



برآورد قطر متوسط تاج درختان با استفاده از تصاویر هوایی پهپاد بر مبنای روش‌های قطعه‌بندی چندمقیاسه و حوزه آبخیز (مطالعه موردی: جنگل خیرود)

وحید نصیری^۱، علی اصغر درویش صفت^{۲*}، حسین عارفی^۳ و منوچهر نمیرانیان^۴

^۱ دانشجوی دکتری دانشکده منابع طبیعی، دانشگاه تهران، کرج، ایران.

^۲ استاد دانشکده منابع طبیعی، دانشگاه تهران، کرج، ایران.

^۳ استادیار دانشکده مهندسی نقشه‌برداری و اطلاعات مکانی، دانشگاه تهران، تهران، ایران.

^۴ استاد دانشکده منابع طبیعی، دانشگاه تهران، کرج، ایران.

(تاریخ دریافت: ۱۳۹۸/۱۱/۱۲؛ تاریخ پذیرش: ۱۳۹۸/۱۱/۱۹)

چکیده

تصویر ارتوفتو موزائیک و مدل رقومی ارتفاع که از پردازش تصاویر هوایی پهپاد به دست می‌آیند، داده‌های بارزشی‌اند که در برآورد مشخصات تک‌درختان می‌توان از آنها استفاده کرد. در همین زمینه، با استفاده از یک پهپاد بال‌چرخان عمودپرواز، دو برداشت در فصل‌های رویش و خزان انجام گرفت و با استفاده از مدل‌های رقومی زمین (DTM) و سطح (DSM)، مدل ارتفاع تاج پوشش (CHM) تهیه شد. محدوده تاج درختان با دو رویکرد تعیین شد. در رویکرد اول، از ارتوفتوموزائیک و روش قطعه‌بندی چندمقیاسه و در رویکرد دوم، از مدل ارتفاعی تاج پوشش و روش حوزه آبخیز برای قطعه‌بندی استفاده شد. به منظور بررسی قابلیت این رویکردها در برآورد قطر متوسط تاج درختان، مختصات دقیق و قطر تاج ۹۵ اصله درخت در عملیات میدانی اندازه‌گیری و با مقادیر برآورد شده مقایسه شد. نتایج نشان داد که قطر تاج درختان اندازه‌گیری شده در جنگل، همبستگی زیادی با مقادیر برآورد شده با روش‌های چندمقیاسه ($R^2 = 0/88$) و حوزه آبخیز ($R^2 = 0/92$) دارد. بهترین نتیجه برآورد قطر تاج درختان با استفاده از روش حوزه آبخیز به دست آمد ($MAE = 5/97\%$ و $RMSE = 7/02\%$). همچنین براساس نتایج، اختلاف معنی‌داری بین مقادیر اندازه‌گیری شده و برآورد شده با روش حوزه آبخیز مشاهده نشد. در حالی که بین مقادیر اندازه‌گیری شده و برآورد شده با روش چندمقیاسه اختلاف معنی‌داری (سطح ۵ درصد) وجود داشت. نتایج پژوهش نشان داد که این رویکرد می‌تواند به عنوان روشی دقیق و ارزان در برآورد قطر متوسط تاج درختان استفاده شود.

واژه‌های کلیدی: آماربرداری جنگل، پهپاد، تشخیص تاج درخت، قطعه‌بندی، مدل ارتفاع تاج پوشش.

مقدمه

قطر تاج درختان است. قطر تاج در مدل‌سازی و برآورد مشخصات کاربردی، نظیر درصد تاج پوشش جنگل (Gill et al., 2000)، شاخص سطح برگ (Lovynska et al., 2018) و زی‌توده (Holopainen et al., 2018) کاربرد دارد. همچنین

آماربرداری جنگل و کسب اطلاعات به‌روز و دقیق، به‌خصوص در مقیاس تک‌درخت، از نیازهای اساسی مدیریت پایدار جنگل‌هاست (Grznárová et al., 2019). یکی از مهم‌ترین مشخصات لازم در سطح تک‌درخت،

برآورد قطر متوسط تاج درختان می‌توان از آن استفاده کرد (Mohan et al., 2017). ارتوفتوموزائیک حاصل از پردازش تصاویر پهپاد نیز در تعیین محدوده تاج درختان و برآورد قطر تاج به‌کار رفته است (Diaz-Varela et al., 2015). در سال‌های اخیر مطالعات مختلفی با هدف برآورد قطر تاج درختان بر مبنای اطلاعات حاصل از پهپاد انجام گرفته است. Varela et al. (2015) به‌منظور اندازه‌گیری قطر تاج درختان زیتون در منطقه‌ای جنگلکاری شده در اسپانیا از تصاویر هوایی پهپاد استفاده کردند؛ بدین‌صورت که با استفاده از روش قطعه‌بندی چندمقیاسه، ارتوفتوموزائیک و DSM حاصل از تصاویر پهپاد قطعه‌بندی و قطر تاج درختان برآورد شد. نتایج نشان‌دهنده قابلیت خوب این روش در برآورد قطر تاج درختان بود. Panagiotidis et al. (2016) به‌منظور برآورد قطر متوسط تاج درختان در جنگل‌های آمیخته در جنوب کشور چک از مدل ارتفاع تاج‌پوشش حاصل از تصاویر پهپاد استفاده کردند. به‌منظور برآورد قطر تاج درختان، پس از قطعه‌بندی به روش حوزه آبخیز، محدوده درختان ترسیم و قطر تاج تک‌درختان با دقت خوبی برآورد شد. در تحقیقی دیگر Grznárová et al. (2019) با قطعه‌بندی DSM حاصل از پهپاد به روش حوزه آبخیز، نتایج قابل قبولی را در برآورد قطر متوسط تاج درختان در یک جنگل طبیعی در اسلواکی به‌دست آوردند.

بر اساس مرور منابع، داده‌های حاصل از پهپادها مانند ارتوفتوموزائیک و مدل‌های رقومی ارتفاعی، در برآورد قطر تاج درختان قابل استفاده است. هر یک از مطالعات از روش‌ها و داده‌های متفاوتی در شرایط جنگلی متفاوت اعم از جنگلکاری تا جنگل‌های طبیعی استفاده کردند. تهیه مدل‌های ارتفاعی زمین و تاج‌پوشش در جنگل‌های طبیعی همواره یکی از چالش‌های محققان بوده است. در این زمینه بهترین روش، استفاده از فناوری لایدار و لیزر اسکنر هوایی است که کاربرد گسترده‌ای دارند (Balzter et al., 2017). هزینه زیاد و محدودیت‌های

اطلاع از ساختار تاج درختان، برای پایش و مدل‌سازی دخالت‌ها در جنگل، ارزیابی تنوع زیستی و تبیین فرایندهای اکولوژیکی، هیدرولوژیکی و ریزاقلیم‌شناسی (Zacaro-Tejada et al., 2014) ضروری است. با توجه به اینکه عملیات میدانی برای تعیین مشخصات جنگل پرهزینه و زمان‌بر است، استفاده از فناوری سنجنش از دور در مواقعی که داده‌های دورسنجی با مشخصه‌های اندازه‌گیری شده زمینی همبستگی خوبی داشته باشند، می‌تواند گام مؤثری برای برنامه‌ریزی و پایش جنگل باشد (PirBavaghar, 2011). یکی از نوین‌ترین فناوری‌های برداشت اطلاعات سنجنش از دوری، پهپادها (پرنده‌های هدایت‌پذیر از دور) هستند که از دهه اخیر در کنار دیگر سیستم‌های هوابرد و ماهواره‌ها به‌منظور جمع‌آوری اطلاعات از اکوسیستم‌های جنگلی استفاده می‌شوند (Torresan et al., 2017). پهپادها ویژگی‌هایی دارند که استفاده از آنها را در عرصه‌های جنگلی توجیه می‌کند که از آن جمله می‌توان به انعطاف‌پذیری در برنامه‌ریزی پرواز، کیفیت و تراکم زیاد داده‌ها (Wallace et al., 2016) و امکان استفاده از الگوریتم‌های خودکار در پردازش‌ها (Mlambo et al., 2017) اشاره کرد. خروجی یک برداشت موفق با پهپادها و پردازش‌های مختلف، ارتوفتوموزائیک با اندازه تفکیک مکانی در حد چند سانتی‌متر و ابرنقاط مترام است که برای تهیه مدل‌های رقومی ارتفاعی (DEM¹) قابل استفاده است (Sperlich et al., 2014). برداشت تصاویر استریو با همپوشانی زیاد، امکان تهیه دقیق مدل‌های رقومی ارتفاع زمین (DTM²) و سطح (DSM³) را فراهم می‌کند. DTM نشان‌دهنده ارتفاع زمین بدون پوشش است. در مقابل، DSM به‌عنوان ارتفاع زمین لخت به‌همراه عوارض روی آن مانند درختان، ساختمان‌ها و ... است. از تفاضل DTM و DSM، مدل ارتفاعی تاج‌پوشش (CHM⁴) ایجاد می‌شود که در

1. Digital Elevation Models
2. Digital Terrain Model
3. Digital Surface Model
4. Canopy Height Model

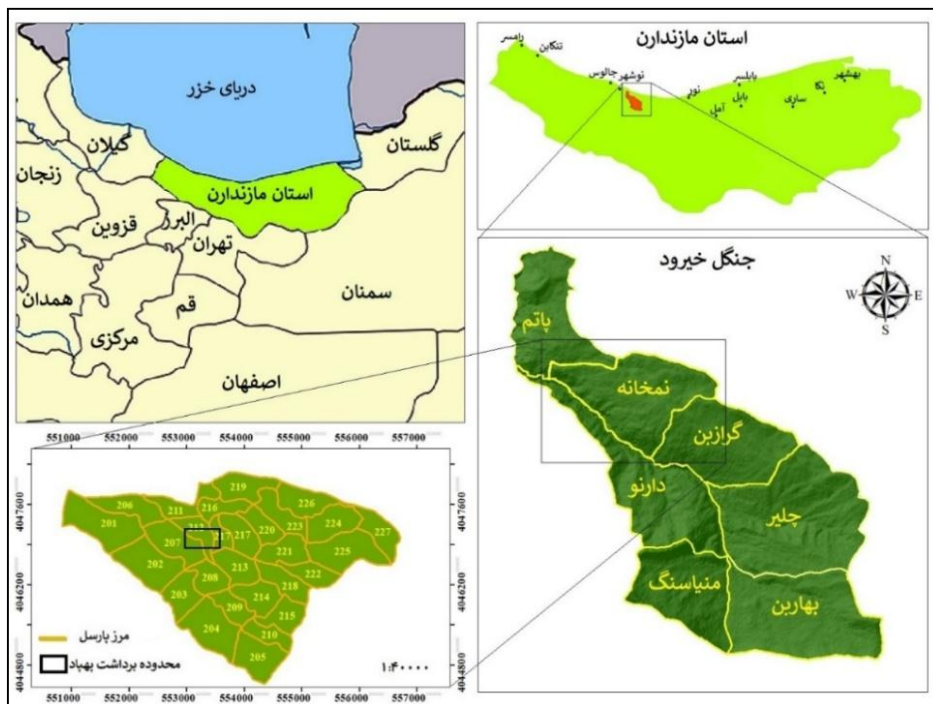
روش مختلف قطعه‌بندی در تشخیص خودکار و برآورد قطر متوسط تاج درختان در یک جنگل طبیعی، هدف فرعی تحقیق است.

مواد و روش‌ها

منطقه پژوهش

منطقه تحقیق، بخش کوچکی از جنگل آموزشی و پژوهشی خیرود واقع در هفت کیلومتری شهرستان نوشهر در استان مازندران است. پژوهش در محدوده‌ای با مساحت ۶ هکتار در بخش نمخانه انجام گرفت. عواملی مانند دسترسی به منطقه، وضعیت توپوگرافی، شرایط دید حداکثری و همچنین فضای کافی و بدون مانع برای پرواز، فرود و چرخش پهپاد در شناسایی منطقه، مدنظر قرار گرفتند. دامنه ارتفاعی محدوده برداشت شده با پهپاد، ۹۶۰-۸۷۰ متر و شیب عمومی آن ۳۰ درصد است. شکل ۱ موقعیت منطقه تحقیق را نشان می‌دهد.

عملیاتی آنها سبب شده تا استفاده از تصاویر هوایی پهپاد، به‌عنوان روشی ارزان و انعطاف‌پذیر در نظر گرفته شود. لازمه تهیه یک مدل رقومی ارتفاع زمین از روی تصاویر هوایی پهپاد، رؤیت کف جنگل و به‌عبارت دیگر در اختیار داشتن تعداد کافی نقاط ارتفاعی زمینی با پراکنش خوب است (Wallace et al., 2016). بر همین اساس، فرضیه ما در این تحقیق این است که با تصویربرداری پهپاد در دو فصل مختلف می‌توان مدل ارتفاع تاج‌پوشش دقیق تهیه کرد و براساس ارزش‌های ارتفاعی مدل ایجادشده و استفاده از روش قطعه‌بندی حوزه آبخیز، قطر تاج درختان را با دقت بیشتری نسبت به روش قطعه‌بندی چندمقیاسه بر مبنای ارزش‌های طیفی تصاویر یک فصل، برآورد کرد. همچنین خوب بودن عملکرد هر دو روش قطعه‌بندی در تعیین محدوده تاج درختان، دیگر فرضیه این تحقیق است. براساس فرضیه‌ها، هدف اصلی این تحقیق، تشخیص خودکار محدوده تاج درختان و برآورد قطر متوسط تاج آنها بر مبنای داده‌های حاصل از پهپاد است. همچنین مقایسه دو



شکل ۱- منطقه تحقیق و موقعیت جغرافیایی آن

IMU، سکوی تثبیت دوربین و باتری‌های لیتیوم- پلیمری قابل شارژ است. بخش زمینی برای هدایت و کنترل بخش هوایی بوده و رابط کاربر و بخش هوایی است. اجزای اصلی این بخش شامل ایستگاه زمینی، رادیو کنترل و رایانه همراه با نرم‌افزارهای پایش و کنترل پهپاد است.

برنامه‌ریزی عملیات پرواز و برداشت تصاویر

در این تحقیق از یک پهپاد هشت‌ملخه بال چرخان که توسط پردیس فنی دانشگاه تهران توسعه یافته است، استفاده شد (شکل ۲). به‌طور کلی این سیستم برداشت، شامل دو بخش اصلی هوایی و زمینی است. بخش هوایی شامل اجزای مکانیکی پرواز، بوردهای پایش و کنترل، سامانه‌های موقعیت‌یاب (GPS) و

	وزن خالص	۲۵/۲ کیلوگرم
	باتری	۱۶۰۰۰ mHA (×۲)
	سیستم هدایت (پرواز و فرود)	هدایت دستی و اتوماتیک
	دوربین مرئی	۱۲ مگا پیکسل
	دوربین مادون قرمز	۱۲ مگا پیکسل
	دامنه کاربردی پرواز	۴ کیلومتر
	دامنه ارتفاعی پرواز	۵۰-۳۰۰ متر
	حداکثر وزن در هنگام پرواز	۱۰ کیلوگرم
	مدت زمان مداومت پروازی	۳۰ دقیقه

شکل ۲- مشخصات پهپاد به‌کاررفته در تحقیق

درصد و با اندازه تفکیک مکانی ۵ سانتی‌متر برداشت شدند. مشخصات دوربین استفاده‌شده در جدول ۱ آمده است.

تصاویر با استفاده از دوربین Survey1camera در محدوده مرئی (RGB) و از ارتفاع ۱۰۰ متری از سطح زمین منطقه تحقیق، با همپوشانی طولی و عرضی ۷۵

جدول ۱- مشخصات فنی دوربین استفاده‌شده در تصویربرداری با پهپاد

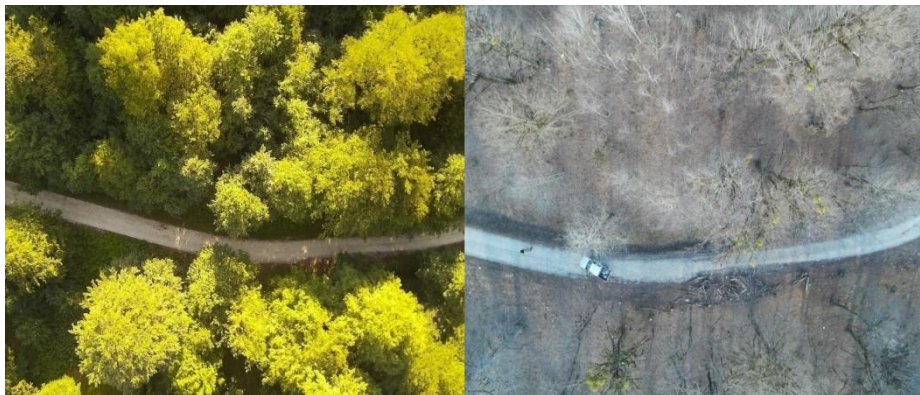
۱۲ مگاپیکسل، (۳۰۲۴×۴۰۳۲ پیکسل)	قدرت تفکیک‌پذیری دوربین
زاویه دید ۶۰ درجه (۳۱ میلی‌متر)	نوع لنز
۴ میلی‌متر	فاصله کانونی
۱ تصویر در هر سه ثانیه	سرعت تصویربرداری
۹۰۰mA، ۲۵۰۰ تصویر با هر بار شارژ	باتری
۴۷ گرم بدون باتری، ۶۴ گرم با باتری	وزن

رقومی زمین (DTM) استفاده شود. در مرحله بعد، برای تهیه مدل رقومی سطح (DSM)، در فصل رویش (خردادماه) با رعایت پارامترهای پروازی فصل خزان، برداشت دیگری انجام گرفت. در مجموع برای هر پرواز

با توجه به اهداف تحقیق، پروازها در دو فصل مختلف انجام گرفتند. ابتدا در فصل خزان (اسفندماه) تصاویر متعددی برداشت شدند، تا از نبود برگ درختان جهت مشاهده زمین و برآورد دقیق‌تر مدل

شکل ۳ آمده است.

۲۶۰ تصویر در محدوده پروازی برداشت و استفاده شدند. یک فریم از تصاویر فصل رویش و خزان در



شکل ۳- بخش کوچکی از منطقه یک فریم تصاویر فصل خزان (سمت راست) و همان بخش در فصل رویش (سمت چپ)

دستگاه DGPS Trimble R3 و به روش PPK^۱ برداشت شد. این مختصات در تصحیح تصاویر برداشت شده و تهیه ارتوموزائیک دقیق استفاده شدند. شکل ۴ نمونه‌ای از نقاط کنترل و DGPS استفاده شده را نشان می‌دهد.

برداشت نقاط کنترل

تصحیح هندسی دقیق تصاویر و تهیه مدل‌های سه‌بعدی قابل اعتماد، از ضروریات این‌گونه مطالعات است. در این زمینه در هر محدوده پروازی تعدادی نقطه کنترل با پراکنش مناسب مستقر شده و مختصات دقیق آنها با دقت سانتی‌متر با استفاده از



شکل ۴- نمونه‌ای از نقاط کنترل زمینی و DGPS استفاده شده در تحقیق

تصاویر، به متادیتای آن افزوده شده و به این ترتیب تصاویر ژئوتگ^۲ شدند. روش متداول در تهیه مدل‌های سه‌بعدی رقومی بر پایه تصاویر هوایی، روش

پردازش تصاویر هوایی پهپاد

پس از برداشت تصاویر هوایی آماده‌سازی‌های اولیه شامل بررسی چشمی تصاویر، انتخاب تصاویر مسیر برداشت و حذف تصاویر اضافی انجام گرفت. سپس مختصات استخراج شده از GPS پهپاد برای هر یک از

1. Post processing kinematic
2. Geo Tagging

برای زمین مرجع کردن دقیق ابرنقاط پراکنده تولیدشده از مرحله تناظریابی استفاده شد. بدین صورت که نقاط کنترل زمینی روی تصاویر شناسایی و مختصات دقیق آن (که قبلاً توسط DGPS برداشت شده بود) به صورت دستی در پیکسل های مربوط ثبت و ابرنقاط ایجادشده، بهینه شد.

ابرنقاط تولیدشده در مرحله قبل که تنها از نقاط گرهی تشکیل شده و دارای تراکم کم است، برای ایجاد هندسه یک مدل سه بعدی مناسب، ناکافی است. به همین منظور، الگوریتم تناظریابی با استفاده از پارامترهای دوربین و تصویر و همچنین ابرنقاط پراکنده حاصل از مرحله اول، سایر نقاط تصویر را هم مختصات دار می کند و به این ترتیب تعداد زیادی نقطه با مختصات زمینی دقیق تولید می شود که ابرنقاط متراکم نامیده می شود. ابرنقاط متراکم از میلیون ها نقطه تشکیل شده است که با توجه به نوع دوربین استفاده شده در این تحقیق، هر یک از این نقاط علاوه بر سه ویژگی مختصاتی X, Y, Z ، بازتاب در طول موج های آبی، سبز و قرمز را نیز دارا هستند (X, Y, Z, R, G, B) . از مهم ترین مراحل پس از تهیه ابرنقاط، ساخت مدل سه بعدی^۶ یا Mesh با استفاده از ابرنقاط متراکم است. یک مدل سه بعدی Mesh شامل مجموعه ای از رئوس^۷، لبه ها^۸ و نماها^۹ است. در حالی که ابرنقاط متراکم مجموعه ای از نقاط سه بعدی است، Mesh شامل مجموعه ای از پلی گون های سه بعدی است و سطح واحدی را ایجاد می کند. در مرحله بعد به منظور بهبود مدل سه بعدی و ارتقای آن، تابع بافت روی آن اجرا شد و پس از آن از توفتو موزائیک و مدل

(Structure from Motion) SFM است. این روش با استفاده از تصاویر دوبعدی متعددی که با هم پوشانی زیاد، به وسیله دوربین متحرک از یک شیء ثابت برداشت شده اند و لحاظ کردن پارامترهای دوربین مانند هندسه درونی، موقعیت^۱ و جهت^۲ آن (که در حین پرواز به وسیله GPS و IMU پهناد ثبت شده اند)، مدل های سه بعدی ایجاد می کند (Micheletti et al., 2013). در مرحله اول، با استفاده از الگوریتم SIFT^۳ نقاط مشترک بین تصاویر جست و جو و با یکدیگر متناظر شدند. خروجی این مرحله ابرنقاط پراکنده است که در مناطق مشترک تصاویر ایجاد می شود. همچنین برای هر تصویر موقعیت دوربین، پارامترهای توجیه خارجی و داخلی مانند فاصله کانونی دوربین (f) ، ضرایب مربوط به ناهنجاری^۴ شعاعی لنز دوربین (k_1, k_2, k_3) و مختصات نقطه اصلی (X_p, Y_p) تصحیح شدند. با توجه به متغیر بودن شرایط تصویربرداری، ممکن است تفاوت هایی از نظر پارامترهای مقیاس، دوران، روشنایی و هندسه بین تصاویر ایجاد شود. بنابراین در چنین شرایطی به الگوریتم تناظریابی قابل اعتمادی نیاز است تا تحت تأثیر شرایط متفاوت تصاویر قرار نگیرد. روش تناظریابی SIFT از پرکاربردترین الگوریتم ها در پردازش تصاویر هوایی است که قابلیت آن در مقایسه با دیگر روش های تناظریابی در پژوهش های مختلف اثبات شده است (Karagiannis et al., 2016). پس از استخراج نقاط گرهی، بلوک تصاویر با استفاده از الگوریتم BBA^۵ سرشکن و پارامترهای موقعیت و جهت برای هر یک از تصاویر محاسبه شد. سپس از طریق مثلث بندی هوایی، مختصات سه بعدی (X, Y, Z) برای هر یک از نقاط گرهی براساس مختصات اندازه گیری شده به وسیله GPS پهناد محاسبه شدند. با توجه به نوع GPS نصب شده روی پهناد، دقت مختصات محاسبه شده برای ابرنقاط پراکنده، پایین و در حد چند متر بود، به همین دلیل، از نقاط کنترل زمینی (۴ نقطه کنترل در گوشه های منطقه تحقیق) هم

1. Position
2. Orientation
3. Scale-invariant Feature Transform
4. Distortion
5. Bundle Block Adjustment
6. 3D Model reconstruction
7. Vertices
8. Edges
9. Faces

تشخیص و تعیین خودکار محدوده تاج درخت

به منظور تشخیص تاج تک درختان از دو روش قطعه‌بندی مختلف استفاده شد؛ در روش اول، با استفاده از روش قطعه‌بندی چندمقیاسه^۱، ارتوفتو موزائیک قطعه‌بندی و تاج درختان شناسایی شد. این روش براساس پارامترهای هندسی و طیفی مانند مقیاس، شکل، رنگ، فشردگی^۲ و نرمی^۳، تصویر را به قطعات متعدد با ویژگی‌های مشابه تقسیم می‌کند. در این تحقیق نیز مانند بیشتر چنین پژوهش‌هایی (Bialas et al., 2019) مقادیر بهینه این پارامترها با آزمون و خطا مشخص شد. این فرایند با استفاده از باندهای طیفی R, G, B و DSM حاصل از تصاویر فصل رویش و در محیط نرم‌افزار eCognition Developer 64 انجام گرفت.

در روش دوم، از روش قطعه‌بندی حوزه آبخیز معکوس^۴ برای تعیین محدوده تاج درختان روی مدل ارتفاعی تاج پوشش (CHM) استفاده شد. در مرحله اول، مدل ارتفاعی تاج پوشش، معکوس شد، بدین صورت که در محدوده هر تاج درخت، ارتفاع از سمت حاشیه تاج درخت به سمت نوک درخت، کاهش یابد و هر تاج درخت به حوزه آبخیز تبدیل شود. سپس با استفاده از تابع Flow Direction و ابزار Basin محدود هر حوزه آبخیز (تاج درختان) ترسیم شد. به منظور افزایش دقت در این روش قطعه‌بندی، تعیین یک دامنه ارتفاعی، فایل بولین محدوده تاج درختان تهیه شد تا با استفاده از آن، از قطعه‌بندی روشن‌های بزرگ به عنوان تاج درخت ممانعت شود. دامنه ارتفاعی برای تهیه فایل بولین ۱۴ متر انتخاب شد؛ بدین صورت که به ارزش‌های ارتفاعی بیشتر از ۱۴ متر روی مدل رقومی تاج پوشش عدد ۱، و به کمتر از آن عدد صفر اختصاص داده شد. این مقدار براساس آزمون و خطا (مقادیر ۱ تا ۲۰ متر بررسی

سه بعدی سطح تهیه شدند.

مرحله تهیه مدل‌های رقومی ارتفاعی زمین و سطح تقریباً همانند است، تنها با این تفاوت که در تهیه مدل رقومی ارتفاعی زمین با استفاده از تصاویر فصل خزان، لازم بود تا بعد از تهیه ابرنقاط متراکم، نقاط به دو طبقه زمینی و غیرزمینی طبقه‌بندی شود. این طبقه‌بندی در دو مرحله و براساس سه پارامتر اندازه سلول، حداکثر فاصله و حداکثر زاویه انجام می‌گیرد. در مرحله اول، ابرنقاط متراکم به سلول‌هایی با ابعاد مختلف که توسط کاربر تعیین می‌شود، تقسیم می‌شود. اندازه مناسب این سلول‌ها به عواملی مانند میانگین قطر تاج درختان، میانگین قطر روشن‌های موجود در تاج پوشش و ... بستگی دارد و باید اندازه‌ای انتخاب شود که در محدوده آن نقاط زمینی مناسبی قابل شناسایی باشد. در این تحقیق طبقه‌بندی‌های مختلفی با اندازه سلول‌های متفاوت انجام و مدل رقومی حاصل بررسی شد و در نهایت اندازه سلول ۱۰ متری مناسب تشخیص داده شد. سپس در هر سلول، پایین‌ترین ارزش شناسایی و برای مثلث‌بندی و مدل‌سازی اولیه مدل رقومی زمین استفاده شد. این مدل رقومی زمین سپس با اضافه شدن تعدادی نقطه زمینی با استفاده از دو پارامتر حداکثر فاصله و حداکثر زاویه بهبود خواهد یافت. این پارامترها به ترتیب میزان فاصله و زاویه بین مدل رقومی زمین ایجاد شده از مرحله قبل و تک‌تک نقاط موجود در ابرنقاط را نشان می‌دهد. به عبارت دیگر، نقاطی به عنوان نقطه زمینی در نظر گرفته می‌شوند که در فاصله و زاویه تعیین شده از مدل رقومی زمین قرار داشته باشند. در این تحقیق مقادیر (حداکثر فاصله، ۱ متر و حداکثر زاویه، ۳۰ درجه) نتایج خوبی ارائه داد. پس از طبقه‌بندی ابرنقاط فصل خزان، از ابرنقاط طبقه زمینی برای تهیه مدل رقومی زمین استفاده شد، پس از تهیه مدل‌های رقومی زمین و سطح، مدل ارتفاعی تاج پوشش از تفاضل آنها تهیه شد.

1. Multiresolution Segmentation
2. Compactness
3. Smoothness
4. Invert Watershed Segmentation

شمال-جنوب و غرب-شرق روی هر یک از درختان نمونه قرار داده شد. سپس با ابزار Distance در نرم افزار ArcGIS قطر تاج درختان اندازه گیری و سپس میانگین قطر تاج برای هر درخت محاسبه شد.

تجزیه و تحلیل آماری

به منظور بررسی رابطه بین مقادیر اندازه گیری شده در جنگل و برآورد شده با روش های قطعه بندی، از رگرسیون خطی و محاسبه ضریب تبیین R^2 و برای بررسی معنی دار بودن اختلاف بین میانگین آنها از آزمون t جفتی استفاده شد. در نهایت ارزیابی دقت روش های قطعه بندی در برآورد قطر تاج درختان با محاسبه آماره های مجذور میانگین مربعات خطا (RMSE) و میانگین مطلق خطا (MAE) صورت گرفت.

نتایج

مدل رقومی ارتفاع زمین، مدل رقومی سطح، مدل ارتفاع تاج پوشش و ارتوفتوموزائیک حاصل در شکل ۵ آمده است.

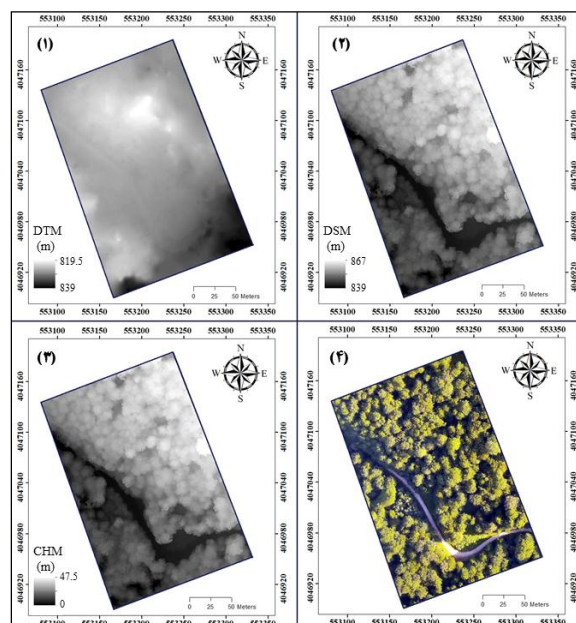
شدند) تعیین می شود (Panagiotidis et al., 2016). تمامی مراحل قطعه بندی حوزه آبخیز در نرم افزار ArcGIS10.3 انجام گرفت.

برداشت های میدانی

به منظور بررسی قابلیت این رویکرد در برآورد قطر تاج درختان، تعداد ۹۵ اصله درخت در پارسل ۲۱۲ جنگل خیرود به صورت انتخابی تعیین و مختصات آنها با استفاده از DGPS برداشت شد. سپس با استفاده از متر لیزری (TruPulse 360 laser range finder)، قطر تاج آنها در راستای شمال-جنوب و غرب-شرق، از طریق تعیین پای عمود تاج روی زمین اندازه گیری و براساس آن میانگین قطر تاج برای هر درخت محاسبه شد.

برآورد قطر تاج درختان

با توجه به اینکه تعیین محدوده تاج درختان با استفاده از دو روش مختلف قطعه بندی صورت گرفت، این الزام وجود داشت که اندازه گیری تاج درختان حاصل از قطعه بندی های مختلف در یک راستا انجام گیرد؛ از این رو ابتدا دو محور عمود بر هم در راستای

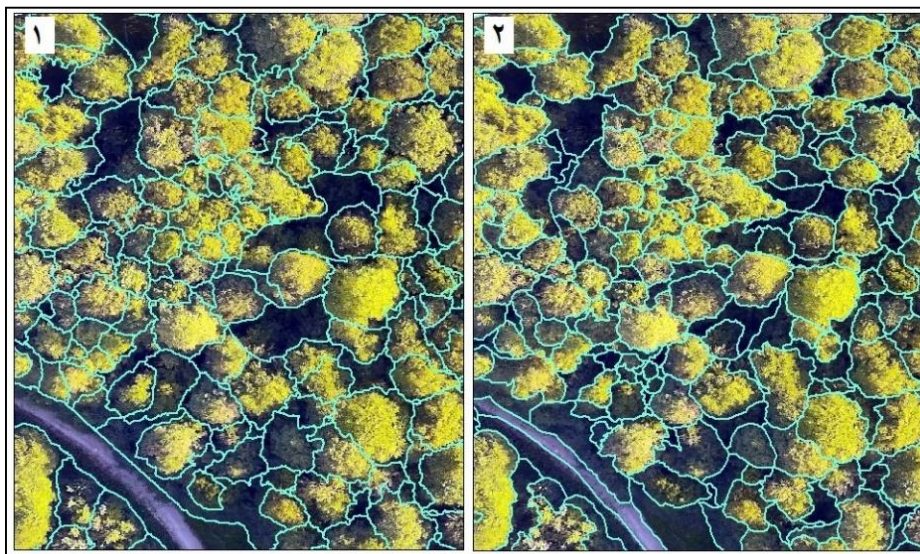


شکل ۵- مدل رقومی ارتفاع زمین (۱) و مدل رقومی سطح (۲)، مدل رقومی ارتفاع تاج پوشش (۳) و ارتوفتوموزائیک حاصل از تصاویر هوایی پهپاد برای منطقه تحقیق

ارزیابی برآورد قطر متوسط تاج درختان

نتایج قطعه‌بندی با روش‌های چندمقیاسه و حوزه

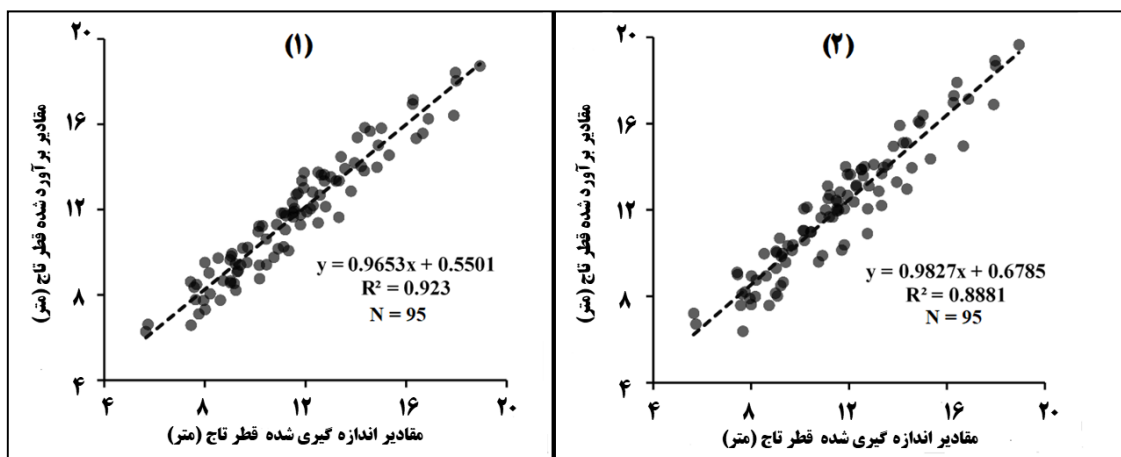
آبخیز برای بخشی از منطقه، در شکل ۶ آمده است.



شکل ۶- نتایج قطعه‌بندی با روش‌های حوزه آبخیز (۱) و چندمقیاسه (۲) برای تشخیص خودکار تاج درختان

مقادیر قطر تاج درختان برآورد شده به روش قطعه‌بندی حوزه آبخیز، همبستگی بیشتری نسبت به روش قطعه‌بندی چندمقیاسه، با مقادیر اندازه‌گیری شده نشان داد.

شکل ۷، نمودار مربوط به مقادیر اندازه‌گیری شده و برآورد شده، معادله و خط رگرسیون حاصل را نشان می‌دهد. براساس نتایج مقدار ضریب تعیین برای برآورد قطر تاج درختان با روش چندمقیاسه، ۰/۸۹ و با روش حوزه آبخیز، ۰/۹۲ به دست آمد. همچنین



شکل ۷- نمودار مربوط به مقادیر اندازه‌گیری شده و برآورد شده با روش‌های قطعه‌بندی حوزه آبخیز (۱) و چندمقیاسه (۲)

روش‌های قطعه‌بندی چندمقیاسه و حوزه آبخیز به ترتیب ۱/۰۵ متر (۸/۷۴٪) و ۰/۸۱ متر (۷/۰۲٪)

همچنین مقدار آماره مجذور میانگین مربعات خطا (RMSE) برای برآورد قطر متوسط تاج درخت به

معنی داری ۵ درصد، درحالی که اختلاف بین میانگین مقادیر اندازه‌گیری شده و برآورد شده به روش چند مقیاسه معنی دار است، این اختلاف در روش حوزه آبخیز معنی داری نبوده است.

به‌دست آمد. مقدار میانگین مطلق خطا (MAE) برای روش چندمقیاسه، ۰/۹۳ متر (۸/۱۱٪) و برای روش حوزه آبخیز، ۰/۶۸ متر (۵/۹۷٪) بوده است. براساس نتایج آزمون t (جدول ۲)، در سطح

جدول ۲- آماره‌های مقادیر اندازه‌گیری شده و برآورد شده و مقایسه آنها

قطر تاج برآورد شده (متر)		قطر تاج اندازه‌گیری شده (متر)	
روش چندمقیاسه	روش حوزه آبخیز		
۱۲/۰۱	۱۱/۶۸	۱۱/۵۳	میانگین
۱۹/۶۵	۱۹/۷۳	۱۹/۲۰	حداکثر
۶/۳۸	۶/۵۹	۵/۵۵	حداقل
۲/۹۵	۲/۸۵	۲/۸۳	انحراف معیار
۴/۹۳	۰/۳۶	-	t
۰	۰/۳۵	-	p-value

اسکندر هوایی است. محدودیت‌های مالی و عملیاتی استفاده از لایدار به‌خصوص در کشور ما سبب شده تا بر روش‌های ارزان‌تر مانند استفاده از تصاویر هوایی پهپاد تمرکز شود. یکی از چالش‌های پردازش چنین تصاویری در مناطق جنگلی، تشکیل گپ‌هایی در ابرنقاط متراکم است که در اثر تناظریابی ناموفق بین برخی تصاویر ایجاد می‌شود. در مطالعه حاضر این مشکل در تصاویر فصل خزان به‌علت یکنواخت‌تر بودن بافت، بیشتر مشاهده شد، به طوری که از مجموع ۲۶۰ تصویر فصل خزان تنها ۲۰۷ تصویر با یکدیگر متناظر شدند. درحالی که در تصاویر فصل رویش ۲۵۷ تصویر متناظر شدند و در تهیه ابرنقاط به‌کار رفتند. البته با انجام اقداماتی مانند افزایش پوشش طولی و عرضی تصاویر، انجام پروازهای متقاطع و موازی به‌صورت توأم و همچنین در نظر گرفتن برخی عوامل تأثیرگذار در کیفیت تصاویر مانند سرعت باد، ساعت مناسب تصویربرداری و انتخاب ارتفاع پرواز مناسب، می‌توان از ایجاد گپ‌های متعدد جلوگیری کرد (Seifert et al., 2019). طبقه‌بندی ابرنقاط فصل خزان به نقاط زمینی و غیرزمینی مهم‌ترین گام در

بحث و نتیجه‌گیری

با توسعه توأم پهپادها و روش‌های پردازش تصویر مانند SFM، این امکان ایجاد شده تا بتوان با استفاده از مجموعه‌ای از تصاویر استریو و روش‌های فتوگرامتری، مدل‌های سه‌بعدی جنگل تهیه و مشخصات درختان را برآورد کرد. قطر متوسط تاج درخت یکی از مشخصاتی است که با استفاده از خروجی‌های مختلف حاصل از پردازش تصاویر هوایی پهپاد قابل برآورد است. در همین زمینه می‌توان از ارتوفتوموزائیک، مدل رقومی سطح و مدل ارتفاع تاج پوشش و مجموعه‌ای از روش‌های مختلف تشخیص خودکار تاج درختان، مانند روش‌های قطعه‌بندی بهره گرفت. فرضیه تحقیق حاضر این بود که با تصاویر پهپاد برداشت‌شده در فصل‌های خزان و رویش می‌توان مدل ارتفاع تاج پوشش دقیق تهیه و قطر متوسط تاج درختان را به‌طور دقیقی برآورد کرد. لازمه تهیه مدل رقومی تاج پوشش، در اختیار داشتن یک مدل رقومی ارتفاع زمین دقیق است. بهترین روش برای تهیه این مدل به‌خصوص در جنگل‌های کوهستانی و متراکم، استفاده از داده‌های لایدار و لیزر

تهیه یک مدل رقومی زمین دقیق محسوب می‌شود. روش‌های متعددی برای طبقه‌بندی ابرنقاط وجود دارد. برای مثال He et al. (2019) از شاخص‌های سایه^۱ و زمین لخت^۲ برای طبقه‌بندی ابرنقاط استفاده کردند. در مطالعه حاضر برای طبقه‌بندی ابرنقاط از سه پارامتر اندازه سلول، حداکثر فاصله و حداکثر زاویه استفاده شد. مقادیر مناسب این پارامترها در کیفیت مدل‌های رقومی زمین و ارتفاع تاج پوشش و در نهایت برآورد قطر متوسط تاج درختان تأثیرگذار است. در این تحقیق با صرف زمان کافی و انتخاب مقادیر مختلف و مقایسه خروجی‌های حاصل، سعی شد تا اندازه بهینه هر یک از پارامترها تعیین شود، بی‌شک این مقادیر در مطالعات بعدی در چنین مناطق و شرایط برداشتی قابل استفاده‌اند. افزایش مقدار پارامتر اندازه سلول، سبب کاهش تعداد نقاط زمینی می‌شود، بنابراین برداشت تصاویر در فصل خزان این امکان را ایجاد می‌کند که با انتخاب اندازه سلول کوچک‌تر، تعدادی بیشتری نقطه زمینی شناسایی کرد. در این تحقیق با توجه به تراکم زیاد درختان و وجود سایه، اندازه سلول ۱۰ متر نتیجه خوبی داشت. برای پارامترهای حداکثر فاصله و حداکثر زاویه نیز به ترتیب مقادیر ۱ متر و ۳۰ درجه انتخاب شد. زمین مرجع کردن مدل‌های رقومی زمین و سطح با استفاده از مختصات دقیق نقاط کنترل انجام گرفت. با توجه به دقت به نسبت کم GPS معمولی نصب شده روی پهپاد، استفاده از نقاط کنترل و با مختصات دقیق DGPS بی‌شک دقت برآوردها را با مدل‌های ایجادشده، افزایش می‌دهد. تعداد و پراکنش نقاط کنترل زمینی می‌تواند دقت مسطحاتی و ارتفاعی مدل‌های ایجادشده و نتایج را تحت تأثیر قرار دهد. براساس مطالعه (Abbaspour et al. 2018) با قرار دادن نقاط کنترل در گوشه‌های منطقه تحقیق، می‌توان به دقت مسطحاتی خوبی دست یافت. درحالی که برای

دستیابی به دقت ارتفاعی مناسب باید نقاط کنترل در سطوح ارتفاعی مختلف و مرکز منطقه قرار داده شوند. با توجه به اینکه منطقه تحقیق، جنگل طبیعی و متراکم بود، محدودیت‌هایی از نظر قرار دادن نقاط کنترل وجود داشت. با وجود این چهار نقطه کنترل با پراکنش مناسب در مناطق باز مانند بستر جاده جنگلی و در محل روشن‌های بزرگ قرار داده شد. در این تحقیق از نقاط کنترل معینی برای زمین مرجع کردن تصاویر فصل خزان و رویش استفاده شد تا اطمینان کافی از دقت هندسی و همخوانی مدل‌های خروجی حاصل شود. نکته دیگری که در تهیه مدل ارتفاع تاج پوشش باید مدنظر قرار گیرد، مقیاس یکسان مدل‌های رقومی زمین و سطح است. برای یکسان‌سازی مقیاس مدل‌ها، از فاصله افقی بین نقاط کنترل که در بازدیدهای میدانی اندازه‌گیری شده بودند، استفاده شد. پس از پردازش تصاویر هوایی فصل‌های رویش و خزان و تهیه مدل ارتفاع تاج پوشش، از دو روش قطعه‌بندی چندمقیاسه و حوزه آبخیز برای تعیین محدوده تاج درختان روی ارتوفتوموزائیک و همچنین مدل ارتفاع تاج پوشش استفاده شد. براساس نتایج، مقدار RMSE % برای برآوردهای روش چندمقیاسه و حوزه آبخیز به ترتیب ۸/۷۴ و ۷/۰۲ و مقدار MAE % برای دو روش یادشده به ترتیب ۸/۱۱ و ۵/۹۷ درصد، به دست آمد. بنابراین روش حوزه آبخیز عملکرد بهتری در برآورد قطر متوسط تاج درختان نسبت به روش چندمقیاسه داشته است. در مطالعات مشابه، Panagiotidis et al. (2016) برای برآورد قطر تاج درختان در یک جنگل طبیعی چندآشکوبه در دو منطقه مختلف از نظر ساختار تاج درختان از اجرای قطعه‌بندی حوزه آبخیز روی مدل ارتفاع تاج پوشش، استفاده کردند. آنها توانستند قطر متوسط تاج درختان را با میزان RMSE% ۱۴/۲۹ و ۱۸/۵۶ درصد (دقت به‌طور محسوسی کمتر از تحقیق حاضر بوده است) به ترتیب برای مناطقی با تاج درختان گسسته و پیوسته برآورد کنند. از آنجا که سوزنی‌برگان

1. Shadow Index
2. Bare-earth Index

مقدار $RMSE\%$ ۱۲/۹۶ و ۱۸/۸۳ درصد به ترتیب برای مناطقی با تاج پوشش پیوسته و گسسته محاسبه شد. با توجه به اینکه مطالعه آنها در توده‌های جنگلکاری شده زیتون انجام گرفت، بازتاب طیفی یکسان درختان زیتون می‌تواند یکی از عوامل محدودکننده در تشخیص تاج درختان با روش قطعه‌بندی چندمقیاسه باشد. درحالی که در مطالعه حاضر، تنوع گونه‌های درختی کمک زیادی در تشخیص و تفکیک تاج کرد. قطعه‌بندی چندمقیاسه می‌تواند روی مجموعه‌ای از داده‌ها انجام گیرد. در تحقیق حاضر، این روش قطعه‌بندی روی ترکیبات متفاوتی از باندهای طیفی و ارزش‌های ارتفاعی شامل ارتوفتوموزائیک، ارتوفتوموزائیک به همراه مدل رقومی تاج پوشش (CHM) و ارتوفتوموزائیک به همراه مدل رقومی سطح (DSM) انجام گرفت و به منظور منسجم شدن مطالب، بهترین نتیجه آورده شد. در روش حوزه آبخیز، قطعه‌بندی براساس ارزش‌های ارتفاعی مدل ارتفاعی تاج پوشش انجام می‌گیرد و بسته به تغییرات ارتفاعی، محدوده‌های تاج درختان ترسیم می‌شود. درحالی که روش چندمقیاسه، براساس ارزش‌های طیفی باندهای استفاده شده و پارامترهایی مانند مقیاس، شکل، رنگ، فشردگی و نرمی، فرایند قطعه‌بندی را انجام می‌دهد. به نظر می‌رسد حالت چنداشکوبه جنگل‌های تحت مطالعه و تنوع ارتفاعی بین پایه‌های درختی، می‌تواند یکی از عوامل عملکرد بهتر روش قطعه‌بندی حوزه آبخیز باشد. مقایسه بین مقادیر اندازه‌گیری شده و برآورد شده نشان می‌دهد که برآوردها بیشتر از مقدار اندازه‌گیری شده اتفاق افتاده است؛ به عبارت دیگر بیش‌برآورد مشاهده شد. این بیش‌برآورد ممکن است دلایل متعددی داشته باشد. یکی از دلایل احتمالی، وجود سایه در اطراف برخی درختان است که سبب می‌شود قطر تاج درختان بزرگ‌تر از مقدار واقعی در فرایند قطعه‌بندی لحاظ شود. خطای هندسی و ارتفاعی مدل رقومی تاج پوشش و ارتوفتوموزائیک حاصل از تصاویر هوایی

گونه‌های غالب درختان منطقه تحقیق آنها را شامل می‌شد، اشکال مضرس و نامتقارن تاج درختان سوزنی‌برگ، ممکن است یکی از عوامل افزایش خطا باشد. بنابراین شکل تاج می‌تواند در دقت اندازه‌گیری و برآورد قطر تاج در این‌گونه مطالعات تأثیر گذار باشد. در مطالعه مذکور، و برخلاف تحقیق حاضر، مدل رقومی زمین از ابرنقاط زمینی حاصل از تصاویر فصل رویش تهیه شده بود و نه از تصاویر فصل خزان. به همین دلیل استفاده از مدل رقومی زمین دقیق در تهیه مدل ارتفاع تاج پوشش، می‌تواند دقت برآورد قطر تاج درخت را افزایش دهد. دقت کم مدل رقومی زمین، مدل ارتفاع تاج پوشش و در نهایت دقت برآورد قطر تاج درختان را تحت تأثیر قرار می‌دهد. تهیه مدل رقومی زمین با طبقه‌بندی ابرنقاط حاصل از تصاویر فصل رویش، تنها در مناطق جنگلی مسطح و با تراکم تاج پوشش کم می‌تواند با دقت مناسب انجام گیرد (Zarco-Tejeda et al., 2014) و در جنگل‌های متراکم و کوهستانی محدودیت‌های زیادی را ایجاد می‌کند (Grznarova et al., 2019). روش قطعه‌بندی حوزه آبخیز در مطالعه (Grznarova et al., 2019) نیز برای قطعه‌بندی DSM حاصل از تصاویر فصل رویش، استفاده شد و میزان $RMSE\%$ در دامنه ۲۱/۸۵-۲۱/۵۴ بسته به گونه‌های مختلف مشاهده شد. براساس نتایج پژوهش‌های انجام گرفته، بهترین روش برای تهیه مدل رقومی زمین دقیق از مناطق جنگلی، استفاده از داده‌های لایدار هوایی (ALS) است (Kangas et al., 2018)، اما محدودیت‌های عملیاتی و هزینه زیاد این فناوری سبب کاربرد کمتر آن شده است. نتایج تحقیق ما نشان داد که با تصویربرداری در فصل خزان می‌توان مدل رقومی زمین دقیق تهیه و قطر متوسط تاج تک‌درختان را برآورد کرد. روش قطعه‌بندی چندمقیاسه، توسط Diaz-Varela et al. (2015) به منظور برآورد قطر تاج درختان در دو منطقه جنگلکاری شده استفاده شد.

این رویکرد بتواند به تدریج در آماربرداری از جنگل‌ها، به‌عنوان روشی ارزان و دقیق به‌کار رود.

سپاسگزاری

این پژوهش در قالب طرح پژوهشی مصوب صندوق حمایت از پژوهشگران و فناوران کشور به شماره ۹۷۰۰۳۶۳۷ انجام گرفت، نگارندگان مراتب سپاس و قدرانی خود را ابراز می‌دارند.

پهپاد نیز می‌تواند دلیل دیگری در بیش‌برآوردها باشد. به‌طور کلی نتایج این تحقیق نشان داد که می‌توان با تصاویر هوایی پهپاد و خروجی‌های حاصل از آن و همچنین به‌کار گرفتن روش‌های خودکار، قطر تاج درختان را با دقت خوبی برآورد کرد. البته میزان دقت به عوامل متعددی مانند نوع پهپاد و دوربین‌های استفاده‌شده، پارامترهای پروازی و ثبات تصویربرداری، تعداد و کیفیت نقاط کنترل و روش‌های پردازش تصویر بستگی دارد. با توجه به نتایج امید است که

References

- Abbaspour, M.M., Kosh-Lahjeh Azar, M.&Varshosaz, M. (2018). Influence of the number and position of the ground control points on the mapping accuracy based on UAV based photogrammetry. *25th national conference on geomatics and 3rd national conference on geospatial engineering*. Toosi University of Technology, Tehran, Iran.
- Bialas, J., Oommen, T. & Havens, C.T. (2019). Optimal segmentation of high spatial resolution images for the classification of buildings using random forests. *International journal of applied earth observation and geoinformation*, 82:1-8.
- Diaz-Varela, R., Rosa, R.D., Leon, L.&Zarco-Tejada, P. (2015). High-resolution airborne UAV imagery to assess olive tree crown parameters using 3D photo reconstruction: application in breeding trials. *Remote sensing*, 7(4): 4213-4232.
- Gill, S.J., Biging, G.S.& Murphy, E.C. (2000). Modeling conifer tree crown radius and estimating canopy cover. *Forest ecology and management*, 126(3): 405-416.
- Grznarova, A., Mokros, M., Surovy, P., Slavik, M., Pondelik, M.&Merganic, J. (2019). The crown diameter estimation from fixed wing type of UAV imagery. *The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, Volume XLII-2/W13.
- He, H., Yan, Y., Chen, T.& Cheng, P. (2019). Tree height estimation of forest plantation in mountainous terrain from bare-earth points using a DoG-coupled radial basis function neural network. *Remote sensing*, 11(11): 1271-1287.
- Holopainen, M., Vastaranta, M., Kankare, V., Raty, M., Vaaja, M., Liang, X., Yu, X., Hyypä, J., Hyypä, H., Viitala, R.&Kaasalainen, S. (2011). Biomass estimation of individual trees using stem and crown diameter TLS measurements. *International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, Volume XXXVIII-5/W12.
- Karagiannis, G., Castro, F.N. & Mioc, Darka. (2016). Automated photogrammetric image matching with SIFT algorithm and Delaunay triangulation. *ISPRS Annals of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, Volume III-2.
- Lisein, J., Pierrot-Deseilligny, M., Bonnet, S.& Lejeune, P. (2013). A Photogrammetric workflow for the creation of a forest canopy height model from small unmanned aerial system imagery. *Remote sensing*, 4(4): 922-944.
- Lovynska, V., Lakyad, P., Sytnyk, S., Kharytonov, M. & Piestova, I. (2018). LAI estimation by direct and indirect methods in Scots pine stands in Northern Steppe of Ukraine. *Journal of forest science*, 12:514-522.

- Micheletti, N., Chandler, J.H. & Lane, S. (2013). Structure from motion (SfM) photogrammetry. *Geomorphological techniques*, 2(2): 1-11.
- Mlambo, R., Woodhouse, H.I., 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*, 68:1-20.
- Mohan, M., Silva, C. A., 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.
- Panagiotidis, D., Abdollahnejad, A., Surovy, P. & Chiteculo, V. (2016). Determining tree height and crown diameter from high-resolution UAV imagery. *International journal of remote sensing*, 38(10): 2392-2410.
- PirBaveghar, M. (2011). Evaluation of capability of IRS-P6 satellite data for predicting quantitative attributes of forests (case study: Northern Zagros forests). *Iranian journal of forests*, 3(4): 277-289.
- Remondino, F., Barazzetti, L., Nex, F., Scaioni, M. & Sarazzi, D. (2011). UAV photogrammetry for mapping and 3D modeling-Current status and future perspectives. *International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, Volume XXXVIII-1/C22.
- Seifert, E., Seifert, S., Vogt, H., Drew, D., Aardt, J.V., Kunneke, A. & Seifert, T. (2019). Influence of drone altitude, image overlap, and optical sensor resolution on multi-view reconstruction of forest images. *Remote sensing*, 11 (20). 1-19.
- Sperlich, M., Kattenborn, T., Koch, B. & Kattenborn, G. (2014). Potential of unmanned aerial vehicle based photogrammetric point clouds for automatic single tree detection. *Joint Conference of the DGfK, DGPF, GfGI and GiN Image quality*.
- Torresan, C., Berton, A., Carotenuto, F., Di-Gennaro, S.F., Giolo, B., Matese, A., Miglitta, F., Vagonli, C., Zadei, A. & Wallace, L. (2017). Forestry applications of UAVs in Europe: a review. *International journal of remote sensing* 38(10): 2427-24244710.
- Wallace, L., Lucieer, A., Malenkovsky, Z. & Vopenka, P. (2016). Assessment of forest structure using two UAV techniques: A comparison of airborne laser scanning and structure from motion (SfM) point clouds, *Forests*, 62: 1-16.
- Zarco-Tejada, P. J., Diaz-Varela, R., Angileri, V. & Loudjani, P. (2014). Tree height quantification using very high resolution imagery acquired from an Unmanned Aerial Vehicle (UAV) an automatic 3D photo-reconstruction methods. *European journal of agronomy*, 55 (55): 89-99.



Research Article

Estimating Mean Tree Crown Diameter using UAV Imagery Based on Multi Resolution and Watershed Segmentation Methods (Case study: Kheyroud Forest)

V. Nasiri¹, A.A. Darvishsefat^{2*}, H. Arefi³, and M. Namiranian⁴

¹ Ph.D. Student., Dept. of Forestry and Forest Economics, Faculty of Natural Resources, University of Tehran, Karaj, I. R. Iran

^{2*} Prof., Dept. of Forestry and Forest Economics, Faculty of Natural Resources, University of Tehran, Karaj, I. R. Iran

³ Associate Prof., Dept. of Surveying, Faculty of Surveying and Geospatial Engineering, University of Tehran, Tehran, I. R. Iran

⁴ Prof., Dept. of Forestry and Forest Economics, Faculty of Natural Resources, University of Tehran, Karaj, I. R. Iran

(Received: 31 January 2020, Accepted: 8 February 2020)

Abstract

Orthophoto mosaic, and digital elevation models (DEMs) that created from UAV imagery can be used to delineate tree crowns. The goal of this research is to compare two segmentation techniques in the estimation of crown diameter. In this regard, two successful flights were carried out in two different seasons (leaf-off and leaf-on). Then we generated accurate CHM through a photogrammetric workflow using DTM and DSM. We used invert watershed (IWS) and multiresolution segmentation (MRS) to detect tree crowns on CHM and orthophoto mosaic, respectively. To compare the estimates of mean crown diameter from UAV images with actual values, 95 trees were measured. The results of comparing the estimated and field measured values showed that all two algorithms effectively delineate tree crowns. The results of linear regression showed there is a high agreement between estimated and measured values, which were ($R^2=0.88$) for MRS and ($R^2=0.92$) for IWS. The best result was obtained using IWS techniques (RMSE= 7.02 % and MAE = 5.97 %). T-test results showed that there are no significant differences between the field measurement and IWS estimated values. Although the t-test result showed there are significant differences between the means of MRS estimated and measured crown diameters, but based on RMSE (8.74 %) and MAE (8.11 %) of the MRS technique, the error of crown diameter estimation was small and therefore acceptable. Finally, the results showed that this methodology, as an accurate and low-cost process, could be used to estimate mean tree crown diameter.

Keywords: Forest inventory, Tree crown delineation, UAV, Segmentation, Canopy height model.