



استفاده از مدل ارتفاعی تاج استخراج شده از تصاویر پهپاد برای برآورد ارتفاع درختان در جنگل سیسنگان

محمد رضا کارگر^۱، هرمز سهرابی^{۲*}

۱. دانشجوی کارشناسی ارشد رشته علوم و مهندسی جنگل، دانشکده منابع طبیعی و علوم دریایی، دانشگاه تربیت مدرس

۲. دانشیار گروه علوم و مهندسی جنگل، دانشکده منابع طبیعی و علوم دریایی، دانشگاه تربیت مدرس

مشخصات مقاله

پیشینه مقاله:

دریافت: ۱۰ مهر ۱۳۹۷

پذیرش: ۹ تیر ۱۳۹۸

دسترسی اینترنتی: ۲۵ مهر ۱۳۹۸

واژه‌های کلیدی:

پهپاد

الگوریتم ساختار حرکت مینا

مدل ارتفاعی تاج

مدل رقومی سطح زمین

سیسنگان

چکیده

پیشرفت‌های اخیر در زمینه وسایل پرنده و قابلیت نصب سنجنده‌های سبک بر روی آن‌ها، امکان برآورد مشخصه‌های ساختاری درختان و توده‌های جنگلی را از راه دور با هزینه‌های نسبتاً کم در مقایسه با روش‌های سنتی مهیا کرده است. در این پژوهش، دقت و صحت برآورد ارتفاع تک‌درختان با استفاده از تصاویر یک پرنده هدایت‌پذیر از دور (پهپاد) ارزیابی شد. برای این منظور ۸۵۴ تصویر از ارتفاع ۱۰۰ متری برداشت شد و پس از پردازش‌ها، با استفاده از الگوریتم ساختار حرکت مینا (SFM)، ابر نقاط متراکم تهیه گردید. منطقه مورد مطالعه شامل ۳۴/۷۹ هکتار از پارک جنگلی سیسنگان بود که به‌منظور نمونه‌برداری، ۲۸ قطعه نمونه ۳۰×۳۰ متر در آن طراحی گردید و نوع گونه و ارتفاع درختان ثبت شد. مدل‌سازی ارتفاع واقعی در مقابل ارتفاع برآوردی از مدل ارتفاعی تاج توسط تحلیل رگرسیون انجام گرفت. دقت و صحت برآوردها با معیارهای اریبی نسبی و جذر میانگین مربعات خطا نسبی بررسی شد. بر اساس نتایج، اختلاف ارتفاع اندازه‌گیری شده زمینی و مستخرج از مدل ارتفاعی تاج از نظر آماری معنی‌دار بود. همچنین جذر میانگین مربعات خطا نسبی برای برآورد ارتفاع شمشاد، ممرز، انجیلی و سایر گونه‌ها به ترتیب ۲۰/۳۹، ۲۰/۳۹، ۲۰/۵۷ و ۲۰/۵۲ درصد محاسبه شد. در مجموع، اندازه‌گیری ارتفاع با استفاده از ابر نقاط تولیدشده از تصاویر پهپاد و روش‌های بکار برده شده در این تحقیق، اریب بود و برآوردها دارای عدم قطعیت زیادی بود.

*پست الکترونیکی مسئول مکاتبات: hsohrabi@modares.ac.ir

مقدمه

ویژگی‌های ساختاری درختان از نظر بیولوژیکی و اقتصادی بسیار حائز اهمیت است. از جمله مهم‌ترین این ویژگی‌ها می‌توان به ارتفاع اشاره کرد. ارتفاع درخت، مشخصه مهمی در محاسبه حجم و زیتوده روی زمینی جنگل است. همچنین رشد ارتفاعی درخت پارامتر مهمی برای تعیین حاصلخیزی رویشگاه است (۲۱). مشخصه کمی ارتفاع درخت، در موارد مختلفی مانند تعیین حجم، ترسیم منحنی ارتفاع، محاسبه ضرایب شکل و قد کشیدگی در زیست‌سنجی جنگل کاربرد دارد. برآورد این ویژگی‌ها به منظور دسترسی به میزان پتانسیل‌های محیطی موجود در منطقه، بسیار لازم است (۲ و ۶).

ارتفاع درخت از جمله متغیرهایی است که در جنگل‌های معتدله مانند جنگل‌های هیرکانی که عموماً تاج پوشش متراکم و ارتفاع درختان بلند است، دشوار، پرهزینه و همراه با خطا است. ضمن این‌که این کار نیازمند داشتن تجربه دانش کارشناسی است. دیگر آنکه برداشت داده نیز در برخی نقاط دور از دسترس و کوهستانی با مشکلات زیادی همراه است. مجموع این موارد سبب کاهش دقت آماربرداری و مسائل ناشی از آن می‌شود (۲۴).

مشکل دسترسی به برخی از عرصه‌ها و همچنین وجود تعداد بسیار زیادی درخت در واحد سطح، مستلزم آن است تا راه‌حلی اقتصادی و روشی دقیق به منظور برآورد اطلاعات اساسی جنگل، ارائه شود (۵). از جمله به‌روزترین این روش‌ها، استفاده از پهپادها است. که ممکن است در صورت رسیدن به دقت مناسب، برای محدوده‌هایی مانند یک پارسل یا سری جنگلداری، توجیه فنی و اقتصادی داشته باشد. با پیشرفت‌های اخیر که در زمینه وسایل هوایی بدون سرنشین و سنجنده‌های قابل‌نصب بر روی آن‌ها صورت گرفته است، استفاده از این وسایل، زمان موردنیاز آماربرداری جنگل را به شکل چشم‌گیری کاهش داده است (۱۵).

پهپادها دستگاه‌هایی هستند که انواع مختلفی از داده‌های سنجنش‌ازدوری را با تفکیک مکانی و زمانی بالاتری در مقایسه با ماهواره‌ها فراهم می‌کنند که بسته به هدف کاربر قابل‌برنامه‌ریزی است (۷).

پهپادها نسبت به ماهواره دارای مزیت‌های مختلفی از جمله

کنترل ارتفاع پروازی، زاویه دید سنجنده و تنظیم میزان هم‌پوشانی تصاویر می‌باشند (۲۴). بهره‌گیری از تصاویر اخذشده توسط پهپاد با کاهش هزینه‌ها برای تصویربرداری در مقیاس‌های کوچک و متوسط باعث شده است که این ابزار به‌عنوان یک ابزار بسیار مفید در این حوزه معرفی گردد (۱۸).

پهپادها با ایجاد امکان برداشت داده‌های طیفی و نیز به سبب برداشت تصاویر با هم‌پوشانی زیاد و ایجاد امکان تولید ابر نقاط سه‌بعدی توسط الگوریتم ساختار حرکت مبنا (SFM; Structure From Motion)، امکان برآورد ارتفاع درختان را فراهم آورده است. به‌منظور تولید ابر نقاط سه‌بعدی از داده‌های پهپاد، باید این تصاویر به میزان کافی با یکدیگر هم‌پوشانی طولی و عرضی داشته باشند. جفت تصاویری که با یکدیگر هم‌پوشانی دارند، با استفاده از الگوریتم SFM تبدیل به مدل سه‌بعدی سطح می‌گردند (۱۴). به‌طور خلاصه، فرآیند SFM استخراج یک ساختار سه‌بعدی از نماهای گوناگون دوربین متحرک است. در بخشی از این فرآیند، SFM در ابتدا نقاط کلیدی مشترک در هر جفت تصویر را که مانند هم هستند و دقیقاً از یک نقطه برداشت‌شده‌اند را شناسایی می‌کند. نقاط کلیدی ممکن است به شکل مجموعه‌ای از نقاط کنار هم دیده شوند که ابعاد تعریف‌شده تصویر را تشکیل می‌دهند (۱۰).

در این زمینه تاکنون مطالعات متعددی در خارج از کشور صورت گرفته است؛ زارکو-تجادا و همکاران (۲۳) به‌منظور برآورد ارتفاع تک‌درختان زیتون (*Olea europaea L.*) از طریق مدل سه‌بعدی ارتفاع در جنوب اسپانیا انجام دادند، ارتفاع درختان موجود در عرصه را با ضریب تبیین 0.83 و جذر میانگین مربعات خطا نسبی $11/5$ درصد برآورد کردند.

لیم و همکاران (۱۲) تحقیقی در رابطه با برآورد ارتفاع درختان با استفاده از تصاویر حاصل از پهپاد انجام دادند. در این تحقیق که در دو منطقه مطالعاتی صورت گرفت، آن‌ها موفق شدند که ارتفاع درخت را با جذر میانگین مربعات خطا به ترتیب 0.84 متر و در منطقه مطالعاتی دوم نیز با جذر میانگین مربعات خطا به مقدار $2/45$ متر برآورد نمایند.

پولیتی و همکاران (۲۰) به‌منظور آماربرداری در سطح قطعه‌نمونه انجام گرفت، از تصاویر پهپاد استفاده کردند. در این

استفاده از تصاویر رنگی طبیعی گرفته شده به وسیله پهپاد مورد بررسی قرار گرفت.

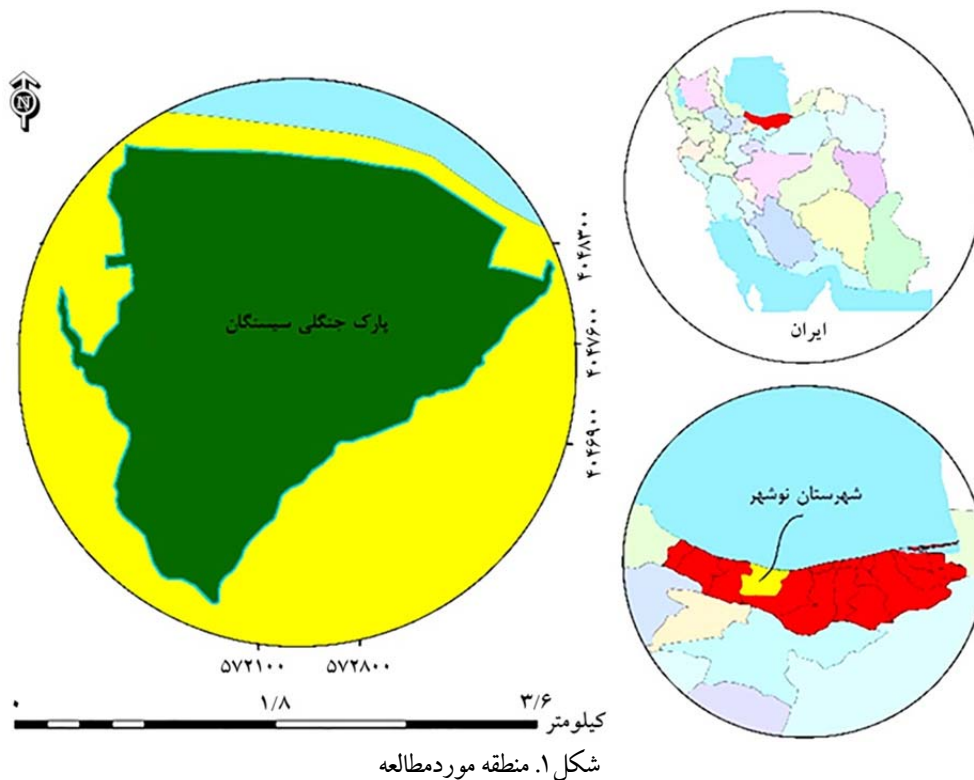
مواد و روش‌ها

منطقه مورد مطالعه

پارک جنگلی سیسنگان یکی از جنگل‌های جلگه‌ای شمال کشور است که در حاشیه جنوبی دریای خزر به فاصله ۳۰ کیلومتری شرق شهر نوشهر قرار گرفته است (۱). این جنگل در عرض جغرافیایی $33^{\circ} 33'$ تا $33^{\circ} 35'$ شمالی و طول جغرافیایی $47^{\circ} 51'$ تا $49^{\circ} 51'$ شرقی واقع شده است.

پژوهش آن‌ها موفق شدند در مقیاس قطعه‌نمونه، میزان ارتفاع را با ضریب تبیین ۰/۹۷ و میزان جذر میانگین مربعات خطا ۰/۷ متر بر هکتار برآورد کنند. بر اساس تحقیقی که یو و همکاران (۲۲) در سطوح مختلف آماربرداری انجام دادند، موفق به پیش‌بینی و مدل‌سازی آماربرداری در سطح قطعه‌نمونه با استفاده از آماربرداری در سطح تک‌درخت و ترکیبی شدند.

در این تحقیق آن‌ها موفق شدند ارتفاع را به ترتیب با ۶/۴۲ درصد جذر میانگین مربعات خطا، ضریب تبیین ۰/۹۴، در مقیاس ترکیبی و در مقیاس تک‌درخت، ارتفاع را با ۵/۶۹ درصد جذر میانگین مربعات خطا برآورد کنند. در پژوهش حاضر دقت و صحت برآورد ارتفاع درختان در یک جنگل جلگه‌ای پهن‌برگ با



دوربین Phantom 4 Pro بر روی یک سامانه لرزش گیر و پایدارساز سه محوره حرفه‌ای (با انحراف ± 0.3 درجه) نصب شد که هیچ‌گونه لرزش و تکانی در تصویر دیده نشود. این پهپاد با قابلیت اتصال بسیار سریع به ۲۴ ماهواره به صورت هم‌زمان موجب می‌گردد تا موقعیت خود را به صورت دقیق و کامل حفظ کند. این

برداشت تصاویر هوایی با استفاده از پهپاد

پهپادی که برای تصویربرداری در این مطالعه به کار رفت، Phantom 4 Pro با قابلیت صعود و فرود عمودی است. این پهپاد با وزن ۱۳۸۰ گرم، دارای دوربینی با قابلیت ثبت تصویرهای ۲۰ مگا پیکسلی خام و با فرمت JPEG است (۴۰۰۰×۳۰۰۰ پیکسل).

ساخت مدل رقومی سطح، زمین و تاج

با بررسی چشمی ابر نقاط متراکم مستخرج از تصاویر پهپاد، نقاط پرت حذف گردید. این نقاط آنهایی هستند که بافاصله زیاد از زمین یا بالای تاج درختان قرار گرفته‌اند. برای تفکیک نقاط مربوط به زمین و غیر زمین (شامل عوارض مختلف مانند درختان، ساختمان‌ها و ...)، از فیلتر ابر نقاط با پنجره‌های ۲ متری با شرط حداکثر تغییرات ۷/۵ درجه استفاده شد. این دو پارامتر با آزمون و خطا بر اساس بررسی چشمی طبقه‌بندی نهایی گردید. با استفاده از فیلتر مذکور ابر نقاط به دو گروه زمین و غیر زمین طبقه‌بندی شد. به سبب مسطح بودن جنگل مورد بررسی، نتایج این روش بر اساس ارزیابی چشمی، بسیار مطلوب بود. برای ایجاد مدل رقومی سطح (DSM; Digital Surface Model)، ابر نقاط غیر زمین توسط شبکه مثلث‌بندی نامنظم (TIN; Triangulated Irregular Network) به یک‌لایه رستری تبدیل گردید. ارزش هر پیکسل در این لایه معادل ارتفاع عرضه از سطح دریا است.

مدل رقومی زمین (DTM; Digital Terrain Model) (شکل ۲) توسط شبکه مثلث‌بندی نامنظم اعمال شده برابر نقاط زمین به دست آمد (شکل ۳) (۱۱). در این مرحله، نتیجه شبکه مثلث‌بندی نامنظم یک‌لایه رستری است که ارزش هر پیکسل معادل ارتفاع زمین در آن پیکسل از سطح دریا است. با کسر مدل رقومی زمین از مدل رقومی سطح (DSM-DTM) (۱۶) مدل ارتفاعی تاج (CHM; Crown Height Model) به دست آمد (شکل ۳). مدل ارتفاعی تاج در واقع متشکل از پیکسل‌هایی است که ارزش هر پیکسل معادل ارتفاع عارضه (در مورد جنگل ارتفاع عارضه همان ارتفاع تاج) است. اندازه پیکسل برای محاسبات فوق ۳۰ سانتی‌متر بود.

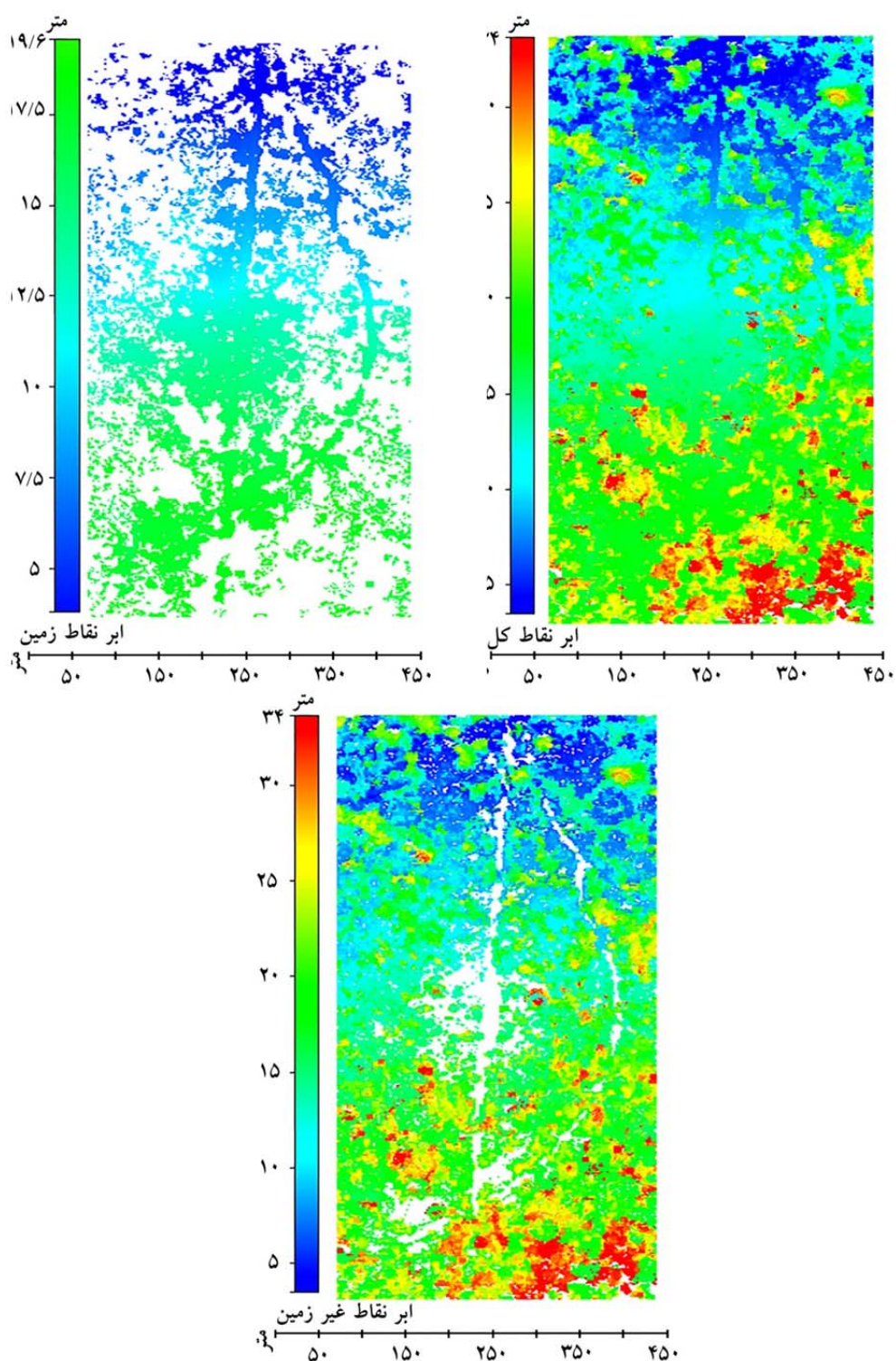
قابلیت باعث می‌شود تا پهپاد نقطه شروع، محل پرواز و ارتباط آن با کاربر را در طول پرواز حفظ نماید (۶).

به‌منظور اطمینان از ساخت مدل سه‌بعدی دقیق، هم‌پوشانی طولی و عرضی به ترتیب ۹۰ و ۸۰ درصد تعیین گردید (۲۳). برای برنامه‌ریزی عملیات از نرم‌افزار DJI GS Pro در سیستم عامل iOS استفاده گردید. کلیه اطلاعات طراحی مسیر توسط نرم‌افزار مذکور به خلبان خودکار پرنده (اتوپیلوت) ارسال شد و عملیات برداشت به‌صورت اتوماتیک صورت گرفت. مسیر پروازی پهپاد و مکان‌هایی که باید تصویر تصویربرداری می‌شد، قبل از پرواز مشخص شد. تعداد تصاویر برداشت‌شده در این پژوهش ۸۵۴ فریم (با ابعاد ۵۴۷۲×۳۶۶۸) بود که در تاریخ چهارشنبه ۸ آذرماه ۱۳۹۶، ساعت ۱۰ صبح برداشت گردید. همچنین ارتفاع پرواز پهپاد ۱۰۰ متر و برداشت تصاویر از کل منطقه ۴۵ دقیقه به طول انجامید.

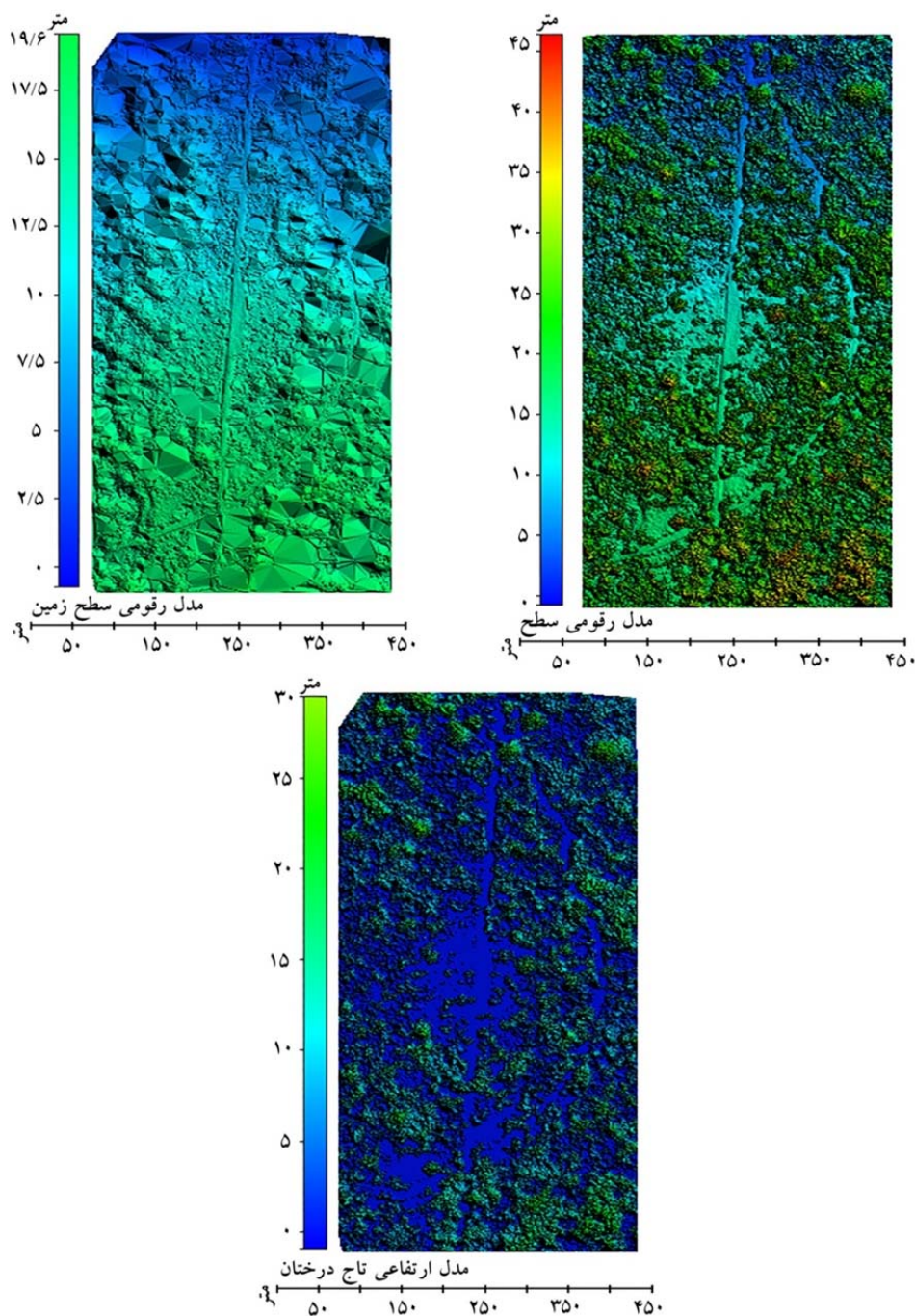
تولید ابر نقاط متراکم

پس از برداشت تصاویر موردنظر، با استفاده از نرم‌افزار Agisoft PhotoScan پردازش‌های لازم به‌منظور تولید ابر نقاط متراکم صورت گرفت. مختصات مرکز هر تصویر که بر روی اطلاعات تصویر درج شده توسط نرم‌افزار مربوطه قرائت و تصاویر در کنار یکدیگر مرتب شد. پس از مرتب کردن تصاویر در کنار یکدیگر، ابرنقاط متراکم با استفاده از الگوریتم SFM (۴ و ۱۳) ایجاد گردید (شکل ۲).

خروجی نهایی این فرآیند، یک ساختار سه‌بعدی است که اطلاعاتی در مورد موقعیت‌های نسبی دوربین و فاصله‌های نسبی بین دوربین و شیء نیز ارائه می‌دهد (۹).



شکل ۲. نقشه ابر نقاط کل، ابر نقاط زمین و ابر نقاط غیر زمین منطقه مورد مطالعه



شکل ۳. نقشه مدل رقومی سطح، مدل رقومی سطح زمین و مدل ارتفاعی تاج درختان منطقه مورد مطالعه

نمونه برداری زمینی و ارتفاع درختان بر روی مدل ارتفاعی تاج

در این تحقیق ۲۸ قطعه نمونه با شبکه آمار برداری منظم با ابعاد ۳۰ در ۳۰ متر طراحی و با استفاده از دستگاه GPS دستی قطعات بر روی زمین بازیابی شد. ارتوفتوموزاییک هر یک از قطعات نمونه

چاپ شده بود و برای بازیابی درختان به عرصه برده شد. تصویر هر یک از قطعات نمونه با هم راستایی تصویر با شمال مغناطیسی، توجیه گردید. حدود قطعات نمونه در منطقه مورد مطالعه پیاده شده و با استفاده از متر نواری ابعاد دقیق آن مشخص گردید. آمار برداری زمینی در بازه زمانی ۱۰ آذرماه ۱۳۹۶ تا ۲۰ آذرماه انجام گردید.

سپس با استفاده از شیب‌سنج سونتو مقادیر شیب نوک و بن درخت برداشت شد. در این پژوهش گونه و ارتفاع ۹۰۴ پایه اندازه‌گیری گردید. *Buxus hyrcana* با اختلاف زیادی، بیشترین فراوانی را در منطقه به خود اختصاص داده است. پس از آن *Parrotia persica* و *Carpinus betulus* در رتبه‌های بعدی قرار دارند (جدول ۱).

برای تعیین موقعیت دقیق، مرکز درخت بر روی تصویر مشخص گردید و به آن کدی اختصاص داده شد. به سبب تفکیک مکانی بالای تصاویر، تشخیص پایه‌های درختان و تمایز موقعیت مکانی آن‌ها نسبتاً ساده بود. گرچه در تاج پوشش‌های بسته این امر دشوار و احتمالاً با خطا همراه باشد. به‌منظور اندازه‌گیری ارتفاع درختان ابتدا با استفاده از متر نواری فاصله از درخت اندازه‌گیری شد و

جدول ۱. نتایج آماربرداری میدانی

درصد	تراکم (تعداد در هکتار)	تعداد	گونه
۷۹/۵۳	۲۸۵/۳۱	۷۱۹	<i>Buxus hyrcana</i>
۸/۶۲	۳۰/۹۵	۷۸	<i>Parrotia persica</i>
۶/۴۱	۲۳/۰۱	۵۸	<i>Carpinus betulus</i>
۱/۴۳	۵/۱۵	۱۳	<i>Acer velutinum</i>
۱/۱۰	۳/۹۶	۱۰	<i>Acer cappadocicum</i>
۱/۱۰	۳/۹۶	۱۰	<i>Ficus carica</i>
۰/۶۶	۲/۳۸	۶	<i>Ulmus glabra</i>
۰/۵۵	۱/۹۸	۵	<i>Quercus castanifolia</i>
۰/۴۴	۱/۵۸	۴	<i>Tilia cordata</i>
۰/۱۱	۰/۳۹	۱	<i>Alnus subcordata</i>
۱۰۰		۹۰۴	مجموع

تحلیل‌های آماری

ابتدا امکان اندازه‌گیری مستقیم ارتفاع درختان با استفاده از مدل ارتفاعی تاج بررسی گردید. برای این منظور از آزمون t جفتی استفاده شد که در آن ارتفاع درختان بر روی زمین با ارتفاع درختان بر روی مدل ارتفاعی تاج با ۹۵ درصد اطمینان مقایسه گردید. در مرحله بعد، ارتفاع درختان با استفاده از مدل‌سازی رگرسیون برآورد شد. در این مدل‌سازی، ارتفاع درختان بر روی زمین متغیر پاسخ و ارتفاع درختان بر روی مدل رقومی سطح، متغیر پیش‌بینی کننده بود. برای بررسی صحت برآورد ارتفاع درختان، از جذر میانگین مربعات خطا (Root Mean Square Error)، جذر میانگین مربعات خطای نسبی (Relative Root Mean Square Error)، اریبی (Bias) و اریبی نسبی (Relative Bias) استفاده گردید (جدول ۲). مدل‌های رگرسیونی بر اساس ۷۵ درصد مشاهدات برازش یافت و ۲۵ درصد دیگر برای محاسبه صحت و دقت مدل‌ها مورد استفاده قرار گرفت.

با توجه به فراوانی بسیار اندک دیگرگونه‌ها، همه پایه‌های آن‌ها در یک گروه تحت عنوان سایر گونه‌ها قرار گرفت و در تحلیل‌های بعدی استفاده شد. گروه سایر گونه‌ها عبارت بود از *Tilia cordata*، *Ulmus glabra*، *Acer cappadocicum*، *Acer velutinum*، *Alnus subcordata*، *cordata*، *Ficus carica* نیز اندازه‌گیری شده بود که به سبب تفاوت معماری درخت از تحلیل‌ها کنار گذاشته شد. برای اندازه‌گیری ارتفاع درختان از روی مدل ارتفاعی تاج، ابتدا محل دقیق نوک درختان که در مشاهدات میدانی عملیات آماربرداری مشخص گردید بود، تعیین شد و در محیط نرم‌افزار نقطه‌گذاری شد. سپس مقادیر ارتفاعی مربوط به پیکسل‌هایی که با نقاط مشخص شده بودند، استخراج شد.

جدول ۲. معیارهای ارزیابی صحت و دقت برآورد ارتفاع درختان با استفاده از تصاویر پهپاد

رابطه	شاخص
$RMSE = \frac{\sqrt{\sum_{i=1}^n (\hat{y}_i - y_i)^2}}{\sqrt{n}}$	جذر میانگین مربعات خطا
$RMSE_r = \frac{RMSE}{\bar{y}}$	جذر میانگین مربعات خطای نسبی
$Bias = \frac{\sum_{i=1}^n (\hat{y}_i - y_i)}{n}$	ارثی
$Bias_r = \frac{Bias}{\bar{y}} \times 100$	ارثی نسبی

\bar{y}_i : مقدار مشاهده شده، \hat{y}_i : مقدار برآورد شده، n : تعداد نمونه، \bar{y} : میانگین مقادیر مشاهده شده

نتایج و بحث

می‌گردد (۸). ترکیب نتایج عملی مستخرج از مدل ارتفاعی تاج و آماربرداری زمینی، برآورد ویژگی‌های ساختاری درخت از جمله ارتفاع را امکان‌پذیر کرده است.

اندازه‌گیری و برآورد ارتفاع درختان

ارتفاع درختان به دو صورت نمونه‌برداری زمینی و از مدل ارتفاعی تاج درختان به دست آمد. خلاصه آماری برای داده‌های واقعی و مقادیر برآورد شده از روی مدل ارتفاعی تاج درختان در جدول ۳ آمده است.

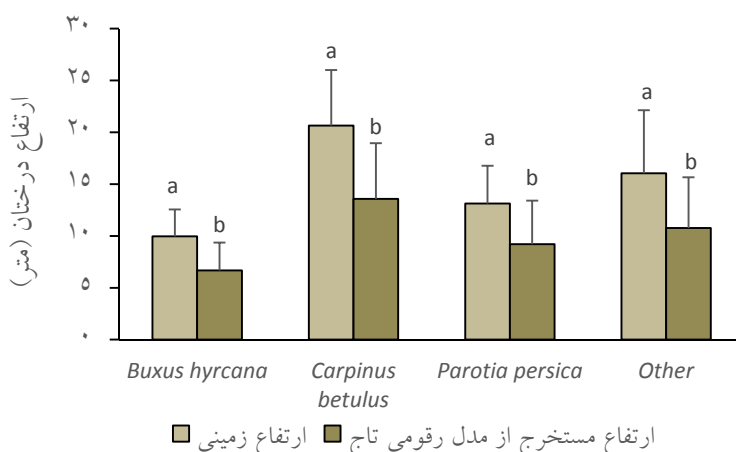
تصاویر پهپاد با ارتفاع پائین، مشاهده تاج پوشش و اندازه‌گیری ارتفاع درختان را به‌طور سیستماتیک امکان‌پذیر کرده است (۱۷). در روش سنتی عموماً به این صورت است که ارتفاع درختان در پایه‌های معدودی اندازه‌گیری می‌شود و ارتفاع دیگر درختان قطعات نمونه، با کمک معادلات رگرسیونی رابطه قطر برابر سینه و ارتفاع درخت به دست می‌آید، در ابر نقاط به دست آمده از تصاویر پهپاد نیز ویژگی‌های ساختاری مانند ارتفاع درخت، به‌وسیله مدل‌سازی رگرسیونی از مدل ارتفاعی تاج استخراج

جدول ۳. خلاصه آماری ارتفاع اندازه‌گیری شده به‌صورت زمین و استخراج شده از مدل ارتفاعی تاج

گونه‌ها				روش	آماره
Other	<i>Parrotia persica</i>	<i>Carpinus betulus</i>	<i>Buxus hyrcana</i>		
۱۱/۵	۱۱/۳۵	۱۸/۹۲	۸/۱۲	نمونه‌برداری زمینی	چارک اول
۱۴/۷۵	۱۳/۷	۲۳/۰۵	۱۰/۳۵		میانه
۲۰/۹۵	۱۵/۷۵	۲۵/۲۵	۱۲	تاج درختان	چارک سوم
۳۱/۶	۲۲/۴	۳۲/۳	۲۰/۷		بیشینه
۱۶/۱۲	۱۳/۶۴	۲۱/۹۵	۱۰/۱	مستخرج از مدل	میانگین
۷/۷۷	۷	۱۱/۵۵	۴/۶۷		چارک اول
۱۱/۰۱	۹/۳۵	۱۵/۵۸	۶/۹۴	ارتفاع تاج	میانه
۱۵/۰۶	۱۳/۱۸	۱۸/۴۲	۸/۵۹		چارک سوم
۲۱	۱۹/۳	۲۲/۶	۱۶/۴	درختان	بیشینه
۱۱/۲۵	۱۰	۱۵/۱۷	۶/۵۲		میانگین
۵۲	۶۰	۴۶	۷۱۶	تعداد کل پایه‌ها	

از مدل ارتفاعی تاج، کمتر از ارتفاع واقعی اندازه‌گیری شده به روش زمینی است. به‌طور کلی، اختلاف نسبی اندازه‌گیری ارتفاع حدود ۳۰ درصد بود. این مقادیر برای *Buxus hyrcana*، *Carpinus betulus*، *Parrotia persica* و سایر گونه‌ها به ترتیب ۳۳، ۲۹، ۳۴ و ۳۳ به دست آمد.

برای مقایسه ارتفاع به‌دست‌آمده به روش اندازه‌گیری زمینی با ارتفاع استخراج‌شده از مدل ارتفاعی تاج، از آزمون t جفتی استفاده شد. همچنین برای رسم نمودار، از میانگین اختلاف‌ها با ۹۵ درصد حدود اعتماد استفاده گردید (شکل ۴). چنانکه ملاحظه می‌گردد، برای تمامی گونه‌ها، ارتفاع به‌دست‌آمده به دو روش موردبررسی از نظر آماری اختلاف دارد، به شکلی که متوسط ارتفاع استخراج‌شده



حروف متفاوت در هر گروه ستون نشان‌دهنده اختلاف آماری معنی‌دار در سطح ۹۵ درصد اطمینان است.

شکل ۴. میانگین ارتفاع به‌دست‌آمده به روش زمینی و ارتفاع مستخرج از مدل ارتفاعی تاج

اطمینان معنی‌دار هستند. همچنین نتایج حاکی از آن است که ضرایب به‌دست‌آمده برای مدل‌های رگرسیونی محاسبه‌شده از نظر آماری معنی‌دار است (جدول ۶).

نتایج برآورد ارتفاع با استفاده از تحلیل رگرسیون در جدول‌های ۴، ۵ و ۶ آمده است. در جدول ۵ ملاحظه می‌گردد که مدل‌های برازش داده‌شده برای برآورد ارتفاع همگی با ۹۹ درصد

جدول ۴. مدل‌های رگرسیونی برازش یافته و میزان ضریب تعیین آن‌ها

R ²	مدل رگرسیونی برازش یافته	
۰/۳۳	$y=0.0557x+6.2526$	<i>Buxus hyrcana</i>
۰/۴۳	$y=0.6562x+11.718$	<i>Carpinus betulus</i>
۰/۵۲	$y=0.6287x+7.3325$	<i>Parrotia persica</i>
۰/۶۵	$y=1.0079x+5.1904$	سایر گونه‌ها

جدول ۵. جدول تحلیل واریانس مدل رگرسیونی برازش داده شده برای برآورد ارتفاع تک درختان با استفاده از مدل ارتفاعی تاج مستخرج از

تصاویر پهپاد با استفاده از داده‌های آموزش

گونه	متغیرها	درجه آزادی	مجموع مربعات	میانگین مربعات	آماره F	p-value
<i>Buxus hyrcana</i>	مدل	۱	۱۰۴۷/۲۲	۱۰۴۷/۲۲	۲۳۱/۸۴	
	خطا	۵۰۶	۲۲۸۵/۵۴	۴/۵۲		</0.001*
	مجموع	۵۰۷	۳۳۳۲/۷۶			
<i>Carpinus betulus</i>	مدل	۱	۵۴۱/۸۶	۵۴۱/۸۶	۳۳/۱۹	
	خطا	۴۳	۷۰۲/۰۱	۱۶/۳۲		</0.001*
	مجموع	۴۴	۱۲۴۳/۸۸			
<i>Parrotia persica</i>	مدل	۱	۳۲۱/۶۰	۳۲۱/۶۰	۵۶/۶۳	
	خطا	۳۷	۲۱۰/۱۲	۵/۶۷		</0.001*
	مجموع	۳۸	۵۳۱/۷۲			
سایر گونه‌ها	مدل	۱	۱۱۹۸/۰۲	۱۱۹۸/۰۳	۹۸/۲۲	
	خطا	۳۸	۴۶۳/۴۹	۱۲/۲۰		</0.001*
	مجموع	۳۹	۱۶۶۱/۵۱			

* سطح اطمینان ۹۹ درصد

جدول ۶. ضرایب برآورد شده برای مدل‌های رگرسیونی برازش یافته بین ارتفاع اندازه گیری شده درختان و ارتفاع مستخرج از مدل ارتفاعی تاج

مستخرج از تصاویر پهپاد با استفاده از داده‌های آموزش

گونه	اصطلاحات	برآورد شده	Std Error	آماره t	Prob> t
<i>Buxus hyrcana</i>	عرض از مبدأ	۶/۳۸۵۶	۰/۲۵۲۴	۲۵/۲۹	</0.001*
	شیب خط	۰/۵۳۶۸	۰/۰۳۵۲	۱۵/۲۳	</0.001*
<i>Carpinus betulus</i>	عرض از مبدأ	۱۰/۸۳۴۶	۱/۸۰۹۷	۵/۹۹	</0.001*
	شیب خط	۰/۶۹۸۱	۰/۱۲۱۱	۵/۷۶	</0.001*
<i>Parrotia persica</i>	عرض از مبدأ	۰/۴۵۲۰	۰/۹۲۱۸	۷	</0.001*
	شیب خط	۰/۶۹۱۱	۰/۰۹۱۸	۷/۵۳	</0.001*
سایر گونه‌ها	عرض از مبدأ	۳/۹۹۳۴	۱/۳۷۶۹	۲/۹۰	۰/۰۰۶۳*
	شیب خط	۱/۱۰۳۸	۰/۱۱۱۳	۹/۹۱	</0.001*

* سطح اطمینان ۹۹ درصد

گونه‌ها است. پس از آن *Parrotia persica*، *Carpinus betulus* و *Buxus hyrcana* به ترتیب قرار می‌گیرند.

در جدول ۷ ضریب تعیین تعدیل یافته و مقادیر جذر میانگین مربعات خطا برای برآورد ارتفاع هر یک از گونه‌ها نمایش داده شده است. بر اساس نتایج، بیشترین ضریب تعیین مربوط به گروه سایر

جدول ۷. ضریب تعیین تعدیل یافته و مقادیر جذر میانگین مربعات خطا ارتفاع هر کدام از گونه‌ها

گونه	RSquare Adj.	Root Mean Square Error (m)
<i>Buxus hyrcana</i>	۰/۳۱	۲/۱۲
<i>Carpinus betulus</i>	۰/۴۲	۴/۰۴
<i>Parrotia persica</i>	۰/۵۹	۲/۳۸
سایر گونه‌ها	۰/۷۱	۳/۴۹

خطای نسبی قرار گرفته‌اند. میزان اریبی نیز بین ۲ سانتیمتر تا ۲ متر بود که به صورت نسبی بیشترین مقدار به *Carpinus betulus* اختصاص داشت.

نتایج اعتبار سنجی مدل‌های به دست آمده در جدول ۸ ارائه شده است. به طور کل جذر میانگین مربعات خطا حدود ۳ متر و ۲۵ درصد است. جذر میانگین مربعات خطای نسبی برای سایر گونه‌ها بیشترین بود. پس از آن سه گونه دیگر با حدود ۲۰ درصد

جدول ۸. شاخص‌های ارزیابی دقت و صحت اندازه‌گیری ارتفاع با استفاده از تصاویر پهپاد

گونه	RMSE (m)	%RMSE	Bias (m)	%Bias
<i>Buxus hyrcana</i>	۲/۰۵	۲۰/۳۹	۰/۰۲	۰/۱۸
<i>Carpinus betulus</i>	۴/۱۸	۲۰/۳۹	۱/۹۱	۹/۳۱
<i>Parrotia persica</i>	۲/۸۹	۲۰/۵۷	۱/۱۱	۷/۹۰
سایر گونه‌ها	۴/۲۱	۲۹/۵۲	۰/۸۵	۵/۹۵

تعداد درختان با طبقات زیاد و متعدد ارتفاعی می‌تواند باعث افزایش خطا گردد. علت کاهش دقت در درختان با طبقات قطری زیاد، عدم تشخیص صحیح نوک درختان در زمان آماربرداری زمینی به منظور برداشت ارتفاع است (۳). در همین زمینه ایزوکا و همکاران (۱۱) طی تحقیقی توانستند با جذر میانگین مربعات خطا ۱/۷۱ متر، ارتفاع درختان را در منطقه‌ای که از نظر اشکوب بندی بسیار شبیه منطقه مطالعه حاضر است، مدل‌سازی کنند.

در تحقیقی پولیتی و همکاران (۲۰) در منطقه بورآل اقدام به اندازه‌گیری ارتفاع درختان سورنی برگ از روی تصاویر پهپاد کردند. آن‌ها توانستند ارتفاع را با جذر میانگین مربعات خطا نسبی ۳/۵ درصد برآورد کنند. دلیل بهبود نتایج آن‌ها در برآورد ارتفاع، نسبت به تحقیق حاضر، متقارن بودن تاج درختان سوزنی‌برگ و همچنین داشتن نوک واحد است. عدم وجود تاج متقارن و نوک واحد در این درختان نیز از دیگر عوامل ایجاد خطا در برداشت زمینی ارتفاع است. همچنین براساس نتایج این پژوهش، پایه‌های شمشاد به دلیل اینکه تاج متقارن‌تری نسبت به دیگر گونه‌های مورد مطالعه، نتایج

مقدار اریبی ارتفاع برآورد شده به وسیله مدل در درختان شمشاد بسیار کمتر از دیگر گونه‌هاست. از جمله مواردی که باعث کاهش مقدار اریبی مدل در این گونه است، می‌توان به تفکیک و تمایز بهتر این پایه‌ها اشاره کرد که دلیل اصلی آن خزان این درختان است. این مورد بر روی اندازه‌گیری مستقیم ارتفاع در عرصه و اندازه‌گیری از روی مدل ارتفاعی تاج تأثیر بسزایی دارد و به راحتی بالاترین ارتفاع درخت قابل تشخیص است (۲۰). در همین زمینه بر اساس تحقیقی که پاناگیوتیدیس و همکاران (۱۹) انجام دادند، میزان اریبی را در منطقه‌ای که درختان بافاصله بیشتر از یکدیگر بودند، بیش برآورد اعلام کردند. زارکو-تاجادا و همکاران (۲۳) به بررسی و مقایسه ارتفاع درختان از روی تصاویر پهپاد و مقادیر واقعیت زمینی پرداختند؛ در این تحقیق آن‌ها توانستند با میزان جذر میانگین مربعات خطا نسبی بین ۱۰ تا ۱۳ درصد ارتفاع درختان را مدل‌سازی کنند. براساس جدول ۵، از دلایل کاهش میزان خطا در تحقیق آن‌ها نسبت به تحقیق حاضر می‌توان به آشکار بودن کامل سطح زمین به منظور ساخت مدل دقیق‌تر سه بعدی سطح زمین اشاره کرد.

بهتری دارند.

استفاده از فن‌آوری‌های جدید از جمله هواپیماهای بدون سرنشین و کاربرد آن‌ها در مدیریت عرصه‌های پوشیده از جنگل، نه تنها در ایران بلکه در سطح دنیا کاری جدید است. با پیشرفت‌هایی که در زمینه سنجنده‌های قابل نصب بر روی این دستگاه‌ها صورت گرفته است، جایگاه آن‌ها را بسیار گسترش داده است. این تحقیق سعی بر این داشت تا یکی از قابلیت‌های بی‌شمار تصاویر پهپادها را در زمینه مدیریت و آماربرداری جنگل نمایش دهد. استفاده از پهپادها در امر آماربرداری و مخصوصاً برداشت ارتفاع درختان، براساس نتایج این مقاله که در جنگلی با تاج پوشش تقریباً بسته انجام شده است، نتایج ضعیفی را ارائه کرده است. اما باید توجه داشت که قسمت وسیعی از جنگل‌های ایران دارای پوشش تنک بوده و از طریق تصاویر پهپاد، تک‌درختان و نوک آن‌ها به‌منظور اندازه‌گیری ارتفاع، به‌راحتی قابل تشخیص است. استفاده از این وسیله در این مناطق می‌تواند سرعت کار را افزایش دهد و مدیریت این عرصه‌ها را بهبود ببخشد. خوشبختانه با تغییراتی که در زمینه مدیریت جنگل‌ها و همچنین نحوه نگرش مسئولان این بخش اتفاق افتاده است باعث ورود فن‌آوری‌های جدید از جمله پهپادها به این عرصه شده. با ادامه این روند، امید است که بتوان از محصولات خروجی از تصاویر پهپادها، میزان استفاده از آن‌ها را در مبحث مهم آماربرداری نیز گسترش داد.

نتیجه‌گیری

نتایج بررسی‌های فوق نشان داد که اندازه‌گیری مستقیم ارتفاع درختان با استفاده از مدل ارتفاعی تاج منجر به تولید مقادیر اریب شد اما به‌کارگیری مدل‌سازی رگرسیونی، میزان اریبی را بسیار کاهش داد. از طرف دیگر، درصد نسبتاً زیاد جذر میانگین مربعات خطای نسبی نشان از بالا بودن عدم قطعیت برای برآورد ارتفاع درختان دارد. بنابراین به نظر می‌رسد که این روش گرچه ممکن است برای بررسی‌های کیفی و اجمالی توده‌ها مناسب باشد، اما برای اهدافی مانند تهیه طرح‌های جنگلداری یا برداشت چوب، استفاده از این رهیافت‌ها توصیه نمی‌گردد. همچنین به سبب نوپا بودن این دانش و فناوری در داخل کشور بهتر است تلاش‌های

بیشتر با استفاده از رهیافت‌های دیگر مبتنی بر تصاویر پهپاد صورت گیرد تا بتوان هرچه بیشتر اریبی این داده‌های ارزشمند را کاهش داد یا حذف نمود.

منابع مورد استفاده

۱. بابازاده، ا.، ا. دانه‌کار، ب. ریاضی، ا. زاهدی، ف. طاهری و س. موسوی. ۱۳۹۴. تحلیل پوشش گیاهی مناطق باز در پارک جنگلی سیسنگان (استان مازندران). مجله پژوهش‌های گیاهی (مجله زیست‌شناسی)، ۲۸(۳): ۴۸۶-۴۹۸.
۲. بزرگی، ک. و ع. شیخ‌الاسلامی. ۱۳۹۵. بررسی ضریب قدکشیدگی در جنگل راش آمیخته در منطقه حاجیکلا تیرانکلی-ساری. تحقیقات منابع طبیعی تجدیدشونده. ۷(۱): ۱-۱۰.
۳. چناری، ا.، ی. عرفانی‌فرد، م. دهقانی و ح. پورقاسمی. ۱۳۹۶. برآورد مساحت تاج تک‌درختان بنه با استفاده از DSM تصاویر هوایی پهپاد در جنگل تحقیقاتی بنه استان فارس. پژوهش‌های علوم و فناوری چوب و جنگل، ۲۴(۴): ۱۱۷-۱۳۰.
4. Agisoft L, St Petersburg R. 2014. Agisoft photostan. Professional Edition, 7: 340 p.
5. Anderson K, Gaston KJ. 2013. Lightweight unmanned aerial vehicles will revolutionize spatial ecology. *Frontiers in Ecology and the Environment*, 11(3): 138-146.
6. Araus JL, Cairns JE. 2014. Field high-throughput phenotyping: the new crop breeding frontier. *Trends in Plant Science*, 19(1): 52-61.
7. Bhardwaj A, Sam L, Martín-Torres FJ, Kumar R. 2016. UAVs as remote sensing platform in glaciology: Present applications and future prospects. *Remote Sensing of Environment*, 175: 196-204.
8. Dandois JP, Ellis EC. 2010. Remote sensing of vegetation structure using computer vision. *Remote Sensing*, 2(4): 1157-1176.
9. Dellaert F, Seitz SM, Thorpe CE, Thrun S. 2000. Structure from motion without correspondence. In: *Proceedings IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition. CVPR 2000 (Cat. No. PR00662)*. IEEE, pp 557-564.
10. Engel J, Schöps T, Cremers D. 2014. LSD-SLAM: Large-scale direct monocular SLAM. In: *European conference on computer vision*. Springer, pp 834-849.
11. Iizuka 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.
12. Lim YS, La PH, Park JS, Lee MH, Pyeon MW, Kim J-I. 2015. Calculation of tree height and canopy crown

- from drone images using segmentation. *Journal of the Korean Society of Surveying, Geodesy, Photogrammetry and Cartography*, 33(6): 605-613.
13. Lisein J, Linchant J, Lejeune P, Bouché P, Vermeulen C. 2013. Aerial surveys using an unmanned aerial system (UAS): comparison of different methods for estimating the surface area of sampling strips. *Tropical Conservation Science*, 6(4): 506-520.
 14. Malambo L, Popescu SC, Murray SC, Putman E, Pugh NA, Horne DW, Richardson G, Sheridan R, Rooney WL, Avant R. 2018. Multitemporal field-based plant height estimation using 3D point clouds generated from small unmanned aerial systems high-resolution imagery. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, 64: 31-42.
 15. Miller E, Dandois J, Detto M, Hall J. 2017. Drones as a tool for monoculture plantation assessment in the stepland tropics. *Forests*, 8(5): 168.
 16. Mohan M, Silva C, Klauberg C, Jat P, Catts G, Cardil A, Hudak A, 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.
 17. Naesset E. 2002. Predicting forest stand characteristics with airborne scanning laser using a practical two-stage procedure and field data. *Remote Sensing of Environment*, 80(1): 88-99.
 18. Nevalainen O, Honkavaara E, Tuominen S, Viljanen N, Hakala T, Yu X, Hyypä J, Saari H, Pölonen I, Imai N. 2017. Individual tree detection and classification with UAV-based photogrammetric point clouds and hyperspectral imaging. *Remote Sensing*, 9(3): 185.
 19. 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(8-10): 2392-2410.
 20. Puliti S, Ørka H, Gobakken T, Næsset E. 2015. Inventory of small forest areas using an unmanned aerial system. *Remote Sensing*, 7(8): 9632-9654.
 21. Shao G, Zhao S, Shugart H. 1995. Forest dynamics modeling: preliminary explanations of optimizing management of Korean pine forests. China Forestry Publishing House, Beijing, 255 p.
 22. Yu X, Hyypä J, Holopainen M, Vastaranta M. 2010. Comparison of area-based and individual tree-based methods for predicting plot-level forest attributes. *Remote Sensing*, 2(6): 1481-1495.
 23. Zarco-Tejada PJ, Diaz-Varela R, Angileri V, 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.
 24. Zimble DA, Evans DL, Carlson GC, Parker RC, Grado SC, Gerard PD. 2003. Characterizing vertical forest structure using small-footprint airborne LiDAR. *Remote Sensing of Environment*, 87(2-3): 171-182.



Using canopy height model derived from UAV images for tree height estimation in Sisangan forest

M. R. Kargar¹, H. Sohrabi^{2*}

1 MSc. Student of Forest Sciences and Engineering, Faculty of Natural Resources and Marine Sciences, Tarbiat Modares University

2. Assoc. Prof. Department of Forest Sciences and Engineering, Faculty of Natural Resources and Marine Sciences, Tarbiat Modares University

ARTICLE INFO

Article history:

Received 2 October 2018

Accepted 30 June 2019

Available online 17 October 2019

Keywords:

Unmanned aerial vehicle (UAV)

Structure from Motion (SFM) algorithm

Crown height model

Digital terrain model

Sisangan

ABSTRACT

Recent advances in unmanned aerial vehicles (UAVs) technology, as well as the development of lightweight sensors, offers a great possibility for the measurement of different tree features with relatively low costs compared to traditional methods. In this research, the precision and accuracy of tree height measurement and estimation using imagery by a low-cost UAV were studied. For this aim, 854 images with an altitude of 100 m above the ground were taken and the images were processed and dense point cloud was extracted by applying Structure from Motion (SFM) algorithm. The study was conducted in 34.79 ha of Sisangan forest park and 28 sample plots (30 × 30 m) were located in the field and tree heights were measured. Also, tree height was measured using the canopy height model. Linear regression was applied to estimate the actual tree heights based on CHM derived tree heights. The accuracy and precision of the estimates were assessed using relative bias and relative root mean square error. The differences between the field measured and CHM derived tree heights were statistically significant. Based on the results, the relative root means the square error of the height estimation of *Buxus hyrcana*, *Carpinus betulus*, *Parrotia persica*, and other species was 20.39, 20.39, 20.57 and 20.52 percent, respectively. The results showed that tree height measurement based on UAV images and methods that were applied in this research, is biased and the estimations are highly uncertain.

* Corresponding author e-mail address: hsohrabi@modares.ac.ir