

Comparing the efficiency of UAV-based specialized photogrammetry software in estimating some structural features of Zagros forests

Case study: Qalajeh, Kermanshah Province

Arian Esfandiyari¹ , Morteza Pourreza^{*2} , Ebadat Ghanbari Parmehr³ 

1- Graduated student of forest science and engineering, Department of natural resources, Faculty of agriculture and natural resources, Razi University, Kermanshah, Iran. Email: arianes0001@gmail.com

2- (*Corresponding author) Assistant professor, Department of natural resources, Faculty of agriculture and natural resources, Razi University, Kermanshah, Iran. Email: pourreza@razi.ac.ir

3- Assistant professor, Department of geomatics engineering, Faculty of civil engineering, Babol Noshirvani University of Technology, Babol, Iran. Email: egparmehr@gmail.com

Article Info

Date of receive:

2025/03/03

Date of last review:

2025/07/15

Date of accept:

2025/08/16

Date of online publication:

2025/08/16

Keywords:

Photogrammetry,
UAV,
Points cloud,
Tree height,
Canopy,
Tree density,
Zagros forests

Extended Abstract

Introduction

Accurate and up-to-date data on the structural characteristics of forests, particularly at the individual tree level, are critical for sustainable forest management. Traditional field methods for forest inventory, such as 100% sampling or random sampling, are time-consuming and labor-intensive. Remote sensing, on the other hand, provides a more efficient way to estimate the biophysical and biochemical parameters of plants on a large scale. Satellite imagery has been widely used for this purpose, but it has certain limitations, such as cloud coverage and high costs associated with high-resolution imagery. UAVs (Unmanned Aerial Vehicles), or drones, offer an effective alternative by capturing high-resolution spatial data without the restrictions of cloud interference. They can be equipped with various sensors, such as LiDAR, multispectral, hyperspectral, and infrared cameras, to collect detailed plant data. UAV-based photogrammetry, which processes aerial images to create maps and 3D models, has become a popular method for forest monitoring. Among the commonly used photogrammetry software, Agisoft Metashape and PIX4D are widely adopted for forest science. However, there is limited research comparing the efficiency of these two software programs in estimating critical structural features of forests, such as tree height, canopy area, and density. The primary aim of this study is to compare the accuracy and efficiency of Agisoft Metashape and PIX4D in estimating forest structural characteristics, specifically tree density, canopy area, and tree height, in the Zagros forests of western Iran. These forests are under pressure from over-exploitation, and effective management requires accurate, up-to-date, and cost-effective monitoring methods in these regions....  Page 28

How to Cite:

Esfandiyari, A. Pourreza, M. Ghanbari Parmehr, E. (2026). Comparing the efficiency of UAV-based specialized photogrammetry software in estimating some structural features of Zagros forests - Case study: Qalajeh, Kermanshah Province. Scientific-Research Quarterly Geographical Data (SEPEHR). 35(138), 27-43.

Materials and Methods

The study was conducted in the protected forests of Qalaje, located between the Kermanshah and Ilam provinces in Iran. The study area covers 15 hectares, with an elevation of 1,700 meters above sea level, and consists of cold, semi-arid climate condition. The dominant tree species in the study area are *Quercus brantii*, *Pronus microcarpa* and *Crataegus pontica*. A UAV (Phantom 4-RTK) equipped with a real-time kinematic (RTK) system was used to capture high-resolution aerial images over the 15-hectare area. The study area was divided into three groups of sample plots based on canopy coverage density: low (less than 25%), medium (25-50%), and high (more than 50%) canopy coverage. Ten replicates were randomly selected in each category for image processing and field measurement. The flight plan was designed using GS RTK software with a flight altitude of 100 meters. The longitudinal and transversal overlaps were 75%. The images were processed in both Agisoft and PIX4D to create dense point clouds. In Agisoft, a Structure from Motion (SfM) algorithm was used to create dense point clouds, followed by 3D model generation, orthophoto mosaic creation, and extraction of Digital Surface Models (DSM) and Digital Terrain Models (DTM). Similarly, PIX4D followed a comparable process with slight variations in parameter settings. After point cloud generation, the canopy area and tree height were estimated using ArcGIS, where the tree crown area was calculated from the DSM and DTM layers. Field measurements were taken for each plot, including tree density, crown diameter, and tree height. These measurements were used to validate the UAV-based estimates from the two software programs. Paired T-tests were used to compare the estimated tree density, canopy area, and tree height from the UAV images with the field measurements. Linear regression models were also developed to assess the correlation between the UAV-based estimates and field data, with the coefficient of determination (R^2) calculated. Additionally, the Root Mean Square Error (RMSE) was used to quantify the estimation error.

Results and discussion

Regarding the comparison of the performance of the two software programs for generating point clouds, the results showed that the point cloud density produced by Agisoft (1708 points per square meter) was higher than that produced by PIX4D (1498.5 points per square meter).

Additionally, the image processing time in Agisoft (242 minutes) was less than that in PIX4D (273 minutes). The results indicated that only in sample plots with low canopy cover density, the estimated number of trees in Agisoft (3.3) and PIX4D (3) did not show a significant difference from the measured number (3.9). In sample plots with medium and high canopy cover density, the error in the estimated number of trees by Agisoft (with values of 55.15% and 70.29%, respectively) was lower than the estimated error by PIX4D (with values of 61.13% and 78.10%, respectively). Regarding canopy cover estimation, the results showed that in Agisoft and PIX4D, the highest RMSE% error in canopy cover estimation was related to sample plots with low canopy cover density, with values of 30.77% and 22.90%, respectively. The results also indicated that with an increase in canopy cover density in the sample plots, the percentage of error in canopy cover estimation decreased relatively similarly in both software programs. Specifically, the canopy cover estimation error for Agisoft at medium and high canopy densities was 27.63% and 8.63%, respectively, while for PIX4D, it was 12.67% and 11.15%, respectively. Regarding tree height estimation, the results showed that the estimated height error at low canopy density was the lowest in both Agisoft and PIX4D, with values of 14.77% and 5.84%, respectively, compared to other canopy density classes. Furthermore, the results indicated that as the canopy density in the sample plots increased from low to medium, the estimated RMSE% error in tree height for the outputs of both Agisoft and PIX4D increased (with values of 23.12% and 12.59%, respectively). However, as the sample plot density increased from medium to high, this error decreased for both Agisoft and PIX4D (with values of 21.34% and 11.69%, respectively).

Conclusion

In this study, the performance of Agisoft and PIX4D software was compared in estimating the structural features of Zagros forests. Considering the processing time and quality of dense point clouds, it was concluded that Agisoft's performance is superior to that of PIX4D. However, the performance of both software programs for estimating the number of trees, height, and canopy cover is entirely dependent on the level of canopy density.



مقایسه کارایی نرم افزارهای تخصصی فتوگرامتری پهپادمنا در برآورد برخی از ویژگی‌های ساختاری در جنگل‌های زاگرس مطالعه موردی: قلاجه، استان کرمانشاه

آرین اسفندیاری^۱، مرتضی پوررضا^{۲*}، عبادت قنبری پرمهر^۳

۱- دانش‌آموخته کارشناسی ارشد علوم و مهندسی جنگل، گروه مهندسی منابع طبیعی، پردیس کشاورزی و منابع طبیعی، دانشگاه رازی، کرمانشاه، ایران
araines0001@gmail.com

۲- (*نویسنده مسئول) استادیار گروه مهندسی منابع طبیعی، پردیس کشاورزی و منابع طبیعی، دانشگاه رازی، کرمانشاه، ایران pourreza@razi.ac.ir

۳- استادیار گروه نقشه‌برداری، دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه صنعتی نوشیروانی بابل، بابل، ایران egpirmehr@gmail.com

چکیده

امروزه فتوگرامتری پهپادمنا برای دریافت اطلاعات دقیق، ارزان و به‌روز از جنگل در مقایسه با روش‌های سنتی آماربرداری جایگاه ویژه‌ای پیدا کرده است. نوع نرم‌افزارهای فتوگرامتری به کارگرفته شده برای پردازش تصاویر دریافت شده توسط پهپاد، اهمیت فراوانی در دقت و صحت نتایج دارند. بنابراین هدف پژوهش حاضر، مقایسه قابلیت و دقت نرم‌افزارهای Agisoft Metashape و PIX4Dmapper در برآورد ویژگی‌های ساختاری جنگل‌های زاگرس شامل تراکم، سطح تاج‌پوشش و ارتفاع درختان است. به این منظور بخشی از جنگل‌های زاگرس در استان کرمانشاه با وسعت ۱۵ هکتار انتخاب و تصویربرداری از آن با استفاده از پهپاد مجهز به سیستم موقعیت‌یاب آنی (RTK) انجام شد. تعداد ده قطعه‌نمونه به‌طور تصادفی برای تراکم‌های مختلف تاج‌پوشش (کم، متوسط و زیاد) انتخاب شدند. پردازش تصاویر و ایجاد ابر نقاط با استفاده از دو نرم‌افزار Agisoft و PIX4D انجام شد. نتایج نشان داد که ابر نقاط متراکم تولید شده در نرم‌افزار Agisoft و PIX4D به ترتیب ۱۷۰۸ و ۱۴۹۸/۵ بر متر مربع بود. همچنین در قطعه‌نمونه‌های با تراکم تاج‌پوشش کم، هر دو نرم‌افزار برآورد دقیقی از تعداد درختان داشتند اما در قطعه‌نمونه‌های با تراکم متوسط و زیاد، خطای Agisoft (با مقادیر ۵۵/۱۵ درصد و ۷۰/۲۹ درصد) از خطای PIX4D (با مقادیر ۸/۱۳ درصد و ۶۱/۱۳ درصد و ۷۸/۱۰ درصد) کمتر بود. درباره برآورد سطح تاج‌پوشش، بیشترین (۳۰/۷۷ درصد) و کمترین (۸/۶۳ درصد) خطای برآوردی مربوط به Agisoft و به ترتیب در قطعات نمونه با تراکم تاج‌پوشش زیاد و کم بود. درباره برآورد ارتفاع نیز، بیشترین (۲۳/۱۲ درصد) و کمترین (۵/۱۲ درصد) خطا، به ترتیب مربوط به Agisoft در درجه تراکم تاج‌پوشش متوسط و PIX4D در درجه تراکم تاج‌پوشش کم بود. با توجه به زمان پردازش و کیفیت ابر نقاط متراکم، نتیجه‌گیری شد که گرچه کارایی نرم‌افزار Agisoft نسبت به نرم‌افزار PIX4D بیشتر است ولی کارایی هر دو نرم‌افزار برای برآورد تعداد درخت، ارتفاع و سطح تاج‌پوشش، کاملاً وابسته به میزان تراکم تاج‌پوشش است.

اطلاعات مقاله

تاریخ دریافت:

۱۴۰۳/۱۲/۱۳

تاریخ آخرین بازنگری:

۱۴۰۴/۰۴/۲۴

تاریخ پذیرش:

۱۴۰۴/۰۵/۲۵

تاریخ انتشار:

۱۴۰۴/۰۵/۲۵

واژه‌های کلیدی:

فتوگرامتری؛

پهپاد؛

ابرنقاط؛

ارتفاع درخت؛

تاج پوشش؛

تراکم درخت؛

جنگل‌های زاگرس.

استناد به این مقاله:

اسفندیاری، آ؛ پوررضا، م؛ قنبری پرمهر، ع (۱۴۰۵)؛ مقایسه کارایی نرم‌افزارهای تخصصی فتوگرامتری پهپادمنا در برآورد برخی از ویژگی‌های ساختاری در جنگل‌های زاگرس - مطالعه موردی: قلاجه، استان کرمانشاه؛ فصلنامه علمی پژوهشی اطلاعات جغرافیایی (سپهر)، ۳۵ (۱۳۸)، ۴۳ - ۲۷.

۱- مقدمه

دریافت داده‌های دقیق و به‌روز از وضعیت کمی جنگل‌ها، به‌ویژه در مقیاس تک‌درخت‌ها، از پایه‌های اساسی مدیریت پایدار جنگل است (Grznárová et al., 2019). داده‌های مرتبط با جنگل نشان‌دهنده اطلاعاتی هستند که به‌صورت سازمان‌دهی شده از طریق روش‌های زمینی و سنجش از دور گردآوری می‌شوند و برای کمی‌سازی وضعیت یک جنگل و شرایط اقتصادی و اکولوژیکی آن به‌کار می‌روند (Liang & Gamarra, 2020).

برای ارزیابی میدانی، روش‌های مختلفی مانند روش‌های آماربرداری صد درصدی و نمونه‌برداری زمینی وجود دارد (Maurya et al., 2018). روش‌های سنتی بر پایه نمونه‌برداری زمینی بوده که علیرغم دقت بالا، نیاز به نیروی کار زیاد داشتند که باعث صرف زمان زیادی می‌شود (Cruz et al., 2019). Mahlein, 2016 در مقایسه با روش‌های سنتی، سنجش از دور برآوردی سریع از پارامترهای بیوفیزیکی و بیوشیمیایی گیاهان در سطحی بزرگ ارائه می‌دهد (Thapa et al., 2021). فناوری سنجش از دور به‌دلیل دارا بودن توانایی جمع‌آوری اطلاعات در زمان‌های مختلف و نسبتاً دلخواه از مناطق مورد نظر، جایگاه ویژه‌ای در پایش جنگل‌ها پیدا کرده است (Massey et al., 2023).

در برابر برخی محدودیت‌های تصاویر ماهواره‌ای مانند ابرناکی آسمان و به‌روز بودن نسبی داده‌ها، پهپادها می‌توانند داده‌های مناسب‌تری در اختیار قرار دهند (Grznárová et al., 2019; Kargar et al., 2022). قابلیت تکرارپذیری تصویربرداری با استفاده از پهپاد در یک بازه زمانی خاص و دلخواه، پایش مداوم و دقیق از اکوسیستم‌های جنگلی را امکان‌پذیر خواهد ساخت (Karthigesu et al., 2024). به بیان دیگر می‌توان گفت که بهره‌گیری از پهپادها و علم فتوگرامتری، داده‌های مکانی پیوسته و مداومی را از ساختار جنگل و گونه‌های مورد نظر با توان تفکیک مکانی بسیار بالا (حتی در حد سانتی‌متر) در اختیار پژوهشگران و مدیران جنگل قرار می‌دهد (Khalili et al., 2023).

دومین گام فتوگرامتری پهپادمبنا پس از تصویربرداری پردازش تصاویر است که در این‌باره، نرم‌افزارها برای انجام فرآیندهای فراخوانی و تجزیه و تحلیل تصاویر هوایی به‌منظور ایجاد نقشه‌ها، مدل‌ها و سایر داده‌های مکانی نقش کلیدی به عهده دارند (Berber et al., 2023). تاکنون نرم‌افزارهای تخصصی مختلفی برای پردازش تصاویر پهپادی ارائه شده که از مهم‌ترین آن‌ها می‌توان به Agisoft Metashape، Pix4Dmapper و 3DF Zephyr اشاره نمود (Markiewicz et al., 2022). با توجه به اهمیت این موضوع، پژوهش‌هایی به‌منظور مقایسه کارایی این نرم‌افزارها با دیدگاه‌های مختلف و در کاربری‌های مختلف انجام شده است (Emami & Rostami, 2022; Jarahizadeh & Salehi, 2024). زمینه فتوگرامتری در جنگل، دو نرم‌افزار Agisoft Metashape و Pix4Dmapper کاربرد بیشتری در پردازش تصاویر برداشت شده، داشته‌اند (Jarahizadeh & Salehi, 2024; Nasiri et al., 2021; Pourreza et al., 2022). ولی اطلاعات زیادی درباره مقایسه قابلیت این دو نرم‌افزار در بررسی ویژگی‌های ساختاری جنگل مانند تشخیص خودکار درختان، سطح تاج‌پوشش و ارتفاع درختان وجود ندارد (Jarahizadeh & Salehi, 2024). مدل ارتفاعی تاج (CHM^۱) یکی از روش‌های اصلی برای ارزیابی ویژگی‌های جنگل است که از مدل رقومی سطح (DSM^۲) و مدل رقومی زمین (DTM^۳) استخراج شده و می‌تواند سطح تاج، ارتفاع درخت و ارزیابی تراکم را مشخص نماید (Tu et al., 2019). دقت DSM مستقیماً بر دقت پارامترهای جنگل برآورد شده تأثیر می‌گذارد و در نتیجه می‌تواند در تعیین موفقیت مدل‌سازی سه بعدی جنگل نقش کلیدی داشته باشد (Tu et al., 2020). بنابراین، تولید DSM به‌عنوان یک محصول فتوگرامتری در مناطق جنگلی با استفاده از بهترین فناوری موجود بسیار مهم است (Jarahizadeh & Salehi, 2024). تاکنون در چندین پژوهش به مقایسه کارایی نرم‌افزارهای تخصصی فتوگرامتری برای برآورد ابعاد پدیده‌ها و عوارض

1. Canopy Height Model

2. Digital Surface Model

3. Digital Terrain Model

۲- مواد و روش ها

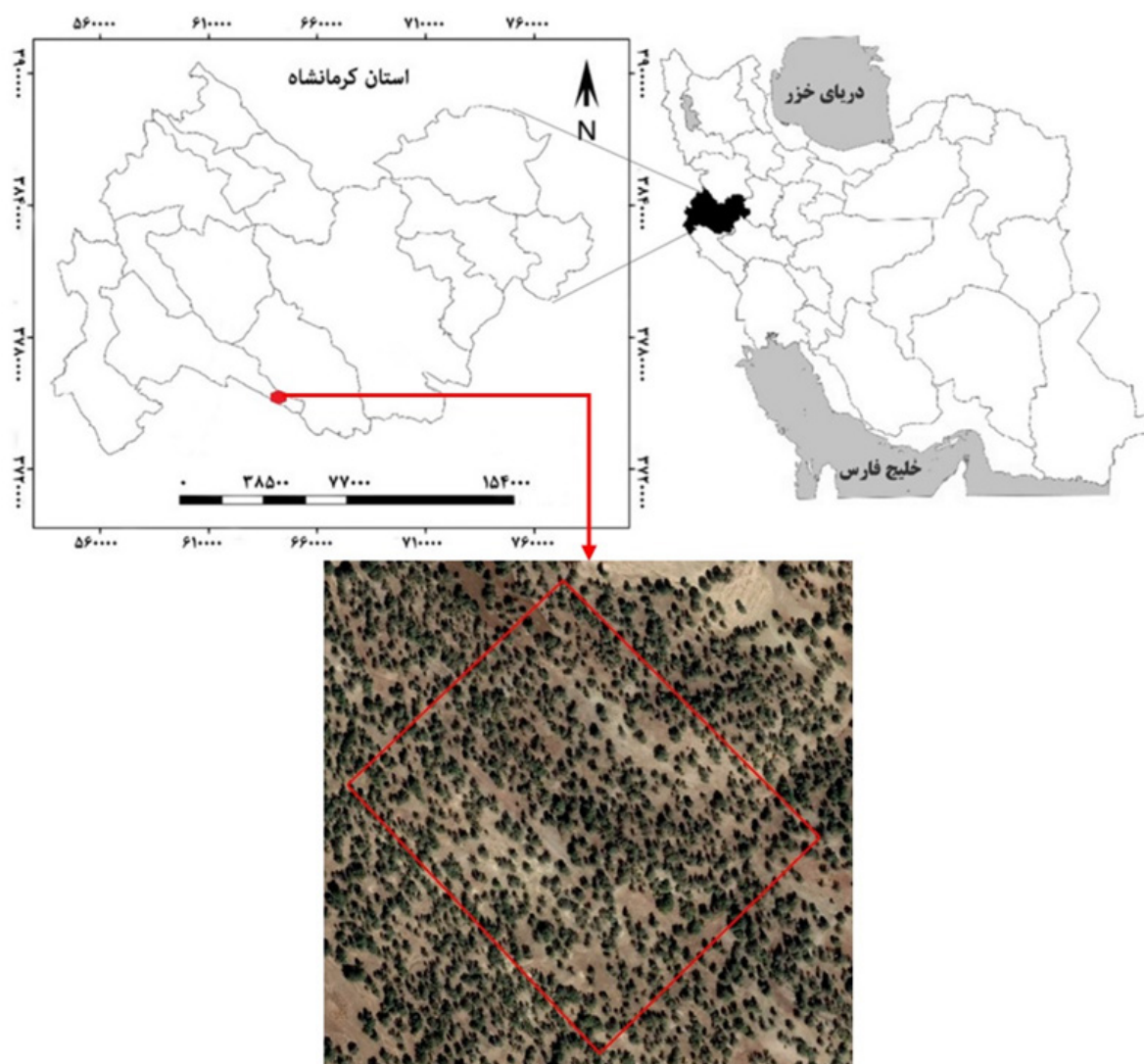
۲-۱- منطقه مورد مطالعه

منطقه مورد مطالعه بخشی از جنگل های حفاظت شده قلاجه بوده که در حد فاصل بین استان کرمانشاه و ایلام قرار دارد (نگاره ۱). وسعت منطقه ای که داده های مورد نظر از آن برداشت شده ۱۵ هکتار بوده که در عرض جغرافیایی ۳۴ درجه و ۳ دقیقه شمالی و طول جغرافیایی ۴۶ درجه و ۱۹ دقیقه شرقی با اقلیم سرد و نیمه خشک واقع شده و ۱۷۰۰ متر ارتفاع از سطح دریا دارد. از گونه های درختی و درختچه ای مهم این منطقه می توان به بلوط ایرانی (*Quercus brantii*)، آلبالوی وحشی (*Prunus microcarpa*)، بادام کوهی (*Amygdalus orientalis*)، زالزالک (*Crataegus pontica*)، بنه (*Pistacia atlantica*) و کیکم (*Acer monspessulanum*) اشاره کرد. البته در محدوده مورد مطالعه تپ جنگل نسبتاً تپ خالص بلوط ایرانی بوده که گونه های زالزالک و آلبالوی وحشی به عنوان گونه های همراه مشاهده می شوند. در این منطقه، درختان بلوط به دلیل برش های پی در پی، در بیشتر مناطق به فرم رویشی شاخه زاد دیده می شوند (Pourreza et al., 2014).

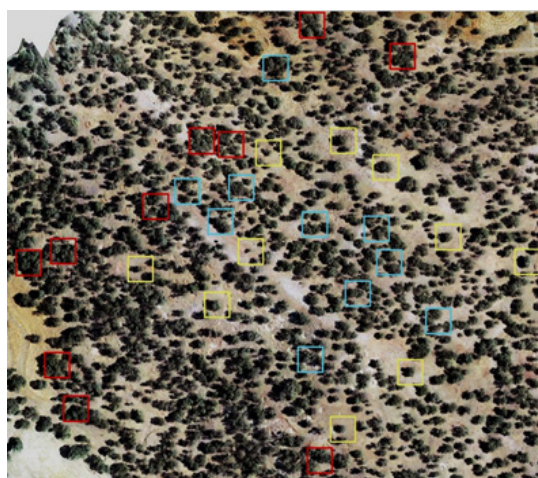
۲-۲- نمونه برداری

پیش از تصویربرداری، با استفاده از تصاویر نرم افزار Google Earth ناحیه ای ۱۵ هکتاری از منطقه مورد مطالعه انتخاب شد. سپس با توجه به تراکم تاج پوشش درختان، سه گروه قطعه نمونه با تراکم تاج پوشش کم (۲۵٪)، متوسط (۵۰٪-۵۰٪) و زیاد (۵۰٪) به صورت کاملاً تصادفی و با ۱۰ تکرار، انتخاب شدند تا اندازه گیری های زمینی و پردازش های لازم داخل این قطعه نمونه ها انجام شود (نگاره ۲). پس از انتخاب این قطعه نمونه ها، تراکم تاج پوشش آنها بر روی زمین نیز اندازه گیری شده و با درصد تراکم اندازه گیری شده در قطعات نمونه بر روی تصاویر گوگل ارث، تطبیق داده شد.

بر روی زمین (شامل ساختمان ها و درختان) پرداخته شده است (Emami & Rostami, 2022; Jarahizadeh & Salehi, 2024). به طور مثال، Jarahizadeh و Salehi (2024)، با مقایسه کارایی نرم افزارهای تخصصی فتوگرامتری در پوشش های مختلف زمین در نیویورک مشاهده کردند که نرم افزارهای Agisoft و PIX4D نسبت به نرم افزار DJI Terra کارایی بهتری در تولید ابر نقاط متراکم نشان داد. در همین راستا، Emami و Rostami (2022)، نیز دقت تولیدات نرم افزارهای تخصصی فتوگرامتری پهپادمبنا را در مناطق شهری و غیر شهری مورد مقایسه قرار داده و مشاهده کردند که نرم افزار Agisoft در مدل سازی سه بعدی انواع سطوح در همه مناطق مورد مطالعه، بهترین نتیجه را نسبت به نرم افزارهای PIX4D، UASmaster و Inpho نشان داد. در پژوهش دیگری نیز، Sahin و همکاران (۲۰۲۵)، با مقایسه صحت ارتوفتوهای تولید شده توسط نرم افزارهای مختلف فتوگرامتری نشان دادند که نرم افزار Agisoft بیشترین صحت مسطحاتی و نرم افزار PIX4D بیشترین صحت ارتفاعی را ارائه داد. با توجه به پیشینه پژوهش انجام شده، هیچ یک از این پژوهش ها به طور تخصصی در زمینه جنگل و برآورد ویژگی های ساختاری جنگل انجام نشده است. به همین دلیل در پژوهش حاضر سعی براین است که با استفاده از یک پهپاد مجهز به سیستم موقعیت یابی آنی^۱، به مقایسه کارایی نرم افزارهای تخصصی رایج در برآورد ویژگی های ساختاری جنگل های زاگرس پرداخته شود. جنگل های زاگرس که در غرب ایران در راستای کوه های زاگرس قرار گرفته اند، به دلیل بهره برداری بیش از حد، برای مدیریت مناسب نیازمند پایش مداوم هستند (Sagheb-Talebi et al., 2014) که این امر مستلزم دریافت اطلاعات دقیق، به روز و ارزان قیمت است. بنابراین هدف از این پژوهش، مقایسه قابلیت و دقت تولیدات دو نرم افزار تخصصی رایج Agisoft Metashape و PIX4Dmapper در برآورد تراکم، سطح تاج پوشش و ارتفاع درختان در جنگل های زاگرس است.



نگاره ۱- موقعیت منطقه مورد مطالعه در بخشی از جنگل حفاظت شده فلاجه



نگاره ۲- موقعیت قطعه نمونه‌های انتخاب شده با تراکم تاج پوشش کم (رنگ زرد)، متوسط (رنگ آبی) و زیاد (رنگ قرمز)

جدول ۱- برخی از پارامترهای عملیات پرواز و تصویربرداری

ارتفاع پرواز (متر)	پوشش طولی	پوشش عرضی	ISO	سرعت پرنده (متر بر ثانیه)	GSD (سانتی متر)
۱۰۰	%۷۵	%۷۵	۱۰۰	۱۱	۲/۷۴

۳-۲- طراحی عملیات پرواز

پیش از عملیات میدانی، از طریق نرم افزار GS RTK، طرح پروازی فراهم شد که در مقایسه با نرم افزارهای معمول دارای امکانات بیشتری از قبیل پرواز منطبق بر ارتفاع از سطح زمین، از سرگیری پرواز از آخرین نقطه، اتصال مستقیم به Handheld RTK برای ثبت نقاط و مساحی بدون استفاده از پهپاد است (Pourreza et al., 2022). در این پژوهش، از طرح پروازی 2D photogrammetry به منظور طراحی پرواز استفاده شده است. ارتفاع پرواز از مبدأ ۱۰۰ متر با هم پوشانی طولی ۷۵ درصد و هم پوشانی عرضی ۷۰ درصد و با فاصله نمونه برداری زمینی (GSD^۱) ۳/۵۵ متر تعیین شد. منظور از GSD، فاصله بین مرکز دو پیکسل متوالی اندازه گیری شده بر روی زمین است. همچنین، شبکه موقعیت یابی یکپارچه مالکیت ها (شمیم) به عنوان شبکه مرجع انتخاب شد. برخی از مهم ترین پارامترهای پرواز در جدول شماره ۱ ارائه شده است.

تصویربرداری با بهره گیری از کوادکوپتر (فانتوم ۴) مجهز به سیستم موقعیت یاب آنی (RTK) (نگاره ۳)، در تاریخ ۳۱ تیر ۱۴۰۱ در یک روز آفتابی و بین ساعات ۱۱ تا ۱۲ ظهر انجام شد. ابعاد این پرنده معادل ۳۵ × ۳۵ سانتی متر بوده و وزن آن ۱۳۹۱ گرم است. باتری ۱۵/۲ ولتی، ۵۸۷۰ میلی آمپری و ۴ سل لیتو با وزن ۴۶۸ گرم، امکان زمان پروازی معادل ۳۰ دقیقه را برای اپراتور این پهپاد فراهم می نماید. این پهپاد از دوربین با سنسور ۱ اینچ ۲۰ مگاپیکسلی CMOS بهره می برد. Phantom 4-RTK دارای توان تفکیک مکانی بسیار بالایی بوده، به گونه ای که فاصله نمونه برداری زمینی در ارتفاع ۱۰۰ متری برابر با ۲/۷۴ سانتی متر است. همچنین این پرنده دارای یک گیمبال سه محوره است که میزان لرزش های آن را هنگام پرواز به حداقل رسانده و از طرف دیگر شاتر مکانیکی موجود در آن، نقش قابل توجهی

در کاهش خطای ناشی از لرزش هنگام تصویربرداری دارد. به دلیل برخورداری از سیستم انتقال OcuSync این پهپاد قادر است تصاویر را با کیفیت HD تا حداکثر فاصله ۷ کیلومتر برای اپراتور ارسال نماید. ریموت کنترل این محصول از نوع ۲/۴ و ۵/۸ گیگاهرتز و ۴ کاناله است که حداکثر برد پروازی آن ۷ کیلومتر است. منحصر به فردترین ویژگی این پهپاد، تعبیه ماژول RTK بر روی آن است که با یک ماژول زمینی D-RTK 2 Mobile Station ارتباط برقرار نموده و باعث دریافت موقعیت افقی و عمودی داده ها به صورت آنی می شود (Pourreza et al., 2022). یک نمونه تصویر برداشت شده با مشخصات ذکر شده در نگاره ۴ قابل مشاهده است. بعد از جمع آوری تصویربرداری، برای ایجاد ابر نقاط متراکم، از دو نرم افزار Agisoft Photoscan (Metashape) و PIX4D Mapper (PIX4D) استفاده شد. نخست، تصاویر برداشت شده، به محیط نرم افزارها منتقل و پیش پردازش های مورد نیاز از قبیل بررسی تصاویر از لحاظ کیفی و توجیه نسبی انجام شد. از آنجا که تصویربرداری با بهره گیری از سیستم موقعیت یاب آنی (RTK) انجام شده بود، دیگر نیازی به اضافه کردن نقاط کنترل نبود (Pourreza et al., 2022). شایان ذکر است که در هر دو نرم افزار، از تنظیمات پیش فرض استفاده شد. سپس به کمک روش Structure from Motion (SfM) در ادامه مدل ابر نقاط متراکم متشکل از میلیون ها نقطه تولید شد. از آنجا که هریک از نرم افزارها از الگوریتم های مختلفی (SIFT^۲, SURF^۳, ORB^۴) برای ساخت ابر نقاط متراکم استفاده می کند، کیفیت، خروجی این نرم افزارها می تواند متفاوت باشد (Rublee et al., 2011). در گام پایانی نیز، مدل رقومی سطح (DSM) و مدل رقومی زمین (DTM)، استخراج شدند (نگاره ۵).

2. Scale-Invariant Feature Transform
3. Speeded-Up Robust Features
4. Oriented FAST and Rotated BRIEF

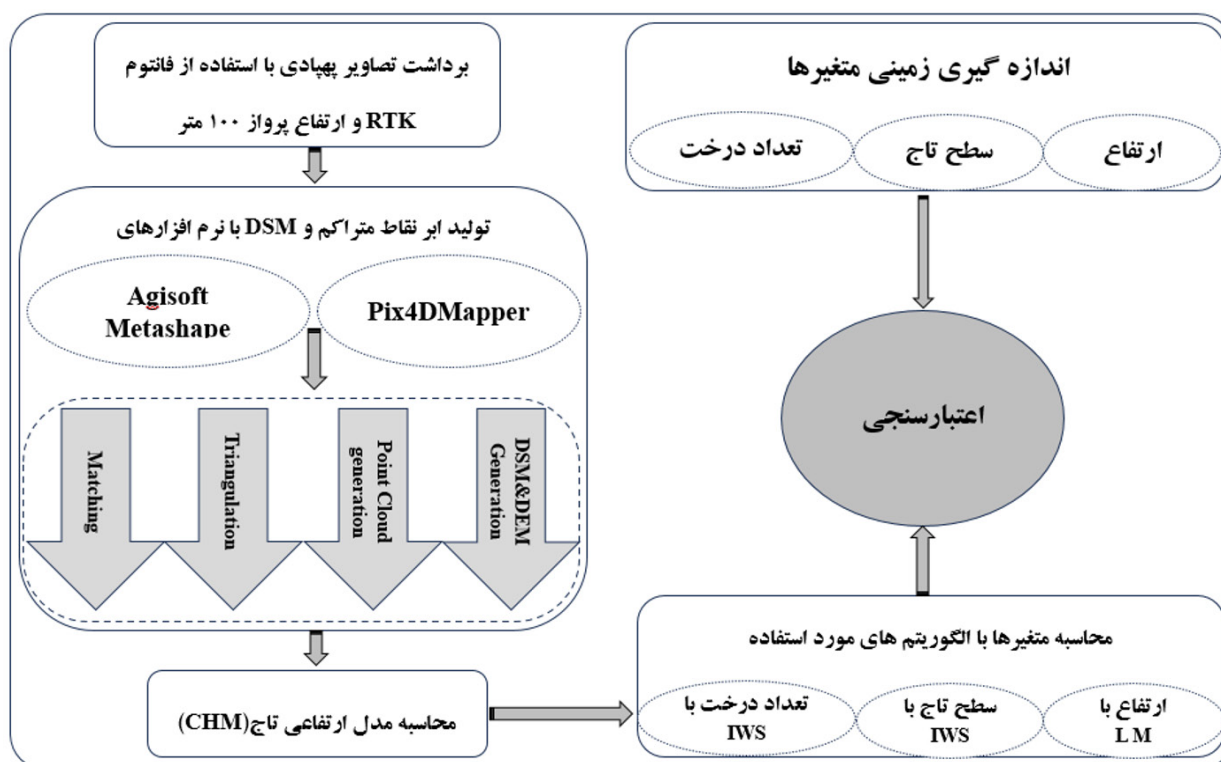
1. Ground Sampling Distance



نگاره ۳- تصویری از پهپاد Phantom 4-RTK



نگاره ۴- یک نمونه تصویر گرفته شده به وسیله پهپاد Phantom 4-RTK



نگاره ۵- روندنمای مقایسه ویژگی های برآورد شده در محیط نرم افزارهای PIX4D و Agisoft

جدول ۲- خلاصه کارایی دو نرم افزار Agisoft و PIX4D در تولید ابر نقاط و زمان پردازش تصاویر در کل منطقه مورد مطالعه

پارامترها	PIX4D	Agisoft
تراکم ابر نقاط (تعداد بر مترمربع)	۱۴۹۸/۵	۱۷۰۸
زمان پردازش تصاویر (دقیقه)	۲۷۳	۲۴۲

برای بررسی ارتباط مقادیر برآورد شده هر یک از این متغیرها (از تصاویر پهپادی) با مقادیر اندازه گیری شده آنها (واقعیت زمینی)، از مدل رگرسیون خطی استفاده شد و ضریب تبیین (R^2) مربوطه محاسبه شد (Pourreza et al., 2022). همچنین با استفاده از روابط ۲ و ۳، درصد خطای جذر میانگین مربعات (RMSE%) محاسبه و به این ترتیب، میزان خطای هر یک از متغیرها برای هر دو نرم افزار Agisoft و PIX4D نیز تعیین شد (Emami and Rostami, 2022):

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (\hat{y}_i - y_i)^2}{n}} \quad \text{رابطه (۲)}$$

$$RMSE\% = \frac{RMSE}{\left(\frac{\sum_{i=1}^N Count_i}{N}\right)} \times 100 \quad \text{رابطه (۳)}$$

۳- یافته های پژوهش

۳-۱- مقایسه کارایی نرم افزارها در تولید ابر نقاط متراکم
نتایج به دست آمده نشان داد که تراکم ابر نقاط تولید شده در نرم افزار Agisoft (با میانگین تعداد ۱۷۰۸ نقطه در متر مربع) نسبت به تراکم ابر نقاط تولید شده در نرم افزار PIX4D (با میانگین تعداد ۱۴۹۸/۵ نقطه در متر مربع) بیشتر بوده که در واقع نشان دهنده کیفیت بالاتری (۱۴ درصد) است. همچنین، زمان پردازش تصاویر در نرم افزار PIX4D (۲۷۳ دقیقه) بیشتر از نرم افزار Agisoft (۲۴۲ دقیقه) بود (جدول ۲). به بیان دیگر، کارایی نرم افزار Agisoft در تولید ابر نقاط متراکم با کیفیت بالاتر و در زمان کوتاه تر، بیشتر از نرم افزار PIX4D بود.

۲-۴- برآورد تعداد درختان، سطح تاج و ارتفاع درختان

برای محاسبه سطح سطح تاج درختان در این شیوه، ابتدا مدل ارتفاعی تاج (CHM) درختان با کسر مدل رقومی سطح (DSM) از مدل رقومی زمین (DTM) محاسبه شد. سپس برای برآورد تعداد درختان و سطح تاج از الگوریتم قطعه بندی حوضه آبخیز معکوس (IWS^1)، و برای برآورد ارتفاع تاج درختان نیز از الگوریتم پیشینه محلی (LM^2) استفاده شد (Nasiri et al., 2021).

۲-۵- اندازه گیری داده های زمینی

به منظور بررسی صحت و دقت اندازه گیری متغیرهای مورد نظر در محیط نرم افزارها، در هر یک از قطعه نمونه ها، تعداد درختان، دو قطر عمود بر هم تاج درختان (قطر بزرگ و قطر عمود بر آن) به منظور محاسبه سطح تاج پوشش (با پیش فرض شکل هندسی بیضی برای تاج) و ارتفاع درختان با استفاده از دستگاه متر لیزری لایکا مدل S910 اندازه گیری شدند.

۲-۶- مقایسه میانگین و خطای اندازه گیری

به منظور مقایسه آماری میانگین برآورد شده از تصاویر پهپادی برای تعداد درخت در قطعه نمونه، سطح تاج پوشش و ارتفاع درختان با میانگین اندازه گیری شده این متغیرها در عرصه (واقعیت زمینی)، از آزمون Paired samples T-test (رابطه ۱) استفاده شد (Pourreza et al., 2022). در رابطه ۱، $\bar{d}$ نشان دهنده میانگین تفاوت بین دو مشاهده جفتی، s_d نشان دهنده انحراف معیار تفاوت ها و n نیز نشان دهنده تعداد مشاهدات جفتی است.

$$t = \frac{\bar{d}}{s_d/\sqrt{n}} \quad \text{رابطه (۱)}$$

1. Invers watershed segmentation

2. Local Maximum

۲-۳- مقایسه برآورد تعداد درختان

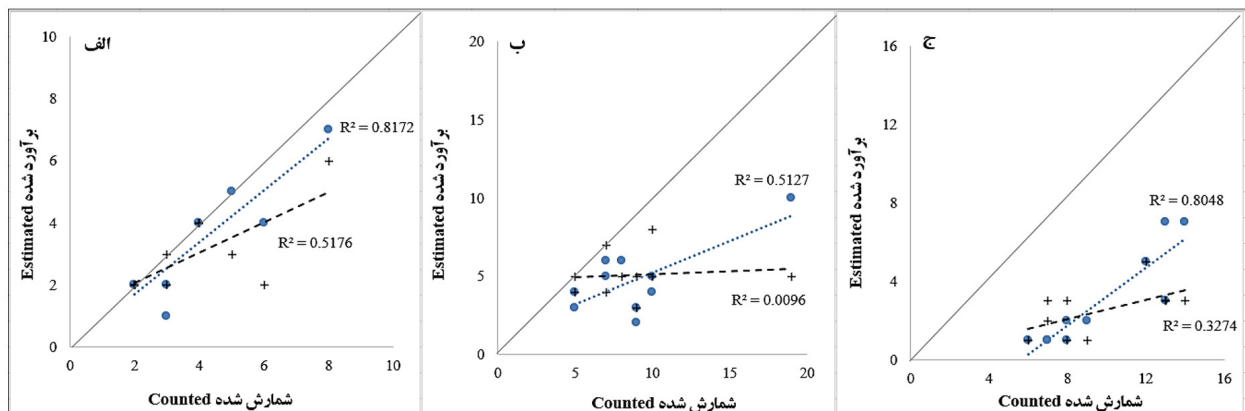
(P-Value=0.000) مشاهده شد که به طور مشابه، این اختلاف

برای نرم افزار PIX4D نیز معنی دار (P-Value=0.008) بود (جدول ۳). نتایج نشان داد که کمترین درصد خطای جذر میانگین مربعات برای برآورد تعداد درختان، هم در نرم افزار Agisoft (RMSE%=25.64) و هم در نرم افزار PIX4D (RMSE%=40.54) مربوط به قطعه نمونه های با درجه تراکم تاج پوشش کم بوده، ولی با افزایش درجه تراکم، درصد خطای جذر میانگین مربعات برای برآورد تعداد درخت در قطعه نمونه، برای هر دو نرم افزار افزایش می یابد. به طوری که برای نرم افزار Agisoft، خطای جذر میانگین مربعات در درجه تراکم متوسط و زیاد تاج پوشش، به ترتیب ۵۵/۱۵ و ۷۰/۲۹ درصد و برای نرم افزار PIX4D نیز به ترتیب ۶۱/۱۳ و ۷۸/۱۰ درصد محاسبه شد (جدول ۳). بررسی ارتباط رگرسیونی تعداد درختان اندازه گیری شده و برآورد شده در قطعه نمونه، نشان داد که ضریب تبیین (R^2) محاسبه شده برای نرم افزار Agisoft در همه تراکم های تاج پوشش (کم، متوسط و زیاد) به ترتیب با مقادیر ۰/۸۱، ۰/۵۱ و ۰/۸۰ بیشتر از ضریب تبیین محاسبه شده برای نرم افزار PIX4D به ترتیب با مقادیر ۰/۵۱، ۰/۰۱ و ۰/۳۲ است (جدول ۳ و نگاره ۶).

میانگین تعداد درختان شناسایی شده در سطح قطعه نمونه های با تراکم مختلف تاج پوشش، با استفاده از دو نرم افزار Agisoft و PIX4D در جدول ۳ خلاصه شده است. در قطعه نمونه های با درجه تراکم تاج پوشش کم، نتایج آزمون Paired samples T-test نشان داد که میانگین تعداد درختان برآورد شده توسط نرم افزار Agisoft، اختلاف معنی داری (P-Value = 0.051) با تعداد درختان شمارش شده نداشت (جدول ۳). به طور مشابه، تعداد درختان برآورد شده در نرم افزار PIX4D نیز اختلاف معنی داری (P-Value = 0.068) با تعداد درختان شمارش شده نشان نداد. در قطعه نمونه های با درجه تراکم تاج پوشش متوسط، نتایج آزمون Paired samples T-test نشان داد که تعداد درختان برآورد شده توسط نرم افزار Agisoft، اختلاف معنی داری (P-Value=0.001) با تعداد درختان شمارش شده داشت. همچنین، تعداد درختان برآورد شده در نرم افزار PIX4D نیز اختلاف معنی داری (P-Value=0.035) با تعداد درختان شمارش شده نشان داد (جدول ۳). در قطعه نمونه های با درجه تراکم تاج پوشش زیاد نیز بین درختان شمارش شده و برآورد شده توسط نرم افزار Agisoft اختلاف معنی داری

جدول ۳- مقایسه میانگین تعداد درختان و خطای برآوردی (RMSE%)

R ²	RMSE%	Paired samples T-test	میانگین تعداد درخت در قطعه نمونه		تراکم تاج پوشش	نرم افزار
		آماره و معنی داری	برآورد	اندازه گیری شده		
۰/۸۱	۲۵/۶۴	۲/۲۵ ^{ns}	۳/۳	۳/۹	کم (>۲۵٪)	Agisoft
۰/۵۱	۵۵/۱۵	۴/۵۵ ^{**}	۴/۸	۸/۹	متوسط (۲۵-۵۰٪)	
۰/۸۰	۷۰/۲۹	۱۵/۸۴ ^{***}	۳	۹/۷	زیاد (<۵۰٪)	
۰/۵۱	۴۰/۵۴	۲/۰۷ ^{ns}	۳	۳/۹	کم (>۲۵٪)	PIX4D
۰/۰۱	۶۱/۱۳	۲/۹۳ [*]	۵/۱	۸/۹	متوسط (۲۵-۵۰٪)	
۰/۳۲	۷۸/۱۰	۹/۱۶ ^{***}	۲/۵	۹/۷	زیاد (<۵۰٪)	



نگاره ۶- ارتباط خطی بین تعداد درختان اندازه گیری شده و برآورد شده در قطعه نمونه با درجه تراکم کم (الف)، متوسط (ب) و زیاد (ج) توسط تولیدات دو نرم افزار Agisoft (خط نقطه چین و دایره توپر) و PIX4D (خط بریده و علامت +)

به ترتیب برابر ۱۲/۶۷ و ۱۱/۱۵ درصد بود. بررسی ارتباط رگرسیونی سطح تاج پوشش اندازه گیری شده و برآورد شده در قطعه نمونه، نشان داد که در تراکم های کم، متوسط و زیاد تاج پوشش، ضریب تبیین (R^2) محاسبه شده برای تولیدات نرم افزار Agisoft، (به ترتیب با مقادیر ۰/۸۸، ۰/۸۵ و ۰/۷۶) نسبت به ضریب تبیین (R^2) محاسبه شده برای تولیدات نرم افزار PIX4D (به ترتیب با مقادیر ۰/۷۹، ۰/۸۳ و ۰/۶۵) بیشتر بود (جدول ۴ و نگاره ۷).

۳-۴- مقایسه برآورد ارتفاع درختان

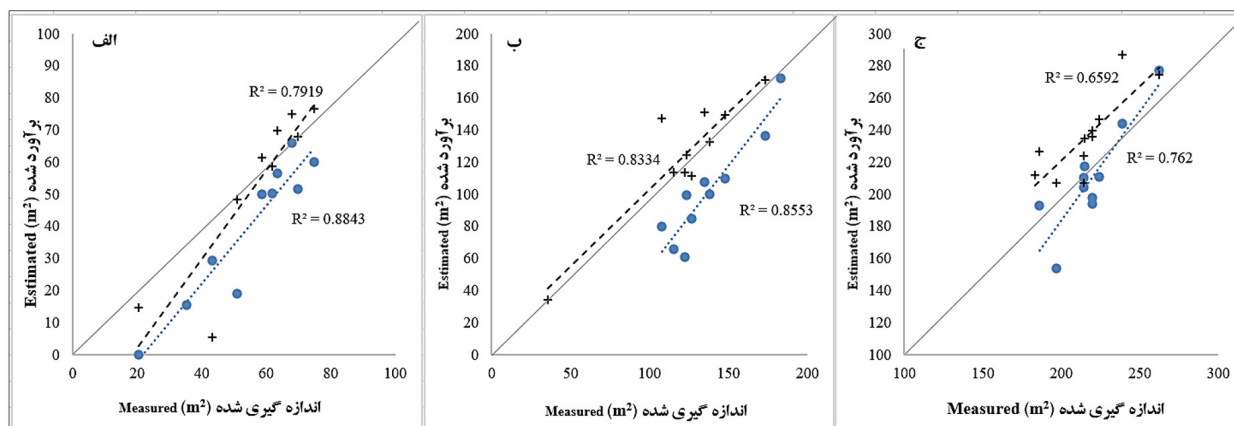
نتایج مقایسه میانگین ارتفاع اندازه گیری شده و برآورد شده درختان نشان داد که میانگین ارتفاع برآورد شده (۶/۹۱ متر) توسط تولیدات نرم افزار Agisoft در قطعه نمونه های با درجه تراکم تاج پوشش کم، با میانگین اندازه گیری شده آن ها (۶/۲۴ متر) اختلاف معنی داری دارد ($P\text{-Value}=0.004$). در قطعه نمونه های با درجه تراکم تاج پوشش متوسط نیز، میانگین ارتفاع برآورد شد (۶/۵۴ متر) اختلاف معنی داری ($P\text{-Value}=0.001$) با میانگین ارتفاع اندازه گیری شده (۵/۷۶ متر) نشان داد. همچنین در قطعه نمونه های با درجه تراکم تاج پوشش زیاد، اختلاف معنی داری ($P\text{-Value}=0.000$) بین میانگین ارتفاع برآورد شده (۷/۲۸ متر) با میانگین ارتفاع اندازه گیری شده (۶/۲۳ متر) مشاهده شد (جدول ۵).

۳-۳- مقایسه برآورد تاج پوشش

بر پایه نتایج آزمون Paired samples T-test، میانگین سطح تاج پوشش برآورد شده توسط نرم افزار Agisoft در قطعات نمونه با تراکم تاج پوشش کم و متوسط، با میانگین اندازه گیری شده آن ها اختلاف معنی داری ($P\text{-Value}=0.000$) داشت ولی این اختلاف برای تراکم تاج پوشش زیاد معنی دار نبود. این اختلاف برای نرم افزار PIX4D ($P\text{-Value}=0.145$) نه تنها در قطعه نمونه های با تراکم تاج پوشش کم و متوسط، با میانگین اندازه گیری شده (به ترتیب با $P\text{-Value}=0.016$ و $P\text{-Value}=0.046$) معنی دار بود، بلکه برای تراکم تاج پوشش زیاد نیز بین میانگین اندازه سطح تاج پوشش اندازه گیری شده و برآورد شده اختلاف معنی دار ($P\text{-Value}=0.004$) بود (جدول ۴). نتایج نشان داد که در نرم افزار Agisoft و PIX4D، بیشترین درصد خطای جذر میانگین مربعات ($RMSE\%$) به ترتیب با مقادیر ۳۰/۷۷ و ۲۲/۹۰ درصد مربوط به قطعه نمونه های با درجه تراکم تاج پوشش کم بود. همچنین نتایج نشان داد که با افزایش درجه تراکم تاج پوشش در قطعه نمونه، درصد این خطا برای برآورد سطح تاج پوشش در قطعه نمونه در هر دو نرم افزار به طور نسبتاً مشابهی کاهش می یابد. به طوری که مقدار خطا برای نرم افزار Agisoft در تراکم های متوسط و زیاد به ترتیب برابر ۲۷/۶۳ و ۸/۶۳ درصد بوده و برای نرم افزار PIX4D

جدول ۴- میانگین سطح تاج پوشش و خطای برآوردی (%RMSE)

R ²	%RMSE	Paired samples T-test	میانگین سطح تاج پوشش در قطعه نمونه		تراکم تاج پوشش	نرم افزار
		آماره و معنی داری	برآورد	اندازه گیری شده		
۰/۸۸	۳۰/۷۷	۵/۵۶ **	۳۹/۸۳	۵۴/۶۳	کم (>۲۵%)	Agisoft
۰/۸۵	۲۷/۶۳	۷/۸۶ ***	۱۰۱/۷۵	۱۷۳/۱۶	متوسط (۲۵%-۵۰%)	
۰/۷۶	۸/۶۳	۱/۵۹ ns	۲۱۰/۱۸	۲۱۹/۰۶	زیاد (<۵۰%)	
۰/۷۹	۲۲/۹۰	۰/۸۵ *	۵۱/۲۰	۵۴/۶۳	کم (>۲۵%)	PIX4D
۰/۸۳	۱۲/۶۷	-۰/۰,۹۹ *	۱۴۲/۶۳	۱۷۳/۱۶	متوسط (۲۵%-۵۰%)	
۰/۶۵	۱۱/۱۵	۳/۸۹ **	۲۳۸/۴۲	۲۱۹/۰۶	زیاد (<۵۰%)	



نگاره ۷- ارتباط خطی بین سطح تاج اندازه گیری شده و برآورد شده در قطعه نمونه با درجه تراکم کم (الف)، متوسط (ب) و زیاد (ج) توسط تولیدات دو نرم افزار Agisoft (خط نقطه چین و دایره توپر) و PIX4D (خط بریده و علامت +)

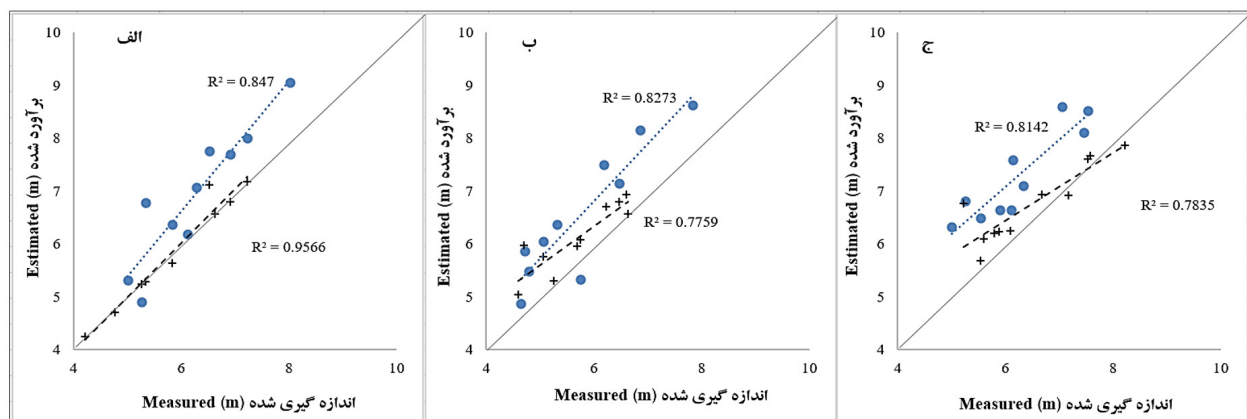
تراکم تاج پوشش کم، هم در نرم افزار Agisoft و هم در نرم افزار PIX4D، به ترتیب با مقادیر ۱۴/۷۷ و ۵/۸۴ درصد، نسبت به سایر طبقات درجه تاج پوشش، کمترین مقدار بود. همچنین نتایج نشان داد که با افزایش درجه تراکم تاج پوشش در قطعه نمونه از کم به متوسط، مقدار خطای برآوردی (%RMSE) ارتفاع برای خروجی های هر دو نرم افزار Agisoft و PIX4D، (به ترتیب با مقادیر ۲۳/۱۲ و ۱۲/۵۹ درصد) افزایش می یابد. در حالی که با افزایش درجه تراکم تاج پوشش در قطعه نمونه از متوسط به زیاد، این خطا برای هر دو نرم افزار Agisoft و PIX4D (به ترتیب با مقادیر ۲۱/۳۴ و ۱۱/۶۹ درصد)، کاهش می یابد. بررسی ارتباط رگرسیونی ارتفاع اندازه گیری شده و برآورد شده درختان

در خصوص تولیدات نرم افزار PIX4D نیز مشاهده شد که در قطعه نمونه های با درجه تراکم تاج پوشش کم، اختلاف معنی داری (P-Value=0.044) بین میانگین ارتفاع برآورد شده (۵/۶۴ متر) و اندازه گیری شده (۶/۲۴ متر) وجود دارد. در قطعه نمونه های با درجه تراکم تاج پوشش متوسط نیز، میانگین ارتفاع برآورد شده (۶/۰۸ متر) اختلاف معنی داری (P-Value=0.035) با میانگین ارتفاع اندازه گیری شده (۵/۷۶ متر) نشان داد. همچنین در قطعه نمونه های با درجه تراکم تاج پوشش زیاد، اختلاف معنی داری (P-Value=0.008) بین میانگین ارتفاع برآورد شده (۶/۷۷ متر) با میانگین ارتفاع اندازه گیری شده (۷/۲۳ متر) مشاهده شد (جدول ۵). نتایج نشان داد که خطای ارتفاع برآوردی در درجه

در قطعه نمونه، نشان داد که بیشترین ضریب تبیین (R^2) محاسبه شده با مقدار ۰/۹۵ مربوط به تولیدات نرم افزار PIX4D در قطعه نمونه های با درجه تراکم تاج پوشش کم بود. ولی در درجه تراکم های تاج پوشش متوسط و زیاد، ضریب تبیین (R^2) محاسبه شده توسط تولیدات نرم افزار Agisoft (به ترتیب با مقادیر ۰/۸۲ و ۰/۸۱)، از ضریب تبیین (R^2) محاسبه شده توسط تولیدات نرم افزار PIX4D (به ترتیب با مقادیر ۰/۷۷ و ۰/۷۸) بیشتر بود (نگاره ۸).

جدول ۵- میانگین ارتفاع درختان و خطای برآوردی (RMSE %)

R^2	RMSE %	آزمون T	میانگین ارتفاع درخت در قطعه نمونه		تراکم تاج پوشش	نرم افزار
		آماره و معنی داری	برآورد	اندازه گیری شده		
۰/۸۴	۱۴/۷۷	-۳/۹۰*	۶/۹۱	۶/۲۴	کم (>۲۵%)	Agisoft
۰/۸۲	۲۳/۱۲	-۴/۶۲**	۶/۵۴	۵/۷۶	متوسط (۲۵%-۵۰%)	
۰/۸۱	۲۱/۳۴	-۸/۶۷***	۷/۲۸	۶/۲۳	زیاد (<۵۰%)	
۰/۹۵	۵/۸۴	-۲/۲۵*	۵/۶۴	۶/۲۴	کم (>۲۵%)	PIX4D
۰/۷۷	۱۲/۵۹	۲/۴۷**	۶/۰۸	۵/۷۶	متوسط (۲۵%-۵۰%)	
۰/۷۸	۱۱/۶۹	۳/۳۸**	۶/۷۷	۷/۲۳	زیاد (<۵۰%)	



نگاره ۸- ارتباط خطی بین ارتفاع اندازه گیری شده و برآورد شده درختان در قطعه نمونه با درجه تراکم کم (الف)، متوسط (ب) و زیاد (ج) توسط تولیدات دو نرم افزار Agisoft (خط نقطه چین و دایره توپر) و PIX4D (خط بریده و علامت +)

۴- بحث

نسبت به نرم افزار Agisoft، حدود ۱۵ درصد بیشتر است که شاید دلیل آن وجود تنوع کاربری های مختلف در تصاویر برداشت شده باشد.

درباره تشخیص تعداد درختان، یافته های پژوهش جاری نشان داد که به طور کلی نرم افزار Agisoft با داشتن خطای برآوردی کمتری، کارایی بیشتری در همه تراکم ها نسبت به نرم افزار PIX4D داشته است. در این راستا یافته های پژوهش Jarahizadeh and Salehi (2024) نشان داد که کارایی نرم افزارهای Agisoft و PIX4D در تشخیص خودکار درختان در مناطق جنگلی تقریباً مشابه است. یافته های آنها نشان داد که گرچه ابر نقاط تولید شده توسط نرم افزارهای Agisoft و PIX4D حدود ۲/۵ برابر متراکم تر از ابر نقاط تولید شده توسط نرم افزار DJI Terra بود، اما به دلیل توانایی نرم افزار DJI Terra در تولید DSM دقیق تر، کارایی بهتری در تشخیص و شناسایی درختان داشته است.

در برآورد سطح تاج پوشش، یافته های پژوهش جاری نشان داد که با افزایش تراکم تاج پوشش، کارایی هر دو نرم افزار افزایش می یابد و با توجه به نتایج آزمون آماری، صحت برآورد سطح تاج در هر دو نرم افزار فقط در قطعه نمونه های با تراکم زیاد قابل قبول بوده و در قطعه نمونه های با تراکم کم و متوسط صحت قابل قبولی ندارد. همچنین همبستگی بین سطح تاج برآورد شده توسط نرم افزار Agisoft با سطح تاج اندازه گیری شده بیشتر از نرم افزار PIX4D بود. گرچه در زمینه برآورد سطح تاج پوشش درختان در جنگل با استفاده از نرم افزارهای مختلف و در تراکم های مختلف گزارشی ارائه نشده است، ولی یافته های پژوهش Emami and Rostami (2022) نشان داد که خطای مسطحاتی برآوردها در نرم افزار Agisoft کمتر از نرم افزار PIX4D است. البته یکی از یافته های مهم پژوهش جاری، کم برآورد نمودن سطح تاج توسط نرم افزار Agisoft نسبت به نرم افزار PIX4D بود که در همه قطعه نمونه ها این روند مشاهده شد.

درباره برآورد ارتفاع درختان نتایج پژوهش جاری نشان داد که در همه درجات تراکم تاج پوشش، خطای

یکی از مهم ترین پارامترهایی که در فتوگرامتری برای محاسبه ویژگی پدیده ها نقش کلیدی دارد، تراکم ابر نقاط تولیدی است (Jarahizadeh and Salehi, 2024). در نتایج پژوهش جاری، کارایی نرم افزار Agisoft برای تولید ابر نقاط متراکم نسبت به نرم افزار PIX4D بیشتر بود زیرا ابر نقاط متراکم، با کیفیت بالاتری (تعداد نقاط بیشتر در واحد سطح) و در زمان کمتری تولید شده بود. در این باره، یافته های پژوهش Jarahizadeh and Salehi (2024) نشان داد، گرچه کارایی هر دو نرم افزار در تولید ابر نقاط متراکم مشابه است ولی در تصویربرداری با ارتفاع پروازهای مختلف، ابر نقاط متراکم تولید شده در دو نرم افزار متفاوت است به طوری که با ثابت بودن سایر شرایط تصویربرداری، در ارتفاع پروازی پایین تر (۶۰ متر)، نرم افزار Agisoft ابر نقاط متراکم تری تولید کرده ولی در ارتفاع پروازی بالاتر (۱۲۰ متر) نرم افزار PIX4D ابر نقاط متراکم تری تولید می کند. البته گزارش شده است که به طور کلی کیفیت ابر نقاط متراکم می تواند به پوشش های مختلف زمین بستگی داشته باشد (Jarahizadeh and Salehi, 2024). به طوری که در پژوهش دیگری نشان داده شد که ابر متراکم تولید شده توسط نرم افزار PIX4D در مناطق دارای پوشش گیاهی، کیفیت پایین تری نسبت به نرم افزار Agisoft دارد که تا حدود زیادی یافته های به دست آمده در پژوهش جاری را تأیید می کند (Georgopoulos et al., 2016). همچنین، نتایج از پژوهش به دست آمده (Emami and Rostami, 2022) در مناطقی با کاربری های متنوع نیز نشان داد که نرم افزار Agisoft، ابر نقاط متراکم تری نسبت به نرم افزار PIX4D تولید می کند که هم سو با یافته های پژوهش حاضر است. همچنین یافته های پژوهش حاضر نشان داد که نرم افزار Agisoft با پردازش تصاویر و تولید ابر نقاط متراکم در زمان کمتری (حدود ۱۱ درصد) نسبت به نرم افزار PIX4D دارای کارایی نسبی بیشتری بود. البته یافته های پژوهش (Emami and Rostami, 2022) برخلاف یافته های این پژوهش نشان داد که کارایی نرم افزار PIX4D در زمان پردازش تصاویر و تولید ابر نقاط متراکم

۵- نتیجه گیری

در پایان نتیجه گیری می شود که با توجه به زمان پردازش تصاویر و تولید ابر نقاط متراکم، نرم افزار Agisoft کارایی بهتری نسبت به نرم افزار PIX4D دارد. همچنین، از نظر توانایی تشخیص درختان نیز، نرم افزار Agisoft دارای کارایی بهتری نسبت به نرم افزار PIX4D است. نتیجه گیری شد که برآورد سطح تاج درختان وابسته به تراکم تاج پوشش بوده و در مناطق متراکم تر، نرم افزار Agisoft دارای کارایی بهتری نسبت به نرم افزار PIX4D است. درباره برآورد ارتفاع درختان می توان نتیجه گرفت که هر دو نرم افزار ارتفاع را بیشتر از واقعیت برآورد نموده ولی به طور کلی نرم افزار PIX4D دارای کارایی بهتری نسبت به نرم افزار Agisoft است. با جمع بندی این موارد می توان گفت که با توجه به نیاز کاربران به برآورد و بررسی ویژگی های ساختاری جنگل، انتخاب ارجح می تواند متفاوت باشد. نتایج این پژوهش می تواند به کاربران فتوگرامتری و مدل های سه بعدی کمک کند تا با آشنایی با کارایی نرم افزارها، نسبت به انتخاب نرم افزار مناسب تر اقدام نمایند.

تعارض منافع

در این پژوهش، حامی مالی و تعارض منافع وجود ندارد.

References

- 1- Berber, M. M., Munjy, R., & Meme, K. (2023). Three Photogrammetric Software Are Compared Using Four UAV Datasets. *Advances in Geomatics*, 1(1), 1-14. <https://doi.org/10.5281/zenodo.10202271>
- 2- Cruz, A., Ampatzidis, Y., Pierro, R., Materazzi, A., Panattoni, A., De Bellis, L., & Luvisi, A. (2019). Detection of grapevine yellows symptoms in *Vitis vinifera* L. with artificial intelligence. *Computers and electronics in agriculture*, 157, 63-76. <https://doi.org/10.1016/j.compag.2018.12.028>

ارتفاع برآورد شده توسط نرم افزار PIX4D کمتر از نرم افزار Agisoft بود. در این راستا، یافته های پژوهش (Emami and Rostami, 2022) نشان داد که گرچه نرم افزار Agisoft در مدل سازی سه بعدی انواع سطوح در مناطق مختلف، عملکرد بهتری دارد ولی نرم افزار PIX4D در تشخیص اختلاف ارتفاع، کارایی بهتری دارد. در حالی که یافته های پژوهش (Jarahizade and Salehi, 2024) نشان داد که در جنگل های متراکم، نرم افزار Agisoft کارایی بهتری در برآورد ارتفاع درختان نسبت به نرم افزار PIX4D دارد که دلیل آن می تواند استفاده از الگوریتم های مختلف برای شناسایی نقاط مشترک در تصاویر و بازسازی مدل های سه بعدی باشد. در مقابل، نرم افزار PIX4D برآورد ارتفاع درختان در مناطق با تراکم کم دقت قابل قبولی دارد اما در جنگل های متراکم با چالش های بیشتری مواجه است که با توجه به اینکه جنگل های زاگرس به عنوان جنگل های باز به شمار می روند می تواند تأیید کننده یافته های پژوهش جاری باشد. نکته جالب توجه در پژوهش جاری، بیش برآورد نمودن ارتفاع درختان توسط هر دو نرم افزار در همه قطعه نمونه ها با تراکم های مختلف بود. در این باره، یافته های پژوهش (Pourreza et al., 2022) نشان داد که نرم افزار Agisoft ارتفاع درختان را در یک جنگل سوزنی برگ سرو نقره ای، کم تر از واقعیت زمینی برآورد کرده و دلیل آن به شکل مخروطی بودن تاج این درختان و ثبت نشدن نوک تیز آن ها در ساخت ابر نقاط متراکم و همچنین مرتبط شد. البته برپایه یافته های پژوهش جاری، در همه تراکم ها، ارتفاع برآوردی درختان توسط نرم افزار Agisoft بیشتر از ارتفاع برآوردی درختان توسط نرم افزار PIX4D بود. گرچه در این زمینه پژوهش های زیادی انجام نشده است، ولی یافته های پژوهش (Jarahizade and Salehi, 2024) نشان داد که ارتفاع برآوردی ساختمان ها و درختان توسط نرم افزار Agisoft همواره بیشتر از ارتفاع برآوردی توسط نرم افزار PIX4D بود که تأیید کننده یافته های پژوهش جاری است.

10. 10-Mahlein, A.-K. (2016). Plant disease detection by imaging sensors—parallels and specific demands for precision agriculture and plant phenotyping. *Plant disease*, 100(2), 241-251. <https://doi.org/10.1094/PDIS-03-15-0340-FE>
11. 11-Markiewicz, J., Łapiński, S., Pilarska-Mazurek, M., Zawieska, D., & Levytskyi, V. (2022). Using low-cost UAVs in post-mining exploration-a case study. *Sensors and Machine Learning Applications*, 1(1), 1-23. DOI: <https://doi.org/10.55627/smla.001.01.0009>
12. 12-Massey, R., Berner, L. T., Foster, A. C., Goetz, S. J., & Vepakomma, U. (2023). Remote sensing tools for monitoring forests and tracking their dynamics. In *Boreal Forests in the Face of Climate Change: Sustainable Management* (pp. 637-655). Springer. https://doi.org/10.1007/978-3-031-15988-6_26
13. 13-Nasiri, V., Darvishsefat, A. A., Arefi, H., Pierrot-Deseilligny, M., Namiranian, M., & Le Bris, A. (2021). Unmanned aerial vehicles (UAV)-based canopy height modeling under leaf-on and leaf-off conditions for determining tree height and crown diameter (case study: Hyrcanian mixed forest). *Canadian Journal of Forest Research*, 51(7), 962-971.
14. 14-Pourreza, M., Moradi, F., Khosravi, M., Deljouei, A., & Vanderhoof, M. K. (2022). GCPs-free photogrammetry for estimating tree height and crown diameter in Arizona Cypress plantation using UAV-mounted GNSS RTK. *Forests*, 13(11), 1905. <https://doi.org/10.3390/f13111905>
15. 15-Rublee, E., Rabaud, V., Konolige, K., & Bradski, G. (2011). ORB: An efficient alternative to SIFT and SURF. *Proceedings of the International Conference on Computer Vision (ICCV)*, 2564-2571. <https://doi.org/10.1109/ICCV.2011.6126548>
16. 16-Sagheb-Talebi, K., Sajedi, T., & Pourhashemi, M. (2014). *Forests of Iran. A treasure from the past, a hope for the future*, 10.
17. 17-Şahin, C., Şahin, A., Bilücan, F., Ergun, B., & Özer, D. (2025). Comparative accuracy assessment of orthophotos produced using different UAV and
3. 3-Emami, H., & Rostami, S. G. (2022). Analysis and comparison of the exactness of specialist drone-based software products in urban and exurban region. *Scientific-Research Quarterly of Geographical Data (SEPEHR)*, 31(123), 63-87. <https://doi.org/10.22131/sepehr.2022.699908> (In Persian)
4. 4-Grznárová, A., Mokroš, M., Surový, P., Slavík, M., Pondelík, M., & Merganič, J. (2019). The crown diameter estimation from fixed wing type of UAV imagery. *The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, 42, 337-341. <https://doi.org/10.5194/isprs-archives-XLII-2-W13-337-2019>
5. 5-Jarahizadeh, S., & Salehi, B. (2024). A Comparative Analysis of UAV Photogrammetric Software Performance for Forest 3D Modeling: A Case Study Using AgiSoft Photoscan, PIX4DMapper, and DJI Terra. *Sensors*, 24(1), 286. <https://doi.org/10.3390/s24010286>
6. 6-Kargar, M. R., Khabazi, F., & Hesabi, A. (2022). Evaluation crown height model extracted from the UAV in individual tree detection in Sisangan Forest Park. *Ecology of Iranian Forests*, 10(20), 193-203. (In Persian) 10.52547/ifej.10.20.193
7. 7-Karthigesu, J., Owari, T., Tsuyuki, S., & Hiroshima, T. (2024). Improving the Estimation of Structural Parameters of a Mixed Conifer–Broadleaf Forest Using Structural, Textural, and Spectral Metrics Derived from Unmanned Aerial Vehicle Red Green Blue (RGB) Imagery. *Remote Sensing*, 16(10), 1783. <https://doi.org/10.3390/rs16101783>
8. 8-Khalili, z., Fallah, A., & Shataee, S. (2023). Canopy Gap delineation using UAV data in Coniferous Forests using (Case Study: Arab Dag Region in Golestan Province) [Applicable]. *Ecology of Iranian Forests*, 11(21), 24-39. (In Persian) <https://doi.org/10.61186/ifej.11.21.24>
9. 9-Liang, J., & Gamarra, J. G. (2020). The importance of sharing global forest data in a world of crises. *Scientific Data*, 7(1), 424.

- photogrammetric software. In M. Ben Ahmed, B. A. Abdelhakim, İ. R. Karaş, & K. Ben Ahmed (Eds.), Innovations in smart cities applications volume 8: Proceedings of the SCA 2024. Springer. https://doi.org/10.1007/978-3-031-88653-9_11
18. 18-Sotomayor, L., Kattenborn, T., Poux, F., Turner, D., & Lucieer, A. (2024). Investigating Deep Learning Techniques to Estimate Fractional Vegetation Cover in the Australian Semi-arid Ecosystems combining Drone-based RGB imagery, multispectral Imagery and LiDAR data. <https://doi.org/10.5194/egusphere-egu24-5766>.
19. 19-Thapa, S., Garcia Millan, V. E., & Eklundh, L. (2021). Assessing forest phenology: a multi-scale comparison of near-surface (UAV, spectral reflectance sensor, phenocam) and satellite (MODIS, sentinel-2) remote sensing. Remote Sensing, 13(8), 1597. <https://doi.org/10.3390/rs13081597>
20. 20-Tu, Y.-H., Johansen, K., Phinn, S., & Robson, A. (2019). Measuring canopy structure and condition using multi-spectral UAS imagery in a horticultural environment. Remote Sensing, 11(3), 269.
21. 21-Tu, Y.-H., Phinn, S., Johansen, K., Robson, A., & Wu, D. (2020). Optimising drone flight planning for measuring horticultural tree crop structure. ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing, 160, 83-96.

COPYRIGHTS

©2026 by the authors. Published by National Geographical Organization. This article is an open access article distributed under the terms and conditions of the Creative Commons [Attribution-NoDerivs 4.0 International \(CC BY-ND 4.0\)](https://creativecommons.org/licenses/by-nd/4.0/)

