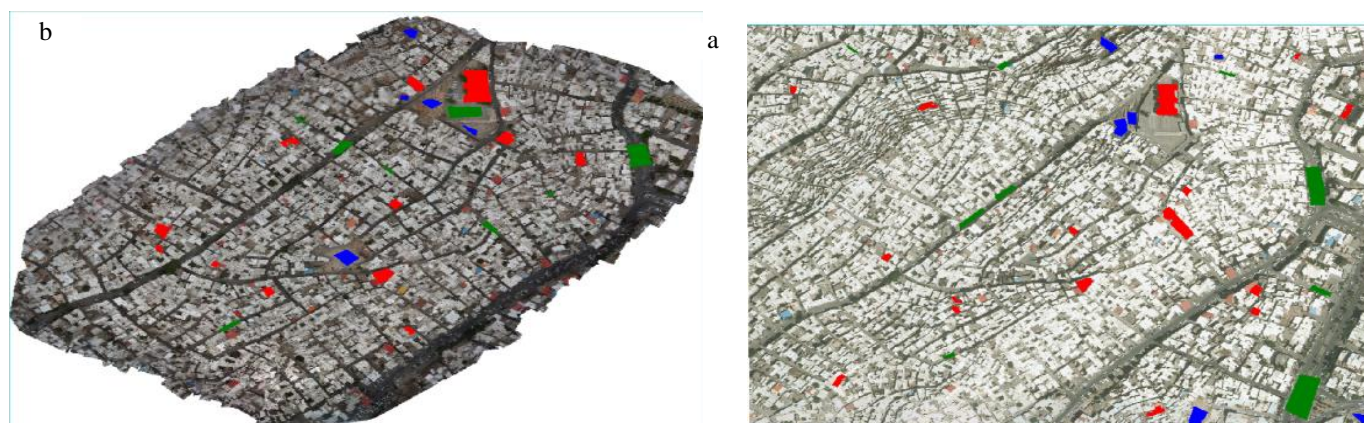
برای طبقه‌بندی حداکثر احتمال که جزو طبقه‌بندی‌های نظارت شده می‌باشد، نیاز به معرفی تعدادی داده‌های آموزشی برای انجام طبقه‌بندی است. از این رو برای طبقه‌بندی تصویر التراکم به سه کلاس جاده، ساختمان و زمین بایر با استفاده از این روش و با توجه به وسعت زیاد منطقه تحت پوشش در تصویر التراکم، گوناگونی طیف‌های رنگی در آن و همچنین وجود چالش‌های مختلف بافتی در تصاویر، تعداد ۴۵ داده آموزشی چندضلعی برای کلاس ساختمان، ۳۵ داده آموزشی چندضلعی برای کلاس جاده و تعداد ۱۵ داده چندضلعی برای کلاس زمین بایر در این تحقیق، مورد استفاده قرار گرفته است. ارزش‌گذاری پارامترهای مختلف تاثیرگذار در این روش به منظور طبقه‌بندی دقیق‌تر و بهینه‌تر تصاویر، باعث استخراج تغییرات بهتری نیز در روند پژوهش خواهد شد. در نتیجه ارزش حدآستانه طبقه‌بندی حداکثر احتمال برابر ۱۰ و همچنین ارزش مولفه مقیاس (Scale Factor) آن برابر ۲۵۵ در این پژوهش، مورد ارزیابی قرار می‌گیرد. در طبقه‌بندی تصویر ارتوفتو پهبادی، تعداد داده‌های آموزشی با توجه به عوامل گفته شده به نسبت تصویر ارتوموزابیک دوربین التراکم، کم‌تر است. از این رو تعداد ۲۵ داده آموزشی چندضلعی برای کلاس ساختمان، تعداد ۱۵ داده آموزشی برای کلاس جاده و تعداد ۱۰ داده آموزشی برای کلاس زمین بایر در نظر

تفکیک طیفی تصاویر، استفاده از روش تناظرایی اطلاعات متقابل و استفاده از عملگر موراک برای استخراج نقاط گرهی از عوارض نقطه‌ای و لبه‌ی ساختمان‌ها گزینه‌های مناسبی می‌باشند. رویکرد اطلاعات متقابل به عنوان یک معیار کارآمد جهت تناظرایی تصاویر سنجش از دور در نظر گرفته شده و همچنین کارایی بالاتری در مقایسه با معیار ضریب همبستگی (Cross Correlation) دارد. به طور کلی روش اطلاعات متقابل جزو روش‌های تناظرایی ناحیه مبنا بوده و به منظور تناظرایی تصاویر چند منبعی اخذ شده توسط سنسورهای مختلف ارائه شده است (Sedaghat et al., 2011b). همچنین این معیار از نظریه اطلاعات برگرفته شده است و به عنوان میزان وابستگی آماری میان دو دسته داده تعریف می‌شود. مفهوم اطلاعات متقابل ذاتاً مرتبط با آنتروپی یک متغیر تصادفی است که میزان داده‌های آماری موجود در آن را نشان می‌دهد. (Zitova and Flusser, 2003).

در قدم بعد با توجه به الگوریتم پیشنهادی، هدف اعمال طبقه‌بندی‌های لازم بر روی تصاویر به منظور استخراج تغییرات کاربری اراضی می‌باشد. در این خصوص هرکدام از طبقه‌بندی‌ها بصورت جداگانه بر روی تصاویر اعمال می‌گردند و دقت نتایج هر روش طبقه‌بندی بصورت جدا محاسبه خواهد شد. با توجه به اینکه بخش قابل توجهی از منطقه مطالعاتی دارای عوارض متراکم ساختمانی بوده و دیگر پوشش اراضی موجود در منطقه از نوع کاربری جاده و زمین بایر می‌باشد، به همین علت تغییرات پوشش اراضی سه کلاس مذکور در این تحقیق مورد بررسی قرار خواهد گرفت. لازم بذکر است که پوشش دیگر عوارض در تصاویر منطقه مطالعاتی به میزان ناچیزی بوده و بدین جهت طبقه‌بندی و آشکارسازی تغییرات آن‌ها در نظر گرفته نشده است.

یکی از روش‌های طبقه‌بندی استفاده شده برای آشکارسازی تغییرات در این پژوهش، روش طبقه‌بندی حداکثر احتمال می‌باشد. این تکنیک طبقه‌بندی، یکی از الگوریتم‌های مهم در پردازش تصاویر سنجش از دوری محسوب می‌شود. در این فرایند، احتمال وجود هر پیکسل در هر یک از دسته‌ها و کلاس‌های ممکن، برای هر یک از عناصر تصویری بصورت جدا، محاسبه می‌شود. سپس پیکسل به دسته‌ای

شکل ۴-ا، تصویر پراکنش نمونه های آموزشی در تصویر ارتوموزاییک التراکم و شکل ۴-ب تصویر آن ها در ارتوفتو پهپادی را نشان می دهد.



شکل ۴-ا) پراکنش نمونه های آموزشی در تصویر التراکم، (ب) پراکنش نمونه های آموزشی در تصویر ارتوفتو پهپادی
Fig. 4. a) Distribution of training samples in the Ultracam image, b) Distribution of training samples in the drone orthophoto image.

موجود در این تحقیق به روش حداقل فاصله نیز، تصاویر ارتوموزاییک التراکم و ارتوفتو پهپادی با در نظر گرفتن تعداد داده های آموزشی مشابه در حالت قبل، به سه کلاس ساختمان، جاده و زمین بایر طبقه بندی می شوند. گفتنی است که مقادیر پارامترهای بیشترین انحراف معیار و بیشترین خطای فاصله در روش طبقه بندی حداقل فاصله، برای تصاویر ارتوموزاییک شده پهپاد و التراکم، به ترتیب برابر با ۲۰ و ۱ تعیین شدند. به منظور گویاسازی و تفسیر بهتر بصری و همچنین ارتقا دقت کلی طبقه بندی، در این پژوهش، مرحله پس پردازش انجام گرفته است. از میان روش های گوناگون پس پردازش طبقه بندی، در این مطالعه، تکنیک اکثریت_اقلیت (Majority/Minority) اجرا گردیده است. این الگوریتم با در نظر گرفتن تعداد پیکسل های همسایه در اطراف هر پیکسل، مقدار حداکثری و یا مقدار حداقلی آن ها را در نظر گرفته و طبق آن دیگر پیکسل های همسایه را تبدیل به تعداد اکثریت پیکسل ها و یا اقلیت پیکسل ها در اطراف پیکسل مرکزی می کند. در پیاده سازی این الگوریتم، از یک کرنل 13×13 استفاده شده و همچنین ارزش وزن پیکسل مرکزی این کرنل، عدد ۳ می باشد. این

گرفته شده است. در این پژوهش، ارزش گذاری پارامترهای مختلف برای روش طبقه بندی حداکثر احتمال در تصویر ارتوموزاییک پهپادی دقیقاً برابر با ارزش گذاری آن ها برای تصویر التراکم می باشد.

دیگر روش طبقه بندی بکار برده شده در این تحقیق، روش حداقل فاصله می باشد. در طبقه بندی حداقل فاصله، یک نمونه از جامعه آماری (یعنی گروهی از بردارها) به کلاسی طبقه بندی می شود که توزیع محاسبه شده یا تخمین زده آن نمونه، بیشترین شباهت را به توزیع تخمین زده شده از نمونه ای که از قبل در آن کلاس مشخص طبقه بندی شده، دارد (Ghimire and Wang, 2012). به بیان دیگر در این تکنیک ابتدا میانگین همه مقادیر پیکسل های موجود در هر کلاس که قبلاً با استفاده از روش تعیین نواحی تعلیمی از همدیگر تفکیک گردیده اند، تعیین شده و سپس فاصله اقلیدسی بدست آمده از بازتاب هر پیکسل را، از میانگین تمام کلاس ها محاسبه می کنند. در نتیجه هر پیکسل به کلاسی تعلق می گیرد که کمترین مقدار فاصله را تا میانگین سایر کلاس ها داشته باشد. این نوع طبقه بندی کننده از نظر ریاضی ساده و از نظر محاسباتی کاراست. استفاده از روش طبقه بندی حداقل فاصله در مسائل سنجش از دور، مانند شناسایی گونه های گیاهی و آشکارسازی آفات کشاورزی، مورد توجه بوده است (Wacker and Landgrebe, 1972). برای طبقه بندی داده های

انجام می‌پذیرد. این تکنیک ابتدا هر کدام از تصاویر اخذ شده در دو تاریخ مختلف را به صورت مستقل طبقه‌بندی نموده و سپس نقشه‌ی تغییرات کاربری اراضی را با آشکارسازی کلاس‌های تغییر یافته (از کلاس قبلی به کلاس جدید) تولید می‌کند (Peiman, 2011). استفاده از این روش در استخراج و تفسیر بهتر تغییرات کاربری اراضی، نتایج مطلوب‌تر و کاراتری نسبت به روش‌های دیگر مانند رویکرد پیش از طبقه‌بندی دارد. همچنین این تکنیک، با طبقه‌بندی هر تصویر به صورت جداگانه، تاثیر خطاهای ناشی از تفاوت شرایط جوی و یا اختلاف روشنایی موجود در محیط دو حسگر در در زمان‌های مختلف اخذ تصاویر را با نرمال‌سازی و تصحیح آن‌ها، به حداقل می‌رساند. با این حال، در این رویکرد، دقت استخراج تغییرات، وابسته به دقت طبقه‌بندی هر کدام از تصاویر بصورت جداگانه است (Qin et al., 2016). در پژوهش انجام گرفته، تعریف یک فیلتر پایین‌گذر با اندازه کرنل ۳*۳ و همچنین یک کرنل ۹*۹ به منظور تراکم‌سازی و شفاف‌سازی پیکسل‌ها، نقش مهمی در بهبود ساخت یک تصویر طبقه‌بندی شده برای تشخیص تغییرات کاربری اراضی، ایفا خواهند کرد. در نهایت دقت استخراج تغییرات کلاس‌های ایجاد شده در هر روش طبقه‌بندی نیز، با استفاده از مقدار دقت کلی طبقه‌بندی و ارزیابی معیار ضریب کاپا، مورد بررسی و مقایسه قرار خواهد گرفت. در مورد دلیل بهره‌گیری از روش‌های طبقه‌بندی مذکور باید به این نکته اشاره کرد که پس از بررسی و آزمایش دیگر الگوریتم‌های طبقه‌بندی پیکسل‌مبنا با استفاده از نمونه‌های آموزشی یکسان، مشخص شد که به جهت بالا بودن قدرت تفکیک مکانی و پیکسل‌سایز تصاویر این تحقیق، برخی الگوریتم‌های طبقه‌بندی قدرتمند مانند شبکه عصبی و ماشین بردار پشتیبان نتایج غیرقابل قبولی حتی از لحاظ بصری و دقت کمی پایینی ارائه نموده‌اند.

در نتیجه با مقایسه و تحلیل روش‌های مختلف در این زمینه در نهایت دو روش حداکثر احتمال و حداقل فاصله دقت بالاتر و نتایج مطلوبتری

روش، برای پیاده‌سازی عملیات پس پردازش، بر روی خروجی حاصل از طبقه‌بندی حداقل فاصله خروجی بدست آمده از روش حداکثر احتمال، اجرا شده است.

برای ارزیابی نتایج در مطالعه حاضر، از شاخص برآوردگر دقت مجموع، و دقت کاپا استفاده شده است. شاخص برآوردگر دقت مجموع، به‌عنوان پارامتر ارزیابی دقت طبقه‌بندی شناخته می‌شود. این شاخص در واقع برای محاسبه دقت نهایی الگوریتم طبقه‌بندی مورد استفاده قرار می‌گیرد و به‌صورت رابطه (۱) تعریف می‌گردد.

$$Accuracy_{Total} = \frac{Trace}{Total \text{ selected pixels}} * 100 \quad (1)$$

که در آن صورت کسر، عبارت "Trace" مجموع عناصر قطر اصلی ماتریس درهمی و مخرج کسر، یعنی عبارت "Total Selected pixel" برابر مجموع تعداد پیکسل‌ها با برچسب کلاس مورد نظر می‌باشد.

در نظر گرفتن دقت کلی طبقه‌بندی و همچنین ارزیابی ضریب کاپا در ماتریس درهمی، یکی از روش‌های مرسوم و مفید برای بررسی میزان کارایی طبقه‌بندی، مورد توجه قرار گرفته است. بدین منظور، لازم است که تعدادی نمونه کنترلی در هر کلاس به طور تصادفی برای بررسی ضریب کاپا و ارزیابی میزان دقت کلی نتایج طبقه‌بندی در نظر گرفته شوند که در این پژوهش این کار با انتخاب ۱۳ نمونه برای کلاس ساختمان، ۱۰ نمونه برای کلاس جاده و ۳ نمونه برای کلاس زمین بایر، برای بررسی میزان دقت در تصویر التراکم و تعداد به ترتیب ۱۳، ۹ و ۴ نمونه کنترلی به ترتیب برای کلاس‌های ساختمان، جاده و زمین بایر برای سنجش میزان دقت و صحت در تصویر ارتوفتو پهبادی، به طور تصادفی انتخاب خواهد شد. باتوجه به این نکته که اختلاف زمانی تصویر در زمان ۱ (تصویر ارتوموزاییک التراکم) و تصویر زمان ۲ (تصویر ارتوفتو پهبادی) در حدود ۱۰ سال است، لازم است که نمونه‌های آزمایشی هر تصویر در زمان مربوط به خود صورت پذیرد که همین موضوع، علت برداشت دو سری نمونه کنترلی بصورت مستقل در این تحقیق می‌باشد. پس از ارزیابی و مقایسه دقت طبقه‌بندی‌های انجام شده، فرایند آشکارسازی تغییرات با استفاده از رویکرد شناسایی تغییرات موضوعی،

از خود نشان داده‌اند. در همین راستا جدول شماره ۲ نمایش داده شده است.

جدول ۲- تحلیل و مقایسه ضریب کاپا و دقت کلی بدست آمده از الگوریتم‌های طبقه‌بندی نظارت شده

Table 2. Analysis and comparison of kappa coefficient and overall accuracy obtained from supervised classification algorithms

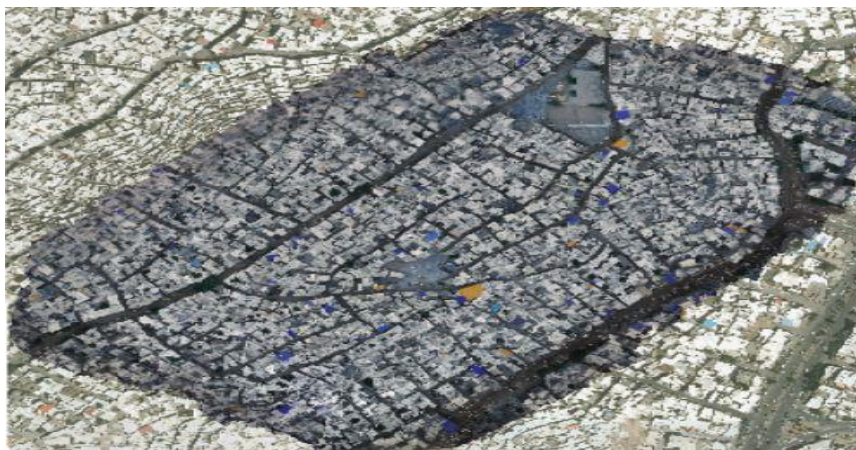
Classification Method	Overall Accuracy(Percent)	Kappa Coefficient
Mahalanobis distance classification	45	0.3
parallelepiped classification	38	0.22
Neural Net classification	18	0.05
Support Vector Machine	22	0.08
Spectral Angel Mapper Classification	30	0.14

ارائه نتایج و بحث

پیاده سازی مراحل پژوهش از نرم‌افزار پردازش تصاویر پهپاد PIX4D برای تصحیح رادیومتریکی و هندسی تصاویر پهپاد و تبدیل آن‌ها به ارتوموزاییک استفاده گردید. همچنین از نرم‌افزار ENVI 5.6 برای فرایند استخراج تغییرات استفاده شده است. انتخاب و تهیه نمونه کنترلی در هر کلاس برای ارزیابی دقت کلی نتایج طبقه‌بندی و بررسی ضریب کاپا در نرم افزار Google Earth صورت پذیرفت. در گام آخر فرایند کارتوگرافی خروجی‌های بدست آمده از هر مرحله و تهیه نقشه تغییرات کاربری اراضی، در نرم‌افزار ArcGIS Pro انجام گرفت.

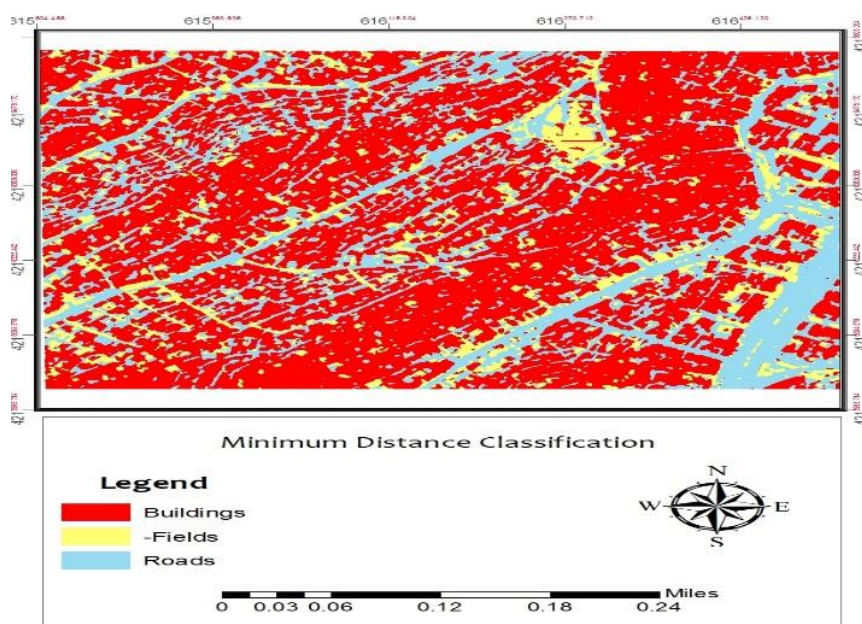
شکل ۵، همپوشانی و روی‌هم‌گذاری تصویر ارتوفتو پهپادی و ارتوموزاییک دوربین التراکم را نشان می‌دهد. قابل ذکر است که پس از تولید ارتوفتو پهپادی و بررسی دقت آن، مشخص شد که دقت مسطحاتی فرایند انجام شده حدود ۸ سانتی‌متر و دقت ارتفاعی (با در نظر گرفتن عدد جدایی بیضوی از ژئوئید) حدود ۱۴ سانتی‌متر است.

روش‌های گوناگونی برای آشکارسازی تغییرات در تصاویر سنجش از دوری موجود است. هدف از این پژوهش بررسی کارایی دو روش طبقه‌بندی پیکسل مبنا به منظور شناسایی تغییرات کاربری اراضی با استفاده از تصاویر اخذ شده به وسیله دوربین رقومی هوایی و داده‌های پهپاد است. کاربرد این تصاویر اخذ شده به وسیله این سکوها که دارای قدرت تفکیک مکانی بالایی نیز می‌باشند، در شناسایی تغییرات مزیت‌هایی مانند کاهش عملیات پیش‌پردازش تصاویر به نسبت تصاویر ماهواره‌ای و همچنین ارتقا دقت نتایج حاصل از استخراج تغییرات را در پی خواهد داشت. در این قسمت از تحقیق ابتدا، خروجی‌های بدست آمده در هر مرحله از فرایند روش پیشنهادی، به نمایش درآمده و بیان خواهد شد. سپس در ادامه، به تحلیل و اعتبارسنجی نتایج این پژوهش به صورت بصری و کمی پرداخته می‌شود. لازم به ذکر است که برای



شکل ۵- عمل هم پوشانی و روی هم گذاری تصویر ارتوفتو پهپادی و ارتوموزاییک دوربین التراکم (منبع: یافته های پژوهش)
 Fig. 5. Overlapping and registering of drone orthophoto and Ultracam orthomosaic images (Source: Research findings)

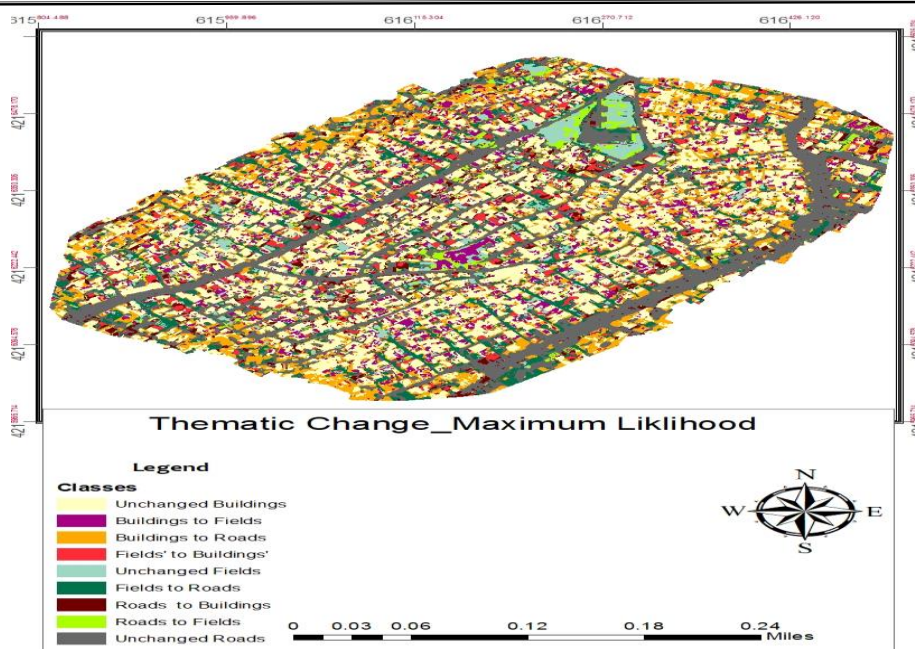
همچنین در شکل ۶، تصویر طبقه بندی شده تصویر ارتوموزاییک دوربین التراکم به روش حداقل فاصله به نمایش در آمده است.



شکل ۶- تصویر حاصل از طبقه بندی ارتوموزاییک دوربین التراکم به روش حداقل فاصله (منبع: یافته های پژوهش)
 Fig. 6. Image achieved from the classification of the UltraCam orthomosaic using the minimum distance method (Source: Research findings)

زیادی در کلاس ساختمان ها ثابت مانده است که با توجه به ماهیت شهری بودن منطقه مورد مطالعه و فراوانی تراکم نواحی ساختمانی در آن، قابل پیش بینی می باشد.

در شکل ۷، نقشه حاصل از تغییرات کاربری اراضی به وسیله طبقه بندی حداکثر احتمال به نمایش در آمده است. همان طور که از تفسیر بصری نقشه تغییرات کلاس ها و کاربری اراضی پیداست، نواحی



شکل ۷- نقشه تغییرات کاربری اراضی براساس طبقه‌بندی حداکثر احتمال (منبع: یافته‌های پژوهش)

Fig. 7. Landuse changes mapping based on maximum likelihood classification (Source: Research findings)

حداقل فاصله، به نمایش در آمده است. قابل ذکر است که همان‌طور که پیش‌تر ذکر شد، تعدادی نمونه کنترلی جهت ارزیابی دقت کلی نتایج و تحلیل ماتریس کاپا در نظر گرفته شده است.

در جداول ۳ و ۴، ارزش ضریب کاپا و مقدار دقت کلی بدست آمده از عناصر ماتریس درهمی، بترتیب در طبقه‌بندی تصاویر ارتوموزاییک التراکم و ارتوفتو پهپادی، با استفاده از روش‌های حداکثر احتمال و

جدول ۳- مقایسه روش حداکثر احتمال و حداقل فاصله برای تصویر التراکم

Table 3. Comparison of maximum likelihood and minimum distance methods for UltraCam image

Accuracy/Classification Method	Overall Accuracy(Percent)	Kappa Coefficient
Maximum likelihood	85%	0.7674
Minimum Distance	50%	0.2593

جدول ۴- مقایسه روش حداکثر احتمال و حداقل فاصله برای تصویر ارتوفتو پهپاد

Table 4. Comparison of maximum likelihood and minimum distance methods for UAV orthophoto images

Accuracy/Classification Method	Overall Accuracy(Percent)	Kappa Coefficient
Maximum likelihood	92.5226%	0.8868
Minimum Distance	66.6666%	0.5

ضریب کاپا و دقت کلی آشکارسازی تغییرات طبقه‌بندی این دو روش، برای دو تصویر ارتوموزاییک التراکم و ارتوفتو پهپادی می‌باشد. گفتنی

همچنین یکی دیگر از اهداف این تحقیق، مقایسه و تحلیل ضریب کاپا و دقت کلی حاصل از استخراج تغییرات با استفاده از دو الگوریتم طبقه‌بندی حداکثر احتمال و حداقل فاصله می‌باشد. جدول ۵، بیانگر

است که مقادیر بدست آمده در جدول ۵، با برداشت و معرفی نمونه‌های کنترلی در بازه زمانی معین حاصل شده است.

جدول ۵- مقایسه روش حداکثر احتمال و حداقل فاصله در آشکارسازی تغییرات

Table 5. Comparison of maximum likelihood and minimum distance methods in detecting changes

Change Detection utilizing/ accuracy	Overall Accuracy of Change Detection	Kappa Coefficient of Change Detection
Maximum likelihood	97.1176%	0.8924
Minimum Distance	69.2308%	0.5273

در جدول ۶ و ۷ نیز میزان درصد تغییرات کاربری اراضی با استفاده روش‌های به ترتیب حداکثر احتمال و حداقل فاصله پس از محاسبات برداری به ثبت رسیده است.

جدول ۶- کمی‌سازی نتایج شناسایی تغییرات کاربری اراضی با استفاده از روش حداکثر احتمال

Table 6. Quantification of the results of identifying land use changes using the maximum likelihood method

Former Landuse	Current Landuse	Changed Area of Region (m ²)	Changed Percentage
Building	Building	16.76034	18.815059
Building	Road	00.39466	9.766073
Building	Bare Land	32.22213	5.496805
Road	Building	60.9085	2.248280
Road	Road	40.56485	13.977614
Road	Bare Land	16.6315	1.562720
Bare Land	Building	08.9687	2.397120
Bare Land	Road	12.23561	5.830325
Bare Land	Bare Land	20.9990	2.472128

جدول ۷- کمی‌سازی نتایج شناسایی تغییرات کاربری اراضی با استفاده از روش حداقل فاصله

Table 7. Quantification of the results of identifying land use changes using the minimum distance method

Former Landuse	Current Landuse	Changed Area of Region (m ²)	Changed Percentage
Building	Building	105016.00	25.986770
Building	Road	36349.28	8.994824
Building	Bare Land	10304.76	2.549968
Road	Building	13612.72	3.368540
Road	Road	51932.72	12.851029
Road	Bare Land	4014.48	0.993405
Bare Land	Building	7705.48	1.906762
Bare Land	Road	19880.24	4.919472
Bare Land	Bare Land	3983.72	0.985793

غیرهمپوشانی شده ارتوفتو پهپاد با تصویر التراکم می‌باشد. مقایسه نتایج کمی، همچنین نشان می‌دهد که آمار تغییرات کاربری اراضی تقریباً با استفاده از هر دو روش نتایج تقریباً یکسانی دربرداشته و در این امر، دو روش طبقه‌بندی مشابه هم عمل کرده‌اند.

ارزیابی بصری نتایج

به منظور ارزیابی صحت نتایج شناسایی تغییرات و اعتبارسنجی آن‌ها بصورت بصری، تصاویر ناحیه‌ای بخصوص در منطقه مورد مطالعه که تغییر کاربری اراضی در آن محرز می‌باشد، در نظر گرفته شده است. شکل‌های ۸-ا، ۸-ب تصویر آن را به ترتیب در تصاویر ارتوموزاییک التراکم و ارتوفتو پهپادی نشان می‌دهد. همچنین در شکل‌های ۹-ا، ۹-ب، تصویر همان ناحیه بخصوص در نقشه طبقه‌بندی شده تغییرات کاربری اراضی به وسیله الگوریتم‌های حداکثر احتمال و حداقل فاصله به نمایش درآمده است.

از تحلیل و بررسی نتایج کمی شناسایی تغییرات کلاس‌ها با استفاده از روش طبقه‌بندی حداکثر احتمال در جدول ۶، این‌طور استخراج می‌شود که بیشترین و کمترین تغییرات کاربری اراضی به ترتیب از کلاس ساختمان به کلاس جاده با ۹/۷۶۶۰ درصد و از کلاس جاده به زمین بایر با ۱/۵۶۲۷ درصد می‌باشد. همچنین از ارزیابی نتایج کمی شناسایی تغییرات کلاس‌ها با استفاده از روش حداقل فاصله در جدول ۷، می‌توان نتیجه گرفت که بیشترین درصد تغییرات کاربری اراضی از کلاس ساختمان به کلاس جاده با ۸/۹۹۴۸ درصد و همچنین کمترین آن مربوط به تغییر از کلاس جاده به زمین بایر با ۰/۹۹۳۴ درصد می‌باشد. این نکته را باید در نظر گرفت که درصد ثابت ماندن کلاس‌ها در جداول ۶ و ۷ به معنای تغییر نکردن در اراضی کاربری آن‌ها می‌باشد. همچنین نکته دیگری که باید به آن توجه کرد، این است که بسیاری از مناطق به صورت طبقه‌بندی نشده یا نامشخص بودند که نرم‌افزار تغییر کلاس کاربری آن‌ها را نیز در نظر گرفته است. این امر در درواقع طبقه‌بندی نکردن داده‌های نامربوط و خارج کردن مناطق

b

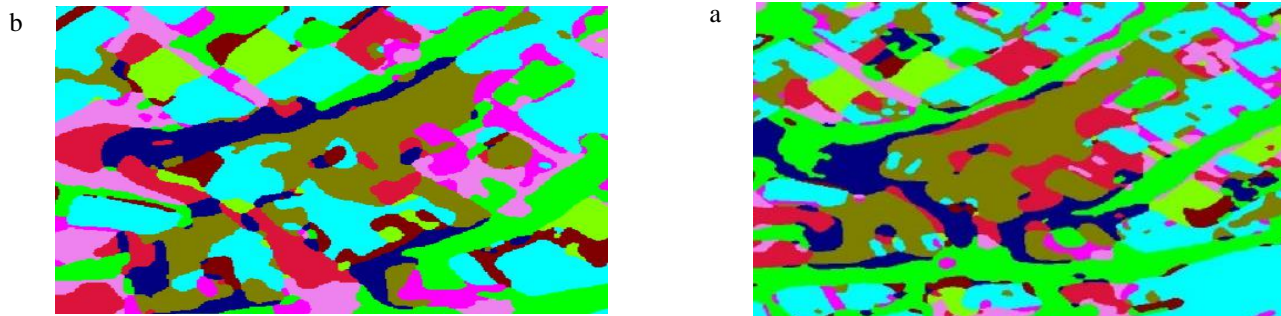


a



شکل ۸-ا) تصویر حاصل از التراکم، ب) تصویر حاصل از پهپاد (منبع: یافته‌های پژوهش)

Fig. 8.a) Digital Image of UltraCam, b) Digital Image of UAV (Source: Research findings)



شکل ۹-ا) ناحیه تغییر با استفاده از حداکثر احتمال، ب) ناحیه تغییر با استفاده از حداقل فاصله (منبع: یافته‌های پژوهش)
 Fig. 9.a) Change area using maximum likelihood, b) Change area using minimum distance (Source: Research findings)

الگوریتم حداقل فاصله نسبت الگوریتم حداکثر احتمال نیست، زیرا که روش حداقل فاصله در طبقه‌بندی عوارض بعضی مناطق تصویری، بهتر از روش دیگر عمل کرده است. در شناسایی تغییرات کاربری اراضی، همچنان که از جدول ۵ استخراج می‌شود، الگوریتم حداکثر احتمال دقت بسیار بالاتری نسبت به روش حداقل فاصله داشته و کارایی بهتر از خود نشان داده است.

نتیجه‌گیری

هدف از این تحقیق، مقایسه دو روش طبقه‌بندی حداکثر احتمال و حداقل فاصله در شناسایی تغییرات کاربری اراضی با استفاده داده‌های حاصل از پهپاد و تصاویر التراکم در منطقه شهری بود. نتایج نشان داد دقت استخراج تغییرات در منطقه شهری بوسیله تصاویر با قدرت تفکیک مکانی بالا و با استفاده از طبقه‌بندی‌های پیکسل مبنای، در سطح قابل قبولی می‌باشد. قابل ذکر است که در محدوده مورد مطالعه در نظر گرفته شده در این پژوهش، دقت طبقه‌بندی حداکثر احتمال بهتر از دقت روش دیگر است، اما امکان برتری دقت حداقل فاصله در مناطق مورد مطالعه دیگر نیز وجود دارد. همچنین می‌توان بیان کرد که اگرچه دو روش طبقه‌بندی از لحاظ ارائه نتایج کلی آشکارسازی تغییرات مشابه هم عمل کرده‌اند، ولی از جهت ارائه آمار و ارقام تغییرات کاربری اراضی عملکرد متفاوتی داشته‌اند. از دیگر موارد مهم در این تحقیق، بررسی میزان امکان‌سنجی شناسایی تغییرات بوسیله تصاویر با قدرت تفکیک

از تحلیل و تفسیر نواحی مرکزی شکل ۸-ا، می‌توان دریافت که قسمتی از ناحیه انتخاب شده برای اعتبارسنجی بصورت ساختمانی و قسمت دیگر آن بصورت جاده می‌باشد. همان‌طور که در شکل ۸-ب نیز به صورت بصری قابل مشاهده است، ناحیه منتخب در تصویر ارتوفتو پهپاد دچار تغییر کاربری شده و قسمتی از آن که قبلاً به صورت جاده بود تبدیل به کاربری زمین بایر شده است و همچنین قسمتی از آن که بصورت کلاس ساختمان بود به کلاس جاده، تغییر یافته است. در شکل‌های ۹-ا، ۹-ب نیز قسمت‌های قهوه‌ای رنگ، مناطق تغییر یافته از کلاس جاده به زمین بایر و قسمت‌های آبی پررنگ، مناطق تغییر یافته از کلاس ساختمان به کلاس جاده را نشان می‌دهند. از مقایسه ناحیه منتخب برای اعتبارسنجی در نقشه تغییرات کاربری اراضی با استفاده از روش‌های حداکثر احتمال و حداقل فاصله در شکل‌های ۹-ا، ۹-ب با تغییرات شناسایی شده توسط تحلیل و تفسیر بصری، می‌توان دریافت که روش حداکثر احتمال، تغییرات کاربری اراضی را نسبت به روش حداقل فاصله، به مراتب بهتر شناسایی کرده است.

تحلیل کمی‌سازی نتایج

از تحلیل جدول ۳ و ارزیابی جدول ۴ می‌توان تفسیر کرد که در مقایسه دقت بین روش‌های حداکثر احتمال و حداقل فاصله در این پژوهش، روش حداکثر احتمال دقت بهتری از خود نشان داده و نسبت به روش دیگر ارجحیت دارد. البته این موضوع بیانگر برتری کامل

شی‌گرا در استخراج تغییرات کاربری اراضی به وسیله تصاویر با قدرت تفکیک مکانی بالا نیز جزو مواردی می‌باشند که می‌تواند در پژوهش‌های آینده به آن‌ها پرداخته شود.

مکانی بالا اخذ شده از سکوه‌های مختلف با قدرت تفکیک مکانی متفاوت بود. آن‌چنان که از نتایج این پژوهش برمی‌آید، این کار قابل پیاده‌سازی است. ارزیابی استفاده از تصاویر با قدرت تفکیک مکانی بالا که از سکوهایی یکسانی اخذ شده‌اند و همچنین بررسی روش‌های طبقه‌بندی

References

- Ahmad, A., Quegan, S., 2012. Analysis of maximum likelihood classification on multispectral data. *Applied Mathematical Sciences* 6 (129), 6425–6436.
- Al-doski, J., Mansor, S. B., Mohd Shafri, H. Z., 2013. Change detection process and techniques. *Civil and Environmental Research* 3 (10), 37–45.
- Arabi Aliabad, F.A., Malamiri, H.R.G., Shojaei, S., Sarsangi, A., Ferreira, C.S.S., Kalantari, Z., 2022. Investigating the ability to identify new constructions in urban areas using images from unmanned aerial vehicles, Google Earth, and Sentinel-2. *Remote Sensing* 14 (13), 3227.
- Boonpook, W., Tan, Y., Liu, H., Zhao, B., He, L., 2018. UAV-based 3D urban environment monitoring. *ISPRS Annals of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences* 4, 37–43.
- Boguszewski, A., Batorski, D., Ziemia-Jankowska, N., Dzedzic, T., Zambrzycka, A., 2021. LandCover.ai: Dataset for automatic mapping of buildings, woodlands, water and roads from aerial imagery. In *Proceedings of the IEEE/CVF Conference on Computer Vision and Pattern Recognition*, 1102–1110.
- Chavis, C., Anders, K.-H., Jankowski, P., 2012. Change detection for environmental monitoring using unmanned aerial vehicle (UAV) imagery. *Marshall Plan Scholarship Program Final Project Report*. Retrieved from <https://www.marshallplan.at>.
- Gbopa, A.O., Ayodele, E.G., Okolie, C.J., Ajayi, A.O., Iheaturu, C.J., 2021. Unmanned aerial vehicles for three-dimensional mapping and change detection analysis. *Geomatics and Environmental Engineering* 15 (1), 41–61.
- Ghimire, S., Wang, H., 2012. Classification of image pixels based on minimum distance and hypothesis testing. *Computational Statistics & Data Analysis* 56 (7), 2273–2287.
- Han, D., Lee, S.B., Song, M., Cho, J.S., 2021. Change detection in unmanned aerial vehicle images for progress monitoring of road construction. *Buildings* 11 (4), 150.
- Hester, D.B., 2008. *Land cover mapping and change detection in urban watersheds using Quickbird high spatial resolution satellite imagery*. North Carolina State University.
- Lahooti, S., Lahoti, A., Saito, O., 2020. Application of unmanned aerial vehicles (UAVs) for urban green space mapping in urbanizing Indian cities. In *Unmanned Aerial Vehicle: Applications in Agriculture and Environment*, 177–188.
- Liu, W., Ji, X., Liu, J., Guo, F., Yu, Z., 2022. A novel unsupervised change detection method with structure consistency and GFLICM based on UAV images. *Journal of Geodesy and Geoinformation Science* 5 (1), 91.
- Lv, Zhiyong., Liu, T., Benediktsson, J.A., Falco, N., 2021. Land cover change detection techniques: Very-high-resolution optical images—a review. *IEEE Geoscience and Remote Sensing Magazine* 10 (1), 44–63.
- Makuti, S., Nex, F., Yang, M.Y., 2018. Multi-temporal classification and change detection using UAV images. *The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences* 42, 651–658.
- Peiman, R., 2011. Pre-classification and post-classification change-detection techniques to monitor land-cover and land-use change using multi-temporal Landsat imagery: A case study on Pisa Province in Italy. *International Journal of Remote Sensing* 32 (15), 4365–4381.
- Qin, R., 2014. An object-based hierarchical method for change detection using unmanned aerial vehicle images. *Remote Sensing* 6 (9), 7911–7932.
- Qin, R., Tian, J., Reinartz, P., 2016. 3D change detection—approaches and applications. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing* 122, 41–56.
- Sedaghat, A., Mokhtarzade, M., Ebadi, H., 2011a. Uniform robust scale-invariant feature matching for optical remote sensing images. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing* 49 (11), 4516–4527.
- Sedaghat, A., Mokhtarzade, M., Ebadi, H., 2011b. Mutual information similarity measure for scale and rotation invariant image matching. *Journal of Geomatics Science and Technology* 1, 14.

- Soffianian, A., Madanian, M., 2015. Monitoring land cover changes in Isfahan Province, Iran using Landsat satellite data. *Environmental Monitoring and Assessment* 187, 1–15.
- Wang, T., 2018. Building change detection with UAV images. *3rd International Conference on Electromechanical Control Technology and Transportation (ICECTT 2018)*, 564–567.
- Wacker, A.G., Landgrebe, D.A., 1972. Minimum distance classification in remote sensing. *LARS Technical Reports* 25.
- Yao, H., Qin, R., Chen, X., 2019. Unmanned aerial vehicle for remote sensing applications—a review. *Remote Sensing* 11 (12), 1443.
- Zitova, B., Flusser, J., 2003. Image registration methods: A survey. *Image and Vision Computing* 21 (11), 977–1000.