

تأثیر توان تفکیک مکانی تصاویر هوایی پهپاد در برآورد ارتفاع درختان بنه (*Pistacia atlantica* Desf.)

سید یوسف عرفانی فرد^{۱*}، افروز چناری^۲، مریم دهقانی^۳ و فرشاد امیراصلانی^۴

*۱- نویسنده مسئول، دانشیار، گروه سنجش از دور و GIS، دانشکده جغرافیا، دانشگاه تهران، تهران، ایران. پست الکترونیک: erfani@ut.ac.ir

۲- کارشناس ارشد، بخش منابع طبیعی و محیط زیست، دانشکده کشاورزی، دانشگاه شیراز، شیراز، ایران

۳- دانشیار، بخش مهندسی عمران و محیط زیست، دانشکده مهندسی، دانشگاه شیراز، شیراز، ایران

۴- دانشیار، گروه سنجش از دور و GIS، دانشکده جغرافیا، دانشگاه تهران، تهران، ایران

تاریخ دریافت: ۱۳۹۷/۱۱/۱۴ تاریخ پذیرش: ۱۳۹۸/۰۲/۲۴

چکیده

برآورد ویژگی‌های زیست‌سنجی مانند ارتفاع تک‌درختان که به‌طور مستقیم روی تصاویر هوایی پهپادها قابل مشاهده نیستند، دشوار است، بنابراین پژوهش پیش‌رو با هدف معرفی روشی برای برآورد ارتفاع تک‌درختان بنه (*Pistacia atlantica* Desf.) انجام شد. یک محدوده ۴۵ هکتاری از جنگل تحقیقاتی بنه استان فارس با پهپاد فانتوم ۴ تصویربرداری شد. سپس، الگوریتمی پیشنهاد شد که روی مدل رقومی سطح (DSM) منطقه، پس از شناسایی خودکار هر درخت، تفاضل ارتفاع بین پیکسل زمین و پیکسل نوک تاج را به‌عنوان ارتفاع درخت در نظر بگیرد. به این ترتیب، ارتفاع ۱۰۰ درخت بنه روی DSM با توان‌های تفکیک مکانی ۳/۴۷، ۱۰، ۲۰، ۴۰، ۶۰، ۸۰ و ۱۰۰ سانتی‌متر برآورد شد. نتایج نشان داد که بیشترین ضریب تبیین (۰/۸۹) و کمترین جذر میانگین مربعات خطای نسبی (۱۱/۸ درصد) مربوط به ارتفاع‌های برآوردشده در توان تفکیک مکانی ۳/۴۷ سانتی‌متر بود. همچنین، بین میانگین‌های ارتفاع برآوردی و واقعی در سه توان تفکیک مکانی ۳/۴۷، ۱۰ و ۲۰ سانتی‌متر، اختلاف معنی‌داری مشاهده نشد. برآورد ارتفاع درختان بنه در توان تفکیک مکانی ۳/۴۷ سانتی‌متر اندکی بیشتر از مقدار واقعی (امتیاز اریبی ۱/۱۵)، در توان تفکیک مکانی ۱۰ سانتی‌متر نزدیک به مقدار واقعی (امتیاز اریبی ۱/۰۱) و در موارد دیگر، کمتر از مقدار واقعی بود. به‌طور کلی، برآورد ارتفاع درختان بنه با استفاده از تصاویر هوایی پهپاد فانتوم ۴ امکان‌پذیر است. در این بین، تصاویر هوایی با توان تفکیک مکانی ۱۰ سانتی‌متر، توانایی بیشتری در برآورد ارتفاع درختان بنه داشتند.

واژه‌های کلیدی: استان فارس، جنگل تحقیقاتی بنه، مدل رقومی سطح، هوایمای بدون سرنشین.

مقدمه

طبقه‌بندی شده است. بنه (*Pistacia atlantica* Desf.) یکی از گونه‌هایی است که به‌صورت پراکنده و تک‌درخت در این ناحیه رویشی گسترش دارد. این گونه، نقشی بسیار مهم در تثبیت خاک، جلوگیری از فرسایش و به‌وجود آوردن ریزاقلیم‌ها دارد. بنه در بسیاری از نقاط ناحیه رویشی ایران تورانی به‌همراه گونه‌های مختلف، توده‌های آمیخته را

پوشش گیاهی رویشگاه‌های خشک و نیمه‌خشک را درختان و درختچه‌هایی تشکیل می‌دهند که به‌صورت پراکنده در این مناطق گسترش یافته‌اند. رویشگاه ایران-تورانی نیز که از مهم‌ترین منابع زیست‌شناختی و ذخایر ژنتیک ایران است، به‌عنوان رویشگاهی خشک و نیمه‌خشک

پژوهشگران به این موضوع اشاره می‌کنند که بسیاری از داده‌های تهیه‌شده از سکوهایی مانند ماهواره‌ها و هواپیماها به دلیل توان تفکیک مکانی نامناسب، کارایی لازم را در برآورد ارتفاع درختان ندارند (Li et al., 2012; Gulbe & Rokhmana, 2015; Mednieks, 2013). هرچند پژوهش‌های ارزشمندی در زمینه برآورد ارتفاع درختان با استفاده از داده‌های لیدار (Rajabpour Rahmati et al., 2018; Lee & Lee, 2015) و نیز داده‌های راداری و نوری (Amini & Sadeghi, 2013) انجام شده است، اما عدم دسترسی به این داده‌ها در همه رویشگاه‌ها بر گسترش کاربرد آن‌ها تأثیر گذاشته است. برآورد ارتفاع روی تصاویر ماهواره‌ای نیز برای گروه‌های درختی امکان‌پذیر است (Hansen et al., 2016) و اندازه‌گیری ارتفاع تک‌درختان روی بسیاری از آن‌ها مقدور نیست (Gulbe & Mednieks, 2013). از سوی دیگر، برآورد ارتفاع تک‌درختان با استفاده از طول سایه روی تصاویر هوایی با توان تفکیک مکانی زیاد (Rezayan & Erfanifard, 2016) وقت‌گیر است و در سطوح گسترده امکان‌پذیر نیست، بنابراین استفاده از پهپادها به دلیل تولید تصاویر هوایی استریو با توان تفکیک مکانی زیاد و ارائه مدل سه‌بعدی تک‌درختان می‌تواند گزینه‌ای مناسب در برآورد خودکار این ویژگی زیست‌سنجی به‌شمار آید (Mohan et al., 2017).

باتوجه به قابلیت‌های ویژه پهپادها در بررسی پوشش گیاهی که بیشتر اشاره شد، تاکنون پژوهش‌های زیادی در این زمینه انجام شده است. از تصاویر هوایی پهپاد در برآورد مساحت تاج درختان (Chenari et al., 2017) و تهیه مدل ارتفاعی تاج (Goodbody et al., 2017; Mohan et al., 2017; Panagiotidis et al., 2017) در رویشگاه‌های مختلف استفاده شده است. همچنین، این داده‌ها در برآورد ارتفاع درختان به‌کار گرفته شده‌اند (Zarco-Tejada et al., 2014; Lin et al., 2015; Birdal et al., 2017; Iizuka et al., 2019; Puliti et al., 2018). این پژوهش‌ها نشان می‌دهند که برآورد ارتفاع درختان روی تصاویر هوایی پهپاد با جذر میانگین مربعات خطا (RMSE) حدود ۰/۲ تا ۱/۲

تشکیل می‌دهد. مدیریت توده‌های خالص و آمیخته بنه که بوم‌سازگانی آسیب‌پذیر دارد، یکی از اهداف مهم مدیریت پایدار پوشش گیاهی در این ناحیه است (Marvie, 2011; Sagheb Talebi et al., 2014; Mohadjer, 2011). اولین گام در مدیریت پایدار پوشش گیاهی، دستیابی به اطلاعات دقیق و به‌روز است. از آنجایی که تک‌درختان بنه در اجتماعات کوچک و بزرگ با تراکم کم پراکنده شده‌اند و داده‌برداری میدانی از این تک‌درختان، زمان‌بر و پرهزینه است، استفاده از داده‌های سنجش‌ازدور در مدیریت آن‌ها می‌تواند بسیار مفید و کارآمد باشد (Pir Bavaghar, 2011; Yousefi et al., 2013; Miri et al., 2017).

با هدف استفاده از فناوری سنجش‌ازدور در مدیریت پوشش گیاهی، استفاده از پهپادها (پرنده هدایت‌پذیر از دور) یا هواپیمای بدون سرنشین (UAV) به‌سرعت رو به گسترش است (Zarco-Tejada et al., 2014; Feduck et al., 2018). برخی از ویژگی‌های پهپادها مانند انعطاف‌پذیری در برنامه‌ریزی پرواز، تعیین مشخصات تصاویر حاصل متناسب با نیاز کاربر و قابلیت دسترسی باعث شده است تا استفاده از آن‌ها گسترش یابد (Birdal et al., 2017; Goodbody et al., 2017).

برآورد ویژگی‌های کمی پوشش گیاهی مانند ارتفاع تک‌درختان که امکان مشاهده مستقیم آن‌ها روی داده‌های سنجش‌ازدور وجود ندارد، همواره یکی از چالش‌های پیش‌روی پژوهشگران بوده است (Duncanson & Iizuka et al., 2018; Dubayah, 2018). اگرچه ارتفاع تک‌درختان در ناحیه رویشی ایران- تورانی به دلیل تغییرهای اندک شاید از دیدگاه مدیران اجرایی جزء شاخص‌های پراهمیت نباشد، اما پژوهشگران (Lee et al., 2017; Panagiotidis et al., 2016) اعتقاد دارند که این ویژگی از دیدگاه بوم‌شناختی، یکی از شاخص‌های مهم رشد در پوشش گیاهی به‌شمار می‌رود و برآورد آن به‌منظور ارزیابی تغییرات ساختار عمودی اجتماعات گیاهی ضروری است. اندازه‌گیری ارتفاع نه‌تنها در عرصه دشوار است، بلکه

تهیه نقشه کاربری اراضی (Fisher et al., 2018) و زی توده روزمینی (Deo et al., 2018) انجام شده است. پژوهش پیش رو بر مبنای این فرضیه انجام شد که برآورد ارتفاع تک درختان بنه روی تصاویر هوایی پهپاد امکان پذیر است. به منظور آزمون این فرضیه، ارتفاع تک درختان بنه در جنگل تحقیقاتی بنه استان فارس روی تصاویر هوایی پهپاد برآورد شد و نتایج با مقدار واقعی آن‌ها مقایسه شدند. تعیین توان تفکیک مکانی بهینه برای برآورد ارتفاع درختان بنه از دستاوردهای این پژوهش بود. تاکنون در کمتر پژوهشی به این موضوع پرداخته شده است که هنگام استفاده از پهپاد، امکان برآورد ارتفاع از DSM تصاویر هوایی وجود دارد. همچنین، توان تفکیک مکانی مناسب برای اندازه‌گیری ارتفاع تک درختان چقدر است که از این نظر، پژوهش پیش رو، نوآوری دارد. نتایج این پژوهش می‌تواند در برنامه‌ریزی برای استفاده از پهپادها در اندازه‌گیری ارتفاع درختان بنه در منطقه مورد مطالعه و بخش‌هایی از ناحیه رویشی ایران- تورانی با شرایط مشابه استفاده شود.

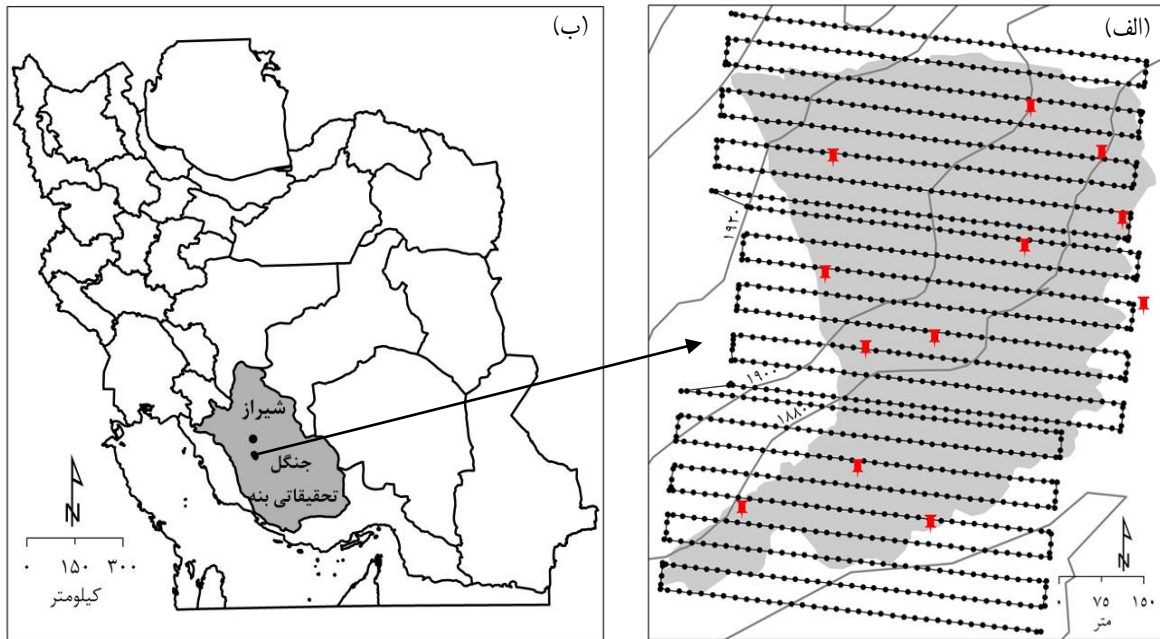
مواد و روش‌ها

مشخصات منطقه مورد مطالعه

در این پژوهش، بخشی از جنگل تحقیقاتی بنه فیروزآباد که در جنوب غربی استان فارس قرار دارد، انتخاب شد. این عرصه در طول جغرافیایی $30^{\circ} 52'$ تا $40^{\circ} 52'$ شرقی و عرض جغرافیایی 29° تا $15' 29^{\circ}$ شمالی قرار دارد (Owji & Hamzeshpour, 2012). جنگل تحقیقاتی بنه با مساحت کل ۹۳۷۴ هکتار و متوسط ارتفاع از سطح دریای ۱۹۲۰ متر، از توده‌های خالص و آمیخته درختان بنه با ارتفاع‌های متفاوت پوشیده شده است. بخشی از این جنگل تحقیقاتی که از جنوب به جاده شیراز- فیروزآباد، از شرق و غرب به اراضی کشاورزی و از شمال به کوه منتهی می‌شود و وسعت آن ۴۵ هکتار است، با استفاده از پهپاد تصویربرداری شد. ارتفاع متوسط منطقه حدود ۱۹۰۰ متر، جهت آن شرقی و شیب آن کمتر از هفت درصد است (شکل ۱).

متر و همبستگی $0/8$ تا $0/9$ امکان پذیر است. اگرچه Zarco-Tejada و همکاران (۲۰۱۴) ارتفاع درختان باغ زیتون در جنوب اسپانیا را برآورد کردند، اما در پژوهش‌های دیگر، امکان برآورد ارتفاع تک درختان روی تصاویر هوایی پهپادها به ویژه در پوشش گیاهی طبیعی بررسی نشده است. علاوه بر این، در بسیاری از پژوهش‌ها از تفاضل مدل رقومی سطح (DSM) و مدل رقومی زمین (DTM) برای برآورد ارتفاع تاج پوشش گروهی از درختان استفاده شده است. هرچند که Zarco-Tejada و همکاران (۲۰۱۴) تصاویر هوایی تا توان تفکیک مکانی ۳۰ سانتی‌متر را برای اندازه‌گیری ارتفاع درختان زیتون مناسب دانستند، اما در بیشتر پژوهش‌ها، توان تفکیک مکانی بهینه به منظور اندازه‌گیری ارتفاع درختان بررسی نشده است.

به طور کلی، هرگونه اندازه‌گیری و برآورد با استفاده از داده‌های سنجش از دور متأثر از مشخصه‌های این داده‌ها است. یکی از این مشخصه‌ها، توان تفکیک مکانی است که بر درستی برآورد ویژگی‌های زیست‌سنجی درختان تأثیر زیادی دارد (Franklin, 2001; Schowengerdt, 2007). از آنجایی که برنامه‌ریزی برای تهیه تصاویر هوایی به وسیله پهپاد به طور کامل در اختیار کاربر است، وی می‌تواند با تغییر ارتفاع پرواز پهپاد، اندازه تفکیک مکانی را متناسب با اهداف پژوهش تعیین کند. اگرچه افزایش توان تفکیک مکانی تصویر هوایی، امکان مشاهده جزئیات بیشتری از پدیده‌ها را فراهم می‌کند، اما با افزایش این مشخصه، حجم داده‌ها به قدری افزایش می‌یابد که پردازش آن‌ها را با مشکل مواجه می‌سازد. این موضوع موجب کاهش مساحت قابل برداشت می‌شود، بنابراین ضروری است که مقدار و نحوه تأثیر توان تفکیک مکانی بر صحت و دقت برآورد ارتفاع درختان روی تصاویر هوایی پهپاد ارزیابی شود. آگاهی از این موضوع، امکان برنامه‌ریزی کارآمدتر در تهیه تصاویر هوایی به وسیله پهپاد را ممکن می‌سازد. کاهش توان تفکیک مکانی داده‌های سنجش از دور با استفاده از بازنمونه‌گیری مکانی (Spatial resampling) و مطالعه تأثیر آن بر برآوردهای کمی مانند



شکل ۱- موقعیت مکانی جنگل تحقیقاتی بنه، خطوط پرواز پهپاد و مرکز تصاویر هوایی (خطوط و دایره‌های مشکی) و نقاط کنترل زمینی (نشان‌های قرمز) (الف) در ایران و استان فارس (ب)

تصویربرداری

پهپاد کوادروتور فانتوم ۴ (DJI Phantom 4) با قابلیت صعود و فرود عمودی برای تصویربرداری استفاده شد. این پهپاد با وزن ۱۳۸۰ گرم، امکان ثبت عکس‌های ۱۲ مگاپیکسلی (۴۰۰۰×۳۰۰۰ پیکسل) خام در سه باند طیفی قرمز، سبز و آبی و با فرمت JPEG را دارد. دوربین فانتوم ۴ که یک لنز غیرکروی با زاویه دید ۹۴ درجه (f/2.8) دارد، بر روی یک سیستم لرزش‌گیر و پایدارساز سه‌محوره حرفه‌ای نصب شده است تا مانع لرزش دوربین و انحراف در عکس‌ها شود. استفاده ترکیبی از سامانه موقعیت‌یاب جهانی (Global Positioning System: GPS) و سامانه ماهواره‌ای ناوبری جهانی (Global Navigation Satellite System: GLONASS) در این وسیله باعث می‌شود تا با اتصال سریع به ۲۴ ماهواره، به‌طور کامل موقعیت پهپاد از نقطه شروع شناسایی شود و ارتباط آن با کاربر در طول پرواز حفظ شود (www.dji.com). در مهرماه ۱۳۹۵ در منطقه مورد مطالعه، تصویربرداری

در ۲۵ خط پرواز با هم‌پوشانی طولی ۷۰ و عرضی ۲۰ درصد در ارتفاع ۷۰ متر بالاتر از ارتفاع متوسط زمین انجام شد. مسیر پرواز از قبل بر روی پهپاد برنامه‌ریزی شده بود و تصویربرداری به‌صورت خودکار انجام شد. برای پوشش کل محدوده مورد بررسی (۴۵ هکتار)، ۱۰۷۶ تصویر با توان تفکیک مکانی ۳/۴۷ سانتی‌متر تهیه شد. ۱۲ نقطه کنترل زمینی نیز با استفاده از GPS سه‌فرکانسه Leica Viva GS15 به‌روش حرکتی به‌موقع (Real Time Kinematic: RTK) و با دقت هشت میلی‌متر در کل منطقه مورد مطالعه به‌منظور زمین‌مرجع‌سازی برداشت شد (www.leica-geosystems.com).

روش پژوهش

در داده‌برداری میدانی، موقعیت مکانی هر درخت نیز با استفاده از GPS سه‌فرکانسه Leica Viva GS15 به‌روش RTK ثبت شد. همچنین، ارتفاع دختان بنه با استفاده از شیب‌سنج سونتو و رابطه ۱ اندازه‌گیری شد.

وجود چهار نقطه و امکان برازش بیشتر از یک صفحه بر آن‌ها، بهترین صفحه با استفاده از روش حداقل مربعات انتخاب شد و به‌عنوان DTM استفاده شد (Li et al., 2004). از آنجایی که حداقل ارتفاع درختان بنه در منطقه مورد مطالعه ۱/۳ متر بود، تمام پیکسل‌هایی که روی DTM، ارتفاع بیشتر از این مقدار داشتند، کد یک و بقیه کد صفر گرفتند. سپس با دستور bwconncomp پیکسل‌های مرتبط به هم به‌عنوان یک درخت شناسایی شدند. با توجه به لایه موقعیت مکانی ۱۰۰ درخت بنه انتخاب شده به صورت تصادفی، درختان روی DSM مشخص شدند و در مرکز هر گروه از پیکسل‌های معرف هر درخت، اختلاف ارتفاع بلندترین پیکسل با زمین اطراف آن به‌عنوان ارتفاع هر درخت در نظر گرفته شد.

به‌منظور ارزیابی صحت مقادیر ارتفاع برآورد شده از آزمون t جفتی و برای ارزیابی دقت از سه شاخص RRMSE (Relative RMSE)، کارایی مدل (ME) و امتیاز اریبی (BS) استفاده شد (رابطه‌های ۲ تا ۴). از ضریب همبستگی اسپیرمن و نمودار یک‌به‌یک نیز برای ارزیابی روش به‌کار رفته استفاده شد.

$$H = a(\operatorname{tg} \alpha - \operatorname{tg} \beta) \quad (۱)$$

که در آن: H ارتفاع درخت، a فاصله تا درخت و α و β به ترتیب زاویه نوک و بن درخت هستند (Zobeiry, 2000). پهپادها قابلیت ثبت ارتفاع عوارض سطح زمین را نیز دارند، بنابراین در جریان پردازش تصاویر، امکان تولید DSM با استفاده از تصاویر استریو حاصل از پهپاد و اطلاعات همراه آن وجود دارد. با توجه به هدف این پژوهش که بررسی تصاویر هوایی حاصل از پهپاد در برآورد خودکار ارتفاع درختان بنه و همچنین ارزیابی تأثیر تغییر توان تفکیک مکانی این تصاویر بر دقت و صحت ارتفاع‌های برآورد شده بود، با تغییر اندازه توان تفکیک مکانی، راست‌عکس (Orthophoto) و شش DSM با توان تفکیک ۱۰، ۲۰، ۴۰، ۶۰، ۸۰ و ۱۰۰ سانتی‌متر با روش نزدیک‌ترین همسایه نیز تولید شدند که هرکدام به صورت جداگانه در نرم‌افزار MATLAB 2015b تجزیه و تحلیل شدند. با توجه به حجم زیاد DSM منطقه مطالعاتی (حدود ۲/۵ گیگابایت) و همچنین اجرای مرحله تخمین DTM، DSM به نه زیربخش تقسیم شد و برای هر زیربخش DTM تهیه شد. در هر زیربخش به‌منظور تهیه DTM، براساس مختصات چهار گوشه، یک صفحه برازش داده شد. با توجه به

$$RRMSE = \frac{\sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (\hat{y}_i - y_i)^2}}{\bar{y}} \times 100 \quad (۲)$$

$$ME = \frac{|\sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2 - \sum_{i=1}^n (\hat{y}_i - \bar{y})^2|}{\sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2} \quad (۳)$$

$$BS = \frac{\sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2}{\sum_{i=1}^n (\hat{y}_i - \bar{y})^2} \quad (۴)$$

بیشتر از مقدار واقعی برآورد شده است و در صورت کمتر بودن BS از یک، یعنی مقدار ارتفاع کمتر برآورد شده است (Yim et al., 2011; Bennet et al., 2013).

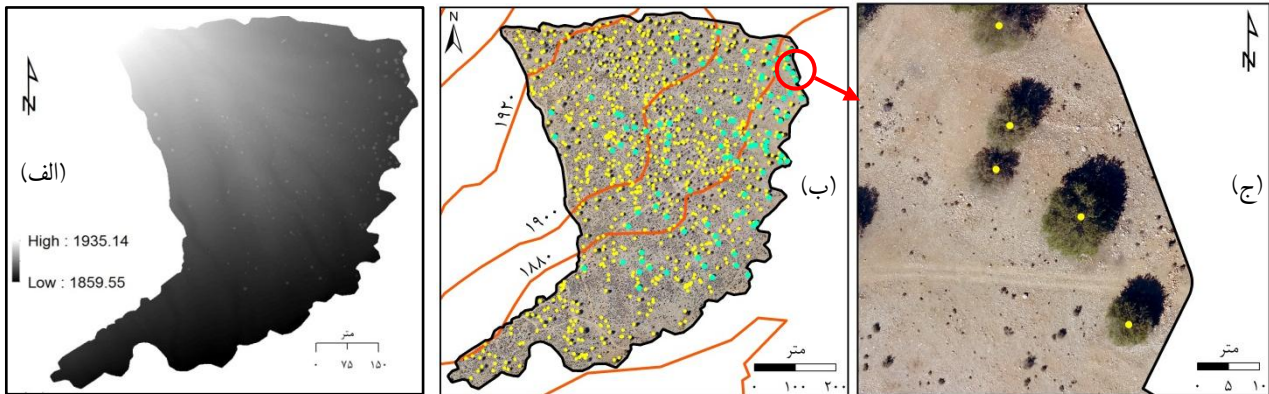
نتایج

در منطقه مورد مطالعه، ۸۷۵ درخت بنه با تراکم ۱۹/۵ پایه

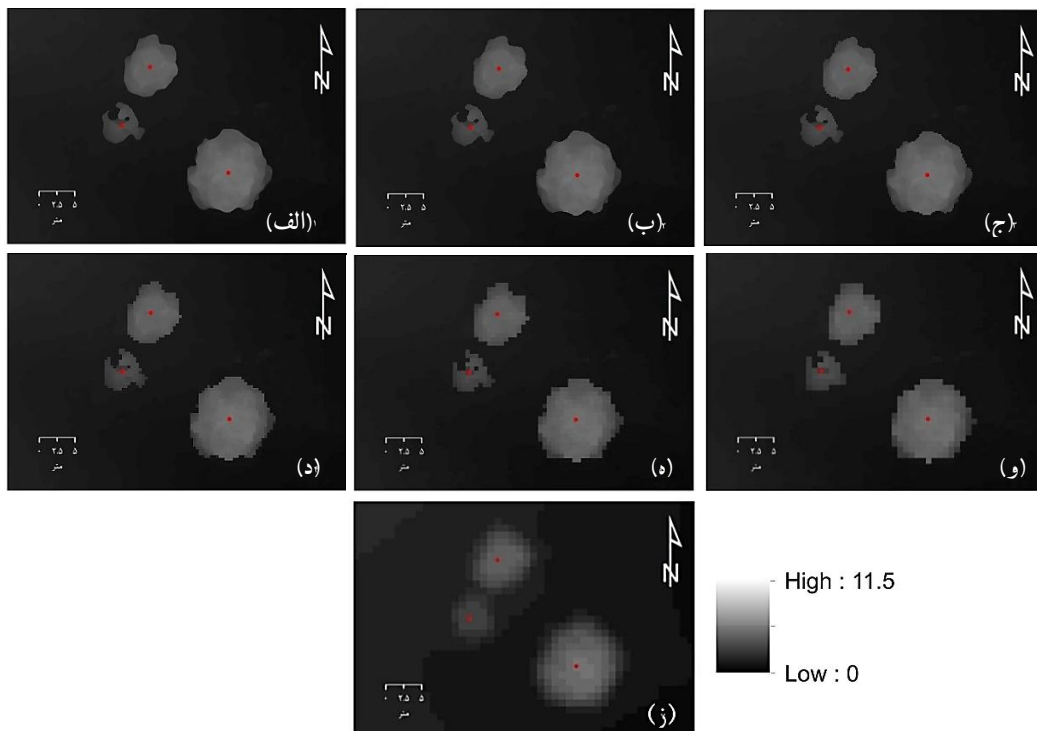
که در آن‌ها: y_i : ارتفاع واقعی، \hat{y}_i : ارتفاع برآوردی، n : تعداد نمونه و \bar{y} : میانگین ارتفاع واقعی است. هرچه مقدار RRMSE به صفر نزدیک‌تر باشد، مدل کارآمدتر است. مقدار $ME = 1$ بیانگر کارایی بسیار خوب مدل است، درحالی‌که مقدار منفی آن به معنی رد کارایی مدل است. اگر مقدار BS بیشتر از یک باشد، به این معنا است که ارتفاع

با استفاده از GPS سه فرکانسه و با دقت هشت میلی متر انجام شد و همچنین توان تفکیک مکانی بسیار زیاد تصاویر هوایی (۳/۴۷ سانتی متر) باعث شد تا تمام ۱۰۰ درخت بنه انتخاب شده که به صورت انفرادی و تراکم کم در منطقه مورد مطالعه پراکنده شدند، شناسایی شوند (شکل ۲-ب، ج).

در هکتار نقشه برداری شدند. تصویر راست عکس با RMSE هشت سانتی متر و DSM با دامنه ارتفاعی ۱۸۵۹/۵ تا ۱۹۳۵/۱ متر تهیه شد (شکل ۲-الف). تعیین موقعیت مکانی درختان بنه در داده برداری میدانی و نقاط کنترل زمینی مورد نیاز در تهیه راست عکس منطقه مورد مطالعه (شکل ۲-ب) که



شکل ۲- DSM منطقه مطالعاتی با توان تفکیک مکانی ۳/۴۷ سانتی متر (الف)، موقعیت مکانی درختان بنه ثبت شده در داده برداری میدانی (نقاط زرد)، ۱۰۰ درخت بنه انتخاب شده به صورت تصادفی (نقاط سبز آبی) و خطوط میزان (خطوط نارنجی) روی راست عکس منطقه مطالعاتی (ب) و تطابق موقعیت ثبت شده درختان بنه روی راست عکس منطقه مطالعاتی (ج)



شکل ۳- درختان بنه شناسایی شده در بخشی از DSM تسطیح شده منطقه مورد مطالعه با توان تفکیک مکانی ۳/۴۷ (الف)، ۱۰ (ب)، ۲۰ (ج)، ۴۰ (د)، ۶۰ (ه)، ۸۰ (و) و ۱۰۰ (ز) سانتی متر

درخت بنه که به طور تصادفی انتخاب شده بودند، روی DSM با توان‌های تفکیک مکانی ۳/۴۷، ۱۰، ۲۰، ۴۰، ۶۰، ۸۰ و ۱۰۰ سانتی‌متر برآورد شد. خلاصه این نتایج در جدول ۱ آمده است. این یافته‌ها نیز نشان داد که با کاهش توان تفکیک مکانی، برآورد مقدار ارتفاع تحت تأثیر قرار می‌گیرد. به‌ویژه اینکه میانگین برآوردشده روی DSM در همه توان‌های تفکیک مکانی کمتر از میانگین واقعی بود. همچنین، انحراف معیار همه ارتفاع‌های برآوردشده کمتر از مقدار واقعی آن بود. اگرچه همبستگی همه ارتفاع‌های برآوردشده با مقدار واقعی معنی‌دار بود، اما مقدار ضریب آن با کاهش توان تفکیک مکانی کاهش یافت (جدول ۱).

در مرحله بعد با تغییر اندازه توان تفکیک مکانی، DSM با توان‌های تفکیک مکانی ۱۰، ۲۰، ۴۰، ۶۰، ۸۰ و ۱۰۰ سانتی‌متر نیز تولید شدند که در شکل ۳ بخش ثابتی از DSM با توان‌های تفکیک مکانی مختلف آمده است. چنانچه ملاحظه می‌شود، با کاهش توان تفکیک مکانی از وضوح تصاویر نیز کاسته می‌شود. در نتیجه، یافتن بالاترین نقطه تاج برای برآورد ارتفاع نیز دشوارتر می‌شود. حجم هریک از DSM‌ها برای کل منطقه نیز براساس توان‌های تفکیک مکانی ۳/۴۷، ۱۰، ۲۰، ۴۰، ۶۰، ۸۰ و ۱۰۰ سانتی‌متر به ترتیب ۲/۵۳ گیگابایت، ۳۰۸/۹، ۷۷/۲، ۱۹/۲، ۸/۵ و ۴/۸ مگابایت بودند.

پس از تهیه DSM منطقه مورد مطالعه، ارتفاع ۱۰۰

جدول ۱- مقایسه مقادیر واقعی و برآوردی ارتفاع ۱۰۰ درخت بر روی DSM با هفت توان تفکیک مکانی

توان تفکیک مکانی (سانتی‌متر)	۳/۴۷	۱۰	۲۰	۴۰	۶۰	۸۰	۱۰۰
میانگین ارتفاع (متر)	۶/۹	۶/۶	۶/۵	۵/۹	۵/۸	۵/۷	۴/۶
واقعی				۷/۱			
حداقل ارتفاع (متر)	۳	۳/۱	۳/۱	۳/۲	۳/۳	۳/۱	۱/۶
واقعی				۲/۴			
حداکثر ارتفاع (متر)	۱۱	۱۰/۷	۹/۶	۹/۷	۹/۲	۹/۱	۹/۱
واقعی				۱۱/۶			
انحراف معیار ارتفاع (متر)	۱/۳	۱/۳	۱/۲	۱/۳	۱/۲	۱/۳	۱/۵
واقعی				۱/۶			
ضریب تغییرات (درصد)	۲۰/۷	۲۰/۷	۲۰/۸	۲۱/۴	۲۰/۵	۲۲/۱	۳۳/۱
واقعی				۲۲/۴			
ضریب همبستگی اسپیرمن	۰/۹۴*	۰/۸۶*	۰/۸۲*	۰/۷۷*	۰/۷۶*	۰/۷۳*	۰/۷۱*

* معنی‌دار در سطح اطمینان ۹۵ درصد

تفکیک مکانی ۱۰ سانتی‌متر نسبت به موارد دیگر، به عدد یک نزدیک‌تر بود. بررسی صحت نتایج با آزمون t در سطح اطمینان ۹۵ درصد نشان داد که میانگین برآوردی روی DSM با توان‌های تفکیک مکانی ۳/۴۷، ۱۰ و ۲۰ سانتی‌متر با مقدار واقعی، اختلاف معنی‌دار نداشت.

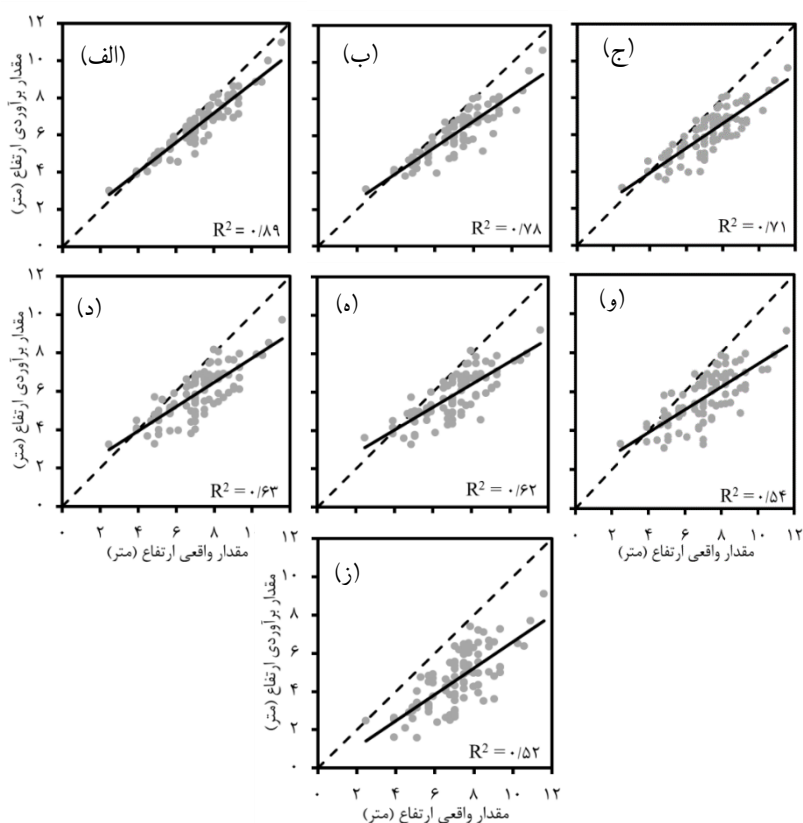
برای ارزیابی دقت ارتفاع‌های برآوردشده، شاخص‌های RRMSE و ME و BS محاسبه شدند (جدول ۲). کمترین و بیشترین RRMSE به ترتیب مربوط به ارتفاع برآوردی روی DSM با توان‌های تفکیک مکانی ۳/۴۷ و ۱۰۰ سانتی‌متر بودند. مقدار BS در ارتفاع برآوردی روی DSM با توان

جدول ۲- نتایج به دست آمده از ارزیابی شاخص‌های دقت و صحت ارتفاع‌های برآورد شده ۱۰۰ درخت بنه

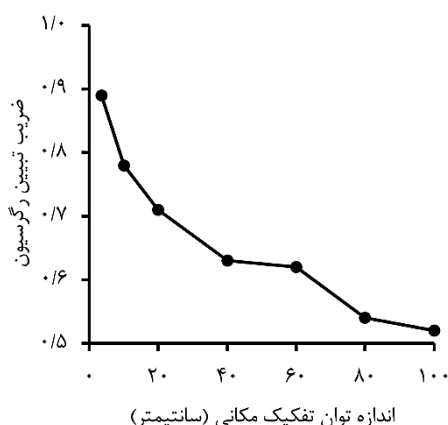
توان تفکیک مکانی (سانتی متر)							شاخص
۱۰۰	۸۰	۶۰	۴۰	۲۰	۱۰	۳/۴۷	
۳۸/۷	۲۴/۵	۲۲/۱	۲۱/۶	۱۹/۵	۱۶/۸	۱۱/۸	RRMSE (%)
-۲/۰۱	-۰/۲	-۰/۰۲	-۰/۰۶	-۰/۲۳	-۰/۴۳	-۰/۷۲	ME
۰/۲۱	۰/۷۲	۰/۸۵	۰/۸۳	۰/۹۱	۱/۰۱	۱/۱۵	BS
۲۱/۲۱	۲۰/۶۳	۱۷/۴۲	۱۴/۳۴	۱۲/۶۶	۱۲/۳۴	۱۱/۲۵	<i>t</i>
۰/۰۰	۰/۰۰	۰/۰۰	۰/۰۰	۰/۱۳	۰/۱۴	۰/۱۷	<i>p</i> -value

برآوردی ارتفاع روی DSM با توان‌های تفکیک مکانی ۳/۴۷ و ۱۰۰ سانتی‌متر به ترتیب حداکثر و حداقل بودند (شکل ۵).

نمودار یک‌به‌یک ارتفاع‌های برآورد شده و مقادیر واقعی آن‌ها نیز مقایسه شدند (شکل ۴). نتایج نشان داد که ضریب تبیین رگرسیون خطی برازش داده شده به مقادیر واقعی و



شکل ۴- نمودار یک‌به‌یک ارتفاع‌های واقعی و مقادیر برآورد شده روی DSM با توان‌های تفکیک مکانی ۳/۴۷ (الف)، ۱۰ (ب)، ۲۰ (ج)، ۴۰ (د)، ۶۰ (ه)، ۸۰ (و) و ۱۰۰ (ز) سانتی‌متر



شکل ۵- تأثیر تغییر توان تفکیک مکانی بر ضریب تبیین رگرسیون بین مقدار واقعی و برآوردی ارتفاع درختان بنه در منطقه مورد مطالعه

بحث

نکته دیگری که در استفاده از تصاویر پهپاد برای برآورد ارتفاع درختان باید به آن توجه شود، ضرورت تصحیح هندسی این داده‌ها با نقاط کافی کنترل زمینی است که با دقت بسیار زیادی ثبت شده باشند. در این پژوهش، برای زمین مرجع‌سازی تصاویر از ۱۲ نقطه کنترل زمینی استفاده شد که به روش RTK و با استفاده از GPS سه‌فرکانسه Leica Viva GS15 تهیه شدند، به طوری که زمین مرجع‌سازی بسیار دقیقی با RMSE برابر با هشت سانتی‌متر انجام شد که مطابق با پژوهش‌های پیشین بود. Xiang و Tian (۲۰۱۱) ضمن تأکید بر ضرورت زمین مرجع‌سازی، تصاویر حاصل از پهپاد را با استفاده از ۱۶ نقطه کنترل زمین مرجع کردند که RMSE را ۵۶/۹ سانتی‌متر به دست آوردند. Zahawi و همکاران (۲۰۱۵) نیز از نقاط کنترل زمینی برای زمین مرجع‌سازی تصاویر پهپاد با هدف پایش تغییرات پوشش گیاهی استفاده کردند و به دقت ۳۵ سانتی‌متر رسیدند. علت تفاوت نتایج این پژوهش‌ها با پژوهش پیش‌رو می‌تواند به دلیل تفاوت در نوع سکو، نحوه ثبت نقاط کنترل زمینی و نیز فرایند زمین مرجع‌سازی باشد. مزیت منطقه مورد مطالعه در پژوهش پیش‌رو، پراکنش انفرادی درختان بود که امکان اندازه‌گیری تغییرات ارتفاعی بین نوک تاج تک‌درختان و زمین اطراف هر درخت را روی

اگرچه داده‌های سنجش‌ازدور یکی از ابزارهای مناسب برای برآورد ویژگی‌های زیست‌سنجی درختان هستند، اما در این داده‌ها، ارتفاع به‌عنوان یکی از ویژگی‌های کمی به‌طور مستقیم قابل مشاهده و اندازه‌گیری نیست. همسو با پژوهش‌های پیشین (Zarco-Tejada et al., 2014; Lin et al., 2015; Birdal et al., 2017; Iizuka et al., 2018)، در این پژوهش نیز از DSM تصاویر تهیه‌شده با پهپاد برای برآورد ارتفاع درختان استفاده شد. پهپادها با تنظیم ارتفاع پرواز و قابلیت تصویربرداری در نزدیک سطح زمین، توانایی تهیه تصاویری با کیفیت رادیومتری و توان تفکیک مکانی زیاد را دارند (Rokhmana, 2015). هرچند در این پژوهش، استفاده از راست‌عکس و DSM با توان تفکیک مکانی ۳/۴۷ سانتی‌متر در برآورد ارتفاع تک‌درختان بنه در منطقه مورد مطالعه نتایجی قابل قبول از نظر دقت و صحت به همراه داشت، اما حجم بسیار زیاد DSM در یک محدوده ۴۵ هکتاری، امکان تجزیه و تحلیل کل منطقه را بسیار دشوار و طولانی کرد، بنابراین برای پژوهش‌های آینده باید به این نکته توجه کرد که اگرچه با افزایش توان تفکیک مکانی، جزئیات بیشتری در اختیار کاربر قرار می‌گیرد، اما فرایند تجزیه و تحلیل تصویر نیز طولانی و دشوار می‌شود.

مقدار ارتفاع واقعی کمتر خواهد شد. اگرچه کاهش توان تفکیک مکانی باعث کم شدن دقت و صحت برآورد ارتفاع شد، اما کاهش حجم داده‌ها و افزایش سرعت پردازش اطلاعات را به دنبال داشت. هرچند تاکنون پژوهشی به بررسی تأثیر کاهش توان تفکیک مکانی تصاویر هوایی پهپاد بر اندازه‌گیری ارتفاع تک‌درختان نپرداخته است، اما Borra-Serrano و همکاران (۲۰۱۵) اثر کاهش توان تفکیک مکانی تصاویر هوایی پهپاد بر دقت شناسایی علف‌های هرز را بررسی کردند. همچنین، روش استفاده‌شده در پژوهش پیش‌رو (تغییر اندازه توان تفکیک مکانی با روش بازنمونه‌گیری) در پژوهش‌های پیشین تأیید شده است (Deo et al., 2018; Fisher et al., 2018).

در پژوهش Chenari و همکاران (۲۰۱۷) با استفاده از تصاویر هوایی پهپاد، مساحت تاج تک‌درختان بنه برآورد شد. علاوه بر تفاوت در ویژگی‌های زیست‌سنجی مورد ارزیابی، در پژوهش مذکور از روش طبقه‌بندی شی‌گرا به منظور شناسایی مرز تاج استفاده شد، درحالی‌که در پژوهش پیش‌رو، الگوریتمی پیشنهاد شد که به طور خودکار تفاضل پیکسل مبنا و نوک تاج را محاسبه کرد و به عنوان ارتفاع هر درخت در نظر گرفت.

به طور کلی، یافته‌های پژوهش پیش‌رو نشان داد که تصاویر هوایی پهپاد کوادروتور فانتوم ۴ کارایی لازم را برای برآورد ارتفاع تک‌درختان بنه با روش کاملاً خودکار و بدون دخالت مفسر دارند. ارزیابی صحت و دقت میانگین ارتفاع برآوردشده برای ۱۰۰ درخت بنه تصادفی نشان داد که DSM تهیه‌شده از تصاویر هوایی پهپاد به دلیل توان تفکیک مکانی زیاد قادر به ثبت تغییرات ارتفاعی است. این پژوهش، فرضیه تأثیر توان تفکیک مکانی DSM بر برآورد ارتفاع تک‌درختان بنه را نیز ارزیابی کرد و صحت آن را تأیید کرد. DSM با توان تفکیک مکانی ۱۰ سانتی‌متر، ارتفاع درختان را بدون اختلاف معنی‌دار با مقدار واقعی برآورد کرد و حجم آن (۳۰۸/۹ مگابایت) به مراتب کمتر از حجم DSM با توان تفکیک اصلی (۲/۵۳ گیگابایت) بود که موجب تسریع در فرایند تجزیه و تحلیل شد. برای پژوهش‌های آینده می‌توان

DSM فراهم کرد. این شرایط در برخی نواحی رویشی ایران مانند ناحیه رویشی هیرکانی و بخش‌هایی از زاگرس فراهم نیست، بنابراین یکی از دلایل کارآمدی این روش در جنگل تحقیقاتی بنه استان فارس، امکان مشاهده تک‌درختان بود که در صورت فراهم شدن چنین شرایطی می‌توان ارتفاع تک‌درختان نواحی رویشی دیگر در ایران را در زمانی کمتر از داده‌برداری میدانی برآورد کرد. Rezayan و Erfanifard (۲۰۱۶) با استفاده از طول سایه، ارتفاع تک‌درختان را روی تصاویر راست‌عکس حاصل از UltraCam-D با همبستگی ۰/۸۵ (در مقایسه با همبستگی ۰/۹۴ در پژوهش پیش‌رو) محاسبه کردند. روش استفاده‌شده در پژوهش مذکور علاوه بر ضرورت مشاهده تک‌درختان، برخلاف پژوهش پیش‌رو به مشاهده طول سایه نیز نیاز داشت. همچنین، روش مذکور برخلاف روش استفاده‌شده در این پژوهش، خودکار نبود و خطای ناشی از مفسر را هم به همراه دارد.

یکی از اهداف پژوهش پیش‌رو، آزمون این فرضیه بود که تغییر در اندازه توان تفکیک مکانی تصاویر پهپاد بر برآورد ارتفاع تک‌درختان بنه تأثیر دارد. مقایسه نتایج برآورد ارتفاع تک‌درختان روی DSM با توان‌های تفکیک مکانی ۳/۴۷، ۱۰، ۲۰، ۴۰، ۶۰، ۸۰ و ۱۰۰ سانتی‌متر صحت این فرضیه را تأیید کرد، به طوری‌که با کاهش توان تفکیک مکانی از دقت برآورد ارتفاع تک‌درختان کم شد. اگرچه میانگین ارتفاع برآوردی و واقعی در سه توان تفکیک مکانی ۳/۴۷، ۱۰ و ۲۰ سانتی‌متر، تفاوت معنی‌داری باهم نداشتند، اما شاخص BS نشان داد که شباهت بین ارتفاع‌های واقعی و برآوردی ۱۰۰ تک‌درخت بنه روی DSM با توان تفکیک مکانی ۱۰ سانتی‌متر از موارد دیگر بیشتر است ($BS = 1/01$). نتایج شاخص BS و نمودارهای یک‌به‌یک مقادیر واقعی و برآوردی ارتفاع درختان بنه نشان داد که با کاهش اندازه توان تفکیک مکانی، مقدار ارتفاع درختان بنه کمتر از مقدار واقعی برآورد شدند. با کاهش توان تفکیک مکانی، قسمت بالایی تاج درختان، کلی‌تر از شکل واقعی دیده می‌شود و شناسایی بالاترین نقطه تاج با خطا همراه است. در نتیجه، مقدار ارتفاع برآوردی از

- Forest Management. CRC Press, Boca Raton, Florida, 424p.
- Goodbody, T.R.H., Coops, N.C., Marshall, P.L., Tompalski, P. and Crawford, P., 2017. Unmanned aerial systems for precision forest inventory purposes: A review and case study. *The Forestry Chronicle*, 93(1): 71-81.
 - Gulbe, L. and Mednieks, I., 2013. Automatic identification of individual tree crowns in mixed forests using fusion of LIDAR and multispectral data. *Technologies of Computer Control*, 14(1): 93-99.
 - Hansen, M.C., Potapov, P.V., Goetz, S.J., Turubanova, S., Tyukavina, A., Krylov, A., Kommareddy, A. and Egorov, A., 2016. Mapping tree height distributions in Sub-Saharan Africa using Landsat 7 and 8 data. *Remote Sensing of Environment*, 185: 221-232.
 - Iizuka, K., Yonehara, T., Itoh, M. and Kosugi, Y., 2018. Estimating tree height and diameter at breast height (DBH) from digital surface models and orthophotos obtained with an unmanned aerial system for a Japanese cypress (*Chamaecyparis obtusa*) forest. *Remote Sensing*, 10(1): 13.
 - Lee, J.H., Ko, Y. and McPherson, E.G., 2016. The feasibility of remotely sensed data to estimate urban tree dimensions and biomass. *Urban Forestry and Urban Greening*, 16: 208-220.
 - Lee, W.J. and Lee, C.W., 2018. Forest canopy height estimation using multiplatform remote sensing dataset. *Journal of Sensors*: 1593129.
 - Lin, Y., Jiang, M., Yao, Y., Zhang, L. and Lin, J., 2015. Use of UAV oblique imaging for the detection of individual trees in residential environments. *Urban Forestry and Urban Greening*, 14(2): 404-412.
 - Li, W., Guo, Q., Jakubowski, M.K. and Kelly, M., 2012. A new method for segmenting individual trees from the Lidar point cloud. *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*, 78(1): 75-84.
 - Li, Z., Zhu, Q. and Gold, C., 2004. *Digital Terrain Modeling: Principals and Methodology*. CRC Press, Boca Raton, Florida, 340p.
 - Marvie-Mohadjer, M.R., 2011. *Silviculture*. University of Tehran Press, Tehran, 418p.
 - Miri, N., Darvishsefat, A.A., Zargham, N. and Shakeri, Z., 2017. Estimation of leaf area index in Zagros forests using Landsat 8 data. *Iranian Journal of Forest*, 9(1): 29-42 (In Persian).
 - Mohan, M., Silva, C.A., Klauberg, C., Jat, P., Catts, G., Cardil, A., Hudak, A.T. and 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):

کارایی الگوریتم پیشنهادی در این پژوهش را در نواحی رویشی دیگر در ایران ارزیابی کرد.

منابع مورد استفاده

- Amini, J. and Sadeghi, Y., 2013. Optical and radar images in modeling the forest biomass in north of Iran. *Remote Sensing and GIS*, 4(4): 69-82 (In Persian).
- Bennet, N.D., Croke, B.F.W., Guariso, G., Guillaume, J.H.A., Hamilton, S.H., Jakeman, A.J., Marsili-Libelli, S., Newham, L.T.H., Norton, J.P., Perrin, C., Pierce, S.A., Robson, B., Seppelt, R., Voinov, A.A., Fath, B.D. and Andreassian, V., 2013. Characterizing performance of environmental models. *Environmental Modelling and Software*, 40: 1-20.
- Birdal, A.C., Avdan, U. and Türk, T., 2017. Estimating tree heights with images from an unmanned aerial vehicle. *Geomatics, Natural Hazards and Risk*, 8(2): 1144-1156.
- Borra-Serrano, I., Peña, J.M., Torres-Sánchez, J., Mesas-Carrascosa, F.J. and López-Granados, F., 2015. Spatial quality evaluation of resampled unmanned aerial vehicle-imagery for weed mapping. *Sensors*, 15(8): 19689-19708.
- Chenari, A., Erfanfard, S.Y., Dehghani, M. and Pourghasemi, H.R., 2017. Estimation of crown area of wild pistachio single trees using DSM of UAV aerial images in Baneh Research Forest, Fars province. *Journal of Wood and Forest Science and Technology*, 24(4): 117-130 (In Persian).
- Deo, R.K., Domke, G.M., Russell, M.B., Woodall, C.W. and Andersen, H.E., 2018. Evaluating the influence of spatial resolution of Landsat predictors on the accuracy of biomass models for large-area estimation across the eastern USA. *Environmental Research Letters*, 13(5): 055004.
- Duncanson, L. and Dubayah, R., 2018. Monitoring individual tree-based change with airborne lidar. *Ecology and Evolution*, 8(10): 5079-5089.
- Feduck, C., McDermet, G.J. and Castilla, G., 2018. Detection of coniferous seedlings in UAV imagery. *Forests*, 9(7): 432.
- Fisher, J.R.B., Acosta, E.A., Dennedy-Frank, P.J., Kroeger, T. and Boucher, T.M., 2018. Impact of satellite imagery spatial resolution on land use classification accuracy and modeled water quality. *Remote Sensing in Ecology and Conservation*, 4(2): 137-149.
- Franklin, S.E., 2001. *Remote Sensing for Sustainable*

2014. Forests of Iran: A Treasur from the Past, a Hope for Future. Springer, Dordrecht, 160p.
- Schowengerdt, R.A., 2007. Remote Sensing: Models and Methods for Image Processing. Third Edition, Academic Press, Burlington, Massachusetts, 560p.
 - Xiang, H. and Tian, L., 2011. Method for automatic georeferencing aerial remote sensing (RS) images from an unmanned aerial vehicle (UAV) platform. Biosystems Engineering, 108(2): 104-113.
 - Yim, J.S., Kim, Y.H., Kim, S.H., Jeong, J.H. and Shin, M.Y., 2011. Comparison of the k-nearest neighbor technique with geographical calibration for estimating forest growing stock volume. Canadian Journal of Forest Research, 41(1): 73-82.
 - Yousefi, S., Mirzaee, S. and Zeini Vand, H., 2013. Investigation deforestation trends in Zagros mountain with using GIS and RS (Case study: Marivan). Journal of Applied RS and GIS Techniques in Natural Resources Science, 4(2): 15-23 (In Persian).
 - Zahawi, R.A., Dandois, J.P., Holl, K.D., Nadwodny, D., Reid, J.L. and Ellis, E.C., 2015. Using lightweight unmanned aerial vehicles to monitor tropical forest recovery. Biological Conservation, 186: 287-295.
 - Zarco-Tejada, P.J., Diaz-Varela, R., Angileri, V. and Loudjani, P., 2014. Tree height quantification using very high resolution imagery acquired from an unmanned aerial vehicle (UAV) and automatic 3D photo-reconstruction methods. European Journal of Agronomy, 55: 89-99.
 - Zobeiry, M., 2000. Forest Inventory (Measurement of Tree and Forest). University of Tehran Press, Tehran, 401p (In Persian).
 - 340.
 - Owji, M.Gh. and Hamzeshpour, M., 2012. Vegetation Profile of Wild Pistachio Experimental Forest. Published by Research Institute of Forests and Rangelands, Tehran, 240p (In Persian).
 - Panagiotidis, D., Abdollahnejad, A., Surový, P. and Chiteculo, V., 2017. Determining tree height and crown diameter from high-resolution UAV imagery. International Journal of Remote Sensing, 38(8-10): 2392-2410.
 - Pir Bavaghar, M., 2011. Evaluation of capability of IRS-P6 satellite data for predicting quantitative attributes of forests (case study: Northern Zagros forests). Iranian Journal of Forest, 3(4): 277-289 (In Persian).
 - Puliti, S., Solberg, S. and Granhus, A., 2019. Use of UAV photogrammetric data for estimation of biophysical properties in forest stands under regeneration. Remote Sensing, 11(3): 233.
 - 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 Journal of Forest and Poplar Research, 23(1): 90-103 (In Persian).
 - Rezayan, F. and Erfanifard, Y., 2016. Estimating biophysical parameters of Persian oak coppice trees using UltraCam-D airborne imagery in Zagros semi-arid woodlands. Arid Environment, 133: 10-18.
 - Rokhmana, C.A., 2015. The potential of UAV-based remote sensing for supporting precision agriculture in Indonesia. Procedia Environmental Sciences, 24: 245-253.
 - Sagheb Talebi, Kh., Sajedi, T. and Pourhashemi, M.,

Effect of spatial resolution of UAV aerial images on height estimation of wild pistachio (*Pistacia atlantica* Desf.) trees

S.Y. Erfanifard^{1*}, A. Chenari², M. Dehghani³ and F. Amiraslani⁴

1*- Corresponding author, Associate Prof., Department of Remote Sensing and GIS, Faculty of Geography, University of Tehran, Tehran, Iran. E-mail: erfanifard@ut.ac.ir

2- M.Sc., Department of Natural Resources and Environment, School of Agriculture, Shiraz University, Shiraz, Iran

3- Associate Prof., Department of Civil and Environmental Engineering, College of Engineering, Shiraz University, Shiraz, Iran

4- Associate Prof., Department of Remote Sensing and GIS, Faculty of Geography, University of Tehran, Tehran, Iran

Received: 03.02.2019

Accepted: 14.05.2019

Abstract

Estimation of allometric tree attributes such as heights that are not directly observed on unmanned aerial vehicle (UAV) imagery is challenging. Therefore, this study aimed to introduce a method to estimate the height of wild pistachio (*Pistacia atlantica* Desf.) single trees in the Zagros region. Therefore, a 45-ha area in Baneh Research Forest of Fars province was captured by a Phantom IV UAV. An algorithm was then suggested to consider the difference between pixels of ground and crown top as tree height on the digital surface model (DSM) following automatic single tree detection. The heights of 100 trees were estimated on DSMs with spatial resolutions of 3.47, 10, 20, 40, 60, 80, and 100 cm. The results showed that the highest coefficient of determination of 0.89 and the lowest relative root mean square error of 11.8% were returned for heights estimated on DSM with 3.47 cm spatial resolution. Moreover, no significant difference was observed among measured and estimated height values on spatial resolutions of 3.47, 10, and 20 cm, respectively. The tree heights were overestimated on DSM with a spatial resolution of 3.47 cm (bias score 1.15), while they were close to the measured values on 10 cm spatial resolution (bias score 1.01) and were underestimated in other spatial resolutions. In general, the results showed the feasibility to estimate heights of wild pistachio trees on Phantom IV imagery, in particular on UAV imagery with a 10 cm spatial resolution.

Keywords: Baneh Research Forest, digital surface model, Fars province, unmanned aerial vehicles.