



دانشگاه تهران

نشریه پژوهش‌های علوم و فناوری چوب و جنگل

جلد بیست و ششم، شماره سوم، ۱۳۹۸

۵۵-۶۸

<http://jwfst.gau.ac.ir>

DOI: 10.22069/jwfst.2019.16642.1810

بررسی صحت برآورد ارتفاع درختان با استفاده از تصاویر دوربین هوایی رقومی UltraCam (مطالعه موردی: پارک طالقانی تهران)

*علی‌اصغر درویش‌صفت^۱، مسلم ارمندی^۲ و امید رفیعیان^۳

^۱استاد گروه جنگلداری و اقتصاد جنگل، دانشکده منابع طبیعی، دانشگاه تهران، کرج، ایران،

^۲دانش‌آموخته کارشناسی ارشد گروه جنگلداری و اقتصاد جنگل، دانشکده منابع طبیعی، دانشگاه تهران، کرج، ایران،

^۳استادیار گروه مهندسی محیط زیست، دانشکده کشاورزی و منابع طبیعی، واحد تبریز، دانشگاه آزاد اسلامی، تبریز، ایران

تاریخ دریافت: ۱۳۹۸/۲/۲۷؛ تاریخ پذیرش: ۱۳۹۸/۶/۱۶

چکیده

سابقه و هدف: اندازه‌گیری ارتفاع درختان به روش‌های میدانی در سطوح وسیع، زمان و هزینه فراوانی را می‌طلبد، از این رو استفاده از تصاویر هوایی رقومی زوج به‌عنوان روشی جایگزین می‌تواند مطرح شود. هدف اصلی این پژوهش بررسی قابلیت این تصاویر در برآورد ارتفاع درختان است.

مواد و روش‌ها: این پژوهش با استفاده از نه تصویر دوربین هوایی رقومی UltraCam-D با پوشش‌های مشترک ۷۰ درصد طولی و ۶۰ درصد عرضی، مقیاس اسمی ۱:۸۰۰۰ و اندازه تفکیک زمینی هفت سانتی‌متر در پارک جنگلی طالقانی شهر تهران انجام شد. تصاویر ابتدا به روش مثلث‌بندی هوایی، تصحیح هندسی و موزاییک‌سازی و سپس مدل‌های رقومی ارتفاع (DEM) و سطح (DSM) به ترتیب در اکستنشن‌های LPS و INPHO، تهیه و از تفاضل دو مدل یادشده، ارتفاع درختان محاسبه گردید. برای برآورد صحت DEM، مقادیر ارتفاعی ۱۵ نقطه از نقشه ۱:۱۰۰۰ شهر تهران استخراج و با مقادیر ارتفاعی DEM در محل همان نقاط مقایسه شد. جهت بررسی صحت مقادیر ارتفاعی محاسبه‌شده، ارتفاع ۱۰۱ درخت از گونه‌های مختلف پهن‌برگ و سوزنی‌برگ در عرصه اندازه‌گیری و با مقادیر ارتفاع برآوردی از DSM همان درختان مقایسه شد. مقایسه مقادیر ارتفاع برآوردی (محاسبه‌شده) با مقادیر واقعیت زمینی (ارتفاع‌های اندازه‌گیری‌شده) با استفاده از رگرسیون خطی ساده و آماره‌های ضریب تبیین (R^2)، جذر میانگین مربعات خطا (RMSE) و همچنین $RMSE\%$ برای ارزیابی خطای DSM تولید شده و از آزمون t جفتی نیز برای مقایسه اختلاف ارتفاع‌ها به تفکیک در دو گروه پهن‌برگان و سوزنی‌برگان استفاده شد.

یافته‌ها: با توجه به مقدار RMSE بر اساس پنج نقطه‌ی شاهد (۰/۲۲ پیکسل) و همخوانی دقیق تصاویر تصحیح‌شده با نقشه توپوگرافی، اطمینان لازم در مورد انجام تصحیح هندسی با صحت قابل‌قبول کسب شد. تراکم نه‌چندان زیاد پوشش جنگلی منطقه مورد مطالعه، امکان رؤیت سطح زمین در تصاویر را فراهم کرده بود. این نکته امکان انتخاب نقاط کنترل مناسب و تعداد زیادی نقاط گرهی را میسر نموده بود. همبستگی خطی زیاد بین ارتفاع محاسبه‌شده و ارتفاع واقعی درختان ($R^2=۸۲$) درصد و متر

* مسئول مکاتبه: adarvish@ut.ac.ir

RMSE=۱/۳۵) و همچنین اختلاف به نسبت اندک و غیرمعنی‌دار بین این ارتفاع‌ها (۱/۱۳ متر) بیانگر این است که برآورد ارتفاع با رویکرد مورد استفاده، از صحت قابل‌قبولی برخوردار می‌باشد. در ضمن تفاوت محسوسی بین صحت برآورد ارتفاع سوزنی‌برگان و پهن‌برگان مشاهده نشد.

نتیجه‌گیری: بر پایه نتایج این پژوهش، از این تصاویر می‌توان در این چنین مناطق نسبتاً مسطحی مانند جنگل‌های شهری و جنگل‌های مسطح غرب برای تعیین ارتفاع درختان به‌طور اجرایی استفاده کرد ولی قابلیت این تصاویر در جنگل‌های کوهستانی، پرتراکم و پرشیب باید مورد بررسی قرار گیرد.

واژه‌های کلیدی: ارتفاع درخت، مدل رقومی ارتفاع (DEM)، مدل رقومی سطح (DSM)، UltraCam-D

مقدمه

یکی از مشخصه‌های مهم جنگل، ارتفاع درختان آن است. روش‌های میدانی اندازه‌گیری ارتفاع به‌ویژه در سطوح وسیع، زمان و هزینه فراوانی را می‌طلبد. بنابراین از دهه‌ها پیش استفاده از عکس‌های هوایی زوج بزرگ‌مقیاس و ابزار پارالاکس بار (۲۲) و همچنین تکنیک‌های فتوگرامتری تحلیلی مورد توجه قرار گرفتند. با پیدایش و توسعه روش‌های نوین سنجش از دور رقومی، از جمله عکس‌های هوایی رقومی (۱۵)، لیدار^۱ هوایی (۱۱) و لیدار فضایی (۱۶) تحولی چشمگیر در این زمینه ایجاد و جای خود را در فتوگرامتری و اندازه‌گیری جنگل باز کرده است.

اولین دوربین رقومی هوایی به‌نام UltraCam-D در سال ۲۰۰۳ توسط شرکت اتریشی Vexcel عرضه و خیلی‌زود به ایران نیز وارد و استفاده شد از دیگر دوربین‌های رقومی هوایی می‌توان DMC^۲، HRSC^۳، ADS^۴ را نام برد. دوربین UltraCam از نوع فرمت بزرگ است که با داشتن پنج باند طیفی در محدوده‌های مرئی و مادون‌قرمز نزدیک با تفکیک مکانی و رادیومتری بسیار زیاد، منبع اطلاعاتی بسیار باارزشی در بهنگام‌سازی نقشه‌های شهری، ارائه

مدل‌های سه‌بعدی شهرها و جنگل‌ها محسوب می‌شود (۱۵). اندازه تفکیک مکانی بسیار کوچک، در حد دسی‌متر تا متر و تعدد تصاویر برداشتی، امکان تفکیک و شناسایی تک‌تک درختان و از سوی دیگر برداشت تصاویر با پوشش مشترک، امکان برآورد ارتفاع درختان را میسر می‌سازد.

مطالعاتی با استفاده از این داده‌ها در جنگل‌های ایران انجام شده است. رفیعیان و همکاران (۲۰۰۹) نسبت به بررسی کیفی و قابلیت‌های تصاویر برداشت‌شده از جنگل‌های شمال و برخی مزایا و محدودیت‌های آن‌ها برای استخراج اطلاعات جنگل اقدام کردند (۱۷). درویش‌صفت و همکاران (۲۰۱۰) قابلیت تصاویر دوربین UltraCam-D برای تشخیص گونه‌های درختی و تیپ‌بندی جنگل به روش شی-پایه را در منطقه چمستان نور بررسی و به نتایج مطلوبی رسیدند (۳). سهرابی و همکاران (۲۰۰۹) نیز در بخشی از جنگل‌های شمال به بررسی امکان تهیه جدول حجم هوایی با به‌کارگیری تفسیر چشمی این تصاویر هوایی رقومی، پرداختند و یک جدول حجم هوایی نسبتاً دقیق را تولید کردند (۲۱). قاسمی و همکاران (۲۰۱۶) قابلیت داده‌های UltraCam-X در برآورد سطح تاج پوشش جنگل‌های حرا جنوب کشور را با روش‌های آماری بررسی کردند (جذر میانگین مربعات خطا حدود ۱۳ درصد) (۴). رضائیان

- 1- Light detection and ranging
- 2- Digital mapping camera (DMC)
- 3- High resolution stereo camera (HRSC)
- 4- Airborne digital sensor (ADS)

میدانی بود (۰/۳۵) متر خطا برای تصاویر ۳۰ سانتی متری و ۰/۳۱ متر خطا برای تصاویر ۱۰ سانتی متری در مقایسه با برآورد میدانی؛ بنابراین نتیجه گیری شد که تصاویر ۳۰ سانتی متری برای برآورد ارتفاع متوسط توده جنگلی کفایت می کنند و نتایج مشابهی نسبت به تصاویر ۱۰ سانتی متری ارائه می دهند (۲).

کراوس و همکاران (۲۰۱۹) به اندازه گیری ارتفاع درختان با استفاده از پهپاد حامل دوربین رقومی Sony A7r با اندازه تفکیک مکانی ۱ متر، در یک توده جنگل کاری همسال کاج جنگلی در شمال شرقی برلین پرداختند. صحت برآورد ارتفاع درختان حاصل از تصاویر هوایی زوج، از طریق مقایسه با ارتفاع درختان مستخرج از دو روش؛ میدانی (با اندازه گیری زوایای نوک و بن و فاصله از درختان سرپا) و مستقیم (بعد از قطع درختان منتخب) ارزیابی شد. نتیجه مقایسه ارتفاع برآورد شده از تصاویر هوایی با اندازه گیری میدانی برای تمامی ۲۸۵ درخت، نشان دهنده RMSE معادل ۰/۴۷۹ متر بود. همچنین نتیجه گیری شد که برای ارزیابی صحت ارتفاع، در صورتی که امکان قطع و اندازه گیری مستقیم فراهم نباشد، اندازه گیری های میدانی کفایت می کند (۱۲).

قابلیت ادغام داده های چندطیفی UltraCam-D با لیدار، در ساختار جنگل در سطح درخت، نیز توسط علی و همکاران (۲۰۰۸) در کشور استرالیا بررسی شد (۱). جارنستد و همکاران (۲۰۱۲) در آلمان و نورمین و همکاران (۲۰۱۳) در فنلاند به برآورد مشخصه های کمی جنگل با ادغام داده های لیدار هوایی و UltraCam-XP پرداختند و رویکرد مورد استفاده را مثبت ارزیابی کردند (۱۰ و ۱۴).

بر پایه مطالعات یاد شده می توان بیان کرد که با توجه به قدرت تفکیک مکانی زیاد این تصاویر، استخراج بعضی مشخصه های جنگل و شناسایی تک درختان میسر و تجارب خوبی در این زمینه در

و عرفانی فرد (۲۰۱۶) نیز به بررسی قابلیت داده های UltraCam-D در برآورد تراکم توده، قطر تاج درختان و همچنین ارتفاع درخت بر اساس طول سایه درختان در تصویر، در قطعه کوچکی در جنگل های بلوط غرب پرداختند و نتایج رضایت بخشی کسب کردند (۱۹). محمدی و همکاران (۲۰۱۷) به بررسی قابلیت داده های ادغام شده UltraCam-D با لیدار هوایی برای برآورد مشخصه های حجم سرپا، رویه زمینی و تعداد درختان در جنگل شصت کلاته گرگان پرداختند و به نتایج مثبتی رسیدند (۱۳). قاسمی رزوه و همکاران نیز در پژوهشی در سال ۲۰۱۷ قابلیت داده های UltraCam را برای تشخیص گونه های درختی در بخشی از جنگل های شصت کلاته گرگان بررسی کردند. تصاویر پس از آماده سازی به دو روش پیکسل پایه و شی پایه طبقه بندی و سپس با تهیه یک نقشه واقعیت زمینی دقیق و بهنگام شامل ۱۲۸ پایه درخت، مورد ارزیابی صحت قرار گرفت. کسب صحت کلی ۶۳ درصد و ضریب کاپا ۰/۵۱، نشانگر قابلیت به نسبت خوب این رویکرد می باشد (۵).

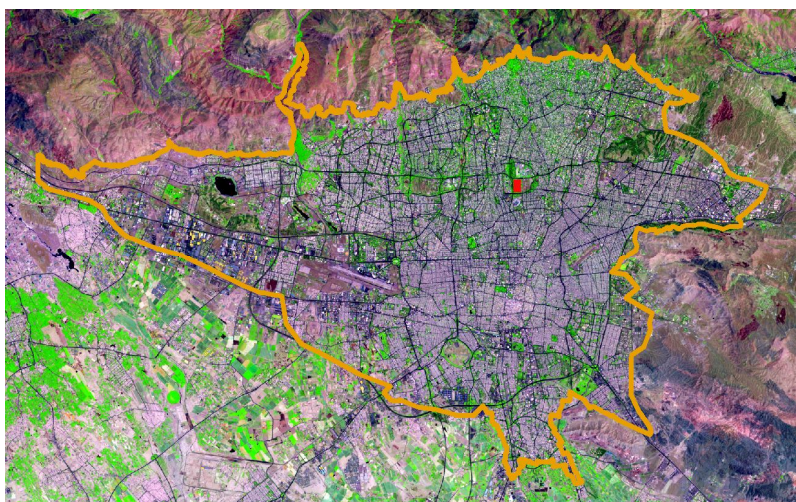
بالنویچ و همکاران (۲۰۱۵)، با استفاده از تصاویر زوج مادون قرمز رنگی دوربین های هوایی UltraCamX و CIR با اندازه های پیکسل ۱۰ تا ۳۰ سانتی متر، به برآورد میانگین ارتفاع درختان در جنگلی در جنوب شهر زاگرب پرداختند. ارتفاع تاج و بن درختان از تصاویر هوایی برآورد و عملیات اندازه گیری میدانی در ۱۸۳ پلات، انجام شد. برای ارزیابی صحت، میانگین ارتفاع توده در هر پلات؛ حاصل از تصاویر زوج و نیز اندازه گیری های میدانی، محاسبه شدند. تحلیل های آماری ANOVA اختلاف معنی داری برای میانگین ارتفاع توده، بین فرآورده ای حاصل از تصویر و عملیات میدانی در تصاویر ۱۰ و ۳۰ سانتی متری نشان نداد. انحراف معیار از میانگین ارتفاع توده در مورد هر دو اندازه تفکیک مکانی، مشابه اندازه گیری

۷۵ گونه گیاهی، شامل درختان و درختچه‌هایی از نوع کاج، سرو، چنار، اوجا و توت به صورت طبیعی و دست‌کاشت می‌باشد. تصاویر دوربین UltraCam-D مورد استفاده در این پژوهش شامل نه فریم از سه خط پرواز کنار هم با پوشش مشترک طولی و عرضی به ترتیب ۷۰ و ۶۰ درصد که خط‌های پرواز اول و سوم شرقی- غربی و خط دوم غربی- شرقی بوده است. تصاویر در ۴ باند طیفی (آبی، سبز، قرمز و مادون‌قرمز نزدیک) به صورت ادغام‌شده با باند پانکروماتیک به صورت ۱۶ بیتی (تفکیک رادیومتری واقعی ۱۲ بیت)، در فرمت Tiff دریافت شدند. تصاویر در تاریخ ۹ مرداد سال ۱۳۸۷ با متوسط ارتفاع پروازی ۸۰۰ متر، مقیاس اسمی ۱:۸۰۰۰ و اندازه تفکیک زمینی ۷ سانتی‌متر برداشت شدند. نقشه رقومی بزرگ‌مقیاس ۱:۲۰۰۰ پارک طالقانی (تولیدشده توسط سازمان نقشه‌برداری کشور، سال ۱۳۸۴) و نقشه رقومی بزرگ‌مقیاس ۱:۱۰۰۰۰ شهر تهران (براساس عکس‌های هوایی سال ۸۹) نیز مورد استفاده قرار گرفت.

ایران کسب شده است. همچنین با پردازش مناسب تصاویر این چنین دوربین‌هایی می‌توان با استفاده از روش انطباق تصاویر^۱، مدل رقومی سطح^۲ (DSM) که ارتفاع نقاط مختلف روی سطح زمین را ارائه می‌دهد، تولید کرد؛ بنابراین در مناطق جنگلی می‌توان ارتفاع درختان را هم به دست آورد. اما لازمه استفاده کاربردی از این امکان در جنگلداری، صحت ارتفاع حاصل از این تصاویر است. از آنجایی که در اکثر موارد تصاویر آماده و تصحیح هندسی شده از شرکت‌های برداشت‌کننده دریافت شده است و پژوهشی در خصوص صحت برآورد ارتفاع در ایران انجام نشده، انجام این پژوهش با هدف اصلی بررسی صحت ارتفاع برآوردی درختان از تصاویر UltraCam-D و هدف فرعی مقایسه این صحت در مورد پهن‌برگان و سوزنی‌برگان ضرورت می‌یابد.

مواد و روش‌ها

منطقه تحقیق: منطقه مورد مطالعه پارک جنگلی طالقانی بر روی تپه‌های عباس‌آباد تهران (شکل ۱) با



شکل ۱- موقعیت منطقه مورد مطالعه (مربع قرمز رنگ) در شهر تهران بر روی تصویر ماهواره‌ای.
Figure 1. Location of the study area (red square) in Tehran on satellite image.

- 1- Image matching
- 2- Digital surface model (DSM)

روش تحقیق

تصحیح هندسی: فرآیند تصحیح هندسی تصاویر هوایی رقومی از طریق روش مثلث بندی هوایی^۱ انجام می پذیرد. بدین ترتیب که ابتدا باید تصاویر نسبت به همدیگر و برپایه ی مشخصات دوربین و تصویر (فاصله کانونی، موقعیت مرکز تصویر و ابعاد پیکسل) توجیه داخلی شوند، سپس با استفاده از نقاط کنترل زمینی و گرهی^۲ (نقطه های مشترک بین دو یا چند فریم تصویر با پوشش مشترک) توجیه خارجی گردند و در نهایت عملیات مثلث بندی هوایی اجرا شود. در مرحله توجیه داخلی تصاویر براساس مشخصه هایی مانند ارتفاع پرواز، اندازه پیکسل، مشخصات فنی دوربین، فاصله کانونی، تصاویر نسبت به هم در موقعیت صحیحی قرار می گیرند. در فرایند توجیه خارجی براساس مختصات اولیه تصویری و زمینی نقاط، معادلات ریاضی روابط مختصاتی تشکیل و تمامی پیکسل های تصاویر دارای مختصات می شوند. منظور از مثلث بندی، تعیین مختصات مسطحاتی نقاط بر پایه ایجاد تعداد زیادی مثلث متشابه متصل به هم (شبکه ای از مثلث ها) است. در این روش خطاها به میزان زیادی تعدیل و می توان به درستی محاسبات براساس خطای باقی مانده^۳ هریک از نقاط و جذر مربعات خطاهای همه نقاط پی برد. سپس متناسب با میزان خطای قابل قبول در راستای هدف (تولید DSM دقیق)، بعضی از نقاط کنترل و گرهی ممکن است اصلاح یا حذف گردند. در آخر معادلات تشکیل شده بر روی همه تصاویر اعمال می گردند.

هر چند که تصاویر دوربین UltraCam-D دارای قابلیت زمین مرجع شدن مستقیم با استفاده از اطلاعات لحظه ای سامانه موقعیت یاب جهانی تفاضلی

(DGPS) مستقر در هواپیما و زمین و وضعیت اینرسی هواپیما^۴ IMU ثبت مشخصه های توجیه خارجی (X,Y,Z, ω,φ,κ) می باشند و علی الاصول بدون نیاز به نقاط کنترل زمینی می توان عملیات مثلث بندی هوایی را انجام داد، ولی در این پژوهش برای افزایش صحت تصحیح هندسی، از ۱۵ نقاط کنترل زمینی حاصل از نقشه رقومی بزرگ مقیاس ۱:۱۰۰۰ شهر تهران استفاده شد. ۷۵ نقطه گرهی نیز به طور خودکار تعیین شد. ۵ نقطه نیز تحت عنوان نقاط چک^۵ برای بررسی صحت فرآیند تصحیح هندسی از روی همین نقشه انتخاب و کنار گذاشته شدند. فرآیند تصحیح هندسی تصاویر در این پژوهش در محیط نرم افزاری^۶ ERDAS LPS 2014 انجام گرفت.

تولید DEM: مدل رقومی ارتفاع (DEM) به روش فتوگرامتری و بر مبنای انطباق تصاویر زوج^۷ تهیه شد. در این روش برای هر پیکسل از تصویر سمت چپ باید پیکسل متناظر از تصویر سمت راست شناسایی شود، با این کار می توان براساس اختلاف در موقعیت مکانی پیکسل ها مقدار پارالاکس میان آنها را که ارتباط مستقیم با ارتفاع دارد، محاسبه نمود (۱۲). در این روش پس از تصحیح هندسی تصاویر، مدل استریو^۸ محاسبه و سپس تصویر اپی پلار^۹ تولید و در نهایت DEM ایجاد می شود. این فرایند نیز در محیط ERDAS-LPS با اندازه سلول ۰/۵ متر انجام شد. البته این فرایند می تواند تنها در این چنین مناطق که تراکم پوشش درختی خیلی زیاد نیست، با اطمینان انجام شود. برای ارزیابی صحت این DEM، مقادیر ارتفاعی ۱۵ نقطه از نقشه ۱:۱۰۰۰ شهر تهران

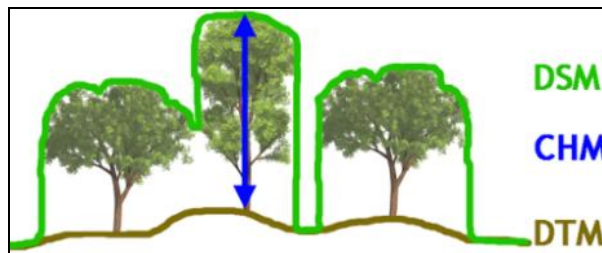
4- Inertial measurement unit (IMU)
5- Check point
6- Leica photogrammetry suite (LPS)
7- Pair image matching
8- Bundle adjustment
9- Epipolar image

1- Aerial triangulation
2- Tie point
3- Residual error

داده شده است. در این پژوهش DSM نیز بر مبنای تصاویر زوج مربوط به نه فریم تصویر دوربین UltraCam-D که در مرحله قبل مورد تطابق هندسی قرار گرفته بودند، به روش مبتنی بر انطباق تصاویر هیرشماگل (۲۰۰۸) در محیط نرم‌افزار INPHO و با اندازه سلول ۰/۵ متر تهیه شد (۶).

استخراج و با مقادیر ارتفاعی DEM در محل همان نقاط مقایسه شد.

تولید DSM: DSM ارتفاع پدیده‌های روی زمین مثل برج‌ها، ساختمان‌ها و درختان را از سطح مبنای ارتفاعی (عموماً سطح آب‌های آزاد) نشان می‌دهد. در شکل ۲، DSM، DEM و CHM^۱ که بیانگر ارتفاع درختان است و از تفاضل آن‌ها حاصل می‌شود، نشان



شکل ۲- تصویر شماتیک DSM، DTM، CHM در یک منطقه جنگلی (۱۵).

Figure 2. The Schematic image of DSM, DEM and CHM (15).

که در آن، H ارتفاع درخت، a فاصله افقی تا درخت بر حسب متر، α و β به ترتیب زاویه دید به نوک و بن درخت برآورد (محاسبه) ارتفاع درختان: موقعیت ۱۰۱ درخت اندازه‌گیری شده در عرصه، بر روی دو مدل DEM و DSM تعیین و ارتفاع درختان از تفریق مقادیر آن‌ها محاسبه شد (شکل ۴).

مقایسه ارتفاع برآورد شده با اندازه‌گیری شده: ابتدا نرمال بودن داده‌ها با استفاده از آزمون شاپیرو-ویلک ارزیابی شد. بررسی رابطه و مقایسه مقادیر ارتفاع برآوردی (محاسبه شده) با مقادیر واقعیت زمینی (ارتفاع‌های اندازه‌گیری شده) به تفکیک پهن‌برگان و سوزنی‌برگان و با استفاده از رگرسیون خطی ساده و آماره‌های ضریب تبیین (R^2)، جذر میانگین مربعات خطا (RMSE) (رابطه ۲) و درصد آن (RMSE%) (رابطه ۳) انجام شد. همچنین از آماره درصد جذر میانگین مربعات خطا (RMSE%) (رابطه ۳) و آزمون

تهیه واقعیت زمینی: در مطالعات دورسنجی برای ارزیابی صحت نقشه‌ها، مدل‌ها و مشخصه‌های محاسبه شده، نیاز به داده‌های واقعیت زمینی و نمونه‌های شاهد است. در این راستا تلاش شد که هر تعداد درختی را که به‌خوبی در تصویر و در طبیعت قابل شناسایی هستند و با پراکنشی مناسب، با ارتفاع‌های متفاوت (درختان بلند، کوتاه و متوسط) و از گونه‌های مختلف در سال ۱۳۹۲ مورد اندازه‌گیری ارتفاع قرار گیرند. بنابراین تصویر تصحیح شده رنگی از پارک در مقیاس ۱:۳۰۰۰ مناسب چاپ شد. سپس در بازدیدهای میدانی، درختان از روی این تصویر شناسایی و ارتفاع آن‌ها به کمک شیب‌سنج سونتو اندازه‌گیری و ارتفاع آن‌ها از رابطه ۱ محاسبه شد. در مجموع ۴۸ اصله درخت پهن‌برگ و ۵۳ اصله درخت سوزنی‌برگ اندازه‌گیری شدند (شکل ۴).

$$H = a \{ \text{tg } \alpha - (\text{tg } \beta) \} \quad (1)$$

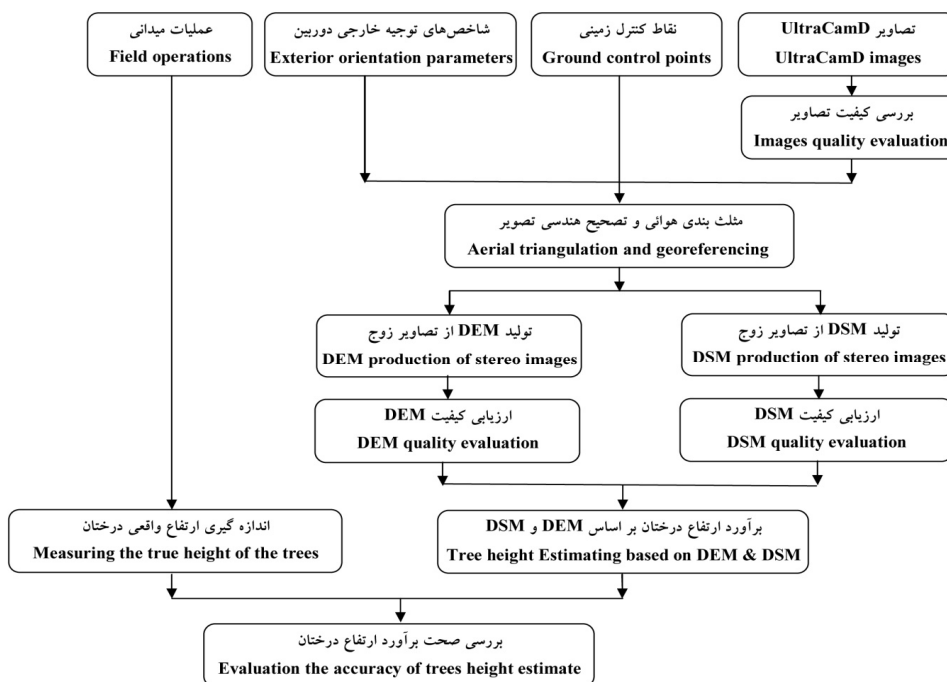
1- Canopy height model (CHM)

که در آن، n تعداد مشاهدات و H_i ، \hat{H}_i و \bar{H} به ترتیب مقدار ارتفاع برآورد شده، مقدار ارتفاع واقعیت زمینی و متوسط مقدار ارتفاع واقعیت زمینی می باشد. نمودار جریان‌ی روش تحقیق در شکل ۳ آورده شده است.

T جفتی نیز برای مقایسه اختلاف ارتفاع‌ها به تفکیک در دو گروه پهن‌برگان و سوزنی‌برگان استفاده شد.

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (H_i - \hat{H}_i)^2}{n}} \quad (2)$$

$$RMSE\% = \frac{\sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (H_i - \hat{H}_i)^2}{n}}}{\bar{H}} \times 100 \quad (3)$$



شکل ۳- نمودار جریان‌ی روش تحقیق.

Figure 3. Flowchart of research.

تصحیح هندسی: انطباق و همخوانی خوب مسطحاتی نقشه ۱:۱۰۰۰ رقومی منطقه با تصاویر تصحیح هندسی شده بیانگر دقت مناسب فرایند بوده است. همچنین مقایسه مختصات دقیق ۵ نقطه کنترلی مسطحاتی (از نقشه ۱:۱۰۰۰) که در فرایند تصحیح هندسی وارد نشده بودند، با مختصات این نقاط در تصویر تصحیح شده (۰/۲۲ پیکسل)، نیز گویای تطابق هندسی دقیق تصاویر بوده است. تطابق هندسی

نتایج و بحث

بررسی کیفیت: در بررسی چشمی تصاویر، ناهنجاری هندسی و رادیومتری بارزی مانند جابجایی پیکسل‌ها و کشیدگی غیرعادی در تصاویر مشاهده نشد اما دو نوار کم‌رنگ زرد و بنفش در موقعیت‌های مختلف تصاویر مشاهده شد (شکل ۴). در ادامه کار مشخص شد که این دو نوار رنگی بر فرآیند تصحیح هندسی و تولید DEM و DSM، تأثیری نداشته است.

دقیق تصاویر تصحیح‌شده با نقشه توپوگرافی، اطمینان لازم در مورد انجام تصحیح هندسی با صحت قابل قبول کسب شد. امکان دستیابی به یک تصحیح خوب در صورت وجود دانش فنی در پژوهش هیرشماگل و بوچر (۲۰۱۰) نیز تأیید شده است (۷).

تولید DEM و DSM: در این پژوهش DEM و DSM بر مبنای تصاویر زوج و به روش فتوگرامتری با اندازه پیکسل ۰/۵*۰/۵ متر تولید شدند. آماره‌های کمینه، بیشینه، میانگین و انحراف معیار در DEM به ترتیب ۱۳۸۳، ۱۴۴۸، ۱۴۱۰ و ۱۲/۶۹ متر بوده است. نتایج ارزیابی DEM بر پایه مقادیر ارتفاعی ۱۵ نقطه کنترل برگرفته از نقشه ۱:۱۰۰۰ شهر تهران در جدول ۱ آمده است.

به صورت دقیق امری مهم و یک پیش‌نیاز اساسی در تهیه DEM و DSM است. فرایند این تصحیح، کاری فنی است و هر چند که نرم‌افزارهایی برای آن تهیه شده است ولی نیاز به دانش فنی و درک و تجربه کافی از هندسه تصویر و فرآیند آن است، به طوری که در بعضی از مطالعات پیشین مجبور به حذف این مرحله از مطالعه شدند (۱۸). صحت تطابق هندسی به صورت مقایسه کمی مختصات ۵ نقطه شاهد از نقشه ۱:۱۰۰۰ شهر تهران به عنوان نقاط شاهد با مختصات آن‌ها در تصویر تصحیح‌شده و همچنین روی هم‌گذاری نقشه‌ها و تصاویر تصحیح‌شده مورد ارزیابی قرار گرفت. با توجه به مقدار RMSE براساس پنج نقطه شاهد (۰/۲۲ پیکسل) و همخوانی

جدول ۱- نتایج مقایسه ارتفاع ۱۵ نقطه کنترل؛ بر روی DEM مستخرج از نقشه توپوگرافی ۱:۱۰۰۰ با تصاویر هوایی زوج.

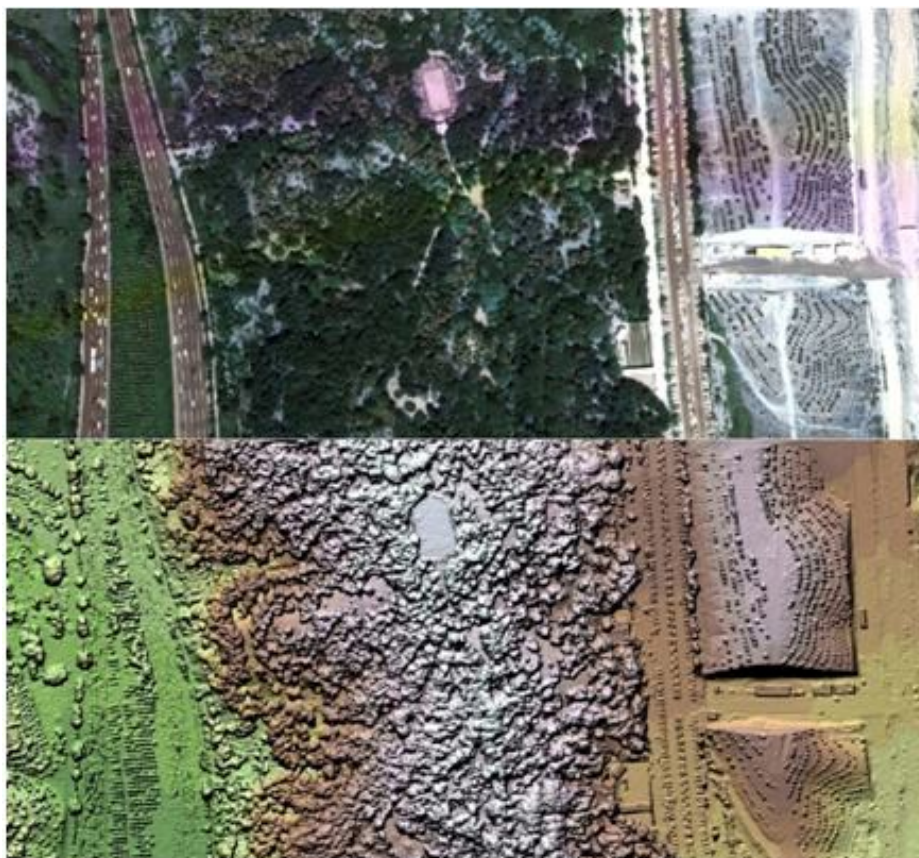
Table 1. Comparison of the height of 15 control points on the DEM; extracted from 1:1000 topographic map with stereo aerial imagery.

مقدار (متر) Value (m)	آماره The statistics
0.29	میانگین قدرمطلق اختلاف Average of absolute difference
1	حداکثر قدرمطلق اختلاف Maximum of absolute difference
0.01	حداقل قدرمطلق اختلاف Minimum of absolute difference
0.28	انحراف معیار قدرمطلق اختلاف The standard deviation of the absolute difference

به ترتیب ۷۰ و ۶۰ درصد می‌باشند، می‌تواند کمک بالارزشی برای تأمین داده‌های مورد نیاز جنگلداری علمی و دقیق باشد.

در شکل ۴ تصویر رنگی و DSM مربوط به قسمتی از پارک آورده شده است. در این DSM اراضی کاملاً مسطح از جمله زمین ورزش موجود در قسمت بالا تصویر دیده می‌شود. همچنین همه تک‌درختان در قسمت شرقی منطقه و حتی درختچه‌های کوچک کاشته شده بین دو بزرگراه در غرب تصویر نیز به وضوح مشخص شده‌اند.

صحت ارتفاعی مناسب DEM تهیه‌شده در این پژوهش (میانگین قدرمطلق اختلاف ارتفاع ۰/۲۹ متر) همسو با نتایج هله و هله (۲۰۰۹) است (۸) که نشانه کارا بودن رویکرد مورد استفاده به لحاظ نوع تصویر و روش کار می‌باشد. داشتن این چنین DEM دقیق برای کارهای مرتبط با جنگلداری به ویژه در سطوح کوچک بسیار دارای اهمیت است. این چنین DEM‌ها را نمی‌توان از حتی نقشه‌های توپوگرافی رقومی جنگل‌ها که معمولاً دارای مقیاس ۱:۲۵۰۰۰ و کوچک‌تر هستند، تهیه کرد. بنابراین استفاده از چنین تصاویری که حداقل دارای پوشش طولی و عرضی



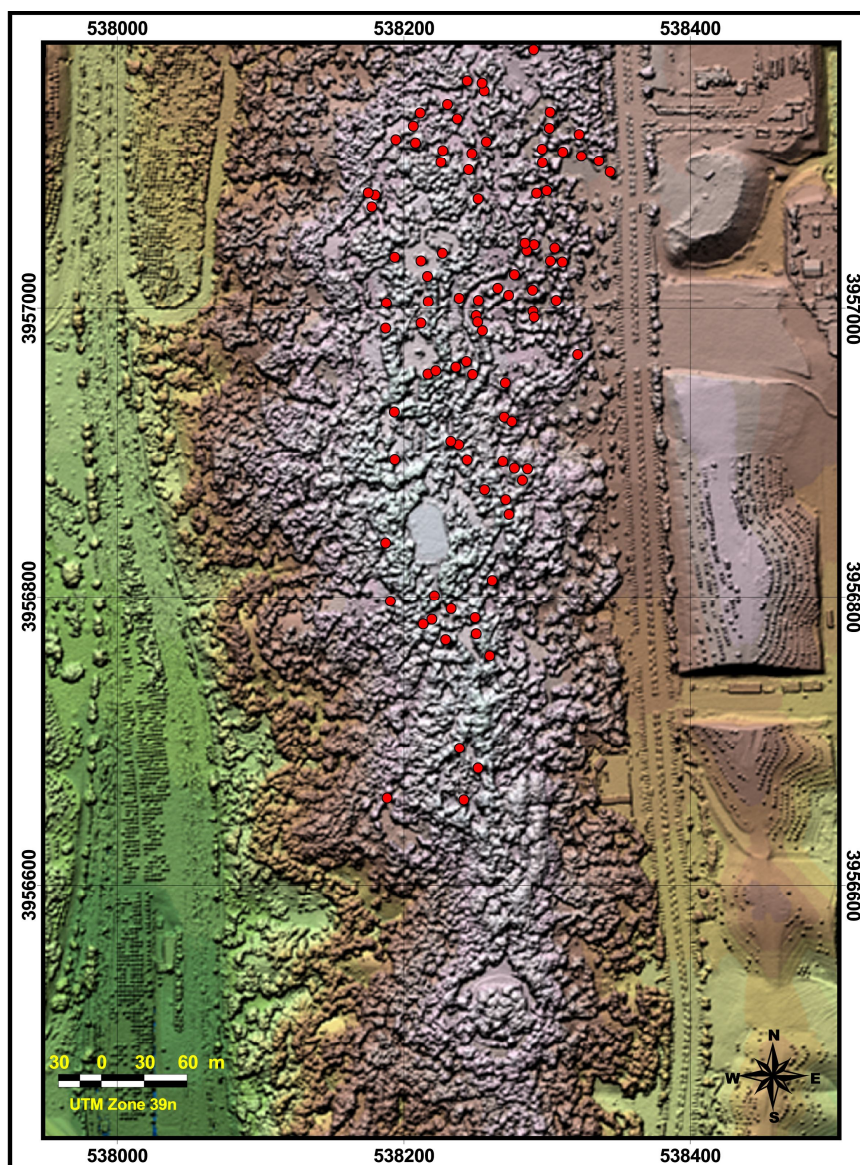
شکل ۴- تصویر رنگ طبیعی (RGB) (321) بخشی از منطقه که دارای دو نوار کمرنگ زرد و بنفش می باشد (بالا). مدل سایه روشن DSM همان قسمت (پائین).

Figure 4. True color composite of aerial imagery from a part of the study area with two yellow and purple stripes (up). The hillshaded DSM of the same area (down).

ساخته و تولید یک DSM با صحت زیاد را مشکل می سازد (۶).

برآورد ارتفاع درخت و مقایسه آن با واقعیت زمینی: نتایج آزمون شاپیرو- ویلک بیانگر نرمال بودن توزیع داده ها بود. نتایج مقایسه ارتفاع برآوردشده با ارتفاع اندازه گیری شده به تفکیک سوزنی برگان، پهن برگان و همه درختان با هم در جدول ۲ و نمودار توزیع ارتفاع برآوردشده در مقابل ارتفاع اندازه گیری شده همه درختان در شکل ۵ آورده شده است.

کیفیت DSM نه تنها به پارامترهای برداشت تصویر (ارتفاع پرواز، IMU و ...)، بلکه به عمق رادیومتری آن (۱۶-۱۲ بیت) (۹) و به توجیه داخلی و نقاط کنترل برای تصحیح هندسی، بستگی دارد (۱۴). تراکم نه چندان زیاد پوشش جنگلی منطقه مورد مطالعه، امکان رؤیت سطح لخت زمین (Bare Earth) در تصاویر را فراهم کرده بود. این نکته امکان انتخاب نقاط کنترل مناسب و تعداد زیادی نقاط گرهی را میسر نموده بود. در مقابل، تراکم زیاد جنگل شرایط کار برای انتخاب نقاط را سخت



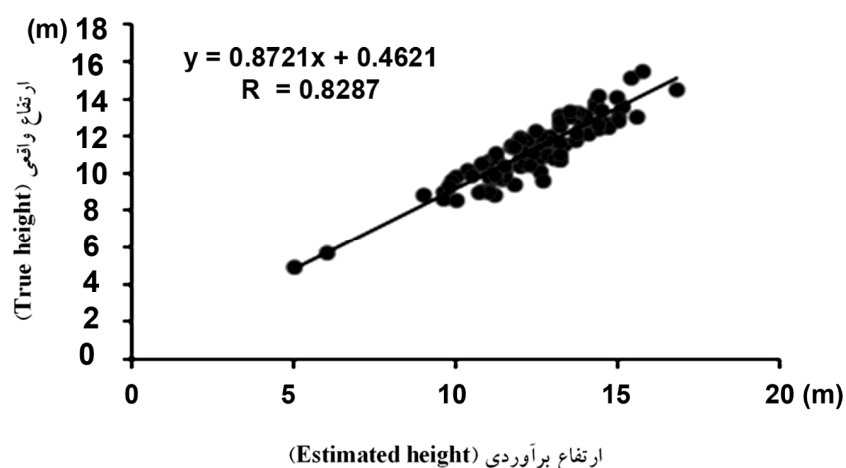
شکل ۵- موقعیت درختان مورد اندازه‌گیری بر روی نقشه سایه روشن پستی و بلندی‌های DSM محاسبه‌شده.

Figure 5. Position of the measured trees on hillshade map of the calculated DSM of the area.

جدول ۲- نتایج تحلیل ارتفاع برآوردشده، در ارتباط با ارتفاع واقعی اندازه‌گیری‌شده، به تفکیک سوزنی‌برگان، پهن‌برگان و همه درختان.

Table 2. The results of estimated height analysis, in relation to the actual measured height, for needles-leaved, broad-leaved and all trees.

همه درختان Total trees	پهن‌برگان Broad-leaved trees	سوزنی‌برگان Needle-leaved trees	آماره The statistics
0.83	0.89	0.77	R^2
1.35	1.3	1.41	RMSE (m)
10.86	10.46	11.35	NMPE (%)



شکل ۶- رابطه بین ارتفاع برآوردشده و ارتفاع واقعی اندازه‌گیری شده در مورد همه درختان.

Figure 6. The relationship between estimated and actual measured heights for all trees.

وجود نداشته است. اختلاف در برآورد ارتفاع پهن‌برگان نسبت به سوزنی‌برگان هر چند که کم بوده است (NMPE = ۰/۰۹ درصد) می‌تواند ناشی از کروی بودن تاج در مقایسه با نقطه‌ای بودن انتهای تاج بعضی از درختان سوزنی‌برگ باشد.

نتایج آزمون معنی‌داری t جفتی در سطح خطای ۵ درصد مربوط به تفکیک در دو گروه پهن‌برگان و سوزنی‌برگان نیز در جدول‌های ۳ و ۴ آمده است. براساس نتایج بین ارتفاع برآوردی و ارتفاع واقعی درختان در هر دو دسته از درختان اختلاف معنی‌داری

جدول ۳- نتایج آزمون T جفتی به تفکیک پهن‌برگان و سوزنی‌برگان.

Table 3. The results of paired t-test for broad-leaved and needle-leaved trees.

مقدار P P-value	مقدار T T-value	انحراف معیار Standard deviation	میانگین Mean	داده data
0.27	1.83	1.87	11.2	پهن‌برگان Broad-leaved
		2.19	12.3	ارتفاع واقعی Actual height
0.3	1.74	1.6	11.37	سوزنی‌برگان Needle-leaved
		1.4	12.55	ارتفاع واقعی Actual height

اندازه‌گیری شده این ۱۰۱ اصله درخت با ارتفاع برآوردی آن‌ها از DSM، ($R^2 = ۰.۸۳$ درصد) و همچنین پراکنش نقاط در شکل ۵ که مربوط به مقایسه ارتفاع برآوردی و ارتفاع واقعی می‌باشند، می‌توان گفت که یک رابطه خطی قوی بین ارتفاع برآوردی و ارتفاع

انتخاب ۱۰۱ اصله درخت به‌عنوان واقعیت زمینی باعث شد تا با توجه به سطح نسبتاً کوچک منطقه مورد مطالعه، واقعیت زمینی مناسبی برای بررسی هرچه بهتر صحت ارتفاع برآوردی توسط DSM در اختیار باشد. براساس نتایج مقایسه ارتفاع

ارتفاع درختان بر روی زمین‌های شیب‌دار خود مسأله‌ای است و نیازمند یافتن الگوریتم‌هایی در جهت کاهش اثر شیب زمین است (۲۰) و تراکم جنگل نیز خود مانعی برای محاسبه دقیق DEM که لازمه برآورد ارتفاع است، محسوب می‌شود.

یکی از دلایل کسب نتایج خوب از فرایند انطباق تصویر (خطا در حد ۰/۲۲ پیکسل) در این پژوهش را می‌توان ناشی از استفاده از تصاویر چند خط پرواز دانست، چرا که به بیان هیرشماگل و بوچر (۲۰۱۰) داشتن تصاویر از زوایای مختلف در رفع و کاهش خطاهای انطباق تصویر مؤثر است (۷).

نتیجه‌گیری کلی

بر پایه نتایج این پژوهش، تصحیح هندسی و تهیه تصاویر ارتو از این چنین تصاویر، هر چند مشکل ولی امکان انجام آن با صحت زیاد وجود دارد. از این تصاویر می‌توان در مناطق نسبتاً مسطحی مانند جنگل‌های شهری، باقی‌مانده جنگل‌های جلگه‌ای شمال و بخش‌های کم شیب جنگل‌های غرب کشور برای تعیین ارتفاع درختان به‌طور اجرایی استفاده کرد ولی قابلیت این تصاویر در جنگل‌های کوهستانی، پرتراکم و پرشیب شمال ایران باید مورد پژوهش و بررسی قرار گیرد.

واقعی، برقرار می‌باشد. همچنین مقادیر به نسبت اندک میانگین اختلاف ارتفاع برآوردی و ارتفاع واقعی (۱/۱۳ متر)، RMSE (۱/۳۵ متر) و NMPE (۱۰/۸۶ درصد)، نیز نمایانگر این است که برآورد ارتفاع با خطای کمی صورت گرفته است، ضمن این‌که بین ارتفاع واقعی و ارتفاع برآوردی اختلاف معنی‌داری هم وجود ندارد. این مطالب گواه بر این است که برآورد ارتفاع بر مبنای DSM در این چنین مناطق به نسبت هموار با صحت بالایی انجام گرفته و قابل قبول می‌باشد. کسب نتایج خوب در این پژوهش با نتایج مطالعه جارنستد و همکاران (۲۰۱۲) و نورمین و همکاران (۲۰۱۳) که DSM‌هایی براساس تصاویر هوایی رقومی دوربین UltraCam با همپوشانی و رویکردی مشابه پژوهش حاضر تولید و توانسته بودند ارتفاع درختان را با صحت خوبی برآورد کنند (RMSE به ترتیب ۱ و ۱/۹۴ متر) تولید کرده بودند، همخوانی دارد (۱۰ و ۱۴).

البته نمی‌توان انتظار داشت که چنین نتیجه رضایت‌بخشی در جنگل‌های کوهستانی و متراکم شمال ایران کسب گردد، چرا که توپوگرافی شدید، تصحیح هندسی دقیق این چنین تصاویر را دچار مشکل و بالطبع برآورد ارتفاع نیز می‌تواند همراه با خطای بیش‌تری باشد از سویی دیگر اندازه‌گیری

منابع

1. Ali, S.S., Dareb, P., and Jonesc, S.D. 2008. Fusion of remotely sensed multispectral imagery and lidar data for forest structure assessment at the tree level. The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences. XXXVII: 1089-1094.
2. Balenović, I., Seletković, A., Pernar, R., and Jazbec, A. 2015. Estimation of the mean tree height of forest stands by photogrammetric measurement using digital aerial images of high spatial resolution. Annals of Forest Research. 58: 1. 125-143.
3. Darvishsefat, A.A., Rafieyan, O., Babae Kafaki, S., and Mataji, A. 2010. Evaluation of UltraCam-D images capability for tree species identification using object-based method in the even-aged mixed forestation. Iranian J. of Forest. 2: 2. 165-176. (In Persian)
4. Ghasemi, A., Fallah, A., and Shataee Joibari, Sh. 2016. Evaluation of four algorithms for estimation of canopy cover of mangrove forests by using aerial imagery. J. of RS and GIS for Natural Resources. 23: 1-16.
5. Ghasemi Rozveh, A., Shataee Joibary, Sh., and Mohamadi, J. 2017. Capability investigation of digital aerial Ultra Cam-

- D images in identifying tree species in the Hyrcanian mixed forests (Case study: Shastkalate forest in Gorgan), *J. of Wood and Forest Sciences and Technology*. 24: 1. 77-89.
6. Hirschmugl, M. 2008. Derivation of forest parameters from Ultracam-D Data. PhD. Thesis. Graz University of Technology. 220p.
 7. Hirschmüller, H., and Bucher, T. 2010. Evaluation of digital surface models by semi-global matching. *DGPF Tagungsband*. 19: 571-580.
 8. Höhle, J., and Höhle, M. 2009. Accuracy assessment of digital elevation models by means of robust statistical methods. *ISPRS J. of Photogrammetry and Remote Sensing*. 64: 4. 398-406.
 9. Jacobsen, K. 2005. Photogrammetry and geoinformation trends in large scale mapping. In: Proceedings of the 1st annual map middle east conference, Geospatial information and knowledge economy, Dubai, UAE. 9p.
 10. Järnstedt, J., Pekkarinen, A., Tuominen, S., Ginzler, C., Holopainen, M., and Viitala, R. 2012. Forest variable estimation using a high-resolution digital surface model. *ISPRS J. of Photogrammetry and Remote Sensing*. 74: 78-84.
 11. Khorrami, R.A., Darvishsefat, A.A., Tabari Kochaksaraei, M., and Shataee Jouybari, Sh. 2014. Potential of LIDAR data for estimation of individual tree height of *Acer velutinum* and *Carpinus betulus*. *Iranian J. of Forest*. 6: 2. 127-140. (In Persian)
 12. Krause, S., Sanders, T.G.M., Mund, J.P., and Greve, K. 2019. UAV-based photogrammetric tree height measurement for intensive forest monitoring. *Remote Sensing*. 11: 7. 758-776.
 13. Mohammadi, J., Shataee Jourbary, Sh., Namiranian, M., and Næsset, E. 2017. Modeling biophysical properties of broad-leaved stands in the hyrcanian forests of Iran using fused airborne laser scanner data and UltraCam-D images. *International J. of Applied Earth Observation and Geoinformation*. 61: 32-45. (In Persian)
 14. Nurminen, K., Karjalainen, M., Yu, X., Hyypä, J., and Honkavaara, E. 2013. Performance of dense digital surface models based on image matching in the estimation of plot-level forest variables. *ISPRS J. of Photogrammetry and Remote Sensing*. 83: 104-115.
 15. Perko, R., Raggam, H., Gutjahr, K., and Schardt, M. 2010. The capabilities of terrasar-x imagery for retrieval of forest parameters. P 452-456, In: W. Wagner and B. Székely (eds), *ISPRS TC VII Symposium - 100Years ISPRS*, Vienna, Austria.
 16. Poli, D., and Caravaggi, I. 2012. Digital surface modelling and 3D information extraction from spaceborne very high resolution stereo pairs. *JRC Scientific and Technical Reports*, Ispra, Luxembourg. 28p.
 17. Rafieyan, O., Darvishsefat, A.A., and Babae Kafaki, S. 2009. Evaluation of UltraCam-D digital aerial images classification object-based method with the aim of using in forest (investigation of images from the Northern Forests). Third National Forest Conference, 12-14 May, Iran. (In Persian)
 18. Rajabpour Rahmati, M., Darvishsefat, A.A., Baghdadi, N., Namiranian, M., and Soofi Mariv, H. 2015. Estimation of forest canopy height in mountainous areas using ICESat-GLAS data. *Iranian J. of Forest and Poplar Research*. 23: 1. 90-103. (In Persian)
 19. Rezayan, F., and Erfanfard, Y. 2016. Estimating biophysical parameters of Persian oak coppice trees using UltraCam-D airborne imagery in Zagros semi-arid woodlands. *J. of Arid Environments*. 133: 10-18.
 20. Shabanipoor, M., Darvishsefat, A.A., Rafieyan, O., and Etemad, V. 2014. Investigation on the possibility of tree species identification using digital aerial images by object-based classification. *J. of Forest and Wood Products*. 67: 1. 21-32. (In Persian)
 21. Sohrabi, H., Zobeiri, M., and Hosseini, S.M. 2009. Preparation of aerial volume table using visual interpretation of digital aerial images. *Iranian J. of Forest and Wood Products*. 62: 3. 261-274. (In Persian)
 22. Tavakol, M.H. 1977. Application of aerial photographs quantitative investigations of OAK forests Western Iran (Nozian area). M.Sc. Thesis. University of Tehran. 142p. (In Persian)



Accuracy of tree height estimation using digital aerial imagery UltraCam (Case study: Taleghani Park, Tehran)

*A.A. Darvishsefat¹, M. Armandi² and O. Raffieyan³

¹Professor, Dept. of Forestry and Forest Economics, Faculty of Natural Resources, University of Tehran, Karaj, Iran,

²M.Sc. Graduated, Dept. of Forestry and Forest Economics, Faculty of Natural Resources, University of Tehran, Karaj, Iran,

³Assistant Prof., Dept. of Environmental Engineering, Faculty of Agriculture and Natural Resources, Tabriz Branch, Islamic Azad University, Tabriz, Iran

Received: 05.17.2019; Accepted: 09.07.2019

Abstract

Background and Objectives: Measuring tree height in forest is time and cost-consuming especially in vast areas. Therefore, using digital aerial images are proposed. The main objective of this research is evaluating capability of such images for estimating trees height.

Materials and Methods: This research was done based on nine UltraCam-D aerial images with 70% end lap overlay and 60% side lap, 7 cm pixel size and scale of 1:8000 in Taleghani Park of Tehran. The images were geometrically corrected using aerial triangulation method and then digital elevation model (DEM) and digital surface model (DSM) were produced using LPS and INPHO software respectively. Then trees height was estimated by the difference between the two models. To estimate the accuracy of DEM, the elevation of 15 points from the 1:1000 topographic map of Tehran were extracted and compared with the DEM elevation values at the same points. After that, calculating 101 trees height, were performed by subtracting values of DSM and DEM for each tree. To check the precision of calculated height, heights of these trees were measured by Suunto in the field and were compared with the estimated height. The trees include various species of conifers and deciduous. Comparison of estimated heights (calculated) with ground values (measured heights) was performed using simple linear regression and, R^2 , RMSE and RMSE%. The pairwise T-test was used to compare height differences in two groups of broad-leaved and needle-leaved trees.

Results: Due to the RMSE value based on the five control points (0.22 pixels), and the exact correspondence of the corrected images with the topographic map, the reliability of the geometric correction was obtained with acceptable accuracy. The low density of forest cover in the studied area allowed the ground to be seen in the images. This point made it possible to select the right control points and the number of node points. Achieved results, high linear correlation between actual height value and calculated height ($R^2=82\%$), RMSE (1.35 m) and insignificant average difference between calculated and actual height (1.13 m) indicate that estimated height based, has acceptable accuracy. In addition, no significant difference was observed between precision of estimated conifers and deciduous height.

Conclusion: Based on the results, this approach can be used operationally to determine height of the trees in relatively flat areas such as urban forests and flat Zagros forests but its capability should be investigated at mountainous areas, high density and high-slope forests.

Keywords: Tree height, Digital elevation model (DEM), Digital surface model (DSM), UltraCam-D

*Corresponding author: adarvish@ut.ac.ir