

برآورد ارتفاع تاج پوشش جنگل در مناطق کوهستانی با استفاده از داده‌های لیدار فضایی ICESat-GLAS (پژوهش موردی: حوضه ۴۶ جنگل‌های شمال ایران)

منیژه رجب‌پور رحمتی^۱، علی‌اصغر درویش‌صفت^{۲*}، نیکلاس بغدادی^۳، منوچهر نمیرانیان^۴ و حمید صوفی‌ماریو^۵

۱- دانشجوی دکتری جنگلداری، دانشکده منابع طبیعی، دانشگاه تهران، کرج، ایران

۲- نویسنده مسئول، استاد گروه جنگلداری و اقتصاد جنگل، دانشکده منابع طبیعی، دانشگاه تهران، کرج، ایران، پست الکترونیک: adarvish@ut.ac.ir

۳- رئیس مرکز تحقیقات سنجش از دور IRSTEA، مونتپلیه، فرانسه

۴- استاد گروه جنگلداری و اقتصاد جنگل، دانشکده منابع طبیعی، دانشگاه تهران، کرج، ایران

۵- کارشناس مسئول گروه جنگلداری و اقتصاد جنگل، دانشکده منابع طبیعی، دانشگاه تهران، کرج، ایران

تاریخ پذیرش: ۹۳/۱۰/۰۱

تاریخ دریافت: ۹۳/۰۶/۰۵

چکیده

اندازه‌گیری ارتفاع تاج پوشش در جنگل مستلزم صرف زمان و هزینه زیاد است. در مقابل داده‌های لیدار سنجنده GLAS ماهواره ICESat امکان اندازه‌گیری ارتفاع را از طریق اندازه‌گیری فاصله سنجنده تا پدیده یا سطح مورد دید فراهم می‌آورد. از این رو، هدف از این پژوهش بررسی قابلیت این داده‌ها برای برآورد ارتفاع تاج پوشش در جنگل‌های شمال ایران است. به این منظور یک نوار شمالی-جنوبی از داده‌های ICESat-GLAS در شرق جنگل آموزشی-پژوهشی خیرود تجزیه و تحلیل شد. سنج‌های گستره شکل موج، گستره لبه پیشتاز و گستره لبه پستی شکل موج‌ها محاسبه شد. همچنین شاخص زمینی براساس مدل رقومی زمین در محل لکه‌های زمینی لیدار محاسبه شد. برای برآورد حداکثر ارتفاع تاج پوشش جنگل، روش مستقیم (اختلاف بین سیگنال آغازین و قله زمین) و مدل‌های رگرسیونی مختلفی آزمون شد. به منظور توسعه مدل‌های رگرسیونی و اعتبارسنجی آنها، ارتفاع ۳۳۰ درخت از بلندترین درختان در ۳۳ قطعه نمونه زمینی دایره‌ای به قطر ۷۰ متر در محل لکه‌های زمینی لیدار در جنگل اندازه‌گیری شد. ارتفاع برآورد شده به روش مستقیم دارای R_a^2 و RMSE به ترتیب ۰/۵۶ و ۱۰/۳۲ متر بود، اما مدل‌های رگرسیونی براساس سنج‌ها و مدل رقومی زمین، نتایج بهتری ارائه داد. بهترین مدل با کمترین مقدار معیار اطلاعاتی آکائیکه (۲۰۴/۵۵) با استفاده از گستره شکل موج و شاخص زمینی، دارای R_a^2 و RMSE به ترتیب ۰/۸۲ و ۶/۱۶ متر بود. نتایج این پژوهش نشان داد که با استفاده از داده‌های لیدار فضایی می‌توان حداکثر ارتفاع تاج پوشش را در مناطق شیب‌دار با دقت رضایت‌بخش به‌ویژه در سطوح وسیع برآورد کرد. امید است با به‌کارگیری دیگر روش‌های آماری و یافتن الگوریتم‌هایی در جهت کاهش اثر شیب بر داده‌های لیدار، بتوان برآوردی دقیق‌تر از ارتفاع به عمل آورد.

واژه‌های کلیدی: حداکثر ارتفاع تاج پوشش، لیدار فضایی، گستره لبه پستی، گستره لبه پیشتاز، ICESat-

GLAS

مقدمه

زیست‌سنجی جنگل است و از آن برای تعیین حجم، ضریب

شکل، تهیه جدول محصول و تعیین حاصلخیزی رویشگاه یا

ارتفاع درخت یکی از متغیرهای کمی مهم در

برآورد ارتفاع پایه‌های درختی پلت و ممرز بررسی کردند. در دیگر کشورها نیز پژوهش‌های کمی به‌کمک داده‌های لیدار فضایی انجام شده است. Lefsky و همکاران (۲۰۰۷) ارتفاع تاج‌پوشش را براساس سنجه‌های حاصل از شکل موج (waveform) سنجنده GLAS، گستره شکل موج (Waveform Extent)، گستره لبه پیش‌تاز (Lead-edge Extent) و گستره لبه پشتی (Trail-edge Extent) در توده‌های سوزنی‌برگ همیشه‌سبز، پهن‌برگ خزان‌کننده و توده‌های آمیخته مناطق معتدله آمریکای شمالی و جنگل‌های پهن‌برگ همیشه‌سبز استوایی در برزیل برآورد کردند. Chen (۲۰۱۰b) از روش مستقیم (اختلاف بین سیگنال آغازین و قله زمین) و مدل‌های آماری رگرسیونی برای برآورد ارتفاع تاج‌پوشش با استفاده از داده‌های ICESat GLAS استفاده کرد. Xing و همکاران (۲۰۱۰) به کمک داده‌های سنجنده GLAS و اطلاعات به‌دست‌آمده از واقعیت زمینی تهیه‌شده، ارتفاع تاج‌پوشش جنگل را روی زمین شیب‌دار در منطقه کوهستانی Changbai چین برآورد کردند. Popescu و همکاران (۲۰۱۱) مشخصه‌های ساختار جنگل مانند حداکثر ارتفاع تاج‌پوشش، متوسط ارتفاع تاج‌پوشش، صدک‌های ارتفاع تاج‌پوشش، همچنین ارتفاع زمین و زی‌توده روی زمینی برآوردشده از داده‌های لیدار فضایی ICESat-GLAS را با لیدار هوایی مقایسه کردند. نتایج نشان داد که ارتفاع‌های برآورد شده از داده‌های لیدار فضایی و هوایی با یکدیگر همبستگی قوی دارند ($r=0.98$ و $RMSE=0.78m$). همچنین متغیرهای ارتفاع GLAS قادر بودند که ۸۰ درصد از واریانس زی‌توده حاصل از لیدار هوایی را با $RMSE$ برابر با ۳۷/۷ مگاگرم در هکتار تبیین کنند. Mitchard و همکاران (۲۰۱۲) از ترکیب داده‌های رادار، لیدار و داده‌های زمینی برای تهیه نقشه زی‌توده در پارک ملی Lope گابن به وسعت پنج هزار کیلومتر مربع با انواع پوشش گیاهی از ساوانا تا جنگل استوایی با تاج‌پوشش بسته استفاده کردند. موجودی زی‌توده روی زمینی این پارک $173 \pm 25\%$ مگاگرم کربن در هکتار به‌دست آمد.

قدرت تولید یک گونه استفاده می‌شود (Namiranian, 2006). همچنین اطلاعات مربوط به ارتفاع و ساختار عمودی جنگل برای ارزیابی سلامت بوم‌سازگان و حفظ تنوع زیستی ضروری است (Ahmed, 2012). از سوی دیگر، به‌منظور پایش و مدل‌سازی چرخه کربن و پویایی بوم‌سازگان جنگل، باید ویژگی‌های پوشش گیاهی از جمله ارتفاع تعیین شود (Cairns et al., 1995).

اندازه‌گیری ارتفاع درخت و توده در مقایسه با برخی مشخصه‌های دیگر مثل قطر درخت مشکل‌تر و با صرف زمان و هزینه بیشتر همراه است. این موضوع به‌ویژه در جنگل‌های کوهستانی و دور از دسترس اهمیت بیشتری می‌یابد. در سال‌های اخیر با توسعه فناوری ارتفاع‌سنجی به‌ویژه سامانه‌های فعال لیدار (Light Detection and Ranging = LiDAR)، امکان اندازه‌گیری مستقیم ارتفاع فراهم شد (Wang et al., 2011). لیدار هوایی ارتفاع سطح زمین و دیگر پدیده‌های روی آن را با دقت و توان تفکیک زیاد فراهم می‌آورد که تا پیش از آن تنها از طریق مساحی زمینی و فتوگرامتری با به‌کارگیری نیروی انسانی زیاد امکان‌پذیر بود. موفقیت‌های سامانه‌های لیدار هوایی در آماربرداری جنگل و نیاز به مشاهده‌های جهانی، در نهایت به تلاش‌های اولیه در ایالات متحده (ماموریت VCL (Blair et al., 1999) و سپس آلمان (Carbon-3D) (Hese et al., 2005) برای اجرای مأموریت لیدار فضایی در زمینه پژوهش‌های گیاهی منجر شد (Pflugmacher et al., 2008).

در پژوهش پیش‌رو توانایی داده‌های لیدار فضایی ICESat (Ice, Cloud, and land Elevation Satellite) در برآورد ارتفاع تاج‌پوشش جنگل بررسی شد. با توجه به نبودن فن ارتفاع‌سنجی لیدار به‌ویژه لیدار فضایی نسبت به دیگر زمینه‌های دورسنجی، تاکنون پژوهشی در رابطه با استفاده از داده‌های لیدار فضایی در برآورد مشخصه‌های مختلف جنگل یا دیگر کاربری‌ها در ایران انجام نشده است و در رابطه با استفاده از داده‌های لیدار هوایی در جنگل، تنها Khorrami و همکاران (۲۰۱۴) توانایی این داده‌ها را در

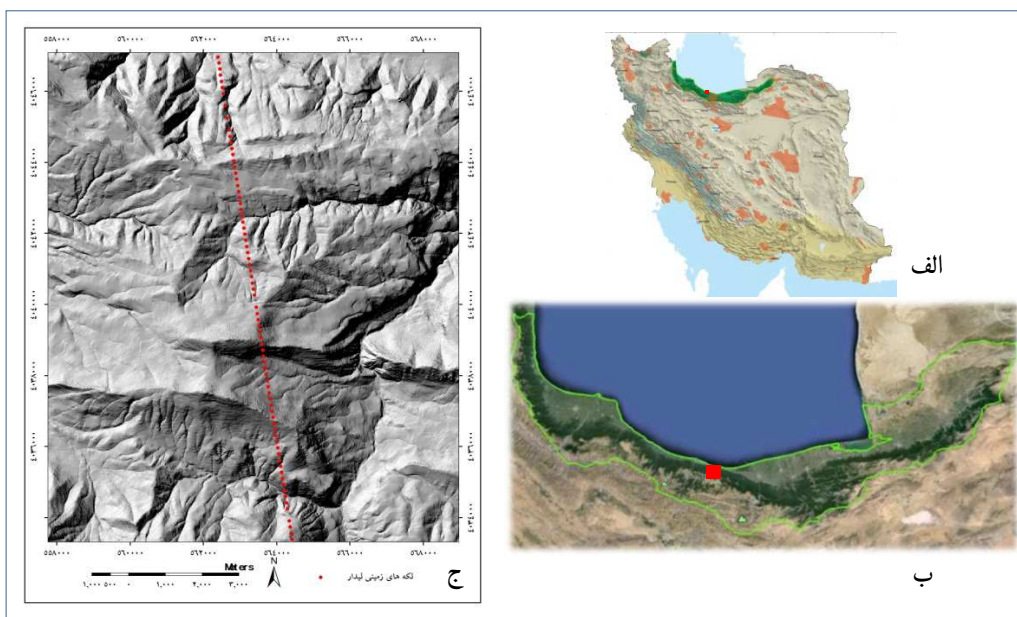
به طور اجرایی در سطح گسترده جنگل‌های شمال به منظور کاهش زمان و هزینه کار استفاده کرد.

مواد و روش‌ها

منطقه مورد بررسی

از آنجایی که داده‌های ICESat-GLAS به صورت لکه‌هایی در امتداد نوارهای شمالی-جنوبی به فاصله ۱۷۰ متر از هم برداشت می‌شوند، این پژوهش با استفاده از داده‌های یک نوار شمالی-جنوبی به طول تقریبی ۱۱ کیلومتر از قسمت‌های جلگه‌ای تا ارتفاع ۲۰۰۰ متر در نزدیکی روستای بین انجام شد. این جنگل‌ها در حوزه ۴۶ از جنگل‌های شهرستان نوشهر قرار دارند و برای آنها طرح جنگلداری تهیه نشده است (شکل ۱). جنگل‌های این منطقه شامل رویشگاه‌های پهن‌برگ آمیخته با گونه‌های غالب راش (*Fagus orientalis*) و ممرز (*Carpinus betulus*) در ارتفاعات میان‌بند و گونه‌های لور (*Carpinus orientalis*) و اوری (*Quercus macranthera*) در ارتفاعات بالابند است. توپوگرافی در محل لکه‌های زمینی لیدار شیب‌دار و با شیب متوسط ۳۵ درصد است.

پژوهش‌های انجام شده در مورد برآورد ارتفاع، حجم و زی‌توده جنگل به کمک فن دورسنجی لیدار، مناسب بودن این داده‌ها را در برآورد چنین مشخصه‌هایی به ویژه در سطوح وسیع تأیید می‌کند. از این داده‌ها در شرایط متنوع از جنگل‌های دست‌کاشت تا جنگل‌های طبیعی سوزنی‌برگ، پهن‌برگ و آمیخته استفاده شده است. در اکثر مطالعات انجام شده از مدل‌های رگرسیونی و روش‌های آماری پارامتریک برای برآورد مشخصه‌های یاد شده استفاده شده است. نکته مورد توجه دیگر اینکه جنگل‌های مورد بررسی اغلب مسطح یا دارای شیب کم هستند. با توجه به شرایط کوهستانی جنگل‌های شمال ایران و شیب قابل توجه در بسیاری از مناطق و تأثیر آن روی داده‌های لیدار، این پرسش مطرح است که آیا امکان به‌کارگیری فن لیدار فضایی در برآورد ارتفاع تاج پوشش در شرایط خاص این جنگل‌ها با ساختار متنوع و پیچیده وجود دارد؟ بنابراین پژوهش پیش‌رو به بررسی قابلیت داده‌های لیدار فضایی ICESat-GLAS در برآورد ارتفاع تاج پوشش در جنگل‌های پهن‌برگ کوهستانی در شهرستان نوشهر می‌پردازد. چنانچه قابلیت این داده‌ها برای برآورد ارتفاع تاج پوشش در این پژوهش و پژوهش‌های تکمیلی تأیید شود، از این راهکار می‌توان



شکل ۱- موقعیت لکه‌های زمینی لیدار؛ الف: نقشه ایران؛ ب: مرز جنگل‌های هیرکانی؛ ج: نقشه پستی و بلندی منطقه مورد مطالعه

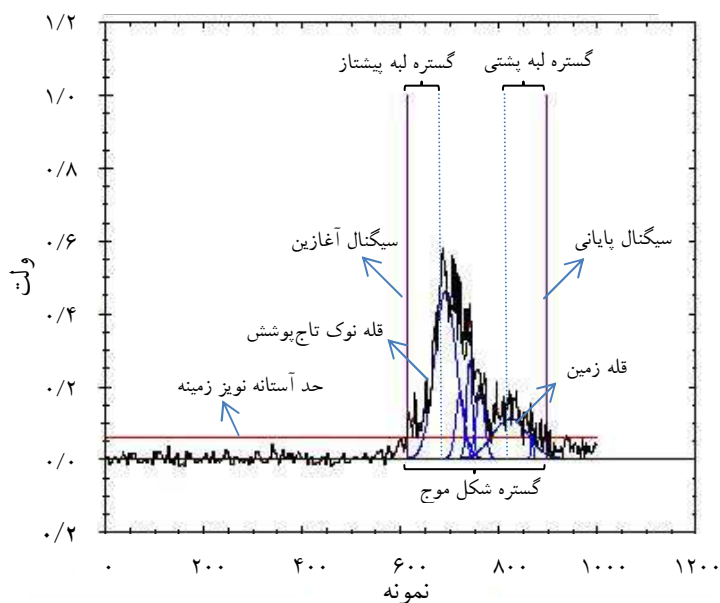
داده‌های ICESat-GLAS

ماهواره ICESat در ژانویه ۲۰۰۳ از سوی ناسا به فضا پرتاب شد تا مشاهدات لیزری جهانی را از پوشش ورقه‌های یخ قطبی، زمین، اقیانوس و اتمسفر فراهم آورد (Aronoff, 2005). پوشش جهانی از عرض جغرافیایی 86° تا 8° + با استفاده از سنجنده GLAS (Geoscience Laser Altimeter System) ماهواره ICESat در مدارهایی با چرخه تکرار ۹۱ روزه کسب می‌شود. فاصله این مدارها در استوا ۱۵ کیلومتر و در عرض جغرافیایی 80° ، $2/5$ کیلومتر است. سنجنده GLAS یک ارتفاع‌سنج لیزری برای اندازه‌گیری فاصله سنجنده تا سطح زمین از طریق اندازه‌گیری زمان طی‌شده برای انتقال پالس لیزر و بازتابی انعکاس از زمین و با توجه به میزان سرعت نور است. این ماهواره در ارتفاع ۶۰۰ کیلومتری گردش می‌کند و پالس‌های کوچک (با عرض اسمی شش نانوثانیه) امواج مادون قرمز (۱۰۶۴ نانومتر) و سبز مرئی (۵۳۲ نانومتر) را در فرکانس ۴۰ هرتز ارسال می‌کند. این پالس‌ها لکه‌هایی از سطح زمین با قطر متوسط ۷۰ متر و با فاصله ۱۷۰ متر از یکدیگر را در امتداد مسیر زمینی مدار ماهواره برداشت می‌کند. در هر لکه زمینی، انرژی از همه پدیده‌های مورد دید سنجنده بازگشت داده می‌شود و به تشکیل یک شکل موج که وضعیت عمودی ارتفاع لکه روشن‌شده توسط لیزر را نشان می‌دهد، منجر می‌شود (Brenner et al., 2003). هر شکل موج تابعی از توزیع عمودی سطحی که نور لیزر (مادون قرمز با طول موج ۱۰۶۴ نانومتر) به آن نفوذ می‌کند و نحوه انعکاس آن سطح در آن طول موج است (Kotchenova et al., 2003). انرژی لیزر به سمت حاشیه‌های لکه زمینی کاهش می‌یابد و در نتیجه شکل موج حاصل بیشتر معرف پدیده‌های نزدیک به مرکز لکه است (Rosette et al., 2008) که این نکته در اندازه‌گیری‌های زمینی در نظر گرفته شد.

جدیدترین داده‌های موجود از سنجنده GLAS (سال ۲۰۰۸) توسط مرکز سنجش از دور Irstea در اختیار این پژوهش قرار گرفت. از بین ۱۵ محصول داده‌های ICESat

تولیدشده توسط مرکز NSIDC (National Snow and Ice Data Center)، تنها محصولات GLA01 و GLA14 نسخه ۳۳ استفاده شد. به عبارتی برای هر لکه زمینی یک شکل موج خام، زمان و تاریخ کسب داده، موقعیت مکانی دقیق مرکز لکه، پارامترهای استخراج‌شده از تجزیه گوسی شکل موج، سطح نویز برآورد شده و بسیاری دیگر از اطلاعات براساس محصولات GLA01 و GLA14 فراهم شد. هر شکل موج شامل ۵۴۴ یا ۱۰۰۰ نمونه (bin) است که هر یک متناظر با یک نانوثانیه یا ۱۵ سانتی‌متر است (Harding & Wang et al., 2011; Carabajal, 2005). هر شکل موج دریافت‌شده حداکثر به شش تابع گوسی متناظر با سیگنال‌های بازگشتی از لایه‌های مختلف بین نوک درختان و زمین جنگل تجزیه شد. روی زمین مسطح اولین قله گوسی مربوط به انعکاس نوک تاج پوشش و آخرین قله گوسی مربوط به پایین‌ترین نقطه در لکه زمینی یعنی زمین است (Chen, 2010b; Baghdadi et al., 2014). همان‌طور که در شکل ۲ مشخص است، به فاصله عمودی بین سیگنال آغازین و سیگنال پایانی گستره شکل موج گفته می‌شود. اختلاف ارتفاع عمودی بین سیگنال آغازین و موقعیت مربوط به قله نوک تاج پوشش را گستره لبه پیش‌تاز و اختلاف ارتفاع عمودی بین سیگنال پایانی و موقعیت مربوط به قله زمین (Ground Peak) را گستره لبه پشتی گویند (Baghdadi et al., 2014) (فاصله‌ها در شکل به صورت افقی نشان داده شده است).

پیش‌پردازش‌هایی روی شکل موج‌ها انجام شد تا داده‌هایی که تحت تأثیر ابر یا دیگر اثرات اتمسفری قرار گرفتند، حذف شوند و فقط شکل موج‌هایی که حاوی اطلاعات صحیح و قابل استفاده هستند حفظ شود (Chen, 2010b; Hilbert & Schmullius, 2012; Baghdadi et al., 2014). این پردازش‌ها عبارتند از: ۱) شکل موج‌هایی که تحت تأثیر ابر قرار گرفته بودند، حذف شد. به این منظور از مشخصه `i_FRir_gaFlag` که در محصول GLA14 آورده شده است، استفاده شد.



شکل ۲- نمونه‌ای از شکل موج کسب‌شده روی یک سطح جنگلی با شیب متوسط ۲۵ درصد ($15\text{cm} = 1\text{ns}$)

مشخص شد. با در نظر گرفتن این نکته که انرژی لیزر به سمت حاشیه‌های لکه زمینی کاهش می‌یابد و در نتیجه شکل موج حاصل بیشتر معرف پدیده‌های نزدیک به مرکز لکه است (Rosette et al., 2008)، در محل هر لکه زمینی دو قطعه نمونه به شعاع ۱۸ و ۳۵ متر با مرکز مشترک پیاده شد. ارتفاع پنج درخت از بلندترین درختان در قطعه نمونه کوچک و پنج درخت از بلندترین درختان خارج از قطعه نمونه کوچک و داخل قطعه نمونه بزرگ به کمک دستگاه شیب‌سنج سونتو اندازه‌گیری شد (Zobeiry, 2004). در مجموع ۳۳ قطعه نمونه اندازه‌گیری شد که شرایط آنها از نظر ارتفاع از سطح دریا و شیب در جدول ۱ آورده شده است. این مطلب مدنظر بود که از تمام طبقات ارتفاعی قطعاتی آماربرداری شود ولی به دلایلی چون عدم وجود داده‌های لیدار در برخی دامنه‌های ارتفاعی، عدم امکان دسترسی به برخی نقاط یا عدم امکان آماربرداری در آنها به دلیل وجود پرتگاه و غیره این امکان وجود نداشت.

چنانچه مقدار این مشخصه برابر با ۱۵ باشد نشان‌دهنده عدم حضور ابر است؛ ۲) شکل موج‌هایی که اختلاف ارتفاع مرکز آنها (موجود در محصول GLA14) با ارتفاع نظیر در SRTM (Shuttle Radar Topography Mission) زیاد بود ($100\text{m} > \text{ICESat} - \text{SRTMI}$) حذف شد؛ ۳) شکل موج‌هایی که نسبت سیگنال به نویز (Signal to Noise Ratio) آنها کم بود ($\text{SNR} < 15$) حذف شد؛ ۴) شکل موج‌های اشباع‌شده حذف شد. به این ترتیب که چنانچه ارزش مشخصه i_satNdx موجود در محصول GLA14 بیش‌تر از صفر باشد نشان‌دهنده شکل موج اشباع‌شده است و آن شکل موج حذف می‌شود.

اندازه‌گیری‌های زمینی

به منظور اندازه‌گیری ارتفاع درختان در محل لکه‌های زمینی لیدار در جنگل، موقعیت این لکه‌ها روی نقشه توپوگرافی پیاده شد. سپس با استفاده از دستگاه GPS (Global Positioning System) مدل Garmin Colorado 300 و با صرف زمان مناسب موقعیت این نقاط روی زمین

جدول ۱- پراکنش قطعات نمونه در دامنه ارتفاعی و شیب در منطقه مورد بررسی

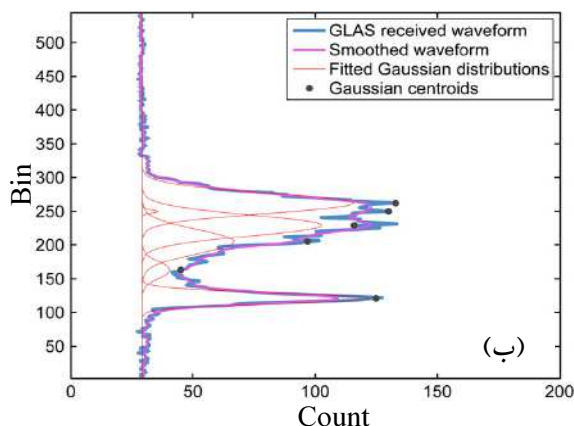
شیب (درصد)					ارتفاع از سطح دریا (متر)		
بیش از ۵۰	۴۰ تا ۵۰	۲۰ تا ۴۰	۱۰ تا ۲۰	کمتر از ۱۰	(۱۵۰۰-۲۰۰۰)	(۱۳۰۰-۱۴۰۰)	(۲۰۰>)
۸ قطعه نمونه	۹ قطعه نمونه	۸ قطعه نمونه	۷ قطعه نمونه	۱ قطعه نمونه	۲۰ قطعه نمونه	۱۰ قطعه نمونه	۳ قطعه نمونه

دریافت شده با استفاده از پارامترهای استخراج شده از شکل موج ارسال شده متناظر نرم (Smooth) می شود. هر شکل موج دریافت شده، همگشتی (Convolution) از شکل موج ارسال شده و ویژگی های انعکاسی سطح روشن شده است. بنابراین شکل موج دریافت شده در ارتباط با شکل موج ارسال شده است. شکل موج ارسال شده با یک تابع گوسی (رابطه ۲) برازش می شود (Chen, 2010b; Sun *et al.*, 2008).
رابطه ۲

$$y = a \times \exp\left(-\frac{(x-\mu_t)^2}{2\sigma_t^2}\right) + c$$

لا: ارزش رقومی ثبت شده متناظر با هر نمونه در شکل موج ارسال شده (count)، μ_t و σ_t : میانگین و انحراف معیار تابع گوسی، a : ضریب متغیر و c : ضریب ثابت (شکل ۳- الف).

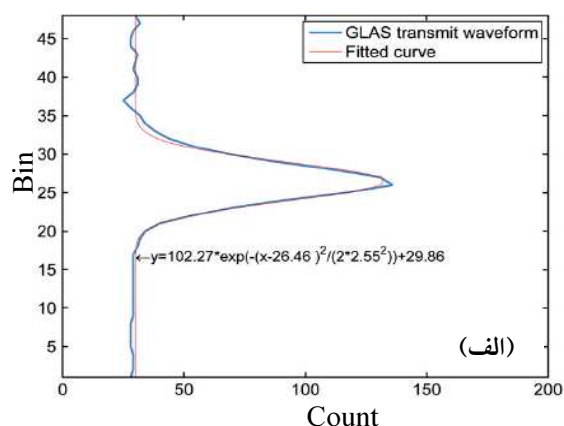
سپس شکل موج دریافت شده با یک فیلتر گوسی نرم می شود تا نویز زمینه حذف شود و با سیگنال آغازین اشتباه نشود (شکل ۳- ب).



برآورد ارتفاع تاج پوشش جنگل
الف: روش مستقیم
استفاده از روش مستقیم برای برآورد حداکثر ارتفاع تاج پوشش جنگل بر پایه شناخت دقیق نوک و بن بلندترین درخت در لکه زمینی استوار است. سیگنال آغازین و قله زمین در هر شکل موج معمولاً به ترتیب به عنوان نوک و بن درخت در نظر گرفته می شود. بر این اساس در روش مستقیم ارتفاع با استفاده از رابطه ۱ برآورد می شود (Duong *et al.*, 2008; Sun *et al.*, 2008; Chen, 2010b).
رابطه ۱

$$H_L = (G_p - S_s) \times 0.15$$

H_L : حداکثر ارتفاع تاج پوشش برآورد شده از داده های GLAS، G_p : موقعیت قله زمین و S_s : موقعیت سیگنال آغازین است. هر نمونه در شکل موج متناظر با یک نانوثانیه یا ۰/۱۵ متر است.
برای شناسایی سیگنال آغازین ابتدا هر شکل موج



شکل ۳- نمونه ای از شکل موج ارسال شده (الف) و شکل موج دریافت شده (ب); در شکل ب شکل موج نرم شده و توزیع گوسی برازش شده نیز نشان داده شده است (Chen, 2010b).

بازگشتی از زمین و پوشش گیاهی به دلیل بزرگ تر شدن لکه زمینی ادغام می شود. در نتیجه شناسایی قله زمین و برآورد صحیح ارتفاع تاج پوشش را به روش مستقیم مشکل می سازد (Chen, 2010b; Baghdadi *et al.*, 2014). بنابراین لازم است به طریقی اثر شیب زمین کاهش داده شود. Lefsky و همکاران (۲۰۰۵) و Rosette و همکاران (۲۰۰۸) اطلاعات استخراج شده از مدل رقومی ارتفاع (Digital Elevation Model) و Lefsky و همکاران (۲۰۰۷) و Pang و همکاران (۲۰۰۸) سنجه های استخراج شده از شکل موج شامل گستره لبه پستی و گستره لبه پیشتاز را در مدل های رگرسیونی وارد کردند تا اثر شیب زمین را کاهش دهند.

در این پژوهش، بعد از استخراج سنجه های مربوط به شکل موج مانند گستره شکل موج، گستره لبه پیشتاز و گستره لبه پستی، همچنین استخراج شاخص زمینی با استفاده از مدل رقومی زمین با اندازه تفکیک مکانی ۱۰ متر برای هر لکه زمینی، مدل های رگرسیونی مختلفی برای برآورد حداکثر ارتفاع تاج پوشش جنگل آزمون شد که برخی از آنها در پژوهش های پیشین نیز استفاده شده است. این مدل ها در نرم افزار آماری R بر داده های این پژوهش برازش و ضرایب محاسبه شدند.

موقعیت اولین نمونه در جایی که شدت شکل موج بیشتر از میانگین نويز زمينه است به عنوان موقعیت سیگنال آغازین شناسایی می شود. در پژوهش های پیشین، میانگین نويز زمينه به اضافه ۳σ (Sun *et al.*, 2008)، ۴σ (Lefsky *et al.*, 2005) یا ۴/۵σ (Lefsky *et al.*, 2007) به عنوان حد آستانه نويز در نظر گرفته شده است. σ انحراف معیار نويز زمينه موجود در محصول GLA01 است. Baghdadi و همکاران (۲۰۱۴)، حد آستانه ۴/۵σ را به عنوان حد آستانه بهینه با مقدار اریبی کمتر معرفی کردند. در این پژوهش ابتدا براساس حد آستانه ۴/۵σ که در بیشتر پژوهش ها استفاده شده بود، عمل شد. ولی در ادامه حد آستانه های دیگر هم مورد آزمون قرار گرفت و بهترین نتیجه با استفاده از همین حد آستانه به دست آمد. برای تعیین قله زمین در مناطق کوهستانی از بین دو قله گوسی آخر، قله گوسی با دامنه بزرگ تر به عنوان قله زمین در نظر گرفته شد (Rosette *et al.*, 2008; Chen, 2010a; Baghdadi *et al.*, 2014).

ب: مدل های رگرسیونی

در کنار روش مستقیم، مدل های رگرسیونی آماری برای پیش بینی ارتفاع تاج پوشش با استفاده از گستره شکل موج توسعه داده شده است. روی زمین شیب دار گستره شکل موج افزایش می یابد، قله زمین عریض تر می شود و انعکاس های

(Lefsky *et al.*, 2005)

(Xing *et al.*, 2010)

(Chen, 2010b)

(Baghdadi *et al.*, 2014)

(Baghdadi *et al.*, 2014)

(Baghdadi *et al.*, 2014)

(Baghdadi *et al.*, 2014)

$$H_L = aW_{ext} - bTI$$

$$H_L = aW_{ext} - bTI - c$$

$$H_L = a \ln(W_{ext}) - bTI - c$$

$$H_L = aW_{ext} - b(\text{lead}_{ext} + \text{trail}_{ext})$$

$$H_L = aW_{ext} - b\text{lead}_{ext} - c\text{trail}_{ext} - d$$

$$H_L = aW_{ext} - b\text{trail}_{ext}$$

$$H_L = aW_{ext} - b\text{trail}_{ext} - c$$

$$H_L = aW_{ext} - b\text{lead}_{ext}$$

$$H_L = aW_{ext} - b\text{lead}_{ext} - c$$

$$H_L = aW_{ext} - bTI - c\text{lead}_{ext} - d$$

$$H_L = aW_{ext} - bTI - c\text{trail}_{ext} - d$$

$$H_L = aW_{ext} - bTI - c\text{trail}_{ext}$$

$$H_L = aW_{ext} - bTI + c\text{lead}_{ext} - d\text{trail}_{ext}$$

$$H_L = aW_{ext} - bTI - c\text{lead}_{ext} - d\text{trail}_{ext} - e$$

با اندازه تفکیک ۱۰ متر پنجره‌ای به ابعاد ۷×۷ در نظر گرفته می‌شود (Rosette et al., 2008; Baghdadi et al., 2014). در این پژوهش از روش آماری اعتبارسنجی متقابل LOO (Leave One Out Cross Validation) به منظور یافتن بهترین مدل پیش‌بینی‌کننده استفاده شد و آماره‌هایی چون جذر میانگین مربعات خطا (RMSE.cv)، ضریب تعیین تعدیل‌شده (R²a.cv) و معیار اطلاعاتی آکائیکه (Akaike's Information Criterion: AIC) محاسبه و بررسی شد (Burnham & Anderson, 2002).

$$R^2 = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (H_i - \hat{H}_i)^2}{\sum_{i=1}^n (H_i - \bar{H}_i)^2}$$

$$R_a^2 = R^2 - \left(\frac{K \times (1 - R^2)}{n - k - 1} \right)$$

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

$$AIC = 2K - 2 \ln(L)$$

در این مدل‌ها، H_L: حداکثر ارتفاع تاج پوشش برآوردشده از داده‌های GLAS، W_{ext}: گستره شکل موج به متر، lead_{ext}: گستره لبه پیش‌تاز به متر، trail_{ext}: گستره لبه پشتی به متر و TI (Terrain Index): شاخص زمینی که از مدل رقومی ارتفاع با اندازه تفکیک ۱۰ متر (حاصل از نقشه توپوگرافی رقومی) استخراج شد. به این ترتیب که اختلاف بین حداکثر و حداقل ارتفاع‌های زمینی در پنجره‌ای به ابعاد ۷×۷ پیکسل به مرکزیت لکه زمینی لیدار، به‌عنوان شاخص زمینی تعیین شد. اندازه این پنجره به اندازه تفکیک مدل رقومی ارتفاع بستگی دارد و به‌طور معمول برای مدل رقومی

نتایج

در جدول ۲ نحوه پراکنش قطعات نمونه در ۵ طبقه ارتفاعی و خلاصه‌ای آماری از ارتفاع درختان اندازه‌گیری شده آورده شده است. شایان ذکر است که این اطلاعات مربوط به حداکثر ارتفاع درختان در قطعه نمونه است.

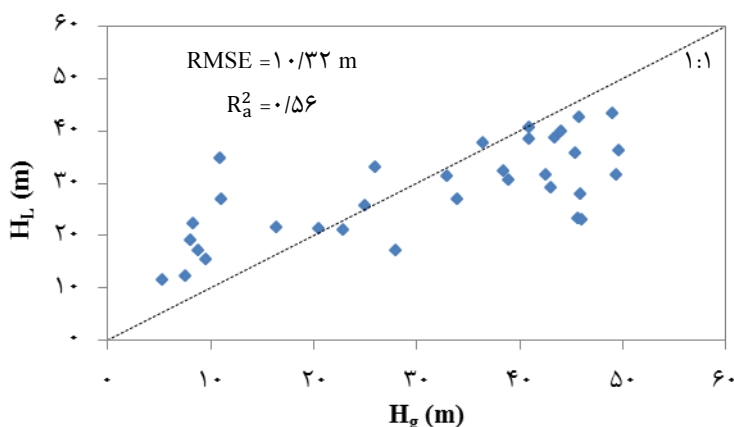
در این فرمول‌ها، n: تعداد نمونه‌ها، H_i: ارتفاع اندازه‌گیری شده، H_i: ارتفاع برآورد شده، H: میانگین ارتفاع اندازه‌گیری شده، k: تعداد متغیرهای مورد استفاده در مدل، L: حداکثر مقدار تابع درست‌نمایی برای مدل برآورد شده است.

جدول ۲- پراکنش قطعات نمونه اندازه‌گیری شده در پنج طبقه ارتفاعی و خلاصه‌ای آماری از درختان اندازه‌گیری شده

ارتفاع درختان (متر)	۱۰ >	۱۰ تا ۲۵	۲۵ تا ۳۵	۳۵ تا ۴۵	۴۵ <
تعداد قطعه نمونه	۶	۸	۲	۱۱	۶
میانگین	۲۶/۱۱	۳	حداکثر	انحراف معیار	
			۴۹/۵۸	۱۳/۶۲	

است. در این روش مقدار R²a و RMSE به ترتیب ۰/۵۶ و ۱۰/۳۲ متر محاسبه شد.

در شکل ۴ ارتفاع برآوردشده از داده‌های GLAS (H_L) به روش مستقیم در مقابل حداکثر ارتفاع تاج پوشش اندازه‌گیری شده روی زمین (H_g) با خط ۱ به ۱ مقایسه شده



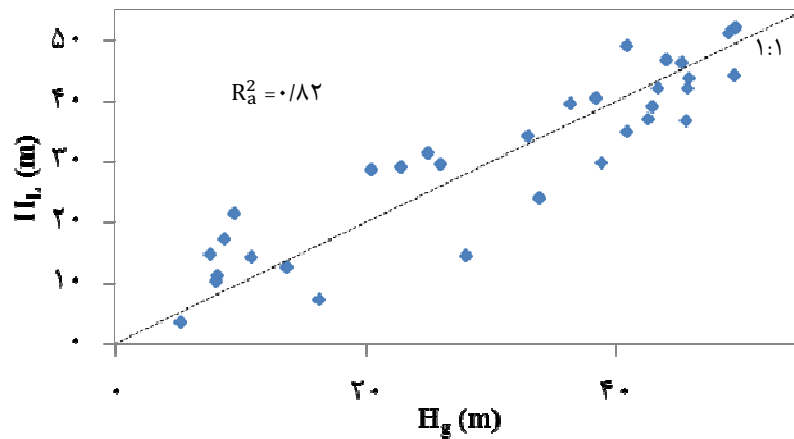
شکل ۴- مقایسه ارتفاع برآورد شده از داده‌های GLAS (H_L) به روش مستقیم و حداکثر ارتفاع اندازه‌گیری شده روی زمین (H_g)

به ترتیب ۰/۸۲ و ۶/۱۶ متر بهترین نتیجه را ارائه داد. در شکل ۵ ارتفاع برآورد شده از داده‌های GLAS براساس این مدل با ارتفاع اندازه‌گیری شده زمینی با خط یک به یک مقایسه شده است. همچنین نتایج تجزیه و تحلیل همبستگی بین ارتفاع اندازه‌گیری شده زمینی و سنجه‌های گستره شکل موج، گستره لبه پشتی و گستره لبه پیش‌تاز و شاخص زمینی در شکل ۶ مشاهده می‌شود.

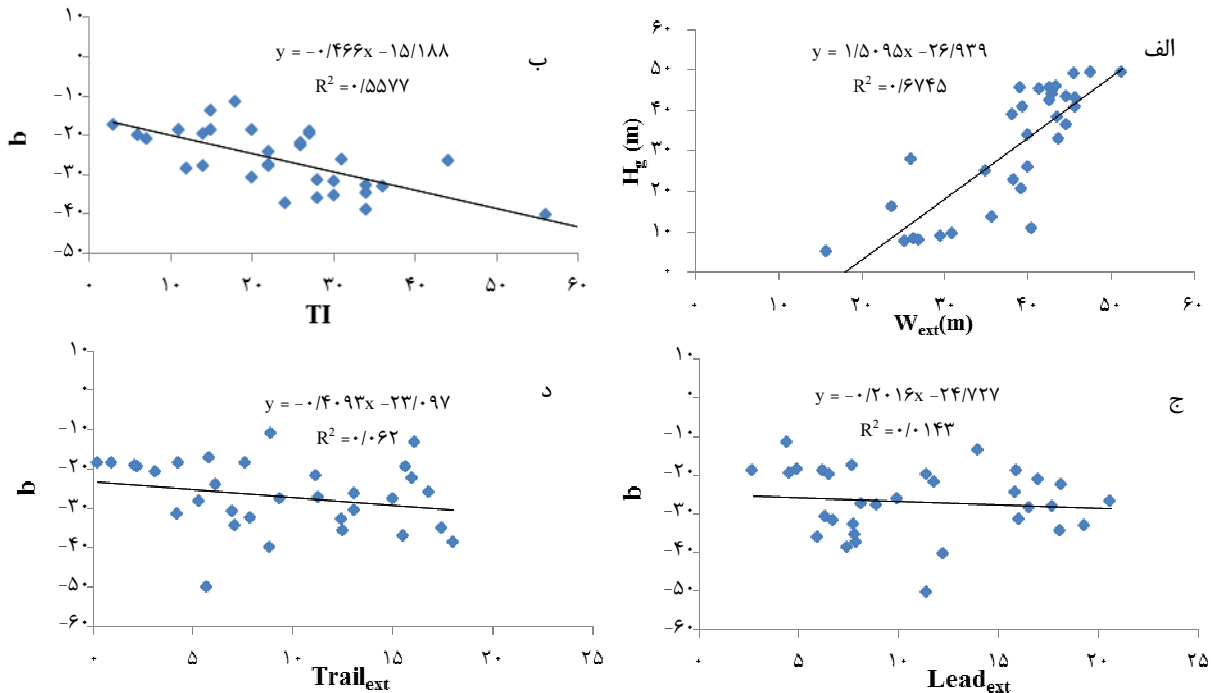
جدول ۳ مدل‌های رگرسیونی برازش شده در منطقه مورد بررسی را نشان می‌دهد. برای مقایسه مدل‌ها براساس معیار AIC، معمولاً مقدار Δ ($\Delta = AIC - AIC_{min}$) محاسبه می‌شود. بهترین مدل، مدلی است که $\Delta = 0$ باشد. همچنین مدلی که $\Delta \leq 2$ باشد به عنوان مدل رقیب شناخته شده و می‌تواند مدل خوبی باشد (Burnham & Anderson, 2002). در بین مدل‌های رگرسیونی مختلف، مدل ۲ ($-14/57228$) با R_a^2 و RMSE

جدول ۳- مدل‌های رگرسیونی برازش شده در منطقه مورد بررسی

شماره مدل	Model	RMSE.cv (m)	R_a^2 .cv	AIC.cv	Δ
۱	$H_L = 1/18514 W_{ext} - 0/55281 TI$	۶/۶۳	۰/۸۰	۲۰۹/۴۵	۴/۹
۲	$H_L = 1/50108 W_{ext} - 0/47432 TI - 14/57228$	۶/۱۶	۰/۸۲	۲۰۴/۵۵	۰/۰
۳	$H_L = 47/5418 Ln(W_{ext}) - 0/51668 TI - 128/01095$	۶/۸۱	۰/۷۸	۲۰۹/۱۸	۴/۶۳
۴	$H_L = 1/0278 W_{ext} - 0/3763(lead_{ext} + trail_{ext})$	۱۰/۴۹	۰/۵۸	۲۳۶/۸۱	۳۲/۲۶
۵	$H_L = 1/7096 W_{ext} - 0/4031 lead_{ext} - 0/3713 trail_{ext} - 26/8147$	۹/۰۶	۰/۶۰	۲۲۸/۸۵	۲۴/۳
۶	$H_L = 0/97147 W_{ext} - 0/5898 trail_{ext}$	۱۰/۲۸	۰/۵۷	۲۳۵/۸۰	۳۱/۲۵
۷	$H_L = 1/5468 W_{ext} - 0/3951 trail_{ext} - 24/7551$	۹/۰۱	۰/۶۲	۲۲۷/۸۶	۲۳/۳۱
۸	$H_L = 0/83266 W_{ext} - 0/2456 lead_{ext}$	۱۰/۷۷	۰/۵۷	۲۳۸/۶۱	۳۴/۰۶
۹	$H_L = 1/7774 W_{ext} - 0/4433 lead_{ext} - 28/7195$	۹/۱۴	۰/۶۱	۲۲۸/۴۰	۲۳/۸۵
۱۰	$H_L = 1/45709 W_{ext} - 0/48358 TI + 0/10709 lead_{ext} - 13/81993$	۶/۳۷	۰/۸۰	۲۰۶/۴۲	۱/۸۷
۱۱	$H_L = 1/5293 W_{ext} - 0/46268 TI - 0/21589 trail_{ext} - 13/87226$	۶/۳۳	۰/۸۰	۲۰۵/۴۵	۰/۹
۱۲	$H_L = 1/24244 W_{ext} - 0/53247 TI - 0/28504 trail_{ext}$	۶/۷۳	۰/۷۸	۲۰۹/۸۷	۵/۳۲
۱۳	$H_L = 1/14767 W_{ext} - 0/5042 TI + 0/36408 lead_{ext} - 0/28168 trail_{ext}$	۶/۸۵	۰/۷۶	۲۱۰/۳۲	۵/۷۷
۱۴	$H_L = 1/48103 W_{ext} - 0/47276 TI + 0/1185 lead_{ext} - 0/2190 trail_{ext} - 13/02961$	۶/۵۷	۰/۷۸	۲۰۷/۲۸	۲/۷۳



شکل ۵- مقایسه ارتفاع برآورد شده از داده‌های GLAS (H_L) براساس مدل رگرسیونی ۲ و حداکثر ارتفاع اندازه‌گیری شده روی زمین (H_g)



شکل ۶- رابطه بین حداکثر ارتفاع تاج پوشش اندازه‌گیری شده روی زمین (H_g) و الف: گستره شکل موج (W_{ext}), ب: شاخص زمینی (TI), ج: گستره

لبه پیشتاز ($Lead_{ext}$), د: گستره لبه پشتی ($Trail_{ext}$). ارزش b در محور عمودی نمودارهای ب تا د با استفاده از معادله رگرسیونی نمودار الف

$$\text{به دست می آید: } y = 1/50.95x$$

بحث

کوهستانی شرق جنگل آموزشی- پژوهشی خیرود نوشهر مورد بررسی قرار گرفت. نتایج نشان داد که به طور کلی روش مستقیم، حداکثر ارتفاع تاج پوشش جنگل را بیشتر و

در این پژوهش توانایی داده‌های GLAS ماهواره ICESat در برآورد حداکثر ارتفاع تاج پوشش در جنگل‌های

است. چنانچه Chen (۲۰۱۰a) نیز در پژوهش خود که در سه رویشگاه مختلف با شیب متوسط ۲۰ درجه انجام شد، به نتیجه مشابهی دست یافت. وی برای تولید شاخص زمینی از مدل رقومی ارتفاع دقیقی که از داده‌های لیدار هوایی به دست آمده بود استفاده کرد.

نتیجه تجزیه و تحلیل همبستگی بین ارتفاع اندازه‌گیری شده زمینی و گستره شکل موج نشان داد که یک رابطه خطی بین آنها با $R^2=0.67$ وجود دارد ($H_{max}=aW_{ext}-b$) (شکل ۶-الف). همچنین بین b ($H_{max}-1/5.095W_{ext}$) و شاخص زمینی نیز رابطه خطی با $R^2=0.57$ مشاهده شد (شکل ۶-ب). در حالی که b در رابطه با دو سنجه گستره لبه پیش‌تاز و گستره لبه پشتی تقریباً ثابت است (شکل ۶-ج و ۶-د). این نتایج بیانگر اهمیت زیاد شاخص زمینی در مدل‌های رگرسیونی برای برآورد حداکثر ارتفاع تاج پوشش در منطقه مورد بررسی است.

بهترین مدل در برآورد ارتفاع تاج پوشش جنگل، مدل رگرسیونی خطی با دو متغیر گستره شکل موج و شاخص زمینی (مدل ۲) با کمترین مقدار AIC (۲۰۴/۵۵) است. مدل‌های ۱۰ و ۱۱ نیز به ترتیب با $\Delta=1/87$ و $\Delta=0/9$ به عنوان مدل‌های رقیب محسوب می‌شوند. به این معنی که می‌توانند در کنار مدل ۲ مدل خوبی در برآورد حداکثر ارتفاع تاج پوشش باشند. ولی از آنجا که مدل ۲ ساده‌تر است و در آن به اندازه‌گیری متغیرهای کمتر و قابل اطمینان‌تری نیاز است، این مدل نسبت به مدل‌های دیگر برتری دارد. در مدل‌های ۱۰ و ۱۱، شاخص‌هایی چون گستره لبه پیش‌تاز و گستره لبه پشتی باید محاسبه شود. این شاخص‌ها بر شناسایی دقیق قله تاج پوشش و قله زمین استوار است که با توجه به شیب‌دار بودن منطقه و تأثیر آن بر این دو شاخص (Lefsky et al., 2007)، احتمال خطا و شناسایی نادرست وجود دارد.

به‌طور کلی نتایج این پژوهش نشان داد که امکان برآورد حداکثر ارتفاع تاج پوشش جنگل با استفاده از داده‌های ICESat-GLAS در مناطق شیب‌دار به کمک مدل‌های رگرسیونی با دقت تقریبی شش متر وجود دارد که این نتیجه

در مواردی کمتر از حد برآورد می‌کند. در جاهایی که درختان کم‌ارتفاع روی سطح شیب‌دار قرار دارند این انتظار می‌رود که در روش مستقیم ارتفاع تاج پوشش بیش از حد برآورد شود. در چنین شرایطی ارتفاع بلندترین پدیده در سطح یک لکه زمینی الزاماً نوک بلندترین درخت نیست، بلکه می‌تواند نوک یک درخت کم ارتفاع قرار گرفته در بالای شیب باشد یا حتی در مناطق کم‌پوشش، سطح زمین در بالای شیب به اشتباه به عنوان نوک درخت شناسایی شود (Chen, 2010b). بررسی شرایط لکه‌های زمینی پژوهش پیش‌رو نشان داد که در لکه‌هایی که ارتفاع بیش از حد برآورد شده است، درختان کم ارتفاع روی سطح شیب‌دار قرار دارند و تراکم توده نیز کم بوده است. در مطالعه Chen (۲۰۱۰a) نیز که در مناطقی با شیب متوسط ۲۰ درجه انجام شد، اختلاف زیادی بین نتایج حاصل از برآورد ارتفاع به روش مستقیم و روش‌های آماری مشاهده شد. وی چنین نتیجه‌ای را ناشی از شیب زمین دانست. به‌طور کلی همان‌طور که پیشتر بیان شد، استفاده از این روش در برآورد ارتفاع تاج پوشش بر شناسایی صحیح ارتفاع سیگنال آغازین و قله زمین استوار است. از آنجا که هیچ حد آستانه بهینه ثابتی برای تعیین سیگنال آغازین وجود ندارد و از طرف دیگر شناسایی ارتفاع زمین در مناطق شیب‌دار مشکل است چنین نتیجه‌ای دور از انتظار نبود. این نکته توسط محققان زیادی در این زمینه بیان شده است (Lefsky et al., 2010; Chen, 2010b; Xing et al., 2005).

آماره‌های محاسبه شده برای مدل‌های رگرسیونی نشان می‌دهد که مدل‌هایی که در آنها از شاخص زمینی (TI) استفاده شد، نسبت به دیگر مدل‌ها برآورد بهتری از ارتفاع تاج پوشش ارائه می‌دهند. برای این مدل‌ها مقدار RMSE بین ۶/۱۶ و ۶/۸۵ متر، مقدار ضریب تعیین تعدیل شده R_a^2 بین ۰/۸۲ و ۰/۷۶ و مقدار AIC بین ۲۰۴/۵۵ و ۲۱۰/۳۲ به دست آمد. این موضوع می‌تواند به این دلیل باشد که مدل رقومی ارتفاع مورد استفاده برای استخراج شاخص زمینی دارای دقت زیاد و با اندازه تفکیک ۱۰ متر بوده و حاوی اطلاعات به نسبت دقیقی از شرایط توپوگرافی

- Brenner, A.G., Zwally, R.J., Bentley, C.R., Csatho, B.M., Harding, D.J., Hofton, M.A., Minster, J.B., Roberts, L., Saba, J.L., Thomas, R.R. and Yi, D., 2003. Derivation of range and range distributions from laser pulse waveform analysis for surface elevations, roughness, slope, and vegetation heights, Geoscience Laser Altimeter System (GLAS). Algorithm theoretical basis document, Version 4.1, 92p.
- Burnham, K.P. and Anderson, D.R., 2002. Model selection and multimodel inference: A practical information-theoretic approach. 2nd ed. New York: Springer-Verlag Press, 488p.
- Cairns, M., Barker, J., Shea, R. and Haggerty, P., 1995. Carbon dynamics of Mexican tropical evergreen forests: influence of forestry mitigation options and refinement of carbon-flux estimates. *Interciencia*, 20(6): 401-408.
- Chen, Q., 2010a. Assessment of terrain elevation derived from satellite laser altimetry over mountainous forest areas using airborne lidar data. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 65(1): 111-122.
- Chen, Q., 2010b. Retrieving vegetation height of forests and woodlands over mountainous areas in the Pacific Coast region using satellite laser altimetry. *Remote Sensing of Environment*, 114: 1610-1627.
- Duong, V.H., Lindenbergh, R., Pfeifer, N. and Vosselman, G., 2008. Single and two epoch analysis of ICESat full waveform data over. *International Journal of Remote Sensing*, 29(5): 1453-1473.
- Harding, D.J. and Carabajal, C.C., 2005. ICESat waveform measurements of within-footprint topographic relief and vegetation vertical structure. *Geophysical Research Letters*, 32(L21S10): 1-4.
- Hilbert, C. and Schmulius, Ch., 2012. Influence of surface topography on ICESat/GLAS forest height estimation and waveform shape. *Remote Sensing*, 4: 2210-2235.
- Hese, S., Lucht, W., Schmulius, C., Barnsley, M., Dubayah, R., Knorr, D., Neumann, K., Riedel, T. and Schroter, K., 2005. Global biomass mapping for an improved understanding of the CO₂ balance, The Earth observation mission Carbon-3D. *Remote Sensing of Environment*, 94: 94-104.
- Khorrami, R.A., Darvishsefat, A.A., Tabari Kochaksaraei, M. and Shataee Jouybari, Sh.,

به‌ویژه در کاربردهایی در سطوح بزرگ رضایت‌بخش است. در صورت رفع برخی مشکلات پیش روی این پژوهش از جمله امکان استفاده از GPS‌های تفاضلی برای تعیین محل دقیق لکه‌های زمینی و عدم وجود اختلاف زمانی بین داده‌های لیدار و داده‌های زمینی می‌توان انتظار داشت که به نتایج بهتری نیز دست یافت. لازم به ذکر است که در ادامه این پژوهش روش‌های تجزیه و تحلیل و آماری دیگری نظیر PCA و Random Forest مورد آزمون قرار خواهد گرفت. امید است که با به‌کارگیری روش‌های آماری غیرپارامتری، افزایش تعداد نمونه‌های اندازه‌گیری زمینی و یافتن الگوریتم‌هایی در جهت کاهش اثر شیب زمین بر داده‌های لیدار، بتوان حداکثر ارتفاع تاج پوشش را با دقت بیشتری برآورد کرد.

سپاسگزاری

در این مقاله بخشی از نتایج به‌دست‌آمده از طرح پژوهشی شماره ۹۲۰۳۰۱۹۰ مصوب صندوق حمایت از پژوهشگران و فناوران کشور ارایه شده است. نویسندگان وظیفه خود می‌دانند که از حمایت‌های صندوق صمیمانه تشکر کنند.

References

- Ahmed, R.U., 2012. Accuracy of biomass and structure estimates from radar and lidar. *Open Access Dissertations*, 231P.
- Aronoff, S., 2005. *Remote sensing for GIS Managers*. Esri press, 487p.
- Baghdadi, N., Maire, G., Fayad, I., Bailly, J.S., Nouvellon, Y., Lemos, C. and Hakamada, R., 2014. Testing different methods of forest height and aboveground biomass estimations from ICESat/GLAS data in Eucalyptus plantations in Brazil. *IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing*, 7(1): 290-299.
- Blair, J.B., Rabine, D.L. and Hofton, M.A., 1999. The laser vegetation imaging sensor: a medium-altitude, digitization only, airborne laser altimeter for mapping vegetation and topography. *ISPRS Journal of Photogrammetry & Remote Sensing*, 54(2-3): 115-122.

- International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences, Vol. XXXVII, Part B7, 777-782.
- Pflugmacher, D., Cohen, W., Kennedy, R. and Lefsky, M., 2008. Regional applicability of forest height and aboveground biomass Models for the Geoscience Laser Altimeter System. *Forest Science*, 54(6): 647-657.
 - Popescu, S.C., Zhao, K., Neuenschwander, A. and Lin, Ch., 2011. Satellite lidar vs. small footprint airborne lidar: Comparing the accuracy of aboveground biomass estimates and forest structure metrics at footprint level. *Remote Sensing of Environment*, 115: 2786-2797.
 - Rosette, J.A.B., North, P.R.J. and Suarez, J.C., 2008. Vegetation height estimates for a mixed temperate forest using satellite laser altimetry. *International Journal of Remote Sensing*, 29(5): 1475-1493.
 - Sun, G., Ranson, K.J., Kimes, D.S., Blair, J.B. and Kovacs, K., 2008. Forest vertical structure from GLAS: An evaluation using LVIS and SRTM data. *Remote Sensing of Environment*, 112: 107-117.
 - Wang, X., Cheng, X., Gong, P., Huang, H., Li, Zh. and Li, X., 2011. Earth science applications of ICESat/GLAS. *International Journal of Remote Sensing*, 32(23): 8837-8864.
 - Xing, Y., De Gier, A., Zhang, J. and Wang, L., 2010. An improved method for estimating forest canopy height using ICESat/GLAS full waveform data over sloping terrain: A case study in Changbai mountains, China. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, 12: 385-392.
 - Zobeiry, M., 2004. *Forest Inventory (Measurement of Tree and Stands)*. University of Tehran Press, 401p (In Persian).
 - 2014. Potential of LIDAR data for estimation of individual tree height of *Acer velutinum* and *Carpinus betulus*. *Iranian Journal of Forest*, 6(2): 127-140 (In Persian).
 - Kotchenova, S., Shabanov, N., Knyazikhin, Y., Davis, A., Dubayah, R. and Myneni, R., 2003. Modeling LiDAR waveforms with time-dependent stochastic radiative transfer theory for remote estimations of forest structure. *Journal of Geophysical Research*, 108(D15): 1-13.
 - Lefsky, M.A., Harding, D.J., Keller, M., Cohen, W.B., Carabajal, C.C., Espirito-Santo, F.D., Hunter, M.O., DE Oliveira, R. and DE Camargo, P.B., 2005. Estimates of forest canopy height and aboveground biomass using ICESat. *Geophysical Research Letters*, 32(22): 1-4.
 - Lefsky, M.A., Keller, M., Pang, Y., De Camargo, P.B. and Hunter, M.O., 2007. Revised method for forest canopy height estimation from Geoscience Laser Altimeter System waveform. *Journal of Applied Remote Sensing*, 1: 1-18.
 - Mitchard, E.T.A., Saatchi, S.S., White, L.J.T., Abernethy, K.A., Jeffery, K.J., Lewis, S.L., Collins, M., Lefsky, M.A., Leal, M.E., Woodhouse, I.H. and Meir, P., 2012. Mapping tropical forest biomass with radar and spaceborne LiDAR in Lop'e National Park, Gabon: overcoming problems of high biomass and persistent cloud. *Biogeosciences*, 9: 179-191.
 - Namiranian, M., 2006. *Measurement of Tree and Forest Biometry*. University of Tehran Press, 574p (In Persian).
 - Pang, Y., Lefsky, M., Sun, G., Ellen Miller, M. and Li, Z., 2008. Temperate forest height estimation performance using ICESat GLAS data from different observation periods, The

Estimation of forest canopy height in mountainous areas using ICESat-GLAS data

M. Rajab Pourrahmati¹, A.A. Darvishsefat^{2*}, N. Baghdadi³, M. Namirani⁴ and H. Soofi Mariv⁵

1- Ph.D. Student, Faculty of Natural Resources, University of Tehran, Karaj, Iran

2* - Prof., Faculty of Natural Resources, University of Tehran, Karaj, Iran. Email: adarvish@ut.ac.ir

3- Research Director at IRSTEA, Montpellier, France

4- Prof., Faculty of Natural Resources, University of Tehran, Karaj, Iran

5- Forest Expert, Faculty of Natural Resources, University of Tehran, Karaj, Iran

Received: 08.27.2014

Accepted: 12.22.2014

Abstract

Forest canopy height is an important input variable to derive a set of essential parameters of forest stands, which is yet costly and time consuming when measured based on ground surveys. The satellite-based laser scanner data from ICESat-GLAS provide a 3D representation of ground objects by measuring the distance from spacecraft to the objects on the earth surface. By means of these data, this study aims to estimate forest canopy height in a portion of mountainous Kheyroud experimental forests in north of Iran. An ICESat-GLAS dataset was analyzed. Several metrics including waveform extent, lead-edge extent and trail-edge extent were extracted from waveform data, and a terrain index was additionally calculated based on a digital elevation model at the location of all laser footprints. Forest canopy height was retrieved by calculating difference between signal begin and ground peak (direct estimation) and regression models (indirect estimation). For fitting the regression, a number of 330 highest trees were measured in 33 circular plots (70 meter diameter) which were collocated with LiDAR footprints. The directly estimated height produced R_a^2 and RMSE values of 0.56 and 10.32 m, respectively. Compared to this, regression models based on combined waveform metrics and digital elevation model provided better results. Best model fit with lowest AIC= 204.55 was achieved using waveform extent and terrain index variables ($R_a^2=0.82$; RMSE= 6.16m). The ICESat-GLAS therefore concluded to be able to retrieve a relatively accurate estimate of maximum forest canopy height in such steep mountainous area, especially on small scales. Better results are assumed to be achieved using other statistical methods, as well as by an improved waveform processing techniques.

Keywords: Maximum canopy height, waveform extent, trail-edge extent, lead-edge extent, space-borne LiDAR, ICESat-GLAS.