مقاله کوتاه

نشریه علمی تحقیقات جنگل و صنوبر ایران
جلد ۳۰ شماره ۳، صفحه ۳۰۷-۲۹۹، (۱۴۰۱)

شناسه دیجیتال (DOI): 10.22092/ijfpr.2023.361410.2086
شناسه دیجیتال (DOR): 20.1001.1.17350883.1401.30.3.7.5

فرصت‌ها و چالش‌های کاربرد پهپادهای تصویربرداری اقتصادی در آماربرداری جنگل‌های زاگرس

هومن لطیفی

دانشیار، گروه فتوگرامتری و سنجش از دور، دانشکده مهندسی نقشه‌برداری، دانشگاه صنعتی خواجه‌نصیرالدین طوسی، تهران، ایران

پست الکترونیک: hooman.latifi@kntu.ac.ir

تاریخ دریافت: ۱۴۰۱/۱۰/۲۰ تاریخ پذیرش: ۱۴۰۱/۱۱/۱۸

چکیده

اندازه‌گیری و آماربرداری جنگل در بوم‌سازگان‌های نیمه‌خشک و توده‌های حفاظتی مانند جنگل‌های زاگرس برای گردآوری اطلاعات اولیه و ثانویه زیست‌سنجی، بوم‌شناختی و حفاظتی- حمایتی از این جنگل‌ها ضروری است. در حالی‌که محدودیت‌های دسترسی، زمانی، لجستیکی، مالی و کمبود نیروی متخصص مانع از اجرای به‌هنگام و متوالی طرح‌های آماربرداری در زاگرس می‌شود، در این نوشتار به اختصار به موضوع کاربرد داده‌ها و روش‌های مبتنی بر پرنده‌های هدایت‌پذیر از دور (پهپادهای) اقتصادی به‌عنوان جایگزین یا مکمل آماربرداری در این نواحی پرداخته خواهد شد. چالش‌ها و فرصت‌های مربوط به این تصاویر به‌دست‌آمده از پهپادها در پایه‌ای‌ترین حالت ممکن (پرواز نادیر، تصاویر محدوده مرئی و سنجنده گیمبال ثابت) به اختصار بررسی می‌شود و در پیوند با متغیرهای اساسی اولیه و ثانویه آماربرداری جنگل در زاگرس بحث خواهند شد. یافته‌ها و پیشنهادهای این مقاله برای تسهیل تصمیم‌سازی مدیران و پژوهشگران در ناحیه رویشی زاگرس تنظیم شده‌اند.

واژه‌های کلیدی: بوم‌سازگان‌های نیمه‌خشک، پرواز نادیر، فتوگرامتری، مدل‌های رقومی زمین و سطح.

مقدمه

آماربرداری و جمع‌آوری اطلاعات از وضعیت فعلی جنگل‌ها پیش‌نیاز تحلیل‌های ساختاری، تحلیل‌های بیانگر تنوع گونه‌ای، تجدیدحیات و نیز تحلیل زوال و تغییرات کمی و کیفی آن‌ها و درنهایت پیش‌شرط ارزیابی وضعیت فعلی و ارزیابی خدمات بوم‌سازگانی آن‌ها است. با تمرکز بر بحث ساختار جنگل، باید توجه کرد که ویژگی‌های اولیه ساختار شامل تعداد درختان، ترکیب گونه‌ای، اندازه درختان و زی‌توده روی‌زمینی تشکیل‌دهنده بخش مهمی از متغیرهای مورد اندازه‌گیری در هر آماربرداری هستند. به‌همین دلیل، اخذ آمار و اطلاعات به‌هنگام از آن‌ها، ضمن کارکرد مستقل، به‌عنوان پیش‌نیازی برای استخراج ویژگی‌های ثانویه‌ای مانند سطح کل برگ، مجموع زی‌توده درخت و چندین خدمت بوم‌سازگانی دیگر اهمیت دارد. به‌عنوان نمونه، ارتفاع و قطر برابر سینه ازجمله ویژگی‌های اساسی در اندازه گیری جنگل هستند که در بسیاری از معادلات آلومتریک برای برآورد زی‌توده روی‌زمینی استفاده می‌شوند و درنهایت در زمره اطلاعات اساسی جهت پیکربندی چرخه کربن جنگل (Chave *et al*., 2005) و بررسی تأثیر تغییر اقلیم بر بوم‌سازگان در سطوح مکانی و زمانی مختلف محسوب می‌شوند. امروزه داده‌ها و روش‌های مبتنی بر علوم مکانی (Geomatics) مانند فتوگرامتری و سنجش از دور چه به‌عنوان جایگزین و چه به‌عنوان مکمل نقش غیرقابل‌انکاری در بخش‌های پژوهشی و اجرایی علوم جنگل ایفا می‌کنند.

از بین حسگرها و سکوهای متعدد موجود و به‌ویژه در جنگل‌داری کوچک‌مقیاس (Small-scale forestry) می‌توان به پرنده‌های تصویربردار هدایت‌پذیر از دور یا پهپادها (Imaging unmanned aerial vehicles) اشاره کرد. این ابزارها شامل مجموعه‌ای از ربات‌های پرنده هستند که در پایه‌ای‌ترین حالت خود مجهز به یک سکوی نصب یا گیمبال (Gimbal) ثابت یا بازشونده، واحدی مشتمل بر یک یا چند سنجنده قابل‌حمل (Payload)، یک سیستم موقعیت‌یاب جهانی و یک واحد اندازه‌گیری اینرسی (GPS/IMU) و یک واپایشگر (Controller) هستند و در انواع ملخی (Copter) و بال‌ثابت (Fixed-wing) تولید می‌شوند. این پرنده‌ها در انواع سطوح از نظر برد پروازی، سیستم موقعیت‌یاب، وزن قابل حمل و گیمبال تولید می‌شوند و بسته به نوع و فن‌آوری به‌کاررفته، قابلیت حمل یک یا چند سنجنده را دارند. در اقتصادی‌ترین حالت ممکن برای بررسی‌های علمی، سنجنده‌های غیرفعال (Passive) با وضوح مکانی زیاد (حداقل ۱۲ مگاپیکسل) نصب‌شده روی گیمبال ثابت یک پرنده چهارملخه (Quadcopter) امکاناتی را برای تصویربرداری استریو و سپس برای استخراج مدل‌های سه‌بعدی ارائه می‌دهند و امکان ثبت سطح تاج از طریق الگوریتم‌های تناظریابی تصویر (Image matching) و تکنیک‌های پس‌پردازش (Post-processing) را فراهم می‌کند. اگرچه پرنده‌های بال‌ثابت اغلب قابلیت پرواز بسیار طولانی‌تری را دارند (Fakhri & Latifi, 2021)، ارزان‌تر بودن (اغلب کمتر از ۱۰۰۰ دلار در اقتصادی‌ترین حالت ممکن) و نیز پرواز و فرود آسان‌تر پرنده‌های ملخی سبب انعطاف‌پذیری بیشتر آن‌ها شده برای استفاده در پژوهش‌های علمی شده است.

به‌رغم فرصت‌های چندی که استفاده روزافزون از پهپادهای اقتصادی برای اندازه‌گیری جنگل‌ها (به‌طور عام) و جنگل‌های زاگرس (به‌طور خاص) فراهم می‌سازد، کاربرد این ابزار با چالش‌هایی نیز همراه است. به‌طور خلاصه می‌توان از توان تفکیک مکانی بسیار زیاد (در حد سانتی‌متر)، برآورد نزدیک به اندازه‌گیری ارتفاع درختان و نیز حل چالش اندازه‌گیری متغیرهای مسطحاتی تاج به‌عنوان مهم‌ترین فرصت‌ها نام برد. درنقطه مقابل، محدودیت سطوح عملیاتی، نیاز به مکان‌یابی دقیق، محدودیت‌های امنیتی در مناطق مرزی و حساس و محدودیت باندهای طیفی به ناحیه مرئی از مهم‌ترین چالش‌ها در این حوزه هستند. در این مقاله به مرور کوتاه برخی چالش‌ها، فرصت‌ها و نکات قابل تأمل در استفاده از این نوع پرنده‌ها در جنگل‌های زاگرس پرداخته می‌شود و سعی خواهد شد به کمک اطلاعات ارائه‌شده، پاسخی بر این پرسش که حدومرز استفاده از داده‌ها و تکنیک‌های مبتنی بر پرنده‌های اقتصادی در آماربرداری در ناحیه زاگرس کجاست، داده شود. به‌عبارت دیگر، پرسش اصلی که این نوشتار به‌دنبال یافتن پاسخی برای آن خواهد بود، این است که آیا ضروری است مدیران و مسئولان متولی، استفاده از پرنده‌های اقتصادی را به‌عنوان یک منبع اصلی و یا کمکی در آماربرداری جنگل‌های زاگرس درنظر گیرند؟

چالش‌ها و فرصت‌های استفاده از داده‌ها و فنون مبتنی بر پهپادهای اقتصادی

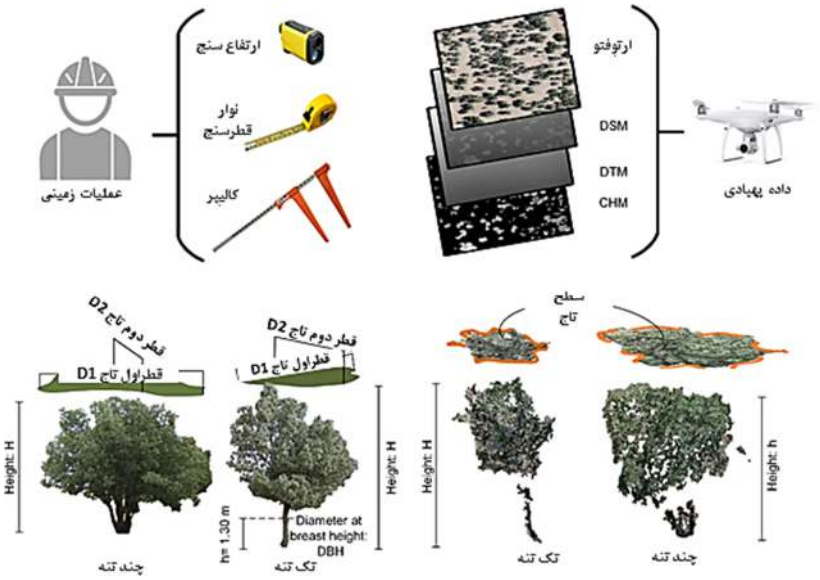
روش‌های مرسوم آماربرداری از متغیرهای اصلی آلومتریک که ریشه در علم آماربرداری زمینی جنگل دارند، عموما پرهزینه و وقت‌گیر بوده و به‌ویژه برای تعمیم مکانی از سطح تک‌درخت به قطعه‌نمونه و نیز از قطعه‌نمونه به سطوح بزرگ‌تر غیرکاربردی و بعضاً نادقیق هستند (Fieber *et al.*, 2015). علاوه‌براین، یکی از موانع اصلی این اندازه‌گیری‌ها، عدم وجود دید کافی سطح تاج درختان (به‌ویژه در درختان پهن‌برگ) است. یکی از راه‌های تسهیل این موضوع، امکان مشاهده نادیر با وضوح بسیار زیاد مکانی برای اندازه‌گیری‌های همزمان دو و سه‌بعدی با مشاهده کامل سطح تاج درختان است که اغلب تنها با داده‌ها و روش‌های مبتنی بر تحلیل تصاویر فتوگرامتری هوایی و یا داده‌های ماهواره‌ای چندزاویه‌ای (Multi-angular) دارای توان تفکیک مکانی بسیار زیاد (Very high resolution imagery) امکان‌پذیر است. اگر برآورد نزدیک به اندازه‌گیری ارتفاع درختان را به‌عنوان مهم‌ترین آورده عملی استفاده از چنین تصاویری

پذیرفته شود، می‌توان از آن برای برآورد طیف وسیعی از دیگر متغیرهای تاج درخت ازجمله سطح و قطر (Panagiotidis *et al*., 2017) استفاده کرد. با این‌وجود، محدودیت‌های بسیاری بر سر راه استفاده از این طیف متنوع از داده‌ها وجود دارند که کاربرد برخی از آن‌ها را در هر شرایطی به‌شدت محدود می‌کنند. به‌عنوان نمونه، داده‌های ماهواره‌ای چندزاویه‌ای شامل مثال‌های فراوانی مانند داده‌های تجاری سری WorldView، SPOT 6-7، Pleiades، GaoFen و PLANET هستند که فارغ از پوشش محدود، به‌دلیل مبتنی بر تقاضا و تجاری بودن، واجد پیچیدگی دسترسی برای کاربران ایرانی در شرایط تحریمی بوده و حتی به شرط دسترسی با حداقل قیمتی حدود ۱۲ دلار در کیلومتر عرضه می‌شوند (https://landinfo.com/satellite-imagery-pricing/) که کاربرد آن‌ها را به سطوح محدود مکانی و اهداف فقط پژوهشی محدود می‌کند. سنجنده‌های لیزری هوایی (Airborne LiDAR) (Maltamo *et al*., 2014) و نیز داده‌های راداری به‌طور گسترده و به‌طور عمده در سطوح کوچک‌تر از حوزه آبخیز استفاده شده‌اند که به‌رغم دقت برآورد اغلب زیاد، از نظر مالی و نیز لجستیک بسیار محدود هستند (Goodbody *et al*., 2019). باتوجه‌به چالش‌های ذکر شده، اخذ داده‌ها در سطوح کوچک با سنجنده‌های غیرفعال پهپادهای اقتصادی در سالیان اخیر بسیار رایج بوده و امکان تولید مدل‌های سه‌بعدی زمین (DTM) و سطح (DSM) در سطوح کوچک را فراهم می‌کنند (Puliti *et al*., 2019) که می‌تواند منتج‌به استخراج اطلاعات ساختاری از سطح جنگل به‌وسیله کاربرد الگوریتم‌های تناظریابی تصاویر (Image matching) و سپس پردازش سه‌بعدی آن‌ها شود (Krause *et al*., 2019). اگرچه سنجنده‌های هوایی غیرفعال اجازه اخذ مستقیم داده‌ها از زیراشکوب تاج اصلی جنگل را نمی‌دهند، اما در اندازه‌گیری ویژگی‌های ساختاری افقی و عمودی برای توده‌های تک‌اشکوبه و فاقد ساختار عمودی پیچیده مفید هستند. به‌عبارت دیگر، در این زمینه باید به‌طور ویژه بر این نکته تأکید کرد که داده‌های استریو حاصل از سنجنده‌های هوایی غیرفعال اساساً فاقد توانایی نفوذ در تاج درختان بوده و به‌همین دلیل در حالت نادیر (عمودی) منابع مناسبی برای برآورد متغیرهای تنه درختان به‌شمار نمی‌روند. پس در مقطع فعلی تمرکز این نوشتار بیشتر بر برآورد ارتفاع درختان و نیز متغیرهای تاج استوار خواهد بود.

پژوهش‌های متعددی درمورد برآورد ارتفاع درختان با استفاده از روش‌های فتوگرامتری و سنجش از دور و با استفاده از داده‌های سنجنده‌های فعال و غیرفعال انجام شده که قدمتی بیش از ۷۰ سال دارند (به‌عنوان نمونه، Guimarães *et al*. 2020). همچنین، قطر برابر سینه یکی دیگر از متغیرهای اساسی ساختاری جنگل به‌ویژه در درختان تک‌تنه (فارغ از جستی یا بذری بودن مبدأ آن‌ها) است. اگرچه قطر برابر سینه را می‌توان برای تعداد محدودی از درختان به‌راحتی با روش‌های سنتی مبتنی بر استفاده از خط‌کش دوبازو یا نوار قطرسنج در عرصه اندازه‌گیری کرد، اما بازهم مشکلاتی در تعمیم مکانی آن حتی از سطح تک‌درخت به قطعه‌نمونه و به‌ویژه در مناطق دورافتاده و صعب‌العبور و یا در توده‌هایی که دربرگیرنده تنوع فرم‌های رویشی درختان هستند، وجود دارد (Lizuka *et al*., 2018). در چنین مواردی، استفاده از روش‌های فتوگرامتری پهپاد به‌عنوان یک گزینه مناسب (به‌ویژه از منظر تعمیم مکانی از تک‌درخت به قطعه‌نمونه) راه‌گشا است (Ota *et al*., 2015). به‌طور کلی، پژوهش‌هایی که در آن‌ها از داده‌های با توان تفکیک مکانی بسیار زیاد برای برآورد مستقیم قطر برابر سینه استفاده شده است، بر استفاده از داده‌های LiDAR و ابر نقاط متراکم به‌دست‌آمده از آن‌ها متمرکز بوده‌اند (Puliti *et al*., 2020)، در حالی‌که داده‌های غیرفعال پهپاد در حالت نادیر به‌دلیل پوشش تاج درختان در نفوذ به زیر سطح تاج اصلی و مشاهده عوارض زیر تاج پوشش کاربردی در این زمینه ندارند (Machimura *et al*., 2021). بنابراین، دستیابی به این امر با فرض استفاده از سکوهای پهپاد اقتصادی مستلزم کاربرد یکی از دو راه زیر است:

۱) برآورد غیرمستقیم قطر برابر سینه با استفاده از داده‌های سه‌بعدی فتوگرامتری پهپاد در حالت نادیر و سپس استفاده از روابط مدل‌سازی مانند همبستگی قطر برابر سینه و ارتفاع

درخت (Jucker *et al*., 2017) و یا همبستگی قطر برابر سینه و سطح تاج (Zagalikis et al., 2005) که در این زمینه پژوهش Fakhri و Latifi (۲۰۲۱) نمونه بارزی از کاربرد و عملکرد این مدل‌ها در جنگل‌های زاگرس میانی به‌شمار می‌رود (شکل ۱).



شکل ۱- روند شماتیک اندازه‌گیری برخی متغیرهای اولیه آماربرداری در دو روش پهپاد و زمینی در جنگل‌های زاگرس. ارتفاع سنج: **height measurer**، نوار قطرسنج:**diameter tape** ، کالیپر: **caliper**، تک تنه: **single-stem**، چندتنه: **multi-stem**

Figure 1. A schematic representation of measuring a number of primary forest inventory attributes in UAV- and field-based approaches

۲) طراحی و اجرای همزمان پروازهای نادیر و مایل (Oblique) که در نتیجه آن امکان تهیه دو نوع ابرنقاط با هندسه پروازی متفاوت ایجاد می‌شود و درنهایت با تلفیق (Fusion) این دو داده می‌توان به ابرنقاط سومی دست یافت که علاوه بر تراکم بیشتر نسبت‌به دو ابر نقاط پیشین، حاوی جزئیات بیشتری از برخی عوارض اصلی زیر تاج مانند تنه درختان خواهد بود. البته، در این زمینه باید توجه داشت که موفقیت در این روش وابستگی بسیاری به عواملی مانند نوع روش تناظریابی استفاده‌شده برای تولید ابرنقاط و ثبت آن‌ها به یکدیگر و نیز تراکم و تنوع ساختار عمودی توده مورد بررسی دارد. درمورد عامل دوم، جنگل‌های زاگرس (به‌ویژه در نواحی میانی و جنوبی) اغلب شامل ساختار عمودی تک‌اشکوبه هستند و نیز وجود فواصل بین درختی امکان اخذ اطلاعات تنه از ابرنقاط را فراهم می‌کند. با این‌وجود، کاربرد این روش در جنگل‌های زاگرس در مراحل ابتدایی است و ارزیابی قطعی نتایج آن موکول به تکمیل پروژه‌های پژوهشی است.

علاوه‌بر متغیرهای اولیه آماربرداری مانند ارتفاع، سطح تاج و قطر، محتوای متغیرهای ثانویه‌ای مانند حجم سرپا و زی‌توده روی‌زمینی جنگل به‌طور عمده به ساختار توده و نیز تفاوت‌های بین‌گونه‌ای مربوط است (Lewis *et al*., 2013) و بنابراین شاخص مهمی برای اندازه‌گیری ظرفیت ترسیب کربن محسوب می‌شوند (Brahma *et al*., 2018). روش‌های مستقیم برای برآورد زی‌توده روی‌زمینی شامل روش‌های تخریبی است (Chave *et al*., 2005)، در حالی‌که معادلات آلومتریک اغلب به‌عنوان روش‌های غیرمستقیم شناخته می‌شوند (Pothong *et al*., 2021). در پژوهش Fakhri و Latifi (۲۰۲۱) ایده بازتولید مدل‌های آلومتریک زی‌توده

برای درختان بلوط زاگرس در هر دو فرم شاخه‌زاد و دانه‌زاد با متغیرهای درختی برآوردشده از پهپاد بررسی شد تا در راستای اجرای عملی نتایج از آن استفاده شود. برای این منظور، قطر برابر سینه با رگرسیون خطی بر ارتفاع و سطح تاج برآورد و سپس در معادلات آلومتریک برای استخراج زی‌توده جایگذاری شد.

فناوری پهپاد امکان برآوردهای کوچک‌مقیاس براساس مشتقات توپوگرافیکی مانند مدل‌های رقومی سطح (DSM) را فراهم کرده است که می‌تواند در تولید محصولات جانبی مانند مدل رقومی زمین (DTM) و نیز کالیبره کردن مدل‌های مکانی استفاده شوند. روند تولید مدل‌های رقومی زمین در مناطق جنگلی شامل درون‌یابی بین پیکسل‌های حاوی زمین و غیرزمین است (Bandara *et al*., 2011) و به همین دلیل محاسبه آن با چالش اصلی نبود یا کمبود پیکسل‌های زمین بدون درخت در توده‌های متراکم مواجه است (Mlambo *et al*., 2017). از این منظر، توده‌های درختی تنک مانند اکثر توده‌های جنگلی زاگرس (به‌ویژه در نواحی میانی و جنوبی) تسهیل‌کننده استفاده از مدل‌های فتوگرامتری برای محاسبه مدل رقومی زمین و درنهایت محاسبه مدل‌های ارتفاع تاج (CHM = DSM-DTM) هستند (شکل ۱). از دیگر متغیرهای اولیه مرتبط می‌توان به تفکیک درختان تک‌تنه و چندتنه (فارغ از مبدأ) با داده‌های پهپاد اشاره کرد که تاکنون اغلب موضوع پژوهش‌ها مبتنی بر داده‌های لایدار هوابرد بوده‌اند (Bottalico *et al*., 2014). نتایج تحلیل‌های اولیه‌ای که توسط نگارنده و همکاران بر طبقه‌بندی باینری درختان زاگرسی با تصاویر نادیر پهپاد به‌دست آمد نشان‌دهنده دقت بیشینه حدود ۷۰ درصدی در تفکیک این درختان است که بیان نتایج قطعی در این مورد نیاز به تکمیل پژوهش‌ها در سایت‌های متعدد که شامل درختان تک‌تنه و چندتنه با تنوع فرم تاجی، توپوگرافی و زوایای قرارگیری تنه هستند، دارد. همچنین، در این زمینه تلفیق ابرنقاط حاصل از داده‌های نادیر و مایل می‌تواند راهگشا باشد.

به‌طور خلاصه و برای خاتمه این بخش باید به تعدادی دیگر از متغیرهای آماربرداری مرتبط اشاره کرد. جداسازی یا قطعه‌بندی تاج درختان (Tree crown segmentation) یکی از مهم‌ترین متغیرهای اولیه حاصل از پردازش داده‌های تصویری با توان تفکیک مکانی زیاد و یکی از پیش‌نیازهای مجموعه‌ای از پردازش‌های بعدی مانند محاسبه نرخ سرخشکیدگی/زوال (متغیر ثانویه)، برآورد حجم و زی‌توده در واحد تک‌درخت (متغیر ثانویه) و نیز اندازه‌گیری شاخصه‌های مسطحاتی تاج در واحد تک‌درخت (متغیر ثانویه) است. پژوهش‌های جدیدی مانند Ghasemi و همکاران (۲۰۲۲) بر کارایی و عملکرد بسیار مناسب قابل حصول در قطعه‌بندی تاج درختان زاگرس میانی و جنوبی بر تصاویر محدوده مرئی پهپادهای اقتصادی تأکید دارند و از آن به‌عنوان ورودی مهمی برای برآورد نرخ زوال به‌عنوان یک متغیر پیوسته یاد کرده‌اند. به‌رغم این موضوع، پیشنهاد می‌شود برای تشخیص و برآورد زوال و سرخشکیدگی به‌جای تکیه بر سطح نادیر تاج درختان بلوط، از تلفیق تصاویر نادیر و مایل برای دستیابی به اطلاعات کناره‌های تاج نیز استفاده شود.

با وجود تمام موارد ذکرشده، برای برآورد عموم متغیرهای درختی باید توجه داشت که داده‌های برداشت‌شده توسط پهپادهای اقتصادی در حال حاضر شامل سه باند مرئی قرمز، سبز و آبی هستند که این به معنای عدم دسترسی به بخش مهمی از اطلاعات مرتبط با سلامت و سبزینگی پوشش گیاهی است که اغلب در بخش‌های مادون قرمز (نزدیک و میانی) اجتماع یافته‌اند. بخشی از این محدودیت در توان بیان طیفی را می‌توان با بارزسازی اطلاعات موجود طیفی/مکانی از طریق محاسبه شاخص‌های بافتی و شاخص‌های محدوده مرئی جبران کرد. همچنین، از وجود مقادیر متفاوتی از سایه منتج از ساعات متفاوت تصویربرداری در مناطقی که گاهی از نظر ترکیب گونه‌ای و ساختار مشابه هستند، می‌توان به‌عنوان یکی از چالش‌های کلی دیگر در تصویربرداری با پهپاد در مناطق جنگلی کوهستانی مانند زاگرس نام برد که می‌توانند بر پردازش‌هایی مانند قطعه‌بندی تاج، محاسبه متغیرهای مسطحاتی تاج، برآورد سبزینگی و نیز خشکیدگی تاج تأثیرگذار باشند (Safonova *et al*., 2021). باتوجه‌به موارد

ذکرشده، برخی از مهم‌ترین چالش‌ها و فرصت‌های کاربرد پهپادهای تصویربرداری اقتصادی در آماربرداری در جنگل‌های زاگرس را می‌توان به‌شرح مندرج در جدول ۱ ارائه کرد.

جدول ۱- شرایط و چالش‌های عمومی در کاربرد داده‌های غیرفعال تصویری پهپادهای اقتصادی در جنگل‌های زاگرس (✓ به معنای پاسخ مثبت و × به معنای پاسخ منفی است.)

Table 1. A schematic representation of measuring a number of primary forest inventory attributes in UAV- and field-based approaches

شرایط استخراج Condition for extraction	متغیرهای اولیه Primary variables						متغیرهای ثانویه Secondary variables				
	ارتفاع درختان Tree height	قطعه‌بندی تاج درختان و تعداد در هکتار/قطعه‌نمونه Crown segmentation and tree count per ha/plot	قطر برابر سینه DBH	تعداد جست No. of sprouts	تفکیک تک‌تنه و چندتنه (فارغ از مبدأ) Single- and multi-stem differentiation (regardless of origin)	متغیرهای مسطحاتی تاج Planimetric crown attributes	سرخشکیدگی و زوال عمومی General tree decline	حجم سرپا/زی‌توده Standing volume/biomass	درصد تاج‌پوشش Crown cover	مدل رقومی زمین DTM	مدل رقومی سطح DSM
امکان اندازه‌گیری مستقیم Possibility for direct measurement	✓	×	×	×	×	✓	×	×	✓	×	×
لزوم برآورد غیرمستقیم Necessity for indirect estimation	×	✓	✓	✓	✓	×	✓	✓	×	✓	✓
نیاز به تصاویر همپوشان (استریو) Need for stereo imagery	✓	×	×	×	✓	×	×	✓	×	✓	✓
نیاز به تلفیق با داده مایل Need for fusion with oblique data	×	×	✓	✓	✓	×	✓	×	×	×	×
نیاز مبرم به داده زمینی برای صحت‌سنجی Absolute need for ground reference data	×	×	✓	✓	✓	×	✓	✓	×	×	×
قابلیت تعمیم مکانی Feasibility of spatial upscaling	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓

جمع‌بندی

جنگل‌های زاگرس از نظر بوم شناختی یکی از متنوع‌ترین و در عین حال تخریب‌شده‌ترین بوم سازگان‌های ایران هستند. توپوگرافی بسیار ناهموار و مشکل بودن کارهای میدانی در مناطق دورافتاده و تا حدی غیرقابل دسترسی، کمی‌سازی میدانی اطلاعات دقیق ساختاری را در این جنگل‌ها محدود می‌سازد. این چالش را می‌توان با کاربرد روش‌های مبتنی بر پهپاد و همچنین تلفیق اطلاعات حاصل با روش‌های مدل‌سازی و پردازش تصاویر فتوگرامتری دست کم در مقیاس محلی کم کرد. باتوجه‌به وجود داده‌های چندطیفی ماهواره‌ای

مانند داده‌های سری سنتینل۲، برآوردها می‌توانند به‌خوبی برای تعمیم مکانی (Spatial upscaling) از سطح پیکسل‌های پهپاد به سطح پیکسل‌های داده ماهواره‌ای استفاده شوند. با این‌وجود، به‌طور کلی برخی از دیگر چالش‌های مرتبط با عملیات پروازی که باید در هنگام طراحی و اجرای آن‌ها مورد نظر پژوهشگران و کارشناسان قرار گیرند را می‌توان به‌شرح زیر اشاره کرد:

– تهیه و استفاده از پهپادهای اقتصادی مجهز به جی‌پی‌اس چندفرکانسه به‌رغم قیمت بیشتر بر پرنده‌های فاقد آن ارجح است. در غیراین‌صورت ضروری است زمان و هزینه اضافی که بابت مکان‌یابی دقیق مرکز و گوشه‌های قطعه‌نمونه مورد نیاز است، از سوی مجری درنظر گرفته شود.

– از پرواز در شرایط ناپایداری هوا (باد و بارش باران) که موجب ناپایداری پرنده و میزانی از نویز در تصاویر اخذشده می‌شوند، اجتناب شود.

– از تصویربرداری با سرعت متوسط به‌جای سرعت کم استفاده شود. این کار مدت تصویربرداری را حداقل به نصف کاهش می‌دهد و تفاوتی بین کیفیت بصری و ابرنقاط تصاویر حاصل ایجاد نخواهد کرد.

– زمان‌های متفاوت تصویربرداری موجب بروز مقادیر متفاوتی از سایه درختان در تصاویر می‌شوند که اثر مستقیمی بر برآورد محل تاج درختان، الگوریتم‌های قطعه‌بندی تاج و نیز تمام برآوردهای هندسی متعاقب آن دارد. بنابراین، پیشنهاد می‌شود در پروژه‌های عملیاتی و اجرایی زمان میانه روز (حداقل سایه در آسمان آفتابی) و یا روزهای ابری و فاقد آفتاب مستقیم برای تصویربرداری انتخاب شده و از تصویربرداری در ساعات پایانی روز (حوالی عصر تا غروب آفتاب) اجتناب شود.

– در ناحیه رویشی زاگرس، قطر متوسط تاج در پژوهش‌ها میدانی به‌عنوان برآوردگر بهتری نسبت‌به قطر تنه برای زی‌توده معرفی شده است که این امر می‌تواند به‌طور عمده به فرم رویشی شاخه‌زاد اکثر توده‌های زاگرسی وابسته باشد.

درمجموع، مدل‌های فتوگرامتری مبتنی بر پهپادهای اقتصادی می‌توانند نه‌تنها در منطقه زاگرس، بلکه به‌طور کلی در همه توده‌های جنگلی مناطق نیمه‌خشک، به‌عنوان مکملی برای کاهش قابل توجه عملیات زمینی استفاده شوند. این مناطق اغلب فاقد برآوردهای دقیق و سریع از مشخصه‌های ساختاری جنگل هستند و تا زمانی که این برآوردها در دسترس نباشند، امکان کمی‌سازی پدیده‌هایی مانند رویش، زوال و تغییرات ساختاری این جنگل‌ها ممکن نخواهد بود.

سپاسگزاری

بخشی از نتایج ارائه‌شده در این مقاله منتج از پروژه ملی " کاربرد سنجش از دور سه‌بعدی در پایش ساختار توده‌های جنگلی زاگرس " به شماره ۹۷۰۵۴۸–۹۷۰۱۲–۰۴۸–۰۹۵۱–۰۹–۰۱۳ می‌باشد. بدین‌وسیله برخود لازم می‌دانم از همکاری آقایان دکتر مهدی پورهاشمی، سیدکاظم بردبار، یعقوب ایران‌منش، حسن جهانبازی، مهرداد زرافشار، آقایان مهندس حبیب‌اله رحیمی، آروین فخری و جواد صبایی، خانم مهندس مرضیه قاسمی و آقایان محمد قارلقی و محمدعلی بهاور صمیمانه سپاسگزاری کنم.

منابع مورد استفاده

- Bandara, K.R., Samarakoon, L., Shrestha, R.P., Kamiya, Y., 2011. Automated generation of digital terrain model using point clouds of digital surface model in forest area. Remote Sensing, 3: 845-858.
- Bottalico, F., Travaglini, D., Chirici, G., Marchetti, M., Marchi, E., Nocentini, S., Corona, P., 2014. Classifying silvicultural systems (coppices vs. high forests) in Mediterranean oak forests by Airborne Laser Scanning data. European Journal of Remote Sensing, 47(1): 437-460
- Brahma, B., Nath, A.J., Sileshi, G.W., Das, A., 2018., Estimating biomass stocks and potential loss of biomass carbon through clear-felling of rubber plantations. Biomass and Bioenergy, 115: 88-96.
- Chave, J., Andalo, C., Brown, S., Cairns, M.A., Chambers, J.Q., Eamus, D., Fölster, H., Fromard, F., Higuchi, N., Kira, T., 2005. Tree allometry and improved estimation of carbon stocks and balance in tropical forests. Oecologia, 145: 87-99.
- Fakhri, S.A., Latifi, H., 2021. A Consumer Grade UAV-Based Framework to Estimate Structural Attributes of Coppice and High Oak Forest Stands in Semi-Arid Regions. Remote Sensing, 13(21):4367.
- Fieber, K.D., Davenport, I.J., Tanase, M.A., Ferryman,

applying the pipe model theory and adaptable to UAV-derived canopy height models. Remote Sensing, 12: 258.
- Maltamo, M., Næsset, E., Vauhkonen, J., 2014. Forestry Applications of Airborne Laser Scanning. Springer Verlag. ISBN: 978-94-017-8663-82014.
- Mlambo, R., Woodhouse, I.H., Gerard, F., 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.
- Ota, T., Ogawa, M., Shimizu, K., Kajisa, T., Mizoue, N., Yoshida, S., Takao, G., Hirata, Y., Furuya, N., Sano, T., 2015. Aboveground biomass estimation using structure from motion approach with aerial photographs in a seasonal tropical forest. Forests, 6: 3882-3898.
- Panagiotidis, D., Abdollahnejad, A., Surový, P., Chiteculo, V., 2017. Determining tree height and crown diameter from high-resolution UAV imagery. International Journal of Remote Sensing, 38: 2392-2410.
- Pothong, T., Elliott, S., Chairuangsri, S., Chanthorn, W., Shannon, D.P.; Wangpakapattanawong, P., 2021. New allometric equations for quantifying tree biomass and carbon sequestration in seasonally dry secondary forest in northern Thailand. New Forests, 53: 17-36.
- Puliti, S., Breidenbach, J., Astrup, R., 2020. Estimation of forest growing stock volume with UAV laser scanning data: can it be done without field data? Remote Sensing, 12: 1245.
- Puliti, S., Solberg, S., Granhus, A., 2019. Use of UAV photogrammetric data for estimation of biophysical properties in forest stands under regeneration. Remote Sensing, 11: 233.
- Safonova A., Guirado E., Maglinets Y., Alcaraz-Segura D., Tabik S., 2021. Olive Tree Biovolume from UAV Multi-Resolution Image Segmentation with Mask R-CNN. Sensors, 21(5):1617.
- Zagalikis, G., Cameron, A.D., Miller, D., 2005. The application of digital photogrammetry and image analysis techniques to derive tree and stand characteristics. Canadian Journal of Forest Research, 35: 1224-1237.

J.M., Gurney, R.J., Becerra, V.M., Walker, J.P., Hacker, J.M., 2015. Validation of Canopy Height Profile methodology for small-footprint full-waveform airborne LiDAR data in a discontinuous canopy environment. ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing, 104: 144-157.
- Ghasemi, M., Latifi, H., Pourhashemi, M., 2022. A novel method for detecting and delineating coppice trees in UAV images to monitor tree decline. Remote Sensing, 14(23): 5910.
- Goodbody, T.R., Coops, N.C., White, J., 2019. Digital aerial photogrammetry for updating area-based forest inventories: a review of opportunities, challenges, and future directions. Current Forestry Reports, 5: 55-75.
- Guimarães., Pádua, L., Marques, P., Silva, N., Peres, E., Sousa, J. J., 2020. Forestry remote sensing from unmanned aerial vehicles: A review focusing on the data, processing and potentialities. Remote Sensing, 12 (6): 1046.
- Jucker, T., Caspersen, J., Chave, J., Antin, C., Barbier, N., Bongers, F., Dalponte, M., van Ewijk, K.Y., Forrester, D.I., Haeni, M, 2017. Allometric equations for integrating remote sensing imagery into forest monitoring programmes. Global Change Biology, 23: 177-190.
- Krause, S., Sanders, T.G., Mund, J.-P., Greve, K., 2019. UAV-based photogrammetric tree height measurement for intensive forest monitoring. Remote Sensing, 11: 758.
- Lewis, S.L., Sonké, B., Sunderland, T., Begne, S.K., Lopez-Gonzalez, G., Van Der Heijden, G.M., Phillips, O.L., Affum-Baffoe, K., Baker, T.R., Banin, L., 2013. Above-ground biomass and structure of 260 African tropical forests. Philosophical Transactions of the Royal Society B, 368: 20120295.
- Lizuka, K., Yonehara, T., Itoh, M., Kosugi, Y., 2018. Estimating tree height and diameter at breast height (DBH) from digital surface models and orthophotos obtained with an unmanned aerial system for a Japanese cypress (*Chamaecyparis obtusa*) forest. Remote Sensing, 10 (1): 13.
- Machimura, T., Fujimoto, A., Hayashi, K., Takagi, H., Sugita, S., 2021. A novel tree biomass estimation model

Potentials and pitfalls of applying consumer-grade unmanned aerial vehicles for the inventory of Zagros forests, Iran

H. Latifi

Associate Prof., Department of Photogrammetry and Remote Sensing, Faculty of Geodesy and Geomatics Engineering, K.N. Toosi University of Technology, Tehran, Iran. E-Mail: hooman.latifi@kntu.ac.ir

Received: 10.01.2023 Accepted: 07.02.2023

Abstract

Forest measurement in semi-arid ecosystems and protective stands like Zagros forests is essential for collecting primary information as well as those related to biometrical, ecological and conservational aspects. While the access, time, logistics, financial and lack of trained staff hamper the timely and frequent implementation of forest inventory projects in Zagros, using data and methods based on consumer-grade unmanned aerial vehicles will be discussed here as an alternative or supplement to conventional forest inventories. The challenges and opportunities related to such UAV data in its basic configuration (nadir flight, RGB image composites images and fixed gimbal) will be briefly reviewed and discussed in connection with the basic primary and secondary variables of forest inventory in Zagros. The findings and suggestions here are aimed to facilitate the decision-making of practical sector managers and researchers within the Zagros region.

Keywords: Digital terrain and surface models, nadir flight, photogrammetry, semi-arid ecosystems.