



مقایسه ابر نقاط و تصاویر رنگی پهپاد در برآورد مساحت تاج تک درختان در جنگل‌های دست کاشت کاج تهران (*Pinus eldarica*)



علی حسینی زاده^۱، سید یوسف عرفانی فرد^{۲*}، سید کاظم علوی پناه^۳، هومن لطیفی^۴، یاسر جویباری مقدم^۵

دریافت: ۱۴۰۰/۱۱/۲۵ / پذیرش: ۱۴۰۰/۱۲/۱۵ / دسترسی اینترنتی: ۱۴۰۲/۰۳/۰۱

چکیده

کاربرد داده‌های پهپادی در اندازه‌گیری ویژگی‌های کمی تک درختان از جمله مساحت تاج به سرعت در حال توسعه است. هرچند کارایی انواع داده‌های قابل جمع‌آوری توسط پهپادها در این زمینه کمتر مورد مقایسه قرار گرفته است.

علی حسینی زاده^۱، سید یوسف عرفانی فرد^{۲*}، سید کاظم علوی پناه^۳، هومن لطیفی^۴، یاسر جویباری مقدم^۵

۱. دانشجوی دکتری سنجش از دور و سیستم اطلاعات جغرافیایی، دانشکده جغرافیا، دانشگاه تهران، ایران

۲. دانشیار گروه سنجش از دور و سیستم اطلاعات جغرافیایی، دانشکده جغرافیا، دانشگاه تهران، تهران، ایران

۳. استاد گروه سنجش از دور و سیستم اطلاعات جغرافیایی، دانشکده جغرافیا، دانشگاه تهران، تهران، ایران

۴. دانشیار گروه فتوگرامتری و سنجش از دور، دانشکده مهندسی ژئودزی و ژئوماتیک، دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی، تهران، ایران

۵. استادیار گروه مهندسی نقشه‌برداری، دانشکده فنی مهندسی، دانشگاه بجنورد، بجنورد، ایران

DOI: 10.30495/girs.2023.689615

پست الکترونیکی مسئول مکاتبات: erfanifard@ut.ac.ir

بنابراین پژوهش حاضر با هدف مقایسه تصاویر رنگی و ابر نقاط پهپاد در برآورد مساحت تاج تک درختان کاج در یک جنگل دست کاشت در پارک پردیسان استان خراسان شمالی انجام شد. هر دو داده برای برآورد مساحت تاج ۳۲۴ درخت کاج با قطعه‌بندی تصویر RGB و الگوریتم Marker-Controlled Watershed تحلیل شدند. نتایج نشان داد مساحت تاج برآوردی روی ابر نقاط از صحت و دقت بیشتری نسبت به تصاویر رنگی (به ترتیب ضریب همبستگی ۰/۹۵ و ۰/۸۱، ضریب تعیین ۰/۹۷ و ۰/۵۹، مقایسه جفتی با $P = ۰/۹۷$ و $P < ۰/۰۵$) برخوردار بود. علاوه بر این، مساحت تاج درختان کاج با تاج بزرگ (< ۱۸ مترمربع) با صحت بیشتری نسبت به درختان با تاج متوسط و کوچک روی ابر نقاط پهپاد برآورد شده است. به‌طور کلی، می‌توان نتیجه گرفت در برآورد مساحت تاج درختان کاج تهران در جنگل دست کاشت مورد مطالعه، قطعه‌بندی ابر نقاط حاصل از داده‌های پهپاد از کارایی بیشتری نسبت به قطعه‌بندی تصاویر رنگی برخوردار بوده است.

پیشینه و هدف

جنگل‌های دست کاشت با اهداف بوم‌شناختی چون حفظ منابع آب و خاک و اهداف اقتصادی مانند تولید چوب و به‌طور کلی، کاهش

فشار بر جنگل‌های طبیعی ایجاد می‌شوند. اهداف بوم‌شناختی و اقتصادی جنگل‌های دست کاشت با زی‌توده روزمینی تک‌درختان آن‌ها ارتباط نزدیکی دارد. تاج به عنوان یکی از ویژگی‌های کمی مهم هر درخت علاوه بر داشتن سهم در زی‌توده روزمینی؛ عملکردهای مختلفی از جمله جذب دی‌اکسید کربن، آزاد کردن اکسیژن و انرژی از طریق فتوسنتز و تنفس را نیز دارد. از طرفی، اندازه تاج درخت با رشد درخت کاملاً ارتباط دارد و از این رو نیز عامل مهمی در اندازه‌گیری‌های درختان جنگلی است. با توجه به اهمیت مشخصه تاج درختان که به برخی از آن‌ها اشاره شد، تاکنون روش‌های مختلفی برای اندازه‌گیری آن در عرصه ارائه شده است. علیرغم ارائه روش‌های متعدد میدانی، اندازه‌گیری مستقیم مساحت تاج علاوه بر هزینه و زمان، با دشواری نیز همراه است. یکی از روش‌هایی که در دهه اخیر مورد استقبال پژوهشگران و مدیران جنگل قرار گرفته، استفاده از تصاویر رنگی و ابر نقاط پهناد است. کارایی این داده‌ها در برآورد مساحت تاج تک‌درختان جنگل‌های دست کاشت به طور جداگانه تأیید شده است. اگرچه این پرسش مطرح است که با وجود دسترسی به دو نوع داده تصاویر رنگی و ابر نقاط پس از تصویربرداری با پهناد، کدامیک می‌توانند در برآورد درست مساحت تاج تک‌درختان در جنگل‌های دست کاشت کارآمدتر باشند. بنابراین، پژوهش حاضر با هدف مقایسه تصاویر رنگی و ابر نقاط حاصل از تصویربرداری با پهناد در برآورد مساحت تاج تک‌درختان در یک جنگل دست کاشت از گونه کاج تهران انجام گرفت. دستاوردهای پژوهش حاضر می‌تواند گامی مهم در راستای تأمین داده‌های مورد نیاز در مدیریت پایدار جنگل‌های دست کاشت در نظر گرفته شود.

مواد و روش‌ها

در راستای اهداف پژوهش حاضر، یک محدوده با مساحت تقریبی ۱۴ هکتار از جنگل‌های دست کاشت خالص از کاج تهران (*Pinus eldarica*) در پارک پردیسان خراسان شمالی انتخاب شد. درختان کاج در این مجموعه در دو مقطع زمانی در سال‌های ۱۳۸۳ و ۱۳۸۹ و با فاصله حدود ۳ متر از یکدیگر کاشته شده‌اند. کلیه درختان در منطقه مطالعاتی (تعداد ۳۲۴ درخت) در مدت پنج روز مورد اندازه‌گیری دقیق قرار گرفتند. علاوه بر موقعیت مکانی هر درخت، ویژگی‌های کمی شامل دو قطر عمود بر هم تاج، قطر برابر سینه و ارتفاع اندازه‌گیری شد. همچنین منطقه با استفاده از پهناد فانتوم ۴

پرو در روز ۱۴ اسفندماه ۱۳۹۹ در ساعت حدود ۱۴:۳۰ تصویربرداری شد. جمع‌آوری تصاویر در این پژوهش با توجه به نوع توپوگرافی در ارتفاع ۴۰ متری و بصورت قائم با همپوشانی طولی و عرضی ۸۰ و ۴۰ درصد صورت گرفت. به منظور زمین مرجع سازی تصاویر مذکور و تهیه موزاییک آن‌ها از ۱۴ نقطه کنترل زمینی استفاده شد. از تصاویر رنگی پس از پردازش‌های لازم، مدل سه بعدی با استفاده از الگوریتم ساختار حرکت مبنا ایجاد شد. در مرحله بعد ابر نقاط با تراکم ۱/۲۷ نقطه در هر سانتیمتر مربع تهیه شد. برآورد مساحت تاج درختان کاج روی تصاویر رنگی با روش قطعه‌بندی چندمقیاسه روی ترکیب باندهای سبز و قرمز انجام شد. در فرایند قطعه‌بندی، با توجه به شکل تاج درختان کاج و شرایط منطقه مطالعاتی؛ پس از استفاده از روش آزمون و خطا و تفسیر بصری، ضرایب مناسب برای پارامترهای قطعه‌بندی جهت تشخیص دقیق مرز تاج درختان تعیین شد. در نهایت با محاسبه مساحت محدوده شناسایی شده به عنوان تاج، مقدار مساحت تاج هر یک از درختان کاج در منطقه مورد مطالعه به دست آمد. سپس از ابر نقاط یک مدل ارتفاعی تاج تهیه شده و به منظور قطعه‌بندی آن از الگوریتم Marker-Controlled Watershed (MCW) استفاده شد. تاج شناسایی شده درختان کاج در منطقه مطالعاتی برای تعیین مساحت تاج هر یک از درختان به کار رفت. به منظور ارزیابی صحت مساحت تاج درختان کاج برآورد شده روی تصاویر رنگی و ابر نقاط از آزمون آماری مناسب برای مقایسه مقادیر برآورد شده با مقادیر واقعی استفاده شد. همچنین نمودار یک‌به‌یک مقادیر واقعی و برآوردی در دو روش و ضریب همبستگی اسپیرمن آن‌ها مورد ارزیابی قرار گرفت. به منظور بررسی بیشتر نتایج، مساحت تاج واقعی درختان به سه طبقه کوچک (کوچک‌تر از ۱۲ مترمربع)، متوسط (۱۸ - ۱۲ مترمربع) و بزرگ (بزرگ‌تر از ۱۸ مترمربع) تقسیم شد و نمودار یک‌به‌یک و ضریب تعیین خط برازش شده در طبقات ذکر شده ارزیابی شد. به منظور ارزیابی دقت نتایج از سه شاخص مجذور میانگین مربعات خطای نسبی (RRMSE)، کارایی مدل (ME) و امتیاز اریبی (BS) استفاده شد.

نتایج و بحث

مساحت تاج ۳۲۴ درخت کاج که در منطقه مطالعاتی ثبت شدند با قطعه‌بندی تصاویر رنگی و ابر نقاط برآورد شد. در پژوهش حاضر

مساحت تاج برآوردی روی ابر نقاط در درختان با تاج بزرگ (ضریب تعیین ۰/۹۳) و کمترین تطابق مقادیر واقعی و برآوردی در مورد مساحت تاج درختان متوسط روی تصاویر رنگی به دست آمد (ضریب تبیین ۰/۱۴).

نتیجه‌گیری

به‌طور کلی یافته‌های پژوهش نشان داد که در برآورد مساحت تاج تک‌درختان کاج تهران با داده‌های پهپاد، تصاویر رنگی از کارایی کمتری نسبت به ابر نقاط برخوردار بودند. همچنین مساحت تاج در درختان کاج با اندازه تاج بزرگ با صحت بیشتری نسبت به درختان با تاج متوسط و کوچک روی ابر نقاط پهپاد برآورد شده است. برتری ابر نقاط نسبت به تصاویر رنگی برای برآورد مساحت تاج تک‌درختان کاج در شرایط یکسان (نوع پهپاد، شرایط مکانی و زمانی تصویربرداری، روش قطعه‌بندی) در پژوهش حاضر می‌تواند در مطالعات آتی مورد بررسی بیشتر قرار گیرد.

واژه‌های کلیدی: الگوریتم Marker-Controlled Watershed، پارک پردیسان بجنورد، قطعه‌بندی، مدل ارتفاعی تاج.

برای قطعه‌بندی CHM از الگوریتم MCW استفاده شد که کارایی آن در شناسایی درختان کاج در پژوهش‌های پیشین نیز تأیید شده است. مقایسه جفتی مساحت تاج برآورد شده با استفاده از تصاویر رنگی و ابر نقاط با مقدار واقعی نشان داد که استفاده از ابر نقاط داده‌های پهپاد امکان برآورد مساحت تاج تک‌درختان کاج در منطقه مطالعاتی را بدون اختلاف معنی‌دار با مقدار واقعی آن‌ها ($p = 0/97$) فراهم نمود. درحالی‌که مساحت تاج برآوردی همان درختان با استفاده از قطعه‌بندی تصاویر رنگی دوبعدی با مقدار واقعی اختلاف معنی‌دار داشت ($p < 0/05$). ضریب همبستگی بین مقادیر واقعی مساحت تاج تک‌درختان کاج و مساحت تاج تک‌درختان برآورد شده روی تصاویر رنگی و ابر نقاط به ترتیب ۰/۸۱ و ۰/۹۵ به دست آمد. همچنین مقایسه نتایج با نمودار یک‌به‌یک نشان داد مقادیر واقعی مساحت تاج درختان کاج با مقادیر برآوردی روی تصاویر رنگی و ابر نقاط دارای ضریب تعیین ۰/۵۹ و ۰/۹۷ بودند. در ارزیابی دقت مساحت تاج برآورد شده روی تصاویر رنگی و ابر نقاط، شاخص‌های RRMSE به ترتیب ۳۰ و ۱۵ درصد، ME به ترتیب ۰/۲۴ و ۰/۳۱ و BS به ترتیب ۱/۳۲ و ۰/۹۳ به دست آمدند. علاوه بر این، مقایسه نتایج برآورد مساحت تاج در سه طبقه اندازه تاج کوچک، متوسط و بزرگ؛ بیشترین تطابق با مقادیر واقعی در

مقدمه

جنگل‌های دست‌کاشت با اهداف بوم‌شناختی چون حفظ منابع آب‌وخاک و اهداف اقتصادی مانند تولید چوب و به‌طورکلی، کاهش فشار بر جنگل‌های طبیعی ایجاد می‌شوند. بنابراین آگاهی از وضعیت مشخصات کمی و کیفی جنگل همواره مورد توجه مدیران این نوع جنگل‌ها بوده است تا به آن‌ها در برنامه‌ریزی آینده و دستیابی به اهداف اولیه کمک نماید. برآورد دقیق و صحیح ویژگی‌های کمی تک‌درختان و پایش تغییرات آن‌ها در جنگل‌های دست‌کاشت ازجمله داده‌های مهمی است که دسترسی به آن در مدیریت پایدار این جنگل‌ها ضروری است. این موضوع زمینه توسعه راهکارهایی شده که امکان کسب اطلاعات دقیق و قابل اعتماد از منابع جنگلی به‌منظور تصمیم‌گیری‌های مؤثر در حفظ و توسعه جنگل‌های دست‌کاشت را فراهم می‌کنند (۱۷، ۲۷).

اهداف بوم‌شناختی و اقتصادی جنگل‌های دست‌کاشت با زی‌توده روزمینی تک‌درختان آن‌ها ارتباط نزدیکی دارد. حجم و زی‌توده تنه و تاج تک‌درختان در تحلیل‌های بوم‌شناختی، برآورد میزان رویش جنگل، مدلسازی رفتار آتش‌سوزی و همچنین سهم جنگل در ترسیب کربن اهمیت دارد. علاوه بر این، پژوهش‌های پیشین نشان می‌دهند که اندازه‌گیری زی‌توده و سایر مشخصات کمی تاج تک‌درختان به عنوان مشخصه‌های کلیدی در برآورد موجودی جنگل محسوب می‌شود. امکان برآورد زی‌توده تاج با استفاده از معادلات آلومتریک امکان‌پذیر است، هرچند این معادلات نیاز به اندازه‌گیری درست ویژگی‌های کمی تاج ازجمله قطر، مساحت و هندسه آن در مقیاس تک‌درختان دارند (۵، ۲۴).

تاج به عنوان یکی از ویژگی‌های کمی مهم هر درخت علاوه بر داشتن سهم در زی‌توده روزمینی؛ عملکردهای مختلفی ازجمله جذب دی‌اکسید کربن، آزاد کردن اکسیژن و انرژی از طریق فتوسنتز و تنفس را نیز دارد. از طرفی، اندازه تاج درخت و مساحت تحت پوشش آن با رشد درخت کاملاً ارتباط داشته و ازاین‌رو نیز عامل مهمی در اندازه‌گیری‌های درختان جنگلی است. پارامترهای قطر، مساحت و حجم تاج به

عنوان تعدادی از پارامترهای اساسی برای توصیف ساختار درخت هستند. این پارامترها در مدلسازی بسیاری از مشخصه‌های دیگر می‌تواند تأثیر زیادی داشته و تعیین درست آن‌ها بر بهبود دقت مدلسازی و پیش‌بینی‌های حاصل از آن نقش داشته باشد (۲۶). با توجه به اهمیت مشخصه تاج درختان که به برخی از آن‌ها اشاره شد، تاکنون روش‌های مختلفی برای اندازه‌گیری آن در عرصه ارائه شده است. علیرغم ارائه روش‌های متعدد میدانی، اندازه‌گیری مستقیم زمینی مساحت تاج علاوه بر هزینه و زمان، با دشواری نیز همراه است (۷). تشخیص محل دقیق لبه تاج در هنگام مساحی توسط آمبردار ممکن است با خطا همراه باشد که این خطا می‌تواند بر برآورد مساحت تاج تأثیر قابل ملاحظه‌ای داشته باشد (۱۴). برای حل این مسئله، روش‌ها و ابزارهای مختلفی که می‌توانند مشخصات هندسی تاج درختان را ترسیم کنند توسعه داده شده‌اند که مبتنی بر فناوری‌های نوین هستند.

یکی از روش‌هایی که در دهه‌های اخیر مورد استقبال پژوهشگران و مدیران جنگل قرار گرفته، استفاده از فتوگرامتری است. داده‌های فتوگرامتری د با ارائه دید عمودی از تاج تک‌درختان امکان مشاهده دقیق آن‌ها و شناسایی مرز تاج آن‌ها را به ویژه در جنگل‌های تنک فراهم می‌سازد (۱۰). علیرغم توسعه و پیشرفت‌های چشمگیر تصاویر تهیه شده از ماهواره‌ها و همچنین دسترسی به مجموعه‌ای مناسب از شاخص‌های پوشش گیاهی با توجه به تفکیک‌پذیری طیفی مناسب، این تصاویر به دلیل محدودیت در تفکیک‌پذیری مکانی نمی‌توانند در برخی پژوهش‌ها ازجمله در ارزیابی ویژگی‌های کمی تک‌درختان بطور مناسب استفاده شوند (۲، ۱۲). یکی دیگر از داده‌های در دسترس در فتوگرامتری که کارایی آن در برآورد مساحت تاج تک‌درختان جنگل‌های طبیعی و دست‌کاشت تأیید شده، داده‌های جمع‌آوری‌شده با پهپادها هستند (۱۹). پهپادها با پرواز در ارتفاع نزدیک زمین تا حدود ۳۰ کیلومتری می‌توانند تصاویری با تفکیک‌پذیری مکانی زیاد تا بسیار زیاد فراهم کنند. به لحاظ نظری، این داده‌ها را می‌توان در مطالعه جزئیات دقیق هر پدیده‌ای ازجمله تک‌درختان مورد استفاده

با پهپاد در برآورد مساحت تاج تک‌درختان در یک جنگل دست کاشت از گونه کاج تهران انجام گرفت. از آنجایی که کاج تهران یکی از گونه‌های مهم سوزنی‌برگ است که علاوه بر جنگل‌های دست کاشت، در فضا‌های سبز شهری و کمربند‌های سبز اطراف شهرها در کشور مورد استفاده گسترده قرار گرفته، نتایج این مطالعه می‌تواند مورد استفاده پژوهشگران و مدیران شهری و منابع طبیعی قرار گیرد. انتخاب داده مناسب با توجه به دستاوردهای پژوهش حاضر و برآورد درست مشخصات تاج تک‌درختان می‌تواند گامی مهم در تأمین داده‌های مورد نیاز در مدیریت پایدار جنگل‌های دست کاشت در نظر گرفته شود.

مواد و روش‌ها

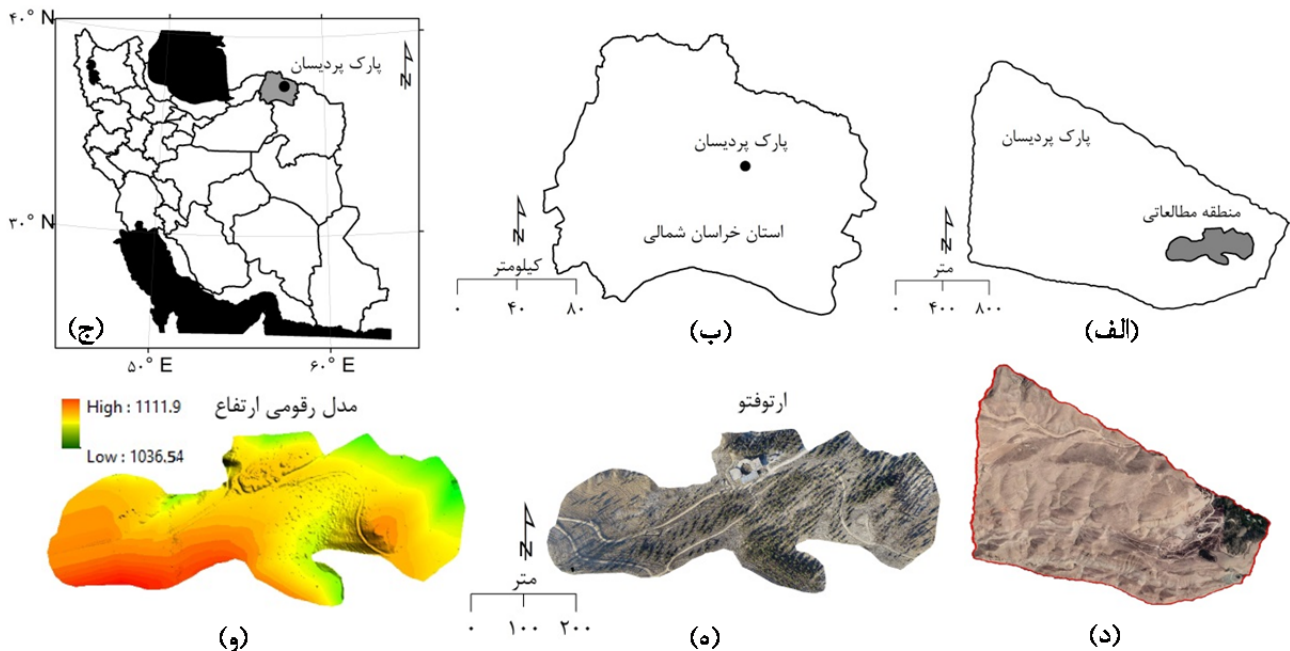
منطقه مورد مطالعه

پارک پردیسان خراسان شمالی در کیلومتر هشت جاده بجنورد به مشهد (37°N, 57°E, Zone 40 N, 28' 49"E-37° 25' 57°)، در مجاورت پارک جنگلی باباامان و در ارتفاع میانگین ۱۰۸۰ متری از سطح دریا واقع گردیده است (شکل ۱ الف-ج). این مجموعه بصورت حصارکشی دو ردیف تحت مدیریت اداره کل حفاظت محیط‌زیست استان خراسان شمالی قرار داشته و به طور خالص پوشیده از گونه کاج تهران (*Pinus eldarica*) است. درختان در این مجموعه در دو مقطع زمانی در سال‌های ۱۳۸۳ و ۱۳۸۹ و با فاصله حدود ۳ متر از یکدیگر کاشته شده‌اند. منطقه از نظر نوع آب‌وهوا بر اساس معیار کوپن بصورت سرد نیمه‌خشک و از نظر توپوگرافی دارای شیب نسبتاً زیاد است که میانگین بارندگی و دمای آن بر اساس آمار ایستگاه هواشناسی فرودگاه بجنورد (نزدیک‌ترین ایستگاه به منطقه مورد مطالعه) در یک بازه زمانی ۱۰ ساله (۱۳۹۰-۱۴۰۰) به ترتیب ۲۶۰ میلی‌متر و ۱۵ درجه سانتی‌گراد است. عمده نوع خاک این پارک نیز سیلتی رسی و سیلتی لومی است. اگرچه مساحت پارک حدوداً ۳۵۱ هکتار بوده که تقریباً ۲۱ هکتار آن از جنگل دست کاشت کاج تهران پوشیده شده است (شکل ۱)، با توجه به محدودیت در صدور مجوزهای حضور و پرواز در منطقه، برای پژوهش حاضر یک محدوده با مساحت تقریبی

قرار داد. اگرچه تصاویر تهیه شده با پهپادها نسبت به تصاویر ماهواره‌ای از تفکیک‌پذیری طیفی کمتری برخوردار هستند ولی از تصاویر رنگی پهپادها می‌توان در برآورد مساحت تاج از طریق قطعه‌بندی و طبقه‌بندی شی گرا بهره برد. علاوه بر این، با توجه به همپوشانی این تصاویر امکان تولید ابر نقاط سه بعدی با تراکم نقطه تقریباً مناسب نیز فراهم است (۲۱). دسترسی به ابر نقاط با هزینه کمتر نسبت به لایدار (LiDAR) و با تراکم نقاط زیاد، تهیه مدل رقومی سطح (Digital Surface Model: DSM) را در مناطق جنگلی ممکن می‌سازد. از DSM می‌توان به مدل رقومی زمین (Digital Terrain Model: DTM) رسید که تفاضل آن‌ها مدل ارتفاعی تاج (Crown Height Model: CHM) را می‌سازد. کارایی CHM در شناسایی تاج در سطح تک‌درخت در جنگل‌های مختلف از جمله جنگل‌های سوزنی برگ با تراکم پایین نیز تأیید شده است (۱۰).

بررسی پژوهش‌های پیشین که به برخی از آن‌ها اشاره شد، مشخص کرد که کارایی داده‌های پهپاد در برآورد مساحت تاج تک‌درختان در انواع بوم‌سازگان‌ها از جمله جنگل‌های دست کاشت به طور جداگانه تأیید شده است. اگرچه این پرسش مطرح است که با وجود دسترسی به دو نوع داده تصاویر رنگی و ابر نقاط پس از تصویربرداری با پهپاد، کدامیک می‌تواند در برآورد درست مساحت تاج تک‌درختان در جنگل‌های دست کاشت کارآمدتر باشند. با وجود اینکه هر کدام از این داده‌ها به تنهایی مورد ارزیابی قرار گرفته و دقت و صحت مساحت تاج برآورد شده با هر کدام از آن‌ها تأیید شده است ولی مشخص نیست در شرایط یکسان، کدام نوع داده می‌تواند عملکرد بهتری داشته باشد. با توجه به این مسئله و همچنین دستاوردهای مطالعات قبلی، این فرضیه مطرح است که ابر نقاط با فراهم کردن امکان تشخیص مرز تاج تک‌درختان و تفکیک دقیق‌تر آن از سایه می‌تواند از کارایی بیشتری نسبت به تصاویر رنگی در برآورد مساحت تاج تک‌درختان برخوردار باشد. بنابراین به منظور آزمون این فرضیه، پژوهش حاضر با هدف مقایسه تصاویر رنگی و ابر نقاط حاصل از تصویربرداری

۱۴ هکتار در نظر گرفته شد که ارتوفتوی رقومی آن با تصویربرداری با پهپاد (شکل ۱- ه) تهیه شد. همچنین مدل رقومی ارتفاع (DEM) منطقه مورد مطالعه با دامنه ارتفاعی ۱۱۱۱/۹ تا ۱۰۳۶/۵ متر تهیه گردید (شکل ۱- و).



شکل ۱- موقعیت منطقه مورد مطالعه در پارک پردیسان (الف) استان خراسان شمالی (ب) و ایران (ج) تصویر پارک پردیسان از GoogleEarth (تاریخ تصویر ۱۴ اوت ۲۰۲۱) (د)، ارتوفتو (ه) و مدل رقومی ارتفاع منطقه مورد مطالعه نیز ارائه شده است (و).

Figure 1- Location of the study area in Pardisan Park (الف) of North Khorasan Province (ب) and Iran (ج) Image of Pardisan Park from GoogleEarth (image date ۱۴th August ۲۰۲۱) (د), orthophoto (ه) and digital model of elevation of the study area are also provided (و).

داده برداری میدانی

sensor)، موقعیت صحیح هر درخت به دقت ثبت شد تا هرگونه خطای انسانی ناشی از عدم تراز بودن دستگاه توسط پژوهشگر در موقع برداشت رفع گردد. سپس ویژگی‌های کمی هر درخت شامل دو قطر عمود بر هم تاج (با استفاده از متر فلزی استاندارد)، قطر برابر سینه (خط کش دو بازو) و ارتفاع (دوربین توتال استین لایکا مدل TS02) اندازه‌گیری شده و در فرم نمونه‌برداری درج شد. از دو قطر عمود بر هم تاج برای تعیین مساحت تاج استفاده شد (۲۸).

تصویربرداری با پهپاد

در پژوهش حاضر از تصاویر RGB پهپاد فانتوم ۴ پرو (Phantom 4 Pro) استفاده شد. پهپاد مذکور دارای گیمبال (Gimbal) سه محوره جهت جلوگیری از هرگونه لرزش و

در راستای اهداف پژوهش حاضر کلیه درختان منطقه مطالعاتی (تعداد ۳۲۴ درخت) در مدت پنج روز مورد اندازه‌گیری دقیق قرار گرفتند. بدین منظور ابتدا موقعیت همه درختان با بکارگیری موقعیت‌یاب جهانی دو فرکانسه رایمند مدل iRoG3B تحت سامانه شمیم (شبکه موقعیت‌یابی یکپارچه مالکیت‌ها) با دقت مسطحاتی ۰/۴۵ سانتیمتر و دقت ارتفاعی ۰/۸ سانتیمتر ثبت شد. بمنظور برداشت صحیح و یکدست درختان در بازه دقت‌های مسطحاتی و ارتفاعی، در دستگاه مورد استفاده محدوده مجاز دقت (دقت مسطحاتی کمتر از ۰/۵ سانتیمتر و دقت ارتفاعی کمتر از یک سانتیمتر) تعریف گردید تا ثبت موقعیت درخت در خارج از بازه تعریف شده صورت نگیرد. همچنین با فعال‌سازی حسگر کجی دستگاه (Tilt

نظر تار بودن و پخش نور در لبه‌های تصویر مورد تأیید قرار گیرد. همچنین شرایط محیطی از جمله باد ملایم با سرعت کمتر از یک گره و صاف بودن هوا در انتخاب روز پرواز در نظر گرفته شد. مشخصات کلی دوربین مورد استفاده و تصاویر هوایی رقومی دریافت شده در جدول ۱ آمده است.

ایجاد تعادل مناسب دوربین در مأموریت‌های مختلف برداشت تصویر است به‌گونه‌ای که از برداشت تصاویر با تیلت زیاد جلوگیری می‌کند. جمع‌آوری تصاویر در این پژوهش با توجه به نوع توپوگرافی در ارتفاع ۴۰ متری و بصورت قائم با همپوشانی طولی و عرضی ۸۰ و ۴۰ درصد صورت گرفت (۱۸).

جدول ۱- مشخصات دوربین پهپاد به‌کاررفته و تصاویر هوایی رقومی تهیه شده در پژوهش حاضر (تارنمای www.dji.com، تاریخ دسترسی: ۲۸ آذر ۱۴۰۰)

Table ۱- Specifications of the UAV camera used and digital aerial images prepared in the present study (website

www.dji.com, access date: ۲۸ Azar ۱۴۰۰)

JPG	قالب تصویر	DJI	سازنده دوربین
RGB	ترکیب رنگی	FC6310	مدل دوربین
نرمال	اشباع	۲۴ میلی‌متر	فاصله کانونی
نرمال	وضوح	۳۴۴۸ × ۵۴۷۲ پیکسل	ابعاد تصویر
نرمال	تباین	۲۰ مگا پیکسل	حجم هر تصویر
۴ متر بر ثانیه	سرعت پهپاد	۱/۱۶۰ ثانیه	سرعت پلک
فعال	حالت کنترل کجی دوربین	۷۲ dpi	تفکیک‌پذیری افقی
GPS/GLONASS	سامانه موقعیت‌یابی	۷۲dpi	تفکیک‌پذیری عمودی

پژوهش تعداد ۳۹ تصویر که دارای شرایط لازم نبودند از روند کار کنار گذاشته شد. از تصاویر باقیمانده پس از پردازش‌های لازم، مدل سه بعدی با استفاده از الگوریتم ساختار حرکت مبنا (SFM: Structure from motion) ایجاد شد. در مرحله بعد ابر نقاط در حالت تراکم نقاط بالا (High Density) (تعداد ۱/۲۷ نقطه در هر سانتیمترمربع) تهیه شد. بر روی ابر نقاط متراکم فیلتر میانه (Median) برای کاهش نویز مورد استفاده قرار گرفت تا در پردازش‌های اختلال و یا خطا ایجاد نکند.

برآورد مساحت تاج روی تصاویر رنگی

در این پژوهش از روش قطعه‌بندی چندمقیاسه (Multiresolution segmentation) در تصاویر رنگی برای شناسایی تاج درختان کاج استفاده شد. ابتدا با توجه به رابطه ۱ (۱)، یک تصویر VI_{green} از باندهای سبز و قرمز تصویر رنگی پهپاد در منطقه مورد مطالعه تهیه شد.

$$VI_{green} = \frac{green-red}{green+red} \quad [1]$$

تصویربرداری در روز ۱۴ اسفندماه ۱۳۹۹ در ساعت حدود ۱۴:۳۰ انجام شد و در مجموع تعداد ۹۵۲ تصویر استاندارد و بررسی شده برای پوشش منطقه مورد مطالعه تهیه شد. به منظور زمین مرجع سازی تصاویر مذکور و تهیه موزاییک آن‌ها از ۱۴ نقطه کنترل زمینی استفاده شد. در انتخاب نقاط کنترل زمینی مواردی همچون فاصله مناسب نقاط از یکدیگر، پراکندگی در سطح منطقه مورد مطالعه به همراه ماندگاری و دید مناسب از جهت‌های مختلف برداشت تصویر، مورد توجه قرار گرفت. بمنظور جلوگیری از برخی خطاها از جمله کشیدگی در حین تصویربرداری، از سرعت حدود ۴ متر بر ثانیه استفاده شد (۲۰).

پیش‌پردازش و استخراج ابر نقاط

پس از تصویربرداری، تصاویر مورد بررسی جداگانه قرار گرفت تا در صورت تار بودن، کج شدگی بیش از اندازه مجاز و یا تأثیر شدید نور آفتاب، از روند کار حذف گردد که در این

سپس قطعه‌بندی چندمقایسه روی تصویر مذکور انجام شد. در فرایند قطعه‌بندی، با توجه به شکل تاج درختان کاج و همچنین پژوهش‌های پیشین (۱۰) و شرایط منطقه مطالعاتی؛ پس از استفاده از روش آزمون و خطا و تفسیر بصری، ضرایب مناسب برای پارامترهای قطعه‌بندی ($Scale\ Parameter=25\ Pixel$, $Shape=0.1$, $Compactness=0.5$ در واحد پیکسل) جهت تشخیص دقیق مرز تاج درختان تعیین شد. در نهایت با محاسبه مساحت محدوده شناسایی شده به عنوان تاج، مقدار مساحت تاج هر یک از درختان کاج در منطقه مورد مطالعه به دست آمد.

برآورد مساحت تاج روی ابر نقاط

برخلاف داده‌های لایدار که ماهیت آن بصورت برگشت‌های نوبتی نظیر برگشت اول و آخر است (۴)، در داده‌های پهپاد امکان جداسازی نقاط برگشت اول و آخر فراهم نیست. بنابراین برای حل این چالش، بعد از استخراج ابر نقاط با الگوریتم SFM و کاهش نویز و در نهایت ساخت DSM، نقاط سطح زمین از عوارض بالای آن بر اساس حداقل و حداکثر ارتفاع جدا شدند. با استفاده از نقاط فیلتر شده و روش وزن دهی معکوس فاصله (Inverse Distance Weighting, IDW) ساخته شد. سپس از تفاضل آن‌ها CHM (رابطه ۲) بدست آمد. برای تهیه DSM، DTM و CHM از نرم‌افزارهای Cloudcompare، Globalmapper و محیط کدنویسی Matlab استفاده شد. اندازه فاصله نمونه‌برداری زمینی (Ground sample distance, GSD) برای همه داده‌ها ۲ سانتیمتر در نظر گرفته شد.

$$CHM=DSM-DTM \quad [2]$$

به منظور قطعه‌بندی CHM و شناسایی مرز تاج ۳۲۴ درخت کاج روی CHM منطقه، از الگوریتم Marker-Controlled Watershed (MCW) استفاده شد. الگوریتم MCW یک الگوریتم غیرخطی است که عمدتاً برای اهدافی همچون قطعه‌بندی استفاده می‌شود. ابتدا با استفاده از یک فیلتر حداکثر

محلی (Local maximum) نوک تاج درختان کاج در منطقه مورد مطالعه مشخص شد. دو داده نوک تاج درختان و CHM به الگوریتم MCW وارد شد. از آنجایی که نقاط کنترل نوک تاج درختان کاج بودند، محدوده مشخص شده به دور هر نقطه گرادیان کاهشی بوده و نشان‌دهنده محدوده تاج درختان است. مزیت الگوریتم MCW نسبت به الگوریتم Watershed این است که تعیین محدوده گرادیان کاهشی (یا همان حوضه) فقط در اطراف نقاط مشخص شده به عنوان نوک تاج درختان اجرا می‌شود. این موضوع باعث می‌شود یک تناظر یک‌به‌یک بین نوک تاج درختان و محدوده تاج شناسایی شده با الگوریتم MCW برقرار شود و بروز خطا در شناسایی تاج کاهش یابد (۸، ۲۳). تاج شناسایی شده درختان کاج در منطقه مطالعاتی برای تعیین مساحت تاج هر یک از درختان به کار رفت.

ارزیابی صحت و دقت

به منظور ارزیابی صحت مساحت تاج درختان کاج برآورد شده روی تصاویر رنگی و ابر نقاط از آزمون آماری مناسب برای مقایسه مقادیر برآورد شده با مقادیر واقعی استفاده شد. ابتدا نرمال بودن داده‌ها با دو آزمون شاپیرو-ویلک و کولموگوروف-اسمیرنوف بررسی شده و در صورت نرمال بودن از آزمون تی جفتی و در غیر اینصورت از آزمون ویلکاکسون استفاده شد. همچنین نمودار یک‌به‌یک مقادیر واقعی و برآوردی در دو روش و ضریب همبستگی اسپیرمن آن‌ها مورد ارزیابی قرار گرفت. به منظور بررسی بیشتر نتایج، مساحت تاج واقعی درختان به سه طبقه کوچک (کوچک‌تر از ۱۲ مترمربع)، متوسط (۱۸ - ۱۲ مترمربع) و بزرگ (بزرگ‌تر از ۱۸ مترمربع) تقسیم شد و نمودار یک‌به‌یک و ضریب تعیین خط برازش شده در طبقات ذکر شده ارزیابی شد. مبنای تقسیم‌بندی تاج درختان کاج به سه طبقه ذکر شده در داده‌برداری میدانی این بود که در هر طبقه تعداد نمونه‌ها تقریباً یکسان (حدود ۱۰۸ پایه درخت) باشد (۶). به منظور ارزیابی دقت نتایج از سه شاخص مجذور میانگین مربعات خطای نسبی RRMSE(Relative

خلاصه‌ای از اندازه‌گیری‌های میدانی و شکل ۲-الف موقعیت مکانی درختان کاج ثبت شده در داده‌برداری میدانی در منطقه مطالعاتی را نشان می‌دهند. تورس و همکاران (۱۹) نیز از در برآورد ویژگی‌های تک‌درختان بادام روی داده‌های پهپاد ۳۲۵ پایه درخت را مورد مطالعه قرار دادند که با تعداد نمونه مطالعه حاضر مشابه است. چنانچه ملاحظه می‌شود، درختان کاج مورد مطالعه از دامنه قطری و ارتفاعی نسبتاً متنوعی برخوردار بودند و این موضوع در ارزیابی مؤثرتر دو داده مورد بررسی (یعنی تصاویر رنگی و ابر نقاط) در برآورد مساحت تاج درختان کاج نقش مهمی ایفا می‌کند. در پژوهش‌های پیشین فنخوزر (۳) و گو (۶) نیز بر ضرورت تنوع اندازه تاج درختان در مقایسه داده‌های حاصل از پهپاد تأکید شده است. در همین راستا، پژوهش حاضر نیز درختان کاج با مساحت تاج‌های مختلف از سنین متفاوت (با توجه به قطر برابر سینه) را مورد بررسی قرار داد که ضریب تغییرات و دامنه ویژگی‌های کمی ارائه شده در جدول ۲ این موضوع را نشان می‌دهند. به عنوان مثال، قطر برابر سینه که به عنوان شاخصی برای تفسیر سن درخت مدنظر قرار می‌گیرد نشان داد درختان کاج انتخاب شده از قطر ۱۰ تا ۶۲ سانتیمتر بودند که در کنار سایر ویژگی‌های کمی بیانگر تنوع اندازه درختان کاج نمونه‌برداری شده در پژوهش حاضر هستند.

RMSE (رابطه ۳)، کارایی مدل (ME) (رابطه ۴) و امتیاز اریبی (BS) (رابطه ۵) استفاده شد.

$$RRMSE(100) = \sqrt{\frac{\frac{1}{n} \sum (y_i - \hat{y}_i)^2}{\sum (\hat{y}_i)^2}} \times 100 \quad [3]$$

$$ME = \frac{|\sum (y_i - \bar{y})^2 - \sum (\hat{y}_i - \bar{y})^2|}{\sum (y_i - \bar{y})^2} \quad [4]$$

$$BS = \frac{\sum (y_i - \bar{y})^2}{\sum (\hat{y}_i - \bar{y})^2} \quad [5]$$

در رابطه‌های بالا y_i : مساحت تاج واقعی، $\hat{y}_i$: مقدار برآورد شده، n : تعداد نمونه‌ها و $\bar{y}$: میانگین داده‌های واقعی است. در واقع در رابطه ۳ هر چقدر مقدار RRMSE به صفر نزدیک‌تر باشد نشان‌دهنده کارآمدی بیشتر روش است. در رابطه ۴ مقدار $ME=1$ بیانگر کارایی خوب روش می‌باشد. در مقابل اگر مقدار این پارامتر منفی باشد به معنی رد کارایی روش تلقی می‌گردد. در رابطه ۵ مقدار BS بیشتر از یک حاکی از برآورد بیشتر از مقدار واقعی و در صورتی که این پارامتر کمتر از یک باشد نشان‌دهنده برآورد کمتر مساحت تاج نسبت به مقدار واقعی آن است (۲۵).

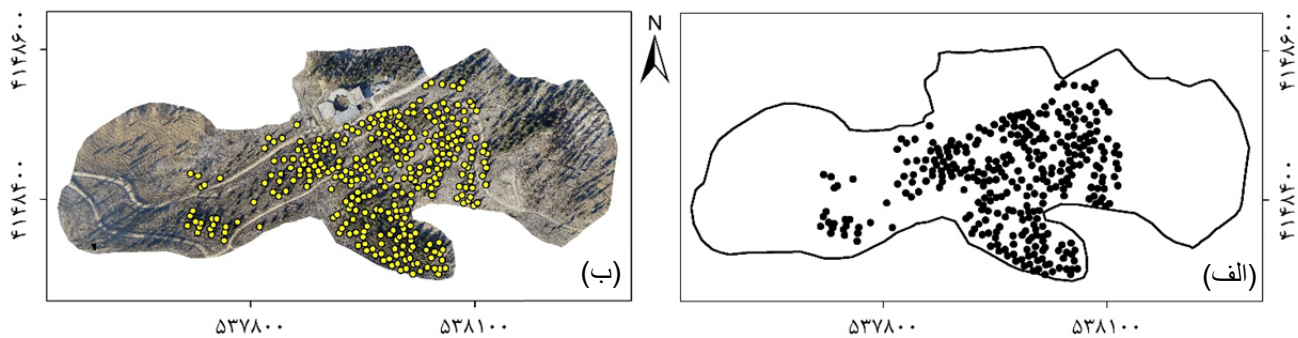
نتایج و بحث

در این پژوهش تعداد ۳۲۴ درخت کاج تهران با دامنه قطری و ارتفاع‌های متفاوت با توجه به تفاوت در سال کاشت آن‌ها مورد اندازه‌گیری مستقیم میدانی قرار گرفت. جدول ۲

جدول ۲- خلاصه‌ای از ویژگی‌های کمی ۳۲۴ درخت کاج تهران اندازه‌گیری شده در پژوهش حاضر

Table 2 - A summary of the quantitative characteristics of ۳۲۴ *Eldarica* pine trees measured in the present study

مشخصه	حداقل	حداکثر	میانگین	انحراف معیار	ضریب تغییرات (درصد)
ارتفاع (متر)	۰/۵	۱۳/۱	۶/۶	۲/۶	۳۸/۹
قطر برابر سینه (سانتیمتر)	۱۰	۶۲	۳۷	۱۱/۲	۳۰/۳
قطر کوچک تاج (متر)	۱/۰	۷/۸	۴/۳	۱/۱	۲۵/۴
قطر بزرگ تاج (متر)	۲/۳	۱۱/۶	۵/۸	۱/۴	۲۳/۴
مساحت تاج (مترمربع)	۰/۸	۴۹/۹	۱۵/۹	۷/۹	۴۹/۷



شکل ۲- نقشه موقعیت مکانی درختان کاج ثبت شده در داده برداری میدانی (الف) و نوک تاج درختان کاج تعیین شده با فیلتر حداکثر محلی (ب) روی ارتوفتوی منطقه مورد مطالعه

Figure 2 - Location map of pine trees recorded in field data (a) and the crown of pine trees determined by the local maximum filter (b) on the orthophoto of the study area

داده‌ها با هر دو روش مورد استفاده نشان داد مساحت تاج درختان کاج اندازه‌گیری شده در عرصه و برآورد شده با ابر نقاط و تصاویر رنگی با توزیع نرمال اختلاف معنی‌دار داشت ($p < 0/05$). همچنین مقایسه جفتی مساحت تاج برآورد شده با استفاده از تصاویر رنگی و ابر نقاط با مقدار واقعی نشان داد که استفاده از ابر نقاط داده‌های پهن‌پایه امکان برآورد مساحت تاج تک‌درختان کاج در منطقه مطالعاتی را بدون اختلاف معنی‌دار با مقدار واقعی آن‌ها ($p = 0/97$) فراهم نمود. در حالی که مساحت تاج برآوردی همان درختان با استفاده از قطعه‌بندی تصاویر رنگی دویعدی با مقدار واقعی اختلاف معنی‌دار داشت ($p < 0/05$). شکل ۳ نمونه‌ای از مرز تاج شناسایی شده روی تصاویر رنگی و ابر نقاط را نشان می‌دهد که این تفسیر بصری نیز نتایج آزمون آماری را تأیید کرده و نشان می‌دهد مرز شناسایی شده روی ابر نقاط از شباهت بیشتری با تاج واقعی برخوردار است.

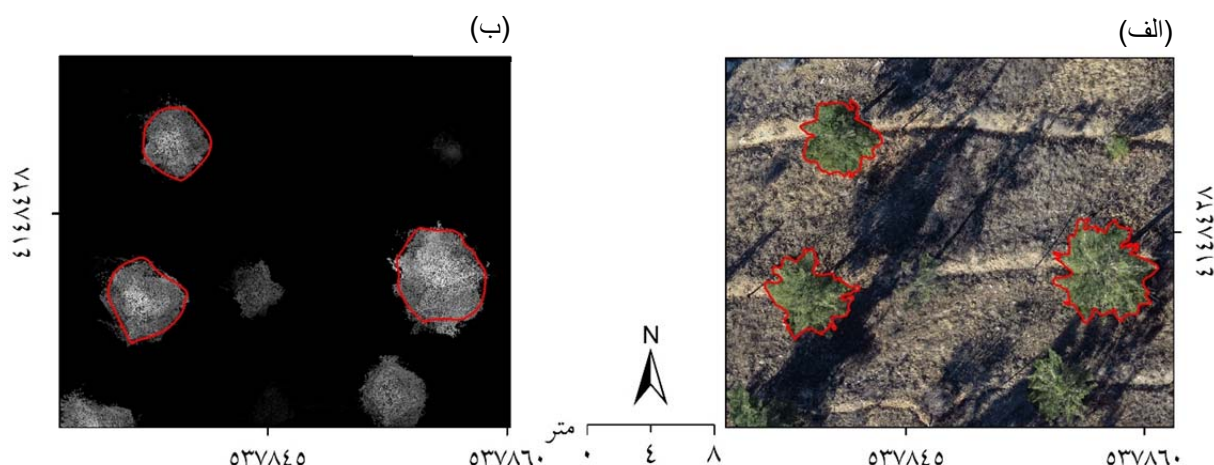
مساحت تاج ۳۲۴ درخت کاج که در منطقه مطالعاتی ثبت شدند با قطعه‌بندی تصاویر رنگی و CHM حاصل از ابر نقاط برآورد شد. در پژوهش حاضر برای قطعه‌بندی CHM از الگوریتم MCW استفاده شد که کارایی آن در پژوهش‌های پیشین مورد تأیید قرار گرفته است (۲۲). استفاده از MCW در مطالعه حاضر که در راستای مطالعات قبلی است به این دلیل بود که الگوریتم مذکور نسبت به الگوریتم Watershed از این مزیت برخوردار است که به دلیل شناسایی اولیه نوک تاج درختان در الگوریتم MCW، میزان خطا در تشخیص درختان کاهش می‌یابد. همچنین کارایی این الگوریتم در شناسایی درختان کاج در پژوهش‌های پیشین نیز تأیید شده است (۱۱، ۱۳).

جدول ۳ خلاصه‌ای از مشخصات آماری مساحت تاج درختان کاج که با استفاده از قطعه‌بندی تصاویر رنگی و ابر نقاط به دست آمده را نشان می‌دهد. نتایج بررسی نرمال بودن

جدول ۳- خلاصه‌ای از مشخصات آماری مساحت تاج ۳۲۴ درخت کاج تهران برآورد شده روی داده‌های پهن‌پایه در پژوهش حاضر (واحد اعداد مترمربع است)

Table 3 - A summary of the statistical characteristics of the crown area of ۳۲۴ *Pinus eldarica* pine trees estimated by UAV events in the present study (unit of numbers is square meters)

مشخصه	حداقل	حداکثر	میانگین	انحراف معیار	ضریب تغییرات (درصد)
مساحت تاج واقعی	۰/۸	۴۹/۹	۱۵/۹	۷/۹	۴۹/۷
مساحت تاج برآوردی با تصاویر رنگی	۵/۸	۴۴/۳	۱۷/۲	۶/۴	۳۷/۴
مساحت تاج برآوردی با ابر نقاط	۰/۵	۴۹/۰	۱۵/۹	۷/۹	۴۹/۹

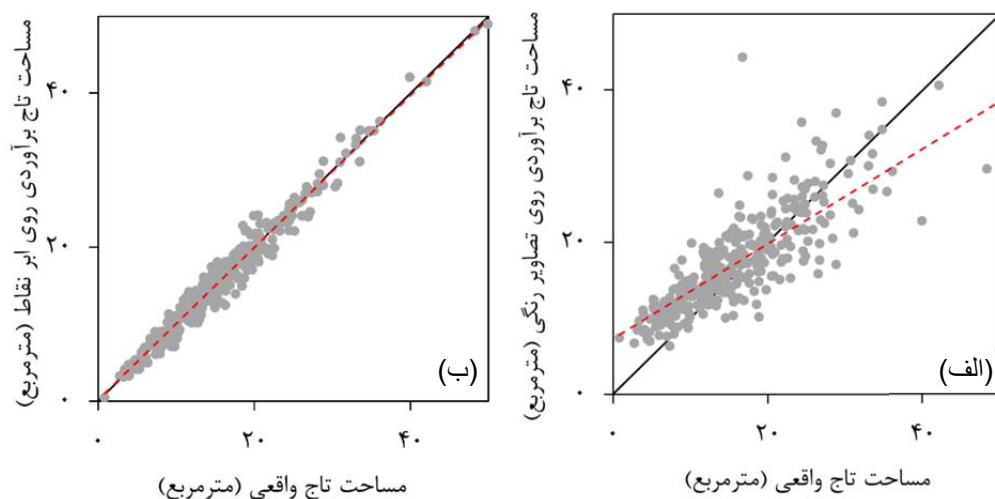


شکل ۳- دو نمونه از مقایسه مرز تاج درختان کاج شناسایی شده روی تصویر رنگی (الف) و ابر نقاط (ب) داده‌های پهپاد در منطقه مورد مطالعه

Figure 3 - Two examples of comparison of the crown border of pine trees identified on the color image (a) and cloud points (b) of UAV data in the study area

با ابر نقاط مقایسه نمودند. در راستای دستاوردهای پژوهش حاضر مبنی بر برتری ابر نقاط نسبت به تصاویر رنگی، نتایج مطالعه گو و همکاران (۶) نیز نشان داد ابر نقاط از کارایی بیشتری نسبت به تصاویر رنگی در برآورد مساحت تاج درختان در توده‌های آمیخته داشته است. اگرچه دو تفاوت بین مطالعه مذکور و پژوهش حاضر وجود دارد. اول اینکه ایشان مقایسه داده‌ها را روی توده‌های آمیخته متراکم انجام دادند و دوم اینکه ارزیابی صحت را بر اساس تفسیر بصری تصاویر رنگی پهپاد انجام دادند. همچنین با مقایسه پژوهش مذکور و تحقیق حاضر، می‌توان به این نتیجه رسید که در توده‌های خالص کم تراکم دست کاشت از درختان کاج (مانند منطقه مطالعاتی پژوهش حاضر) و در توده‌های آمیخته متراکم هم با چیرگی درختان سوزنی‌برگ و هم با چیرگی درختان پهن‌برگ (مانند منطقه مطالعاتی گو و همکاران (۶))؛ CHM حاصل از ابر نقاط نسبت به تصاویر رنگی از کارایی بیشتری در شناسایی تاج درختان و برآورد مساحت آن‌ها برخوردار است. اگرچه چنین نتیجه‌گیری نیاز به پژوهش‌های بیشتری در آینده دارد.

مقایسه ویژگی‌های کمی واقعی و برآوردی درختان با استفاده از آزمون آماری مناسب به عنوان راهکاری قابل اطمینان در ارزیابی صحت نتایج در پژوهش‌های پیشین نیز مورد تأکید قرار گرفته است (۲۴). نتایج پژوهش حاضر در راستای دستاوردهای ایکبال و همکاران (۱۰) است که اشاره کردند قطعه‌بندی ابر نقاط تصاویر هوایی از کارایی لازم در تعیین مرز تاج درختان کاج (گونه رادیاتا) در جنگل‌های دست کاشت برخوردار است. از سوی دیگر سافنوا و همکاران (۱۶) بر کارایی قطعه‌بندی تصاویر رنگی پهپاد در شناسایی و تعیین مرز تاج درختان تأکید کردند. اگرچه در هیچکدام از مطالعات ذکر شده مقایسه‌ای بین تصاویر رنگی و ابر نقاط پهپاد در شناسایی مرز و تعیین مساحت تاج درختان انجام نشده است. نتایج مقایسه این دو داده در شرایط یکسان (نوع پهپاد، شرایط مکانی و زمانی تصویربرداری، روش قطعه‌بندی) در پژوهش حاضر می‌تواند در مطالعات آتی مورد توجه قرار گیرد. لازم به ذکر است که گو و همکاران (۶) در پژوهش خود با استفاده از داده‌های پهپاد اقدام به شناسایی مرز تاج درختان در دو توده متراکم از درختان سوزنی و پهن‌برگ کردند و تصاویر رنگی را

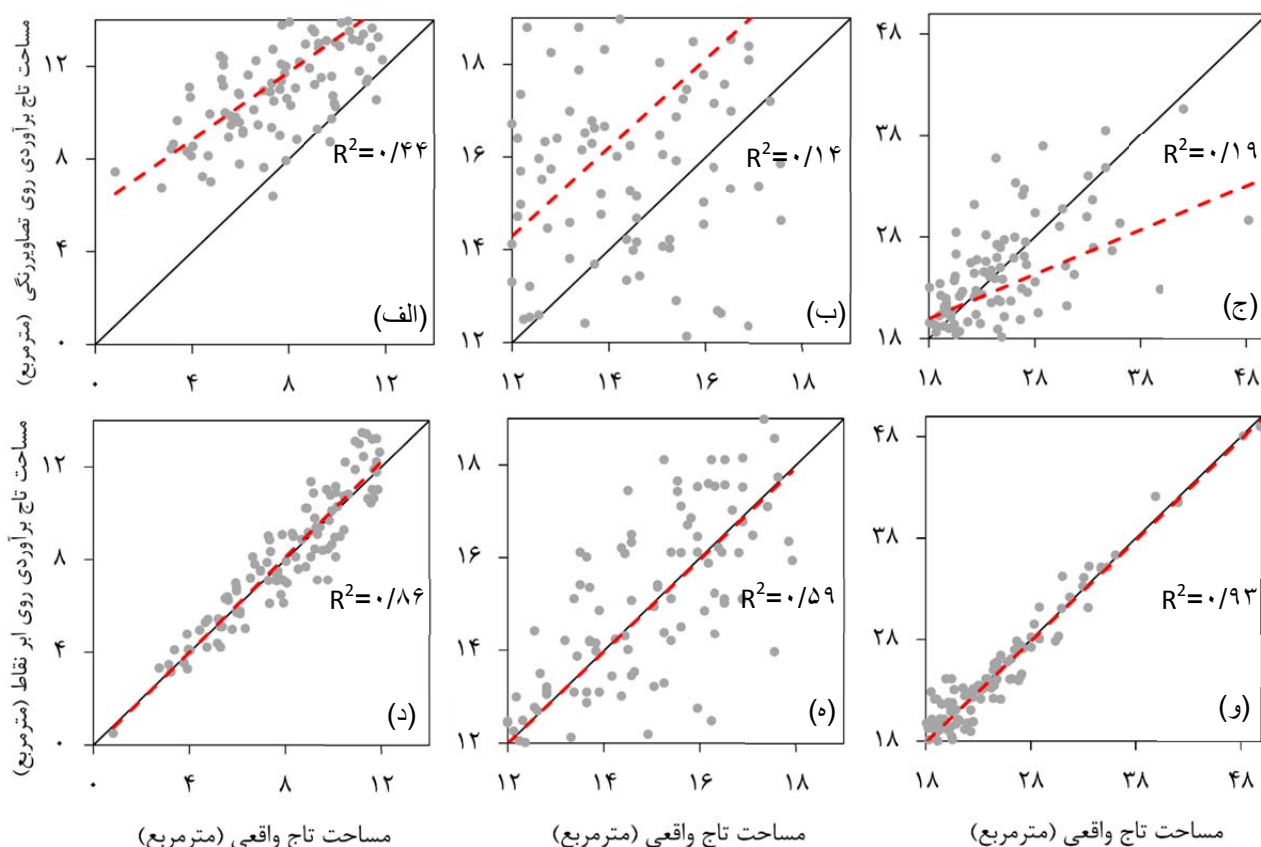


شکل ۴- نمودار یک‌به‌یک مقادیر واقعی مساحت تاج ۳۲۴ درخت کاج با مقادیر برآوردی روی تصاویر رنگی (الف) و ابر نقاط (ب) پهپاد در منطقه مورد مطالعه (خط چین قرمز رگرسیون خطی برازش شده به داده‌ها و خط ممتد مشکی خط یک به یک است)

Figure 4- One-by-one diagram of real values of the canopy area of 324 pine trees with estimated values on color images (a) and cloud points (b) of the drone in the study area (red linear regression line fitted to the data and continuous black line is one to one).

درصد)، ME (به ترتیب ۰/۲۴ و ۰/۳۱) و BS (به ترتیب ۱/۳۲ و ۰/۹۳) به دست آمدند. دقت اندازه‌گیری‌ها بر اساس شاخص RRMSE نشان داد مساحت تاج برآورد شده درختان کاج روی ابر نقاط از دقت بیشتری نسبت به تصاویر رنگی پهپاد برخوردار بوده است. شاخص ME نیز با توجه به مقدار مثبت هر دو عدد کارایی دو برآورد را تأیید نمود هرچند بیشتر بودن مقدار ME و نزدیک‌تر بودن آن به یک در مورد برآوردهای روی ابر نقاط بیانگر کارایی بیشتر این داده بوده است. همچنین بر اساس نتایج BS مساحت تاج برآوردی روی ابر نقاط به مقدار واقعی نزدیک‌تر بوده است. ارزیابی دقت برآوردهای انجام شده روی تصاویر رنگی و ابر نقاط پهپاد با استفاده از شاخص‌های ذکر شده در مطالعه حاضر در راستای پژوهش‌های پیشین انجام شده است (۲۰).

علاوه بر آزمون آماری، ضریب همبستگی بین مقادیر واقعی مساحت تاج تک‌درختان کاج و مساحت تاج تک‌درختان برآورد شده روی تصاویر رنگی و ابر نقاط به ترتیب ۰/۸۱ و ۰/۹۵ به دست آمد. این موضوع نشان دهنده همبستگی بیشتر مساحت‌های برآورد شده روی ابر نقاط با مقادیر واقعی مساحت تاج است. همچنین مقایسه نتایج با نمودار یک‌به‌یک نشان داد مقادیر واقعی مساحت تاج درختان کاج با مقادیر برآوردی روی تصاویر رنگی و ابر نقاط دارای ضریب تعیین ۰/۵۹ (شکل ۴-الف) و ۰/۹۷ (شکل ۴-ب) بودند. مقایسه مقادیر واقعی ویژگی‌های کمی درختان و مقادیر برآورد شده روی داده‌های پهپاد با استفاده از ضرایب همبستگی و همچنین نمودار یک‌به‌یک به عنوان راهکاری برای صحت سنجی نتایج در پژوهش‌های پیشین مورد تأکید قرار گرفته است (۹، ۱۵). در ارزیابی دقت مساحت تاج برآورد شده روی تصاویر رنگی و ابر نقاط، شاخص‌های RRMSE (به ترتیب ۳۰ و ۱۵



شکل ۵- نمودار یک‌به‌یک مقادیر واقعی مساحت تاج ۳۲۴ درخت کاج با مقادیر برآوردی در سه طبقه کوچک (کوچک‌تر از ۱۲ مترمربع)، متوسط (۱۲-۱۸ مترمربع) و بزرگ (بزرگ‌تر از ۱۸ مترمربع) روی تصاویر رنگی (الف، ب، ج) و ابر نقاط (د، ه، و) پهپاد در منطقه مورد مطالعه (تعداد درختان هر طبقه تقریباً ۱۰۸ پایه است) (خط چین قرمز رگرسیون خطی برازش شده به داده‌ها و خط ممتد مشکی خط یک به یک است)

Figure 5- One-by-one diagram of real values of the canopy area of 324 pine trees with estimated values in three classes: small (less than 12 square meters), medium (18-12 square meters) and large (larger than 18 square meters) on color images (A, B, C) And UAV cloud points (d, e, and f) in the study area (number of trees per floor is approximately 108 bases) (red dashed linear regression fits the data and continuous black line is one-to-one line)

تاج بزرگ (شکل ۵-و) حاصل شده است. همچنین کمتر تطابق مقادیر واقعی و برآوردی در مورد مساحت تاج درختان متوسط روی تصاویر رنگی به دست آمد (شکل ۵-ب). به‌طورکلی، نتایج نشان داد ابر نقاط برای برآورد مساحت تاج درختان کاج با اندازه تاج کوچک، متوسط و بزرگ مناسب‌تر از تصاویر رنگی بوده و مساحت تاج درختان با تاج بزرگتر با صحت بیشتری روی این داده‌ها برآورد می‌شوند. این نتایج با دستاوردهای گو و همکاران (۶) نیز مطابقت داشته که نشان دادند مساحت تاج درختان روی ابر نقاط با صحت بیشتری برآورد می‌شوند. اگرچه در مطالعه مذکور برخلاف مطالعه حاضر، مساحت تاج درختان با تاج کوچک با صحت بیشتری

از آنجایی که نمودار یک‌به‌یک مساحت تاج واقعی و برآوردی برای همه ۳۲۴ درخت کاج (شکل ۴) نشان نمی‌داد که کارایی داده‌های مورد استفاده در برآورد مساحت تاج درختان با اندازه‌های مختلف چگونه است، مقایسه مقادیر واقعی و برآوردی مساحت تاج در سه طبقه بر اساس اندازه مساحت تاج واقعی با تعداد پایه تقریباً مساوی (۱۰۸ پایه) انجام شد. مقدار ضریب تعیین خط برازش شده در نمودار یک‌به‌یک مقادیر واقعی مساحت تاج درختان کاج و مقادیر برآورد شده روی تصاویر رنگی و ابر نقاط در شکل ۵ نشان داده شده است. چنانچه ملاحظه می‌شود، بیشتر تطابق با مقادیر واقعی در مساحت تاج برآوردی روی ابر نقاط در درختان با

برآورد شدند که این موضوع ممکن است به تفاوت در توده‌های جنگلی مورد مطالعه مربوط باشد. در توده‌های آمیخته متراکم، این احتمال وجود دارد که به دلیل تداخل درختان، تعیین مرز تاج درختان بزرگ با خطا همراه باشد و برآورد مساحت آن‌ها با مقدار واقعی تفاوت بیشتری نسبت به درختان کوچک داشته باشد. در مطالعه حاضر نامناسب‌ترین نتایج برآورد روی ابر نقاط مربوط به درختان متوسط (مساحت تاج ۱۸ - ۱۲ مترمربع) بوده است. یکی از دلایل این موضوع ممکن است مربوط به آستانه‌های به‌کاررفته در فرایند قطعه‌بندی باشد که باعث قطعه‌بندی بیشتر یا کمتر تاج درختان متوسط شده است و این موضوع در مطالعات پیشین نیز اشاره شده است (۲۱). در مطالعات آتی می‌توان به ارتباط حد آستانه‌ها در فرایند قطعه‌بندی و اندازه تاج درختان پرداخت تا مشخص شود تبدیل تاج‌های با اندازه‌های مختلف به قطعات چگونه بر برآورد مساحت تاج تأثیر می‌گذارد.

نتیجه‌گیری

اگرچه استفاده از تصاویر رنگی و ابر نقاط پهپاد در اندازه‌گیری دقیق ویژگی‌های کمی تک‌درختان به طور جداگانه مورد تأیید قرار گرفته است، مقایسه کارایی این دو داده در شرایط یکسان کمتر مورد توجه بوده است. بنابراین پژوهش حاضر به مقایسه دو داده مذکور در شرایط یکسان برای شناسایی و برآورد مساحت تاج تک‌درختان کاج در یک جنگل دست کاشت پرداخت. به‌طور کلی یافته‌های پژوهش نشان داد که در برآورد مساحت تاج تک‌درختان کاج تهران با داده‌های پهپاد، تصاویر رنگی (ضریب همبستگی ۰/۸۱ با مقادیر واقعی)

از کارایی کمتری نسبت به ابر نقاط (ضریب همبستگی ۰/۹۵ با مقادیر واقعی) برخوردار بودند. همچنین مقایسه جفتی مساحت واقعی و برآوردی تاج درختان نشان داد تنها مساحت تاج برآوردی روی ابر نقاط با مقادیر واقعی اختلاف معنی‌دار ندارد ($p > 0.05$). سایر شاخص‌های ارزیابی صحت و دقت نیز تأیید کردند ابر نقاط کارایی بیشتری نسبت به تصاویر رنگی در برآورد مساحت درختان کاج داشته است. علاوه بر این، مساحت تاج در درختان کاج با اندازه تاج بزرگ (< 18 مترمربع) با صحت بیشتری نسبت به درختان با تاج متوسط و کوچک روی ابر نقاط پهپاد برآورد شده است. به‌طور کلی، می‌توان نتیجه گرفت در برآورد مساحت تاج درختان کاج تهران در جنگل دست کاشت مورد مطالعه، قطعه‌بندی ابر نقاط حاصل از داده‌های پهپاد از کارایی بیشتری نسبت به قطعه‌بندی تصاویر رنگی برخوردار بوده است. مطالعات آتی بر روی توده‌هایی با نوع گونه، آمیختگی و تراکم متفاوت با منطقه مطالعاتی در پژوهش حاضر می‌تواند منجر به تأیید نهایی این دستاورد گردد.

سپاسگزاری

نویسندگان این پژوهش از اداره کل حفاظت محیط‌زیست بویژه آقای مهدی اله پور و آقای اسکندر گردمردی و محیط‌بانان مجموعه پارک پردیسان بجنورد و همچنین آقای سید آروین فخری بابت همکاری در کدنویسی کمال قدردانی را دارند. همچنین بخشی از هزینه‌های این پژوهش از طریق طرح شماره ۴۰۰۳۳۹۳ مصوب صندوق حمایت از پژوهشگران و فناوری‌های کشور تأمین شده است.

References

- Costa L, Nunes L, Ampatzidis Y. 2020. A new visible band index (vNDVI) for estimating NDVI values on RGB images utilizing genetic algorithms. *Computers and Electronics in Agriculture*, 172:105334. <https://doi.org/10.1016/j.compag.2020.105334>.
- Dong X, Zhang Z, Yu R, Tian Q, Zhu X. 2020. Extraction of information about individual trees from high-spatial-resolution UAV-acquired images of an orchard. *Remote Sensing*, 12(1):133. <https://doi.org/10.3390/rs12010133>.
- Fankhauser K.E, Strigul N.S, Gatzolis D. 2018. Augmentation of traditional forest inventory and airborne laser scanning with unmanned aerial systems and photogrammetry for forest monitoring. *Remote Sensing*, 10(10):1562. <https://doi.org/10.3390/rs10101562>.
- Gorgoso-Varela J.J, Ponce R.A, Rodríguez-Puerta F. 2021. Modeling Diameter Distributions with Six Probability Density Functions in *Pinus halepensis* Mill. Plantations Using Low-Density Airborne Laser Scanning Data in Aragón (Northeast Spain). *Remote*

- Sensing, 13(12):2307.
<https://doi.org/10.3390/rs13122307>.
5. Grznárová A, Mokroš M, Surový P, Slavík M, Pondelík M, Merganič J. 2019. THE CROWN DIAMETER ESTIMATION FROM FIXED WING TYPE OF UAV IMAGERY. *International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing & Spatial Information Sciences*, 15:337.
<https://pdfs.semanticscholar.org/a9d3/749d5d316b609984de1dd6b5b84a972a3236.pdf>.
6. Gu J, Grybas H, Congalton R.G. 2020. Individual tree crown delineation from UAS imagery based on region growing and growth space considerations. *Remote Sensing*, 12(15):2363.
<https://doi.org/10.3390/rs12152363>.
7. Gülci S, Akay A.E, Gülci N, Taş İ. 2021. An assessment of conventional and drone-based measurements for tree attributes in timber volume estimation: A case study on stone pine plantation. *Ecological Informatics*, 63:101303.
<https://doi.org/10.1016/j.ecoinf.2021.101303>.
8. Huang H, Li X, Chen C. 2018. Individual tree crown detection and delineation from very-high-resolution UAV images based on bias field and marker-controlled watershed segmentation algorithms. *IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing*, 11(7):2253-2262. DOI: 10.1109/JSTARS.2018.2830410.
9. 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.
<https://doi.org/10.3390/rs10010013>.
10. Iqbal I.A, Osborn J, Stone C, Lucieer A. 2021. A Comparison of ALS and Dense Photogrammetric Point Clouds for Individual Tree Detection in Radiata Pine Plantations. *Remote Sensing*, 13(17):3536.
<https://doi.org/10.3390/rs13173536>.
11. Kim S.R, Kwak D.A, Olee W.K, Son Y, Bae S.W, Kim C, Yoo S. 2010. Estimation of carbon storage based on individual tree detection in *Pinus densiflora* stands using a fusion of aerial photography and LiDAR data. *Science China Life Sciences*, 53(7): 885-897. doi:10.1007/s11427-010-4017-1.
12. Lim Y.S, La P.H, Park J.S, Lee M.H, Pyeon M.W, 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):605-614.
<https://doi.org/10.7848/ksgpc.2015.33.6.605>.
13. McMahon C.A. 2019. Remote sensing pipeline for tree segmentation and classification in a mixed softwood and hardwood system. *PeerJ*, 6:5837.
<https://doi.org/10.7717/peerj.5837>.
14. Menendez-Miguel M, Ruiz-Peinado R, Del Río M, Calama R. 2021. Improving tree biomass models through crown ratio patterns and incomplete data sources. *European Journal of Forest Research*, 140(3):675-689.
<https://doi.org/10.1007/s10342-021-01354-3>.
15. Moe K.T, Owari T, Furuya N, Hiroshima T. 2020. Comparing individual tree height information derived from field surveys, LiDAR and UAV-DAP for high-value timber species in Northern Japan. *Forests*, 11(2):223.
<https://doi.org/10.3390/f11020223>.
16. Safonova A, Hamad Y, Dmitriev E, Georgiev G, Trenkin V, Georgieva M, Dimitrov S, Iliev M. 2021. Individual Tree Crown Delineation for the Species Classification and Assessment of Vital Status of Forest Stands from UAV Images. *Drones*, 5(3):77.
<https://doi.org/10.3390/drones5030077>.
17. Scholz J, De Meyer A, Marques A.S, Pinho T.M, Boaventura-Cunha J, Van Orshoven J, Rosset C, Künzi J, Kaarle J, Nummala K. 2018. Digital technologies for forest supply chain optimization: existing solutions and future trends. *Environmental management*, 62(6):1108-1133. doi:10.1007/s00267-018-1095-5.
18. Surový P, Almeida Ribeiro N, Panagiotidis D. 2018. Estimation of positions and heights from UAV-sensed imagery in tree plantations in agrosilvopastoral systems. *International Journal of Remote Sensing*, 39(14):4786-4800.
<https://doi.org/10.1080/01431161.2018.1434329>.
19. Torres-Sánchez J, de Castro A.I, Pena J.M, Jimenez-Brenes F.M, Arquero O, Lovera M, Lopez-Granados F. 2018. Mapping the 3D structure of almond trees using UAV acquired photogrammetric point clouds and object-based image analysis. *Biosystems engineering*, 176:172-184.
<https://doi.org/10.1016/j.biosystemseng.2018.10.018>.
20. Tu Y.H, Phinn S, Johansen K, Robson A, Wu D. 2020. Optimising drone flight planning for measuring horticultural tree crop structure. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 160:83-96.
<https://doi.org/10.1016/j.isprsjprs.2019.12.006>.
21. Weinstein B.G, Marconi S, Bohlman S, Zare A, White E. 2019. Individual tree-crown detection in RGB imagery using semi-supervised deep learning neural networks. *Remote Sensing*, 11(11): 1309.
<https://doi.org/10.3390/rs11111309>.
22. Wu B, Wu S, Li Y, Wu J, Huang Y, Chen Z, Yu B. 2020. Automatic building rooftop extraction using a digital surface model derived from aerial stereo images. *Journal of Spatial Science*, 1-20.
<https://doi.org/10.1080/14498596.2020.1720836>.
23. Wolfer M, Niemann K.O, Goodenough D.G. 2000. Local maximum filtering for the extraction of tree locations and basal area from high spatial resolution

- imagery. Remote Sensing of environment, 73(1):103-114. [https://doi.org/10.1016/S0034-4257\(00\)00101-2](https://doi.org/10.1016/S0034-4257(00)00101-2).
24. Yilmaz V, Güngör O. 2019. Estimating crown diameters in urban forests with Unmanned Aerial System-based photogrammetric point clouds. International Journal of Remote Sensing, 40(2):468-505. <https://doi.org/10.1080/01431161.2018.1562255>.
25. Yim J.S, Kim Y.H, Kim S.H, Jeong J.H, Shin, M.Y. 2011. Comparison of the k-nearest neighbor technique with geographical calibration for estimating forest growing stock volume. Canadian journal of forest research, 41(1):73-82. <https://doi.org/10.1139/X10-132>.
26. Zheng J, Fu H, Li W, Wu W, Yu L, Yuan S, Ta, W.Y.W, Pang T.K, Kanniah K.D. 2021. Growing status observation for oil palm trees using Unmanned Aerial Vehicle (UAV) images. ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing, 173:95-121. <https://doi.org/10.1016/j.isprsjprs.2021.01.008>.
27. Zimudzi E, Sanders I, Rollings N, Omlin C.W. 2021. Remote sensing of mangroves using unmanned aerial vehicles: Current state and future directions. Journal of Spatial Science, 66(2):195-212. <https://doi.org/10.1080/14498596.2019.1627252>.
28. Zobeyri M. 2019. Forest Survey, University of Tehran Press, Fifth Edition. (in persiaan)



Comparison of unmanned aerial vehicle (UAV) RGB imagery and point clouds in crown area estimation of individual trees within pine (*Pinus eldarica*) man-made forests

Ali Hosseingholizadeh¹, Seyyed Yousef Erfanifard^{2*}, Seyyed Kazem Alavipanah³, Hooman Latifi⁴, Yaser Jouybari Moghadam⁵

Received: 2022-02-14 / Accepted: 2022-03-06 / Published: 2023-05-22

Abstract

Application of unmanned aerial vehicles (UAVs) is widespread in measurement of quantitative characteristics of single trees such as crown area. However, the efficiency of different types of data collected by UAVs are less compared. Therefore, the aim of this study was comparison of UAV RGB imagery and point clouds in crown area estimation of

individual pine trees within a man-made forest in Pardisan Park, Northern Khorasan province, Iran. Both datatypes were analyzed by similar segmentation method (Marker-Controlled Watershed algorithm) to estimate crown area of 324 sample pine trees. The results showed that the crown area measured on the point clouds had higher accuracy and precision compared to RGB imager (Spearman correlation of 0.95 and 0.81, coefficient of determination of 0.97 and 0.59, *p*-value of 0.97 and 0.001, respectively). Additionally, crown area of pine trees with large crown ($> 18 \text{ m}^2$) delineated on the point clouds showed the highest accuracy in comparison to trees with small and medium crowns. In general, it was concluded that segmentation of UAV point clouds was more efficient than RGB imagery segmentation in quantification of crown area of pine trees within the study area.

Ali Hosseingholizadeh¹, Seyyed Yousef Erfanifard²(✉), Seyyed Kazem Alavipanah³, Hooman Latifi⁴, Yaser Jouybari Moghadam⁵

1. PhD Student in Remote Sensing and Geographic Information System, Faculty of Geography, University of Tehran, Iran

2. Associate Professor, Department of Remote Sensing and Geographic Information System, Faculty of Geography, University of Tehran, Tehran, Iran

3. Professor, Department of Remote Sensing and Geographic Information System, Faculty of Geography, University of Tehran, Tehran, Iran

4. Associate Professor, Department of Photogrammetry and Remote Sensing, Faculty of Geodesy and Geomatics Engineering, Khajeh Nasiruddin Toosi University of Technology, Tehran, Iran

5. Assistant Professor, Department of Surveying Engineering, Faculty of Engineering, Bojnourd University, Bojnourd, Iran

DOI: 10.30495/girs.2023.689615

e-mail: erfanifard@ut.ac.ir

Background and objectives

Man-made forests are established with ecological scopes such as conservation of soil and water resources and economic aims like wood production and in general, reduction of pressure on natural forests. The ecological and economic aims of man-made forests are closely related to above-ground biomass (AGB) of their single trees. Tree crown is one of important quantitative characteristics that has different functions such as CO₂ absorption, energy and oxygen release through photosynthesis

in addition to its participation in AGB. Additionally, size of crown is closely related to tree growth, therefore, it is considered in forest tree inventory. Considering the importance of tree crown, there are diverse techniques to measure it in field mensuration. However, field-based techniques are costly and difficult.

One of techniques recently considered by forest researchers and managers is application of UAV (Unmanned Aerial Vehicles) RGB imagery and point clouds. The efficiency of these data in estimation of tree crowns in man-made forests were reported separately. However, this question needs to be answered that between RGB imagery and point clouds available after UAV imaging, which data is more efficient in accurate estimation of crowns of single trees in a man-made forest. Therefore, this study aimed at comparison of RGB imagery and point clouds captured by UAV in estimation of crowns of *Pinus eldarica* single trees in a man-made forest. The achievements of the present research is considered an important step toward obtaining the information necessary to sustainable management of man-made forests.

Materials and Methods

In accordance with the aims of this study, a 14-ha plot was selected in pure man-made forests of *P. eldarica* in Pardisan Park, Northern Khorasan province, Iran. Trees were planted in two years of 2004 and 2010 with three meter spacing. All trees (i.e., 324 individuals) within the plot were measured in five days. In addition to spatial location of each tree, their characteristics such as perpendicular crown diameters, diameter at breast height and height were measured. Moreover, the area was photographed by DJI Phantom 4 pro UAV on 4 March 2021 at 2:30 p.m.

Image collection was performed at 40 m height and vertical position with end- and side-lap of 80 and 40 percent, respectively. Georeferencing and mosaicking of the imagers were performed by 14 ground control points. After necessary processing, a 3D model was constructed from RGB imagery based on structure from motion (SFM) algorithm. In the next step, a point cloud was produced with density of 1.27 points cm^{-2} . Crown area estimation of pine trees on RGB imagery was obtained by multi-resolution segmentation of green and red bands. According to crown shape of pine trees and status of the study area, suitable segmentation parameters were selected for precise delineation of crown boundaries. Finally, the crown area of each pine tree in the study plot was estimated by

determining the area of crown boundary. A crown height model (CHM) was constructed from the point clouds and marker-controlled watershed (MCW) algorithm was used for its segmentation. The identified crowns of pine trees was used for estimation of crown area of each tree. The measured crown areas in the field and those estimated on RGB imagery and point clouds were statistically compared by appropriate tests. Additionally, cross-check plots were made between the measured and estimated values and their correlation was evaluated by Pearson coefficient. The results were also evaluated by stratification of tree crowns into small (<12 m), medium ($12 \text{ m} < \sim <18$ m) and large (>18 m) crowns and cross-check plots were assessed in each stratum. The precision of results was evaluated by relative root mean squared error (RRMSE), model efficiency (ME) and bias score (BS).

Results and Discussion

The crown area of 324 individuals found within the study areas was estimated by segmentation of RGB imagery and point clouds. The efficiency of MCW algorithm used for CHM segmentation in this study was shown in previous research. Paired comparison of estimated crown areas with the true values showed that the crown areas of pine trees obtained from point clouds were not significantly different from the true values ($p = 0.97$). However, the crown areas provided by segmentation of RGB imagery were different from the true values ($p < 0.05$). Spearman correlation coefficients of crown areas on RGB imagery and point clouds and true values were 0.81 and 0.95, respectively. Furthermore, the cross-check plots indicated that the coefficients of determination (CoD) of comparisons were 0.59 and 0.97, respectively. Precision assessment of crown areas estimated on RGB imagery and point clouds showed RRMSE of 30 and 15%, ME of 0.24 and 0.31, and BS of 1.32 and 0.93, respectively. Moreover, comparison of crown area estimation in three strata of small, medium and large indicated that the highest and the lowest agreement with the true values were observed in crowns of large trees on point clouds (CoD = 0.93) and crowns of medium trees on RGB imagery (CoD = 0.14).

Conclusions

In general, the achievements of this research showed that RGB imagery was less efficient than point clouds in crown area estimation of single *P.*

eldarica trees. Furthermore, the crown areas of large trees were estimated more accurately than small and medium trees on UAV point clouds. Efficiency of point clouds compared to RGB imagery in crown area estimation of single *P. eldarica* trees within similar conditions (i.e., UAV

type, spatial and temporal imaging conditions, segmentation algorithm) in this research can be additionally investigated in future studies.

Keywords: Marker-Controlled Watershed algorithm, Bojnurd Pardisan Park, segmentation, crown height model.