نشریه علمی پژوهشی مهندسی فناوری اطلاعات مکانی
سال هفتم، شماره سوم، پاییز ۱۳۹۸
Vol.7, No.3, Autumn 2019
۲۳۰-۲۱۳
مقاله پژوهشی

برآورد زیست‌توده درختان با استفاده از ابر نقاط متراکم استخراج شده از تصاویر پهپاد در سطح تک‌درخت، قطعه نمونه و ترکیبی

محمدرضا کارگر[1]، حمزه سهرابی[2*]

۱- دانش‌اموخته کارشناسی ارشد علوم و مهندسی جنگل دانشکده منابع طبیعی دانشگاه تربیت مدرس، تهران، ایران
۲- دانشیار گروه علوم و مهندسی جنگل دانشکده منابع طبیعی دانشگاه تربیت مدرس، تهران، ایران

تاریخ دریافت مقاله: ۱۳۹۷/۰۵/۰۸   تاریخ پذیرش مقاله: ۱۳۹۸/۰۳/۰۴

چکیده

الگوریتم‌های تبدیل تصاویر دو بعدی به داده‌های سه بعدی این امید را پدید آورده‌اند که بتوان ویژگی‌های ساختاری درختان را از طریق تصاویر پهپاد استخراج کرد. در این پژوهش میزان دقت برآورد زیست توده درختان در سطح تک‌درخت، قطعه نمونه و ترکیبی با استفاده از تصاویر پهپاد بررسی شد. در بخشی از پارک جنگلی سیسنگان با مساحت ۳۸٫۸ هکتار، با استفاده از یک پهپاد عمود پرواز، ۸۵۴ تصویر از ارتفاع ۱۰۰ متری از سطح زمین برداشت و سپس با استفاده از الگوریتم ساختار حرکت مبنا (*SFM*) داده‌های سه بعدی تولید و ارتفاع درختان استخراج شد. در ۲۸ قطعه نمونه طراحی شده با ابعاد ۳۰ در ۳۰ متر، ارتفاع و قطر برابر سینه درختان برداشت شد و سپس با استفاده از قطر برابر سینه و جایگذاری آن در معادله آلومتریک عمومی، زیست توده تک درختان محاسبه شد و بااستفاده از ارتفاع حاصل، مدل ارتفاعی تاج (*CHM*) مدل‌سازی شد. به‌منظور برآورد زیست توده در سطح قطعه نمونه نیز از شاخص‌های ارتفاعی مستخرج از مدل ارتفاعی تاج استفاده شد و مقدار آن در قطعه نمونه مدل‌سازی شد. در سطح ترکیبی نیز مقدار زیست توده موجود در قطعات نمونه بااستفاده از زیست توده برآورد شده تک درختان و زیست توده برآورد شده در سطح قطعه نمونه، مدل‌سازی شد. دقت و صحت برآوردها با معیارهای اریبی‌نسبی، جذر میانگین مربعات خطا نسبی و ضریب تبیین تطابق یافته بررسی شد. براساس نتایج، جذر میانگین مربعات خطا نسبی برآورد زیست توده در سطح تک درخت پایه‌های شمشاد، ممرز، انجیلی و سایر گونه‌ها به‌ترتیب ۱۷٫۵۶، ۷٫۱۱، ۱۴٫۶۷ و ۲۲٫۷۳ درصد بود. زیست توده با جذر میانگین مربعات خطای نسبی ۵۸ درصد در سطح قطعه نمونه و ۴۷ درصد در سطح ترکیبی برآورد شد. براساس نتایج، دقیق‌ترین سطح برای برآورد زیست توده سطح ترکیبی است و دقت برآورد زیست توده با تصاویر پهپاد مورد استفاده در این تحقیق برای ارزیابی‌های کلی مناسب است اما برای برنامه ریزی مدیریتی دقت لازم را ندارد.

کلیدواژه‌ها: پهپاد، سیسنگان، مدل ارتفاعی تاج، زیست توده روی زمین، مدل رقومی زمین.

*نویسنده مکاتبه کننده: مازندران، شهرستان نور، خیابان امام خمینی، بلوار امام رضا، دانشکده منابع طبیعی و علوم دریایی دانشگاه تربیت مدرس.
تلفن: ۰۱۱۴۴۵۵۳۱۰۱

Email : hsohrabi@modares.ac.ir

[DOI: 10.29252/jgit.7.3.213]

۱- مقدمه

محصولات سنجش‌ازدوری از مهم‌ترین داده‌هایی هستند که امروزه در تامین منابع مورد نیاز برای مدیریت سطوح مختلف جنگل‌ها نقش ایفا می‌کنند. این محصولات از تجهیزات مختلفی مانند پهپادها، ماهواره‌ها، هواپیماهای سرنشین‌دار و غیره حاصل می‌شوند. پهپادها تجهیزات نوظهوری هستند که ارتفاع فعالیت آنها کمتر از تجهیزات هوابرد بوده و به دلایل ایمنی سطح پرواز آن‌ها به زمین نزدیک‌تر است *[۱]*.

۱-۱- پهپادها و اهمیت آن‌ها

این تجهیزات به‌دلیل اینکه قابلیت‌های زیادی در اختیار کاربر قرار می دهند، امروزه در زمینه‌های مختلف از جمله جنگل‌داری مورد توجه زیاد قرار گرفته‌اند. انواع مختلفی از سنجنده‌های روی این وسایل قابل نصب بوده و با توجه به نیاز کاربر به راحتی قابل تعویض‌اند. همچنین یکی دیگر از مهم‌ترین مزیت آن‌ها نسبت به سایر تجهیزات سنجش از دوری، می‌توان به تفکیک مکانی و زمانی قابل برنامه‌ریزی توسط کاربر اشاره کرد *[۲]*. این ویژگی‌ها زمینه را برای بسیاری از مطالعات مختلف از جمله بیومتری، فنولوژی، پاتولوژی و غیره مهیا ساخته است و جایگاه پهپادها را در عرصه جنگل‌داری بسیار گسترش داده است. تصاویر و داده-های پهپاد به دلیل دارا بودن قابلیت تبدیل به تصاویر سه بعدی، به محقق این امکان را می‌دهد تا بسیاری از مشخصه‌های ساختاری جنگل از جمله ارتفاع تک درختان، تعداد آشکوب، قطر تاج و غیره را با دقت و صحت بالا از تصاویر استخراج کند *[۳]*.

همچنین دیگر مشخصه‌های ساختاری جنگل از جمله زیست توده روی زمین[1]و موجودی حجمی، از طریق مدل‌سازی با استفاده از مشخصه‌های مستخرج از تصاویر سه بعدی قابل برآورد هستند *[۴]*. زیست توده روی زمین در واقع مقدار مواد زیستی حاصل ازفتوسنتز است که تبدیل به بافت گیاهی شده است. به منظور اندازه‌گیری زیست توده هر گیاه، باید آن را قطع کرده و وزن خشک آن را محاسبه شود؛ اما این روش مخرب است و موجب از بین رفتن درخت، بنابراین برای برآورد زیتوده از رابطه‌های آلومتریک استفاده می‌شود *[۱]*. از جمله متغیرهای به‌کارگیری شده در معادلات آلومتریک، مشخصه‌های بیوفیزیکی درختان هستند. قطر تاج، ارتفاع درختان، قطر برابر سینه و غیره، از جمله مواردی هستند که در برآورد زیست توده از طریق این فرمول‌ها کاربرد دارند *[۲]*. مهم‌ترین روش‌های برداشت پارامترها به منظور محاسبه میزان زیست توده روی زمین در جدول (۱) ذکر شده است. به دلیل این‌که اندازه‌گیری میدانی این ویژگی‌ها بسیار طاقت‌فرساست و گاها همراه با خسارات جبران ناپذیر جانی است، از فن‌آوری‌های جدید سنجش از دوری استفاده می‌شود که از نمونه‌های جدید این فن‌آوری‌ها، پهپادها هستند که در این پژوهش به منظور برآورد زیست توده روی زمین درختان، از ارتفاع مستخرج از مدل سه‌بعدی پهپاد استفاده شد. قابلیت تبدیل سه بعدی در تصاویر پهپادها و تفکیک‌های مختلف مکانی و زمانی قابل برنامه‌ریزی آن‌ها، خدمات بسیار ویژه‌ای را در زمینه علوم جنگل ارائه کرده است.

۱-۲- سه بعدی سازی تصاویر پهپاد

استخراج ابر نقاط متراکم توسط الگوریتم ساختار حرکت مبنا (*SFM*[2]) صورت می‌گیرد. این الگوریتم نقاط مشابه در تصاویری که دارای هم‌پوشانی مطلوب هستند را به عنوان نقاط کلیدی انتخاب کرده و تصاویر را به وسیله آن‌ها بر روی یکدیگر قرار می‌دهد؛ سپس با استفاده از سازوکار مورد کاربرد در استریوسکوپ، تصاویر دو بعدی را به فضای سه بعدی تبدیل می‌کنند *[۶]*. میزان هم‌پوشانی در تصاویر اخذ شده به‌وسیله پهپاد، توسط کاربر قابل برنامه‌ریزی است. تفکیک مکانی و زمانی تصاویری که به‌وسیله پهپاد اخذ

[1] *Above Ground Biomass*

[2] *Structure from Motion*

[DOI: 10.29252/jgit.7.3.213]

می‌شوند نیز براساس برخی پارامترهای موثر، قابل برنامه‌ریزی هستند. میزان تفکیک مکانی تصاویر پهپاد بسیار بالا است و توانایی تفکیک پدیده‌هایی با ابعاد سانتی‌متر را داراست [۷]. این ویژگی‌ها و توانایی‌های خاص تصاویر پهپاد، باعث گسترش روزافزون کاربرد آن در آماربرداری در سطوح مختلف جنگل شده است.

جدول ۱: مهم‌ترین روش‌های برداشت پارامترها برای محاسبه زیست‌توده

شیوه‌های کلی	روش‌های برداشت پارامترها	مزایا	معایب
روش‌های زمینی (میدانی)	فتوگرامتری زمینی روش‌های آماربرداری میدانی روش‌های قطع درختان	بسیار دقیق هستند عدم احتیاج به پردازش خاص عدم احتیاج به اعتبار سنجی داده‌ها	طاقت فرسا بودن کار احتمال خطرات جانی قابلیت انجام در محدوده کم بسیار زمان‌بر
روش‌های هوابرد	سنجنده‌های لایدار سنجنده‌های رادار	قابلیت انجام در محدوده متوسط دقت نسبتا خوب سرعت برداشت بالا	پردازش‌های سنگین در صورت استفاده از هواپیما متحمل هزینه زیاد است احتیاج به اعتبار سنجی داده‌ها
روش‌های فضابرد	استفاده از داده‌های ماهواره‌های مختلف لندست، اسپات و ...	قابلیت انجام در محدوده بزرگ سرعت برداشت بسیار بالا هزینه‌های بسیار پایین دسترسی به مکان‌های صعب‌العبور	پردازش نسبتا سنگین احتیاج به اعتبار سنجی داده‌ها دقت پایین

۱-۳- رهیافت‌های مختلف آماربرداری

به منظور برآورد و محاسبه ویژگی‌های ساختاری جنگل، رهیافت‌های مختلفی ارائه شده که آز آن جمله می‌توان به رهیافت تک‌درختی و رهیافت ترکیبی اشاره کرد. هر کدام از این راهکارها کاربردهای خاص خود را داشته و با توجه ساختار، تیپ جنگل و هدف آماربرداری، انتخاب می‌شود. به‌دلیل اینکه در رهیافت تک‌درخت باید موقعیت و ویژگی‌های ساختاری هر درخت به تنهایی از دیگر درختان تفکیک شده و برآورد گردد، در مقایسه با رهیافت ترکیبی، احتیاج به ابر نقاط متراکم دقیق‌تر است و تراکم آن به منظور پوشش و تشخیص بهتر تاج تک درختان، باید بالا باشد [۸]. از روش‌هایی که تک درختان موجود در عرصه را به صورت خودکار، به‌وسیله مدل ارتفاعی تاج (*CHM*[۱]) تشخیص داده و تفکیک می‌کند، می‌توان به الگوریتم *IWS*[۲] و بیشینه محلی[۳] اشاره کرد که هر کدام عملکرد الگوریتم‌های منحصر به‌فردی دارند. البته لازم به ذکر است که آشکارسازی تک درختان در مناطق با پوشش گیاهی تنک‌تر و درختان سوزنی برگ بهتر انجام می‌پذیرد. این روش‌ها معمولا در درختان پهن برگ، به دلیل اینکه نوک واحد ندارند کارآیی مطلوبی ندارند [۹]. رهیافت دیگری که یکی از راهکارهای آماربرداری در جنگل است، رهیافت ترکیبی است. در این شیوه ابتدا آشکارسازی و تفکیک تک‌درختان موجود در عرصه صورت گرفته و ویژگی‌های ساختاری آن‌ها برآورد می‌شود و به منظور برآورد و محاسبات هر قطعه نمونه، مشخصه‌های ساختاری تک درختان موجود در آن‌ها با یکدیگر جمع می‌شود. در این شیوه به منظور مدل‌سازی ویژگی‌های ساختاری هر قطعه نمونه، از

[1] *Crown Height Model*

[2] *Inverse Watershed Segmentation*

[3] *Local Maxima*

مجموع مشخصه‌های تک درختان موجود در آن‌ها استفاده می‌شود.

۱-۴- پیشینه پژوهش

در زمینه برآورد زیست توده روی زمین با استفاده از مشخصه‌های ارتفاعی مستخرج از تصاویر پهپاد، در خارج از کشور تاکنون مطالعاتی صورت گرفته است. در این زمینه می‌توان به پژوهشی که هرناندز و همکاران اشاره کرد *[۸]*. در این پژوهش؛ آنان به مدل‌سازی زیست توده روی زمین با استفاده از مشخصه‌های مستخرج از تصاویر چند زمانه پهپاد در سطح تک‌درخت پرداختند. در این پژوهش که در جنگل‌های سوزنی برگ انجام گرفت، ابتدا مشخصه‌های ساختاری ۵۰ درخت به‌صورت میدانی اندازه‌گیری شد؛ سپس با استفاده از ارتفاع به‌دست آمده از تصاویر پهپاد که در سال‌های ۲۰۱۵ و ۲۰۱۷ انجام گرفته بود، میزان زیست توده روی زمین تک درختان با مجذور میانگین مربعات خطا نسبی به‌ترتیب ۱۱٫۴۴ و ۱۲٫۵۹ برآورد شد. در پژوهش دیگری که لی و همکاران در سطح قطعه نمونه انجام دادند، به‌منظور مدل‌سازی میزان زیست توده روی زمین توده‌های ذرّت در سطح قطعه نمونه، از متریک‌های مستخرج از *CHM* تصاویر پهپاد استفاده نمودند *[۱۰]*. آن‌ها ابتدا به منظور برداشت ارتفاع توده‌های ذرّت، از هر قطعه نمونه، ارتفاع چهار بوته را با استفاده از متر نواری اندازه‌گیری کرده و سپس متوسط ارتفاع این بوته‌ها را به‌عنوان نماینده ارتفاع توده ثبت کردند. همچنین آن‌ها برای اندازه‌گیری میزان زیست توده روی زمین، دو تا سه پایه از بوته‌های ذرّت موجود در هر قطعه نمونه را برداشت و در آون خشک نمودند؛ سپس به منظور برآورد میزان زیست توده موجود در هر قطعه نمونه، وزن متوسط بوته‌های خشک شده هر قطعه نمونه را در تراکم آن ضرب کرده و زیست توده آن را برآورد کردند. برای اندازه‌گیری و برداشت داده‌های هوایی نیز از یک پهپاد عمود پرواز استفاده کرده و پارامترهای ارتفاعی هر قطعه نمونه را اندازه‌گیری نمودند. آن‌ها توانستند با مجذور میانگین مربعات خطا نسبی ۶٫۴۰ درصد زیست توده روی زمین را با استفاده از متریک‌های مستخرج از تصاویر پهپاد مدل‌سازی کنند. در زمینه برآورد زیست توده در عرصه‌های جنگلی با استفاده از شاخص‌های ساختاری مستخرج از تصاویر پهپاد نیز تحقیقاتی صورت گرفته است. در همین زمینه، کاچامبا و همکاران به بررسی میزان زیست توده روی زمین درختان جنگل‌های گرمسیری و مدل‌سازی آن‌ها پرداختند *[۱۱]*. در این پژوهش که در سطح قطعه نمونه صورت گرفت، آن‌ها توانستند با مشخصه‌های ارتفاعی استخراج شده از تصاویر پهپاد، با مجذور میانگین مربعات خطا نسبی ۴۶٫۷ درصد، زیست توده روی زمین هر قطعه نمونه را مدل‌سازی کنند. در تحقیق دیگری که پولیتی و همکاران انجام دادند، به بررسی و مدل‌سازی موجودی حجمی جنگل‌های بورآل در سطح قطعه نمونه با استفاده از تصاویر پهپاد پرداختند *[۱۲]*. در این پژوهش آن‌ها با استفاده از داده‌های لیزر اسکنر هوایی مدل رقومی سطح زمین (*DTM*[1]) را بازسازی کرده و به منظور ادامه فرآیند، از داده‌های حاصل از تصاویر پهپاد استفاده کردند. در این پژوهش آن‌ها توانستند با مجذور میانگین مربعات خطای نسبی ۱۴٫۹۵ درصد حجم توده را مدل‌سازی کنند. در پژوهشی که جینگ و همکاران به منظور برآورد میزان زیست توده روی سطح گیاهان هیدروفیت در سطح ترکیبی انجام دادند؛ آن‌ها ابتدا ۹۰ قطعه نمونه تصادفی با ابعاد ۲۰ در ۲۰ سانتیمتر طراحی کرده و سپس ارتفاع تمامی گیاهان موجود در آن‌ها را با استفاده از متر نواری اندازه‌گیری کردند؛ سپس به منظور برآورد مقدار دقیق زیست توده روی سطح، تمامی گیاهان موجود در قطعات نمونه را جمع‌آوری و در دستگاه آون خشک کردند و سپس جرم ماده خشک آن را اندازه‌گیری نمودند. برای اندازه‌گیری ارتفاع و مدل‌سازی میزان زیست توده روی سطح، با استفاده از *CHM* مستخرج از تصاویر پهپاد

[1] *Digital Terrain Model*

[DOI: 10.29252/jgit.7.3.213]

عمود پرواز، ارتفاع گیاهان موجود در قطعات نمونه را اندازه‌گیری و سپس میزان زیست توده روی سطح آن را با مجذور میانگین مربعات خطا نسبی ۷٫۱۳ درصد مدل‌سازی کردند[۱۳].

۱-۵- اهمیت پژوهش

آماربرداری میدانی به‌منظور مدل‌سازی و برآورد میزان زیست توده روی زمین درختان در سطوح بزرگ، کاری طاقت فرسا است که در برخی مواقع باعث بروز بی‌دقتی در آماربرداری شده و صحت و دقت نتایج را تحت تاثیر قرار می‌دهد. روش‌های سنتی آماربرداری که امروزه هم-چنان در برخی کشورها مانند ایران مرسوم است، باعث صرف هزینه و زمان زیادی می‌شود[۱۴]. همچنین در برخی موارد به دلیل صعب العبور بودن مناطق جنگلی، آماربرداری میدانی باعث ایجاد خطرات جانی می‌شود و به دلیل آنکه این مناطق دور از دسترس بوده و حضور اکیپ آماربرداری در آنجا با سختی زیادی همراه است، فاقد داده‌های مورد نیاز هستند [۱۵]. با توجه به مشکلات و سختی‌هایی که آماربرداری میدانی دارد، خلا تجهیزاتی که بتواند انسان‌ها را در این زمینه یاری بنماید احساس می‌شود. از طرف دیگر، استفاده از روش‌های هوابرد مانند سنجنده‌های لایدار و رادار و غیره در صورتی‌که توسط هواپیما حمل شوند، متحمل هزینه‌های بسیار بالا هستند. همچنین به دلیل دقت پایین سایر روش‌ها مانند استفاده از داده‌های ماهواره‌ای باعث شده تا جایگاه استفاده از یک سنجنده با میزان سرعت برداشت و دقت بالا حس شود. پهپادها با توانایی‌ها و ویژگی‌هایی که دارند می‌توانند به عنوان یک مکمل، گروه‌های آماربرداری را در مکان‌های صعب-العبور یاری نموده و بعضی از پارامترهای مورد نظر در آماربرداری جنگل را برداشت نمایند که البته در این زمینه در مورد راستی‌آزمایی داده‌های برداشت شده باید جوانب احتیاط رعایت شود. همچنین این پرنده‌ها با سرعت و دقتی که در برداشت داده‌ها دارند، ممکن است در زمان آماربرداری صرفه‌جویی نموده و هزینه‌ها را کاهش دهند.

در پژوهش حاضر که در پارک جنگلی سیسنگان صورت گرفت، با استفاده از آماربرداری میدانی ابتدا مشخصه‌های ساختاری درختان ثبت شد. سپس زیست توده روی زمین درختان در سه سطح تک‌درخت، قطعه نمونه و ترکیبی با استفاده از اطلاعات به دست آمده از ارتفاع مستخرج از تصاویر پهپاد، مدل‌سازی شد.

۲- مواد و روش‌ها:

در ادامه مواد و روش‌ها تشریح شده است.

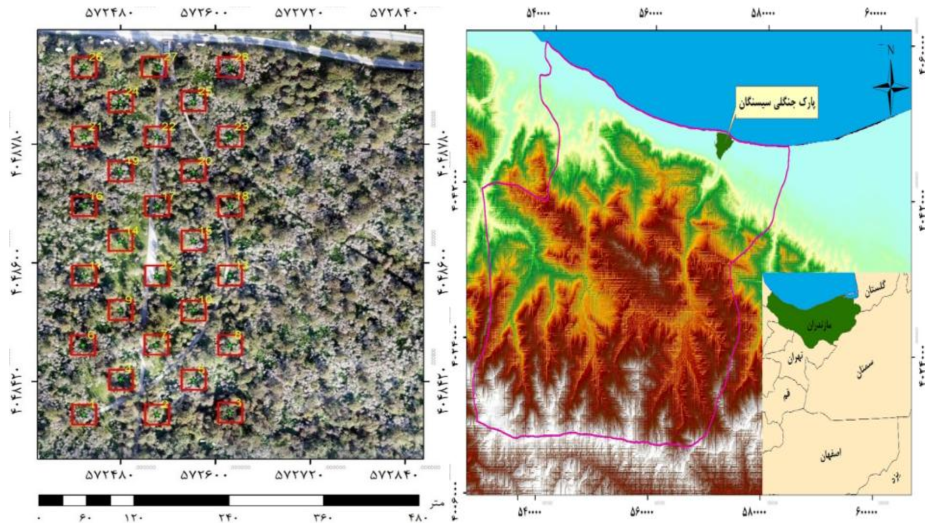
۲-۱- منطقه مورد مطالعه

پارک جنگلی سیسنگان در کرانه جنوبی دریای خزر و در ۳۰ کیلومتری شرق شهرستان نوشهر و در عرض جغرافیایی ۳۶ درجه و ۳۳ دقیقه و ۳۰ ثانیه تا ۳۶ درجه و ۳۵ دقیقه و ۳۰ ثانیه شمالی و طول جغرافیایی ۵۱ درجه و ۴۷ دقیقه ۰۰ثانیه تا ۵۱ درجه و ۴۹ دقیقه و ۳۰ ثانیه شرقی واقع شده است (شکل (۱)).

سیسنگان از مناطق جنگلی جلگه‌ای کشور بوده و ارتفاعی بین ۲۸- تا ۱۲۵ متر از سطح آب‌های آزاد قرار دارد و بیشترین شیب ثبت شده در محدوده مورد مطالعه ۴ درصد است. از نظر اقلیمی، پارک جنگلی سیسنگان با توجه به اقلیم‌نمای آمبرژه، جزء مناطق خیلی مرطوب با زمستان های ملایم و تراکم درختان در این منطقه به طور متوسط ۳۵۸ پایه در هکتار است. این منطقه علاوه بر ایفای نقش توریستی و تفریحی، حفظ و حراست از برخی گونه‌های نادر و حفاظت شده را برعهده دارد. از جمله مهم‌ترین این گونه‌ها می‌توان به شمشاد[۱]، انجیلی[۲] و ممرز[۳] اشاره کرد. گونه‌های موجود در این پارک شامل برخی از گونه‌های شاخص جنگل‌های هیرکانی است. بیشترین مساحت از عرصه تفریحی این پارک را پایه‌های شمشاد پوشانده است؛ اما متاسفانه به دلیل بیماری، پایه‌های موجود در این پارک تبدیل به خشکه‌دار شده‌اند.

[1] *Buxus hyrcana*
[2] *Parrotia persica*
[3] *Carpinus betulus*

[DOI: 10.29252/jgit.7.3.213]



شکل ۱: منطقه مورد مطالعه، پارک جنگلی سیسنگان

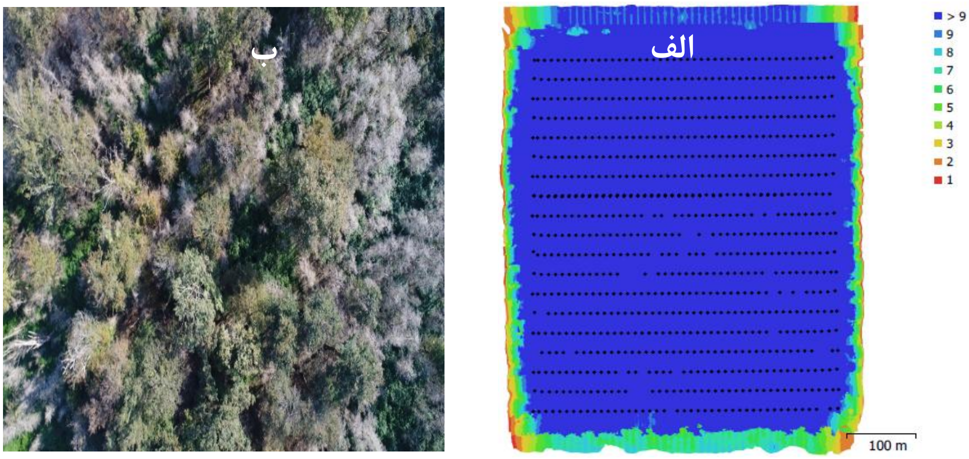
۲-۲- تصویر برداری هوایی

در این مطالعه به‌منظور برداشت تصاویر هوایی از یک پهپاد مدل فانتوم ۴ پرو استفاده شد. این پهپاد از نوع پرنده‌های عمود پرواز است. وزن این وسیله ۱۳۸۰ گرم است و دوربینی با قابلیت ثبت عکس‌های ۲۰ مگاپیکسلی را با خود حمل می‌کند. ابعاد هرکدام از تصاویر برداشت شده توسط این سنجنده، ۵۴۷۲×۳۶۴۸ پیکسل می‌باشد. نمونه‌ای از تصویر خام برداشت شده توسط این سنجنده در شکل (۲- ب) نشان داده شده است. به دلیل اینکه این دوربین بر روی یک لرزش‌گیر بسیار قوی سه‌محوره نصب شده است، هیچ‌گونه لرزش و اعوجاجی در تصاویر دیده نمی‌شود. مسیر پروازی پهپاد و مکان‌هایی که باید تصویربرداری صورت گیرد، قبل از انجام پرواز مشخص شد. این کار از طریق نرم‌افزار رابط کاربری پهپاد *DJI GS Pro* انجام شد. این نرم‌افزار که برروی سیستم عامل آی او اس قابلیت مدیریت پرواز ایمن‌تری دارد، مسیرهای پروازی را به صورت خودکار و به شکل خطوط رفت و برگشت و با توجه به پارامترهای مورد نیاز کاربر طراحی می‌کند.

مسیر پروازی طراحی شده به‌وسیله نرم‌افزار که بهینه‌ترین حالت آن است، به خلبان خودکار[1] پرنده ارسال شد و عملیات برداشت به صورت اتوماتیک صورت گرفت. در محدوده انتخاب شده در مجموع ۸۵۴ تصویر برداشت شد. ارتفاع پرواز ۱۰۰ متر و فاصله نمونه‌برداری (*GSD*[2]) زمینی ۲/۶۳ سانتی‌متر بود. مساحت تصویر برداری نیز ۳۴/۵ هکتار محاسبه شد. برداشت تصاویر در تاریخ چهارشنبه ۸ آذر ماه ۱۳۹۶، ساعت ۱۰ صبح انجام شد. مدت زمان برداشت از کل منطقه ۴۵ دقیقه به‌طول انجامید. همچنین به‌منظور ساخت مدل سه‌بعدی دقیق و اطمینان از پوشش کل منطقه مورد مطالعه، میزان هم‌پوشانی تصاویر ۹۰ درصد طولی و ۸۰ درصد عرضی تنظیم شد. چنانکه در شکل (۲- الف) دیده می شود، هم‌پوشانی مناسب موجب شده است که در بخش اصلی محدوده مورد مطالعه پوشش عالی ایجاد شده و در هر موقعیت، حداقل بیش از ۹ تصویر دیده شود.

[1] *Autopilot*
[2] *Ground Sample Distance*

[DOI: 10.29252/jgit.7.3.213]



شکل ۲: الف: میزان هم‌پوشانی تصاویر برداشت شده نسبت به مراکز تصویربرداری ب: تصویر خام برداشت شده توسط سنجنده پهپاد فانتوم ۴ پرو

۲-۳- پردازش تصاویر و استخراج مدل رقومی سطح

در طول تصویربرداری هوایی، موقعیت جغرافیایی هر تصویر توسط سامانه تعیین موقعیت داخلی پهپاد ثبت شد و به تصاویر الحاق می‌شود. پس از انتقال تصاویر به رایانه، پردازش‌های مختلف به منظور ایجاد مدل رقومی سطح (*DSM*[1]) و اورتوموزاییک به‌وسیله نرم‌افزار اجی‌ای‌سافت فتواسکن[2] بر روی تصاویر صورت گرفت. پس از مرتب شدن تصاویر در کنار یکدیگر، با استفاده از الگوریتم *SFM*، ابر متراکم نقاط منطقه مورد مطالعه که در واقع همان *DSM* است ایجاد می‌شود (شکل(۳)). خروجی نهایی این فرآیند، یک ساختار سه‌بعدی است که اطلاعاتی در مورد موقعیت‌های نسبی دوربین و فاصله‌های نسبی بین دوربین و شی نیز ارائه می‌دهد. در نهایت با استفاده از ابر نقاط متراکم، اورتوموزاییک عکس‌ها تشکیل شد که میزان دقت آن ۱۸/۴۱ سانتیمتر برآورد شد.

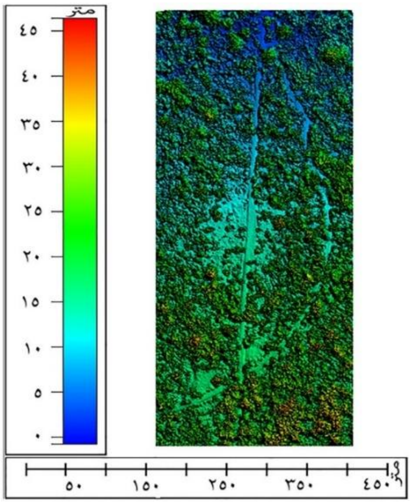
۲-۴- استخراج *DTM* و *CHM*:

به‌منظور برآورد دقیق ارتفاع عارضه‌ها و پدیده‌های موجود در منطقه مورد مطالعه، محل قرارگیری و یا محل رویش پدیده باید مشخص شود. عارضه‌ی مورد مطالعه در این پژوهش ارتفاع درختان بود. محل رویش درختان سطح زمین است و برای اندازه‌گیری دقیق ارتفاع آن‌ها باید *DTM* بازسازی شود. در این پژوهش به منظور ساخت *DTM*، با استفاده از فیلتر ابر نقاط با یک پنجره ۲ متری با شرط حداکثر تغییرات ۷/۵ درجه برای عرصه، نقاط مربوط به زمین جدا شدند. ابر نقاط حاصل شده با میزان تفکیک مکانی ۳۰ سانتی‌متر در هر پیکسل به فایل رستری تبدیل شد. در فایل رستری ایجاد شده، قسمت‌هایی از زمین که در زیر تاج پوشش قرار داشته و فاقد داده بودند، با استفاده از روش *IDW*[3] درونیابی شدند و در نهایت *DTM* ساخته شد، شکل (۴-الف). دلیل استفاده از روش *IDW* به این دلیل بود که از آن به منظور درونیابی داده‌هایی استفاده می‌شود که بیشتر حالت محلی[4] دارند و چون منطقه مورد مطالعه این پژوهش نیز بسیار پهناور نبود، لزومی بر استفاده از روش‌های دیگر درونیابی نبود. همچنین با توجه به اینکه روش درونیابی *IDW* برای برآورد مقدار داده نقاط مجهول از نقاط معلوم نزدیک‌تر استفاده می‌کند و نقاط فاقد داده این پژوهش نیز که نقاط ارتفاعی بودند، هر کدام از آن‌ها توسط چند نقطه ارتفاعی مجاور و نزدیک به هم باید درونیابی می‌شدند. به منظور برآورد ارتفاع

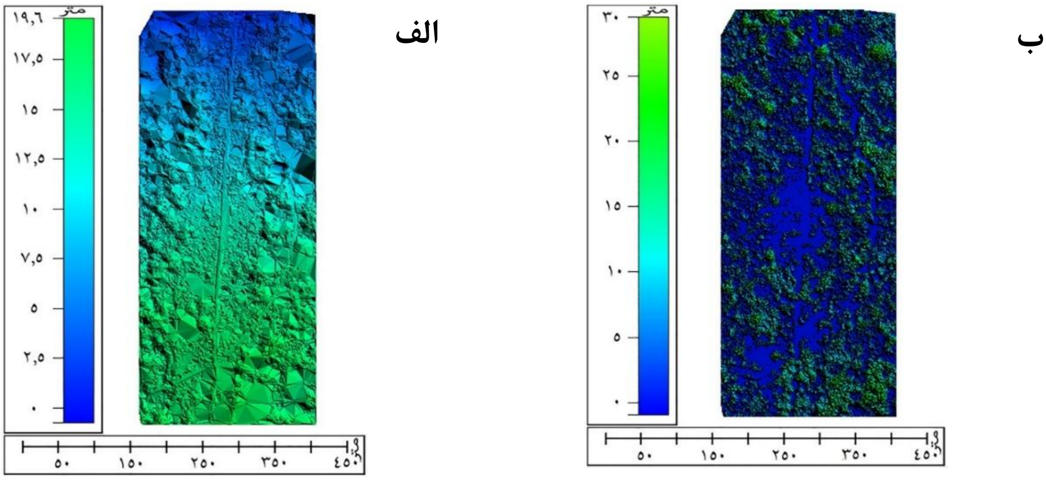
[1] *Digital Surface Model*
[2] *Agisoft PhotoScan*
[3] *Inverse Distance Weight*
[4] *Local*

[DOI: 10.29252/jgit.7.3.213]

دقیق درختان لازم بود که *CHM* نیـز بازسـازی شـود. *CHM* فایلی رستری یا ابـر متـراکم نقـاطی اسـت کـه مقدار هر پیکسل یا نقطه آن، نماینده ارتفاعی آن نقطه اسـت. ایـن لایـه از تفاضـل لایـه‌هـای *DSM* و *DTM* حاصـــــل مـــــی‌شـــــود (شـــــکل (۴-ب)).



شکل۳: مدل رقومی سطح (*DSM*)



شکل۴: الف: مدل رقومی سطح زمین (*DTM*)**، ب: مدل ارتفاعی تاج** (*CHM*)

[DOI: 10.29252/jgit.7.3.213]

۲-۵- شیوه نمونه‌برداری میدانی

نمونه‌برداری درختان در منطقه مطالعاتی، با ۲۸ قطعه نمونه که با فواصل منظم از یکدیگر و با ابعاد ۳۰ در ۳۰ متر با استفاده از اورتوموزاییک تصاویر پهپاد طراحی شد. به‌منظور پیاده‌سازی در عرصه، هر کدام از قطعات نمونه به‌صورت جداگانه بر روی کاغذ چاپ شد. به دلیل تفکیک مکانی بسیار بالای اورتوموزاییک (*Cm* ۲٫۶۳ *GSD*) چاپ شده، جانمایی قطعات در عرصه آسان بود. برای جانمایی، ابتدا مراکز حدودی آن‌ها با استفاده از *GPS* دستی مشخص شد. همچنین به‌منظور تعیین موقعیت دقیق مراکز قطعات، از اورتوموزاییک چاپ شده بر روی کاغذ که موقعیت تاج درختان و موقعیت مکانی هرکدام از آن‌ها واضح و مشخص بود، استفاده شد. ابعاد قطعات نیز با استفاده از متر نواری و طناب، اندازه‌گیری و پیاده‌سازی شد. در قطعات نمونه آماربرداری شده جمعا ۹۰۴ پایه برداشت شد که به‌طور متوسط در هرکدام از آن‌ها ۳۲ پایه قرار گرفت. برای اندازه‌گیری ارتفاع درختان موجود در قطعات نمونه لازم بود شیب نوک و بن درختان و همچنین فاصله تا درخت برداشت شود که برای اندازه‌گیری شیب از شیب‌سنج سونتو و برای اندازه‌گیری فاصله تا درخت از متر لیزری استفاده شد. برای اندازه‌گیری قطر برابر سینه نیز از خط‌کش دو بازو استفاده شد. پس از ثبت اطلاعات هر درخت، نقاط مربوط به نوک آن‌ها بر روی اورتوموزاییک مشخص شد. پس از نمونه‌برداری، به منظور اندازه‌گیری دقیق‌تر ارتفاع درختان، ابتدا نقاط متناظر با نوک آن‌ها بر روی ابر نقاط سه‌بعدی مشخص شد و سپس نقاط مشخص شده مربوط به نوک درختان بر روی *CHM* پیاده سازی گردید و ارتفاع هر کدام از آن‌ها استخراج شد. لازم به ذکر است که این کار باعث ایجاد محدودیت‌ها و اتلاف زمان می‌شود و می‌تواند خطا ایجاد کند که پیشنهاد می‌شود برای جلوگیری از آن، نقاط مربوط به مراکز درختان با استفاده از *GPS* ژئودتیک برداشت شود تا مستقیما بر روی *CHM* پیاده‌سازی شده و ارتفاع اندازه‌گیری شود.

۲-۶- محاسبه مقدار واقعی و برآورد زیست توده روی زمین

به‌منظور محاسبه مقدار زیست توده تک‌درختان از رابطه آلومتریک عمومی زیست توده استفاده شد.

۲-۶-۱- برآورد مقدار زیست توده در سطح تک درخت

رابطه آلومتریک عمومی زیست توده (رابطه (۱)) از قطر برابر سینه درختان برای محاسبه مقدار زیست توده روی زمین استفاده می‌کند.

$$AGB = 0.3DBH^{2.33} \qquad \text{رابطه}(۱)$$

که در آن، *AGB* زیست‌توده روی زمین درخت و *DBH* قطر برابر سینه درخت است. برای برآورد زیست توده با استفاده از *CHM*، ارتفاع متناظر با مرکز درخت استخراج شد. پس از استخراج ارتفاع، مقدار آن با ارتفاع حقیقی برداشت شده در آماربرداری میدانی مقایسه شد. در نهایت به‌منظور پردازش مدل مناسب، مقدار زیست توده واقعی به‌عنوان متغیر وابسته و مقدار ارتفاع برآورد شده به عنوان متغیر مستقل برازش یافت.

۲-۶-۲- برآورد مقدار زیست توده در سطح قطعه نمونه

برای مدل‌سازی زیست توده درختان در رهیافت قطعه نمونه، ابتدا مجموع زیست توده واقعی تک‌درختان موجود در هر قطعه نمونه به‌عنوان زیست توده آن قطعه محاسبه شد؛ سپس با استفاده از *CHM*، مشخصه‌های ارتفاعی درختان هر قطعه نمونه استخراج شد. برای مدل‌سازی، مقدار واقعی زیست توده موجود در قطعه نمونه به‌عنوان متغیر وابسته و شاخص‌های ارتفاعی به‌عنوان متغیر مستقل مدل‌سازی شدند. در این سطح، فقط رابطه بین شاخص‌های ارتفاعی (چارک‌ها، دهک‌ها، صدک‌ها و دامنه تغییرات ارتفاعی) مستخرج از ابر نقاط حاصل از تصاویر پهپاد و مقدار زیست توده واقعی بررسی و مدل‌سازی شد. لازم به ذکر است که در این سطح به‌منظور مدل‌سازی میزان زیست توده روی زمین

[DOI: 10.29252/jgit.7.3.213]

درختـان بـا اسـتفاده از داده‌هـای مسـتخرج از تصـاویر پهپاد، می‌توان از قطر تاج درختان نیز استفاده نمود.

۲-۶-۳- برآورد مقـدار زیسـت تـوده در سـطح ترکیبی

برای مدل‌سازی در این سطح ابتدا مقدار زیست توده بـا استفاده از مدلی که در سطح قطعه نمونه برازش یافتـه بود، برآورد شـد. همچنـین بـه‌منظـور محاسـبه مقـدار زیست توده واقعی، از مجموع زیست توده مشاهده شده تک درختان موجود در هر قطعـه نمونـه اسـتفاده شـد. سپس برای مدل‌سـازی و بـرآورد زیسـت تـوده در ایـن سطح، مقدار مجموع زیست توده تک‌درختان هر قطعـه نمونه که در سطح تک‌درخت برآورد شده بود بـه‌عنـوان متغیر وابسته و مقدار برآورد شـده آن در سـطح قطعـه نمونه به‌عنوان متغیر مستقل مدل‌سازی شدند.

فرآیند مدل‌سازی زیست توده در هـر سـه سـطح ذکـر شده در شکل (۵) نشان داده شده است.

۲-۷- روش ارزیابی نتایج

برای بررسی صحت و دقـت بـرآورد ارتفـاع درختـان، از جذر میانگین مربعات خطای نسبی (رابطه (۲))، اریبـی نسبی (رابطه (۳)) و ضریب تبیین تطابق یافته اسـتفاده شد. مدل‌های رگرسیونی براساس ۷۵ درصد مشـاهدات برازش یافت و ۲۵ درصد دیگر برای محاسـبه صـحت و دقت مدل‌ها مورد استفاده قـرار گرفـت. در ایـن روابـط $RMSE$ جذر میانگین مربعات خطـا، $Bias$ اریبـی، و $\bar{y}$ میانگین مقادیر واقعی متغیر وابسته است.

$$RMSE_r\% = \frac{RMSE}{\bar{y}} \times 100 \qquad \text{(۲)رابطه}$$

$$Bias_r = \frac{Bias}{\bar{y}} \times 100 \qquad \text{(۳)رابطه}$$

۳- نتایج و بحث

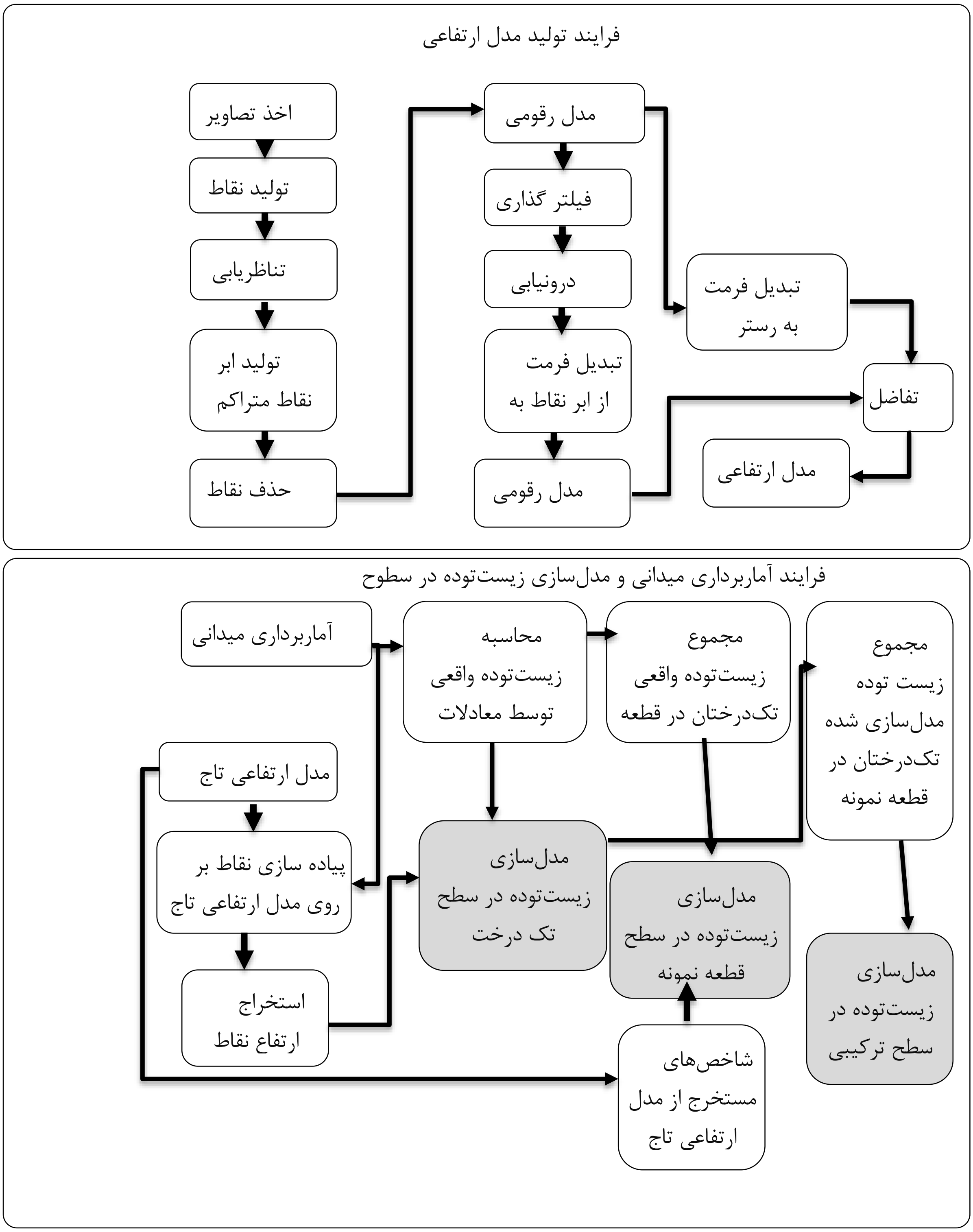
در ادامه هر مورد به تفصیل شرح داده شده است.

۳-۱- نتایج مدل‌سازی ارتفاع درختان:

در این پـژوهش بـه‌منظـور مـدل‌سـازی میـزان ارتفـاع مسـتخرج از CHM و ارتفـاع برداشـت شـده زمینـی و بررسی رابطه بین آن‌ها، ابتدا ایـن دو از نظـر آمـاری بـا یکـدیگر مقایسـه شـدند کـه در شـکل (۶) نتـایج ایـن مقایسه نشان داده شده است. نتایج نشان مـی‌دهـد کـه ارتفاع به دست آمده از داده‌های زمینی همواره بیشتر از ارتفاع محاسبه شده بر اساس CHM است.

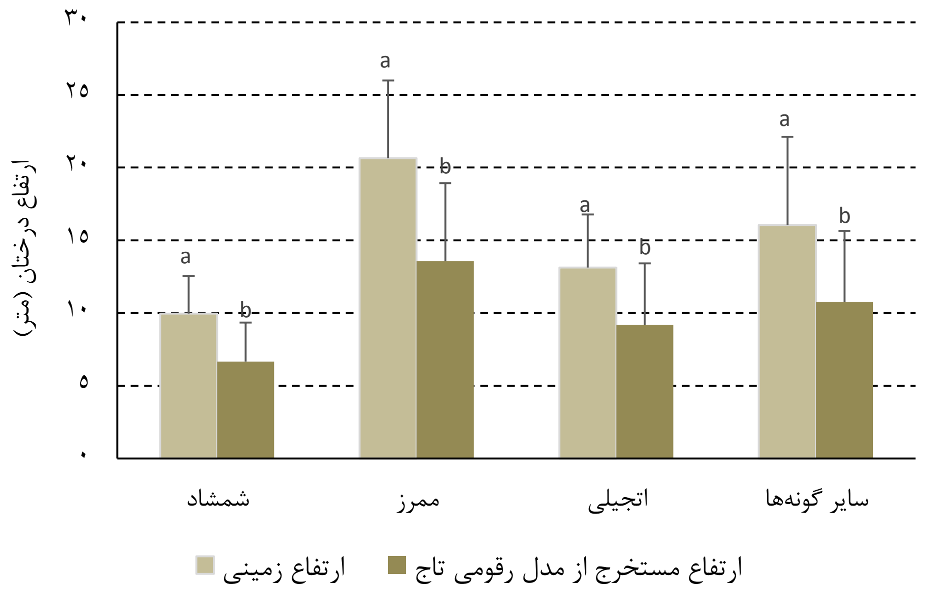
پس از بررسی آماری و وجود رابطه بین ارتفاع برداشـت شده زمین و ارتفاع مستخرج از CHM، رابطه بین آن‌ها مدل‌سازی شد. نتایج ارزیابی و اعتبارسنجی مـدل‌هـای رگرسیونی برازش یافته در جدول (۲) ذکر شده است.

[DOI: 10.29252/jgit.7.3.213]



شکل ۵: فرآیند تولید مدل ارتفاعی تاج درختان و مدل‌سازی زیست توده در سطوح مختلف

[DOI: 10.29252/jgit.7.3.213]



شکل ۶: مقایسه ارتفاع برداشت شده زمینی و ارتفاع مستخرج از *CHM*، اعداد متفاوت بر روی دو ستون مجاور نشان‌دهنده اختلاف آماری معنی‌دار در سطح ۹۵ درصد اطمینان است.

جدول ۲: ارزیابی مدل‌سازی ارتفاع زمینی و ارتفاع مستخرج از *CHM*

گونه‌ها	مجذور میانگین مربعات خطا	مجذور میانگین مربعات خطا نسبی	اریبی	اریبی نسبی
شمشاد	۲/۰۵	۲۰/۳۹	۰/۰۲	۰/۱۸
ممرز	۴/۱۸	۲۰/۳۹	۱/۹۱	۹/۳۱
انجیلی	۲/۸۹	۲۰/۵۷	۱/۱۱	۷/۹۰
سایر گونه‌ها	۴/۲۱	۲۹/۵۲	۰/۸۵	۵/۹۵

۳-۲- نتایج مدل‌سازی زیست توده روی زمین در سطح تک درخت

نتایج ارزیابی مدل‌سازی و برآورد میزان زیست توده روی زمین تک درختان با استفاده از ارتفاع مستخرج از *CHM* در جدول (۳) ذکر شده است. برای تمام گونه‌ها مقدار اریبی برآورد کمتر از ۴ درصد و قابل اغماض است. بیشترین مجذور میانگین مربعات خطا نسبی برآورد زیست توده مربوطه به گروه سایر گونه‌ها با مقدار ۲۲/۷۳ درصد بود. پس از آن به ترتیب شمشاد (۱۷/۵۶) و انجیلی (۱۴/۶۷) و کمترین مقدار متعلق به ممرز (۷/۱۱) است.

متغیری که از داده‌های سه بعدی پهپاد در مورد درختان در این تحقیق استخراج شد، ارتفاع توده بود. در حالیکه برآورد زیست توده بر مبنای قطر برابر سینه است و ارتباط قطر برابر سینه و ارتفاع درختان به دلیل اثر ویژگی‌های ژنتیکی درختان و نیز شرایط محیطی به شدت متغیر بوده و خود یکی از عدم قطعیت‌هایی است که در نتایج برآوردها وارد می‌شود. به همین سبب وجود مقادیر بالای میانگین مربعات خطا برای برآورد زیست توده قابل انتظار است.

از طرف دیگر به توجه به معماری درخت، ممرز شکل استانداردتری داشته و انتظار می‌رود که ارتباط قطر و

[DOI: 10.29252/jgit.7.3.213]

ارتفاع این گونه بیشتر از دیگر گونه‌های مورد بررسی باشد. چنانکه ملاحظه می‌شود میزان مجذور میانگین مربعات خطای برآورد زیست توده برای این گونه کمتر از دیگر گونه‌های مورد برررسی است. دیگر آنکه، قراردادن گونه‌های مختلف در یک گروه (به سبب شمار اندک این گونه‌ها برای تحلیل) اثر ناهمگنی ارتباط قطر و ارتفاع درخت را در دقت برآوردها به خوبی دخیل نموده است و درصد مجذور مربعات خطای براورد زیست توده برای این گروه حداکثر است.

جدول ۳: ارزیابی مدل‌سازی مقدار زیست توده در سطح تک درخت

گونه‌ها	مجذور میانگین مربعات خطا	مجذور میانگین مربعات خطا نسبی	اریبی	اریبی نسبی
شمشاد	۰/۳۳	۱۷/۵۶	۰/۰۰	۰/۰۸
ممرز	۰/۲۴	۷/۱۱	۰/۱۳	۳/۸۷
انجیلی	۰/۴۰	۱۴/۶۷	-۰/۰۳	-۱/۰۶
سایر گونه‌ها	۰/۵۴	۲۲/۷۳	-۰/۲۶	-۱۰/۷۶
کل گونه‌ها	۰/۳۸	۱۴/۸۴	-۰/۰۵	-۲/۷۲

۳-۳- نتایج مدل‌سازی زیست توده روی زمین در سطح قطعه نمونه

به‌منظور مدل‌سازی زیست توده روی زمین موجود در قطعات نمونه، مجموع زیست توده تک درختان هر قطعه نمونه با استفاده از مشخصه‌های ارتفاعی مستخرج از *CHM* همان قطعه نمونه مدل‌سازی شد. نتایج تحلیل رگرسیون چند متغیره گام به گام در جدول (۴) ذکر شده است. بر اساس نتایج، بهترین مدل با استفاده از متغیرهای دامنه تغییرات مقادیر مدل ارتفاعی تاج در قطعه نمونه و دهک‌های اول، هشتم و نهم به‌دست‌آمد. نتایج تجزیه واریانس مدل رگرسیونی به‌دست آمده، در جدول (۵) گزارش شده است. بر اساس این نتایج، معادله استخراج شده از نظر آماری معنی‌دار است.

ضریب تبیین تطابق یافته مدل رگرسیونی چندمتغیره براساس متغیرهای ذکر شده در جدول (۶)، برابر با ۰/۵۸ و درصد میانگین مربعات خطا ۵۸ درصد بود.

جدول ۴: ضرایب برآورد شده مدل برازش یافته میزان زیست توده در سطح قطعه نمونه

متغیرهای وارد شده در مدل	ضریب	خطای استاندارد	آماره *t*	*p-value*
عرض از مبدا	۳۲۹/۷۰	۸۹/۶۶	۳/۶۸	۰/۰۰۱۲
دامنه	-۲۴/۲۹	۹/۲۶	-۲/۶۲	۰/۰۱۵۳
دهک اول	۹۲/۶۶	۱۸/۱۹	۵/۰۹	<۰/۰۰۰۱
دهک هشتم	-۸۴/۹۸	۳۰/۸۹	-۲/۷۵	۰/۰۱۱۴
دهک نهم	۸۹/۹۰	۳۵/۷۳	۲/۵۲	۰/۰۱۹۳

[DOI: 10.29252/jgit.7.3.213]

جدول ۵ تجزیه واریانس مدل برازش یافته میزان زیست توده در سطح قطعه نمونه

منبع تغییرات	درجه آزادی	مجموع مربعات	میانگین مربعات	آماره F	*p-value*
مدل	۴	۳۵۴۰۷۲/۵۱	۸۸۵۱۸/۱	۷/۸۳۸۷	۰/۰۰۰۴
خطا	۲۳	۲۵۹۷۲۷/۴۸	۱۱۲۹۲/۵		
مجموع	۲۷	۶۷۳۷۹۹/۹۹			

جدول ۶: ارزیابی مدل‌سازی مقدار زیست توده در سطح قطعه نمونه

معیار ارزیابی	مقادیر
ضریب تبیین	۰/۵۷۶۸
ضریب تبیین تطابق یافته	۰/۵۰۳۲
مجذور میانگین مربعات خطا	۱۰۶/۲۶
مجذور میانگین مربعات خطا نسبی	۵۸
میانگین	۱۸۱/۷۱
تعداد مشاهدات (قطعات نمونه)	۲۸

با توجه به مطالعات متعددی که در این زمینه صورت گرفته است، عوامل کاهش دقت مدل را می‌توان در موارد مختلفی جست‌وجو کرد. ساختار و نوع جنگل یکی از عوامل بسیار مهمی است که در میزان دقت مدل موثر می‌باشد. در همین زمینه، مطالعه‌ای که کاچامبا و همکاران در جنگل‌های گرمسیری با تراکم پایین انجام دادند، با استفاده از بیشینه ارتفاع مستخرج از *CHM*، میزان زیست توده را مدل‌سازی کردند[۱۱]. میزان مجذور میانگین مربعات خطا نسبی این پژوهش در مقایسه با پژوهش حاضر کمتر بود. از جمله مواردی که ممکن است باعث بهبود نتایج آن‌ها نسبت به این پژوهش شود، می‌توان به تنک‌تر بودن منطقه حاضر نسبت به منطقه مورد مطالعه و همچنین تفاوت در ساختار جنگل‌ها اشاره کرد.

بازسازی *DTM*، به‌منظور ساخت *CHM* دقیق نیز از مهم‌ترین عوامل تاثیرگذار بر روی نتایج است. هرچقدر این مدل دقیق‌تر باشد نتایج حاصل از استخراج ارتفاع و مدل‌سازی زیست توده دقیق‌تر صورت می‌گیرد. روش‌های بازسازی *DTM* با توجه به نوع منطقه مورد مطالعه انتخاب می‌شود؛ هر چقدر منطقه تنک‌تر باشد، روش‌های نمونه‌گیری بصری به منظور ساخت *DTM* نتایج بهتری را از خود نشان می‌دهند. پولیتی و همکاران مطالعه‌ای در منطقه بورآل به‌منظور برآورد موجودی حجمی و دیگر مشخصه‌های ساختاری درختان انجام دادند. در این پژوهش آن‌ها توانستند با مجذور میانگین مربعات خطا نسبی ۱۴/۹۵ درصد، موجودی حجم را برآورد نمایند *[۱۲]*. از مهم‌ترین تفاوت‌های پژوهش آن‌ها نسبت به تحقیق حاضر می‌توان به مواردی مانند سوزنی‌برگ بودن درختان منطقه مورد مطالعه و همچنین ساخت *DTM* با استفاده از داده‌های لایدار اشاره کرد. درختان سوزنی برگ به‌دلیل تاج متقارن و نوک واحدی که دارند راحت و به‌آسانی قابل آشکارسازی و اندازه‌گیری ارتفاع هستند که این مسأله می‌تواند یکی از عوامل بهبود نتایج آن‌ها باشد. همچنین استفاده از داده‌های لایدار نیز با دقتی که نسبت به سنجنده‌های اپتیکال در آشکارسازی سطح زمین دارند، در امر بهبود نتایج موثر است. همچنین در تحقیقی که گوباکن و همکاران انجام دادند، بر دقت

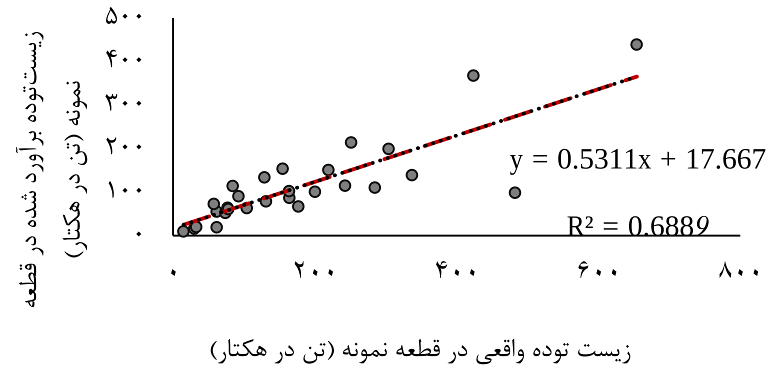
[DOI: 10.29252/jgit.7.3.213]

بیشتر سنجنده‌های لایدار نسبت به سنجنده‌های اپتیکال تاکید کردند[۱۷].

از طرف دیگر، ابعاد قطعه نمونه برداشت شده در آماربرداری زمینی مواردی است که باید با توجه به برخی از اهداف آماربرداری و شرایط منطقه انتخاب شود. توجه به این نکات در آماربرداری زمینی در نتایج مدل‌سازی در سطح قطعه نمونه می‌تواند بسیار موثر باشد. کاچامبا و همکاران در تحقیق خود به این نکته اشاره کردند [۱۱].

۳-۴- نتایج مدل‌سازی زیست توده روی زمین در سطح ترکیبی

برآورد مشخصه‌های ساختاری با استفاده از روش ترکیبی یکی از جدیدترین رهیافت‌ها در زمینه مدل‌سازی است. این رهیافت در واقع ترکیبی از دو روش قبل (سطح تک‌درخت و سطح قطعه نمونه) است. همانطور که از شکل ۷ مشخص است، در این شیوه مجموع مقادیر زیست توده تک‌درختان موجود در هر قطعه نمونه به‌عنوان متغیر وابسته و مقدار زیست توده برآورد شده با استفاده از متریک‌های مستخرج از *CHM* هر قطعه نمونه، به‌عنوان متغیر مستقل مدل‌سازی و میزان همبستگی این مدل ۰/۶۸ محاسبه شد. نتایج ارزیابی ضرایب معادله رگرسیونی حاکی از معنی‌دار نبودن عرض از مبدا است که به سبب همسان بودن متغیرهای مورد مدل‌سازی کاملا قابل انتظار و تاییدکننده صحت مدل‌سازی است (جدول (۷)).



شکل ۷: نمودار زیست توده اندازه‌گیری شده در مقابل زیست توده برآورد شده در سطح قطعه نمونه

جدول ۷: ضرایب برآورد شده مدل برازش یافته میزان زیست توده در سطح ترکیبی

متغیرها	مقدار برآورد شده	خطای استاندارد	آماره*t*	*p-value*
عرض از مبدا	۳۳/۶۰۴	۲۵/۳۶	۱/۳۳	۰/۱۹۶۷
زیست توده برآورد شده	۱/۲۹۷	۰/۱۷	۷/۵۹	۰/۰۰۰۱

نتایج تجزیه واریانس معادله استخراج شده نشان‌دهنده معنی‌دار بودن این معادله با ۹۹ درصد اطمینان است، (جدول (۸)). ضریب تبیین مدل برازش یافته ۰/۶۹ و مجذور میانگین مربعات خطا ۴۷ درصد بود، (جدول(۹))، که در مقایسه با روش قطعه نمونه، این مدل برتری دارد. مقایسه کلی این موارد حاکی از بهتر بودن نتایج در رهیافت ترکیبی است.

[DOI: 10.29252/jgit.7.3.213]

جدول ۸: تجزیه واریانس ضرایب مدل برازش یافته میزان زیست توده در سطح ترکیبی

منبع تغییرات	درجه آزادی	مجموع مربعات	میانگین مربعات	آماره F	*p-value*
مدل	۱	۴۲۲۸۶۷/۹۷	۴۲۲۸۶۸	۵۷/۵۸۳۷	<۰/۰۰۰۱
خطا	۲۶	۱۹۰۹۳۲/۰۲	۷۳۴۴		
مجموع	۲۷	۶۱۳۷۹۹/۹۹			

جدول ۹: ارزیابی مدل‌سازی مقدار زیست توده در سطح ترکیبی

معیار ارزیابی	مقادیر
ضریب تبیین	۰/۶۸۸۹
ضریب تبیین تطابق یافته	۰/۶۷۶۹۷
مجذور میانگین مربعات خطا	۸۵/۶۹
مجذور میانگین مربعات خطا نسبی	۰/۴۷
میانگین	۱۸۱/۷۱
تعداد مشاهدات (قطعات نمونه)	۲۸

شیوه‌های برداشت داده‌ها چه در مرحله زمینی و چه در مرحله برداشت تصاویر هوایی و نوع آن‌ها تاثیر بسزایی در نتایج دارد. با توجه به این نکته که تصویربرداری این پژوهش با استفاده از داده‌های سه‌بعدی مستخرج از تصاویر صورت گرفت، در مقایسه با مطالعاتی از این دست که با استفاده از سنجنده‌های لایدار انجام شده‌اند، نتایج ضعیف‌تر دارد. استفاده از سنجنده‌های لایدار با تراکم نقاط بالاتر و همچنین سیستم کدگذاری نقاط، دقت بازسازی مدل سه‌بعدی را بهبود می‌بخشد. سیستم کدگذاری که در این سنجنده‌ها موجود است، نقاط را با توجه به برخی از پارامترها، کدگذاری کرده و آن‌ها را قابل تفکیک می‌کند. به‌طور کلی *DSM*، *DTM* و *CHM* که بااستفاده از این سنجنده‌ها ساخته می‌شوند بسیار دقت بالایی دارند و نتایج پژوهش را بهبود می‌بخشند.

علاوه بر ایت، نتایج پژوهش‌هایی از این دست با توجه به نوع ساختار جنگل و وضعیت توپوگرافی منطقه ممکن است تغییر کند. منطقه‌ای مورد مطالعه در این پژوهش مسطح بود و نسبت به دیگر مناطق جنگلی از تراکم کمتری برخودار بود. دلایل این انتخاب این بودکه این تحقیق برای اولین بار در سطح کشور صورت می‌گرفت و تاکنون هیچگونه تحقیقی در این زمینه در ایران صورت نگرفته بود تا بتواند به عنوان منبعی برای نویسندگان این مقاله مورد استفاده قرار گیرد. همچنین امکان انتخاب منطقه‌ای کوهستانی محیّا نبود تا بتوانند اثرات توپوگرافی و یا تغییرات آن را بر روی مراحل مختلف پژوهش بررسی کنند. اما همانطور که ذکر شد ساخت *DTM* یکی از مراحل بسیار مهم در این قبیل پژوهش‌ها است. تولید مدل رقومی سطح زمین با روش استفاده شده در این پژوهش در مناطق کوهستانی به دلیل تغییرات ارتفاعی بسیار زیاد، مشکل خواهد بود و نیاز به امکانات خاص خود را دارد. نکته دیگری که لازم است بیان شود، دخالت میزان تراکم جنگل در ساخت *DTM* است. هر چقدر که منطقه جنگلی متراکم‌تر باشد و سطح زمین از روی تصاویر مشخص نباشد، امکان تشکیل مدل سه‌بعدی آن به دلیل کمبود داده‌های مورد نیاز و همچنین عدم وجود داده‌های دقیق در مرحله درونیابی، بسیار سخت است.

در این مطالعه از قطعات نمونه با اندازه ثابت استفاده شد؛ در صورتی‌که قطعات نمونه با اندازه ثابت در

[DOI: 10.29252/jgit.7.3.213]

سنجش از دور از منابع عدم قطعیت مدل هستند [۱۹، ۲۰ و ۲۱].

بنابراین مطالعات آینده باید به بررسی ابعاد قطعه نمونه و تعداد آن‌ها بر برآورد زیست توده بپردازد. همچنین ارتفاع پروازی که پهپاد در آن ارتفاع از منطقه تصویربرداری کرد، ۱۰۰ متر بود. به نظر می‌رسد بررسی ارتفاع پهپاد به‌منظور تصویربرداری و اثرات این ارتفاع پرواز برروی دقت *DTM*، *DSM* و *CHM* ضروری باشد. تفاوت در روش‌های ساخت *DTM* و بررسی بهترین روش در برآورد ارتفاع و زیست توده نیز یکی از مواردی است که انجام تحقیقات آتی بیشتر بر روی آن ضروری است. لازم به ذکر است که در این پژوهش به دلیل کمبود بودجه‌های پژوهشی، به‌منظور توجیه تصاویر و افزایش میزان دقت مدل ارتفاعی خروجی، از سیستم تعیین موقعیت جهانی خیلی دقیق و نیز نیز نقشه برداری درختان با ابزاری مانند توتال‌استیشن استفاده نشد. کاربرد چنین تجهیزاتی باعث بهبود نتایج و افزایش میزان اعتبار آن‌ها می‌شود که به‌منظور انجام امور پژوهشی، کار بر روی این موارد پیشنهاد می‌شود.

۴- نتیجه‌گیری

نتایج این مطالعه نشان داد که استفاده از مجموعه داده‌های اخذ شده از پهپادها و استفاده از تکنیک سه‌بعدی‌سازی *SFM* در پایش و برآورد زیست توده روی زمین در سطوح مختلف، برای برآوردهای کلی مناسب است اما برای اهداف مدیریتی نیاز به استفاده از داده‌های با کیفیت‌تر، اخذ نقاط کنترل زمینی دقیق، استفاده از شبکه پرواز متقاطع و تحقیقات بیشتر برای رسیدن به دقت‌های بالاتر است. همچنین از بین سطح‌های مورد بررسی، سطح هیبرید نتایج امیدبخش‌تری ارائه نمود.

به طور کلی با توجه به نتایج پژوهش حاضر که بیشترین تمرکز آن بر روی رهیافت‌های مختلف آماربرداری از جمله رهیافت‌های تک‌درخت، قطعه نمونه و ترکیبی می‌باشد و میزان زیست توده روی زمین درختان را در یک جنگل جلگه‌ای هیرکانی برآورد نموده است؛ رهیافت ترکیبی توانست در مقایسه با دو رهیافت دیگر عملکرد بهتری از خود نشان دهد. لازم به ذکر است که این نتایج می‌تواند با توجه به نوع جنگل، بافت و ساختار آن متغیر باشد.

مراجع

[1] *F. Xu, Z. Gao, X. Jiang, W. Shang, J. Ning, D. Song and J. Ai, "A UAV and S2A data-based estimation of the initial biomass of green algae in the South Yellow Sea", Marine pollution bulletin, vol.128, pp. 408-414, 2018.*

[2] *Z. Zhou, Y. Yang and B. Chen, "Estimating Spartina alterniflora fractional vegetation cover and aboveground biomass in a coastal wetland using SPOT6 satellite and UAV data", Aquatic Botany, vol.144, pp. 38-45, 2018.*

[3] *S. Manfreda, M. F. McCabe, P. E. Miller, R. Lucas, V. Pajuelo Madrigal, G. Mallinis, ... and J. Müllerová, "On the Use of Unmanned Aerial Systems for Environmental Monitoring". Remote Sensing, vol.10, pp. 641, 2018.*

[4] *M. Ruwaimana, B. Satyanarayana, V. Otero, A. M. Muslim, M. Syafiq, S. Ibrahim, D. Raymaekers, N. Koedam and F. Dahdouh-Guebas, "the advantages of using drones over space-borne imagery in the mapping of mangrove forests", PloS one, vol.13, e0200288, 2018.*

[5] *S. Jiang and W. Jiang, "Efficient structure from motion for oblique UAV images based on maximal spanning tree expansion", ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing, vol.132, pp. 140-161, 2017.*

[6] *N. Micheletti, J. H. Chandler and S. N. Lane, Structure from motion (SFM) photogrammetry. Loughborough University: British Society for Geomorphology, 2015.*

[7] *J. D. Stevenson, S. O'Young and L. Rolland, "Enhancing the visibility of small unmanned*

[DOI: 10.29252/jgit.7.3.213]

aerial vehicles", Procedia Manufacturing, vol.3, pp. 944-951, 2015.

[8] J. Guerra-Hernández, E. González-Ferreiro, V. J. Monleón, S. P. Faias, M. Tomé and R. A. Díaz-Varela, "Use of Multi-Temporal UAV-Derived Imagery for Estimating Individual Tree Growth in Pinus pinea Stands", Forests, vol.8, pp. 300, 2017.

[9] D. Panagiotidis, A. Abdollahnejad, P. Surový and V. Chiteculo, "Determining tree height and crown diameter from high-resolution UAV imagery", International journal of remote sensing, vol.38, pp. 2392-2410, 2017.

[10] W. Li, Z. Niu, H. Chen, D. Li, M. Wu and W. Zhao, "Remote estimation of canopy height and aboveground biomass of maize using high-resolution stereo images from a low-cost unmanned aerial vehicle system", Ecological indicators, vol.67, pp. 637-648, 2016.

[11] D. J. Kachamba, H. O. Ørka, T. Gobakken, T. Eid and W. Mwase, "Biomass estimation using 3D data from unmanned aerial vehicle imagery in a tropical woodland", Remote Sensing, vol.8, pp. 968, 2016.

[12] S. Puliti, H. O. Ørka, T. Gobakken and E. Næsset, "Inventory of small forest areas using an unmanned aerial system". Remote Sensing, vol.7, pp. 9632-9654, 2015.

[13] R. Jing, Z. Gong, W. Zhao, R. Pu and L. Deng, "Above-bottom biomass retrieval of aquatic plants with regression models and SfM data acquired by a UAV platform–A case study in Wild Duck Lake Wetland, Beijing, China", ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing, vol.134, pp. 122-134, 2017.

[14] D. A. Zimble, D. L. Evans, G. C. Carlson, R. C. Parker, S. C. Grado and P. D. Gerard, "characterizing vertical forest structure using small-footprint airborne LiDAR", Remote sensing of Environment, vol.87, pp. 171-182, 2003.

[15] Y. Seul, P. Hien, J. Soo, M. Hee and M. Wook, "Calculation of tree height and canopy crown from drone images using segmentation", Journal of the Korean Society of Surveying, Geodesy, Photogrammetry and Cartography, vol.33, pp. 605-613, 2015.

[16] V. Luoma, N. Saarinen, M. A. Wulder, J. C. White, M. Vastaranta, M. Holopainen and J. Hyyppä, "Assessing precision in conventional field measurements of individual tree attributes", Forests, vol.8, pp. 38, 2017.

[17] T. Gobakken, O. M. Bollandsås and E. Næsset, "Comparing biophysical forest characteristics estimated from photogrammetric matching of aerial images and airborne laser scanning data", Scandinavian Journal of Forest Research, vol.30, pp. 73-86, 2015.

[18] G. V. Laurin, N. Puletti, Q. Chen, P. Corona, D. Papale and R. Valentini, "Above ground biomass and tree species richness estimation with airborne lidar in tropical Ghana forests", International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation, vol.52, pp. 371-379, 2016.

[19] E. W. Mauya, L. T. Ene, O. M. Bollandsås, T. Gobakken, E. Næsset, R. E. Malimbwi and E. Zahabu, "Modelling aboveground forest biomass using airborne laser scanner data in the miombo woodlands of Tanzania", Carbon balance and management, vol.10, pp. 28, 2015.

[20] G. W. Frazer, S. Magnussen, M. A. Wulder and K. O. Niemann, "Simulated impact of sample plot size and co-registration error on the accuracy and uncertainty of LiDAR-derived estimates of forest stand biomass", Remote Sensing of Environment, vol.115, pp. 636-649, 2011.

[21] E. H. Hansen, T. Gobakken, O. M. Bollandsås, E. Zahabu and E. Næsset, "Modeling aboveground biomass in dense tropical submontane rainforest using airborne laser scanner data", Remote Sensing, vol.7, pp. 788-807, 2015.

[DOI: 10.29252/jgit.7.3.213]

K. N. TOOSI UNIVERSITY OF TECHNOLOGY
FACULTY OF GEODESY AND GEOMATICS ENGINEERING

Journal of Geospatial Information Technology
Vol.7, No.3, Autumn 2019

Research Paper

Estimation of Tree Biomass at Individual tree, Sample plot and Hybrid Level using Drone Images

Mohammad Reza Kargar[1], Hamzeh Sohrabi[2*]

1- *MSc Student of Forest Sciences and Engineering, Faculty of Natural Resources, Tarbiat Modares University*
2- *Associate Professor of Forest Sciences and Engineering, Faculty of Natural Resources, Tarbiat Modares University*

Abstract

Two-dimensional image conversion algorithms to 3D data create the hope that the structural properties of trees can be extracted through these images. In this study, the accuracy of biomass estimation in tree, plot, and hybrid levels using UAVs images was investigated. In 34.8 ha of Sisangan Forest Park, using a quadcopter, 854 images from an altitude of 100 meters above ground were acquired. SFM algorithm was applied to produce 3D data and the height of the trees was extracted. 28 samples with 30×30 m dimension were collected and the height and the diameter at the breast height were measured and the biomass was calculated based on a general allometric equation. In order to estimate the biomass at plot-level, the height metrics were extracted from the point cloud. For tree-level, the biomass of each tree was modeled based on the height value derived from CHM for each tree. In hybrid-level, sum of estimated biomass of trees in tree-level was used as the predictor in modeling. The accuracy and precision of the estimates were evaluated using relative bias (rBias), relative root mean square error (rRMSE), and adjusted r square (r2). rRMSE for biomass estimation in Buxus hyrcana, Carpinus betulus, Parottia persica, and other species were 17.56, 7.11, 14.67 and 22.73 percent, respectively. For plot level and hybrid level, rRMSE were 58 and 47 percent, respectively. Based on the result, the most precise approach for biomass estimation is hybrid level and the precision of the estimate is appropriate for overall assessment of forest stands, not for management planning.

Key words: *UAV, Sisangan, Crown Height Model, Above Ground Biomass, Digital Terrain Model.*

Correspondence Address*. Forestry Department, Faculty of Natural Resources, Tarbiat Modares University, Tehran, Iran.*
Tel: +98 2182880000.
Email: *hsohrabi@modares.ac.ir*

[DOI: 10.29252/jgit.7.3.213]