



Evaluation of UAV Photogrammetric capability in Road Pavement Cracks Detection

S. A. Fakhri^{1*}, M. Saadatseresht², M. Varshosaz³, H. Zakeri⁴

¹ Department of Engineering, University of Esfahan, Esfahan, Iran

² Department of Engineering, University of Tehran, Tehran, Iran

³ Department of Engineering, K. N. Toosi University of Technology, Tehran, Iran

⁴ Department of Civil and Environmental Engineering, Amirkabir University of Technology

ABSTRACT: To establish a system for managing road pavement, it is mandatory to prepare information components based on various perspectives of pavement management. One of the most significant information components in these systems is quality assessment regarding road pavement status. Accordingly, in this regard, data containing details of surface pavement failures and defects are of great significance. Apart from causing vehicle depreciation & damage, maintenance costs, and reducing the useful lifespan of the pavement structure, road pavement failures also lead to accidents and reduce road safety. Bearing in mind that the most important surface damages in road pavement are related to cracks with longitudinal, transverse, oblique, alligator, and block types, and as such cracks and defects can be visually and non-destructively assessed and evaluated, imaging-based approaches and techniques can provide details such as the type of defect, its severity, extent, and location and prove to be highly useful. In this paper, the Unmanned Aerial Vehicle (UAV)/drone photogrammetry has been proposed as a complementary approach aimed at providing information on defects caused by cracks in the country's road pavement management system. According to the author, the output of UAV photogrammetric products will significantly improve if the system parameters are adjusted. Consequently, through presenting a procedure to investigate the optimal parameters in the design of a UAV photogrammetric network, further, attempts were made for the implementation of an automated algorithm based on image processing operations & classifier decision tree which is independent of scale and image dimensions. Hence, after removing the road edges and determining the asphalt area, a pixel detection operation was carried out to reveal the cracks. Furthermore, after preparing the ground reality through selected orthophoto mosaic, the evaluation of crack pixel detection was determined using the proposed algorithm with three methods. An accuracy of 96% was determined for the main orthophoto mosaic. For the test orthophotos, which were the result of images taken by Phantom 4 Pro and Mavic Pro at different altitudes, an accuracy of approximately 82% to 91% was determined.

Review History:

Received: Apr. 04, 2021

Revised: Jun. 18, 2021

Accepted: Jun. 30, 2021

Available Online: Jul. 19, 2021

Keywords:

PMS

UAV

Image Processing

Machine Learning

Decision tree

1- Introduction

Extraction of road cracks automatically and using images taken by a photogrammetric drone are very useful and cost-effective in various ways. Field visits by experts can be very time-consuming and costly. On the other hand, in most cases, experts evaluate only a part of the road and generalize its condition to other parts of the road, which causes serious errors and mistakes in examining the condition of road pavement [1-3]. Laser scanners can be used to automatically check the condition of paved roads and asphalt cracks. These tools are very expensive and costly to purchase, maintain and maintain. Therefore, the use of UAV images to detect and extract road cracks seems to be an essential need in managing and monitoring the condition of roads. In this way, it can be done automatically at a relatively low cost.

2- Methodology

In general, the proposed method in this paper consists of 4 operational and processing phases, which are:

Network design and data collection: In this phase, after identifying the area and performing ground mapping operations, network design operations and adjusting camera parameters are performed.

Photogrammetric processing and calculations: In this phase, first, the obtained images are pre-processed, then, using specialized software in the field of UAV image processing, photogrammetric products such as orthophoto mosaic are produced with the highest separation from the asphalt surface of the roads.

Detection of crack pixels due to cracking: In this phase, steps such as roadside removal, image preprocessing, feature extraction, training data generation, and crack detection

*Corresponding author's email: aryafakhri@trn.ui.ac.ir



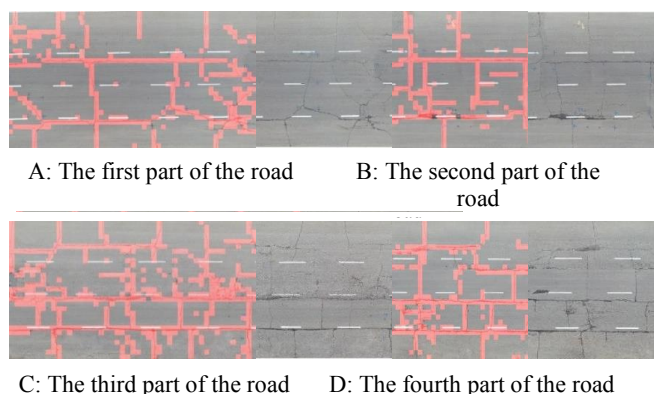


Fig. 1. Final results related to crack detection in different sections of the road

are presented based on a method based on supervised classification using the decision tree [4-6].

Output accuracy assessment: The results of the mentioned method are compared with the ground reality and after the formation of the ambiguity matrix, the accuracy of the proposed method is determined [7-8].

3- Results and Discussion

At this stage, after the feature vector of the eight components related to the segmented tiles from each orthophoto mosaic section produced is introduced as the input to the decision tree, the output is labeled crack or non-crack. Figure 1 shows an example of an orthophoto-mosaic at the height of 20 meters and the final output of four sections of road with dimensions of 100 pixels by 100 pixels.

Figure 2 also shows an example of cracks detected based on the proposed method relative to ground reality in the orthophoto generated from a height of 20 meters to evaluate the results of the output of the proposed algorithm. The first type is marked in yellow and the second type is marked in red.

To evaluate the accuracy of the above method, the ambiguity matrix values were calculated. According to Table 1, an example of the accuracy of the output with three methods is shown on the orthophoto at the height of 20 meters.

4- Conclusion

In this research, a method for extracting road cracks automatically using a decision tree algorithm based on orthophoto mosaic from UAV images is presented. Evaluation of crack pixel detection operation was determined by three methods, which was determined to be about 96% accuracy for the main orthophoto mosaic at the height of 20 meters. Also, according to the tests performed, it was determined that the Phantom 4 Pro UAV at the height of 20 meters and a speed of 2 meters per second has a good performance in detecting crack pixels.

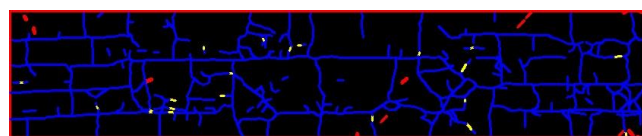


Fig. 2. Comparison of a sample of detected cracks with ground reality

Table 1. The Confusion Matrix

Total number of pixels (449649792)		Predicted number of pixels	
		Crack	No crack
Number of known pixels	Crack	TP = 66931991	FN = 3522736
	No crack	FP = 15167803	TN = 364027264
Accuracy		96%	
Kappa		96%	
F1 Score		88%	

References

- [1] H. Naderi, M. Zokaei, Automatic evaluation of asphalt pavement failures by image processing method (in Persian), in: Third International Conference on Applied Research in Civil Engineering, Architecture and Urban Management, Khajeh Nasir al-Din Tusi University of Technology, 2015.
- [2] K.H. McGhee, Automated pavement distress collection techniques, Transportation Research Board, 2004.
- [3] H. Zakeri, F. Moghadasnejad, Expert system for detecting pavement failure caused by cracks in civil and environmental (in Persian), Amirkabir University of Technology, Tehran, 2008.
- [4] A. Cubero-Fernandez, F.J. Rodriguez-Lozano, R. Villatoro, J. Olivares, J.M.J.E.J.o.I. Palomares, V. Processing, Efficient pavement crack detection and classification, 2017(1) (2017) 1-11.
- [5] S. Mokhtari, L. Wu, H.-B. Yun, Comparison of supervised classification techniques for vision-based pavement crack detection, Transportation Research Record, 2595(1) (2016) 119-127.
- [6] P. Sheng, L. Chen, J. Tian, Learning-based road crack detection using gradient boost decision tree, in: 2018 13th IEEE Conference on Industrial Electronics and Applications (ICIEA), IEEE, 2018, pp. 1228-1232.
- [7] S. Loussaief, A. Abdelkrim, Machine learning framework for image classification, in: 2016 7th International Conference on Sciences of Electronics, Technologies of Information and Telecommunications (SETIT), IEEE, 2016, pp. 58-61.
- [8] F. Galton, Finger Prints Macmillan, in, London, 1892.

HOW TO CITE THIS ARTICLE

S. A. Fakhri, M. Saadatseresht, M. Varshosaz, H. Zakeri, *Evaluation of UAV Photogrammetric capability in Road Pavement Cracks Detection, Amirkabir J. Civil Eng.*, 54(5) (2022) 343-346.

DOI: [10.22060/ceej.2021.19815.7263](https://doi.org/10.22060/ceej.2021.19815.7263)





ارزیابی توانایی روش فتوگرامتری پهپاد در آشکارسازی ترک روسازی جاده‌ها

سید آریا فخری^{۱*}، محمد سعادت سرشت^۲، مسعود ورشوساز^۳، حمزه ذاکری^۴

۱- دانشکده مهندسی عمران و حمل‌ونقل، دانشگاه اصفهان، اصفهان، ایران

۲- دانشکده مهندسی نقشه‌برداری و اطلاعات مکانی، دانشگاه تهران، تهران، ایران

۳- دانشکده مهندسی نقشه‌برداری، دانشگاه صنعتی خواجه‌نصیرالدین طوسی، تهران، ایران

۴- دانشکده عمران و محیط‌زیست، دانشگاه صنعتی امیرکبیر، تهران، ایران.

خلاصه: به منظور ایجاد سامانه مدیریت روسازی راه‌ها باید مؤلفه‌های اطلاعاتی بر اساس دیدگاه‌های مختلف مدیریت روسازی اخذ

شوند. از جمله مهم‌ترین مؤلفه‌های اطلاعاتی در این سامانه‌ها، ارزیابی کیفی وضعیت روسازی راه‌ها می‌باشد. لذا در این رابطه داده‌های

حاوی جزئیات خرابی‌های سطحی روسازی از اهمیت فراوانی برخوردار است. خرابی‌های روسازی علاوه بر اینکه باعث استهلاک

وسایل نقلیه، صرف هزینه‌های تعمیر و نگهداری و کاهش عمر مفید سازه روسازی می‌شوند، موجب بروز تصادفات و کاهش ایمنی

معابر نیز می‌گردند. با توجه به اینکه مهم‌ترین خرابی‌های سطحی در روسازی جاده‌ها مربوط به ترک‌ها می‌باشند و از آنجایی که

تشخیص این ترک‌ها به صورت بصری قابل‌برداشت و ارزیابی است، پس روش‌های مبتنی بر تصویربرداری می‌تواند در تشخیص آن

بسیار کارگشا باشد. در این پژوهش از فتوگرامتری پهپاد به عنوان روشی مکمل جهت آشکارسازی خرابی‌های ناشی از ترک روسازی

استفاده شده است. لذا با ارائه روندی جهت بررسی پارامترهای بهینه در طراحی شبکه فتوگرامتری پهپاد و همچنین پیاده‌سازی

الگوریتمی خودکار مبتنی بر پردازش تصویر و طبقه‌بندی کننده درخت تصمیم‌گیری اقدام گردید. نتایج حاصل از ارزیابی صورت گرفته

در خصوص آشکارسازی پیکسل‌های ترک توسط الگوریتم پیشنهادی و مقایسه آن با واقعیت زمینی در بهترین حالت و با استفاده از

ارث‌توفتوموزائیک تولید شده از تصاویر اخذ شده توسط پهپاد فانتوم ۴ پرو در ارتفاع ۲۰ متری، دقت ۹۶٪ حاصل شد. با توجه به دقت

بالای این روش در آشکارسازی خرابی‌های ناشی از ترک، استفاده از فتوگرامتری پهپاد به عنوان روشی مکمل و قابل اعتماد در سامانه

مدیریت روسازی پیشنهاد شده است.

تاریخچه داوری:

دریافت: ۱۴۰۰/۰۱/۱۵

بازنگری: ۱۴۰۰/۰۳/۲۸

پذیرش: ۱۴۰۰/۰۴/۰۹

ارائه آنلاین: ۱۴۰۰/۰۴/۲۸

کلمات کلیدی:

سامانه مدیریت روسازی

ترک‌های روسازی

فتوگرامتری پهپاد

یادگیری ماشین

درخت تصمیم‌گیری

مانند بسیاری از دیگر کشورهای در حال توسعه با انتظارات و خواسته‌های

جوامع امروزی سازگار نیست [۳]. امروزه متخصصین و کارشناسان به این

نتیجه رسیده‌اند که مدیریت روسازی گامی فراتر از نگهداری روسازی است،

به طوری که انتخاب زمان و روش بهینه ترمیم و نگهداری روسازی بدون

سیستم مدیریت روسازی^۱ امکان‌پذیر نیست [۴].

سیستم مدیریت روسازی مجموعه‌ای کامل و هماهنگ از فعالیت‌هایی

همچون طراحی، برنامه‌ریزی، ساخت، نگهداری و ترمیم، ارزیابی، بازسازی

و تحقیقات مربوط به روسازی است [۶ و ۵]؛ که در دو سطح شبکه [۸ و ۷]

و پروژه [۹ و ۱۰] مطرح است. در سطح شبکه، برنامه‌ریزی تعیین اولویت‌ها

و زمان‌بندی و تخصیص بودجه برای ساخت، نگهداری و کنترل کیفیت

پروژه‌های مختلف با دید کلی صورت می‌گیرد؛ اما در سطح پروژه، بهترین

گزینه برای هر پروژه و تعیین جزئیات آن که شامل روش‌های اجرایی،

۱- مقدمه

روسازی جاده‌ها جزء سرمایه‌های ملی هر کشوری محسوب می‌شوند و

هر ساله بخشی از بودجه‌های عمرانی را به خود اختصاص می‌دهند که صرف

ترمیم، بهسازی، حفظ و نگهداری آن‌ها می‌شود [۱]. بر اساس آمار پایگاه

خبری وزارت راه و شهرسازی، در ایران بیش از ۲۰۰ هزار کیلومتر راه جاده‌ای

وجود دارد که مدیریت کیفیت و نگهداری آن‌ها از اهمیت بالایی برخوردار

است. مطالعات نشان می‌دهند که روسازی‌ها معمولاً برای مدت ۲۰ سال

طراحی می‌شوند، در حالی که در عمل دوره بهره‌برداری از روسازی‌ها به مدت

۱۰ الی ۱۲ سال محدود می‌شود و بعد از این دوره بدون ترمیم جدی قابلیت

سرویس‌دهی ندارند [۲]. از طرفی عدم ترمیم و تقویت به موقع باعث می‌شود

تا خرابی‌ها در ابعاد وسیع‌تر ظاهر شوند و در نتیجه هزینه بازسازی چند برابر

گردد. واقعیت این است که عملکرد روسازی جاده‌های آسفالتی در ایران

1 PMS (Pavement Management System)

* نویسنده عهده‌دار مکاتبات: aryafakhri@trn.ui.ac.ir

حقوق مؤلفین به نویسندگان و حقوق ناشر به انتشارات دانشگاه امیرکبیر داده شده است. این مقاله تحت لیسانس آفرینندگی مردمی (Creative Commons License) در دسترس شما قرار گرفته است. برای جزئیات این لیسانس، از آدرس <https://www.creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/legalcode> دیدن فرمائید.



اپراتور خودرو، اپراتورهای کامپیوتر میدانی، اپراتور کامپیوتر دفتری و همپایی خودرو به لحاظ مسائل امنیتی و غیره نام برد.

بر اساس گزارش روابط عمومی اداره کل راهداری و حمل و نقل جاده‌ای در ایران، از لیزر اسکنرهای سه بعدی متحرک برای بازسازی سه بعدی سطح آسفالت و همچنین از دوربین‌های رقومی جهت برداشت اطلاعات بافت سطح جاده‌ها در قالب سامانه‌های موبایل مپینگ نصب شده بر روی خودرو استفاده می‌شود. علیرغم دقت و تراکم بالای اطلاعات برداشت شده این سیستم‌ها، با محدودیت‌هایی همراه بوده است که ایده به کارگیری روش فتوگرامتری پهپاد به عنوان یک سامانه مکمل جهت افزایش کارایی و کاهش هزینه‌های عملیاتی مورد توجه محققین قرار گرفته است. از آنجا که در روش فتوگرامتری پهپاد امکان تولید محصولات مکانی زمین مرجع مانند ارتوفتوموزائیک، مدل رقومی زمین و نقشه‌های خطی میسر است، پس می‌توان در سطوح شبکه و پروژه از سیستم‌های مدیریت روسازی جاده‌ها بهره گرفت. علاوه بر این روش مذکور نسبت به روش موبایل مپینگ، دارای تجهیزات ارزان‌تر، قابلیت جابجایی راحت‌تر، هزینه‌های نگهداری و عملیاتی کمتر، وسعت برداشت داده بیشتر، نواحی پنهان کمتر به دلیل برداشت اطلاعات از بالا به پایین، عدم مواجهه با مشکلات جانبی نظیر ترافیک و انسداد جاده‌ای می‌باشد.

از نظر نگارنده با توجه به اینکه مهم‌ترین خرابی‌های سطح روسازی جاده‌ها مربوط به انواع ترک‌ها بوده و از آنجا که این ترک‌ها به صورت بصری و غیر مخرب قابل برداشت و ارزیابی هستند، روش‌های مبتنی بر تصویربرداری پهپاد می‌تواند در ارائه‌ی جزئیاتی از جمله نوع خرابی، شدت، وسعت و محل آن بسیار کارگشا باشد، اما در عمل استخراج ترک بر روی تصاویر پهپاد با مشکلاتی روبرو است. هدف از این پژوهش، بررسی پارامترهای بهینه در طراحی شبکه فتوگرامتری پهپاد به منظور آشکارسازی ترک در سطح جاده‌ها می‌باشد.

۲- پیشینه تحقیق

همان‌طور که مشخص است ترک‌خوردگی‌ها جزو مشکلات عمده و اساسی در جاده‌ها بوده که مستقیماً موجب کاهش کیفیت روسازی جاده‌ها می‌گردند و از لحاظ ایمنی آن‌ها را به خطر می‌اندازد. لذا جهت بررسی و پیگیری این نوع از خرابی‌ها ابتدا نیاز به شناسایی آن‌ها است. در روش‌های سنتی شناسایی ترک با توجه به اینکه نیاز به بازدید دقیق و بررسی کاملی از وضعیت کیفی جاده‌ها توسط نیروی انسانی است، این امر موجب خطیر

هزینه‌ها، منابع مورد نیاز و محدودیت‌های موجود است مورد بررسی و اقدام قرار می‌گیرد. در هر دو سطح شبکه و پروژه، ارزیابی کیفی و سازه‌ای روسازی از اهمیت بالایی برخوردار است. برای ارزیابی کیفی روسازی، وضعیت ناهمواری‌ها، ترک‌ها و در مجموع خرابی‌های ظاهری سطح راه مورد توجه قرار می‌گیرد که به صورت بصری قابل اندازه‌گیری است در حالی که در ارزیابی سازه‌ای، توانایی روسازی در تحمل بارهای وارده از وسایل نقلیه بررسی می‌شود و نیاز به آزمایش‌ها، نمونه‌برداری و دستگاه‌های مخصوص در این زمینه است [۱۱]. در ارزیابی کیفی مدیریت روسازی جاده‌ها می‌توان به دو روش سنتی (بازرسی میدانی توسط کارشناسان فنی) و مکانیزه (اسکنرهای جاده‌ای) عمل نمود.

در روش‌های سنتی، برداشت و ارزیابی خرابی‌های جاده‌ای توسط افراد مجرب انجام می‌پذیرد. این برداشت‌ها با پیاده‌روی به دست می‌آیند که از جمله معایب این روش علاوه بر کند و زمان‌بر بودن می‌توان به خطرناک بودن برداشت به دلیل سرعت بالای ترافیک، عدم قابلیت برداشت مجدد، هزینه بالا، خطای اندازه‌گیری و دخیل بودن طبع و نظر برداشت کننده، انجام عملیات تکراری و کسل کننده نام برد که موجب کاهش دقت در تهیه اطلاعات و داده‌های به دست آمده در سطوح شبکه و پروژه می‌شود. از طرفی به دلیل عدم برداشت کامل در کل شبکه جاده، در چند مقطع تصادفی صورت گرفته و با روش‌هایی به کل مقاطع تعمیر داده می‌شود که از دقت کمی برخوردار بوده و نتایج غیرواقعی و غیردقیق را به همراه دارد [۱۴-۱۲]. در روش مکانیزه موجود برداشت خرابی‌ها با استفاده از دستگاه اسکنر سطح جاده مجهز به (LCMS)، صورت می‌گیرد [۱۵]. در این دستگاه از پرتوافکن لیزری خطی و دوربین‌های سرعت بالا جهت تولید پروفیل‌های سه بعدی سطح روسازی با رزولوشن طولی ۵ میلی‌متر، عرضی ۱ میلی‌متر و ارتفاعی ۰/۵ میلی‌متر استفاده می‌شود [۱۶]. از این رو می‌تواند در مقایسه با روش‌های سنتی با دقت و سرعت مناسب، جاده‌ها را پایش کرده و اطلاعات مفیدی را در اختیار سامانه‌های مدیریت روسازی قرار دهد. لذا با وجود تمامی این قابلیت‌ها، استفاده از این سیستم به دلایلی، دارای محدودیت‌هایی است که باعث ایجاد مشکلاتی در تهیه اطلاعات لازم گردیده است. از جمله‌ی این مشکلات می‌توان به قیمت بسیار زیاد جهت خرید دستگاه (حدود دو میلیون دلار)، هزینه بالا جهت بیمه سالانه، مشکلات زیاد در خصوص تعمیر و نگهداری و عدم خدمات از سوی سازنده به دلیل تحریم مانند کالیبراسیون و سرویس‌های دوره‌ای، استفاده از تعداد نفرات زیاد در موقع اسکن از قبیل

در مورد تصاویر سایه‌دار با رزولوشن پایین نشان داده شد که این روش جایگزین خوبی جهت برنامه‌های پایش روسازی می‌باشد. از جمله مزایای اصلی این روش در مقایسه با سیستم‌هایی که در حال حاضر جهت پایش جاده‌ها استفاده می‌شوند، مقرون به صرفه بودن و قابلیت حمل راحت پهپادها می‌باشد.

لئوناردی و همکاران (۲۰۱۸) [۲۰]، در مطالعاتشان عملکرد یک سیستم پهپاد جهت ثبت خودکار داده‌های سه بعدی برای شناسایی خرابی روسازی در سریع‌ترین زمان ممکن را بررسی کردند. آن‌ها در ابتدا جهت اخذ تصاویر با GSD^5 کمتر از ۱ سانتی‌متر، پارامترهای اولیه پرواز را طراحی نمودند؛ که این پارامترها شامل ارتفاع پرواز (۳۰ متر)، فاصله کانونی (۵ میلی‌متر) و پوشش‌های طولی و عرضی (۸۰ درصد) بود. سپس عملیات طراحی را بر اساس نرم‌افزار Pix4D به صورت خودکار و فرآیند بازسازی سه بعدی را با استفاده از نرم‌افزار Agisoft Photoscan انجام دادند. پس از پردازش تصاویر، با استفاده از یک فیلتر در ابر نقاط سه بعدی از DEM^6 ، توسط نرم‌افزار 3D Reshaper، ترک‌های موجود در روسازی را برجسته کردند و عمق چاله‌ها را با دقت زیر ۳ سانتی‌متر اندازه‌گیری کردند.

دادرس جوان و همکاران در سال ۲۰۱۹ [۲۱]، روشی خودکار را جهت تشخیص ترک در روسازی راه با استفاده از ویدئوهای به دست آمده از پهپاد ارائه کردند. با توجه به اینکه در تشخیص خودکار ترک، پیش‌پردازش جزو مراحل مهم است، پس در این مطالعه مواردی از قبیل استخراج جاده، هموارسازی تصویر، حذف نویز و حذف المان‌های غیرهدف به عنوان مراحل پیش‌پردازش، مورد بحث و بررسی قرار گرفت. حذف محدوده‌های غیرجاده‌ای بر اساس انتخاب فریم‌های کلیدی انجام شد. سپس ترک تصاویر را از طریق بهبود الگوریتم مبتنی بر تشخیص لبه (Canny) و اپراتورهای بهبود تصویر، استخراج کردند. همچنین در طبقه‌بندی نهایی، از الگوریتم طبقه‌بندی SVM با سه کلاس ویژگی طیفی، بافتی و هندسی استفاده کردند. نتایج تولید شده در تشخیص ترک، دقتی در حدود ۷۵٪ را با واقعیت زمینی نشان داد.

ژانگ و همکاران (۲۰۱۹) [۲۲]، در مطالعاتشان جهت تشخیص خرابی روسازی و جلوگیری از انسداد جریان ترافیک با گسترش دامنه پایش از تصاویر پهپاد استفاده کردند. آن‌ها جهت تشخیص لبه، یک روش ترکیبی را که شامل الگوریتم‌های Canny و OTSU بود، پیشنهاد دادند و بر اساس اپراتورهای مورفولوژی Erosion و Dilation تشخیص لبه‌ها را

و زمان‌بر بودن فرآیند فوق شده است. بر این اساس روش‌های مکانیزه به منظور افزایش سرعت و اطمینان آنالیز ترک در سیستم‌های حمل‌ونقل هوشمند، جایگزین روش‌های سنتی شدند. لذا در اینجا به برخی از روش‌های شناسایی ترک از طریق تصاویر مبتنی بر پهپاد اشاره می‌گردد:

گراند سرت و همکاران (۲۰۱۵) [۱۷]، روشی را برای خودکارسازی، جمع‌آوری، پردازش و تحلیل شبکه‌های حمل‌ونقل جاده‌ای با استفاده از پهپاد و فناوری روش‌های کامپیوتری بررسی کردند. در این تحقیق نقاط قوت استفاده از فناوری پهپاد بدون سرنشین را برای ارزیابی روسازی مشخص کردند. سیستم آن‌ها قادر به ثبت تصاویر جاده‌ای مناسب برای شاخص وضعیت آسفالت جاده‌ها بود، با این حال حداکثر F-Measure الگوریتم ۴۰٪ شد. این نتیجه در سطحی پایین است و نشان می‌دهد که الگوریتم برای طبقه‌بندی کاملاً خودکار شاخص PCI کافی نیست.

پن و همکاران (۲۰۱۷) [۱۸]، جهت تشخیص خرابی‌های روسازی (ترک‌ها و چاله‌ها) از تصاویر حاصل از پهپاد، با استفاده از چهار الگوریتم یادگیری تحت نظارت عمومی (RF^4 ، ANN^5 ، SVM^6 ، KNN^7) مطالعاتی انجام دادند؛ که برای هر یک از الگوریتم‌های یادگیری مجموعه‌ای از پارامترهای مختلف در نظر گرفتند. معیار ارزیابی عملکرد الگوریتم بر مبنای دقت طبقه‌بندی و زمان محاسبات تعیین شد. با تغییر پارامتر الگوریتم‌ها به دقت طبقه‌بندی بیش از ۹۸٪ در کمترین زمان محاسباتی رسیدند. آن‌ها در نهایت الگوریتم RF را به عنوان بهترین عملکرد در بالاترین دقت طبقه‌بندی و حداقل زمان اجرا معرفی نمودند.

ارسوز و همکاران (۲۰۱۷) [۱۹]، در یک مطالعه سیستمی را جهت شناسایی ترک بر اساس پهپاد برای پایش شرایط موجود در روسازی پیشنهاد کردند. این سیستم شامل الگوریتم‌های پردازش تصویر و الگوریتم‌های یادگیری ماشین بود که در هر دو برای تشخیص و طبقه‌بندی ترک‌ها روی سطوح سخت مورد استفاده قرار می‌گیرند. با استفاده از الگوریتم‌های پردازش تصویر (ابتدا تصویر را نرم کرده سپس با شارپ کردن تصویر و اعمال حد آستانه ترک را استخراج و توسط عملگرهای مورفولوژی نویزها را کاهش و موجب اتصال ترک‌ها شدند)، ویژگی‌های متمایز اجسام ترک‌دار را به دست آوردند و سپس برای آموزش ماشین بردار پشتیبان مورد استفاده قرار دادند. در نتایج آن‌ها با وجود برخی معایب از جمله عدم توانایی عملکرد سیستم

- 1 K-Nearest Neighbors
- 2 Support Vector Machine
- 3 Artificial Neural Network
- 4 Random Forest

5 Ground Sample Distance
6 Digital Elevation Model



شکل ۱. منطقه مورد مطالعه

Fig. 1. Area of study



شکل ۲. الف: پهپاد Phantom 4 Pro، ب: پهپاد Mavic Pro

Fig. 2. Phantom 4 Pro, B: Mavic Pro

ناحیه به لحاظ توپوگرافی، تپه‌ماهور محسوب می‌گردد. زمان تصویربرداری در آبان ماه ۱۳۹۸ و طی ساعات ۹ الی ۱۲ بوده است. حداقل و حداکثر ارتفاع ناحیه مورد مطالعه ۱۳۶۰ الی ۱۳۷۰ متر از سطح آب‌های آزاد است [۲۳].

۳-۲- پهپادهای مورد استفاده

جهت اخذ تصاویر از پهپادهای Phantom 4 Pro و Mavic Pro (شکل ۲) که توسط شرکت DJI تولید شده، استفاده گردید. این پهپادها توسط کنترلر هدایت می‌شوند. این پهپادها دارای یک دوربین غیر متریک به مشخصات جدول ۱ می‌باشند [۲۳]:

بهبود دادند. در مرحله آنالیز داده نیز شروع به طبقه‌بندی و استخراج عوارض نمودند. در نتایج آن‌ها نشان داده شد که الگوریتم ترکیبی پیشنهادی، از نظر دقت شناسایی انواع ترک و مشخصات هندسی ترک بهترین عملکرد را دارد.

۳- مواد و روشی

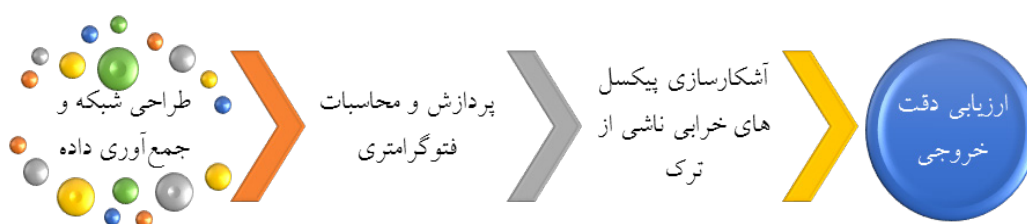
۳-۱- منطقه مورد مطالعه

جهت آشکارسازی خرابی‌های ناشی از ترک روسازی با استفاده از تصاویر اخذ شده توسط پهپاد، در منطقه‌ای به طول حدوداً ۴۰۰ متر واقع در ناحیه جنوبی بهشت سکینه شهرستان کرج، (شکل ۱) با مختصات عرض جغرافیایی ۳۵/۵۳۲۲ و طول جغرافیایی ۵۰/۵۲۴۴ استفاده گردید. این

جدول ۱. مشخصات دوربین به کار گرفته شده در پهپادهای مورد نظر

Table 1. Specifications of the camera used in the drones

مشخصات	فانوم ۴ پرو	ماویک پرو
فاصله کانونی (mm)	۸/۸	۵
کیفیت دوربین	۲۰	۱۲
ابعاد عکس	۵۴۷۲×۳۶۴۸	۴۰۰۰×۳۰۰۰
ابعاد حس گر (mm)	۱۳/۲×۸/۸	۶/۱۷×۴/۵۵



شکل ۳. فلوجارت روش پیشنهادی

Fig. 3. Flowchart of the proposed method

۳-۳- نرم‌افزارهای مورد استفاده

2019a استفاده شد.

- جهت انجام عملیات طراحی پرواز از نرم‌افزار Pix4D Cap-تحت سیستم عامل اندروید و iOS استفاده گردید. این نرم‌افزار به دلایل متعددی از قبیل رابط کاربری ساده، رایگان بودن نرم‌افزار، قابلیت طراحی مسیر در حالت‌های مختلف و غیره مورد استفاده قرار گرفت.
- جهت تولید ارتوفتوموزائیک از نرم‌افزار Agisoft Metashape که توسط شرکت Agisoft LLC عرضه شده است، استفاده گردید. نرم‌افزار فوق در سال ۲۰۱۰ نسخه اولیه آن تحت عنوان Agisoft PhotoScan تولید شد. این نرم‌افزار قابلیت‌های متعددی از قبیل پردازش تصاویر چند طیفی، بررسی دقیق سطوح تصویر، اندازه‌گیری ارتفاع سطوح اشیاء موجود در عکس، پشتیبانی از برنامه‌نویسی پایتون، خروجی ژئورفرنس، اندازه‌گیری فاصله‌ها، مناطق و حجم‌ها، مدل‌سازی چهار بعدی برای صحنه‌های پویا، پردازش شبکه‌ای و غیره را دارد.
- جهت پیاده‌سازی الگوریتم‌های پیشنهادی از برنامه Matlab

۳-۴- روش پیشنهادی

به طور کلی روش پیشنهادی در این مقاله مطابق شکل ۳، از ۴ فاز عملیاتی و پردازشی تشکیل شده است که عبارت‌اند از:

۳-۴-۱- طراحی شبکه و جمع‌آوری داده

در وهله‌ی اول پس از شناسایی منطقه و انجام عملیات نقشه‌برداری زمینی، عملیات طراحی شبکه و تنظیم پارامترهای دوربین صورت می‌گیرد. در طراحی شبکه فتوگرامتری، مواردی از قبیل تعیین ارتفاع پرواز، پوشش‌های طولی و عرضی بهینه، وجود و یا عدم وجود تیلت، سرعت مناسب پرنده، تعیین فاصله کانونی و غیره بررسی می‌گردد و همچنین در تنظیم پارامترهای دوربین مواردی از قبیل ISO, F-Stop, Shutter Speed, Auto Focus and Auto Stabilizer بررسی می‌شود. سپس جهت اخذ تصاویر باکیفیت و تولید محصولات فتوگرامتری، قبل از انجام عملیات

پرواز، مواردی از قبیل شناسایی منطقه مورد نظر، بررسی شرایط توپوگرافی، نوری، آب و هوایی (جهت باد)، محدودیت‌های مخابراتی و مقررات داخلی بررسی می‌گردد. پس از انجام موارد فوق، نیاز به طراحی پرواز با توجه به پارامترهایی همچون GSD، پوشش تصاویر، ارتفاع پرواز، فاصله کانونی، هندسه شبکه فتوگرامتری، محدوده کاری، محل نقاط کنترل و همچنین طراحی محل نشست و برخاست پرنده با توجه به میزان مداومت پروازی و راه‌های دسترسی است.

۳-۴-۲- پردازش و محاسبات فتوگرامتری

در این فاز ابتدا تصاویر اخذ شده به صورت بصری مورد بررسی قرار گرفته و در صورت نیاز توسط الگوریتم‌های بهبود و تقویت کننده عوارض تصویری پیش‌پردازش می‌گردند، سپس با استفاده از نرم‌افزارهای تخصصی در زمینه‌ی پردازش تصاویر پهپاد از قبیل Agisoft Metashape، Pix4D، Context Capture و غیره محصولات فتوگرامتری از قبیل ارتوفتوموزائیک با بیشترین حد تفکیک از سطح آسفالت جاده‌ها تولید می‌شود. همچنین عملیات پردازش ارتوفتوموزائیک از قبیل حذف اجسام در حال حرکت و غیره در این فاز صورت گرفته و خروجی نهایی ارتوفتوموزائیک جهت انجام مراحل بعدی تولید می‌گردد.

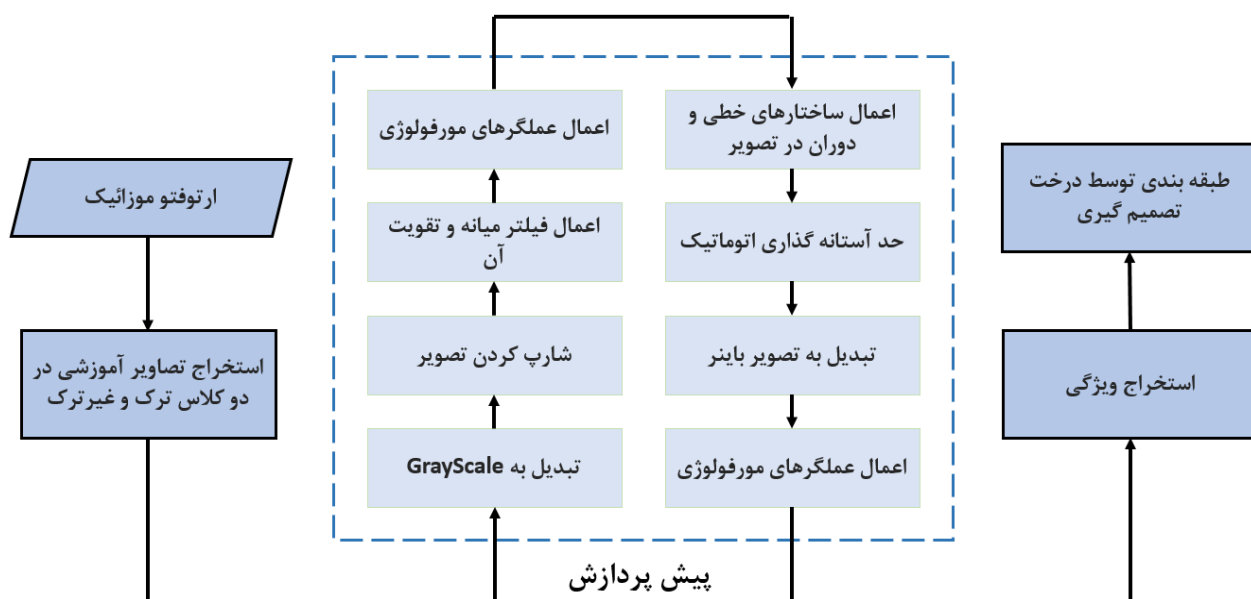
۳-۴-۳- آشکارسازی پیکسل‌های خرابی ناشی از ترک

در این فاز مراحل از قبیل حذف حاشیه‌های جاده، پیش‌پردازش تصاویر، استخراج ویژگی، تهیه داده‌های آموزشی و آشکارسازی بر اساس الگوریتم‌های مبتنی بر یادگیری ماشین صورت می‌گیرد. بدین منظور الگوریتم‌های مختلفی از قبیل CNN، SVM و DT بر اساس داده‌های موجود مورد بررسی قرار گرفت که بر این اساس روشی مبتنی بر طبقه‌بندی نظارت شده با استفاده از درخت تصمیم‌گیری [۲۴-۲۶] ارائه گردید. بنابراین ابتدا بایستی تصاویر آموزشی از طریق ارتوفتوموزائیک، در دو کلاس ترک و غیرترک به منظور آموزش شبکه صورت گیرند، همچنین به منظور طبقه‌بندی ترک روسازی لازم است ویژگی‌های آن استخراج و به عنوان بردار ورودی جهت درخت تصمیم‌گیری در نظر گرفته شود. در این بخش ویژگی‌های متمایز کننده محدوده‌ی دارای ترک از غیرترک شناسایی شده و در آموزش الگوریتم به عنوان فاکتورهای قابل بررسی وارد شوند. قبل از استخراج ویژگی‌های مدنظر، مرحله پیش‌پردازش تصاویر صورت می‌گیرد تا بتوان شرایط تصویر

را برای پیاده‌سازی الگوریتم‌های پردازش تصویر و حد آستانه گذاری بهبود بخشید. همچنین مرحله پیش‌پردازش و استخراج ویژگی در عین حال برای داده‌های آموزشی ترک و غیرترک انجام می‌شود. سپس در ادامه درخت تصمیم‌گیری با ویژگی‌های استخراج شده‌ی داده‌های آموزشی، آموزش دیده و یک شبکه نظارت شده جهت کلاس‌بندی تصاویر به دو کلاس ترک و غیرترک ایجاد می‌شود. در این شبکه ویژگی‌ها با توجه به تابع‌های مختلف پردازش تصویر و شناسایی قطعه‌های تصویری در یک ماتریس گردآوری می‌شوند و هر یک از آن‌ها دارای مقادیر مربوط به خود می‌باشند. با توجه به دو کلاس بودن شبکه‌ی مورد نظر توسط این ماتریس، فرآیند آموزش صورت می‌گیرد. بدین طریق شبکه نظارت شده قادر به تمایز بین ترک و غیرترک خواهد بود. شکل ۴ فلوجارت کلی الگوریتم پیشنهادی را به صورت مرحله به مرحله نمایش می‌دهد.

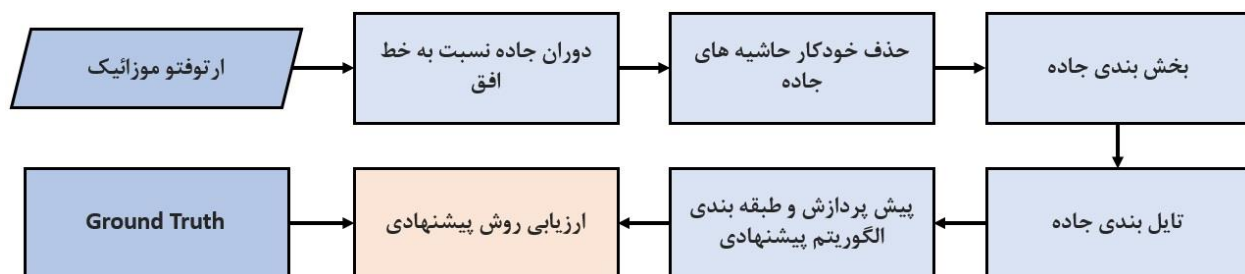
۳-۴-۴- ارزیابی دقت خروجی

جهت ارزیابی روش پیشنهادی در وهله‌ی اول باید جاده به صورت افقی تبدیل شود. لذا بر این اساس محور مرکزی جاده در حالت وکتور به ارتوفتوموزائیک معرفی شده و با استفاده از آن عملیات دوران جاده در جهت محور افقی با محاسبه زاویه‌ی محور معرفی شده‌ی جاده و امتداد افقی به صورت خودکار انجام می‌شود. در این حالت از روش نزدیک‌ترین همسایگی استفاده شده و با بهره‌گیری از الگوریتم لبه یابی Prewitt [۲۷] و در حالت سخت‌گیرانه با حد آستانه ۰/۱ به منظور شناسایی کمتر لبه‌ها، می‌توان لبه‌های کل تصویر را که شامل محورهای جاده، ترک‌های بزرگ، محورهای کناری جاده و همچنین هر آنچه در مرز بیرونی جاده در ارتوفتو قابل رؤیت است شناسایی نمود. سپس با استفاده از شمارش تعداد پیکسل‌های لبه که در تصویر باینری خروجی دارای مقادیر یک (سفید) در هر سطر هستند، می‌توان گفت در آن سطر از تصویر چندین لبه شناسایی شده است. از طرفی در محیط‌های بیرونی جاده شاهد شانه‌های خاکی و یا پوشش گیاهی هستیم، از این رو در آن ناحیه‌ها نیز لبه‌های زیادی خواهیم داشت. متناسب با شمارش لبه‌ها در هر سطر از تصویر، محدوده‌ی آسفالت جاده از قسمت حاشیه راه جدا شده و خروجی این مرحله که شامل بخش آسفالت جاده می‌باشد به چندین ناحیه برای پردازش موازی تقسیم می‌گردد. سپس با توجه به ابعاد داده‌های آموزشی که می‌تواند مربع‌هایی با ابعاد متفاوت باشند، تایل بندی جاده انجام می‌شود. در این مرحله زیر تصویر جاده به تصاویر مربعی کوچک‌تر هم‌اندازه با ابعاد داده‌های آموزشی تقسیم می‌شوند. سپس تصاویر تایل بندی شده وارد



شکل ۴. فلوجارت الگوریتم پیشنهادی جهت استخراج ترک جاده

Fig. 4. Flowchart of the proposed algorithm for extracting road cracks



شکل ۵. مراحل ارزیابی روش پیشنهادی

Fig. 5. Steps to evaluate the proposed method

۴- نتایج

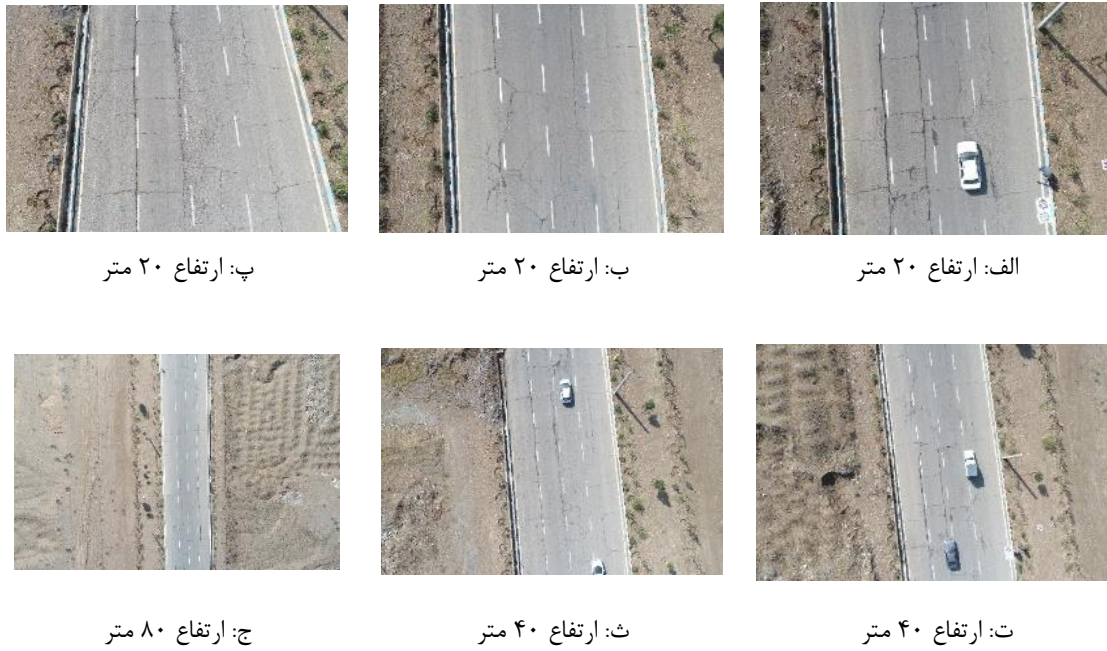
۴-۱- عملیات پرواز

پس از انجام عملیات طراحی پرواز و هدایت پرنده به صورت خودکار، تصاویر در ۶ حالت، توسط پهپاد فانتوم ۴ پرو با تنظیمات مختلف اخذ گردید. در شکل ۶ نمونه‌ای از تصاویر اخذ شده با حالات مختلف پروازی مشاهده می‌گردد.

مطابق جدول ۲ تنظیمات مختلف پهپاد فانتوم ۴ پرو، در ۶ حالت پروازی قابل نمایش است. همچنین پس از انجام عملیات پرواز در ۶ حالت

الگوریتم پیشنهادی می‌گردد و مراحل فلوجارت شکل ۲ بر روی آن‌ها اعمال می‌شود و هر یک از تصاویر کوچک برچسب ترک و یا غیرترک دریافت می‌کنند. سپس همه این تصاویر با هم ترکیب شده و به تصویر اصلی اولیه تبدیل می‌شوند. با این تفاوت که در این حالت قسمت‌های ترک شناسایی شده، دارای رنگ متفاوتی خواهند بود و در نهایت نتایج روش مذکور با واقعیت زمینی مقایسه و پس از تشکیل ماتریس ابهام [۲۸ و ۲۹]، صحت روش فوق تعیین می‌گردد (شکل ۵).

1 Confusion Matrix



شکل ۶. نمونه‌ای از حالت‌های مختلف پرواز توسط دوربین فانتوم ۴ پرو

Fig. 6. Examples of different flight modes with the Phantom 4 Pro camera

جدول ۲. حالت‌های مختلف پرواز توسط دوربین فانتوم ۴ پرو

Table 2. Different flight modes by Phantom 4 Pro camera

ردیف	حالت	سرعت شاتر s	ISO	ارتفاع m	F-stop	سرعت پرنده m/s	پوشش %
۱	خودکار	۱/۵۰۰	۱۰۰	۲۰	۵/۶-۶/۳	۰/۵	۹۵
۲	خودکار	۱/۱-۶۴۰/۵۰۰	۱۰۰	۲۰	۶/۳	۱	۹۰
۳	خودکار	۱/۱-۵۰۰/۴۰۰	۱۰۰	۲۰	۵/۶	۲	۸۰
۴	دستی	۱/۱-۵۰۰/۱-۴۰۰/۳۲۰	۱۰۰	۴۰	۵/۶	۲	۹۰
۵	خودکار	۱/۴۰۰	۱۰۰	۴۰	۵/۶	۸	۶۰
۶	خودکار	۱/۱-۴۰۰/۳۲۰	۱۰۰	۸۰	۵/۶	۵	۹۰



شکل ۷. نمونه‌ای از حالت‌های مختلف پرواز توسط دوربین مایک پرو

Fig. 7. Examples of different flight modes by the Mavik Pro camera

جدول ۳. حالت‌های مختلف پرواز توسط دوربین مایک پرو

Table 3. Different flight modes by Mavik Pro camera

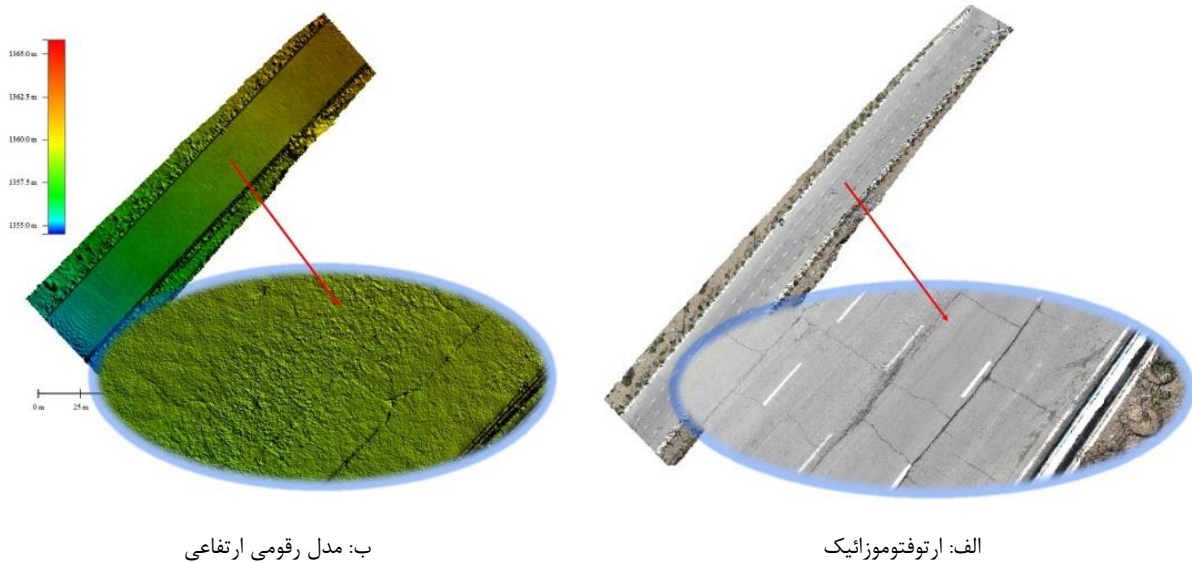
پوشش	سرعت پرنده	F-stop	ارتفاع	ISO	سرعت شاتر	حالت	ردیف
%	m/s		m		s		
۸۰	۲	۴	۱۰	۱۰۰	۱/۱۰۰۰	دستی	۱
۸۰	۴	۴	۱۰	۱۰۰	۱/۲۰۰۰	دستی	۲
۸۰	۸	۲/۲	۱۰	۱۰۰	۱/۲۰۰۰	خودکار	۳
۸۰	۴	۴	۲۰	۱۰۰	۱/۸۰۰	دستی	۴
۸۰	۸	۲/۲	۲۰	۱۰۰	۱/۲۰۰۰	خودکار	۵
۸۰	۸	۲/۲	۴۰	۱۰۰	۱/۲۰۰۰	خودکار	۶

شده در حالات مختلف نشان داده شده است.

مطابق جدول ۳ تنظیمات مختلف پهپاد مایک پرو، در ۶ حالت پروازی قابل نمایش است. همچنین از ۶ پرواز انجام شده، ۱۶ حالت جهت تولید مدل سه - بعدی با پوشش‌های مختلف تولید گردید.

انجام شده جهت ورود به مرحله‌ی محاسبات فتوگرامتری و الگوریتم‌های پیشنهادی در خصوص آشکارسازی خرابی‌های ناشی از ترک اقدام به تولید ۲۲ مدل با پوشش‌های مختلف گردید.

همچنین در ۶ حالت پروازی و با انجام تنظیمات مختلف دوربین توسط پهپاد مایک پرو، تصاویر اخذ گردید. در شکل ۷ نمونه‌ای از تصاویر اخذ



ب: مدل رقومی ارتفاعی

الف: ارتوفتوموزائیک

شکل ۸. نمونه‌ای از ارتوفتوموزائیک و مدل رقومی ارتفاعی تولید شده در ارتفاع ۲۰ متری

Fig. 8. An example of an orthophoto mosaic and digital elevation model produced at a height of 20 meters

ابرنقاط متراکم بسیار زمان بر بوده و نیاز به سخت‌افزار قوی از لحاظ محاسباتی دارد. در نرم‌افزار متاشیپ روند تولید ابرنقاط متراکم عبارت است از: انتخاب زوج تصاویر استریو، تولید تصاویر اپیپولار، تناظریابی متراکم تصویری، تولید Disparity Map، بازسازی سه بعدی ابرنقاط هر مدل استریو و تلفیق ابرنقاط مدل‌های استریو مختلف مبتنی بر روش‌های بهینه‌سازی مطرح در MVS^۱. کیفیت ابرنقاط متراکم بستگی به تراکم ابرنقاط و دقت بازسازی دارد که تراکم نقاط بر اساس پیرامید تصویری در ۵ حالت صورت می‌گیرد. در مرحله بعد جهت تبدیل سطح گسسته‌ی ابرنقاط به سطح پیوسته، Mesh تولید می‌گردد و پس از ساخت مش بر روی آن بافت^۲ اعمال می‌شود. سپس مدل رقومی ارتفاعی زمین تولید می‌گردد. این فرآیند از طریق رستراسازی و درون‌یابی روی ابر نقاط امکان‌پذیر است. بر این اساس باید نقاط مربوط به عوارض مصنوعی از سایر نقاط جدا شده و فقط نقاط مربوط به زمین باقی بماند. انجام این عملیات به صورت دستی و بصری با توجه به اینکه تعداد نقاط بسیار زیاد است امکان‌پذیر نیست. به همین دلیل عملیات فیلترینگ (طبقه‌بندی نقاط) در محیط نرم‌افزاری به صورت خودکار و با دقت و سرعت بالا انجام می‌گیرد. بدین منظور مدل رقومی ارتفاعی زمین و ارتوفتوموزائیک تولید گردید. شکل ۸ نمونه‌ای از ارتوفتوموزائیک و مدل رقومی ارتفاعی تولید شده با رزولوشن ۵/۲۸ mm/pix را نشان می‌دهد.

۴-۲- پردازش و محاسبات فتوگرامتری

جهت تشکیل بلوک فتوگرامتری و انجام عملیات توجیه نسبی بر روی مدل‌های تولید شده در حالت Highest و با حداکثر تعداد ۴۰۰۰۰ نقاط کلیدی و گرهی در هر تصویر مختصات سه بعدی و المان‌های دوربین تولید گردید. سپس از طریق ابزار Gradual selection اقدام به حذف و شناسایی نقاط بلاندر به دلیل ایجاد انحراف در برآوردهای سرشکنی به شکل موضعی و سرتاسری در شبکه می‌گردد. با توجه به اینکه استحکام هندسی مدل‌های تولید شده به دلیل تصویربرداری در حالت کوریدوری با یک رن پروازی پایین است، لذا نمی‌توان از روش‌های مرسوم جهت حذف نقاط بلاندر استفاده نمود. بدین منظور بر روی چندین مدل تولید شده همه‌ی حالت‌های ممکن در خصوص نحوه‌ی به‌کارگیری ابزارهای Gradual Selection تست گردید و دقت ریپروجکشن مورد بررسی قرار گرفت که در نهایت پس از بررسی‌های صورت گرفته مشخص گردید نباید از Image count به دلیل حذف بخش عمده‌ای از نقاط و جلوگیری از کاهش دقت مدل‌سازی استفاده گردد، همچنین از طریق عملیات -Reprojection error و Reconstruction uncertainty در چندین مرحله و تا رسیدن به دقت زیر نیم پیکسل اقدام و در انتهای عملیات حذف نقاط دارای بلاندر از Projection accuracy استفاده شود که این امر تا حدودی موجب بهبود دقت Reprojection می‌گردد.

پس از انجام عملیات فوق ابرنقاط متراکم تولید می‌گردد. فرآیند تولید

1 Multiple View Stereo
2 Texture



شکل ۹. چند نمونه از تصاویر آموزشی کلاس ترک

Fig. 9. A few examples of Turkish class tutorial images



شکل ۱۰. چند نمونه از تصاویر آموزشی کلاس غیر ترک

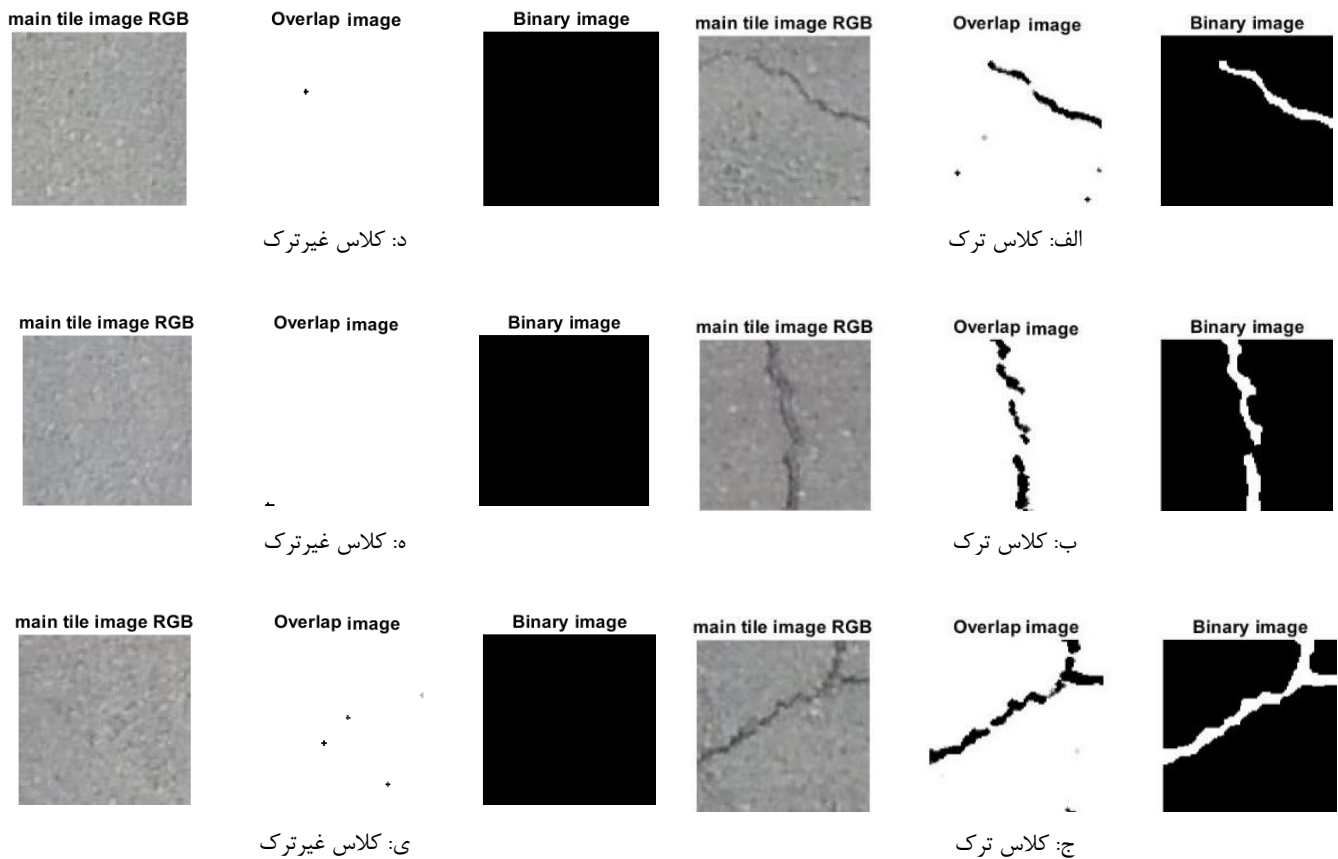
Fig. 10. A few examples of non-Turkish class educational pictures

۳-۴- آشکارسازی پیکسل‌های ترک

طبق الگوریتم پیشنهادی ارائه شده جهت استخراج ترک‌های آسفالت ابتدا داده‌های آموزشی مربوط به کلاس ترک از قبیل انواع ترک‌های طولی، عرضی و مورب بر اساس نمونه‌هایی از انواع تصاویر ارتوفتو در ۳۸ مدل تولید شده انتخاب شدند. در شکل ۹ تعدادی از تصاویر آموزشی کلاس ترک، نشان داده شده است.

با توجه به ابعاد زمینی هر پیکسل که در بهترین مدل برابر با ۵ میلی‌متر در ۵ میلی‌متر است، بهترین ابعاد برای استخراج داده‌های آموزشی ۱۰۰ پیکسل در ۱۰۰ پیکسل تخمین گردید. به این ترتیب داده‌های آموزشی بر روی زمین دارای ابعاد تقریبی ۰/۵ متر در ۰/۵ متر هستند. در شکل ۱۰ تعدادی از تصاویر آموزشی مربوط به کلاس غیر ترک نمایش داده شده است. سپس کلیه تصاویر آموزشی به Grayscale تبدیل و از طریق الگوریتم‌های بهبود کنتراست، تصاویر شارپ شده و در مرحله بعدی جهت حذف نویز و عوارض ناخواسته اقدام به نرم کردن تصویر بر اساس فیلتر میانه گردید، سپس جهت آشکارسازی بهتر چندین مرحله فرآیند فوق انجام و با مقدار قبلی جمع شدند و به این ترتیب مناطق تیره، تیره‌تر و مناطق روش،

روشن‌تر گردید و کنتراست تصاویر به مراتب افزایش یافت. پس از انجام عملیات فوق عملگر مورفولوژی فرسایش با استفاده از ساختار لوزی شکل بر روی تصاویر اعمال گردید. در مرحله بعدی فیلترهایی با ساختار خطی و با زوایای ۰، ۱۵، ۳۰، ... و ۱۶۵ درجه بر روی تصاویر اعمال شدند. به این ترتیب ساختار خطی تصاویر که مربوط به عارضه ترک هستند، تقویت شده و قابلیت تشخیص و استخراج آن‌ها افزایش پیدا کرد. سپس بر روی تصاویر عملگر مورفولوژی باز کردن اعمال گردید. اعمال این اپراتور موجب ضخیم‌تر شدن خطوط مربوط به عارضه ترک شده و قسمت‌های منقطع آن به حالت پیوسته تبدیل گردید. پس از انجام مراحل فوق‌الذکر با استفاده از روش حد آستانه گذاری آتسو و به صورت خودکار تصاویر باینری شده و مقادیر آن‌ها قرینه گردید. به این صورت عوارض ترک که دارای رنگ تیره بودند به صورت پیکسل‌های سفید و قسمت‌های پس‌زمینه که دارای رنگ روشن بودند به صورت پیکسل‌های سیاه ذخیره شدند. عملیات حد آستانه گذاری خودکار با توجه به هیستوگرام هر تصویر انجام می‌گیرد. لذا برای هر تصویر حد آستانه مناسب محاسبه شده و با استفاده از آن عملیات باینری‌سازی تصویر صورت می‌گیرد. جهت حذف نویزها و اتصال قسمت‌های خطی تصاویر باینری به



شکل ۱۱. نمونه‌های آموزشی کلاس ترک و غیر ترک (چپ: تصویر رنگی - وسط: تصویر اصلاح شده خطی - راست: تصویر باینری نهایی)

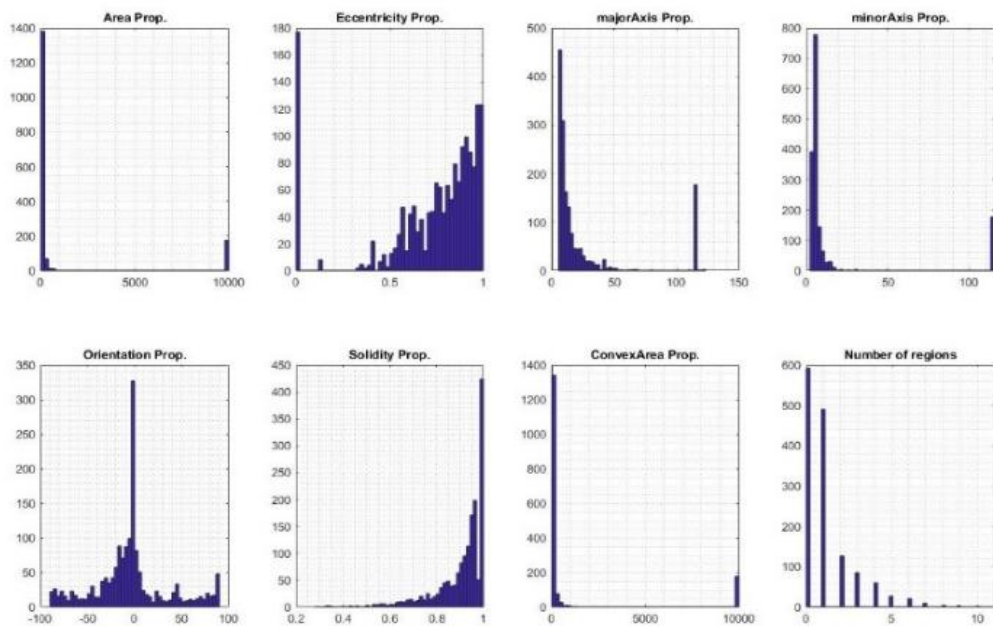
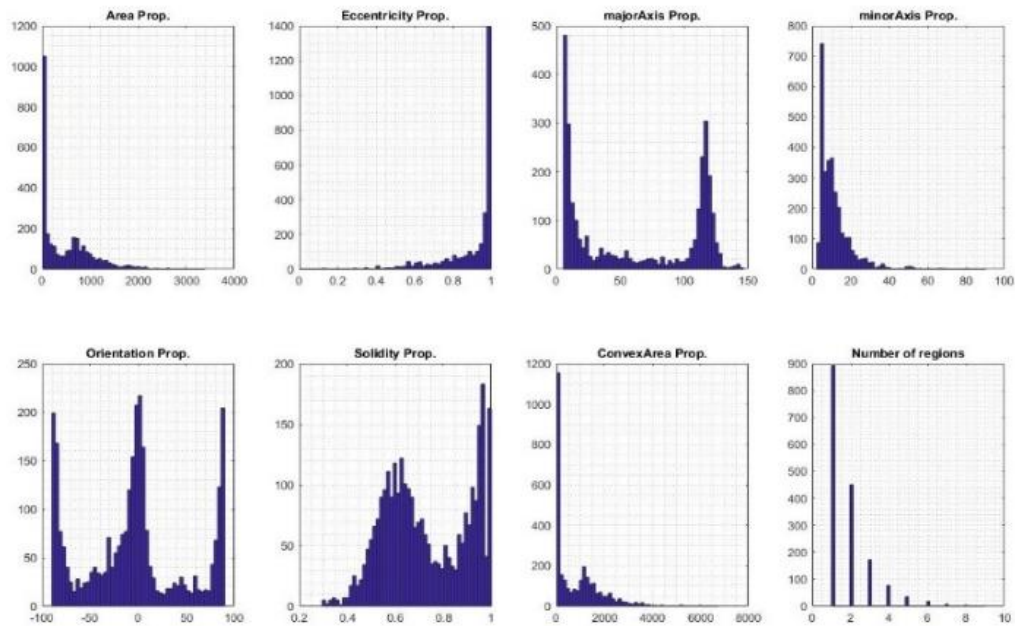
Fig. 11. Turkish and non-Turkish class instructional examples (left: color image - middle: linear modified image - right: final binary image)

خطوطی با ضخامت نسبتاً کم و طول نسبتاً زیاد مشخص می‌شود. همچنین مساحت نواحی دارای ترک تنوع بیشتری نسبت به نواحی فاقد ترک دارند. در تصاویری که حاوی مناطق سفید و فاقد ترک است، اکثراً مساحتی حدود صفر و در مواردی نیز دارای مساحت حداکثر است که این امر نشان دهنده یکنواخت بودن تصاویر فاقد ترک می‌باشد. پس از استخراج بردارهای ویژگی از تصاویر آموزشی مربوط به کلاس ترک و غیر ترک، می‌توان درخت تصمیم‌گیری را با استفاده از آن‌ها آموزش داد. شکل ۱۳ درخت تصمیم‌گیری آموزش داده شده به ازای داده‌های آموزشی هر دو کلاس را نشان می‌دهد. مطابق شکل ۱۳ مشاهده می‌گردد که هر گره دو شاخه خروجی دارد. اختصاص یافتن داده‌های مورد نظر به هر یک از شاخه‌ها با توجه به مقدار حد آستانه تعیین شده برای یک ویژگی خاص در هر گره می‌باشد. با توجه به اینکه هدف از این پژوهش تعیین توانایی فتوگرامتری پهپاد در آشکارسازی پیکسل‌های خرابی ناشی از ترک است؛ بنابراین الگوریتم درخت تصمیم‌گیری

همدیگر یک بار دیگر از عملگرهای مورفولوژی استفاده گردید. در شکل ۱۱ نمونه‌هایی از تصاویر آموزشی مربوط به کلاس ترک و غیر ترک نمایش داده شده است. برای هر نمونه سه تصویر مربوط به حالت رنگی، اصلاح شده بعد از بارسازی عوارض خطی و باینری شده بعد از اعمال عملگرهای مورفولوژی مشاهده می‌گردد.

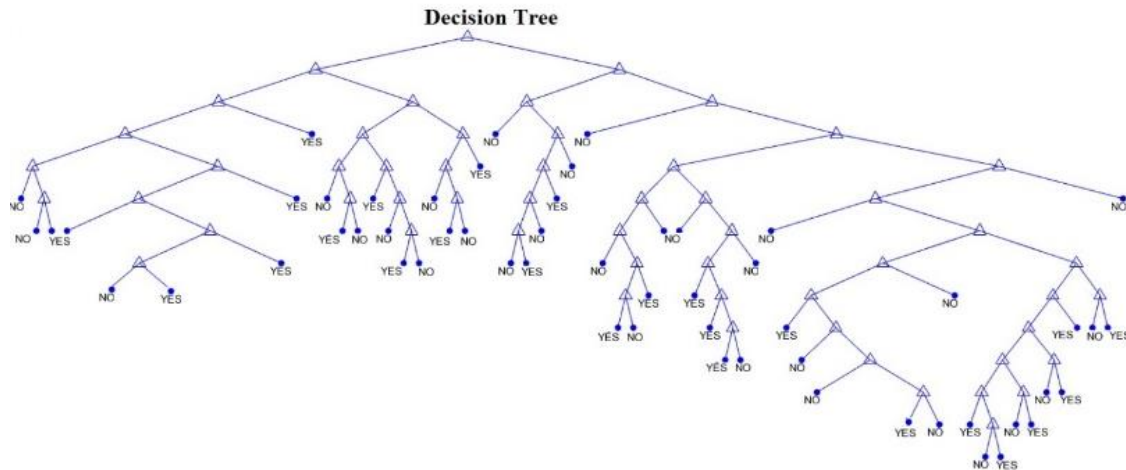
پس از استخراج نهایی تصاویر باینری، ویژگی‌های مربوط به هر تصویر محاسبه می‌شوند. در شکل ۱۲ هیستوگرام مربوط به مقادیر ویژگی‌ها به ازای تصاویر کلاس آموزشی ترک و تصاویر کلاس آموزشی غیر ترک نشان داده شده است.

نمودارهای فوق نشان می‌دهند که اغلب تصاویر دارای ترک، بخش‌هایی با خروج از مرکزیت نزدیک به عدد یک دارند. در حالی که تصاویر فاقد ترک، معمولاً دارای نواحی با خروج از مرکزیت نزدیک به عدد صفر هستند. این مسئله نشان دهنده ساختار هندسی عارضه ترک می‌باشد که به صورت



شکل ۱۲. هیستوگرام مربوط به ویژگی‌های منتخب داده‌های آموزشی کلاس ترک و کلاس غیر ترک

Fig. 12. Histogram related to selected characteristics of Turkish and non-Turkish class educational data



شکل ۱۳. ساختار کلی درخت تصمیم‌گیری پس از مرحله آموزش

Fig. 13. The general structure of the decision tree after the training phase

تایل متناسب با ابعاد داده‌های آموزشی تقسیم می‌گردد. سپس تایل‌های مورد نظر وارد فرآیند پیش‌پردازی که در بخش قبلی توضیح داده شد، می‌گردد و برای هر تایل ویژگی‌های تعریف شده استخراج می‌گردد. همچنین ویژگی‌های فوق به صورت برداری وارد الگوریتم درخت تصمیم‌گیری که قبلاً بر اساس داده‌های آموزشی در دو کلاس ترک و غیرترک، آموزش یافته بود، می‌گردد و عملیات کلاس‌بندی انجام می‌شود.

۴-۴ نتایج استخراج ترک جاده و ارزیابی صحت آن

در این مرحله پس از اینکه بردار ویژگی هشت مؤلفه‌ای مربوط به تایل‌های تقسیم‌بندی شده از هر بخش ارتوفتوموزائیک تولید شده به عنوان ورودی به درخت تصمیم‌گیری معرفی گردید، خروجی دارای برجسب ترک یا غیرترک به دست می‌آید و سپس تایل‌ها مجدداً کنار هم قرار گرفته و ارتوفتوموزائیک اصلی را بازسازی می‌کنند. ارتوفتوموزائیک ساخته شده دقیقاً همانند ارتوفتوموزائیک اولیه می‌باشد با این تفاوت که بخش‌هایی از تصویر که دارای ترک هستند با تغییر RGB بر روی ارتوفتوموزائیک نمایش داده می‌شوند. شکل ۱۶ نمونه‌ای از ارتوفتوموزائیک در ارتفاع ۲۰ متری و خروجی نهایی مربوط به چهار بخش از جاده با ابعاد تایل‌های ۱۰۰ پیکسل در ۱۰۰ پیکسل را نشان می‌دهد.

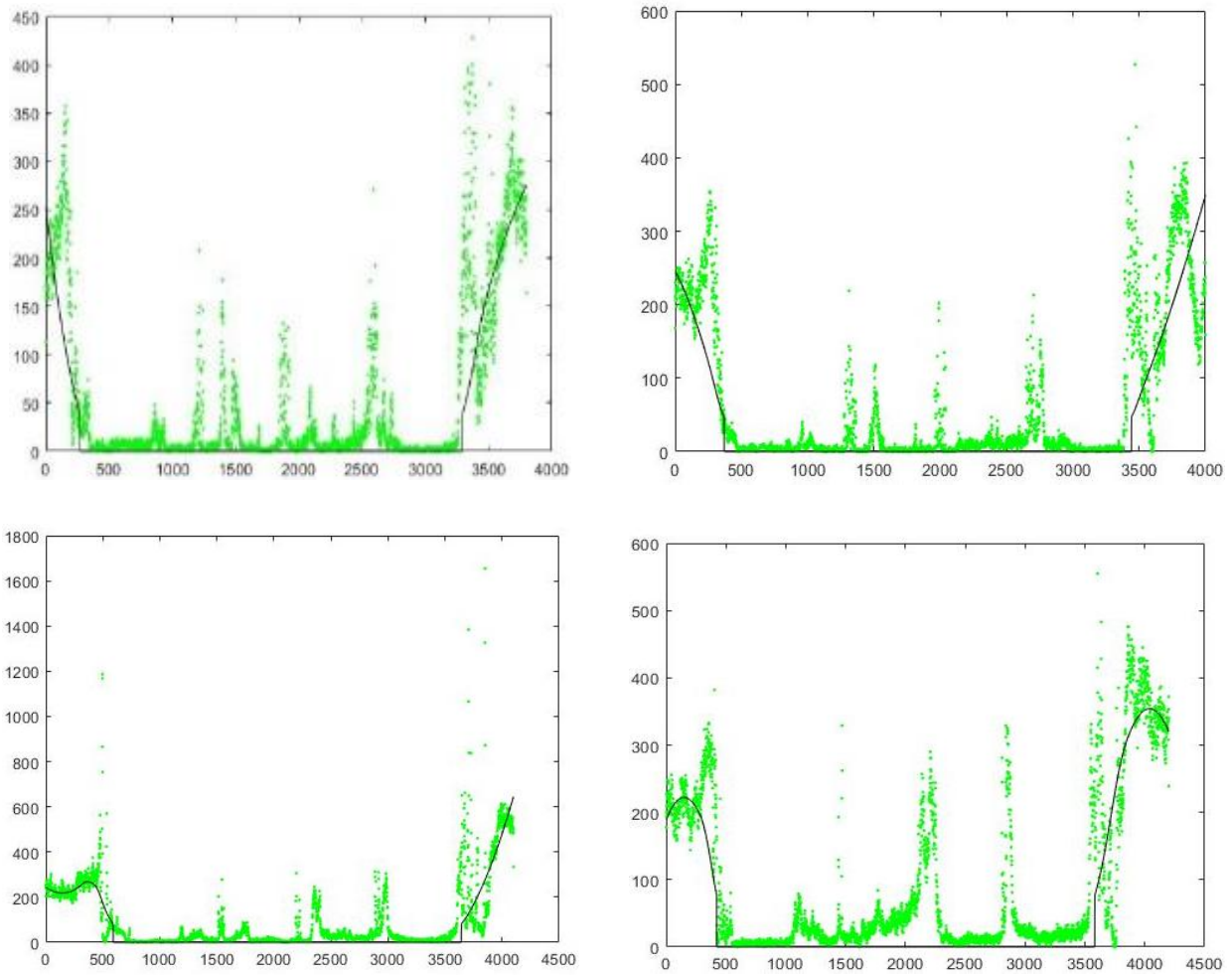
در شکل فوق قسمت‌های قرمز رنگ نشان دهنده بخش‌هایی از جاده هستند که دارای ترک می‌باشند. با توجه به اینکه ترک‌های جاده به رنگ قرمز درآمده‌اند می‌توان دریافت که شبکه به طور مطلوب اقدام به کلاس‌بندی

به صورت خودکار توسط نرم‌افزار متلب و از طریق داده‌های آموزشی منتخب در دو کلاس ترک و غیرترک آموزش داده شدند. ضمن اینکه بهبود و توسعه الگوریتم فوق و مراحل هرس کردن آن می‌تواند در پژوهش‌های آتی صورت گیرد.

پس از آموزش الگوریتم اقدام به تست روش پیشنهادی بر اساس انواع ارتوفتوموزائیک‌های تولید شده گردید. بر این اساس طبق روش پیشنهادی ابتدا با معرفی محور مرکزی جاده بر روی ارتوفتوموزائیک و محاسبه خودکار زاویه آن نسبت به خط افق، تصویر دوران داده می‌شود. سپس عملیات استخراج محدوده‌ی آسفالت صورت می‌گیرد. بر این اساس ابتدا جهت جداسازی قسمت آسفالت جاده از حاشیه راه، عملیات لبه‌یابی انجام گرفته و قسمت آسفالت جاده به صورت خودکار از قسمت‌های دیگر تصویر جدا می‌شود. شکل ۱۴ نمودار مربوط به پیکسل‌های لبه در چهار سطر از ارتوفتوموزائیک را نشان می‌دهد.

با توجه به شکل فوق و نمودار برازش داده شده به مقادیر لبه‌های هر سطر مشاهده می‌شود که لبه بالایی و لبه پایینی جاده به سادگی قابل استخراج بوده و عملیات جداسازی آن از بخش‌های دیگر تصویر می‌تواند صورت گیرد. شکل ۱۵، خروجی محدوده آسفالت جاده از حاشیه راه را بر اساس روش فوق نشان می‌دهد.

همچنین با معرفی ابعاد مورد نظر جهت تقسیم‌بندی جاده به صورت خودکار اقدام به پارت بندی جاده می‌گردد که بر این اساس محدوده‌ی جاده در هر ارتوفتوموزائیک تولید شده به چهار پارت تفکیک و هر بخش به چندین



شکل ۱۴. نمودار پیکسل‌های لبه به ازای سطرهای مختلف ارتوفتوموزائیک

Fig. 14. Diagram of edge pixels for different orthophoto mosaic lines

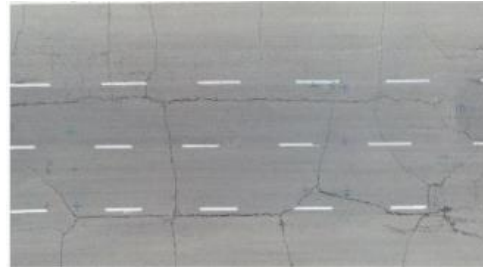
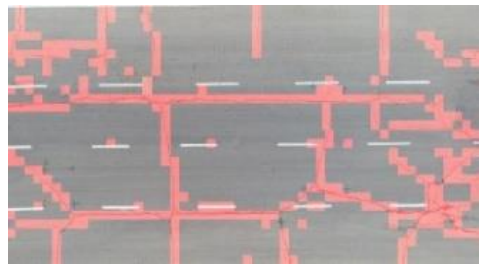


شکل ۱۵. استخراج جاده و حذف حاشیه راه

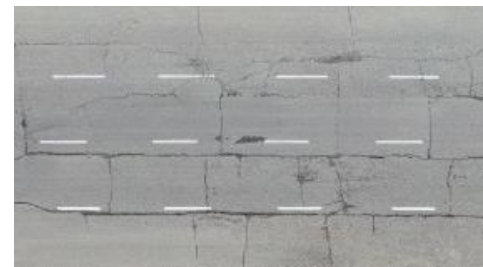
Fig. 15. Road extraction and roadside removal



الف: بخش اول جاده



ب: بخش دوم جاده



ج: بخش سوم جاده



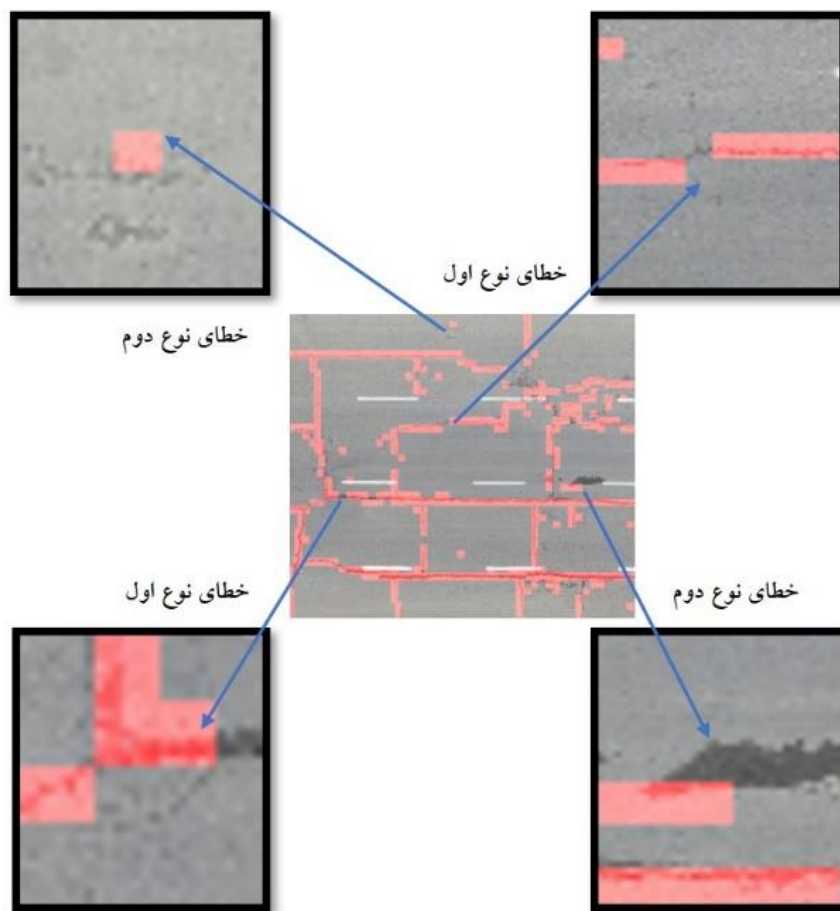
د: بخش چهارم جاده

شکل ۱۶. نتایج نهایی مربوط به آشکارسازی ترک در بخش‌های مختلف جاده

Fig. 16. Final results related to crack detection in different sections of the road

زمینی است که بر این اساس بر روی بهترین ارتوفتوی تولید شده به لحاظ بالا بودن رزولوشن مکانی از محدوده‌ی مورد نظر، اقدام به ترسیم خرابی‌های ناشی از ترک به صورت دستی توسط شخص خیره گردید. سپس جهت کنترل صحت خروجی فوق، چند محدوده از خرابی‌های جاده که قبل از عملیات پرواز بر روی آسفالت مشخص شده بود، به روش فتوگرامتری برد

تصاویر و استخراج ترک‌های جاده کرده است. همچنین الگوریتم در مورد خطوط سفید جاده و قسمت‌های رنگ شده به وسیله اسپری بسیار عالی عمل کرده و آن‌ها را به عنوان نواحی فاقد ترک تشخیص داده است. در شکل ۱۷ نمونه‌ای از خطاهای نوع اول و دوم بر روی ارتوفتو نشان داده شده است. جهت ارزیابی نتایج حاصل از خروجی الگوریتم نیاز به تهیه واقعیت



شکل ۱۷. نمونه‌ای از خطاهای نوع اول و دوم

Fig. 17. An example of errors of the first and second types

صحت روش فوق، اقدام به محاسبه‌ی مقادیر ماتریس ابهام گردید. مطابق جدول ۴ نمونه‌ای از میزان صحت خروجی فوق با سه روش بر روی ارتوفتو در ارتفاع ۲۰ متری نشان داده شده است.

۴-۵- تأثیر نوع پرنده و ارتفاع پرواز در آشکارسازی پیکسل‌های ترک هدف از این آزمون بررسی مزایا و معایب پرنده‌های مورد استفاده در آشکارسازی خرابی ناشی از ترک و انتخاب پرنده‌ی مناسب جهت اخذ تصاویر در تشخیص ترک می‌باشد. لذا بدین منظور پارامترهای مختلفی مورد بررسی و ارزیابی قرار گرفتند که عبارت‌اند از:

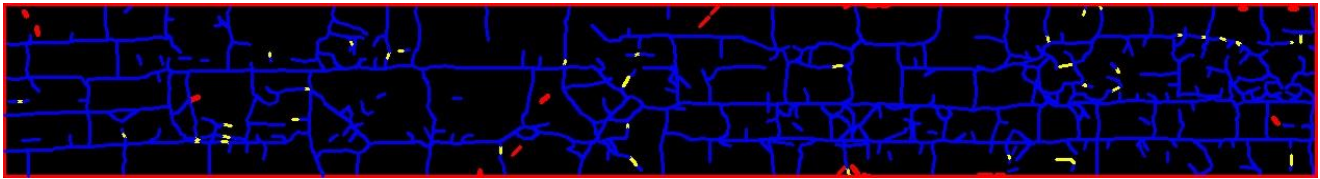
۴-۵-۱- بررسی حد تفکیک مکانی^۱ GRD

جهت تعیین حد تفکیک مکانی پرنده‌های مورد استفاده از طریق آزمون

کوتاه نیز اقدام به تصویربرداری از ارتفاع ۱/۵ الی ۲ متری گردید و سپس با استفاده از عملیات نقشه‌برداری زمینی مدل تولید شده ژئورفرنس گردید. با مقایسه روش دستی و فتوگرامتری برد کوتاه در محدوده‌های مشخص شده، معلوم گردید که دقت ترک‌های ترسیم شده بر روی ارتوفتوموزائیک منتخب قابل قبول بوده و می‌توان به عنوان واقعیت زمینی در ارزیابی‌ها مورد استفاده قرار داد. در شکل ۱۸ مقایسه‌ی نمونه‌ای از ترک‌های تشخیص داده شده بر اساس روش پیشنهادی نسبت به واقعیت زمینی در ارتوفتوی تولید شده از ارتفاع ۲۰ متری را نشان می‌دهد که بر این اساس ترک‌هایی که درست تشخیص داده شده است با رنگ آبی، خطاهای نوع اول با رنگ زرد و نوع دوم با رنگ قرمز مشخص شده‌اند.

با توجه به نتایج به دست آمده مشخص می‌شود که درخت تصمیم‌گیری با استفاده از ویژگی‌های استخراج شده و داده‌های آموزشی معرفی شده می‌تواند با دقت بالایی ترک‌های جاده را آشکارسازی نماید. جهت ارزیابی

1 Ground Resolved Distance



شکل ۱۸. مقایسه نمونه‌ای از ترک‌های تشخیص داده شده نسبت به واقعیت زمینی

Fig. 18. Comparison of a sample of detected cracks with ground reality

جدول ۲. ماتریس ابهام

Table 2. Confusion Matrix

تعداد کل پیکسل‌ها (۴۴۹۶۴۹۷۹۲)	تعداد پیکسل‌های پیش‌بینی شده	
	ترک	غیر ترک
تعداد پیکسل‌های شناخته شده	ترک	TP = ۶۶۹۳۱۹۹۱ FN = ۳۵۲۲۷۳۶
	غیر ترک	FP = ۱۵۱۶۷۸۰۳ TN = ۳۶۴۰۲۷۲۶۲
Accuracy	خروجی بر حسب درصد = ۹۶٪	
Kappa	خروجی بر حسب درصد = ۹۶٪	
F1 Score	خروجی بر حسب درصد = ۸۸٪	

مرتب شده است.

۴-۵-۳- بررسی خطای مسطحاتی و ارتفاعی نقاط چک

جهت بررسی دقت مدل‌سازی تصاویر اخذ شده توسط پرنده‌های مورد نظر از نقاط کنترل و چک استفاده گردید. در هر دو پهپاد، مدل‌های تولید شده از ارتفاع‌های پایین‌تر که رزولوشن مکانی بهتری نسبت به سایر ارتفاع‌های دیگر داشتند، از دقت بهتری برخوردار بودند. شکل ۲۱ نمودار میانگین خطای مسطحاتی و ارتفاعی نقاط چک را در ۱۱ تا از بهترین مدل‌های منتخب از دو پرنده به صورت میانگین نشان می‌دهد. در هر پرنده میانگین خطای مسطحاتی و ارتفاعی از کم به زیاد مرتب شده است.

۴-۵-۴- بررسی الگوریتم پیشنهادی

پس از بررسی موارد ذکر شده در تعیین نوع پرنده و ارتفاع مناسب، در مرحله‌ی آخر اقدام به بررسی الگوریتم پیشنهادی بر روی مدل‌های تشکیل شده از ارتفاع ۲۰ و ۴۰ متری، توسط پهپادهای مورد نظر گردید. بدین منظور پس از معرفی ارتوفتوموزائیک‌های ذکر شده به عنوان ورودی الگوریتم،

زمینس در ارتفاع‌های مختلف تصویر اخذ گردید. بر این اساس پس از محاسبه ضریب GRD به GSD در پهپاد فانتوم ۴ پرو به ضریبی در حدود ۱/۲ و پرنده‌ی ماویک پرو به ضریبی معادل ۳/۷ رسیدیم که این امر نشان می‌دهد در صورتی که نیاز به آشکارسازی ترک‌های ریز باشد پهپاد فانتوم ۴ پرو گزینه‌ی مناسب‌تری است. شکل ۱۹ نمونه‌ای از تصاویر اخذ شده از تارگت زمینس ۱۶ و ۶۴ بازویی توسط پهپادهای مورد مطالعه را نشان می‌دهد [۳۰].

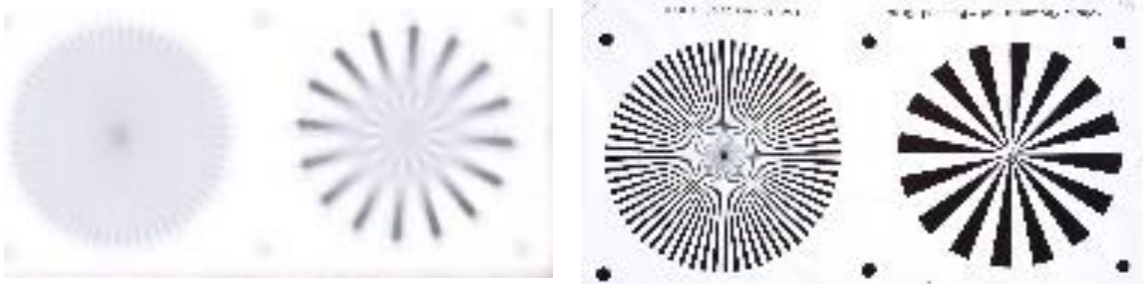
۴-۵-۲- بررسی خطای ریپروجکشن

جهت بررسی خطای ریپروجکشن پس از انجام مدل‌سازی در حالت‌های مختلف و تعیین میانگین خطای فوق مشخص گردید پرنده‌ی فانتوم ۴ پرو دارای خطای میانگین ۰/۳ پیکسل و ماویک پرو دارای خطای میانگین ۰/۹ پیکسل است؛ که در هر دو پهپاد، مدل‌های تولید شده از ارتفاع‌های پایین‌تر دقت بهتری را نسبت به سایر ارتفاع‌های دیگر داشتند. شکل ۲۰ نمودار خطای ریپروجکشن در ۱۱ تا از بهترین مدل‌های تشکیل شده در دو پهپاد را نشان می‌دهد. در هر پرنده میانگین خطای ریپروجکشن‌ها از کم به زیاد



ب: فانتوم ۴ پرو-ارتفاع ۳۶ متر

الف: فانتوم ۴ پرو-ارتفاع ۵ متر

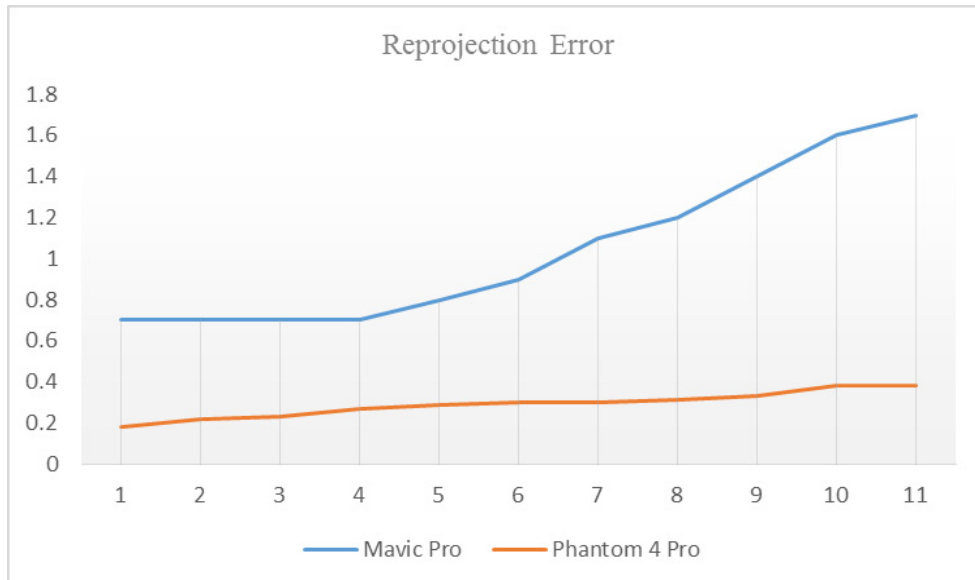


د: ماویک پرو-ارتفاع ۳۲ متر

ج: ماویک پرو-ارتفاع ۵ متر

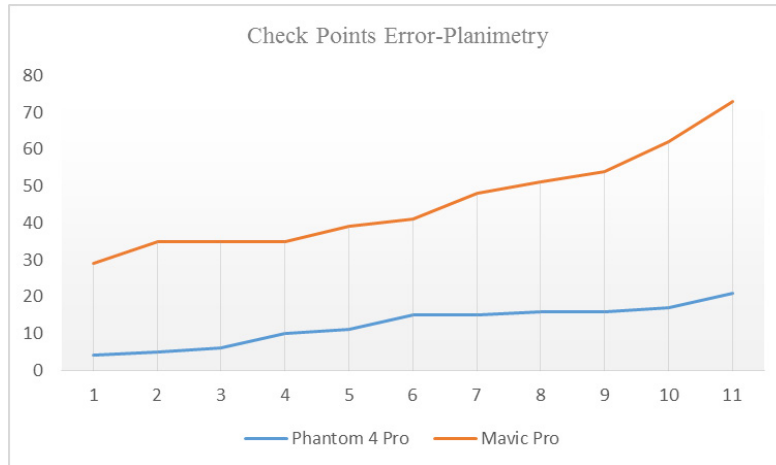
شکل ۱۹. نمونه‌ای از تصاویر اخذ شده از تارگت زیمنس ۱۶ و ۶۴ بازویی توسط پهپادهای مورد مطالعه

Fig. 19. Sample images taken from Siemens Target 16 and 64 Arms studied by drones

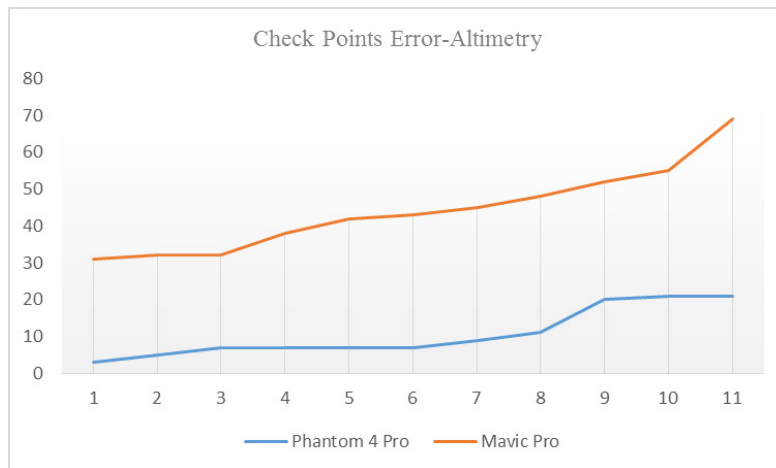


شکل ۲۰. نمودار خطای ریبروژکشن

Fig. 20. Reprojection error diagram



الف: خطای مسطحاتی



ب: خطای ارتفاعی

شکل ۲۱. نمودار میانگین خطای مسطحاتی و ارتفاعی نقاط چک

Fig. 21. Graph of mean area and height error of checkpoints

مکانی پایین تر و جزئیات کمتری از خرابی قابل رویت است که بهترین ارتفاع جهت آشکارسازی پیکسل‌های ترک با دقت بالا در این پژوهش، ارتفاع ۲۰ متر از سطح جاده می‌باشد. هر چند بر اساس نیاز سیستم مدیریت روسازی در سطوح پروژه و شبکه می‌توان ارتفاع مورد نظر را تعیین نمود.

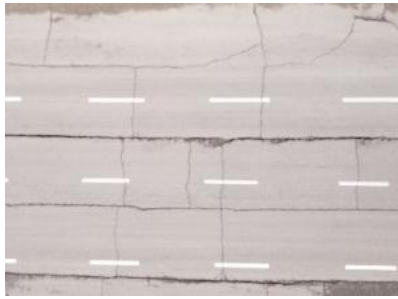
۴-۶- تأثیر سرعت پرنده بر آشکارسازی پیکسل‌های ترک

بر اساس آزمون قبلی مشخص شد که پهپاد فانتوم ۴ پرو در ارتفاع ۲۰ متری عملکرد بهتری نسبت به سایر حالت‌های بررسی شده در این پژوهش دارد. لذا هدف از این آزمون تعیین سرعت مناسب پرنده جهت انجام عملیات آشکارسازی پیکسل‌های ترک می‌باشد. همان‌طور که قبلاً

تصاویر آشکارسازی پیکسل‌های ترک در خروجی تعیین گردید. شکل ۲۲ نمونه‌ای از هر بخش جاده در چهار ارتفاعموزائیک معرفی شده را نشان می‌دهد.

همان‌طور که در جدول ۵ مشاهده می‌گردد، دقت آشکارسازی پیکسل‌های ترک پس از مقایسه‌ی خروجی‌های فوق با واقعیت زمینی در تصاویر پهپاد فانتوم ۴ پرو نسبت به مایک پرو بهتر است.

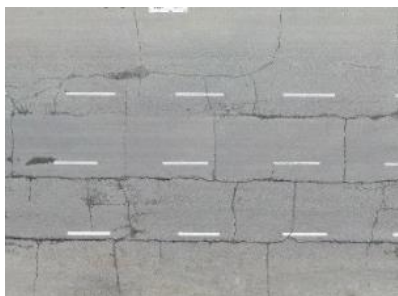
بر اساس نتایج به دست آمده در خصوص بررسی‌های صورت گرفته جهت انتخاب نوع پرنده مشخص گردید که تصاویر اخذ شده توسط پهپاد فانتوم ۴ پرو جهت آشکارسازی پیکسل‌های ترک نسبت به پهپاد مایک پرو عملکرد بهتری دارند و همچنین مشخص گردید هر چه ارتفاع بالاتر باشد رزولوشن



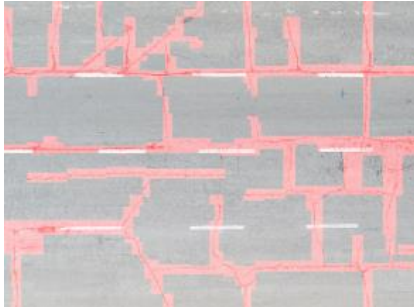
الف: ارتفاع ۲۰ متری - پهپاد ماویک پرو



ب: ارتفاع ۴۰ متری - پهپاد ماویک پرو



ج: ارتفاع ۲۰ متری - پهپاد فانتوم ۴ پرو



د: ارتفاع ۴۰ متری - پهپاد فانتوم ۴ پرو

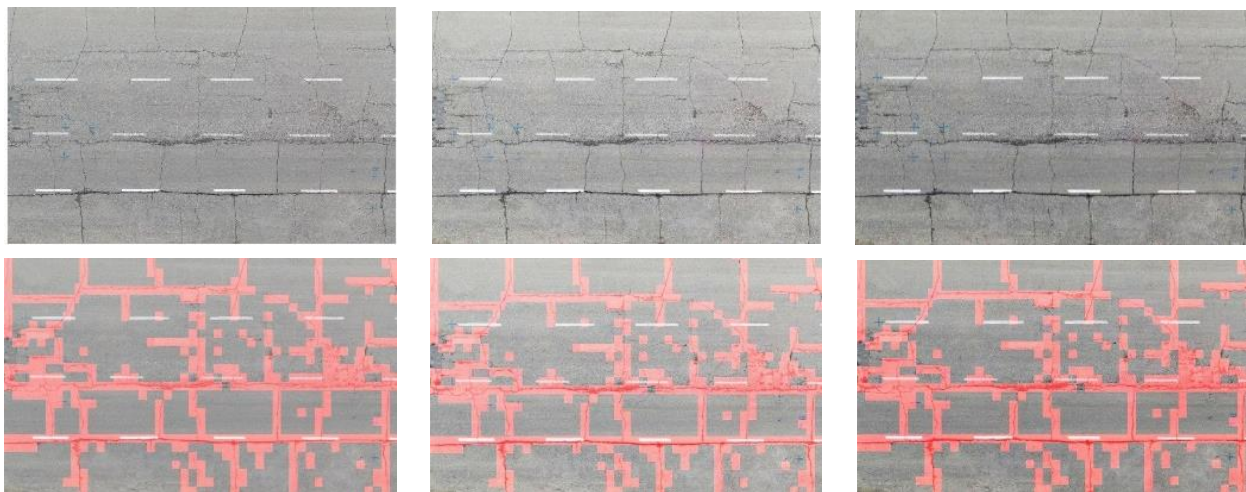
شکل ۲۲. خروجی الگوریتم پیشنهادی در آشکارسازی پیکسل‌های ترک

Fig. 22. The output of the proposed algorithm in detecting crack pixels

جدول ۵. مقایسه صحت خروجی الگوریتم پیشنهادی در حالت‌های مختلف

Table 5. Comparison of the output accuracy of the proposed algorithm in different modes

ردیف	پرنده	ارتفاع	TP	TN	FP	FN	Acc.	Ka.	F ₁
۱	ماویک پرو	۲۰	۱۳۶۱۴۶۶۱	۷۵۱۲۸۹۰۹	۱۱۲۲۶۱۵۹	۱۳۴۶۵۰۵	۸۸	۸۶	۶۸
۲	ماویک پرو	۴۰	۳۲۳۱۴۱۷	۱۷۵۹۱۸۲۳	۳۶۰۳۱۴۴	۴۴۰۶۴۸	۸۴	۸۱	۶۲
۳	فانتوم ۴ پرو	۲۰	۶۶۹۳۱۹۹۱	۳۶۴۰۲۷۲۶۲	۱۵۱۶۷۸۰۳	۳۵۲۲۷۳۶	۹۶	۹۶	۸۸
۴	فانتوم ۴ پرو	۴۰	۱۵۹۳۵۷۳۳	۸۶۲۳۱۴۵۴	۹۵۸۱۲۷۳	۶۶۳۹۸۹	۹۱	۹۰	۷۶



ج: سرعت ۲ متر بر ثانیه

ب: سرعت ۱ متر بر ثانیه

الف: سرعت ۰/۵ متر بر ثانیه

شکل ۲۳. خروجی الگوریتم پیشنهادی در آشکارسازی پیکسل‌های ترک

Fig. 23. The output of the proposed algorithm in detecting crack pixels

بر اساس نتایج به دست آمده و همچنین ارزیابی کیفی صورت گرفته مشخص گردید که پرواز در ۳ سرعت انجام شده، موجب اختلاف محسوسی در آشکارسازی پیکسل‌های ترک نمی‌گردد. لذا با در نظر گرفتن پایش جاده‌ای به طول یک کیلومتر با سرعت ۰/۵ متر بر ثانیه حدود ۳۴ دقیقه زمان نیاز است که با توجه به اینکه مداومت پروازی پهپاد فانتوم ۴ پرو ۱۵ الی ۱۷ دقیقه می‌باشد، پس انجام فرایند فوق حداقل به ۳ باطری و حدود یک ساعت زمان نیاز دارد در حالی که با سرعت ۱ متر بر ثانیه حدود ۱۷ دقیقه پرواز و ۲ متر بر ثانیه حدود ۸ دقیقه پرواز نیاز است. بر اساس آزمون فوق پرواز با سرعت ۲ متر بر ثانیه پیشنهاد می‌گردد.

توضیح داده شد در ارتفاع ۲۰ متری از سطح جاده با سه سرعت، پرواز صورت گرفت و مدل‌های تولید شده جهت بررسی سرعت مناسب توسط الگوریتم پیشنهادی بررسی گردید. شکل ۲۳ نمونه‌ای از بخش اول جاده و خروجی الگوریتم پیشنهادی را بعد از آشکارسازی در سه سرعت ۰/۵، ۱ و ۲ متر بر ثانیه نشان می‌دهد.

پس از اتمام عملیات آشکارسازی پیکسل‌های ترک، جهت مقایسه‌ی خروجی‌های فوق نسبت به همدیگر و تعیین سرعت مناسب در ارتفاع ۲۰ متری پس از مقایسه‌ی هر خروجی با واقعیت زمینی و تعیین ماتریس ابهام نتایج مطابق جدول ۶ نشان داده می‌شود.

جدول ۶. مقایسه صحت خروجی الگوریتم پیشنهادی در سرعت‌های مختلف

Table 6. Compare the output accuracy of the proposed algorithm at different speeds

ردیف	سرعت پرنده (m/s)	TP	TN	FP	FN	Acc.	Ka.	F1
۱	۰/۵	۶۶۹۳۱۹۹۱	۳۶۴۰۲۷۲۶۲	۱۵۱۶۷۸۰۳	۳۵۲۲۷۳۶	۹۶	۹۶	۸۸
۲	۱	۶۶۰۶۶۹۰۳	۳۶۴۸۵۳۵۳۶	۱۵۲۰۲۲۳۱	۳۴۷۷۲۰۵	۹۶	۹۶	۸۸
۳	۲	۶۵۲۶۳۲۳۷	۳۶۵۱۶۷۴۶۲	۱۵۲۱۵۳۱۱	۳۷۹۸۳۸۹	۹۶	۹۵	۸۷

۵- نتیجه‌گیری

دیده و سپس جهت انجام عملیات کلاس‌بندی استفاده گردید. بر این اساس پس از معرفی ارتوفتوموزائیک اصلی به الگوریتم پیشنهادی و پس از معرفی راستای محور جاده، تصویر ارتوفتوموزائیک دوران داده شده و قسمت آسفالت جاده از حاشیه آن به صورت خودکار جدا و همچنین کل محدوده مورد نظر به چند بخش تقسیم گردید. سپس ارتوفتوموزائیک بخش‌بندی شده نیز به ابعادی برابر با تایل‌های آموزشی تقسیم شده تا در فرآیند پیش‌پردازش و استخراج ویژگی قرار گرفته و بر مبنای درخت تصمیم‌گیری آموزش دیده شده، کلاس‌بندی شوند. بر این اساس تایل‌های کلاس‌بندی شده پس از اتصال به هم در قسمت‌های دارای ترک با تغییر RGB نمایش داده می‌شوند. در مرحله بعدی پس از تهیه واقعیت زمینی از طریق ارتوفتوموزائیک منتخب توسط شخص خبره و مقایسه با روش فتوگرامتری برد کوتاه و زمینی، ارزیابی عملیات آشکارسازی پیکسل‌های ترک با سه روش تعیین گردید که برای ارتوفتوموزائیک اصلی در ارتفاع ۲۰ متری دقتی حدود ۹۶ درصد تعیین شد و همچنین بر روی جاده مورد مطالعه عوارض اضافی مانند خطوط اسپری رنگی وجود داشت که این عوارض به همراه خطوط سفید جاده به عنوان قسمت‌های بدون ترک طبقه‌بندی شدند. این مسئله نشان می‌دهد که عوارض ناخواسته بر روی جاده، تأثیر چندانی بر دقت عملکرد روش پیشنهادی نداشته و این روش می‌تواند با وجود آن‌ها کارایی مطلوب خود را حفظ کند. همچنین با توجه به آزمون‌های صورت گرفته مشخص گردید که پهپاد فانتوم ۴ پرو در ارتفاع ۲۰ متری و با سرعت ۲ متر بر ثانیه عملکردی مناسب در آشکارسازی پیکسل‌های ترک دارد. در ضمن پیشنهاد می‌شود که در پژوهش‌های بعدی با به کارگیری DEM به عنوان یک ویژگی اضافه به الگوریتم دقت خروجی را افزایش داد و همچنین به دلیل استفاده از ویژگی‌های هندسی در الگوریتم پیشنهادی امکان استخراج و طبقه‌بندی

استخراج ترک‌های جاده به صورت خودکار و با استفاده از تصاویر اخذ شده توسط پهپاد فتوگرامتری از جهات مختلف بسیار مفید و به صرفه می‌باشد. بازدید میدانی جاده‌ها توسط کارشناسان می‌تواند بسیار وقت‌گیر و پرهزینه باشد. از طرفی در اغلب موارد کارشناسان فقط بخشی از جاده را ارزیابی کرده و وضعیت آن را به بقیه قسمت‌های جاده تعمیم می‌دهند که این کار باعث بروز خطاها و اشتباهات فاحش در بررسی وضعیت روسازی جاده‌ها می‌شود. برای بررسی خودکار وضعیت روسازی جاده‌ها و ترک‌های آسفالت می‌توان از اسکنرهای لیزری استفاده کرد. این ابزارها بسیار گران‌قیمت بوده و هزینه خرید و تعمیر و نگهداری آن‌ها بالاست. از این رو استفاده از تصاویر پهپاد جهت آشکارسازی و استخراج ترک‌های جاده‌ای، نیازی ضروری در مدیریت و پایش وضعیت جاده‌ها به نظر می‌رسد. به این ترتیب می‌توان با هزینه‌ای نسبتاً پایین این کار را به صورت خودکار انجام داد. به همین دلیل در این پژوهش روشی جهت استخراج ترک‌های جاده به صورت خودکار و بر اساس ارتوفتوموزائیک تهیه شده از تصاویر پهپاد ارائه می‌شود و همچنین اقدام به بررسی دقت و کارایی روش پیشنهادی بر روی تصاویر مختلف گردید که برای انجام این کار ابتدا پس از طراحی شبکه فتوگرامتری، تصاویری با استفاده از پهپادهای مولتی روتر ارزان قیمت از قبیل فانتوم ۴ پرو و مایک پرو از سطح جاده مدنظر اخذ شده و ارتوفتوموزائیک جاده تهیه گردید. در مرحله بعدی داده‌های آموزشی برای کلاس‌های ترک و غیرترک انتخاب شدند و بعد از پیش‌پردازش، ویژگی‌های هندسی که عارضه ترک را از بقیه عوارض مجزا می‌کند استخراج شدند. برای انجام عملیات کلاس‌بندی و آشکارسازی ترک‌ها از درخت تصمیم‌گیری استفاده شد. درخت تصمیم‌گیری ابتدا به وسیله ویژگی‌های استخراج شده توسط داده‌های آموزشی، آموزش

(2000).

- [11] M. Safarzadeh, A. Kavousi, M.B. Sari, Provide a model for road pavement management at the project level through hierarchical analysis (in Persian), Transportation Research Journal, (2) (2006).
- [12] H. Naderi, M. Zokaei, Automatic evaluation of asphalt pavement failures by image processing method (in Persian), in: Third International Conference on Applied Research in Civil Engineering, Architecture and Urban Management, Khajeh Nasir al-Din Tusi University of Technology, 2015.
- [13] K.H. McGhee, Automated pavement distress collection techniques, Transportation Research Board, 2004.
- [14] H. Zakeri, F. Moghadasnejad, Expert system for detecting pavement failure caused by cracks in civil and environmental (in Persian), Amirkabir University of Technology, Tehran, 2008.
- [15] S. Soufi, S.M. Karimi, M. Abbasghorbani, Automatic assessment of pavement surface failures using a road surface scanner (in Persian), in: The First National Conference on Road and Transportation Engineering, University of Gilan, 2017.
- [16] C.o. authors, Instructions for monitoring and technical control of maps and spatial information prepared using UAVs (in Persian), in: G.O.o.T.S.a. Control (Ed.), Country Planning and Budget Organization, Country Mapping Organization, Iran, 2016.
- [17] P.J. Grandsaert, Integrating pavement crack detection and analysis using autonomous unmanned aerial vehicle imagery, (2015).
- [18] Y. Pan, X. Zhang, M. Sun, Q.J.I.A.o.t.P. Zhao, Remote Sensing, S.I. Sciences, Object-Based and Supervised Detection of Potholes and Cracks from the Pavement Images Acquired by UAV, 42 (2017).
- [19] A.B. Ersoz, O. Pekcan, T. Teke, Crack identification for rigid pavements using unmanned aerial vehicles, in: IOP Conference Series: Materials Science and Engineering, 2017.
- [20] G. Leonardi, V. Barrile, R. Palamara, F. Suraci,

ترک‌های افقی، قائم، مایل، پوست سوسماری و بلوکی با ابعاد مختلف نیز فراهم می‌گردد.

منابع

- [1] A. Safikhani, J. Salahshour, H. Dashtinaserabadi, The effect of using pavement management method on reducing the cost of annual road maintenance (in Persian), in: First National Conference on Infrastructure Engineering and Management, University of Tehran, 2009.
- [2] M. Ameri, B. Golchin, Familiarity with the concepts of pavement management system (in Persian), Ministry of Roads and Transportation, Deputy Minister of Research and Technology Education, Transportation Research Institute, Tehran, 2005.
- [3] R. Alinasab, evaluation of lime fillers effects on reduction of moisture and freeze damage by indirect tensile strength and compressive strength tests %J Modares Civil Engineering journal, 14(20) (2014) 77-85.
- [4] H. Ramezanzpour, M. Ameri, S. Novbakht, Study and comparison of road procedure evaluation methods and the possibility of using these methods in evaluating the country's roads according to the available facilities (in Persian), University of Science and Industry, Tehran, 2001.
- [5] R. Haas, W.R. Hudson, J.P. Zaniewski, Modern pavement management, 1994.
- [6] W.R. Hudson, R. Haas, R.D.J.N.r. Pedigo, Pavement management system development, (215) (1979).
- [7] J.R. Mbwana, M.A.J.T.r.r. Turnquist, Optimization modeling for enhanced network-level pavement management system, 1524(1) (1996) 76-85.
- [8] C.L. Saraf, K.J.T.R.R. Majidzadeh, Distress prediction models for a network-level pavement management system, (1344) (1992).
- [9] S. Horton, Project level pavement management system development, (1990).
- [10] J.A. Reigle, Development of an integrated project-level pavement management model using risk analysis,

- [25] S. Mokhtari, L. Wu, H.-B. Yun, Comparison of supervised classification techniques for vision-based pavement crack detection, *Transportation Research Record*, 2595(1) (2016) 119-127.
- [26] P. Sheng, L. Chen, J. Tian, Learning-based road crack detection using gradient boost decision tree, in: 2018 13th IEEE Conference on Industrial Electronics and Applications (ICIEA), IEEE, 2018, pp. 1228-1232.
- [27] S.A. Fakhri, S.A. Fakhri, M. Saadatesresht, Road Crack Detection Using Gaussian/prewitt Filter, 42 (2019) 371-377.
- [28] S. Loussaief, A. Abdelkrim, Machine learning framework for image classification, in: 2016 7th International Conference on Sciences of Electronics, Technologies of Information and Telecommunications (SETIT), IEEE, 2016, pp. 58-61.
- [29] F. Galton, *Finger Prints* Macmillan, in, London, 1892.
- [30] S.A. Fakhri, M. Saadatesresht, M. Varshosaz, H. Zakeri, Automatic Estimation of the Spatial Resolution Coefficient of UAV Images Based on Siemens Star Target (in Persian), *Journal of Geomatics Science and Technology*, 10(4) (2021) 191-204.
- G. Candela, 3D Mapping of Pavement Distresses Using an Unmanned Aerial Vehicle (UAV) System, in: *International Symposium on New Metropolitan Perspectives*, Springer, 2018, pp. 164-171.
- [21] F. Dadrasjavan, N. Zarrinpanjeh, A. Ameri, Automatic Crack Detection of Road Pavement Based on Aerial UAV Imagery, (2019).
- [22] L. Zhang, W. Xu, L. Zhu, X. Yuan, C. Zhang, Study on Pavement Defect Detection Based on Image Processing Utilizing UAV, in: *Journal of Physics: Conference Series*, IOP Publishing, 2019, pp. 042011.
- [23] S.A. Fakhri, M. Saadatesresht, M. Varshosaz, H. Zakeri, Application of UAV photogrammetry in obtaining qualitative road pavement information, in: *The 7th National Conference on Applied Research in Civil Engineering, Architecture and Urban Management and the 6th Specialized Exhibition of Mass Builders of Housing and Construction in Tehran Province*, undefined, 2020.
- [24] A. Cubero-Fernandez, F.J. Rodriguez-Lozano, R. Villatoro, J. Olivares, J.M.J.E.J.o.I. Palomares, V. Processing, Efficient pavement crack detection and classification, 2017(1) (2017) 1-11.

چگونه به این مقاله ارجاع دهیم

S. A. Fakhri, M. Saadatesresht, M. Varshosaz, H. Zakeri, *Evaluation of UAV Photogrammetric capability in Road Pavement Cracks Detection*, *Amirkabir J. Civil Eng.*, 54(5) (2022) 1705-1730.

DOI: [10.22060/ceej.2021.19815.7263](https://doi.org/10.22060/ceej.2021.19815.7263)



