

برآورد زی توده روی زمینی بلوط ایرانی (*Quercus brantii*) با استفاده از پارامترهای ساختاری مستخرج از داده‌های پهپاد (مطالعه موردی: جنگل‌های زاگرس، لردگان)

معصومه بهارلویی^{۱*}، مژگان عباسی^۲، حمیدرضا ریاحی بختیاری^۳

چکیده

ارزیابی دقیق زی توده روی زمینی به منظور مدیریت پایدار جنگل‌های بلوط زاگرس که از یک طرف دارای تنوع زیستی بالا و از طرفی به جهت استفاده انسان، اکوسیستم تخریب یافته محسوب می‌شوند، از اهمیت بالایی برخوردار است. هدف از مطالعه حاضر برآورد زی توده روی زمینی درختان بلوط ایرانی در منطقه جنگلی قلعه مدرسه لردگان با استفاده از پارامترهای ساختاری مستخرج از تصاویر پهپاد به روش غیرتخریبی است. بدین منظور، متغیرهای قطر برابر سینه، ارتفاع و قطر متوسط تاج ۲۴۰ درخت در عملیات میدانی برداشت و با استفاده از معادلات آلومتریک، میزان زی توده واقعی محاسبه شد. پس از آشکارسازی تاج درختان در تصویر از طریق مدل رقومی ارتفاع تاج و الگوریتم حوضه آبخیز معکوس، ارتفاع و قطر متوسط تاج هر درخت برآورد گردید. همچنین قطر برابر سینه درختان با روش رگرسیون خطی چندمتغیره بر مبنای دو متغیر دیگر تخمین زده شد. در نهایت، پارامترهای برآوردی برای تخمین میزان زی توده در تصویر وارد روابط آلومتریک شدند. براساس نتایج به دست آمده، جذر میانگین مربعات خطای نسبی برای متغیرهای ارتفاع، قطر متوسط تاج و قطر برابر سینه به ترتیب ۲۵/۵۱، ۲۲/۷۹ و ۳۱/۷۴ درصد با ضریب تبیین ۰/۷۰، ۰/۸۳ و ۰/۵۵ بود. میانگین زی توده روی زمینی برآورد شده بر مبنای متغیرهای مذکور به ترتیب ۱۳۹/۱۱، ۱۴۶/۷۸ و ۲۶۰/۴۶ کیلوگرم با ضریب تبیین ۰/۶۸، ۰/۹۳ و ۰/۵۶ به دست آمد. همچنین نتایج نشان داد که دقت برآورد متغیر قطر متوسط تاج با ضریب تبیین ۰/۸۳ و مدل برآورد زی توده مبتنی بر آن با ضریب تبیین ۰/۹۳ بیشتر از دو متغیر دیگر است. به طور کلی، یافته‌های این تحقیق نشان داد که تصاویر پهپاد ظرفیت مناسبی برای پایش و کمی‌سازی پارامترهای ساختاری درختان بلوط ایرانی و برآورد زی توده روی زمینی آن‌ها دارند و می‌توانند به عنوان ابزار مفیدی برای مدیریت پایدار و برنامه‌ریزی حفاظتی در این اکوسیستم‌ها مورد استفاده قرار گیرند.

واژگان کلیدی:

آلومتریک، ارتفاع، بلوط ایرانی، زی توده روی زمینی، قطر متوسط تاج.



مقاله پژوهشی

۱. دانشجوی دکتری، گروه علوم جنگل، دانشکده منابع طبیعی و علوم زمین، دانشگاه شهرکرد، شهرکرد، ایران.
masoomebaharloe70@gmail.com
* نویسنده مسئول

۲. دانشیار، گروه علوم جنگل، دانشکده منابع طبیعی و علوم زمین، دانشگاه شهرکرد، شهرکرد، ایران.
mozghan.abasi@gmail.com

۳. استادیار، گروه علوم جنگل، دانشکده منابع طبیعی و علوم زمین، دانشگاه شهرکرد، شهرکرد، ایران.
reza_reyahi@yahoo.com

شماره مقاله: ۲۶۰۴-۱۱۶۴

شماره صفحه پایایی: ۱۳۰۵-۱۳۱۵

تاریخ دریافت: ۱۴۰۵/۰۲/۰۶

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۵/۰۳/۲۵

انتشار آنلاین: ۱۴۰۵/۰۳/۲۹

زمان پذیرش: ۵۱ روز

استناددهی:

بهارلویی، م، عباسی، م، و ریاحی بختیاری، ح. (۱۴۰۵). برآورد زی توده روی زمینی بلوط ایرانی (*Quercus brantii*) با استفاده از پارامترهای ساختاری مستخرج از داده‌های پهپاد (مطالعه موردی: جنگل‌های زاگرس، لردگان). مدیریت اکوسیستم‌های طبیعی، (۱)، ۴۶-۵۶.

۱- مقدمه

جنگل‌ها به‌عنوان یکی از اجزاء حیاتی اکوسیستم‌های خشکی، محتوای کربن اتمسفر را طی فرآیند فتوسنتز به میزان قابل توجهی کاهش می‌دهند. از این‌رو، نقش کلیدی در حفظ محیط زیست جهانی، کاهش تغییرات آب‌وهوا، و متعادل کردن چرخه کربن دارند (Wu et al., Favero et al., 2020). برآورد گردیده که سالانه ۲ تا ۴ گیگاتن کربن اتمسفر توسط جنگل‌ها جذب می‌شود (Qureshi et al., 2012). بنابراین، درک تغییرات آب‌وهوایی جهانی لزوماً نیازمند کمی کردن پارامترهای جنگل مانند حجم، زی توده و ذخایر کربن جنگلی است (Steininger, 2000; Ketterings et al., 2001). به‌دلیل سختی جمع‌آوری اطلاعات در مورد زی توده موجود در زیر سطح زمین، بیشتر تحقیقات انجام‌شده بر زی توده موجود در سطح زمین متمرکز شده‌اند (Lu, 2005). جنگل‌های زاگرس از مهم‌ترین زیست‌بوم‌های ایران و خاورمیانه هستند که داشتن اطلاعات روزآمد درخصوص منابع موجود و ارزیابی زی توده روی زمینی آن‌ها از اهمیت ویژه‌ای برخوردار بوده و می‌تواند مبنایی برای تصمیم‌گیری مدیران و محققان در جهت استفاده پایدار از این منابع جنگلی با در نظر گرفتن برنامه‌ریزی مناسب و تلاش‌های حفاظتی فراهم آورد (Torabzadeh et al., 2019).

روش‌های سنتی اندازه‌گیری زمینی و استفاده از سنجش‌ازدور به‌عنوان دو رویکرد اصلی برای برآورد زی توده جنگل شناخته می‌شوند. اگرچه روش‌های سنتی دقیق‌تر هستند (Lu, 2006)، اما این روش‌ها بسیار زمان‌بر، هزینه‌بر و مخرب می‌باشند (Zhang et al., 2019). علاوه بر این، اجرای این روش‌ها در مقیاس‌های وسیع که شامل مناطق وسیعی از جنگل‌های کوهستانی و صعب‌العبور همچون زاگرس می‌شود، عملاً غیرممکن است. درحالی‌که، علم سنجش‌ازدور با برطرف کردن محدودیت‌های ناشی از نیروی انسانی، مواد و ابزار، منابع و محیط امکان‌پذیر می‌شود، عملاً غیرممکن است. درحالی‌که، علم مختلف و به‌صورت پویا را فراهم آورده است (Kumar and Mutanga, 2017). در حال حاضر، بسیاری از محققان انواع داده‌های سنجش‌ازدور از جمله داده‌های ماهواره‌ای چند طیفی، فراطیفی، لیدار و غیره را برای برآورد زی توده به‌کار گرفته‌اند. اگرچه در مطالعات انجام‌شده به‌منظور برآورد زی توده روی زمینی جنگل‌های زاگرس با استفاده از داده‌های ماهواره‌ای چندطیفی با قدرت تفکیک مکانی متوسط نتایج قابل‌قبولی حاصل شده است (قیصر بیگی و همکاران، ۱۴۰۳؛ صفری و سهرابی، ۱۳۹۹؛ Safari and Sohrabi, 2020؛ Moradi et al., 2022)، با این وجود برآورد سریع و دقیق زی توده روی زمینی جنگل با استفاده از این داده‌ها همچنان با چالش‌های متعددی مواجه است و عوامل بسیاری مانند اشباع طیفی داده‌ها، شرایط پیچیده بیوفیزیکی، داده‌های نمونه ناکافی، نادیده گرفتن درختان کوچک با جمعیت قابل‌توجه و سرعت رشد بیشتر ممکن است بر عملکرد برآورد زی توده تأثیر بگذارند (Chaturvedi and Raghubanshi, 2013؛ Lu, 2006). بنابراین، به‌نظر می‌رسد به‌کارگیری تصاویر با وضوح مکانی بالا می‌تواند نتایج برآورد زی توده روی زمینی را بهبود بخشد.

در چند دهه اخیر، پهپادها به‌عنوان ابزارهای سنجش‌ازدور نوین مطرح شده‌اند و دارای قدرت تفکیک مکانی فوق‌العاده زیاد بوده که می‌توان از آن‌ها به‌عنوان یک سامانه کارآمد، سریع و با هزینه‌های نسبتاً پایین‌تری در مقایسه با داده‌های با وضوح مکانی زیاد و لیدار، در مدیریت منابع طبیعی بهره برد. پهپادها دارای مزیت‌های مختلفی از جمله کنترل زمان پرواز، ارتفاع پرواز، زاویه دید سنجنده، تنظیم میزان هم‌پوشانی تصاویر می‌باشند (Anderson and Gaston, 2013). تصاویر پهپاد به دلیل دارا بودن قابلیت تبدیل به تصاویر سه بعدی، امکان استخراج بسیاری از مشخصه‌های ساختاری جنگل از جمله قطر تاج، مساحت تاج و ارتفاع تک درختان را به‌صورت مستقیم فراهم می‌کنند (Manfreda et al., 2018؛ Mohan et al., 2017). همچنین می‌توان قطر برابر سینه را که به‌عنوان یک متغیر کلیدی در مطالعات جنگل محسوب می‌شود، به روش غیرمستقیم و با برقراری روابط رگرسیونی از طریق متغیر ارتفاع و ویژگی‌های تاج از داده‌های فتوگرامتری سه‌بعدی تخمین زد (Zhang et al., 2025؛ Erfanifard et al., 2025). زی توده روی زمینی جنگل، از طریق مدل‌سازی با استفاده از این مشخصه‌ها قابل برآورد است (Ruwaimana et al., 2018).

اخیراً استفاده از داده‌های پهپاد در مطالعات جنگل مورد توجه محققان در داخل و خارج از کشور قرار گرفته است. به‌عنوان مثال، نصیری و همکاران (۱۳۹۹) با استفاده از تصاویر پهپاد و روش‌های قطعه‌بندی چندمقیاسه و حوزه‌آبخیز معکوس، قطر متوسط تاج درختان منطقه خیرود را برآورد نمودند. براساس نتایج، روش حوزه‌آبخیز با $MAE=5/97$ و $RMSE=7/02$ درصد بهترین عملکرد را داشت و مقادیر برآوردی همبستگی قابل توجهی با مقادیر اندازه‌گیری شده نشان دادند. عرفانی‌فرد و کرافسکی (۱۴۰۰) به‌منظور برآورد مساحت تاج و ارتفاع گونه بنه و بادام از تصاویر پهپاد استفاده کردند. نتایج به‌دست آمده بیانگر کارایی مناسب ابرنقاط حاصل از تصاویر پهپاد در برآورد مساحت تاج و ارتفاع بنه (به ترتیب با $R^2=0/83$ و $R^2=0/91$) و همچنین مساحت تاج بادام ($R^2=0/89$) بود. Erfanifard et al. (۲۰۲۵) نیز به‌منظور برآورد قطر برابر سینه درختان کاج، از ویژگی‌های مشتق شده از داده‌های پهپاد شامل ارتفاع و اندازه تاج درخت استفاده نمودند. نتایج به‌دست آمده با ضریب تبیین $0/82$ و $0/98$ از دقت مناسب تصویر پهپاد حکایت داشت. در خصوص تحقیقات انجام‌شده پیرامون برآورد زی توده با پهپاد نیز، کارگر و سهرابی (۱۳۹۸)، زی توده روی زمینی درختان پارک جنگلی سیسنگان را در سطح تک درخت، قطعه‌نمونه و به‌صورت ترکیبی مورد بررسی قرار دادند. بدین منظور، ارتفاع تک درختان از مدل رقومی ارتفاع تاج برآورد و به‌عنوان متغیر مستقل وارد فرآیند مدل‌سازی زی توده شد. نتایج به‌دست آمده نشان داد، رهیافت ترکیبی دقت بهتری برای برآورد زی توده روی زمینی در منطقه مورد مطالعه ارائه نموده است ($RMSE=85.69$ و $R^2=0.68$). همچنین، قابلیت داده‌های پهپاد برای برآورد متغیرهای کمی جنگل‌های

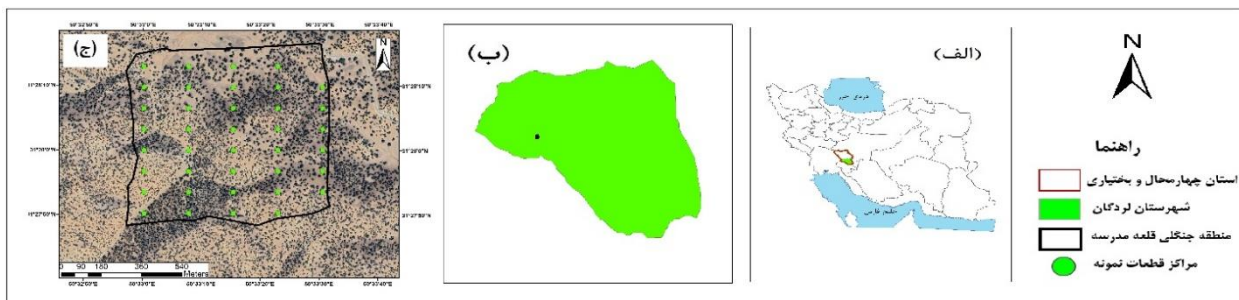
مانگرو و مناطق با دسترسی دشوار نیز در مطالعه میرکی و همکاران (۱۴۰۲) مورد تأیید قرار گرفته است. در پژوهش‌های خارج از کشور نیز Juan-Ovejero et al. (۲۰۲۳) به منظور تخمین زی توده روی زمینی بلوط همیشه‌سبز (*Quercus ilex L.*) در جنوب شرقی اسپانیا، به ضریب تبیین ۰/۶۸ دست یافتند و Guerra-Hernández et al. (۲۰۱۷) نیز به منظور بررسی تغییرات متغیرهای کمی درختان کاج در بازه زمانی ۲۰۱۵ تا ۲۰۱۷، مقدار ضریب تبیین ارتفاع برآوردشده را ۰/۹۶ و زی توده را ۰/۸۷ گزارش نمودند.

در نهایت، با مروری بر پژوهش‌های انجام شده مشخص شد که تاکنون تحقیق جامعی در زمینه برآورد زی توده روی زمینی به‌عنوان یک پارامتر مهم و ضروری برای مدیریت پایدار جنگل‌های بلوط زاگرس با استفاده از تصاویر پهپاد انجام نشده است. از این رو تحقیق حاضر به بررسی و برآورد زی توده روی زمینی بخشی از جنگل‌های بلوط زاگرس به روش غیرتخریبی با استفاده از داده‌های پهپاد با وضوح مکانی بسیار زیاد می‌پردازد. در همین راستا متغیرهای ساختاری تک درختان شامل ارتفاع، قطربرابرسینه و قطرمتوسط تاج به‌عنوان ویژگی‌های قابل برآورد از تصاویر پهپاد استخراج و سپس با به‌کارگیری معادلات آلومتریک زی توده روی زمینی درختان به‌طور غیرمستقیم تخمین زده خواهد شد.

۲- مواد و روش‌ها

۲-۱- منطقه مورد مطالعه

تحقیق حاضر در بخشی از جنگل‌های زاگرس واقع در استان چهارمحال و بختیاری، شهرستان لردگان در منطقه جنگلی قلعه مدرسه با مساحتی حدود ۷۰ هکتار انجام شده است. این منطقه در ۷۵ کیلومتری شهرستان لردگان و ۱۹۵ کیلومتری مرکز استان قرار دارد و از لحاظ جغرافیایی در طول جغرافیایی ۵۰ درجه و ۳۲ دقیقه و ۵۰ ثانیه تا ۵۰ درجه و ۳۳ دقیقه و ۴۰ ثانیه شرقی و عرض جغرافیایی ۳۱ درجه و ۲۷ دقیقه و ۵۰ ثانیه تا ۳۱ درجه و ۲۸ دقیقه و ۱۰ ثانیه شمالی واقع شده است. میانگین بارش سالیانه و دمای سالیانه منطقه به ترتیب ۵۱۹/۹ میلی‌متر و ۱۵/۱ درجه سانتی‌گراد است. این ناحیه رویشی عمدتاً شامل توده‌های دانه‌زاد و خالص بلوط ایرانی (*Quercus brantii*) بوده و در حال حاضر مهم‌ترین بخش جنگل‌های دانه‌زاد استان چهارمحال و بختیاری به‌شمار می‌رود (شکل ۱).



شکل (۱): موقعیت جغرافیایی منطقه مورد مطالعه. (الف) شهرستان لردگان در استان چهارمحال و بختیاری، (ب) منطقه جنگلی قلعه مدرسه در شهرستان لردگان، و (ج) منطقه جنگلی قلعه مدرسه بر روی تصویر Google Earth و موقعیت و پراکنش قطعات نمونه.

۲-۲- برداشت داده‌های پهپاد

به‌منظور انجام این مطالعه، تصاویر مورد نیاز در تاریخ ۲۸ مرداد ۱۴۰۴ توسط پهپاد Phantom4 Pro برداشت شد. عملیات تصویربرداری از ارتفاع ۱۰۰ متری سطح زمین و در شرایط آب‌وهوایی پایدار انجام گرفت. زمان پرواز در بازه ساعت ۱۱ تا ۱۲ ظهر انتخاب شد تا اثر سایه‌ها به حداقل مقدار ممکن برسد و کیفیت تصاویر بهبود یابد. پهپاد مورد استفاده از نوع عمودپرواز است و دوربین آن قابلیت ثبت تصاویر در دامنه‌های طیفی آبی، سبز و قرمز (RGB) را دارا می‌باشد. پس از برنامه‌ریزی مأموریت پرواز، عملیات تصویربرداری به‌صورت خودکار انجام شد. به‌منظور زمین‌مرجع‌سازی دقیق تصاویر، تعداد ۶۷ نقطه کنترل زمینی با پراکنش مناسب در سطح منطقه برداشت شد. مختصات این نقاط با استفاده از دستگاه GPS سه‌فرکانسه و به روش RTK اندازه‌گیری گردید. برای افزایش دقت مدل‌سازی سه‌بعدی و بازسازی هندسی منطقه، میزان هم‌پوشانی طولی و عرضی تصاویر به ترتیب ۸۰ و ۳۰ درصد در نظر گرفته شد. در مجموع، ۱۰۴۶ تصویر با تفکیک مکانی کمتر از ۱۰ سانتی‌متر طی سه مرحله پرواز برداشت گردید. پس از اتمام عملیات تصویربرداری، پیش‌پردازش‌های اولیه شامل بررسی چشمی تصاویر، انتخاب تصاویر مناسب مسیر پرواز و حذف تصاویر اضافی یا نامطلوب انجام شد تا داده‌های ورودی با کیفیت مناسب برای مراحل بعدی پردازش فراهم گردد.

۲-۳- اندازه‌گیری‌های میدانی

ویژگی‌های ساختاری درختان شامل قطربرابرسینه، ارتفاع، قطر متوسط تاج به‌منظور اعتبارسنجی نتایج برآوردهای انجام‌شده با استفاده از تصاویر پهپاد، از طریق اندازه‌گیری‌های میدانی جمع‌آوری شدند. برای این منظور، تعداد ۳۸ قطعه‌نمونه زمینی به شکل مربع با ابعاد ۳۰×۳۰ متر براساس یک شبکه منظم تصادفی با ابعاد ۲۰۰×۱۰۰ طراحی و در نرم‌افزار ArcGIS 10.8.2 بر روی موزائیک تصویر منطقه مورد مطالعه پیاده‌سازی شد. سپس مختصات

جغرافیایی مراکز قطعه نمونه و مرز آنها به نرم‌افزار MAPinr منتقل و در عرصه بازیابی شدند. عملیات میدانی در اوایل شهریورماه ۱۴۰۴ یعنی نزدیک به تاریخ تصویربرداری پهپاد صورت گرفت. تعداد ۲۴۰ درخت واقع در قطعات نمونه کدگذاری و مشخصات آنها شامل قطر برابر سینه، ارتفاع و قطر کوچک و بزرگ تاج اندازه گیری و مختصات جغرافیایی هر درخت برداشت گردید. به دلیل تاج پوشش باز جنگل، تشخیص تک درختان و تمایز موقعیت مکانی آنها از یکدیگر نسبتاً ساده بود. قطر متوسط تاج هر درخت نیز از میانگین دو مقدار قطر کوچک و بزرگ تاج محاسبه شد. با توجه به اینکه منطقه جنگلی شامل توده‌های خالص بلوط ایرانی در فرم رویشی دانه‌زاد بود، مقادیر زی توده روی زمینی درختان با استفاده از معادله آلومتریک پیشنهادی توسط ایرانمنش (۱۳۹۲) برای گونه‌ی بلوط ایرانی در فرم رویشی تک‌پایه و براساس متغیرهای ارتفاع، قطر متوسط تاج و قطر برابر سینه درخت محاسبه شد (رابطه ۱، ۲ و ۳). مقادیر زی توده به دست آمده به عنوان مقدار مرجع (واقعیت زمینی) جهت اعتبارسنجی زی توده برآوردی از تصویر پهپاد مورد استفاده قرار گرفت.

$$Y = 0.067X^{3.921} \quad \text{رابطه (۱)}$$

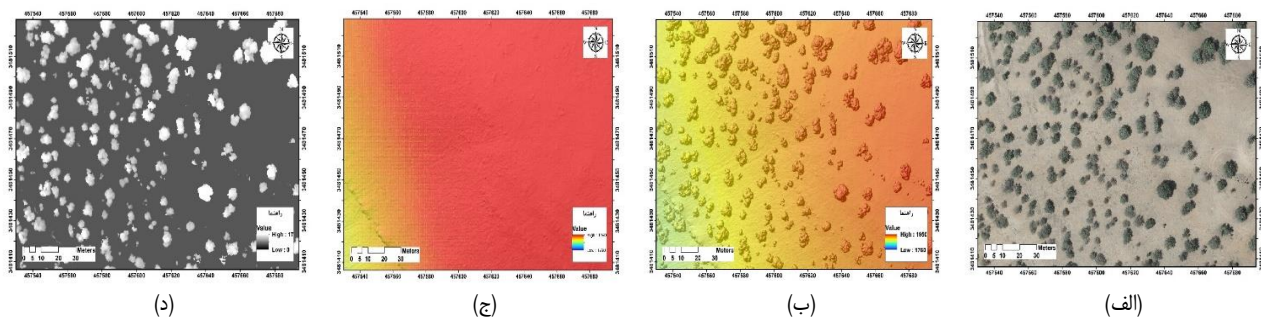
$$Y = 0.615X^{1.865} \quad \text{رابطه (۲)}$$

$$Y = 0.881X^{3.228} \quad \text{رابطه (۳)}$$

در این روابط Y : زی توده روی زمینی درخت به کیلوگرم و X : ارتفاع درخت برحسب متر (در رابطه ۱)، قطر برابر سینه به متر (در رابطه ۲) و قطر متوسط تاج به سانتی‌متر (در رابطه ۳) است.

۴-۲- پردازش تصاویر پهپاد (تولید ابرنقاط متراکم و ساخت مدل‌ها رقومی سطح، زمین و ارتفاع تاج)

پس از برداشت تصاویر پهپاد و انجام پیش پردازش‌های اولیه، پردازش داده‌ها به منظور تولید ابرنقاط متراکم از ابرنقاط متراکم سه بعدی با دقت بالا در نرم‌افزار Agisoft Metashape انجام شد. در مرحله نخست برای ایجاد ابرنقاط متراکم، تصاویر بر اساس مختصات جغرافیایی ثبت شده برای هر تصویر و با بهره‌گیری از نقاط کنترل زمینی در فضای پردازشی نرم‌افزار در کنار هم چیده شدند (شکل ۲-الف). در ادامه، به منظور بازسازی هندسه سه بعدی منطقه، ابرنقاط متراکم با استفاده از ساختار حرکت مبنای تولید شد. خروجی نهایی این فرآیند، یک ساختار سه بعدی است که می‌توان چندین شیء (پدیده) را از آن طبقه بندی کرد (Dellaert et al., 2000). پس از تولید ابرنقاط متراکم سه بعدی از تصاویر، فرآیند استخراج مدل‌های رقومی شامل مدل رقومی زمین، مدل رقومی سطح و مدل رقومی ارتفاع تاج انجام شد. این فرآیند در چند مرحله متوالی و با هدف بازنمایی دقیق ساختار عمودی سطح زمین و پوشش گیاهی صورت گرفت. در مرحله نخست، مدل رقومی سطح که نمایانگر ارتفاع از سطح دریای تمامی عوارض موجود بر سطح زمین از جمله پوشش گیاهی، ساختمان‌ها و سایر پدیده‌های سطحی است، از طریق درون‌یابی ارتفاعی نقاط سه بعدی بر روی یک شبکه منظم تولید گردید (شکل ۲-ب). در مرحله بعد، به منظور تولید مدل رقومی زمین که نشان دهنده ارتفاع زمین در هر نقطه است؛ فرآیند طبقه‌بندی ابرنقاط با هدف جداسازی نقاط زمین از نقاط مربوط به پوشش گیاهی و سایر عوارض سطحی انجام گرفت (شکل ۲-ج). در نهایت، مدل رقومی ارتفاع تاج از تفاضل مدل رقومی زمین و مدل رقومی سطح محاسبه گردید (شکل ۲-د). این مدل متشکل از پیکسل‌ها یا نقاطی است که ارزش هر پیکسل یا نقطه معادل ارتفاع آن نقطه (در خصوص جنگل ارتفاع درختان) نسبت به سطح زمین بوده و اطلاعات دقیق و قابل اعتمادی از ساختار عمودی تاج درختان، توزیع ارتفاعی پوشش گیاهی و تغییرات مکانی ارتفاع فراهم می‌کند.



شکل (۲): برشی از ابرنقاط متراکم (الف)، مدل رقومی سطح (ب)، مدل رقومی زمین (ج) و مدل رقومی ارتفاع تاج (د)

۲-۵- تشخیص خودکار تاج و برآورد مشخصه‌های تک درختان از تصویر پهپاد

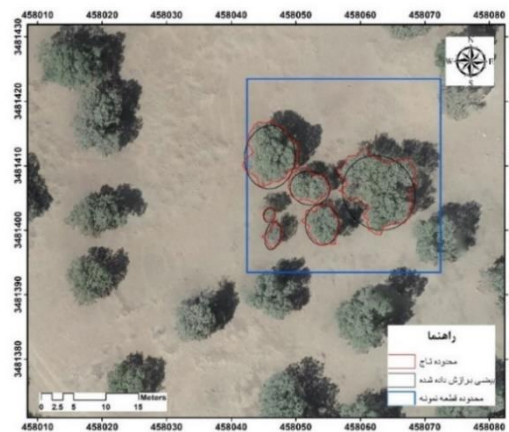
در این مطالعه جهت برآورد زی توده روی زمینی تک درختان از تصاویر پهپاد، متغیرهای ارتفاع، قطر متوسط تاج و قطر برابر سینه استفاده شدند. برای این منظور ابتدا می‌بایست محدوده تاج درختان واقع در قطعات نمونه از تصاویر استخراج شود. بنابراین از مدل رقومی ارتفاع تاج و روش قطعه‌بندی حوزه آبخیز معکوس به دلیل قابلیت بالای آن در تعیین پایه‌های درختی و تفکیک تاج آن‌ها در جنگل‌های تنک استفاده شد (نصیری و همکاران، ۱۳۹۹)؛

1. Structure From Motion (SFM)
2. Digital Terrain Model (DTM)

3. Digital Surface Model (DSM)
4. Canopy Height Model (CHM)

Wan Mohd Jaafar et al., 2018). کلیه مراحل این کار در نرم‌افزار ArcGIS و به‌صورت خودکار انجام گرفت. برای انجام این کار در ابتدا مدل ارتفاعی تاج معکوس شد، بدین ترتیب که در محدوده تاج هر درخت، ارتفاع از سمت حاشیه تاج درخت به سمت نوک درخت کاهش یافته و هر تاج درخت به یک حوزه آبخیز تبدیل گردید. سپس با استفاده از تابع Flow Direction و ابزار Basin محدود هر حوزه آبخیز (تاج درخت) ترسیم شد (Panagiotidis et al., 2016). پس از جداسازی تاج هر درخت، برای محاسبه قطر متوسط تاج لازم بود قطر کوچک و بزرگ تاج (مشابه عملیات میدانی) تعیین گردد (Munteanu et al., 2026) و برای هر تاج، بیضی محاطی در محیط GIS برازش داده شد (شکل ۳). سپس قطر بزرگ و کوچک آن به‌عنوان قطر بزرگ و کوچک تاج درخت محاسبه گردید. قطر متوسط تاج هر درخت نیز از میانگین دو مقدار قطر کوچک و بزرگ تاج به‌دست آمد. همچنین به‌منظور تعیین ارتفاع هر درخت، مقدار حداکثر ارزش مدل رقومی ارتفاع در محدوده تاج هر درخت، به‌عنوان ارتفاع آن درخت برای انجام محاسبات بعدی در نظر گرفته شد.

درخصوص برآورد متغیر قطر برابرسینه درخت، از آنجایی که استخراج مستقیم آن از داده‌های فتوگرامتری پهناد امکان‌پذیر نبود، آن را به‌عنوان تابعی از متغیرهای ارتفاع و قطر متوسط تاج در نظر گرفته شد (Blanchard et al., 2016; Verma et al., 2014; Gonzalez-Benecke et al., 2014). برای این منظور، مدل رگرسیون خطی چندمتغیره با استفاده از این دو پارامتر که در مراحل قبلی استخراج شده بودند، اعمال شدند (Erfanfard et al., 2025; Aiken et al., 2012). بدین ترتیب، مشخصه‌های درختان واقع در محدوده قطعات نمونه (متناظر با درختان اندازه‌گیری شده در عملیات میدانی به‌لحاظ موقعیت جغرافیایی هر درخت) شامل ارتفاع، قطر برابرسینه و قطر متوسط تاج از مدل رقومی ارتفاع تاج حاصل از تصاویر پهناد برآورد گردید.



شکل (۳): محدوده تاج درختان واقع در قطعه نمونه (رنگ قرمز) و بیضی برازش داده شده (رنگ سیاه) به‌منظور تعیین قطر کوچک و بزرگ تاج

۶-۲- ارزیابی دقت و صحت‌سنجی برآوردهای انجام شده

به‌منظور ارزیابی دقت عملکرد تصاویر پهناد در برآورد متغیرهای ساختاری تک درختان بلوط ایرانی و مقایسه مقادیر واقعی (اندازه‌گیری شده در جنگل) و برآورد شده از تصویر، از جذر میانگین مربعات خطا، جذر میانگین مربعات خطای نسبی، ضریب اریبی، ضریب اریبی نسبی و ضریب تبیین استفاده شد (جدول ۱)، که در آن مقادیر پایین RMSE و RMSE% از یک سوء و مقادیر بالای R^2 از سوی دیگر، قابلیت‌های تصاویر پهناد برای برآورد زی‌توده روی‌زمینی را مشخص می‌کنند. همچنین مقدار اریبی بیشتر از صفر نشان می‌دهد که متغیر بیشتر از مقدار واقعی برآورد شده است و اریبی کمتر از صفر نیز بیانگر برآورد کمتر از واقعیت است.

جدول (۱): معیارهای ارزیابی دقت و صحت برآوردهای انجام‌شده با استفاده از تصویر پهناد

شاخص	رابطه	شاخص	رابطه	شاخص	رابطه
جذر میانگین مربعات خطا	$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (Pi - Oi)^2}{n}}$	ضریب اریبی	$Bias = \frac{\sum_{i=1}^n Pi - Oi}{n}$	جذر میانگین مربعات خطای نسبی	$RMSE\% = \frac{RMSE}{\bar{O}} \times 100$
ضریب تبیین	$R^2 = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (Pi - Oi)^2}{\sum_{i=1}^n (Pi - \bar{O})^2}$	ضریب اریبی نسبی	$Bias\% = \frac{Bias}{\bar{O}} \times 100$		

O_i : مقدار مشاهده شده، P_i : مقدار برآورد شده از تصویر پهناد، \bar{O} : میانگین مقادیر مشاهده شده و n : تعداد نمونه

۳- نتایج

۳-۱- اندازه‌گیری و برآورد مشخصه‌های ساختاری

حداقل، حداکثر، میانگین و انحراف از معیار متغیرهای ارتفاع، قطر برابر سینه و قطر متوسط تاج در جدول (۲) آورده شده است. براساس نتایج، میانگین متغیرهای اندازه‌گیری شده در عرصه یعنی ارتفاع، قطر متوسط تاج و قطر برابر سینه به ترتیب ۵/۳۵ متر، ۴ متر و ۲۴/۳۶ سانتی‌متر با انحراف معیار ۱/۵۱، ۱/۷۱ و ۱۱/۵۴ به دست آمد. درحالی‌که میانگین مقادیر برآوردشده پارامترهای مذکور در تصویر پهپاد به ترتیب ۶/۲۴، ۳/۷۲ و ۲۴/۳۵ با انحراف معیار ۱/۸۸، ۲/۰۶ و ۸/۵۵ بود (جدول ۲). همچنین نتایج آزمون t جفتی نشان داد که اختلاف میان مقادیر واقعی و برآوردی برای دو متغیر ارتفاع و قطر متوسط تاج در سطح اطمینان ۹۵ درصد معنادار است ($P < 0.05$). اما، میان مقادیر واقعی و برآوردی متغیر قطر برابر سینه تفاوت آماری معناداری مشاهده نشد (جدول ۳).

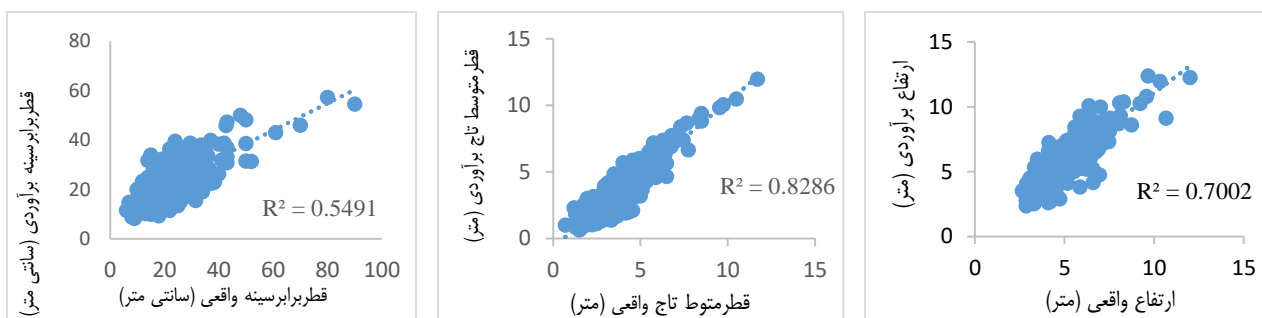
جدول (۲): آماره‌های توصیفی متغیرهای ساختاری اولیه اندازه‌گیری شده در عرصه (واقعی) و برآوردشده از تصویر پهپاد

ویژگی کمی	حداقل	حداکثر	میانگین	انحراف معیار
ارتفاع (متر)	۲/۶۵	۱۲	۵/۳۵	۱/۵۱
برآوردی	۲/۳۷	۱۲/۳۸	۶/۲۴	۱/۸۸
قطر متوسط تاج (متر)	۰/۷	۱۱/۷	۴	۱/۷۱
برآوردی	۰/۶۶	۱۱/۹۷	۳/۷۲	۲/۰۶
قطر برابر سینه (سانتی‌متر)	۶	۹۰	۲۴/۳۶	۱۱/۵۴
برآوردی	۸/۳۱	۵۷/۲۹	۲۴/۳۵	۸/۵۵

جدول (۳): نتایج آزمون آماری t جفتی برای مقایسه پارامترهای ساختاری اولیه اندازه‌گیری شده و برآوردی

ویژگی کمی	اختلاف میانگین	خطای استاندارد میانگین	آماره t	P-value
ارتفاع (متر)	-۰/۸۹	-۰/۰۶۶	-۱۳/۳۶	-۰/۰۰۰
قطر متوسط تاج (متر)	-۰/۳۰	-۰/۰۵۵	۵/۴۵	-۰/۰۰۰
قطر برابر سینه (سانتی‌متر)	-۰/۰۰۳	-۰/۵۰۱	-۰/۰۰۶	-۰/۹۹۵

بررسی رابطه رگرسیونی میان مقادیر اندازه‌گیری شده و برآوردشده متغیرهای ساختاری اولیه نشان داد که مقدار ضریب تبیین برای متغیرهای ارتفاع، قطر متوسط تاج و قطر برابر سینه به ترتیب ۰/۷۰، ۰/۸۳ و ۰/۵۵ است. بر اساس نتایج، بیشترین مقدار ضریب تبیین متعلق به قطر متوسط تاج بوده به عبارتی داده‌های مبتنی بر تصویر پهپاد توانسته‌اند بیش از ۸۰ درصد تغییرات قطر متوسط تاج واقعی درختان را توضیح دهند (شکل ۴). کمترین مقدار ضریب تبیین نیز مربوط به متغیر قطر برابر سینه بود.



شکل (۴): رابطه رگرسیونی میان مقادیر واقعی و برآوردی پارامترهای ساختاری اولیه درختان

همچنین نتایج ارزیابی دقت و صحت سنجی برآوردهای انجام شده با استفاده از مدل رقومی ارتفاع تاج حاصل از پردازش تصاویر پهپاد در جدول (۴) ارائه شده است. مقدار آماره جذر میانگین مربعات خطا برای برآورد متغیرهای ارتفاع، قطر متوسط تاج و قطر برابر سینه به ترتیب ۱/۳۶، ۰/۹۱ و ۷/۷۳ به دست آمد. به طور کلی، خطای نسبی برآوردهای انجام شده کمتر از ۳۲ درصد و حداقل مقدار آن متعلق به متغیر قطر متوسط تاج به میزان ۲۲/۷۹ درصد بود. همچنین، میزان اریبی برآورد برای متغیر ارتفاع مثبت و به صورت نسبی ۱۶/۶۴ درصد محاسبه شد که نشان می‌دهد مدل کمی تمایل به بیش برآورد ارتفاع دارد؛ اما میزان آن قابل توجه نبود. درخصوص دو متغیر دیگر اریبی برآورد منفی و کمتر از ۱۰ درصد به دست آمد.

جدول (۴): ارزیابی دقت برآورد متغیرهای ساختاری اولیه با استفاده از مدل رقومی ارتفاع تاج حاصل از تصاویر پهپاد

ویژگی کمی مورد استفاده در معادله	R ²	RMSE	RMSE%	Bias	Bias%
ارتفاع (متر)	۰/۷۰	۱/۳۶	۲۵/۵۱	-۰/۸۹	۱۶/۶۴
قطر متوسط تاج (متر)	۰/۸۳	۰/۹۱	۲۲/۷۹	-۰/۲۸	-۷
قطر برابر سینه (سانتی‌متر)	۰/۵۵	۷/۷۳	۳۱/۷۴	-۰/۰۰۳	-۰/۰۱

۳-۲- برآورد زی توده روی زمینی درختان

براساس نتایج، میانگین زی توده روی زمینی برآوردی درختان از معادلات مبتنی بر متغیرهای ارتفاع، قطر متوسط تاج و قطر برابر سینه به ترتیب ۱۳۹/۱۱، ۱۴۶/۷۸ و ۲۶۰/۴۶ کیلوگرم با انحراف معیار ۱۷۸/۴۳، ۲۹۷/۴۱ و ۱۷۶/۲۰ (جدول ۵). براساس نتایج به دست آمده، مقادیر میانگین زی توده برآوردی بر مبنای متغیرهای ارتفاع و قطر متوسط تاج اختلاف بسیار ناچیز نسبت بهم داشتند (کمتر از ۱۰ کیلوگرم). در حالی که میانگین زی توده روی زمینی برآورد شده براساس متغیر قطر برابر سینه حدود ۱۲۵ کیلوگرم بیشتر از دو متغیر دیگر بود. به دست آوردن مقادیر مختلف زی توده برای یک درخت معین دور از انتظار نبود، چراکه در هر معادله آلومتریک یک متغیر مستقل متفاوت استفاده شد (جدول ۵). تجزیه و تحلیل نتایج آزمون t جفتی نشان داد، مقادیر زی توده برآوردی با استفاده از متغیر ارتفاع، تفاوت معناداری با مقادیر واقعی در سطح اطمینان ۹۵ درصد دارند. در حالی که درخصوص زی توده مبتنی بر دو متغیر دیگر این اختلاف معنی دار نبود (جدول ۶).

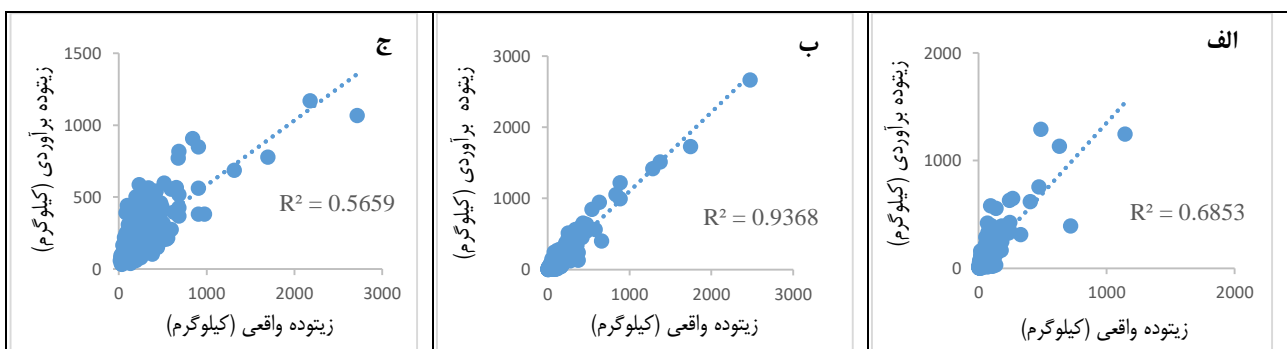
جدول (۵): آماره‌های توصیفی زی توده روی زمینی برآوردی از تصویر پهپاد (برحسب کیلوگرم/درخت)

متغیر مورد استفاده در معادله آلومتریک	حداقل	حداکثر	میانگین	انحراف معیار
ارتفاع	۱/۹۷	۱۲۹۰/۱۲	۱۳۹/۱۱	۱۷۸/۴۳
قطر متوسط تاج	۰/۲۳	۲۶۶۱/۱۱	۱۴۶/۷۸	۲۹۷/۴۱
قطر برابر سینه	۳۱/۹۳	۱۱۶۸/۵۵	۲۶۰/۴۶	۱۷۶/۲۰

جدول (۶): نتایج آزمون آماری t جفتی برای مقایسه زی توده روی زمینی اندازه گیری شده و برآوردی

ویژگی کمی	اختلاف میانگین	خطای استاندارد میانگین	آماره t	P-value
ارتفاع (متر)	-۶۴/۵۹	۶/۸۴	-۹/۴۴۷	۰/۰۰۰
قطر متوسط تاج (متر)	-۳/۵۱	۴/۸۶	-۰/۷۲۲	۰/۲۰۶
قطر برابر سینه (سانتی متر)	۱۸/۵۳	۱۲/۹۰	۱/۴۳۶	۰/۱۵۱

همچنین نتایج تحلیل رگرسیونی میان مقادیر واقعی و برآوردی زی توده روی زمینی نشان دهنده برتری مدل مبتنی بر قطر متوسط تاج با ضریب تبیین ۰/۹۳ بود (شکل ۵). به طور کلی، نتایج به دست آمده بیانگر دقت بالاتر برآوردی زی توده در تصویر پهپاد با استفاده از متغیر قطر متوسط تاج بود.



شکل (۵): رابطه رگرسیونی میان مقادیر زی توده واقعی و برآوردی درختان بر مبنای متغیر ارتفاع (الف)، قطر متوسط تاج (ب) و قطر برابر سینه (ج)

۴- بحث و نتیجه گیری

پایش تغییرات زی توده در بومسازگان‌های نیمه خشک زاگرس، برای گردآوری اطلاعات اولیه در راستای مدیریت و توسعه پایدار این اکوسیستم‌های جنگلی امری ضروری است. پهپادها به دلیل برخورداری از وضوح مکانی و انعطاف پذیری زیاد داده‌ها (Wallace et al., 2016) و همچنین امکان استفاده از الگوریتم‌های خودکار در پردازش‌ها (Mlambo et al., 2017) به عنوان ابزاری کارآمد برای برآورد زی توده، در مقیاس محلی مطرح هستند. در همین راستا، مطالعه حاضر به برآورد زی توده روی زمینی درختان تک پایه بلوط ایرانی با استفاده از روابط آلومتریک مبتنی بر ویژگی‌های ساختاری مستخرج از تصاویر پهپاد پرداخته است. براساس نتایج، میانگین ارتفاع برآوردی درختان ۶/۲۴ متر با ضریب تبیین ۰/۷۰، جذر میانگین مربعات خطا ۱/۳۶ متر و اریبی نسبی ۱۶/۶۴ درصد به دست آمد (جدول ۲ و ۴). این نتایج نشان دهنده دقت مناسب تصاویر پهپاد در بازسازی ساختار عمودی جنگل‌های بلوط زاگرس بود. در مطالعه‌ای که توسط کارگر و سهرابی (۱۳۹۸) برای برآورد ارتفاع درختان شمشاد، ممرز، انجیل در منطقه جنگلی سیسنگان با تصاویر پهپاد انجام شده، ضریب تبیین به ترتیب ۰/۳۱، ۰/۴۲ و ۰/۵۹ و جذر میانگین مربعات خطا ۲ تا ۴ متر گزارش شده است. دلیل برتری دقت برآورد ارتفاع بلوط ایرانی در مطالعه حاضر را می‌توان به پراکنش انفرادی درختان، آشکار بودن کامل کف جنگل و تک اشکوبه بودن آنکه منجر به تشکیل دقیق تر مدل رقومی ارتفاع تاج گردیده، نسبت داد. در حالی که در مناطق جنگلی با پوشش مترکم و چند اشکوبه با طبقات ارتفاعی زیاد و متعدد همچون جنگل‌های شمال کشور تولید مدل رقومی ارتفاع دقیق چالش برانگیز است و می‌تواند بر دقت نتایج تأثیر بگذارد.

مزیت استفاده از ابرنقاط برای شناسایی تاج درخت این بود که برخلاف موزائیک تصویر، مشکل تفکیک تاج از سایه درخت در ابرنقاط تصویر وجود نداشت. در این مطالعه میانگین قطر متوسط تاج برآوردی درختان ۳/۷۲ متر با ضریب تبیین ۰/۸۳، جذر میانگین مربعات خطا ۰/۹۱ متر و اریبی نسبی ۷- درصد محاسبه شد (جدول ۲ و ۴). بر این اساس، پارامتر قطر متوسط تاج با کمترین جذر میانگین مربعات خطای نسبی ($RMSE\% = 22/79$) و بالاترین ضریب تبیین، بیشترین دقت برآورد را در مقایسه با متغیرهای ارتفاع و قطر برابر سینه داشت. این نتیجه در مطالعات جنگل‌های بلوط زاگرس بسیار حائز اهمیت است، زیرا درختان بلوط ایرانی دارای تاج گسترده بوده و بخش عمده زی توده روی زمینی درخت را تاج این گونه تشکیل می‌دهد. یافته‌های مطالعات مشابه دیگری نیز همسو با نتایج تحقیق حاضر بوده و بر کارایی و عملکرد خوب تصاویر پهپادها در قطعه‌بندی تاج درختان و برآورد متغیرهای کمی مرتبط با تاج (مساحت تاج، قطر تاج) تأکید دارند (لطیفی، ۱۴۰۱؛ عرفانی فرد و کرافسکی، ۱۴۰۰؛ نصیری و همکاران، ۱۳۹۹؛ Juan-Ovejero et al., 2023). درخصوص متغیر قطر برابر سینه نیز که به صورت غیرمستقیم و از طریق برقراری روابط رگرسیونی چندمتغیره با استفاده از دو متغیر دیگر برآورد گردید، دقت برآورد متوسط بود ($R^2 = 0/55$ و $RMSE\% = 25/51$). در مطالعات مشابهی که در زمینه برآورد متغیر قطر برابر سینه با داده‌های پهپاد انجام گرفته است؛ Zhang et al. (۲۰۲۵) در بررسی گونه درختی *Catalpa* به $R^2 = 0/86$ و $RMSE\% = 13/63$ دست یافتند. در مطالعه دیگری Erfanifard et al. (۲۰۲۵) مقادیر ۰/۹۸ تا $R^2 = 0/82$ و $RMSE\% = 6/7$ را برای درختان کاج گزارش کردند. فلاح و همکاران (۱۴۰۲) نیز با استفاده از داده‌های لیدار هوایی، قطر برابر سینه گونه‌های درختی مختلف (سوزنی برگ و پهن‌رگ) را در جنگل‌های آلپ با $RMSE\% = 19$ و $R^2 = 0/78$ برآورد نمودند. دقت بیشتر برآوردهای انجام شده در مطالعات مذکور نسبت به مطالعه حاضر می‌تواند ناشی از تفاوت در نوع گونه، نوع جنگل، ساختار درخت و روش مدل‌سازی باشد.

به طور کلی، نتایج به دست آمده در مطالعه حاضر دقت مناسب تصاویر پهپاد و مدل رقومی ارتفاع تاج مستخرج از آنها برای تخمین متغیرهای ساختاری اولیه درختان بلوط ایرانی بویژه قطر متوسط تاج و ارتفاع را در منطقه مورد مطالعه اثبات نمود. یافته‌های ما در این خصوص، کاربرد بعدی این متغیرها را برای تخمین زی توده روی زمینی درختان به روش غیر تخریبی از طریق روابط آلومتریک فراهم ساخت. میانگین زی توده روی زمینی برآورد شده بر اساس معادلات مبتنی بر متغیر ارتفاع، قطر متوسط تاج و قطر برابر سینه به ترتیب ۱۳۹/۱۱، ۱۴۶/۷۸ و ۲۶۰/۶۴ کیلوگرم با ضریب تبیین ۰/۶۸، ۰/۹۳ و ۰/۵۶ به دست آمد (جدول ۵ و شکل ۵). در واقع دقت برآورد زی توده از تصویر تحت تأثیر دقت پیش‌بینی متغیرهای اولیه قرار گرفت. بنابراین، زی توده روی زمینی برآورد شده بر مبنای قطر متوسط تاج با بیشترین مقدار ضریب تبیین بالاترین دقت برآورد را داشت ($R^2 = 0/93$). قطر متوسط تاج به عنوان بهترین متغیر در برآورد زی توده روی زمینی درختان بلوط ایرانی در مطالعات متعددی مطرح شده است (عسکری و همکاران، ۱۳۹۵؛ ایرانمنش، ۱۳۹۲). علت این موضوع را می‌توان در تاج گسترده درختان بلوط ایرانی در غرب کشور دانست که بخش عمده زی توده روی زمینی را تاج این گونه تشکیل می‌دهد و همین امر موجب می‌شود که بتوان تغییرات زی توده درخت را بر مبنای قطر تاج به خوبی توجیه کرد (ایرانمنش، ۱۳۹۲، لطیفی، ۱۴۰۱). مقایسه نتایج مطالعه حاضر با یافته‌های تحقیقات مشابه نیز بیانگر دقت مناسب برآورد زی توده در این تحقیق بود. به عنوان مثال در مطالعه کارگر و سهرابی (۱۳۹۸) جذر میانگین مربعات خطای نسبی برآورد زی توده بر مبنای متغیر ارتفاع، ۴۷ درصد با ضریب تبیین ۰/۶۸ به دست آمد. Juan-Ovejero et al. (۲۰۲۳) نیز که زی توده روی زمینی گونه بلوط همیشه سبز را بر اساس معادلات آلومتریک ارتفاع برآورد نمودند، به ضریب تبیین ۰/۶۸ دست یافتند. در مطالعه دیگری، Guerra-Hernández et al. (۲۰۱۷) ضریب تبیین برآورد زی توده روی زمینی درختان کاج را ۰/۸۷ گزارش کردند. بدون شک نوع جنگل به عنوان یک عامل تعیین کننده کلیدی در عملکرد پهپاد بوده و ساختار تاج گونه‌های خاص بر تشخیص تاج و دقت مدل تأثیرگذار خواهند بود. به طور کلی، مطابق نتایج گزارش شده در مطالعات متعدد پیرامون برآورد زی توده و حجم گونه‌های درختی از تصاویر پهپاد، بهترین عملکرد در جنگل‌های مخروطی بویژه جنگل‌های کاج حاصل شده است (Panagiotidis et al., 2016؛ 2017؛ Janiec et al., 2024؛ Barmpoutis et al., 2020). در این میان ساختارهای عمودی نسبتاً ساده و شکل تاج مخروطی بوده و برای استخراج مدل رقومی ارتفاع تاج مناسب هستند. با این وجود در مطالعات محدودی نیز که در جنگل‌های پهن‌برگ انجام شده، نتایج بیانگر قابلیت روش‌های مبتنی بر پهپاد برای برآورد زی توده و ویژگی‌های ساختاری درختان همچون، بلوط همیشه سبز، راش، زیتون می‌باشد (Fernandes et al., 2020؛ Juan-Ovejero et al., 2023؛ Apostol et al., 2020) که با نتایج تحقیق حاضر همخوانی دارد.

در نهایت، نتایج به دست آمده در این مطالعه نشان داد که ابرنقاط حاصل از تصاویر پهپاد امکان پایش و برآورد مقرون به صرفه، غیرتخریبی و با دقت مناسب زی توده روی زمینی بلوط ایرانی را در جنگل‌های زاگرس فراهم می‌کند. در این میان متغیر قطر متوسط تاج و به تبع زی توده روی زمینی برآوردی از معادله آلومتریک مبتنی بر این متغیر، بیشترین دقت برآورد را داشتند. البته پوشش مکانی محدود پهپادها با وجود دقت مناسب همچنان به عنوان یک چالش در مطالعات زی توده جنگل در سطوح وسیع وجود دارد. یافته‌های این تحقیق مبنی بر برتری مدل برآورد زی توده بر مبنای قطر متوسط تاج، نقطه قوت مهمی در مطالعات زی توده روی زمینی جنگل در سطح گسترده از طریق سنجش‌از دور چندمنبعی محسوب می‌شود. از آنجا که در داده‌های سنجش‌از دور همچون تصاویر ماهواره‌ای نوری (با پوشش مکانی وسیع) عمدتاً آنچه که به صورت مستقیم ثبت می‌گردد، اطلاعات مربوط به بازتاب طیفی سطح بالایی تاج پوشش درختان است. در برآورد زی توده روی زمینی جنگل از طریق سنجش‌از دور چندمنبعی، عمدتاً اندازه‌گیری میدانی یا داده‌های هواپرد به عنوان معیار و مرجع با اطلاعات طیفی باندهای مختلف داده‌های نوری ترکیب می‌شود تا امکان گسترش محدوده را فراهم آورد (Tian et al., 2023).

al., 2023). بنابراین، به نظر می‌رسد که بتوان از داده‌های پهپاد به‌عنوان یک ابزار نمونه‌برداری و جایگزین عملیات میدانی با صرف وقت و هزینه کمتر، جهت دستیابی به تعداد زیادی نمونه باکیفیت برای مدل‌سازی برآورد زی‌توده روی‌زمینی در سطوح وسیع جنگل‌های بلوط زاگرس استفاده کرد. بنابراین، پیشنهاد می‌شود تحقیقات آینده بکارگیری داده‌های سنجش از دور چندمنبعی را اولویت قرار داده و بر تعمیم مکانی با تکیه بر ترکیب داده‌های پهپادی و داده‌های چندطیفی ماهواره‌ای، برای برآورد زی‌توده روی‌زمینی جنگل‌های زاگرس در مقیاس‌های مکانی بزرگ‌تر متمرکز شوند. این امر می‌تواند در مدیریت جنگل‌های وسیع زاگرس که در حال حاضر عمدتاً فاقد چنین تخمین‌هایی هستند و نمی‌توان به‌راحتی زی‌توده روی‌زمینی جنگل را پس از وقوع عوامل مخرب متعدد از جمله تغییر کاربری زمین، زوال درختان، افزایش چرای دام و آتش‌سوزی‌های مکرر به‌صورت کمی پایش کرد، بسیار مؤثر باشد.

منابع

- ایرانش، ی. (۱۳۹۲). ارزیابی روش‌های برآورد زی‌توده و ترسیب کربن گونه بلوط ایرانی در جنگل‌های استان چهارمحال و بختیاری. رساله دکتری جنگلداری، دانشکده منابع طبیعی و علوم دریایی نور دانشگاه تربیت‌مدرس، ۱۲۴ص.
- صفری، ا.، و سهرابی، ه. (۱۳۹۹). بهره‌گیری از رویکرد بوت استرپ برای مقایسه روش‌های مدل‌سازی آماری در برآورد سنجش‌ازدوری زی‌توده روی‌زمینی جنگل‌های زاگرس. سنجش‌ازدور و سامانه اطلاعات جغرافیایی در منابع طبیعی، (۱۱)۲، ۶۷-۴۹.
- عرفانی فرد، س. ی.، و کرافسکی، ب. (۱۴۰۰). برآورد ویژگی‌های کمی و کیفی بنه و بادام روی ابرنقاط تصاویر پهپاد. تحقیقات جنگل و صنوبر ایران، (۱)۲۹، ۲۶-۱۳.
- عسکری، ی.، سلطانی، ع.، و اخوان، ر. (۱۳۹۵). اندازه‌گیری و برآورد ترسیب کربن در جنگل‌های زاگرس میانی بر اساس زی‌توده دو گونه برودار (*Quercus brantii* Lindl.) و وامچک (*Amygdalus arabica oliv*). رساله دکتری جنگلداری، دانشکده منابع طبیعی و علوم زمین دانشگاه شهرکرد، ۱۴۲ص.
- فلاح، م.، متکان، ع.، و عقیقی، ح. (۱۴۰۲). برآورد ارتفاع و قطربرابرسینه درختان جنگل با روش تشخیص تک درخت چندمقیاسی و الگوریتم‌های یادگیری ماشین با استفاده از داده‌های لایدار هوایی. تحقیقات جنگل و صنوبر، (۲)۳۲، ۱۳۰-۱۱۳.
- قیصر بیگی، س.، پیرباوقار، م.، و ولی پور، ا. (۱۴۰۳). برآورد زی‌توده روی‌زمینی جنگل با استفاده از تصاویر ماهواره‌ای و مدل رگرسیون جنگل تصادفی. جغرافیا و پایداری محیط، (۱)۱۴، ۸۵-۱۰۰.
- کارگر، م.، و سهرابی، ه. (۱۳۹۸). برآورد زیست توده درختان با استفاده از ابر نقاط متراکم استخراج‌شده از تصاویر پهپاد در سطح تک‌درخت، قطعه‌نمونه و ترکیبی. مهندسی و فناوری اطلاعات مکانی، (۷)۳، ۲۳۰-۲۱۳.
- لطیفی، ه. (۱۴۰۱). فرصت‌ها و چالش‌های کاربرد پهپادهای تصویربرداری اقتصادی در آماربرداری جنگل‌های زاگرس. تحقیقات جنگل و صنوبر ایران، (۳)۳۰، ۲۹۸-۳۰۷.
- میرکی، م.، سهرابی، ه.، و ایمیتزر، م. (۱۴۰۲). برآورد زی‌توده و ذخیره کربن جنگل‌های مانگرو با استفاده از متغیرهای مستخرج از تصاویر پهپاد. علوم و فنون نقشه‌برداری، (۳)۱۳، ۱-۱۱.
- نصیری، و.، درویش‌صفت، ع.، عارفی، ح.، و نمیرانیان، م. (۱۳۹۹). برآورد قطر متوسط تاج درختان با استفاده از تصاویر هوایی پهپاد بر مبنای روش‌های قطعه‌بندی چندمقیاسه و حوزه آبخیز (مطالعه موردی: جنگل خیرود). جنگل ایران، (۱)۱۲، ۱۴۵-۱۳۱.
- Aiken, L.S., West, S.G., and Pitts, S.C. (2003). Multiple linear regression. Handbook of Psychology, 481-507.
- Anderson, K., and Gaston, K.J. (2013). Lightweight unmanned aerial vehicles will revolutionize spatial ecology. Frontiers in Ecology and the Environment, 11(3), 138-146.
- Apostol, B., Petrilă, M., Lorenț, A., Ciceu, A., Gancz, V., and Badea, O. (2020). Species discrimination and individual tree detection for predicting main dendrometric characteristics in mixed temperate forests by use of airborne laser scanning and ultra-high-resolution imagery. Science of The Total Environment, 698, 134074.
- Barmpoutis, P., Kamperidou, V., and Stathaki, T. (2020, January). Estimation of extent of trees and biomass infestation of the suburban forest of Thessaloniki (Seich Sou) using UAV imagery and combining R-CNNs and multichannel texture analysis. In Twelfth International Conference on Machine Vision (ICMV 2019) (Vol. 11433, pp. 910-917). SPIE.
- Blanchard, E., Birnbaum, P., Ibanez, T., Boutreux, T., Antin, C., Ploton, P., ... and Coutron, P. (2016). Contrasted allometries between stem diameter, crown area, and tree height in five tropical biogeographic areas. Trees, 30(6), 1953-1968.
- Chaturvedi, R.K., and Raghubanshi, A.S. (2013). Aboveground biomass estimation of small diameter woody species of tropical dry forest. New Forests, 44(4), 509-519.
- Dellaert, F., Seitz, S.M., Thorpe, C.E., and Thrun, S. (2000, June). Structure from motion without correspondence. In Proceedings IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition. CVPR 2000 (Cat. No. PR00662) (Vol. 2, pp. 557-564). IEEE.
- Erfanifard, Y., Hosingholizade, A., Griess, V.C., Millan, V.E.G., and Pirasteh, S. (2025). Estimating tree diameter at breast height (DBH) from UAV data: A comparison of oblique-vertical imagery fusion and allometric modeling. Science of Remote Sensing, 12, 100331.
- Favero, A., Daigneault, A., and Sohngen, B. (2020). Forests: Carbon sequestration, biomass energy, or both? Science advances, 6(13), eaay6792.
- Fernandes, M.R., Aguiar, F.C., Martins, M.J., Rico, N., Ferreira, M.T., and Correia, A.C. (2020). Carbon stock estimations in a mediterranean riparian forest: A case study combining field data and UAV imagery. Forests, 11(4), 376.
- Gonzalez-Benecke, C.A., Gezan, S.A., Samuelson, L.J., Cropper Jr, W.P., Leduc, D.J., and Martin, T.A. (2014). Estimating Pinus palustris tree diameter and stem volume from tree height, crown area and stand-level parameters. Journal of Forestry Research, 25(1), 43-52.
- Guerra-Hernández, J., González-Ferreiro, E., Monleón, V.J., Faias, S.P., Tomé, M., and Díaz-Varela, R.A. (2017). Use of multi-temporal UAV-derived imagery for estimating individual tree growth in Pinus pinea stands. Forests, 8(8), 300.
- Janiec, P., Hawryło, P., Tymńska-Czabańska, L., Miszczyszyn, J., and Socha, J. (2024). A low-cost alternative to LiDAR for site index models: applying repeated digital aerial photogrammetry data in the modelling of forest top height growth. Forestry: An International Journal of Forest Research, 1-11.

- Juan-Ovejero, R., Elghouat, A., Navarro, C.J., Reyes-Martín, M.P., Jiménez, M.N., Navarro, F.B., and Castro, J. (2023). Estimation of aboveground biomass and carbon stocks of *Quercus ilex* L. saplings using UAV-derived RGB imagery. *Annals of Forest Science*, 80(1), 44.
- Ketterings, Q.M., Coe, R., van Noordwijk, M., and Palm, C.A. (2001). Reducing uncertainty in the use of allometric biomass equations for predicting above-ground tree biomass in mixed secondary forests. *Forest Ecology and Management*, 146(1-3), 199-209.
- Kumar, L., and Mutanga, O. (2017). Remote sensing of above-ground biomass. *Remote Sensing*, 9(9), 935.
- Lu, D. (2005). Aboveground biomass estimation using Landsat TM data in the Brazilian Amazon. *International Journal of Remote Sensing*, 26(12), 2509-2525.
- Lu, D. (2006). The potential and challenge of remote sensing-based biomass estimation. *International journal of Remote Sensing*, 27(7), 1297-1328.
- Manfreda, S., McCabe, M.F., Miller, P.E., Lucas, R., Pajuelo Madrigal, V., Mallinis, G., ... and Toth, B. (2018). On the use of unmanned aerial systems for environmental monitoring. *Remote Sensing*, 10(4), 641.
- Mlambo, R., Woodhouse, I.H., Gerard, F., and Anderson, K. (2017). Structure from motion (SfM) photogrammetry with drone data: A low cost method for monitoring greenhouse gas emissions from forests in developing countries. *Forests*, 8(3), 68.
- Mohan, M., Silva, C.A., Klauber, C., Jat, P., Catts, G., Cardil, A., Hudak, A.T., and Dia, M. (2017). Individual tree detection from unmanned aerial vehicle (UAV) derived canopy height model in an open canopy mixed conifer forest. *Forests*, 8(9), 340.
- Moradi, F., Sadeghi, S.M.M., Heidarlou, H.B., Deljouei, A., Boshkar, E., and Borz, S.A. (2022). Above-ground biomass estimation in a Mediterranean sparse coppice oak forest using Sentinel-2 data. *Annals of Forest Research*, 65(1), 165-182.
- Munteanu, D., Moldovanu, S., Murariu, G., and Dinca, L. (2026). Sustainable Estimation of Tree Biomass and Volume Using UAV Imagery: A Comprehensive Review. *Sustainability*, 18(2), 1095.
- 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.
- Qureshi, A., Badola, R., and Hussain, S.A. (2012). A review of protocols used for assessment of carbon stock in forested landscapes. *Environmental Science & Policy*, 16(1), 81-89.
- Ruwaimana, M., Satyanarayana, B., Otero, V., Muslim, A.M., Syafiq, M., Ibrahim, S., ... and Dahdouh-Guebas, F. (2018). The advantages of using drones over space-borne imagery in the mapping of mangrove forests. *PloS one*, 13(7), e0200288.
- Safari, A., and Sohrabi, H. (2020). Integration of synthetic aperture radar and multispectral data for aboveground biomass retrieval in Zagros oak forests, Iran: an attempt on Sentinel imagery. *International Journal of Remote Sensing*, 41(20), 8069-8095.
- Steininger, M.K. (2000). Satellite estimation of tropical secondary forest above-ground biomass: data from Brazil and Bolivia. *International Journal of Remote Sensing*, 21(6-7), 1139-1157.
- Tian, L., Wu, X., Tao, Y., Li, M., Qian, C., Liao, L., and Fu, W. (2023). Review of remote sensing-based methods for forest aboveground biomass estimation: Progress, challenges, and prospects. *Forests*, 14(6), 1086.
- Torabzadeh, H., Moradi, M., and Fatehi, P. (2019). Estimating aboveground biomass in zagros forest, Iran, using sentinel-2 data. *The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, 42, 1059-1063.
- Verma, N.K., Lamb, D.W., Reid, N., and Wilson, B. (2014). An allometric model for estimating DBH of isolated and clustered *Eucalyptus* trees from measurements of crown projection area. *Forest Ecology and Management*, 326, 125-132.
- Wallace, L., Lucieer, A., Malenovsky, Z., Turner, D., and Vopěnka, P. (2016). Assessment of forest structure using two UAV techniques: A comparison of airborne laser scanning and structure from motion (SfM) point clouds. *Forests*, 7(3), 62.
- Wan Mohd Jaafar, W.S., Woodhouse, I.H., Silva, C.A., Omar, H., Abdul Maulud, K.N., Hudak, A.T., ... and Mohan, M. (2018). Improving individual tree crown delineation and attributes estimation of tropical forests using airborne LiDAR data. *Forests*, 9(12), 759.
- Wu, X., Shen, X., Zhang, Z., Cao, F., She, G., and Cao, L. (2022). An advanced framework for Multi- Scale forest structural parameter estimations based on UAS-LiDAR and Sentinel-2 satellite imagery in forest plantations of Northern China. *Remote Sensing*, 14(13), 3023.
- Zhang, Y., Liang, S., and Yang, L. (2019). A review of regional and global gridded forest biomass datasets. *Remote Sensing*, 11(23), 2744.
- Zhang, Y., Zhang, M., Chen, Q., Fu, L., Ma, W., Duan, G., ... and Li, P. (2025). Predicting individual tree diameter at breast height for genetically diverse *Catalpa bungei* using nonlinear mixed-effects models and UAV LiDAR data. *Frontiers in Plant Science*, 16, 1716546.

Estimation of Aboveground Biomass of Persioan Oak (*Quercus brantii*) Using Structural Parameters Extracted from UAV data (Case study: Zagros Forests, Lordegan)

Masoumeh Baharlouii^{1*}, Mozghan Abbasi², HamidReza Rivahi Bakhtyari³



Research Article

1. Ph.D. student, Department of forest sciences, Faculty of natural resources and earth sciences, Shahrekord university, Shahrekord, Iran.

masoomebaharloie70@gmail.com

* Corresponding author

2. Associate Professor, Department of forest sciences, Faculty of natural resources and earth sciences, Shahrekord university, Shahrekord, Iran.

mozghan.abasi@gmail.com

3. Assistant Professor, Department of forest sciences, Faculty of natural resources and earth sciences, Shahrekord university, Shahrekord, Iran.

reza_reyahi@yahoo.com

Article Code: 2604-1164

Countinus Pagation: 1305-1315

Received: 26 April 2026

Accepted: 15 June 2026

Online: 19 June 2026

Review speed: 51 days

Citation:

Baharlouii, M., Abbasi, M., and Rivahi Bakhtyari, H. (2026). Estimation of Aboveground Biomass of Persioan Oak (*Quercus brantii*) Using Structural Parameters Extracted from UAV data (Case study: Zagros Forests, Lordegan). Management of Natural Ecosystems, 6(1), 46-56.

Abstract

Accurate assessment of aboveground biomass is highly important for the sustainable management of Zagros oak forests, which, on the one hand, have high biodiversity and, on the other hand, are considered degraded ecosystems due to human use. The aim of present study is to estimate the Above-Ground Biomass of *Quercus brantii* trees in the Qaleh Madrese forest, area of Lordegan using structural parameters extracted from UAV imagery through a non-destructive approach. For this purpose, diameter at breast height, tree height, and mean crown diameter of 240 trees were measured in field operations, and the actual biomass was calculated using allometric equations. After detecting the tree crown in the image using a canopy height model and the inverse watershed algorithm, tree height and mean crown diameter were estimated for each tree. In addition, the diameter at breast height was estimated using a multiple linear regression model based on the other two variables. Finally, the estimated parameters were incorporated into the allometric equations to estimate biomass from the imagery. According to the obtained results, the relative root mean square error for height, mean crown diameter, and diameter at breast height was 25.51%, 22.79% and 31.74%, respectively, with corresponding coefficients of determination (R^2) of 0.70, 0.83, and 0.55. The mean estimated aboveground biomass based on these variables was 139.11, 146.78, and 260.46 kg, respectively, with corresponding R^2 values of 0.68, 0.93, and 0.56. The results also showed that the estimation accuracy of mean crown diameter with an R^2 value of 0.83, and the biomass estimation model based on this variable, with an R^2 value of 0.93 was higher than that of the other two variables. Overall, the findings of this study demonstrated that UAV monitoring and quantifying the structural parameters of *Quercus brantii* trees and estimating their aboveground biomass, and can be used as a useful tool for sustainable management and conservation planning in these ecosystems.

Key Words:

Allometric, Height, *Quercus brantii*, Above-Ground Biomass, Mean Crown Diameter.