Website: https://www.Sepehr.org Online ISSN: 2588-3879; Print ISSN: 2588-3860

Scientific - Research Quarterly

Geographical Data (SEPEHR) Vo.35, No.138, Summer 2026

P.P 27-43

Research paper

https://doi.org/10.22131/sepehr.2025.2054662.3125

Comparing the efficiency of UAV-based specialized photogrammetry software in estimating some structural features of Zagros forests Case study: Qalajeh, Kermanshah Province

Arian Esfandyari[1], Morteza Pourreza*[2], Ebadat Ghanbari Parmehr[3]

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:

Esfandyari, 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.

شاپای الکترونیکی: 2588-3879 / شاپای چاپی: 2588-3860
تارنمای نشریه https://www.Sepehr.org

فصلنامه علمی - پژوهشی
اطلاعات جغرافیایی (سپهر) دوره ۳۵، شماره ۱۳۸، تابستان ۱۴۰۵

مقاله پژوهشی
صفحات ۴۳ - ۲۷

https://doi.org/10.22131/sepehr.2025.2054662.3125

مقایسه کارایی نرم‌افزارهای تخصصی فتوگرامتری پهپادمبنا 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 arianes0001@gmail.com

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

۳- استادیارگروه نقشه‌برداری، دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه صنعتی نوشیروانی بابل، بابل، ایران egparmehr@gmail.com

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.

چکیده

امروزه فتوگرامتری پهپادمبنا 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 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 قطعات‌نمونه 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 تاج پوشش، کاملاً وابسته به میزان تراکم تاج‌پوشش است.

استناد به این مقاله:

اسفندیاری، آ؛ پوررضا، م؛ قنبری پرمهر، ع (۱۴۰۵)؛ مقایسه کارایی نرم‌افزارهای تخصصی فتوگرامتری پهپادمبنا 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 کمّی 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 کمّی‌سازی 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 و 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 Autodesk ReCap، Agisoft Metashape، PIX4Dmapper و 3DF Zephyr اشاره نمود (*Markiewicz et al., 2022*). با توجه به اهمیت این موضوع، پژوهش‌هایی به‌منظور مقایسه کارآیی این نرم‌افزارها با دیدگاه‌های مختلف و در کاربری‌های مختلف انجام شده است (*Emami & Rostami, 2022; Jarahizadeh & Salehi, 2024*). در 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[1]) یکی از روش‌های اصلی برای ارزیابی ویژگی‌های جنگل است که از مدل رقومی سطح (DSM[2]) و مدل رقومی زمین (DTM[3]) 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

بر روی زمین (شامل ساختمان‌ها و درختان) پرداخته شده است (*Emami & Rostami, 2022; Jarahizadeh & Salehi, 2024*). به طور مثال، Jarahizadeh و Salehi (2024)، با مقایسه کارایی نرم‌افزارهای تخصصی فتوگرامتری در پوشش‌های مختلف زمین در نیویورک مشاهده کردند که نرم‌افزارهای Agisoft و PIX4D نسبت به نرم‌افزار DJI Terra کارایی بهتری در تولید ابر نقاط متراکم نشان داد. در همین راستا، Emami و Rostami (2022)، نیز دقت تولیدات نرم‌افزارهای تخصصی فتوگرامتری پهپادمبنا را در مناطق شهری و غیر شهری مورد مقایسه قرار داده و مشاهده کردند که نرم‌افزار Agisoft در مدل‌سازی سه‌بعدی انواع سطوح در همه مناطق مورد مطالعه، بهترین نتیجه را نسبت به نرم‌افزارهای PIX4D، Photomodeler UAS و Inpho UASmaster نشان داد. در پژوهش دیگری نیز، Sahin و همکاران (۲۰۲۵)، با مقایسه صحت ارتوفتوهای تولید شده توسط نرم‌افزارهای مختلف فتوگرامتری نشان دادند که نرم‌افزار Agisoft بیشترین صحت مسطحاتی و نرم‌افزار PIX4D بیشترین صحت ارتفاعی را ارائه داد. با توجه به پیشینه پژوهش انجام شده، هیچ‌یک از این پژوهش‌ها به طور تخصصی در زمینه جنگل و برآورد ویژگی‌های 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[1]، به مقایسه کارایی نرم‌افزارهای تخصصی رایج در برآورد ویژگی‌های ساختاری جنگل‌های زاگرس پرداخته شود. جنگل‌های زاگرس که در غرب ایران در راستای کوه‌های زاگرس قرار گرفته‌اند، به‌دلیل بهره‌برداری 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 نرم‌افزار تخصصی رایج Agisoft Metashape و PIX4Dmapper در برآورد تراکم، سطح تاج‌پوشش و ارتفاع درختان در جنگل‌های زاگرس است.

1. Real Time Kinematic

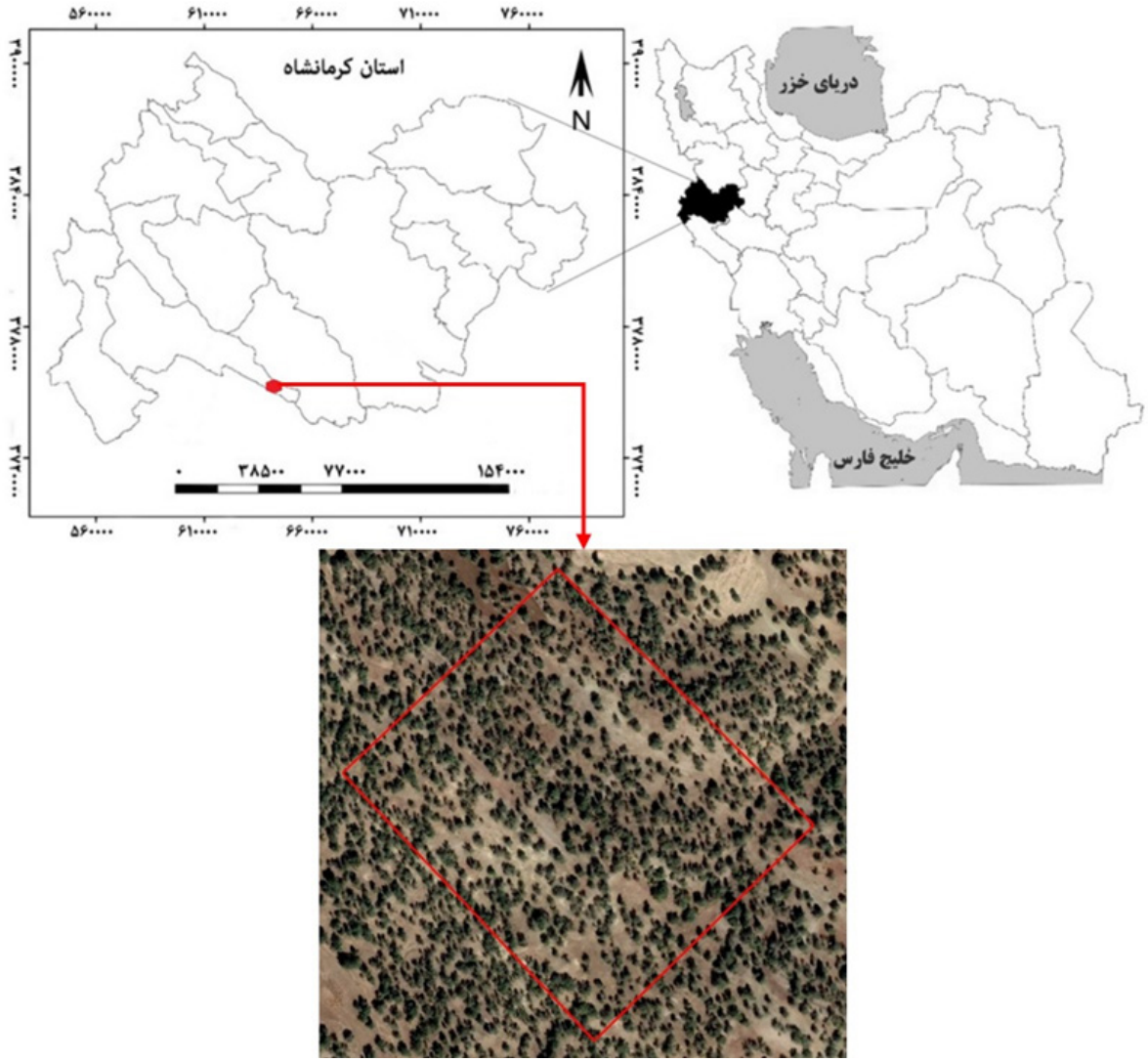
۲- مواد و روش‌ها

۲-۱- منطقه مورد مطالعه

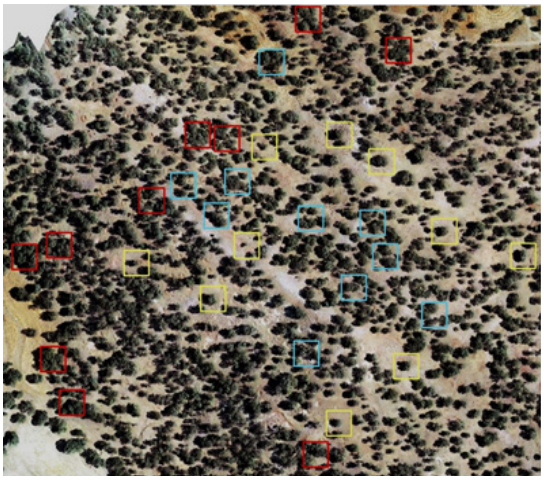
منطقه مورد مطالعه بخشی از جنگل‌های حفاظت شده قلاجه بوده که در حد فاصل بین استان کرمانشاه و ایلام قرار دارد (نگاره ۱). وسعت منطقه‌ای که داده‌های مورد نظر از آن برداشت شده ۱۵ هکتار بوده که در عرض جغرافیایی ۳۴ درجه و ۳ دقیقه شمالی و طول جغرافیایی ٤٦ درجه و ۱۹ دقیقه شرقی با اقلیم سرد و نیمه خشک واقع شده و ۱۷۰۰ متر ارتفاع از سطح دریا دارد. از گونه‌های درختی و درختچه‌ای مهم این منطقه می‌توان 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 تیپ جنگل نسبتاً تیپ خالص بلوط ایرانی بوده که گونه‌های زالزالک و آلبالوی وحشی به‌عنوان گونه‌های همراه مشاهده می‌شوند. در این منطقه، درختان بلوط به‌دلیل برش‌های پی‌درپی، در بیشتر مناطق به فرم رویشی شاخه‌زاد دیده می‌شوند (*Pourreza et al., 2014*).

۲-۲- نمونه‌برداری

پیش از تصویربرداری، با استفاده از تصاویر نرم‌افزار Google Earth ناحیه‌ای ۱۵ هکتاری از منطقه مورد مطالعه انتخاب شد. سپس با توجه به تراکم تاج‌پوشش درختان، سه گروه قطعه‌نمونه با تراکم تاج‌پوشش کم (۲۵%>)، متوسط (۲۵%-۵۰%) و زیاد (۵۰%<) به صورت کاملاً تصادفی و با ۱۰ تکرار، انتخاب شدند تا اندازه‌گیری‌های زمینی و پردازش‌های لازم داخل این قطعه‌نمونه‌ها انجام شود (نگاره ۲). پس از انتخاب این قطعه‌نمونه‌ها، تراکم تاج‌پوشش آنها بر روی زمین نیز اندازه‌گیری شده و با درصد تراکم اندازه‌گیری شده در قطعات نمونه بر روی تصاویر گوگل ارث، تطبیق داده شد.



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



نگاره ۲- موقعیت قطعه‌نمونه‌های انتخاب شده با تراکم تاج‌پوشش 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 (سانتی‌متر)
۱۰۰	%۷۵	%۷۵	۱۰۰	۱۱	۲/۷٤

۲-۳- طراحی عملیات پرواز

پیش از عملیات میدانی، از طریق نرم‌افزار GS RTK، طرح پروازی فراهم شد که در مقایسه با نرم‌افزارهای 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 به‌منظور طراحی پرواز استفاده شده است. ارتفاع پرواز از مبدأ ۱۰۰ متر با هم‌پوشانی طولی ۷۵ درصد و هم‌پوشانی عرضی ۷۰ درصد و با فاصله نمونه‌برداری زمینی (GSD[1]) ۳/۵۵ متر تعیین شد. منظور از GSD، فاصله بین مرکز دو پیکسل متوالی اندازه‌گیری شده بر روی زمین است. همچنین، شبکه موقعیت‌یابی یکپارچه مالکیت‌ها (شمیم) به‌عنوان شبکه مرجع انتخاب شد. برخی از مهم‌ترین پارامترهای پرواز در جدول شماره ۱ ارائه شده است.

تصویربرداری با بهره‌گیری از کوادکوپتر (فانتوم ٤) مجهز به سیستم موقعیت‌یاب آنی (RTK) (نگاره ۳)، در تاریخ ۳۱ تیر ۱٤۰۱ در یک روز آفتابی و بین ساعات ۱۱ تا ۱۲ ظهر انجام شد. ابعاد این پرنده معادل ۳۵ × ۳۵ سانتی‌متر بوده و وزن آن ۱۳۹۱ گرم است. باتری ۱۵/۲ ولتی، ۵۸۷۰ میلی‌آمپری و ٤ سل لیپو با وزن ٤٦۸ گرم، امکان زمان پروازی معادل ۳۰ دقیقه را برای اپراتور این پهپاد فراهم می‌نماید. این پهپاد از دوربین با سنسور ۱ اینچ ۲۰ مگاپیکسلی CMOS بهره می‌برد. Phantom 4-RTK دارای توان تفکیک مکانی بسیار بالایی بوده، به گونه‌ای که فاصله نمونه‌برداری زمینی در ارتفاع ۱۰۰ متری برابر با ۲/۷٤ سانتی‌متر است. همچنین این پرنده دارای یک گیمبال سه محوره است که میزان لرزش‌های آن را هنگام پرواز به حداقل رسانده و از طرف دیگر شاتر مکانیکی موجود در آن، نقش قابل‌توجهی در کاهش خطای ناشی از لرزش هنگام تصویربرداری دارد. به‌دلیل 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 ۲/٤ و ۵/۸ گیگاهرتز و ٤ 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 داده‌ها به‌صورت آنی می‌شود ***(Pourreza et al., 2022)***. یک نمونه تصویر برداشت شده با مشخصات ذکر شده در نگاره ٤ قابل مشاهده است.

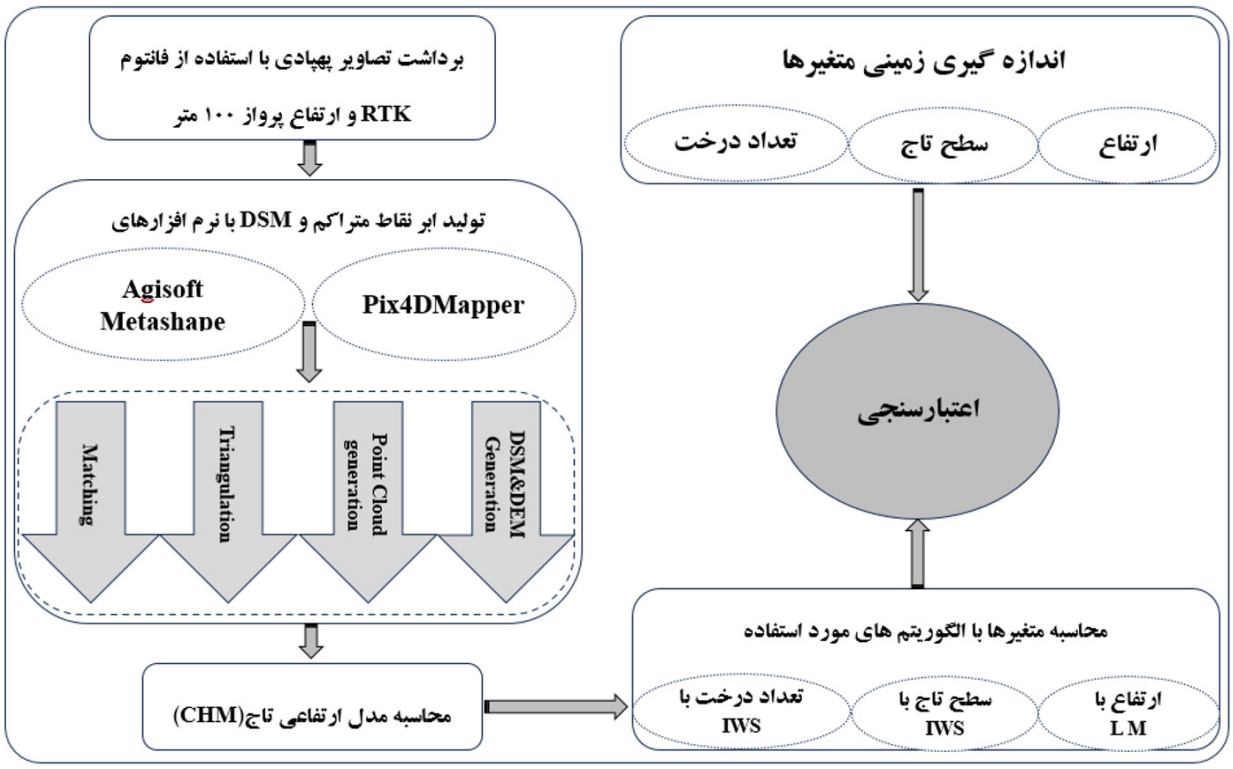
بعد از جمع‌آوری تصویربرداری، برای ایجاد ابر نقاط متراکم، از دو نرم‌افزار AgiSoft Photoscan (Metashape) و PIX4DMapper (PIX4D) استفاده شد. نخست، تصاویر برداشت شده، به محیط نرم‌افزارها منتقل و پیش‌پردازش‌های مورد نیاز از قبیل بررسی تصاویر از لحاظ کیفی و توجیه نسبی انجام شد. از آنجا که تصویربرداری با بهره‌گیری از سیستم موقعیت‌یاب آنی (RTK) انجام شده بود، دیگر نیازی به اضافه کردن نقاط کنترل نبود ***(Pourreza et al., 2022)***. شایان ذکر است که در هر دو نرم‌افزار، از تنظیمات پیش‌فرض استفاده شد. سپس به کمک روش Structure from Motion (SfM) در ادامه مدل ابر نقاط متراکم متشکل از میلیون‌ها نقطه تولید شد. از آنجا که هریک از نرم‌افزارها از الگوریتم‌های مختلفی (SIFT[2], SURF[3], ORB[4]) برای ساخت ابر نقاط متراکم استفاده می‌کند، کیفیت، خروجی این نرم‌افزارها می‌تواند متفاوت باشد ***(Rublee et al., 2011)***. در گام پایانی نیز، مدل رقومی سطح (DSM) و مدل رقومی زمین (DTM)، استخراج شدند (نگاره ۵).

1. Ground Sampling Distance

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

نگاره ۳- تصویری از پهپاد Phantom 4-RTK

نگاره ٤- یک نمونه تصویر گرفته شده به وسیله پهپاد Phantom 4-RTK



نگاره ۵- روندنمای مقایسه ویژگی‌های برآورد شده در محیط نرم‌افزارهای Agisoft و PIX4D

جدول ۲- خلاصه کارایی دو نرم‌افزار Agisoft وPIX4D در تولید ابر نقاط و زمان پردازش تصاویر در کل منطقه مورد مطالعه

پارامترها	PIX4D	Agisoft
تراکم ابر نقاط (تعداد بر مترمربع)	۱٤۹۸/۵	۱۷۰۸
زمان پردازش تصاویر (دقیقه)	۲۷۳	۲٤۲

۲-٤- برآورد تعداد درختان، سطح تاج و ارتفاع درختان

برای محاسبه 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 قطعه‌بندی حوضه آبخیز معکوس (IWS[1])، و برای برآورد ارتفاع تاج درختان نیز از الگوریتم بیشینه محلی (LM[2]) استفاده شد ***(Nasiri et al., 2021)***.

۲-۵- اندازه‌گیری داده‌های زمینی

به‌منظور بررسی صحت و دقت اندازه‌گیری متغیرهای مورد نظر در محیط نرم‌افزارها، در هر یک از قطعه‌نمونه‌ها، تعداد درختان، دو قطر عمود بر هم تاج درختان (قطر بزرگ و قطر عمود بر آن) به‌منظور محاسبه سطح تاج‌پوشش (با پیش فرض شکل هندسی بیضی برای تاج) و ارتفاع درختان با استفاده از دستگاه متر لیزری لایکا مدل S910 اندازه‌گیری شدند.

۲-٦- مقایسه میانگین و خطای اندازه‌گیری

به‌منظور مقایسه آماری میانگین برآورد شده از تصاویر پهپادی برای تعداد درخت در قطعه‌نمونه، سطح تاج‌پوشش و ارتفاع درختان با میانگین اندازه‌گیری‌شده این متغیرها در عرصه (واقعیت زمینی)، از آزمون Paired samples T-test (رابطه۱) استفاده شد ***(Pourreza et al., 2022)***. در رابطه ۱، $\bar{d}$ نشان‌دهنده میانگین تفاوت بین دو مشاهده جفتی، S_dنشان‌دهنده انحراف معیار تفاوت‌ها و n نیز نشان‌دهنده تعداد مشاهدات جفتی است.

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

برای بررسی ارتباط مقادیر برآورد شده هر یک از این متغیرها (از تصاویر پهپادی) با مقادیر اندازه‌گیری 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 نرم‌افزار Agisoft و PIX4D نیز تعیین شد ***(Emami and Rostami, 2022)***:

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

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

۳- یافته‌های پژوهش

۳-۱- مقایسه کارایی نرم‌افزارها در تولید ابر نقاط متراکم

نتایج به‌دست‌آمده نشان داد که تراکم ابر نقاط تولید شده در نرم‌افزار Agisoft (با میانگین تعداد ۱۷۰۸ نقطه در متر مربع) نسبت به تراکم ابر نقاط تولید شده در نرم‌افزار PIX4D (با میانگین تعداد ۱٤۹۸/۵ نقطه در متر مربع) بیشتر بوده که در واقع نشان‌دهنده کیفیت بالاتری (۱٤ درصد) است. همچنین، زمان پردازش تصاویر در نرم‌افزار PIX4D (۲۷۳ دقیقه) بیشتر از نرم‌افزار Agisoft (۲٤۲ دقیقه) بود (جدول ۲). به بیان دیگر، کارایی نرم‌افزار Agisoft در تولید ابر نقاط متراکم با کیفیت بالاتر و در زمان کوتاه‌تر، بیشتر از نرم‌افزار PIX4D بود.

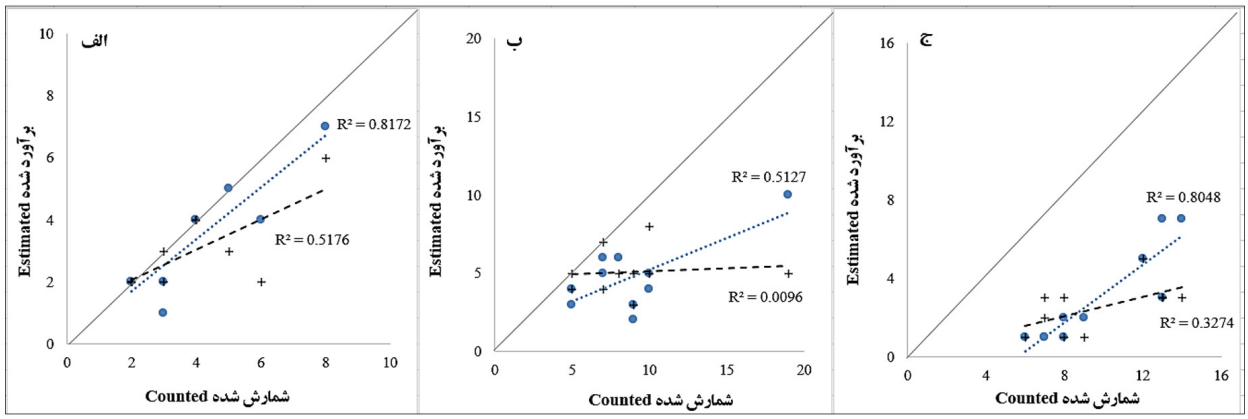
1. Invers watershed segmentation
2. Local Maximum

۳-۲- مقایسه برآورد تعداد درختان

میانگین تعداد درختان شناسایی شده در سطح قطعه‌نمونه‌های با تراکم مختلف تاج‌پوشش، با استفاده از دو نرم‌افزار Agisoft و PIX4D در جدول ۳ خلاصه شده است. در قطعه‌نمونه‌های با درجه تراکم تاج‌پوشش کم، نتایج آزمون Paired samples T-test نشان داد که میانگین تعداد درختان برآورد شده توسط نرم‌افزار Agisoft، اختلاف معنی‌داری (P-Value = 0.051) با تعداد درختان شمارش شده نداشت (جدول ۳). به طور مشابه، تعداد درختان برآورد شده در نرم‌افزار PIX4D نیز اختلاف معنی‌داری (P-Value = 0.068) با تعداد درختان شمارش شده نشان نداد. در قطعه‌نمونه‌های با درجه تراکم تاج‌پوشش متوسط، نتایج آزمون Paired samples T-test نشان داد که تعداد درختان برآورد شده توسط نرم‌افزار Agisoft، اختلاف معنی‌داری (P-Value=0.001) با تعداد درختان شمارش شده داشت. همچنین، تعداد درختان برآورد شده در نرم‌افزار PIX4D نیز اختلاف معنی‌داری (P-Value=0.035) با تعداد درختان شمارش شده نشان داد (جدول ۳). در قطعه‌نمونه‌های با درجه تراکم تاج‌پوشش زیاد نیز بین درختان شمارش شده و برآورد شده توسط نرم‌افزار Agisoft اختلاف معنی‌داری (P-Value=0.000) مشاهده شد که به طور مشابه، این اختلاف برای نرم‌افزار PIX4D نیز معنی‌دار (P-Value=0.008) بود (جدول ۳). نتایج نشان داد که کمترین درصد خطای جذر میانگین مربعات برای برآورد تعداد درختان، هم در نرم‌افزار Agisoft (RMSE%=25.64) و هم در نرم‌افزار PIX4D (RMSE%=40.54) مربوط به قطعه‌نمونه‌های با درجه تراکم تاج‌پوشش کم بوده، ولی با افزایش درجه تراکم، درصد خطای جذر میانگین مربعات برای برآورد تعداد درخت در قطعه‌نمونه، برای هر دو نرم‌افزار افزایش می‌یابد. به طوری که برای نرم‌افزار Agisoft، خطای جذر میانگین مربعات در درجه تراکم متوسط و زیاد تاج‌پوشش، به ترتیب ۵۵/۱۵ و ۷۰/۲۹ درصد و برای نرم‌افزار PIX4D نیز به ترتیب ۶۱/۱۳ و ۷۸/۱۰ درصد محاسبه شد (جدول ۳). بررسی ارتباط رگرسیونی تعداد درختان اندازه‌گیری شده و برآورد شده در قطعه‌نمونه، نشان داد که ضریب تبیین (R^2) محاسبه شده برای نرم‌افزار Agisoft در همه تراکم‌های تاج‌پوشش (کم، متوسط و زیاد) به ترتیب با مقادیر ۰/۸۱، ۰/۵۱ و ۰/۸۰ بیشتر از ضریب تبیین محاسبه شده برای نرم‌افزار PIX4D به ترتیب با مقادیر ۰/۵۱، ۰/۰۱ و ۰/۳۲ است (جدول ۳ و نگاره ۶).

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

نرم‌افزار	تراکم تاج‌پوشش	میانگین تعداد درخت در قطعه‌نمونه		Paired samples T-test	RMSE٪	R^2
		اندازه‌گیری‌شده	برآورد	آماره و معنی‌داری		
Agisoft	کم (<۲۵٪)	۳/۹	۳/۳	۲/۲۵^{ns}	۲۵/۶۴	۰/۸۱
	متوسط (۵۰٪-۲۵٪)	۸/۹	۴/۸	۴/۵۵**	۵۵/۱۵	۰/۵۱
	زیاد (>۵۰٪)	۹/۷	۳	۱۵/۸۴***	۷۰/۲۹	۰/۸۰
PIX4D	کم (<۲۵٪)	۳/۹	۳	۲/۰۷^{ns}	۴۰/۵۴	۰/۵۱
	متوسط (۵۰٪-۲۵٪)	۸/۹	۵/۱	۲/۹۳*	۶۱/۱۳	۰/۰۱
	زیاد (>۵۰٪)	۹/۷	۲/۵	۹/۱۶***	۷۸/۱۰	۰/۳۲



نگاره ٦- ارتباط خطی بین تعداد درختان اندازه‌گیری شده و برآورد شده در قطعه‌نمونه با درجه تراکم کم (الف)، متوسط (ب) و زیاد (ج) توسط تولیدات دو نرم‌افزار Agisoft (خط نقطه چین و دایره توپر) و PIX4D (خط بریده و علامت +)

۳-۳- مقایسه برآورد تاج پوشش

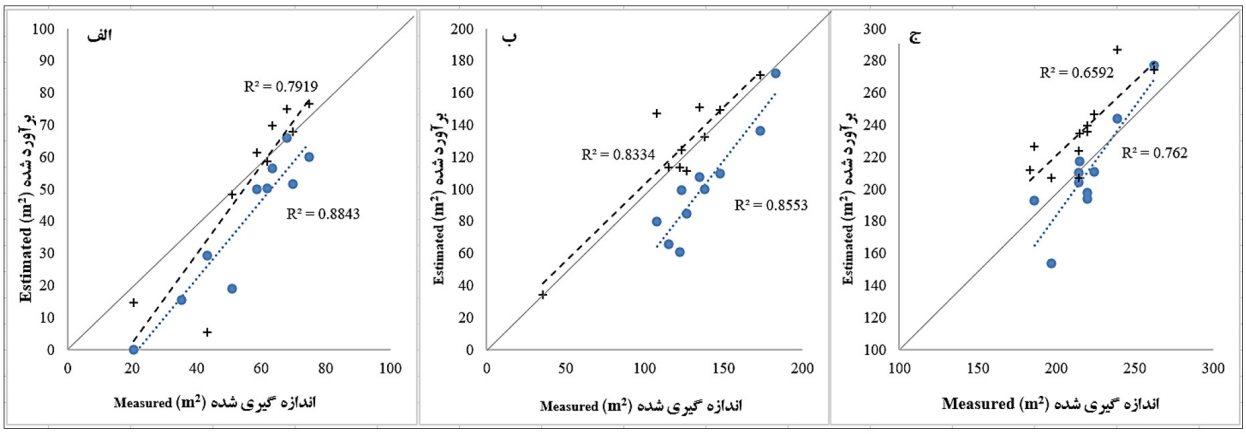
بر پایه نتایج آزمون Paired samples T-test، میانگین سطح تاج‌پوشش برآورد شده توسط نرم‌افزار Agisoft در قطعات‌نمونه با تراکم تاج‌پوشش کم و متوسط، با میانگین اندازه‌گیری شده آن‌ها اختلاف معنی‌داری (P-Value=0.000) داشت ولی این اختلاف برای تراکم تاج‌پوشش زیاد معنی‌دار (P-Value=0.145) نبود. این اختلاف برای نرم‌افزار PIX4D نه تنها در قطعه‌نمونه‌های با تراکم تاج‌پوشش کم و متوسط، با میانگین اندازه‌گیری شده (به ترتیب با P-Value=0.016 و P-Value=0.046) معنی‌دار بود، بلکه برای تراکم تاج‌پوشش زیاد نیز بین میانگین اندازه سطح تاج‌پوشش اندازه‌گیری‌شده و برآورد شده اختلاف معنی‌دار (P-Value=0.004) بود (جدول ٤). نتایج نشان داد که در نرم‌افزار Agisoft و PIX4D، بیشترین درصد خطای جذر میانگین مربعات (RMSE%) به ترتیب با مقادیر ۳۰/۷۷ و ۲۲/۹۰ درصد مربوط به قطعه‌نمونه‌های با درجه تراکم‌تاج‌پوشش کم بود. همچنین نتایج نشان داد که با افزایش درجه تراکم تاج‌پوشش در قطعه‌نمونه، درصد این خطا برای برآورد سطح تاج‌پوشش در قطعه‌نمونه در هر دو نرم‌افزار به‌طور نسبتاً مشابهی کاهش می‌یابد. به‌طوری که مقدار خطا برای نرم‌افزار Agisoft در تراکم‌های متوسط و زیاد به ترتیب برابر ۲۷/٦۳ و ۸/٦۳ درصد بوده و برای نرم‌افزار PIX4D به ترتیب برابر ۱۲/٦۷ و ۱۱/۱۵ درصد بود. بررسی ارتباط رگرسیونی سطح تاج‌پوشش اندازه‌گیری شده و برآورد شده در قطعه‌نمونه، نشان داد که در تراکم‌های کم، متوسط و زیاد تاج‌پوشش، ضریب تبیین (R^2) محاسبه شده برای تولیدات نرم‌افزار Agisoft، (به ترتیب با مقادیر ۰/۸۸، ۰/۸۵ و ۰/۷٦) نسبت به ضریب تبیین (R^2) محاسبه شده برای تولیدات نرم‌افزا PIX4D (به ترتیب با مقادیر ۰/۷۹، ۰/۸۳ و ۰/٦۵) بیشتر بود (جدول ٤ و نگاره ۷).

۳-۴- مقایسه برآورد ارتفاع درختان

نتایج مقایسه میانگین ارتفاع اندازه‌گیری شده و برآورد شده درختان نشان داد که میانگین ارتفاع برآورد شده (٦/۹۱ متر) توسط تولیدات نرم‌افزار Agisoft در قطعه‌نمونه‌های با درجه تراکم تاج‌پوشش کم، با میانگین اندازه‌گیری شده آن‌ها (٦/۲٤ متر) اختلاف معنی‌داری دارد (P-Value=0.004). در قطعه‌نمونه‌های با درجه تراکم تاج‌پوشش متوسط نیز، میانگین ارتفاع برآورد شد (٦/٥٤ متر) اختلاف معنی‌داری (P-Value=0.001) با میانگین ارتفاع اندازه‌گیری شده (٥/۷٦ متر) نشان داد. همچنین در قطعه‌نمونه‌های با درجه تراکم تاج پوشش زیاد، اختلاف معنی‌داری (P-Value=0.000) بین میانگین ارتفاع برآورد شده (۷/۲۸ متر) با میانگین ارتفاع اندازه‌گیری شده (٦/۲۳ متر) مشاهده شد (جدول ٥).

جدول ٤- میانگین سطح تاج‌پوشش و خطای برآوردی (%RMSE)

نرم‌افزار	تراکم تاج‌پوشش	میانگین سطح تاج‌پوشش در قطعه‌نمونه		%RMSE	R^2
		اندازه‌گیری شده	برآورد	Paired samples T-test آماره و معنی‌داری	
Agisoft	کم (<۲۵%)	٥٤/٦٣	٣٩/٨٣	٥/٥٦ **	٠/٨٨	٣٠/٧٧
	متوسط (۵۰%-۲۵%)	١٧٣/١٦	١٠١/٧٥	٧/٨٦ ***	٠/٨٥	٢٧/٦٣
	زیاد (>۵۰%)	٢١٩/٠٦	٢١٠/١٨	١/٥٩ ns	٠/٧٦	٨/٦٣
PIX4D	کم (<۲۵%)	٥٤/٦٣	٥١/٢٠	٠/٨٥ *	٠/٧٩	٢٢/٩٠
	متوسط (۵۰%-۲۵%)	١٧٣/١٦	١٤٢/٦٣	-٠/٠,٩٩ *	٠/٨٣	١٢/٦٧
	زیاد (>۵۰%)	٢١٩/٠٦	٢٣٨/٤٢	٣/٨٩ **	٠/٦٥	١١/١٥



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

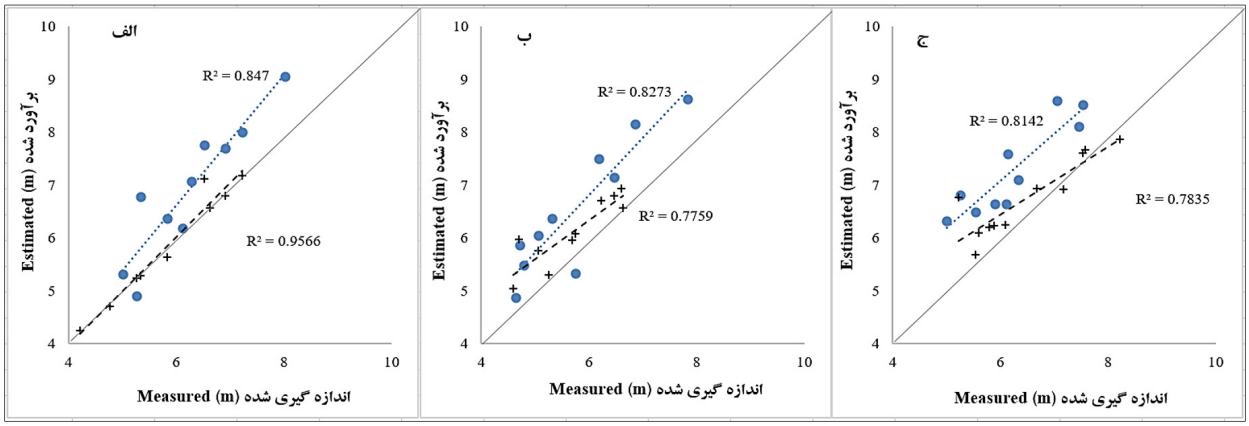
در خصوص تولیدات نرم‌افزار PIX4D نیز مشاهده شد که در قطعه‌نمونه‌های با درجه تراکم تاج‌پوشش کم، اختلاف معنی‌داری (P-Value=0.044) بین میانگین ارتفاع برآورد شده (٥/٦٤ متر) و اندازه‌گیری شده (٦/٢٤ متر) وجود دارد. در قطعه‌نمونه‌های با درجه تراکم تاج‌پوشش متوسط نیز، میانگین ارتفاع برآورد شده (٦/٠٨ متر) اختلاف معنی‌داری (P-Value=0.035) با میانگین ارتفاع اندازه‌گیری شده (٥/٧٦ متر) نشان داد. همچنین در قطعه‌نمونه‌های با درجه تراکم تاج پوشش زیاد، اختلاف معنی‌داری (P-Value=0.008) بین میانگین ارتفاع برآورد شده (٦/٧٧ متر) با میانگین ارتفاع اندازه‌گیری شده (٧/٢٣ متر) مشاهده شد (جدول ٥). نتایج نشان داد که خطای ارتفاع برآوردی در درجه تراکم تاج‌پوشش کم، هم در نرم‌افزار Agisoft و هم در نرم‌افزار PIX4D، به ترتیب با مقادیر ١٤/٧٧ و ٥/٨٤ درصد، نسبت به سایر طبقات درجه تاج‌پوشش، کمترین مقدار بود. همچنین نتایج نشان داد که با افزایش درجه تراکم‌تاج‌پوشش در قطعه‌نمونه از کم به متوسط، مقدار خطای برآوردی (RMSE%) ارتفاع برای خروجی‌های هر دو نرم‌افزار Agisoft و PIX4D، (به ترتیب با مقادیر ٢٣/١٢ و ١٢/٥٩ درصد) افزایش می‌یابد. درحالی‌که با افزایش درجه تراکم تاج‌پوشش در قطعه‌نمونه از متوسط به زیاد، این خطا برای هر دو نرم‌افزار Agisoft و PIX4D (به ترتیب با مقادیر ٢١/٣٤ و ١١/٦٩ درصد)، کاهش می‌یابد. بررسی ارتباط رگرسیونی ارتفاع اندازه‌گیری شده و برآورد شده درختان

در قطعه‌نمونه، نشان داد که بیشترین ضریب تبیین (R^2) محاسبه شده با مقدار ۰/۹۵ مربوط به تولیدات نرم‌افزار PIX4D در قطعه‌نمونه‌های با درجه تراکم تاج‌پوشش کم بود. ولی در درجه تراکم‌های تاج‌پوشش متوسط و زیاد، ضریب تبیین (R^2) محاسبه شده توسط تولیدات نرم‌افزار Agisoft (به ترتیب با مقادیر ۰/۸۲ و ۰/۸۱)، از ضریب تبیین (R^2) محاسبه شده توسط تولیدات نرم‌افزار PIX4D (به ترتیب با مقادیر ۰/۷۷ و ۰/۷۸) بیشتر بود (نگاره ۸).

درباره برآورد ارتفاع درختان که یکی دیگر از ویژگی‌های کلیدی برای بررسی ویژگی ساختاری جنگل‌ها است، نتایج مقایسه میانگین‌ها نشان داد که هیچ یک از دو نرم‌افزار صحت قابل قبولی را در خصوص میانگین ارتفاع ارائه نمی‌دهند. همچنین مشاهده شد که در همه قطعه‌نمونه‌ها، خطای ارتفاع برآورد شده توسط نرم‌افزار PIX4D کمتر از نرم‌افزار Agisoft بود.

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

نرم‌افزار	تراکم تاج‌پوشش	میانگین ارتفاع درخت در قطعه‌نمونه		آزمون T	RMSE %	R^2
		اندازه‌گیری‌شده	برآورد	آماره و معنی‌داری		
Agisoft	کم (<۲۵%)	٦/۲٤	٦/۹۱	-۳/۹۰*	۱٤/۷۷	۰/۸٤
	متوسط (۵۰%-۲۵%)	۵/۷٦	٦/۵٤	-٤/٦۲**	۲۳/۱۲	۰/۸۲
	زیاد (>۵۰%)	٦/۲۳	۷/۲۸	-۸/٦۷***	۲۱/۳٤	۰/۸۱
PIX4D	کم (<۲۵%)	٦/۲٤	۵/٦٤	-۲/۲۵*	۵/۸٤	۰/۹۵
	متوسط (۵۰%-۲۵%)	۵/۷٦	٦/۰۸	۲/٤۷**	۱۲/۵۹	۰/۷۷
	زیاد (>۵۰%)	۷/۲۳	٦/۷۷	۳/۳۸**	۱۱/٦۹	۰/۷۸



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

٤- بحث

یکی از مهم‌ترین پارامترهایی که در فتوگرامتری برای محاسبه ویژگی پدیده‌ها نقش کلیدی دارد، تراکم ابر نقاط تولیدی است ***(Jarahizadeh and Salehi, 2024)***. در نتایج پژوهش جاری، کارایی نرم‌افزار Agisoft برای تولید ابر نقاط متراکم نسبت به نرم‌افزار PIX4D بیشتر بود زیرا ابر نقاط متراکم، با کیفیت بالاتری (تعداد نقاط بیشتر در واحد سطح) و در زمان کمتری تولید شده بود. در این‌باره، یافته‌های پژوهش ***(Jarahizadeh and Salehi, 2024)*** نشان داد، گرچه کارایی هر دو نرم‌افزار در تولید ابر نقاط متراکم مشابه است ولی در تصویربرداری با ارتفاع پروازهای مختلف، ابر نقاط متراکم تولید شده در دو نرم‌افزار متفاوت است به‌طوری‌که با ثابت بودن سایر شرایط تصویربرداری، در ارتفاع پروازی پایین‌تر (٦٠ متر)، نرم‌افزار Agisoft ابر نقاط متراکم‌تری تولید کرده ولی در ارتفاع پروازی بالاتر (۱۲۰ متر) نرم‌افزار PIX4D ابر نقاط متراکم‌تری تولید می‌کند. البته گزارش شده است که به‌طور کلی کیفیت ابر نقاط متراکم می‌تواند به پوشش‌های مختلف زمین بستگی داشته باشد ***(Jarahizadeh and Salehi, 2024)***. به‌طوری‌که در پژوهش دیگری نشان داده شد که ابر متراکم تولید شده توسط نرم‌افزار PIX4D در مناطق دارای پوشش گیاهی، کیفیت پایین‌تری نسبت به نرم‌افزار Agisoft دارد که تا حدود زیادی یافته‌های به‌دست آمده در پژوهش جاری را تأیید می‌کند ***(Georgopoulos et al., 2016)***. همچنین، نتایج از پژوهش به‌دست‌آمده ***(Emami and Rostami, 2022)*** در مناطقی با کاربری‌های متنوع نیز نشان داد که نرم‌افزار Agisoft، ابر نقاط متراکم‌تری نسبت به نرم‌افزار PIX4D تولید می‌کند که هم‌سو با یافته‌های پژوهش حاضر است. همچنین یافته‌های پژوهش حاضر نشان داد که نرم‌افزار Agisoft با پردازش تصاویر و تولید ابر نقاط متراکم در زمان کمتری (حدود ۱۱ درصد) نسبت به نرم‌افزار PIX4D دارای کارایی نسبی بیشتری بود. البته یافته‌های پژوهش ***(Emami and Rostami, 2022)*** بر خلاف یافته‌های این پژوهش نشان داد که کارایی نرم‌افزار PIX4D در زمان پردازش تصاویر و تولید ابر نقاط متراکم نسبت به نرم‌افزار Agisoft، حدود ۱۵ درصد بیشتر است که شاید دلیل آن وجود تنوع کاربری‌های مختلف در تصاویر برداشت شده باشد.

درباره تشخیص تعداد درختان، یافته‌های پژوهش جاری نشان داد که به‌طور کلی نرم‌افزار Agisoft با داشتن خطای برآوردی کمتری، کارایی بیشتری در همه تراکم‌ها نسبت به نرم‌افزار PIX4D داشته است. در این راستا یافته‌های پژوهش Jarahizadeh و Salehi (2024) نشان داد که کارایی نرم‌افزارهای Agisoft و PIX4D در تشخیص خودکار درختان در مناطق جنگلی تقریباً مشابه است. یافته‌های آنها نشان داد که گرچه ابر نقاط تولید شده توسط نرم‌افزارهای Agisoft و PIX4D حدود ۲/۵ برابر متراکم‌تر از ابر نقاط تولید شده توسط نرم‌افزار DJI Terra بود، اما به‌دلیل توانایی نرم‌افزار DJI Terra در تولید DSM دقیق‌تر، کارایی بهتری در تشخیص و شناسایی درختان داشته است.

در برآورد سطح تاج پوشش، یافته‌های پژوهش جاری نشان داد که با افزایش تراکم تاج‌پوشش، کارایی هر دو نرم‌افزار افزایش می‌یابد و با توجه به نتایج آزمون آماری، صحت برآورد سطح تاج در هر دو نرم‌افزار فقط در قطعه‌نمونه‌های با تراکم زیاد قابل قبول بوده و در قطعه‌نمونه‌های با تراکم کم و متوسط صحت قابل قبولی ندارد. همچنین همبستگی بین سطح تاج برآورد شده توسط نرم‌افزار Agisoft با سطح تاج اندازه‌گیری شده بیشتر از نرم‌افزار PIX4D بود. گرچه در زمینه برآورد سطح تاج‌پوشش درختان در جنگل با استفاده از نرم‌افزارهای مختلف و در تراکم‌های مختلف گزارشی ارائه نشده است، ولی یافته‌های پژوهش ***(Emami and Rostami, 2022)*** نشان داد که خطای مسطحاتی برآوردها در نرم‌افزار Agisoft کمتر از نرم‌افزار PIX4D است. البته یکی از یافته‌های مهم پژوهش جاری، کم‌برآورد نمودن سطح تاج توسط نرم‌افزار Agisoft نسبت به نرم‌افزار PIX4D بود که در همه قطعه‌نمونه‌ها این روند مشاهده شد.

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

ارتفاع برآورد شده توسط نرم‌افزار PIX4D کمتر از نرم‌افزار Agisoft بود. در این راستا، یافته‌های پژوهش *(Emami and Rostami, 2022)* نشان داد که گرچه نرم‌افزار Agisoft در مدل‌سازی سه‌بعدی انواع سطوح در مناطق مختلف، عملکرد بهتری دارد ولی نرم‌افزار PIX4D در تشخیص اختلاف ارتفاع، کارایی بهتری دارد. در حالی که یافته‌های پژوهش *(Jarahizade and Salehi, 2024)* نشان داد که در جنگل‌های متراکم، نرم‌افزار Agisoft کارایی بهتری در برآورد ارتفاع درختان نسبت به نرم‌افزار PIX4D دارد که دلیل آن می‌تواند استفاده از الگوریتم‌های مختلف برای شناسایی نقاط مشترک در تصاویر و بازسازی مدل‌های سه‌بعدی باشد. در مقابل، نرم‌افزار PIX4D برآورد ارتفاع درختان در مناطق با تراکم کم دقت قابل‌قبولی دارد اما در جنگل‌های متراکم با چالش‌های بیشتری مواجه است که با توجه به اینکه جنگل‌های زاگرس به‌عنوان جنگل‌های باز به شمار می‌روند می‌تواند تأیید کننده یافته‌های پژوهش جاری باشد. نکته جالب توجه در پژوهش جاری، بیش‌برآورد نمودن ارتفاع درختان توسط هر دو نرم‌افزار در همه قطعه‌نمونه‌ها با تراکم‌های مختلف بود. در این‌باره، یافته‌های پژوهش *(Pourreza et al., 2022)* نشان داد که نرم‌افزار Agisoft ارتفاع درختان را در یک جنگل سوزنی برگ سرو نقره‌ای، کم‌تر از واقعیت زمینی برآورد کرده و دلیل آن به شکل مخروطی بودن تاج این درختان و ثبت نشدن نوک تیز آن‌ها در ساخت ابر نقاط متراکم و همچنین DSM مرتبط شد. البته برپایه یافته‌های پژوهش جاری، در همه تراکم‌ها، ارتفاع برآوردی درختان توسط نرم‌افزار Agisoft بیشتر از ارتفاع برآوردی درختان توسط نرم‌افزار PIX4D بود. گرچه در این زمینه پژوهش‌های زیادی انجام نشده است، ولی یافته‌های پژوهش *(Jarahizade and Salehi, 2024)* نشان داد که ارتفاع برآوردی ساختمان‌ها و درختان توسط نرم‌افزار Agisoft همواره بیشتر از ارتفاع برآوردی توسط نرم‌افزار PIX4D بود که تأیید کننده یافته‌های پژوهش جاری است.

۵- نتیجه‌گیری

در پایان نتیجه‌گیری می‌شود که با توجه به زمان پردازش تصاویر و تولید ابر نقاط متراکم، نرم‌افزار Agisoft کارایی بهتری نسبت به نرم‌افزار PIX4D دارد. همچنین، از نظر توانایی تشخیص درختان نیز، نرم‌افزار Agisoft دارای کارایی بهتری نسبت به نرم‌افزار PIX4D است. نتیجه‌گیری شد که برآورد سطح تاج درختان وابسته به تراکم تاج‌پوشش بوده و در مناطق متراکم‌تر، نرم‌افزار Agisoft دارای کارایی بهتری نسبت به نرم‌افزار PIX4D است. درباره برآورد ارتفاع درختان می‌توان نتیجه گرفت که هر دو نرم‌افزار ارتفاع را بیشتر از واقعیت برآورد نموده ولی به‌طور کلی نرم‌افزار PIX4D دارای کارایی بهتری نسبت به نرم‌افزار Agisoft است. با جمع‌بندی این موارد می‌توان گفت که با توجه به نیاز کاربران به برآورد و بررسی ویژگی‌های ساختاری جنگل، انتخاب ارجح می‌تواند متفاوت باشد. نتایج این پژوهش می‌تواند به کاربران فتوگرامتری و مدل‌های سه بعدی کمک کند تا با آشنایی با کارایی نرم‌افزارها، نسبت به انتخاب نرم‌افزار مناسبت‌تر 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

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. 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, 2019
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. 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. 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. Khalili, z., Fallah, A., & Shataee, S. (2023). Canopy Gap delineation using UAV data in Coniferous Forests using (Case Study: Arab Dagh 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. Liang, J., & Gamarra, J. G. (2020). The importance of sharing global forest data in a world of crises. Scientific Data, 7(1), 424.
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. 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. 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. 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. 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. 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. Sagheb-Talebi, K., Sajedi, T., & Pourhashemi, M. (2014). Forests of Iran. A treasure from the past, a hope for the future, 10.
17. Şahin, C., Şahin, A., Bilücan, F., Ergun, B., & Özer, D. (2025). Comparative accuracy assessment of orthophotos produced using different UAV and

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. 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. 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. 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. 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)