مجلهٔ جنگل ایران، انجمن جنگلبانی ایران
سال دوازدهم، شمارهٔ ۱، بهار ۱۳۹۹
ص ۱۴۵-۱۳۱
مقاله پژوهشی

برآورد قطر متوسط تاج درختان با استفاده از تصاویر هوایی پهپاد برمبنای روش‌های قطعه‌بندی چندمقیاسه و حوزهٔ آبخیز (مطالعهٔ موردی: جنگل خیرود)

وحید نصیری[۱]، علی‌اصغر درویش صفت[۲*]، حسین عارفی[۳] و منوچهر نمیرانیان[۴]

[۱] دانشجوی دکتری دانشکدهٔ منابع طبیعی، دانشگاه تهران، کرج، ایران.
[۲] استاد دانشکدهٔ منابع طبیعی، دانشگاه تهران، کرج، ایران.
[۳] استادیار دانشکدهٔ مهندسی نقشه‌برداری و اطلاعات مکانی، دانشگاه تهران، تهران، ایران.
[۴] استاد دانشکدهٔ 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 به‌دست می‌آیند، داده‌های باارزشی‌اند 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 تاج‌پوشش (CHM) تهیه شد. محدودهٔ تاج درختان با دو رویکرد تعیین شد. در رویکرد اول، از ارتوفتوموزائیک و روش قطعه‌بندی چندمقیاسه و در رویکرد دوم، از مدل ارتفاعی تاج‌پوشش و روش حوزهٔ آبخیز برای قطعه‌بندی استفاده شد. به‌منظور 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 برآوردشده مقایسه شد. نتایج نشان داد که قطر تاج درختان اندازه‌گیری‌شده در جنگل، همبستگی زیادی با مقادیر برآوردشده با روش‌های چندمقیاسه (R2 = ۰/۸۸) و حوزهٔ آبخیز (R2 = ۰/۹۲) دارد. بهترین نتیجهٔ برآورد قطر تاج درختان با استفاده از روش حوزهٔ آبخیز به‌دست آمد (٪ ۵/۹۷ = MAE و ٪ ۷/۰۲ = RMSE). همچنین براساس نتایج، اختلاف معنی‌داری بین مقادیر اندازه‌گیری‌شده و برآوردشده با روش حوزهٔ آبخیز مشاهده نشد. درحالی که بین مقادیر اندازه‌گیری‌شده و برآوردشده با روش چندمقیاسه اختلاف معنی‌داری (سطح ۵ درصد) وجود داشت. نتایج پژوهش نشان داد که این رویکرد می‌تواند به‌عنوان روشی دقیق و ارزان در برآورد قطر متوسط تاج درختان استفاده شود.

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

مقدمه

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

* نویسندهٔ مسئول شمارهٔ تماس: ۰۲۶۳۲۲۴۹۳۱۲ ایمیل: adarvish@ut.ac.ir

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 سنجش از دور در مواقعی که داده‌های دورسنجی با مشخصه‌های اندازه‌گیری‌شدهٔ زمینی همبستگی خوبی داشته باشند، می‌تواند گام مؤثری برای برنامه‌ریزی و پایش جنگل باشد (PirBavaghar, 2011). یکی از نوین‌ترین فناوری‌های برداشت اطلاعات سنجش از دوری، پهپادها (پرنده‌های هدایت‌پذیر از دور) هستند که از دههٔ 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 اندازهٔ تفکیک مکانی در حد چند سانتی‌متر و ابرنقاط متراکم است که برای تهیهٔ مدل‌های رقومی ارتفاعی (DEMs[1]) قابل استفاده است (Sperlich et al., 2014). برداشت تصاویر استریو با همپوشانی زیاد، امکان تهیهٔ دقیق مدل‌های رقومی ارتفاع زمین (DTM[2]) و سطح (DSM[3]) را فراهم می‌کند. DTM نشان‌دهندهٔ 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 (CHM[4]) ایجاد می‌شود که در برآورد قطر متوسط تاج درختان می‌توان از آن استفاده کرد (Mohan et al., 2017). ارتوفتوموزائیک حاصل از پردازش تصاویر پهپاد نیز در تعیین محدودهٔ 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 برمبنای اطلاعات حاصل از پهپاد انجام گرفته است. Varela et al. (2015) به‌منظور اندازه‌گیری قطر تاج درختان زیتون در منطقه‌ای جنگلکاری‌شده 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 نشان‌دهندهٔ 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 حوزهٔ آبخیز، محدودهٔ 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 حوزهٔ آبخیز، نتایج قابل قبولی را در برآورد قطر متوسط تاج درختان در یک جنگل طبیعی در اسلواکی به‌دست آوردند.

براساس 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. تهیهٔ 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). هزینهٔ زیاد و محدودیت‌های

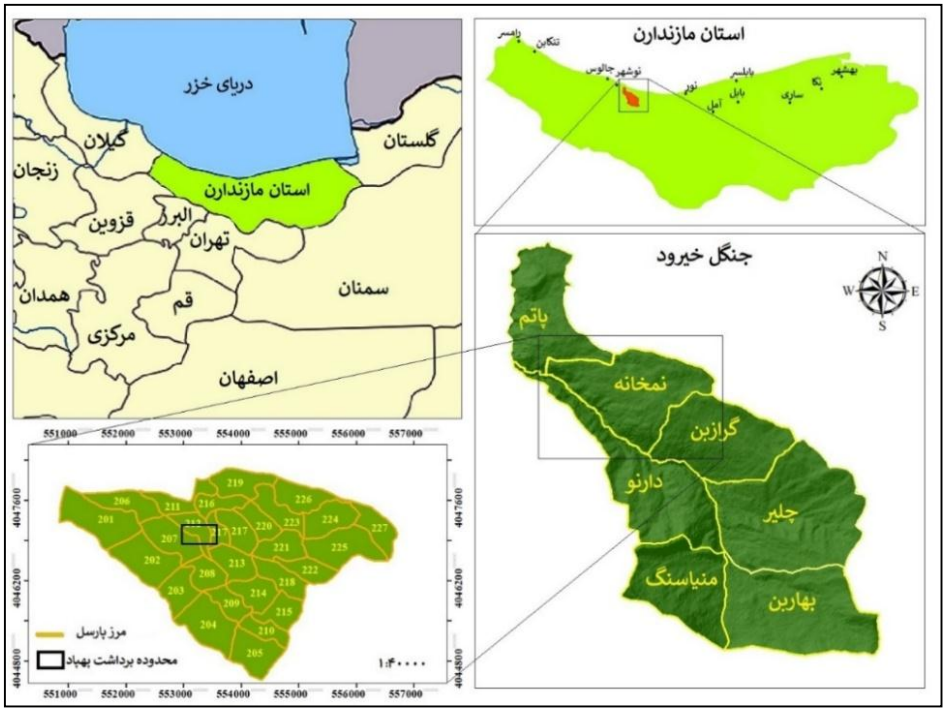
1. Digital Elevation Models
2. Digital Terrain Model
3. Digital Surface Model
4. Canopy Height Model

عملیاتی آنها سبب شده تا استفاده از تصاویر هوایی پهپاد، به‌عنوان روشی ارزان و انعطاف‌پذیر در نظر گرفته شود. لازمهٔ تهیهٔ 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، فرضیهٔ 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 حوزهٔ آبخیز، قطر تاج درختان را با دقت بیشتری نسبت به روش قطعه‌بندی چندمقیاسه برمبنای ارزش‌های طیفی تصاویر یک فصل، برآورد کرد. همچنین خوب بودن عملکرد هر دو روش قطعه‌بندی در تعیین محدودهٔ تاج درختان، دیگر فرضیهٔ این تحقیق است. براساس فرضیه‌ها، هدف اصلی این تحقیق، تشخیص خودکار محدودهٔ تاج درختان و برآورد قطر متوسط تاج آنها برمبنای داده‌های حاصل از پهپاد است. همچنین مقایسهٔ دو روش مختلف قطعه‌بندی در تشخیص خودکار و برآورد قطر متوسط تاج درختان در یک جنگل طبیعی، هدف فرعی تحقیق است.

مواد و روش‌ها

منطقهٔ پژوهش

منطقهٔ 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. دامنهٔ ارتفاعی محدودهٔ برداشت‌شده با پهپاد، ۹۶۰-۸۷۰ متر و شیب عمومی آن ۳۰ درصد است. شکل ۱ موقعیت منطقهٔ تحقیق را نشان می‌دهد.



شکل ۱- منطقهٔ تحقیق و موقعیت جغرافیایی آن

برنامه‌ریزی عملیات پرواز و برداشت تصاویر

در این تحقیق از یک پهپاد هشت‌ملخهٔ بال‌چرخان 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 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 رایانهٔ همراه با نرم‌افزارهای پایش و کنترل پهپاد است.

وزن خالص	۲۵/۲ کیلوگرم
باطری	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	٤ کیلومتر
دامنه ارتفاعی پرواز	۳۰۰-۵۰ متر
حداکثر وزن در هنگام پرواز	۱۰ کیلوگرم
مدت زمان مداومت پروازی	۳۰ دقیقه

شکل ۲- مشخصات پهپاد به‌کاررفته در تحقیق

تصاویر با استفاده از دوربین Survey1camera در محدودهٔ مرئی (RGB) و از ارتفاع ۱۰۰ متری از سطح زمین منطقهٔ تحقیق، با همپوشانی طولی و عرضی ۷۵ درصد و با اندازهٔ تفکیک مکانی ۵ سانتی‌متر برداشت شدند. مشخصات دوربین استفاده‌شده در جدول ۱ آمده است.

جدول ۱- مشخصات فنی دوربین استفاده‌شده در تصویربرداری با پهپاد

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

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 مشاهدهٔ زمین و برآورد دقیق‌تر مدل رقومی زمین (DTM) استفاده شود. در مرحلهٔ بعد، برای تهیهٔ مدل رقومی سطح (DSM)، در فصل رویش (خردادماه) با رعایت پارامترهای پروازی فصل خزان، برداشت دیگری انجام گرفت. در مجموع برای هر پرواز

۲۶۰ تصویر در محدودهٔ پروازی برداشت و استفاده شدند. یک فریم از تصاویر فصل رویش و خزان در شکل ۳ آمده است.

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

برداشت نقاط کنترل

تصحیح هندسی دقیق تصاویر و تهیهٔ مدل‌های سه‌بعدی قابل اعتماد، از ضروریات این‌گونه مطالعات است. در این زمینه در هر محدودهٔ پروازی تعدادی نقطهٔ کنترل با پراکنش مناسب مستقر شده و مختصات دقیق آنها با دقت سانتی‌متر با استفاده از دستگاه DGPS Trimble R3 و به روش PPK[1] برداشت شد. این مختصات در تصحیح تصاویر برداشت‌شده و تهیهٔ ارتوموزائیک دقیق استفاده شدند. شکل ۴ نمونه‌ای از نقاط کنترل و DGPS استفاده‌شده را نشان می‌دهد.

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

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 استخراج‌شده از GPS پهپاد برای هر یک از تصاویر، به متادیتای آن افزوده شده و به این ترتیب تصاویر ژئوتگ[2] شدند. روش متداول در تهیهٔ مدل‌های سه‌بعدی رقومی بر پایهٔ تصاویر هوایی، روش

1. Post processing kinematic
2. Geo Tagging

SFM (Structure from Motion) است. این روش با استفاده از تصاویر دوبعدی متعددی که با همپوشانی زیاد، به‌وسیلهٔ دوربین متحرک از یک شیء ثابت برداشت شده‌اند و لحاظ کردن پارامترهای دوربین مانند هندسهٔ درونی، موقعیت[1] و جهت[2] آن (که در حین پرواز به‌وسیلهٔ GPS و IMU پهپاد ثبت شده‌اند)، مدل‌های سه‌بعدی ایجاد می‌کند (Micheletti et al., 2013). در مرحلهٔ اول، با استفاده از الگوریتم SIFT[3] نقاط مشترک بین تصاویر جست‌وجو و با یکدیگر متناظر شدند. خروجی این مرحله ابرنقاط پراکنده است که در مناطق مشترک تصاویر ایجاد می‌شود. همچنین برای هر تصویر موقعیت دوربین، پارامترهای توجیه خارجی و داخلی مانند فاصلهٔ کانونی دوربین (f)، ضرایب مربوط به ناهنجاری[4] شعاعی لنز دوربین (k_1،k_2،k_3) و مختصات نقطهٔ اصلی (X_p ،Y_p) تصحیح شدند. با توجه به متغیر بودن شرایط تصویربرداری، ممکن است تفاوت‌هایی 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 الگوریتم‌ها در پردازش تصاویر هوایی است که قابلیت آن در مقایسه با دیگر روش‌های تناظریابی در پژوهش‌های مختلف اثبات شده است (Karagiannis et al., 2016). پس از استخراج نقاط گرهی، بلوک تصاویر با استفاده از الگوریتم BBA[5] سرشکن و پارامترهای موقعیت و جهت برای هر یک از تصاویر محاسبه شد. سپس از طریق مثلث‌بندی هوایی، مختصات سه‌بعدی (X,Y,Z) برای هر یک از نقاط گرهی براساس مختصات اندازه‌گیری‌شده به‌وسیلهٔ GPS پهپاد محاسبه شدند. با توجه به نوع GPS نصب‌شده روی پهپاد، دقت مختصات محاسبه‌شده برای ابرنقاط پراکنده، پایین و در حد چند متر بود، به همین دلیل، از نقاط کنترل زمینی (۴ نقطهٔ کنترل در گوشه‌های منطقهٔ تحقیق) هم برای زمین‌مرجع کردن دقیق ابرنقاط پراکندهٔ تولیدشده از مرحلهٔ تناظریابی استفاده شد. بدین‌صورت که نقاط کنترل زمینی روی تصاویر شناسایی و مختصات دقیق آن (که قبلاً توسط DGPS برداشت شده بود) به‌صورت دستی در پیکسل‌های مربوط ثبت و ابرنقاط ایجادشده، بهینه شد.

ابرنقاط تولیدشده در مرحلهٔ قبل که تنها از نقاط گرهی تشکیل شده و دارای تراکم کم است، برای ایجاد هندسهٔ یک مدل سه‌بعدی مناسب، ناکافی است. به همین منظور، الگوریتم تناظریابی با استفاده از پارامترهای دوربین و تصویر و همچنین ابرنقاط پراکندهٔ حاصل از مرحلهٔ اول، سایر نقاط تصویر را هم مختصات‌دار می‌کند و به این ترتیب تعداد زیادی نقطه با مختصات زمینی دقیق تولید می‌شود که ابرنقاط متراکم نامیده می‌شود. ابرنقاط متراکم از میلیون‌ها نقطه تشکیل شده است که با توجه به نوع دوربین استفاده‌شده در این تحقیق، هر یک از این نقاط علاوه‌بر سه ویژگی مختصاتی X,Y,Z، بازتاب در طول موج‌های آبی، سبز و قرمز را نیز دارا هستند (X,Y,Z,R,G,B). از مهم‌ترین مراحل پس از تهیهٔ ابرنقاط، ساخت مدل سه‌بعدی[6] یا Mesh با استفاده از ابرنقاط متراکم است. یک مدل سه‌بعدی Mesh شامل مجموعه‌ای از رئوس[7]، لبه‌ها[8] و نماها[9]ست. درحالی که ابرنقاط متراکم مجموعه‌ای از نقاط سه‌بعدی است، Mesh شامل مجموعه‌ای از پلی‌گون‌های سه‌بعدی است و سطح واحدی را ایجاد می‌کند. در مرحلهٔ بعد به‌منظور بهبود مدل سه‌بعدی و ارتقای آن، تابع بافت روی آن اجرا شد و پس از آن ارتوفتو موزائیک و مدل

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

سه‌بعدی سطح تهیه شدند.

مراحل تهیهٔ مدل‌های رقومی ارتفاعی زمین و سطح تقریباً همانند است، تنها با این تفاوت که در تهیهٔ مدل رقومی ارتفاعی زمین با استفاده از تصاویر فصل خزان، لازم بود تا بعد از تهیهٔ ابرنقاط متراکم، نقاط به دو طبقهٔ زمینی و غیرزمینی طبقه‌بندی شود. این طبقه‌بندی در دو مرحله و براساس سه پارامتر اندازهٔ سلول، حداکثر فاصله و حداکثر زاویه انجام می‌گیرد. در مرحلهٔ اول، ابرنقاط متراکم به سلول‌هایی با ابعاد مختلف که توسط کاربر تعیین می‌شود، تقسیم می‌شود. اندازهٔ مناسب این سلول‌ها به عواملی مانند میانگین قطر تاج درختان، میانگین قطر روشنه‌های موجود در تاج‌پوشش و ... بستگی دارد و باید اندازه‌ای انتخاب شود که در محدودهٔ آن نقاط زمینی مناسبی قابل شناسایی باشد. در این تحقیق طبقه‌بندی‌های مختلفی با اندازهٔ سلول‌های متفاوت انجام و مدل رقومی حاصل بررسی شد و در نهایت اندازهٔ سلول ۱۰ متری مناسب تشخیص داده شد. سپس در هر سلول، پایین‌ترین ارزش شناسایی و برای مثلث‌بندی و مدلسازی اولیهٔ مدل رقومی زمین استفاده شد. این مدل رقومی زمین سپس با اضافه شدن تعدای نقطهٔ زمینی با استفاده از دو پارامتر حداکثر فاصله و حداکثر زاویه بهبود خواهد یافت. این پارامترها به‌ترتیب میزان فاصله و زاویهٔ بین مدل رقومی زمین ایجادشده از مرحلهٔ قبل و تک‌تک نقاط موجود در ابرنقاط را نشان می‌دهد. به‌عبارت دیگر، نقاطی به‌عنوان نقطهٔ زمینی در نظر گرفته می‌شوند که در فاصله و زاویهٔ تعیین‌شده 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 طبقهٔ زمین برای تهیهٔ مدل رقومی زمین استفاده شد، پس از تهیهٔ مدل‌های رقومی زمین و سطح، مدل ارتفاعی تاج‌پوشش از تفاضل آنها تهیه شد.

تشخیص و تعیین خودکار محدودهٔ تاج درخت

به‌منظور تشخیص تاج تک‌درختان از دو روش قطعه‌بندی مختلف استفاده شد؛ در روش اول، با استفاده از روش قطعه‌بندی چندمقیاسه[1]، ارتوفتو موزائیک قطعه‌بندی و تاج درختان شناسایی شد. این روش براساس پارامترهای هندسی و طیفی مانند مقیاس، شکل، رنگ، فشردگی[2] و نرمی[3]، تصویر را به قطعات متعدد با ویژگی‌های مشابه تقسیم می‌کند. در این تحقیق نیز مانند بیشتر چنین پژوهش‌هایی (Bialas et al., 2019) مقادیر بهینهٔ 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 حوزهٔ آبخیز معکوس[4] برای تعیین محدودهٔ تاج درختان روی مدل ارتفاعی تاج‌پوشش (CHM) استفاده شد. در مرحلهٔ اول، مدل ارتفاعی تاج‌پوشش، معکوس شد، بدین‌صورت که در محدودهٔ هر تاج درخت، ارتفاع از سمت حاشیهٔ تاج درخت به سمت نوک درخت، کاهش یابد و هر تاج درخت به حوزهٔ آبخیز تبدیل شود. سپس با استفاده از تابع Flow Direction و ابزار Basin محدود هر حوزهٔ آبخیز (تاج درختان) ترسیم شد. به‌منظور افزایش دقت در این روش قطعه‌بندی، با تعیین یک دامنهٔ ارتفاعی، فایل بولین محدودهٔ تاج درختان تهیه شد تا با استفاده از آن، از قطعه‌بندی روشنه‌های بزرگ به‌عنوان تاج درخت ممانعت شود. دامنهٔ ارتفاعی برای تهیهٔ فایل بولین ۱۴ متر انتخاب شد؛ بدین‌صورت که به ارزش‌های ارتفاعی بیشتر از ۱۴ متر روی مدل رقومی تاج‌پوشش عدد ۱، و به کمتر از آن عدد صفر اختصاص داده شد. این مقدار براساس آزمون و خطا (مقادیر ۱ تا ۲۰ متر بررسی

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

شدند) تعیین می‌شود (Panagiotidis et al., 2016). تمامی مراحل قطعه‌بندی حوزهٔ آبخیز در نرم‌افزار ArcGIS10.3 انجام گرفت.

برداشت‌های میدانی

به‌منظور بررسی قابلیت این رویکرد در برآورد قطر تاج درختان، تعداد ۹۵ اصله درخت در پارسل ۲۱۲ جنگل خیرود به‌صورت 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 اندازه‌گیری و براساس آن میانگین قطر تاج برای هر درخت محاسبه شد.

برآورد قطر تاج در ختان

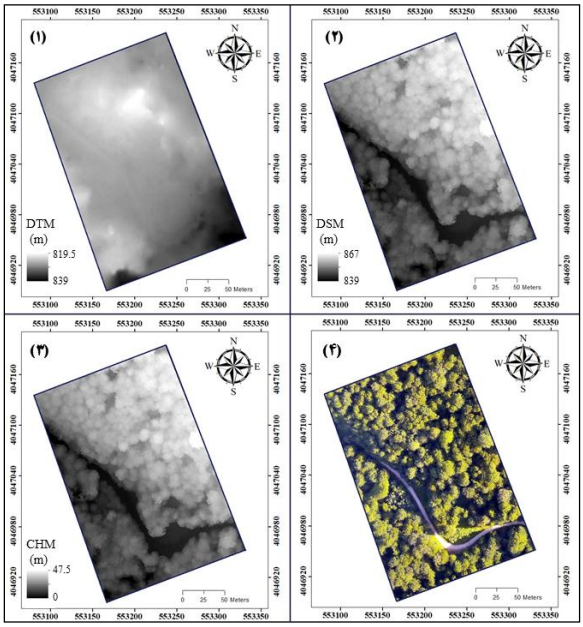
با توجه به اینکه تعیین محدودهٔ تاج درختان با استفاده از دو روش مختلف قطعه‌بندی صورت گرفت، این الزام وجود داشت که اندازه‌گیری تاج درختان حاصل از قطعه‌بندی‌های مختلف در یک راستا انجام گیرد؛ ازاین‌رو ابتدا دو محور عمود بر هم در راستای شمال-جنوب و غرب-شرق روی هر یک از درختان نمونه قرار داده شد. سپس با ابزار Distance در نرم‌افزار ArcGIS قطر تاج درختان اندازه‌گیری و سپس میانگین قطر تاج برای هر درخت محاسبه شد.

تجزیه و تحلیل آماری

به‌منظور بررسی رابطهٔ بین مقادیر اندازه‌گیری‌شده در جنگل و برآوردشده با روش‌های قطعه‌بندی، از رگرسیون خطی و محاسبهٔ ضریب تبیین R^2 و برای بررسی معنی‌دار بودن اختلاف بین میانگین آنها از آزمون t جفتی استفاده شد. در نهایت ارزیابی دقت روش‌های قطعه‌بندی در برآورد قطر تاج درختان با محاسبهٔ آماره‌های مجذور میانگین مربعات خطا (RMSE) و میانگین مطلق خطا (MAE) صورت گرفت.

نتایج

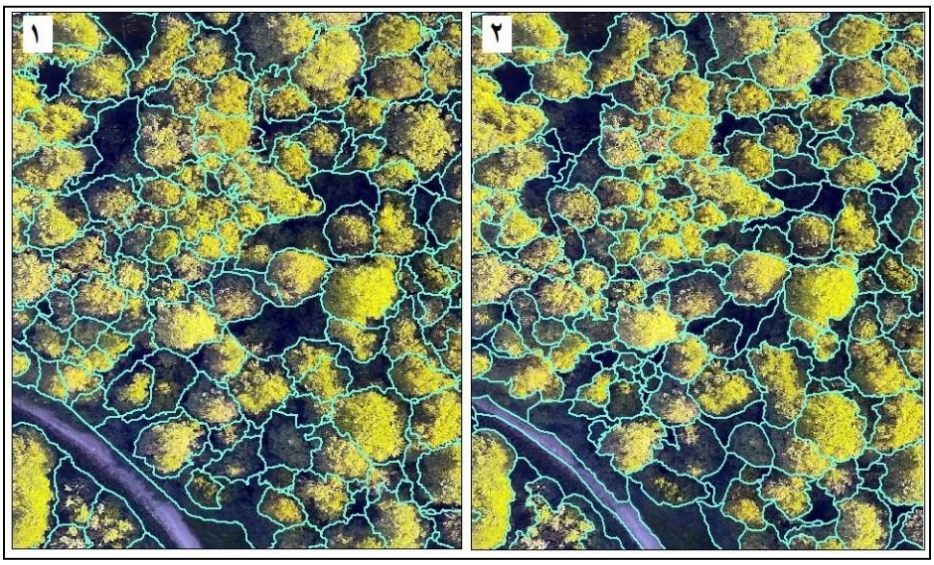
مدل رقومی ارتفاع زمین، مدل رقومی سطح، مدل ارتفاع تاج‌پوشش و ارتوفتوموزائیک حاصل در شکل ۵ آمده است.



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

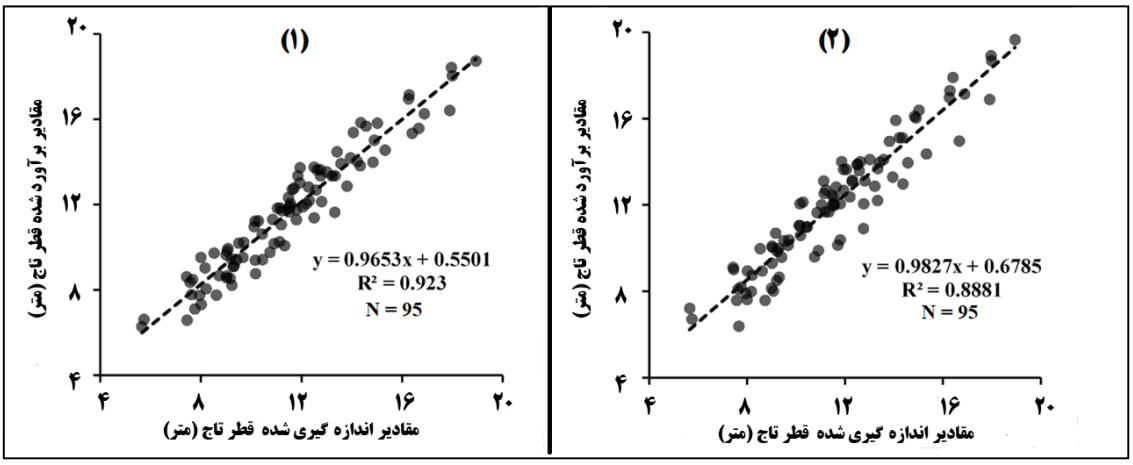
ارزیابی برآورد قطر متوسط تاج درختان

نتایج قطعه‌بندی با روش‌های چندمقیاسه و حوزهٔ آبخیز برای بخشی از منطقه، در شکل ۶ آمده است.



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

شکل ۷، نمودار مربوط به مقادیر اندازه‌گیری‌شده و برآوردشده، 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 حوزهٔ آبخیز، ۰/۹۲ به‌دست آمد. همچنین مقادیر قطر تاج درختان برآوردشده به روش قطعه‌بندی حوزهٔ آبخیز، همبستگی بیشتری نسبت به روش قطعه‌بندی چندمقیاسه، با مقادیر اندازه‌گیری‌شده نشان داد.



شکل ۷- نمودار مربوط به مقادیر اندازه‌گیری‌شده و برآوردشده با روش‌های قطعه‌بندی حوزهٔ آبخیز (۱) و چندمقیاسه (۲)

همچنین مقدار آمارهٔ مجذور میانگین مربعات خطا (RMSE) برای برآورد قطر متوسط تاج درخت به روش‌های قطعه‌بندی چندمقیاسه و حوزهٔ آبخیز به‌ترتیب ۱/۰۵ متر (۸/۷۴ ٪) و ۰/۸۱ متر (۷/۰۲ ٪)

به‌دست آمد. مقدار میانگین مطلق خطا (MAE) برای روش چندمقایسه، ۰/۹۳ متر (۸/۱۱ ٪) و برای روش حوزهٔ آبخیز، ۰/۶۸ متر (۵/۹۷ ٪) بوده است.

براساس نتایج آزمون t (جدول ۲)، در سطح معنی‌داری ۵ درصد، درحالی که اختلاف بین میانگین مقادیر اندازه‌گیری شده و برآورد شده به روش چند مقیاسه معنی دار است، این اختلاف در روش حوزهٔ آبخیز معنی‌داری نبوده است.

جدول ۲- آماره‌های مقادیر اندازه‌گیری‌شده و برآوردشده و مقایسهٔ آنها

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

بحث و نتیجه‌گیری

با توسعهٔ 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 تاج‌پوشش و مجموعه‌ای از روش‌های مختلف تشخیص خودکار تاج درختان، مانند روش‌های قطعه‌بندی بهره گرفت. فرضیهٔ تحقیق حاضر این بود که با تصاویر پهپاد برداشت‌شده در فصل‌های خزان و رویش می‌توان مدل ارتفاع تاج‌پوشش دقیق تهیه و قطر متوسط تاج درختان را به‌طور دقیقی برآورد کرد. لازمهٔ تهیهٔ مدل رقومی تاج‌پوشش، در اختیار داشتن یک مدل رقومی ارتفاع زمین دقیق است. بهترین روش برای تهیهٔ این مدل به‌خصوص در جنگل‌های کوهستانی و متراکم، استفاده از داده‌های لایدار و لیزر اسکنر 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 مطالعهٔ حاضر این مشکل در تصاویر فصل خزان به‌علت یکنواخت‌تر بودن بافت، بیشتر مشاهده شد، به‌طوری 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 تهیهٔ 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

تهیهٔ یک مدل رقومی زمین دقیق محسوب می‌شود. روش‌های متعددی برای طبقه‌بندی ابرنقاط وجود دارد. برای مثال He et al. (2019) از شاخص‌های سایه[1] و زمین لخت[2] برای طبقه‌بندی ابرنقاط استفاده کردند. در مطالعهٔ حاضر برای طبقه‌بندی ابرنقاط از سه پارامتر اندازهٔ سلول، حداکثر فاصله و حداکثر زاویه استفاده شد. مقادیر مناسب این پارامترها در کیفیت مدل‌های رقومی زمین و ارتفاع تاج‌پوشش و در نهایت برآورد قطر متوسط تاج درختان تأثیرگذار است. در این تحقیق با صرف زمان کافی و انتخاب مقادیر مختلف و مقایسهٔ خروجی‌های حاصل، سعی شد تا اندازهٔ بهینهٔ هر یک از پارامترها تعیین شود، بی‌شک این مقادیر در مطالعات بعدی در چنین مناطق و شرایط برداشتی قابل استفاده‌اند. افزایش مقدار پارامتر اندازهٔ سلول، سبب کاهش تعداد نقاط زمینی می‌شود، بنابراین برداشت تصاویر در فصل خزان این امکان را ایجاد می‌کند که با انتخاب اندازهٔ سلول کوچک‌تر، تعدادی بیشتری نقطهٔ زمینی شناسایی کرد. در این تحقیق با توجه به تراکم زیاد درختان و وجود سایه، اندازهٔ سلول ۱۰ متر نتیجهٔ خوبی داشت. برای پارامترهای حداکثر فاصله و حداکثر زاویه نیز به‌ترتیب مقادیر ۱ متر و ۳۰ درجه انتخاب شد. زمین‌مرجع کردن مدل‌های رقومی زمین و سطح با استفاده از مختصات دقیق نقاط کنترل انجام گرفت. با توجه به دقت به‌نسبت کم GPS معمولی نصب‌شده 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 مطالعهٔ Abbaspour et al. (2018) با قرار دادن نقاط کنترل در گوشه‌های منطقهٔ 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 منطقهٔ تحقیق، جنگل طبیعی و متراکم بود، محدودیت‌هایی از نظر قرار دادن نقاط کنترل وجود داشت. با وجود این چهار نقطهٔ کنترل با پراکنش مناسب در مناطق باز مانند بستر جادهٔ جنگلی و در محل روشنه‌های بزرگ قرار داده شد. در این تحقیق از نقاط کنترل معینی برای زمین‌مرجع کردن تصاویر فصل خزان و رویش استفاده شد تا اطمینان کافی از دقت هندسی و همخوانی مدل‌های خروجی حاصل شود. نکتهٔ دیگری که در تهیهٔ مدل ارتفاع تاج‌پوشش باید مدنظر قرار گیرد، مقیاس یکسان مدل‌های رقومی زمین و سطح است. برای یکسان‌سازی مقیاس مدل‌ها، از فاصلهٔ افقی بین نقاط کنترل که در بازدیدهای میدانی اندازه‌گیری شده بودند، استفاده شد. پس از پردازش تصاویر هوایی فصل‌های رویش و خزان و تهیهٔ مدل ارتفاع تاج‌پوشش، از دو روش قطعه‌بندی چندمقیاسه و حوزهٔ آبخیز برای تعیین محدودهٔ تاج درختان روی ارتوفتوموزائیک و همچنین مدل ارتفاع تاج‌پوشش استفاده شد. براساس نتایج، مقدار RMSE % برای برآوردهای روش چندمقیاسه و حوزهٔ آبخیز به‌ترتیب ۸/۷۴ و ۷/۰۲ و مقدار MAE % برای دو روش یادشده به‌ترتیب ۸/۱۱ و ۵/۹۷ درصد، به‌دست آمد. بنابراین روش حوزهٔ 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 منطقهٔ مختلف از نظر ساختار تاج درختان از اجرای قطعه‌بندی حوزهٔ آبخیز روی مدل ارتفاع تاج‌پوشش، 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) به‌ترتیب برای مناطقی با تاج درختان گسسته و پیوسته برآورد کنند. ازآنجا که سوزنی‌برگان

1. Shadow Index
2. Bare-earth Index

گونه‌های غالب درختان منطقهٔ 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 مطالعهٔ 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 تهیهٔ مدل ارتفاع تاج‌پوشش، می‌تواند دقت برآورد قطر تاج درخت را افزایش دهد. دقت کم مدل رقومی زمین، مدل ارتفاع تاج‌پوشش و در نهایت دقت برآورد قطر تاج درختان را تحت تأثیر قرار می‌دهد. تهیهٔ مدل رقومی زمین با طبقه‌بندی ابرنقاط حاصل از تصاویر فصل رویش، تنها در مناطق جنگلی مسطح و با تراکم تاج‌پوشش 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 حوزهٔ آبخیز در مطالعهٔ Grznarova et al. (2019) نیز برای قطعه‌بندی DSM حاصل از تصاویر فصل رویش، استفاده شد و میزان RMSE%، در دامنهٔ ۲۱/۵۴-۲۱/۸۵ بسته به گونه‌های مختلف مشاهده شد. براساس نتایج پژوهش‌های انجام‌گرفته، بهترین روش برای تهیهٔ مدل رقومی زمین دقیق از مناطق جنگلی، استفاده از داده‌های لایدار هوایی (ALS)[1] است (Kangas et al., 2018)، اما محدودیت‌های عملیاتی و هزینهٔ 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) به‌منظور برآورد قطر تاج درختان در دو منطقهٔ جنگلکاری‌شده استفاده شد. مقدار RMSE %، ۱۲/۹۶ و ۱۸/۸۳ درصد به‌ترتیب برای مناطقی با تاج‌پوشش پیوسته و گسسته محاسبه شد. با توجه به اینکه مطالعهٔ آنها در توده‌های جنگلکاری‌شدهٔ 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 مطالعهٔ 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 به‌همراه مدل رقومی تاج‌پوشش (CHM) و ارتوفتوموزائیک به‌همراه مدل رقومی سطح (DSM) انجام گرفت و به‌منظور منسجم شدن مطالب، بهترین نتیجه آورده شد. در روش حوزهٔ آبخیز، قطعه‌بندی براساس ارزش‌های ارتفاعی مدل ارتفاعی تاج‌پوشش انجام می‌گیرد و بسته به تغییرات ارتفاعی، محدوده‌های تاج درختان ترسیم می‌شود. درحالی که روش چندمقیاسه، براساس ارزش‌های طیفی باندهای استفاده‌شده و پارامترهایی مانند مقیاس، شکل، رنگ، فشردگی و نرمی، فرایند قطعه‌بندی را انجام می‌دهد. به‌نظر می‌رسد حالت چنداشکوبهٔ جنگل‌های تحت مطالعه و تنوع ارتفاعی بین پایه‌های درختی، می‌تواند یکی از عوامل عملکرد بهتر روش قطعه‌بندی حوزهٔ آبخیز باشد. مقایسهٔ بین مقادیر اندازه‌گیری‌شده و برآوردشده نشان می‌دهد که برآوردها بیشتر از مقدار اندازه‌گیری‌شده اتفاق افتاده است؛ به‌عبارت 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 تاج‌پوشش و اتوفتوموزائیک حاصل از تصاویر هوایی

1. Airborne Laser Scanning

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 این رویکرد بتواند به‌تدریج 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 شمارهٔ ۹۷۰۰۳۶۳۷ انجام گرفت، نگارندگان مراتب سپاس و قدرانی خود را ابراز می‌دارند.

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 groinformation, 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., Hyyppa, J., Hyppa, 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 methodsin Scots pine stands in Northern Steppe of Ukraine. *Journal of forest science, 12*:514-522.

Michelettti, 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., Kattemborn, 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., Malennovsky, 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.

Iranian Journal of Forest
Vol. 12, No. 1, Spring 2020
pp. 131-145

Research Article

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

V. Nasiri[1], A.A. Darvishsefat[2*], H. Arefi[3], and M. Namiranian [4]

[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

Orthphoto 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.

∗Corresponding author Tel: +982632249312 Email: adarvish@ut.ac.ir