

Research Article

Estimating the height of individual tree using RTK-unmanned aerial vehicle (UAV) images and local maxima algorithm

Morteza Pourreza ^{1,2*}, Fardin Moradi ^{2,3}, Shadi Jalilian ⁴, Mohammad Khosravi ^{1,2}

1* - Corresponding author, Assistant Prof., Faculty of Natural Resources, Razi University, Kermanshah, Iran

E-mail: pourreza@razi.ac.ir

2- Aerial Monitoring Group, Razi University, Kermanshah. Iran

3- Researcher, Research Division of Natural Resources, Kermanshah Agricultural and Natural Resources Research and Education Center, AREEO, Kermanshah, Iran

4- PhD. Student of Forestry, Faculty of Forest Science, Gorgan University of Agricultural Sciences and Natural Resource, Gorgan, Iran

Received: 11.09.2024

Revised: 10.12.2024

Accepted: 18.12.2024

Abstract

Background and objectives: Tree structural attributes are crucial in both ecological and economic contexts, with tree height being a fundamental variable and a primary indicator for quantifying forest stand volume. Measuring tree height is among the most difficult and costly tasks, requiring specialized expertise. Unmanned aerial vehicles (UAVs) have gained attention in forestry for their advanced capabilities. Recent UAV advancements enable remote assessment of tree structural characteristics and forest stands at a relatively low cost compared to traditional methods. This study assessed the accuracy and precision of tree height measurements using the Phantom 4 RTK UAV, without ground control points, combined with the local maxima algorithm to measure Arizona cypress (*Esperocyparis arizonica* (Greene) Bartel) tree heights.

Methodology: The study was conducted in an Arizona cypress plantation in Kermanshah province, Iran. The Phantom 4 UAV, equipped with an RTK system and a 1-inch 20-megapixel CMOS sensor camera, provided high spatial resolution. Key features included the RTK module for real-time horizontal and vertical positioning, a three-axis gimbal to reduce flight vibration, and a mechanical shutter to minimize imaging errors. The GNSS positioning system further enhanced data accuracy, even in enclosed environments. Ninety-eight trees were sampled, and heights were measured on-site using a Leica S910 laser device. The Crown Height Model (CHM) with the local maxima algorithm was used for tree identification. A paired t-test compared measured and estimated tree heights, followed by regression analysis applying linear regression to evaluate the relationship between these values.

Results: The study produced the Digital Elevation Model (DEM), Digital Surface Model (DSM), Orthomosaic, and Crown Height Model (CHM). The local maxima algorithm successfully identified all 98 trees and their locations. Field measurements showed minimum, maximum, and mean tree heights of 1.32 m, 5.84 m, and 3.78 m, respectively, while estimates from the local maxima algorithm were 1 m, 5.65 m, and 3.7 m. The Kolmogorov-Smirnov test confirmed normal distribution of both measured and estimated datasets. The paired t-test revealed the measured heights were significantly greater than the estimated values, indicating the local maxima algorithm tended to underestimate tree height. Regression analysis demonstrated a strong positive



linear correlation between measured and estimated heights ($R^2 = 0.96$) with a low error margin (RMSE = 0.26).

Conclusion: The study concludes that RTK-UAV combined with the local maxima algorithm can precisely identify tree spatial positions while reducing time and cost. This method offers forest managers reliable tree height estimates, supporting efficient forest management decisions.

Keywords: Algorithm, crown height model, forest, phantom, photogrammetry, Real-time Kinematic.

برآورد ارتفاع تک‌درختان با استفاده از تصاویر پهپاد RTK و الگوریتم بیشینه محلی

مرتضی پوررضا^{۱،*}، فردین مرادی^{۲،۳}، شادی جلیلیان^۴ و محمد خسروی^{۱،۲}

*۱- نویسنده مسئول، استادیار، گروه منابع طبیعی، پردیس کشاورزی و منابع طبیعی، دانشگاه رازی، کرمانشاه، ایران. پست الکترونیک: pourreza@razi.ac.ir

۲- گروه پژوهشی پایش هوایی، دانشگاه رازی، کرمانشاه، ایران

۳- پژوهشگر، بخش تحقیقات منابع طبیعی، مرکز تحقیقات و آموزش کشاورزی و منابع طبیعی استان کرمانشاه، سازمان تحقیقات، آموزش و ترویج کشاورزی، کرمانشاه، ایران

۴- دانشجوی دکتری جنگل‌داری، دانشکده علوم جنگل، دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی گرگان، گرگان، ایران

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۳/۰۹/۲۸

تاریخ اصلاح: ۱۴۰۳/۰۹/۲۰

تاریخ دریافت: ۱۴۰۳/۰۶/۲۱

چکیده

سابقه و هدف: خصوصیات ساختاری درخت از نظر زیستی و اقتصادی، اهمیت بسیاری دارد. ازجمله این ویژگی‌ها می‌توان به ارتفاع اشاره کرد که یک مؤلفه مهم برای اندازه‌گیری حجم توده جنگل محسوب می‌شود. اندازه‌گیری ارتفاع درخت، به‌عنوان یکی از پیچیده‌ترین و پرهزینه‌ترین متغیرها در پژوهش‌های بوم‌شناسی و جنگل‌داری، نیازمند دانش تخصصی و تجربه حرفه‌ای است. پهپادها به‌دلیل برخورداری از مزایایی مانند هزینه اندک، سهولت برداش، قابلیت تکرار و نیز داده‌های به‌روز، نقش بسیار مهمی در جمع‌آوری و تأمین اطلاعات موردنیاز در آماربرداری جنگل دارند. پژوهش پیش‌رو با هدف بررسی توانایی پهپاد فانتوم ۴ در اندازه‌گیری ارتفاع درختان سرو نقره‌ای (*Hesperocyparis arizonica* (Greene) Bartel) بدون نقاط کنترل زمینی و با استفاده از الگوریتم بیشینه محلی (Local Maxima Algorithm) انجام شد.

مواد و روش‌ها: این پژوهش در جنگل‌کاری‌های سرو نقره‌ای در شهرستان کرمانشاه انجام شد. از یک پهپاد فانتوم ۴ مجهز به سیستم RTK استفاده شد که دوربینی با سنسور یک اینچ ۲۰ مگاپیکسلی CMOS و توان تفکیک مکانی در حد سانتی‌متر (در ارتفاع پرواز ۱۰۰ متری معادل ۲/۷ سانتی‌متر است) دارد. یکی از ویژگی‌های منحصر به فرد این پهپاد، تعبیه ماژول RTK بر روی آن است که سبب دریافت موقعیت افقی و عمودی داده‌ها به‌صورت آنی می‌شود. همچنین، این پهپاد به یک گیمبال سه‌محوره مجهز است که لرزش‌های آن هنگام پرواز را به حداقل می‌رساند. ازسوی دیگر، شاتر مکانیکی موجود در آن، نقش مؤثری در کاهش خطای ناشی از لرزش در زمان تصویربرداری دارد. علاوه بر ماژول RTK، استفاده از سیستم موقعیت‌یاب GNSS سبب حفظ دقت داده‌های حاصل از این پرنده حتی در محیط‌های بسته مانند مناطق شهری تا حدود زیادی می‌شود. در این پژوهش، از الگوریتم بیشینه محلی برای شناسایی تک‌درختان در یک عرصه با استفاده از مدل ارتفاعی تاج (CHM) استفاده شد. برای جمع‌آوری داده‌های زمینی، ۹۸ اصله درخت پس از بازدید از منطقه مورد مطالعه انتخاب شدند. ارتفاع درخت با استفاده از دستگاه لیزر لایکا S910 اندازه‌گیری شد. از آزمون t جفتی برای کنترل امکان اندازه‌گیری ارتفاع درختان با مدل ارتفاع تاج استفاده شد. برای این منظور، ارتفاع درختان روی زمین و ارتفاع درختان در مدل ارتفاع تاج با اطمینان ۹۵ درصد مقایسه شد. سپس، با استفاده از یک مدل رگرسیون خطی، ارتباط بین ارتفاع اندازه‌گیری‌شده درختان و ارتفاع برآوردشده (با استفاده از الگوریتم بیشینه محلی) بررسی شد.

نتایج: مدل رقومی ارتفاع، مدل رقومی سطح، اورتوموزاییک و مدل ارتفاعی تاج به‌دست آمد. باتوجه به فاصله به‌نسبت زیاد بین درختان، می‌توان تک‌درختان را به‌طور کامل شناسایی کرد. نتایج نشان داد که با استفاده از الگوریتم بیشینه محلی می‌توان همه درختان مورد مطالعه (۹۸ درخت) را به‌طور کامل شناسایی و مکان آن‌ها را تعیین کرد. کمینه، بیشینه و میانگین ارتفاع درختان در منطقه مورد مطالعه به‌ترتیب ۱/۳۲، ۵/۸۴ و ۳/۷۸ متر بودند، درحالی‌که کمینه، بیشینه و میانگین ارتفاع اندازه‌گیری‌شده توسط پهپاد به‌ترتیب برابر با یک، ۵/۶۵ و ۳/۷ متر به‌دست آمد. براساس نتایج آزمون کولموگروف-سمیرنوف، هر دو مجموعه داده اندازه‌گیری‌شده و برآوردشده، توزیع

نرمال داشتند. همچنین، نتایج آزمون t جفتی نشان داد که ارتفاع به دست آمده از روش اندازه گیری زمینی به طور معنی داری بیشتر از ارتفاع استخراج شده از مدل ارتفاعی تاج است. براساس تحلیل رگرسیون، مشخص شد که بین ارتفاع اندازه گیری شده و ارتفاع برآورد شده درختان با استفاده از الگوریتم بیشینه محلی، همبستگی خطی قوی و مثبت وجود دارد ($R^2 = 0.96$). به علاوه، خطای محاسبه شده ($RMSE = 0.26$) بسیار کم به دست آمد.

نتیجه گیری کلی: براساس نتایج این پژوهش می توان گفت که تصاویر پهپادی مورد استفاده و تجزیه و تحلیل آن ها با الگوریتم بیشینه محلی می تواند با صرف زمان و هزینه کمتری، موقعیت دقیق مکانی درختان را شناسایی کند. همچنین، این روش برآورد قابل قبولی از ارتفاع درختان در اختیار مدیران جنگل قرار می دهد.

واژه های کلیدی: الگوریتم، جنگل، فانتوم، فتوگرامتری، مدل ارتفاعی تاج، موقعیت یابی آبی.

مقدمه

یکی از مهم ترین ویژگی های ساختاری درختان از نظر زیستی و اقتصادی، ارتفاع درختان است که اندازه گیری آن برای محاسبه زیست توده روی زمینی و موجودی حجمی جنگل ضروری است و به عنوان پارامتری مهم در تعیین حاصلخیزی رویشگاه به شمار می رود (Shao et al., 1995; Poorazimy et al., 2023; Fallah et al., 2024). دقیق ترین روش برای اندازه گیری مشخصه های جنگل، آماربرداری زمینی است، اما این روش به علت نیاز به نیروی انسانی زیاد، زمان بر بودن و محدودیت های نمونه برداری، با چالش هایی همراه است. به علاوه، آماربرداری زمینی در مناطق دشوارگذر بسیار پرهزینه و در مواردی حتی غیرممکن است (Penboon et al., 2023). در مقابل، فناوری سنجنش ازدور به عنوان یک ابزار کارآمد و قابل اعتماد برای آماربرداری جنگل شناخته می شود که می تواند بسیاری از محدودیت های آماربرداری های سنتی را برطرف کند (Jahdi & Sefidi, 2024). این فناوری با در اختیار داشتن سکو و سنجنده های مختلف، امکان پایش و کسب اطلاعات از جنگل ها را در مقیاس بزرگ و با دقت زیاد فراهم می کند. این موارد سبب کاهش در مراجعه به عرصه جنگلی و نمونه برداری های میدانی و در نتیجه، کاهش چشمگیر هزینه ها و زمان آماربرداری جنگل شده است (Fassnacht et al., 2023).

از جمله به روزترین روش های سنجنش ازدور، استفاده از پهپاد تصویرسنجی (Photogrammetry) است (Xu et al.,

2018). ظهور این پهپادها، یک پیشرفت چشمگیر در عرصه سنجنش ازدور بود که برتری های ویژه ای را نسبت به سنجنش ازدور ماهواره ای ارائه کرد. پهپادها، قابلیت جمع آوری داده هایی با تفکیک مکانی بسیار زیاد و انعطاف پذیری در زمان بندی و مکان اجرای عملیات پروازی را فراهم می کنند. این ویژگی در مقایسه با سنجنش ازدور ماهواره ای که با محدودیت هایی مانند پوشش ابری و بازه های زمانی طولانی مواجه است، بسیار کارآمد و مطلوب محسوب می شود (Lamping et al., 2021). همچنین، پهپادها می توانند در ارتفاع پایین پرواز کنند و با بهره گیری از الگوریتم های جدید مانند ساختار از حرکت (Struction from Motion; SfM) و مدل سازی سه بعدی به طور قابل توجهی در تحلیل ساختار و ارتفاع درختان، کارایی زیادی از خود نشان می دهند (Puliti et al., 2020; Xiong et al., 2023). صحت داده های پهپاد، بستگی به مواردی همچون تعداد و پراکنش مناسب نقاط کنترل زمینی (Ferrer-González et al., 2020)، ابعاد پیکسل های دوربین (Vacca et al., 2018)، هم پوشانی طولی و عرضی تصاویر (Gerke & Przybilla, 2016)، مسیر و طرح پرواز (Gerke & Przybilla, 2016)، روش واسنجی دوربین (Pérez et al., 2012)، نرم افزارهای مورد استفاده (Jaud et al., 2016) و کیفیت پردازش سیگنال های سیستم تعیین موقعیت ماهواره ها (Padró et al., 2019) دارد. نقاط کنترل زمینی، نقش بسیار مهمی در صحت داده های برداشت شده توسط پهپادهای تصویرسنجی دارند. به طوری که کیفیت مدل

در زمینه برآورد ارتفاع درختان با تصویرسنجی پهپادمحور تاکنون پژوهش‌های متعددی در داخل و خارج از کشور صورت گرفته‌اند که در تعداد زیادی از آن‌ها، الگوریتم بیشینه محلی به منظور برآورد ارتفاع درختان استفاده شده است (Ok & Ozdarici-Ok, 2018; Kargar & Sohrabi, 2019; Krause *et al.*, 2019; Azizi & Miraki, 2022; Fu *et al.*, 2024). پیاده‌سازی نقاط کنترل زمینی، یکی از مراحل مشترک در همه فرایندهای تصویربرداری است که مستلزم صرف زمان و هزینه زیاد است. اگرچه در پژوهش‌های ذکرشده از الگوریتم تشخیص خودکار بیشینه محلی برای تعیین مکان درختان استفاده شده است، اما در هیچ‌یک از آن‌ها، توانایی این الگوریتم همراه با پهپاد مجهز به سیستم موقعیت‌یابی آنی و حذف نقاط کنترل زمینی بررسی نشده است. در پژوهش پیش‌رو، قابلیت پهپاد فانتوم ۴ مجهز به سیستم موقعیت‌یابی آنی در برآورد ارتفاع درختان سرو نقره‌ای (*Hesperocyparis arizonica* (Greene) Bartel)) بدون نقاط کنترل زمینی و با بهره‌گیری از الگوریتم بیشینه محلی به جای برداشت زمینی مختصات درختان بررسی می‌شود. پژوهش پیش‌رو به این سؤال پاسخ خواهد داد که آیا استفاده از پهپاد RTK و الگوریتم بیشینه محلی بدون پیاده‌سازی نقاط کنترل زمینی می‌تواند روش مناسبی برای تشخیص خودکار درختان و برآورد ارتفاع آن‌ها باشد؟ این پژوهش در راستای کاهش عملیات میدانی برای برآورد ویژگی‌های درختان در جنگل با پهپاد RTK انجام شده است که در صورت تأیید دقت و صحت آن می‌تواند گامی مؤثر در کاهش زمان و هزینه برای پایش بوم‌سازگان‌های جنگلی محسوب شود.

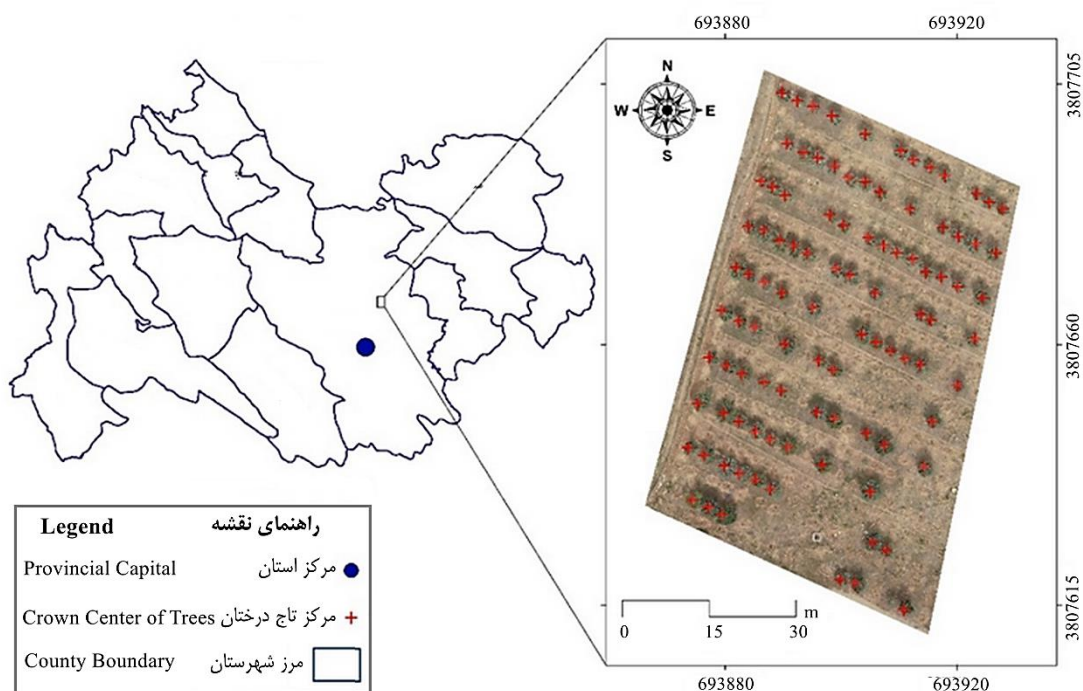
مواد و روش‌ها

منطقه مورد مطالعه

این پژوهش در جنگل‌کاری‌های سرو نقره‌ای واقع در بخشی از شهرستان کرمانشاه انجام شد (شکل ۱). مساحت منطقه انتخاب‌شده، چهار هکتار و شیب آن، کمتر از ده درصد است. سن بیشتر درختان انتخاب‌شده در حدود ۱۵ تا ۲۰ سال بودند.

رقومی ارتفاع، مدل رقومی سطح، اورتوموزاییک و خروجی‌های دیگر، تابعی از تعداد و نحوه پراکنش این نقاط هستند (Eltner *et al.*, 2016).

یکی از چالش‌های اصلی در استفاده از پهپاد در جنگل، پیاده‌سازی نقاط کنترل زمینی است که به دلایلی مانند تراکم تاج پوشش و دشوارگذر بودن برخی مناطق با محدودیت‌هایی مواجه می‌شود (Chudley *et al.*, 2019). در مقابل، سیستم موقعیت‌یابی آنی (Real-time Kinematic; RTK) یک سیستم نوین است که می‌تواند با تعداد نقاط کنترل زمینی کمتر و یا حتی در مواردی بدون استفاده از نقاط کنترل زمینی، موقعیت مکانی را با صحت زیادی (دو تا سه سانتی‌متر) تعیین کند (Ekaso *et al.*, 2020; Pourreza *et al.*, 2022). یکی دیگر از مراحل زمان‌بر و پرهزینه در اندازه‌گیری مشخصه‌های کمی جنگل مانند ارتفاع، ثبت مختصات مکانی درختان است که به‌طور معمول با استفاده از GPS‌های دستی انجام می‌شود. استفاده از این GPS‌ها برای تعیین مختصات مرکز تاج درختان همواره با مشکلاتی همراه است. زیرا تحت تأثیر پوشش متراکم تاج درختان، خطای این فرایند به‌طور قابل توجهی افزایش می‌یابد. برای حل این مشکل، الگوریتم‌های تشخیص خودکار درختان مانند الگوریتم بیشینه محلی (Local Maxima Algorithm) توسعه یافته‌اند که کارایی آن‌ها در پژوهش‌های پیشین بررسی شده است (Gebreslasie *et al.*, 2011; Brodic *et al.*, 2022; Yu *et al.*, 2022). اساس کار الگوریتم بیشینه محلی در تشخیص بیشترین ارزش یا همان نوک درخت، استفاده از یک پنجره متحرک با ابعاد از پیش تعیین‌شده است (Pouliot *et al.*, 2002). ابعاد این پنجره، بسیار حائز اهمیت است. زیرا پنجره با اندازه کوچک باعث می‌شود که تاج یک درخت به چند قسمت تقسیم شود. در نتیجه، یک مقدار بیشینه برای هر قسمت محاسبه می‌شود. در مقابل، پنجره با ابعاد بزرگ در برخی موارد باعث می‌شود که درخت منفرد تشخیص داده نشود (Pouliot *et al.*, 2002). بنابراین یکی از مهم‌ترین عوامل تأثیرگذار بر کارایی الگوریتم بیشینه محلی، تعیین ابعاد مناسب پنجره با توجه به ابعاد و تراکم جنگل موردنظر است (Mohan *et al.*, 2019).



شکل ۱- موقعیت جغرافیایی محدوده مورد مطالعه (سمت چپ) و اورتوموزاییک منطقه با اندازه تفکیک مکانی ۲/۷ سانتی متر (سمت راست)
Figure 1. Location of the study area (left) in Kermanshah province of Iran, and the orthomosaic with a resolution of 2.7 cm (right)

OcuSync این پهپاد قادر است که تصاویر را با کیفیت HD تا بیشینه فاصله هفت کیلومتر برای کاربر ارسال کند. ریموت کنترل این محصول از نوع ۲/۴ و ۵/۸ گیگاهرتز و چهارکاناله است که بیشینه برد پروازی آن، هفت کیلومتر است. منحصربه‌فردترین ویژگی این پهپاد، تعبیه ماژول RTK بر روی آن است که سبب دریافت موقعیت افقی و عمودی داده‌ها به صورت آنی می‌شود. علاوه بر ماژول RTK، استفاده از سیستم موقعیت‌یاب GNSS باعث شده است که دقت داده‌های حاصل از این پهپاد حتی در محیط‌های بسته مانند مناطق شهری تا حدود زیادی حفظ شود (Ekaso et al., 2020).

داده‌های میدانی

به منظور برداشت داده‌های میدانی، ۹۸ اصله درخت سرو نقره‌ای موجود در منطقه تصویربرداری شده انتخاب شد. اندازه‌گیری ارتفاع درختان با کمک دستگاه متر لیزری لایکا

روش پژوهش

داده‌های پهپاد

به منظور تصویربرداری منطقه مورد مطالعه از یک پهپاد فانتوم ۴ مجهز به سیستم موقعیت‌یاب آنی استفاده شد. ابعاد این پهپاد معادل ۳۵ × ۳۵ سانتی متر مربع و وزن آن ۱۳۹۱ گرم است که می‌تواند ۳۰ دقیقه پرواز کند. این پهپاد دارای دوربین با سنسور یک اینچی ۲۰ مگاپیکسلی CMOS است. پهپاد فانتوم ۴ RTK توان تفکیک مکانی بسیار زیادی دارد. به طوری که فاصله نمونه‌برداری زمینی (Ground Sample Distance; GSD) در ارتفاع ۱۰۰ متری برابر با ۲/۷۴ سانتی متر است. همچنین، این پهپاد دارای یک گیمال سه‌محوره است که لرزش‌های آن، هنگام پرواز را کمینه می‌کند. 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

مدل S910 (شرکت Leica) انجام شد. این دستگاه، قابلیت اندازه‌گیری با صحت بسیار زیاد (± 1 میلی‌متر) دارد.

طراحی و عملیات پرواز

یکی دیگر از ویژگی‌های خاص پهپاد فانتوم ۴، استفاده از نرم‌افزار GS RTK است که در مقایسه با نرم‌افزارهای معمول دارای امکانات بیشتری مانند پرواز منطبق بر ارتفاع از سطح زمین، ازسری پرواز از آخرین نقطه، اتصال مستقیم به

Handheld RTK برای ثبت نقاط و مساحی بدون استفاده از پهپاد است. در پژوهش پیش‌رو، از طرح پروازی 2D photogrammetry به منظور طراحی پرواز استفاده شد (Pourreza et al., 2022). شبکه موقعیت‌یابی یکپارچه مالکیت‌ها (شمیم) به عنوان ایستگاه مرجع انتخاب شد. سپس، عملیات پرواز در تاریخ دوم مردادماه ۱۴۰۱ و در شرایط آفتابی و بدون باد انجام شد. برخی از مهم‌ترین مؤلفه‌های پرواز در جدول ۱ بیان شده است.

جدول ۱- مؤلفه‌های تصویربرداری هنگام عملیات پرواز

Table 1. Imaging parameters during flight operations

Parameters	Flight altitude (m)	Frontal Overlap%	Side overlap%	ISO	UAV speed (m/s)	Camera angle (degree)	Flight plan	GSD (cm)
Value	100	80	75	100	9	90	2D photogrammetry	2.74

تجزیه و تحلیل داده‌ها

به منظور بررسی نرمال بودن پراکنش داده‌های برآوردی و اندازه‌گیری شده مربوط به ارتفاع سرو تفره‌ای از آزمون کولموگروف-سمیرنوف استفاده شد. همچنین، مقایسه میانگین داده‌های زمینی و داده‌های اندازه‌گیری شده بر روی CHM با استفاده از آزمون t جفتی انجام گرفت. از ضریب پیرسون به منظور بررسی میزان ارتباط بین دو مجموعه داده استفاده شد. مدل‌های رگرسیونی براساس ۷۵ درصد داده‌ها برازش یافت و ۲۵ درصد داده‌ها برای اعتبارسنجی مدل استفاده شد. همچنین، به منظور بررسی صحت برآورد ارتفاع درختان از مجذر میانگین مربعات خطا (Root Mean Square Error; RMSE)، درصد مجذر میانگین مربعات خطا، اریبی (Bias) و درصد اریبی استفاده شد. اریبی، میزان سوگیری برآوردها را نسبت به اندازه واقعی نشان می‌دهد. مقدار منفی و مثبت آن به ترتیب نشان‌دهنده برآورد کمتر و بیشتر از اندازه واقعی هستند. میانگین مجذور خطای مربعات (RMSE) نیز هر چقدر به صفر نزدیک‌تر باشد، نشان‌دهنده خطای کمتر است. پس از عملیات تصویربرداری و انتقال تصاویر اخذ شده

روش برآورد ارتفاع

به طور کلی برای برآورد ویژگی‌های ساختاری جنگل، بسته به هدف، روش‌های متعددی ارائه شده است. در این زمینه می‌توان به روش‌های تک‌درختی و ترکیبی اشاره کرد. هریک از این راهکارها، کاربردهای ویژه‌ای دارند که با توجه به ساختار، تیپ جنگل مورد نظر و هدف آماربرداری، انتخاب می‌شوند. با توجه به اینکه در روش تک‌درختی باید ویژگی‌های ساختاری و نیز موقعیت هر درخت از درختان دیگر، تفکیک شود، به ابر نقاط تراکم و دقیق‌تری نیاز است. به عبارت دیگر، تراکم آن برای تشخیص و پوشش بهتر تاج تک درختان باید زیاد باشد (Kargar & Sohrabi, 2019). در این زمینه، الگوریتم پیشینه محلی، یکی از روش‌های تشخیص و تفکیک خودکار تک درختان عرصه با بهره‌گیری از مدل ارتفاعی تاج (Crown Height Model; CHM) است. گفتنی است که شناسایی تک پایه‌ها در مناطق با پوشش درختان سوزنی‌برگ، به دلیل داشتن نوک واحد در درختان، در مقایسه با پایه‌های پهن‌برگ با دقت و کارایی بیشتری انجام می‌شود (Panagiotidis et al., 2017).

توسط پهپاد به محیط نرم افزار Agisoft Metashape Professional پردازش های لازم از جمله توجیه نسبی تصاویر، تولید ابر نقاط متراکم، تولید مدل رقومی سطح (Digital Surface Model; DSM)، مدل رقومی زمین

توسط پهپاد به محیط نرم افزار Agisoft Metashape Professional پردازش های لازم از جمله توجیه نسبی تصاویر، تولید ابر نقاط متراکم، تولید مدل رقومی سطح (Digital Surface Model; DSM)، مدل رقومی زمین

جدول ۲- مؤلفه های مورد بررسی در پردازش تصاویر اخذ شده توسط پهپاد

Table 2. Parameters examined in the processing of the UAV images

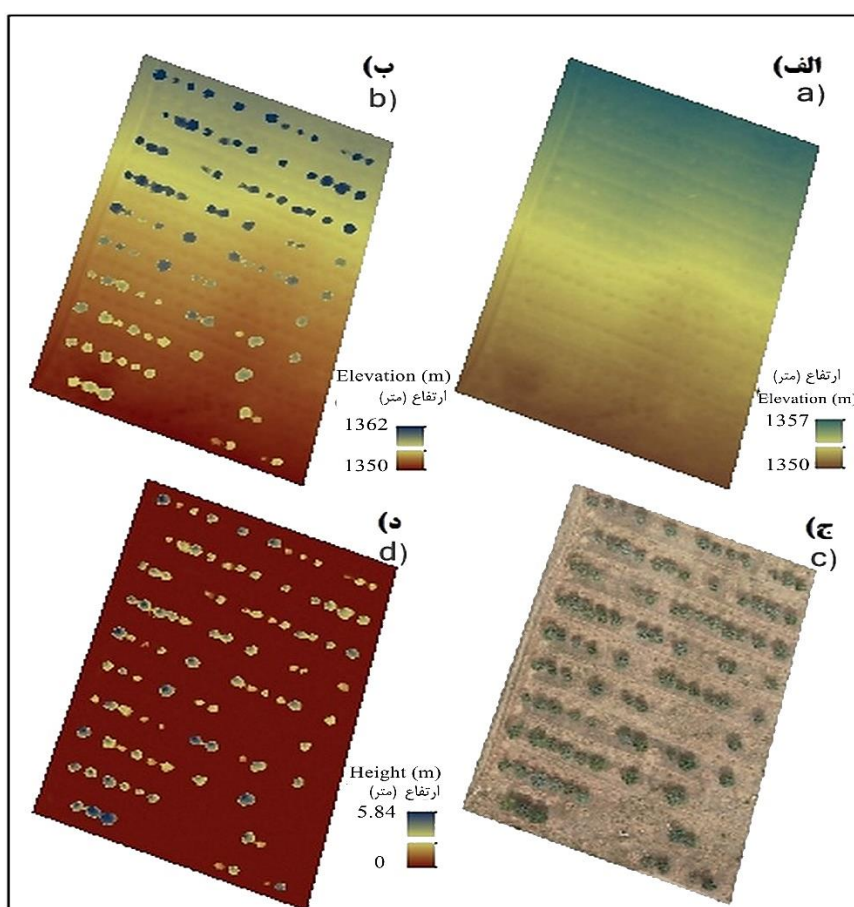
Step	Parameters	Value
Relative orientation	Accuracy	Medium
	Key point limit	40000
	Tie point limit	4000
Dense point clouds generation	Quality	Medium
	Depth filtering	Moderate
	Calculate point colors	Yes
DEM generation	Projection	WGS84/UTM zone 38N
	Source data	Dense cloud
	Interpolation	Enabled
	Point classes	Ground
DSM generation	Projection	WGS84/UTM zone 38N
	Source data	Dense cloud
	Interpolation	Enabled
	Point classes	All
Orthomosaic map generation	Projection	WGS84/UTM zone 38N
	Surface	DEM
	Blending mode	Mosaic

ابعاد پنجره به گونه ای انتخاب شد که هر پنجره، نماینده یک درخت باشد (111×111 پیکسل). در قسمت Statistics Type نیز مؤلفه Maximum قرار داده شد تا بیشترین مقدار پنجره تعیین شده که همان ارتفاع درخت است، به دست آید.

نتایج

ساخت اورتوموزاییک و مدل های رقومی ارتفاع، سطح و تاج شکل ۲، اورتوموزاییک تولید شده و مدل های رقومی ارتفاع، سطح و تاج را نشان می دهد. همان طور که مشخص است فاصله بین درختان توده به نسبت زیاد و تک درختان به صورت کاملاً مجزا، قابل تشخیص هستند. نتایج نشان داد که با به کارگیری الگوریتم بیشینه محلی می توان به طور کامل همه درختان بررسی شده (۹۸ اصله) را تشخیص داد و موقعیت مکانی آن ها را تعیین کرد.

برای برآورد ارتفاع درختان با استفاده از تصاویر پهپاد از روش هایی مانند مدل ارتفاعی تاج استفاده می شود. مدل مذکور با کسر مدل رقومی ارتفاع از مدل رقومی سطح به دست می آید. این مدل متشکل از پیکسل هایی است که هر پیکسل نشان دهنده ارتفاع عارضه مربوطه است (Mohan et al., 2019). بدین منظور، پس از انتقال DTM و DSM به محیط نرم افزار ArcGIS 10.8 و به کمک ابزار Map Algebra مدل ارتفاعی تاج محاسبه شد. در مرحله بعد با استفاده از الگوریتم بیشینه محلی، مرکز هر درخت محاسبه شد که برای این منظور از تابع Focal Statistics استفاده شد. در این راستا، تنظیمات Neighborhood روی Rectangle قرار گرفت و مقادیر مختلفی برای Height و Width از طریق آزمون و خطا آزمایش شد تا بهترین اندازه برای دستیابی به نتیجه مطلوب حاصل شود. با توجه به یکنواخت بودن فاصله کشت درختان،



شکل ۲- الف) مدل رقومی ارتفاع، ب) مدل رقومی سطح، ج) اورتوموزاییک و د) مدل ارتفاعی تاج
Figure 2. a) Digital elevation model, b) digital surface model, c) orthomosaic and d) crown height model

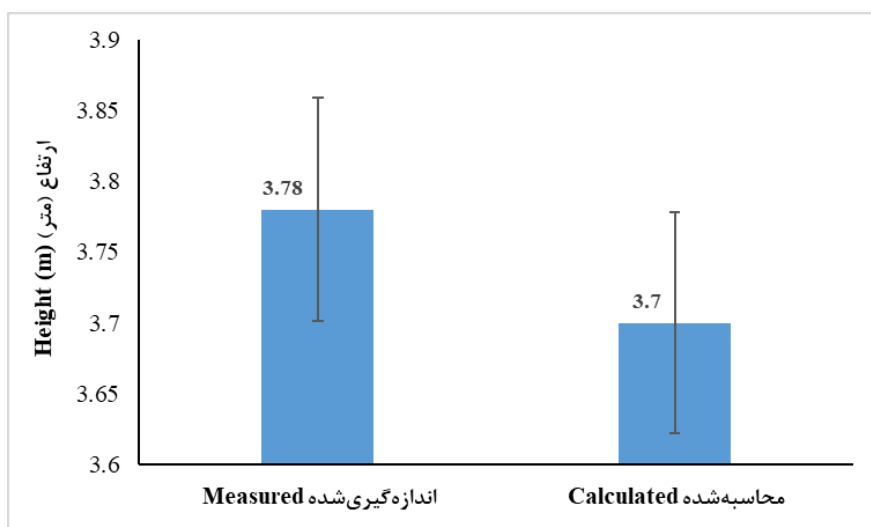
پهپاد، کمتر از میانگین ارتفاع اندازه‌گیری شده درختان به‌روش زمینی است (شکل ۳).

ارتباط ارتفاع اندازه‌گیری شده و محاسبه شده نتایج مربوط به بررسی ارتباط بین داده‌های ارتفاع اندازه‌گیری شده درختان به دو روش زمینی و پهپاد نشان‌دهنده وجود یک رابطه کاملاً خطی و مستقیم با ضریب تبیین بسیار زیاد (۰/۹۶) است (شکل ۴). نتایج برآورد ارتفاع با استفاده از تحلیل رگرسیون (شکل ۴ و جدول ۳) نشان‌دهنده معنی‌داری مدل برازش داده شده است ($p < 0/01$). همچنین، ضریب‌های به‌دست آمده برای مدل‌های رگرسیونی محاسبه شده نیز معنی‌دار است. همان‌طور که نتایج آزمون t جفتی نشان داد، ارتفاع محاسبه شده درختان

مقایسه میانگین داده‌های زمینی و ارتفاع به‌دست آمده از مدل ارتفاعی تاج

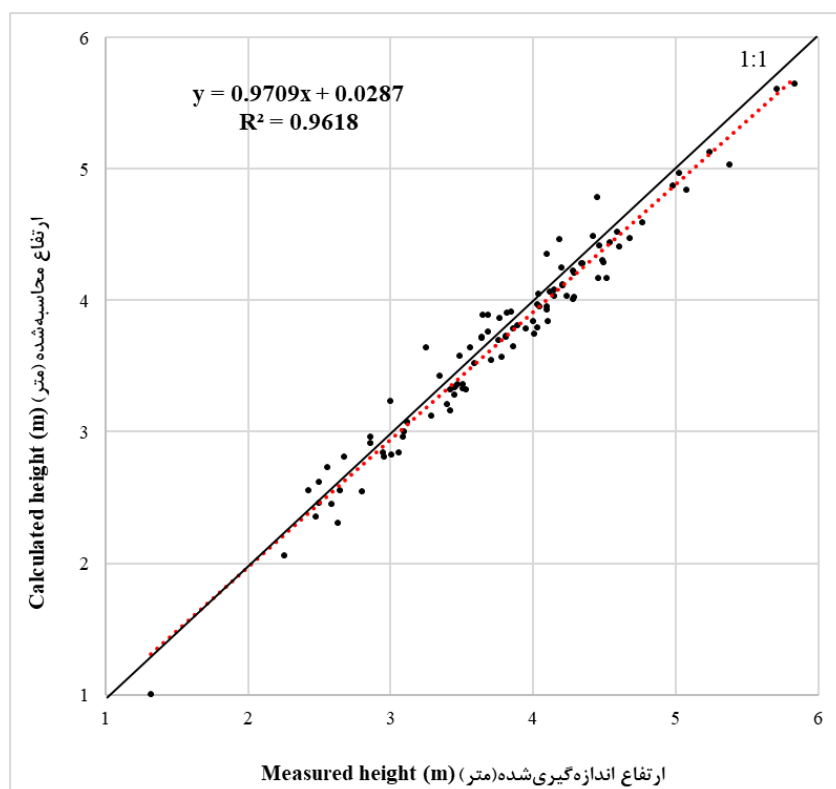
نتایج حاصل از اندازه‌گیری زمینی نشان داد که کمینه، بیشینه و میانگین ارتفاع برای درختان منطقه مورد مطالعه به ترتیب برابر با ۱/۳۲، ۵/۸۴ و ۳/۷۸ متر است. در مقابل، مقادیر متناظر برای ارتفاع‌های تخمین زده شده توسط پهپاد به ترتیب برابر با یک، ۵/۶۵ و ۳/۷ متر به‌دست آمد. نتایج آزمون کولموگروف-سمیرنوف نشان داد که هر دو مجموعه داده‌های ارتفاع اندازه‌گیری شده و محاسبه شده، پراکنش نرمال دارند ($p < 0/05$). براساس نتایج آزمون t جفتی، میانگین ارتفاع درختان بین دو روش اندازه‌گیری زمینی و برآورد حاصل از تصاویر پهپاد، اختلاف معنی‌داری دارند ($p < 0/05$). به‌طوری‌که میانگین ارتفاع محاسبه شده با

توسط مدل ارتفاعی تاج و الگوریتم پیشینه محلی، کمتر از ارتفاع اندازه‌گیری‌شده به‌روش زمینی است (شکل ۴).



شکل ۳- میانگین ارتفاع اندازه‌گیری‌شده به‌روش زمینی و محاسبه‌شده از مدل ارتفاعی تاج (پهپاد)

Figure 3. Mean height measured using ground-based methods and estimated from the Canopy Height Model (CHM) derived from drone data



شکل ۴- ارتباط میان ارتفاع اندازه‌گیری‌شده و محاسبه‌شده

y: مقدار محاسبه‌شده و x: مقدار اندازه‌گیری‌شده

Figure 4. Relationship between measured and calculated heights
y: calculated value and x: measured value

جدول ۳- مدل رگرسیونی و ضریب‌های برآورد شده در بررسی ارتباط بین ارتفاع اندازه‌گیری شده و ارتفاع محاسبه شده درختان

Table 3. Regression model and estimated coefficients of the relationship between the measured height and the calculated height of the trees

Variable	SE	t	p-Value
Intercept	0.088	1.055	0.295
Trees Height	0.997	45.673	0.000
Regression model $y=0.97x + 0.028$			$R^2=0.96$

y: calculated value and x: measured value

y: مقدار محاسبه شده و x: مقدار اندازه‌گیری شده

نتایج اعتبارسنجی مدل به دست آمده در جدول ۴ نمایش داده شده است. مقدار اریبی ارتفاع برآورد شده به وسیله مدل بسیار کم بود. اریبی با مقدار منفی، برآورد کمتر از مقدار واقعی

جدول ۴- شاخص‌های ارزیابی عملکرد مدل رگرسیونی

Table 4. Evaluation indicators for regression model performance

Variable	RMSE (m)	RMSE (%)	Bias (m)	Bias (%)
Height	0.17	4.58	-0.02	-0.42

بحث

مکانی بسیار زیاد، قادر به تشخیص آنان نیستند و ارتفاع تاج را در ارتفاع پایین‌تری ثبت می‌کنند (Krause et al., 2019; Pourreza, Wang et al., 2019). استفاده از تصاویر پهپاد در برآورد ارتفاع درختان را بسیار سودمند و با جذر میانگین مربعات خطا نسبی کمتر از ۱۱ درصد گزارش کردند. همچنین، Zarco-Tejada و همکاران (۲۰۱۴) توانستند با میانگین جذر مربعات خطا نسبی بین ۱۰ تا ۱۳ درصد، ارتفاع درختان را مدل‌سازی کنند. از آنجا که منطقه مورد مطالعه آن‌ها (جنوب اسپانیا، کردوبا) به دلیل آشکار بودن کامل سطح زمین با منطقه مورد نظر پژوهش پیش‌رو مشابه بود، مدل سه‌بعدی سطح زمین نیز دقیق‌تر برآورد شده است. در استفاده از مدل ارتفاعی تاج استخراج شده از تصاویر پهپادی در جنگل سیسنگان در استان مازندران، جذر میانگین مربعات خطا بین سه تا ۲۵ درصد ارتفاع درختان گزارش شد (Kargar & Sohrabi, 2019). نتایج پژوهش Azizi و Miraki (۲۰۲۲) نشان داد که کارایی استفاده از الگوریتم بیشینه محلی، وابسته به ساختار و نوع جنگل است. به‌طوری‌که مدل ارتفاع تاج توانست درختان را با صحت بسیار زیادی (۰/۹) در جنگل‌های پهن‌برگ شهری

نخستین و مهم‌ترین گام برای مدیریت پایدار جنگل، کسب اطلاعات دقیق و قابل اعتماد از بوم‌سازگان است. در صورت کاهش زمان و هزینه دسترسی به این اطلاعات، امکان پایش مداوم جنگل‌ها در جهت مدیریت پایدار آن‌ها فراهم خواهد شد (Pourreza et al., 2022). در همین راستا در پژوهش پیش‌رو، قابلیت استفاده از تصاویر پهپادی کم‌هزینه، بدون پیاده‌سازی نقاط کنترل زمینی و بدون ثبت مختصات مرکز درختان با استفاده از دستگاه GPS در تشخیص موقعیت مکانی تک‌درختان و اندازه‌گیری ارتفاع آن‌ها ارزیابی شد. همان‌طور که نتایج آزمون t جفتی نشان داد، ارتفاع اندازه‌گیری شده درختان به کمک مدل ارتفاعی تاج و الگوریتم بیشینه محلی، کمتر از ارتفاع اندازه‌گیری شده به روش زمینی است. هم‌راستا با این یافته‌ها، برآورد کم ارتفاع درختان با استفاده از این تصاویر و مدل ارتفاع تاج (CHM) در پژوهش‌های پیشین نیز گزارش شده است (Krause et al., 2019; Wang et al., 2019; Pourreza et al., 2022). دلیل این موضوع می‌تواند به سطح کم و نازک شاخه انتهایی تاج درختان برگردد. در نتیجه، تصاویر پهپاد با وجود توان تفکیک

با ساختارهای همگن تشخیص دهد، درحالی که در توده‌های ناهمسال، دقت تشخیص درختان کم می‌شود. نتایج دیگر پژوهش مذکور نشان داد که دقت تشخیص درختان متأثر از ارتفاع آن‌ها است. به‌طوری که درختان با ارتفاع کمتر از پنج متر شناسایی نشدند. از دلایل ضعیف بودن نتایج پژوهش‌های ذکر شده نسبت به پژوهش پیش‌رو می‌توان به تفاوت در ویژگی منطقه مورد مطالعه و ساختار توده‌های جنگلی اشاره کرد. زیرا به‌کارگیری پهپاد در برآورد ارتفاع درختان در مناطق با پوشش تُنک و تک‌درختان دارای نوک واحد، نتایج بهتری خواهد داشت، بنابراین در گام نخست، تشخیص، تفکیک و تمایز بهتر درختان موجود در عرصه هنگام اندازه‌گیری زمینی و در گام بعدی، شناسایی دقیق همان درختان با استفاده از مدل ارتفاعی تاج و الگوریتم پیشینه محلی از مهم‌ترین مواردی است که سبب کاهش مقدار اریبی مدل می‌شود (Azizi & Miraki, 2022). در منطقه مورد مطالعه پژوهش پیش‌رو، با توجه به فاصله درختان در عرصه، آن‌ها به‌طور کامل قابل تشخیص و تفکیک بودند. به همین دلیل با مشخص بودن نوک و بن درختان، ارتفاع درختان به‌طور صحیح اندازه‌گیری شد. ازسوی دیگر، اندازه‌گیری تغییرات ارتفاعی بین نوک تاج درختان با زمین اطراف بر روی CHM با دقت فراهم شد که می‌تواند از دلایل اصلی اریبی کم در پژوهش پیش‌رو باشد.

اگرچه در این پژوهش از نقاط کنترل زمینی استفاده نشد، اما در مرحله شناسایی درختان با به‌کارگیری الگوریتم پیشینه محلی و سیستم موقعیت‌یاب آبی، همه درختان (صد درصد) شناسایی شدند. همچنین، پیشینه ارتفاع درختان با به‌کارگیری الگوریتم پیشینه محلی و در شرایط حذف مرحله پیاده‌سازی نقاط کنترل زمینی، ۵/۶۵ متر به‌دست آمد که بسیار نزدیک به مقدار ارتفاع اندازه‌گیری شده زمینی درختان (۵/۸۴ متر) بود. نتایج به‌دست آمده نشان‌دهنده یک رابطه کاملاً خطی و مستقیم با ضریب تبیین ۰/۹۶ بین ارتفاع اندازه‌گیری شده زمینی و

ارتفاع مستخرج از مدل ارتفاعی تاج بود. این مدل رگرسیونی برازش شده، RMSE و اریبی به ترتیب برابر با ۴/۵۸ درصد و ۰/۰۲- متر را ارائه داد. از آنجاکه تأکید این پژوهش بر برآورد ارتفاع درختان با حذف نقاط کنترل زمینی بود، نتایج نشان داد که استفاده از پهپادهای مجهز به سیستم موقعیت‌یابی آبی می‌تواند عملکرد مناسبی در راستای حذف گام پیاده‌سازی نقاط کنترل زمینی داشته باشد. استفاده از الگوریتم پیشینه محلی نیز نتایج قابل قبولی در جنگل‌های همسال با درختان قابل تفکیک و با فاصله مناسب از هم ارائه داد. البته نتایج به‌دست آمده از این پژوهش نشان داد که ارتفاع اندازه‌گیری شده درختان بر روی مدل ارتفاعی تاج با استفاده از الگوریتم پیشینه محلی همواره به‌طور معنی‌داری کمتر از ارتفاع اندازه‌گیری شده درختان بود. کم‌برآورد شدن ارتفاع درختان با استفاده از مدل ارتفاعی تاج و الگوریتم پیشینه محلی می‌تواند به دلیل عدم تشخیص نوک تیز شاخه انتهایی تاج درختان در مدل ارتفاعی تاج باشد.

به‌طور کلی، در پژوهش‌های پیشین، استفاده از نقاط کنترل زمینی، یکی از گام‌های ضروری برای برآورد ویژگی‌های درختان (مانند ارتفاع) با تصاویر پهپادی بوده است. یکی از اهداف مهم این پژوهش، حذف گام پیاده‌سازی نقاط کنترل زمینی در عرصه بود که حتی با حذف این گام، نتایج به‌دست آمده از الگوریتم پیشینه محلی توانست با دقت قابل قبولی، ارتفاع درختان را اندازه‌گیری کند، بنابراین نتایج این پژوهش با حذف استفاده از نقاط کنترل زمینی و تأکید بر استفاده از الگوریتم پیشینه محلی، رویکرد جدیدی را برای برآورد ارتفاع درختان با هزینه و زمان کمتری ارائه می‌دهد. شایان ذکر است که این پژوهش در نوع خود در مراحل اولیه است و لازم است که در آینده، کارایی این روش‌ها برای مناطق با توپوگرافی متنوع‌تر و جنگل‌های با ساختارهای متفاوت نیز ارزیابی شود.

References

- Azizi, Z. and Miraki, M., 2022. Individual urban trees detection based on point clouds derived from UAV- RGB imagery and local maxima algorithm, a case study of Fateh Garden, Iran. *Environment, Development and Sustainability*, 26: 2331-2344.
- Brodic, N., Cvijetinović, Ž., Milenkovic, M., Kovačević, J., Stančić, N., Mitrovic, M. and Mihajlović, D., 2022. Refinement of individual tree detection results obtained from airborne laser scanning data for a mixed natural forest. *Remote Sensing*, 14: 5345.
- Chudley, T.R., Christoffersen, P., Doyle, S.H, Abellan, A. and Snooke, N., 2019. High-accuracy UAV photogrammetry of ice sheet dynamics with no ground control. *The Cryosphere*, 13(3): 955-968.
- Ekaso, D., Nex, F. and Kerle, N., 2020. Accuracy assessment of real-time kinematics (RTK) measurements on unmanned aerial vehicles (UAV) for direct geo-referencing. *Geo-spatial Information Science*, 23(2): 165-181.
- Eltner, A., Kaiser, A., Castillo, C., Rock, G., Neugirg, F. and Abellán, A., 2016. Image-based surface reconstruction in geomorphometry – merits, limits and developments. *Earth Surface Dynamics*, 4(2): 359-389.
- Fallah, M., Matkan, A.A. and Aghighi, H., 2024. Estimation of height and diameter at breast height of forest trees with multi-scale individual tree detection method and machine learning algorithms using airborne LiDAR data. *Iranian Journal of Forest and Poplar Research*, 32(2): 112-131 (In Persian with English summary).
- Fassnacht, F.E., White, J.C., Wulder, M.A. and Næsset, E., 2023. Remote sensing in forestry: current challenges, considerations and directions. *Forestry*, 97: 11-37.
- Ferrer-González, E., Agüera-Vega, F., Carvajal-Ramírez, F. and Martínez-Carricondo, P., 2020. UAV photogrammetry accuracy assessment for corridor mapping based on the number and distribution of ground control points. *Remote Sensing*, 12: 2447.
- Fu, H., Zhao, H., Jiang, J., Zhang, Y., Liu, G., Xiao, W., ... and Liu, X., 2024. Automatic detection tree crown and height using Mask R-CNN based on unmanned aerial vehicles images for biomass mapping. *Forest Ecology and Management*, 555: 121712.
- Gebreslasie, M.T., Ahmed, F.B., Van Aardt, J.A.N. and Blakeway, F., 2011. Individual tree detection based on variable and fixed window size local maxima filtering applied to IKONOS imagery for even-aged Eucalyptus plantation forests. *International Journal of Remote Sensing*, 32: 4141-4154.
- Gerke, M. and Przybilla, H.J., 2016. Accuracy analysis of photogrammetric UAV image blocks: Influence of onboard RTK-GNSS and cross flight patterns. *Photogrammetrie, Fernerkundung, Geoinformation*, 1: 17-30.
- Jahdi, R. and Sefidi, K., 2024. Trend analysis of vegetation and monitoring of ecosystem health using remote Sensing (Case study: Fandoghlo region). *Iranian Journal of Forest*, 16(2): 291-310 (In Persian with English summary).
- Jaud, M., Passot, S., Le Bivic, R., Delacourt, C., Grandjean, P. and Le Dantec, N., 2016. Assessing the accuracy of high resolution digital surface models computed by PhotoScan® and MicMac® in sub-optimal survey conditions. *Remote Sensing*, 8(6): 465.
- Kargar, M.R. and Sohrabi, H., 2019. Using canopy height model derived from UAV images for tree height estimation in Sisangan forest. *RS and GIS for Natural Resources*, 10(3): 106-119 (In Persian with English summary).
- Krause, S., Sanders, T.G.M., Mund, J.P. and Greve, K., 2019. UAV-based photogrammetric tree height measurement for intensive forest monitoring. *Remote Sensing*, 11(7): 758.
- Lamping, J.E., Zald, H.S.J., Madurapperuma, B.D. and Graham, J., 2021. Comparison of low-cost commercial unpiloted digital aerial photogrammetry to airborne laser scanning across multiple forest types in California, USA. *Remote Sensing*, 13: 4292.
- Mohan, M., de Mendonça, B.A.F., Silva, C.A., Klauberg, C., de Saboya Ribeiro, A.S., de Araújo, E.J.G., ... and Cardil, A., 2019. Optimizing individual tree detection accuracy and measuring forest uniformity in coconut (*Cocos nucifera* L.) plantations using airborne laser scanning. *Ecological Modelling*, 409: 108736.
- Ok, A.O. and Ozdarici-Ok, A., 2018. Combining orientation symmetry and LM cues for the detection of citrus trees in orchards from a digital surface model. *IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters*, 15(12): 1817-1821.
- Padró, J.C., Muñoz, F.J., Planas, J. and Pons, X., 2019. Comparison of four UAV georeferencing methods for environmental monitoring purposes focusing on the combined use with airborne and satellite remote sensing platforms. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, 75: 130-140.
- Panagiotidis, D., Abdollahnejad, A., Surový, P. and Chiteculo, V., 2017. Determining tree height and crown diameter from high-resolution UAV imagery. *International Journal of Remote Sensing*, 38(8-10): 2392-2410.

- Penboon, C., Supavetch, S., Sirirueang, K., Rinnamang, S., Ladpala, P., Kaewgrajang, T. and Meunpong, P., 2023. Estimation of the aboveground biomass and carbon sequestration in an urban forest remnant using aerial photogrammetry from a low-cost Unmanned Aerial Vehicle. *Biodiversitas*, 24(3): 1908-1915.
- Pérez, M., Agüera, F. and Carvajal, F., 2012. Digital camera calibration using images taken from an unmanned aerial vehicle. *The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, 38: 167-171.
- Poorazimy, M., Shataee Jouibary, Sh., Mohammadi, J. and Aghababaei, H., 2023. Feasibility of single-polarized TanDEM-X data for Hyrcanian forest height estimation (Case study: Shast-Kalateh forest). *Iranian Journal of Forest*, 15(3): 329-343 (In Persian with English summary).
- Pouliot, D.A., King, D.J., Bell, F.W. and Pitt, D.G., 2002. Automated tree crown detection and delineation in high-resolution digital camera imagery of coniferous forest regeneration. *Remote Sensing of Environment*, 82: 322-334.
- Pourreza, M., Moradi, F., Khosravi, M., Deljouei, A. and 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.
- Puliti, S., Dash, J.P., Watt, M.S., Breidenbach, J. and Pearce, G.D., 2020. A comparison of UAV laser scanning, photogrammetry, and airborne laser scanning for precision inventory of small-forest properties. *Forestry*, 93(2): 150-162.
- Shao, G., Zhao, S. and Shugart, H., 1995. Forest dynamics modeling: preliminary explanations of optimizing management of Korean pine forests. China Forestry Publishing House, Beijing, 159p.
- Vacca, G., Furfaro, G. and Dessì, A., 2018. The use of the UAV images for the building 3D model generation. *The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, 42: 217-223.
- Wang, Y., Lehtomäki, M., Liang, X., Pyörälä, J., Kukko, A., Jaakkola, A., ... and Hyyppä, J., 2019. Is field-measured tree height as reliable as believed – A comparison study of tree height estimates from field measurement, airborne laser scanning and terrestrial laser scanning in a boreal forest. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 147: 132-145.
- Xiong, J., Zeng, H., Cai, G., Li, Y., Chen, J.M. and Miao, G., 2023. Crown information extraction and annual growth estimation of a chinese fir plantation based on unmanned aerial vehicle–light detection and ranging. *Remote Sensing*, 15(15): 3869.
- Xu, F., Gao, Z., Jiang, X., Shang, W., Ning, J., Song, D. and Ai, J., 2018. A UAV and S2A data-based estimation of the initial biomass of green algae in the South Yellow Sea. *Marine Pollution Bulletin*, 128: 408-414.
- Yu, K., Hao, Z., Post, C.J., Mikhailova, E.A., Lin, L., Zhao, G., Tian, S. and Liu, J., 2022. Comparison of classical methods and Mask R-CNN for automatic tree detection and mapping using UAV imagery. *Remote Sensing*, 14: 295.
- Zarco-Tejada, P.J., Diaz-Varela, R., Angileri, V. and Loudjani, P., 2014. Tree height quantification using very high resolution imagery acquired from an unmanned aerial vehicle (UAV) and automatic 3D photo-reconstruction methods. *European Journal of Agronomy*, 55: 89-99.