بررسی قابلیت داده‌های لیدار هوایی در برآورد ارتفاع پایه‌های درختی پلت و ممرز

رمضان علی خرمی[۱]، علی اصغر درویش صفت[۲]، مسعود طبری کوچکسرایی[۳]* و شعبان شتایی جویباری[۴]

[۱] دانشجوی دورهٔ دکتری جنگلداری، دانشکدهٔ منابع طبیعی، دانشگاه تربیت مدرس
[۲] استاد گروه جنگلداری و اقتصاد جنگل، دانشکدهٔ منابع طبیعی، دانشگاه تهران
[۳] دانشیار گروه جنگلداری، دانشکدهٔ منابع طبیعی، دانشگاه تربیت مدرس
[۴] دانشیار دانشکدهٔ جنگلداری، دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی گرگان

(تاریخ دریافت: ۱۳۹۲/۳/۱۷؛ تاریخ پذیرش: ۱۳۹۲/۵/۱۴)

چکیده

اندازه‌گیری ارتفاع درختان به روش سنتی در عرصه‌های جنگلی به‌ویژه در توده‌های ناهمسال، انبوه و چنداشکوبهٔ پهن‌برگ دشوار و مستلزم صرف زمانی طولانی است. در تحقیق حاضر از سیستم لیزر اسکنر هوایی برای تولید داده‌های لیدار و داده‌های سه‌بعدی دقیق از درختان جنگلی استفاده شد تا قابلیت این داده‌ها برای برآورد ارتفاع پایه‌های درختی در یک جنگل پهن‌برگ خزری در شصت‌کلاته گرگان بررسی شود. داده‌ها در فصل رویش با میانگین تراکم چهار تا پنج نقطه در متر مربع برداشت شد. ۱۰۰ پایهٔ درختی از دو گونهٔ پلت (*Acer velutinum*) و ممرز (*Carpinus betulus*) که در اشکوب چیره واقع شده بودند یا تداخل تاجی با پایه‌های مجاور نداشتند انتخاب شد. ارتفاع درختان با استفاده از دستگاه اندازه‌گیری ارتفاع درخت (Vertex IV) اندازه‌گیری شد و موقعیت مراکز درختان با استفاده از سیستم DGPS و نیز به روش فاصله و آزیموت با استفاده از دوربین توتال استیشن برداشت شد. درختان برداشت‌شده در زمین، با استفاده از مختصات مرکز و قطر تاج در ابرنقاط لیزر بازیابی شدند و استخراج ارتفاع به‌طور مستقیم از ابرنقاط لیزر صورت گرفت. روابط رگرسیونی بین ارتفاع درختان اندازه‌گیری‌شده در عرصه و استخراج شده از ابرنقاط داده‌های لیزر تحلیل شد، طوری‌که ارتفاع درختان پلت و ممرز به‌ترتیب با ضرایب تبیین ۰/۹۶ و ۰/۹۵ و میانگین خطای نسبی ۴ و ۳ درصد برآورد شد. مقدار RMSe (جذر میانگین مربع خطاها) ارتفاع برآوردی گونه‌های پلت و ممرز، به‌ترتیب ۱/۵متر (۶ درصد) و ۱/۸۴متر (۶ درصد) و میانگین اختلاف بین ارتفاع استخراج‌شده از لیدار و ارتفاع اندازه‌گیری‌شده در عرصه ۱/۰۴ متر و ۱/۵۳- متر به‌دست آمد. نتایج این تحقیق آشکار می‌سازد که، با توجه به مقبولیت داده‌های ارتفاعی لیدار، سرعت فراگیرشدن داده‌ها و سهولت دسترسی آن برای کاربران، استفاده از این داده‌ها را می‌توان برای برآورد ارتفاع درختان گونه‌های مورد تحقیق در دیگر نقاط جنگلی شمال کشور توصیه کرد.

واژه‌های کلیدی: ارتفاع پایهٔ درختی، پلت، لیزر اسکنر هوایی، ممرز.

* نویسندهٔ مسئول شمارهٔ تماس: ۰۹۱۱۲۲۴۶۲۵۰ ایمیل: mtabari@modares.ac.ir

مقدمه و هدف

کسب اطلاعات از مشخصه‌های کمی پایهٔ درختی به‌عنوان عنصر اصلی جنگل، برای آماربرداری جنگل حیاتی است، طوری که با تعیین مشخصه‌های کمی آن، به‌آسانی می‌توان به اطلاعاتی در سطح توده و جنگل دست پیدا کرد (Brandtberg *et al*., 2003; Chen *et al*., 2006). در واقع، با تعیین مشخصه‌های کمی درختان به‌همراه دیگر داده‌ها، اطلاعات اولیه به‌منظور برنامه‌ریزی دربارهٔ آینده جنگل تولید می‌شود که برای مدیریت جنگل، برنامه‌ریزی و پایش آن ضروری است (Koch *et al*., 2006). در روش‌های سنتی آماربرداری جنگل به‌طور معمول تعیین مشخصه‌های کمی درختان مانند ارتفاع و قطر از طریق عملیات میدانی یا عکس‌های هوایی صورت می‌گیرد، اما این روش‌ها برای کسب اطلاعات از جنگل به کار زیاد و زمان طولانی نیاز دارند و در مناطق دور از دسترس، روش میدانی عملاً فاقد کارایی لازم است (Lee *et al*., 2010).

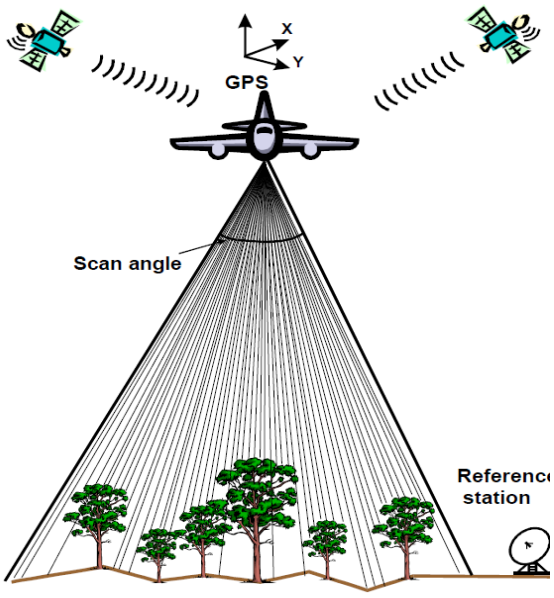
جنگل‌های پهن‌برگ خزری ایران که بیشتر به مناطق کوهستانی محدود می‌شوند، ناهمسال، آمیخته و چنداشکوبه‌اند و تراکم زیادی دارند. در عملیات میدانی، گستردگی تاج درختان پهن‌برگ، تراکم زیاد تاج پوشش، ناهمسالی و چنداشکوبگی، دیدن نوک درخت را که برای سنجش ارتفاع ضروری است، دشوار می‌کند و گاهی موجب خطا در اندازه‌گیری ارتفاع درختان می‌شود. اما سیستم‌های لیزر اسکنر هوایی که بیش از سه دهه است که در زمینهٔ سنجش از دور توسعه پیدا کرده‌اند برخلاف روش‌های سنتی، می‌توانند در زمان تقریبا کوتاه با تولید لیزر و ارسال آن از ارتفاع بالای تاج‌پوشش جنگل به‌سمت درختان و دریافت و ثبت پرتوهای برگشتی، داده‌های سه‌بعدی دقیقی را تولید کنند که برای تعیین مشخصات کمی پایه‌های درختی از جمله ارتفاع به کار می‌رود (Lim *et al*., 2003). در واقع، با استفاده از سیستم‌های یادشده می‌توان حجم عملیات میدانی را برای تعیین مشخصه‌های کمی درختان تا حد بسیار زیادی کاهش داد. سیستم‌های لیزر اسکنر هوایی بسته به نوع و حالت ارسال و دریافت امواج به دو گروه اصلی موج پیوسته[1] و موج گسسته[2] تقسیم می‌شوند. در گروهی که موج گسسته تولید می‌کنند، با عملیات اسکن، ابری از نقاط لیزری تولید می‌شود که هر نقطه آن دارای داده‌های سه‌بعدی و شدت لیزری[3] است.

لیدار[4] به‌مفهوم آشکارسازی نوری و مسافت‌یابی است و داده‌های سه‌بعدی آن، مختصات نقطهٔ برخورد پرتو لیزری را با شاخ و برگ درختان یا سطح زمین نشان می‌دهد. اما داده‌های شدت لیدار با قدرت انرژی برگشت‌یافته از شاخ و برگ درختان یا سطح زمین در ارتباط است (Lim *et al*., 2003). هر پالس لیزر بسته به نوع سیستم لیدار ممکن است یک یا چند برگشت داشته باشد. یک پالس در مسیر حرکتش می‌تواند به قسمت‌های مختلف تاج درخت یا سطح زمین زیر تاج درخت برخورد کرده و به‌طرف سنجنده برگشت کند (شکل ۱). هر پایه درخت را می‌توان با تعیین سه مؤلفهٔ موقعیت مکانی درخت، ارتفاع و شعاع تاج آن در ابرنقاط لیزر آشکار کرد. بنابراین ارتفاع یکی از مؤلفه‌های سه‌گانهٔ آشکارسازی هر پایه درخت در ابرنقاط لیزری به‌شمار می‌رود. Holmgren and Inkinen (1999) اولین بار با استفاده از داده‌های لیدار به آشکارسازی و اندازه‌گیری مشخصات کمی پایهٔ درختی (مانند ارتفاع و قطر تاج) پرداختند. چنین نتایجی را دیگر محققان نیز تایید کردند (Lim *et al*., 2003; Holmgren *et al*., 2003; Chen *et al*., 2006).

این سیستم‌ها قادر به تولید داده‌های ارتفاعی خیلی دقیق از هر پایه درخت نیز هستند (Naesset and Bjerknes, 2001; Maltamo *et al*., 2004) طوری که با تراکم دست‌کم ۵ تا ۱۰ پالس لیزر در متر مربع، می‌توان موقعیت،

[1] Continuous wave
[2] Discrete return
[3] Intensity
[4] Light Detection and Ranging

ارتفاع و شکل هر پایهٔ درخت را در اشکوب چیره تعیین کرد (Vauhkonen *et al*., 2010).



شکل ۱- نحوهٔ برداشت داده‌های لیدار توسط لیزر اسکنر هوایی از مناطق جنگلی (Hyyppä *et al*., 2000)

از درون‌یابی ابرنقاط لیزر می‌توان دو مدل رقومی زمین[1] و رقومی سطحی[2] تولید کرد. از تفاضل مدل رقومی زمین از مدل رقومی سطحی، مدل رقومی ارتفاعی تاج پوشش[3] (DCHM) به‌دست می‌آید. دو مدل رقومی زمین و رقومی سطحی واجد منابع مختلف خطا هستند و خطای مکانی آنها که طی فرایند درون‌یابی از ابرنقاط لیزر تولید می‌شود (Guo *et al*., 2010) می‌تواند دقت برآورد ارتفاع درخت را با استفاده از مدل ارتفاعی تاج‌پوشش کاهش دهد (Li *et al*., 2012). مرور منابع نشان می‌دهد که اندازه ارتفاع درختی که براساس اختلاف دو مدل رقومی زمین و سطحی تعیین می‌شود، در مقایسه با ارتفاع اندازه‌گیری‌شدهٔ همان درخت در عرصه به‌طور معمول دارای اریبی منفی است (Lim *et al*., 2003; Coops *et al*., 2004; Yu *et al*., 2004; Buddenbaum and Seeling, 2006; Stereńczak *et al*., 2008). برآورد کم ارتفاع درخت به‌روش فوق را می‌توان ناشی از فرایند درون‌یابی داده‌های لیدار و اندازهٔ سلول رستری مدنظر برای درون‌یابی دانست که به افزایش ارتفاع نقاط در DTM و کاهش ارتفاع نقاط در DSM منجر می‌شود (Wack and Stelzl, 2005; Stereńczak *et al*., 2008).

ما استفادهٔ مستقیم از داده‌های ابرنقاط لیزر، خطای برآورد مشخصه‌های کمی درختان را کاهش می‌دهد (Rahman *et al*., 2009; Stereńczak and Zasada, 2011; Tittmann *et al*., 2011).

به تازگی در جهان، بررسی‌های زیادی دربارهٔ قابلیت داده‌های لیدار برای برآورد مشخصه‌های کمی توده‌های جنگلی و پایه‌های درختی انجام گرفته است، اما باید توجه داشت که ساختار بیشتر این جنگل‌ها از جنبه‌های مختلف از جنگل‌های خزری شمال ایران متمایز است. ازاین‌رو باید تا قابلیت داده‌های سه‌بعدی لیدار برای برآورد ارتفاع گونه‌های درختی در جنگل‌های خزری که گاهی ساختار پیچیده‌تری دارند، بررسی شود. در تحقیق حاضر برای اولین بار در جنگل‌های پهن‌برگ خزری به‌طور مستقیم از داده‌های

[1] Digital Elevation Model (DEM)
[2] Digital Surface Model (DSM)
[3] Digital Canopy Height Model

ابرنقاط لیزر که از لیزر اسکنر هوایی در فصل رویش برداشت شد برای تعیین ارتفاع درختان استفاده می‌شود. در حقیقت، هدف این تحقیق، بررسی قابلیت داده‌های ارتفاعی لیدار برای تعیین ارتفاع درختان اشکوب چیره دو گونه اصلی پلت (*Acer velutinum*) و ممرز (*Carpinus betulus*)، یا پایه‌هایی از این دو گونه که تاجشان در داخل توده جنگلی آزاد است و تداخل تاجی با پایه‌های مجاور ندارند، است.

مواد و روش‌ها

- منطقهٔ تحقیق

منطقهٔ تحقیق در ارتفاع ۵۰۰-۳۰۰ متر از سطح دریا واقع در پارسل‌های ۱۱ و ۱۲ سری یک جنگل آموزشی-پژوهشی شصت‌کلاته (جنوب غربی شهرستان گرگان) واقع است. طول و عرض جغرافیایی منطقه، به‌ترتیب ″۲۸ ´۲۲ °۵۴ تا ″۲۸ ´۲۳ °۵۴ شرقی و ″۷ ´۴۵ °۳۶ تا ″۳۴ ´۴۶ °۳۶ شمالی است. ممرز، انجیلی، پلت، شیردار و توسکا گونه‌های اصلی درختی منطقه هستند و تاج‌پوشش جنگل بین ۷۰ تا ۹۵ درصد برآورد شده است.

- داده‌های لیدار

داده‌های لیزر اسکنر هوایی از نوع موج گسسته با طول موج مادون قرمز میانی (نانومتر۱۵۵۰) بود و در نیمهٔ دوم مهر ۱۳۹۰در فصل رویش که درختان دارای برگ بودند با استفاده از سیستم لیزر اسکنر Litemapper 5600 و با میانگین تراکم ۵-۴ نقطه در مترمربع از منطقه جنگلی شصت کلاته، توسط شرکت رایان نقشه برداشت شد. متوسط ارتفاع پرواز حدود ۸۰۰ متر، آزیموت خط پرواز ۵۴ درجه، زاویه اسکن حدود ۴۵ درجه، واگرایی پرتو ۱/۲ میلی رادیان و عرض نوار برداشت بین۷۰۰ -۶۰۰ متر بوده است. داده‌های برداشت‌شدهٔ پرواز با پوشش‌های طولی ۶۰ درصد و عرضی ۴۰ درصد پس از پردازش اولیه به‌صورت xyz در اختیار قرار گرفتند.

- روش تعیین مختصات نقاط برداشت توسط لیزر اسکنر هوایی

مختصات هر نقطه بر روی درخت یا روی زمین که لیزر با آن برخورد می‌کند با مشخص بودن مختصات نقطهٔ ارسال لیزر (از طریق سیستم DGPS تعبیه‌شده بر روی هواپیما)، اندازهٔ زاویهٔ ارسال لیزر و فاصلهٔ مایل بین نقطهٔ ارسال و نقطه برخورد پالس با درخت یا سطح زمین قابل محاسبه است. پردازش اولیهٔ داده‌ها و تعیین موقعیت مکانی نقاط با استفاده از داده‌های DGPS و سیستم ناوبریIMU توسط شرکت رایان نقشه انجام گرفت. با مشخص بودن بردار L (تعیین مؤلفه‌های بردار موقعیت نقطهٔ ارسال لیزر توسط DGPS) و بردار r (طول اندازه‌گیری‌شده توسط مسافت‌یاب لیزری)، بردار P که حاوی مؤلفه‌های مختصات نقطهٔ برخورد لیزر با درخت یا سطح زمین است با استفاده از رابطه $\vec{p} = \vec{L} + \vec{r}$ محاسبه شد. فاصلهٔ مایل بین هواپیما و نقطهٔ برخورد پالس بر روی درخت یا سطح زمین با استفاده از اندازه‌گیری دقیق زمان رفت و برگشت پالس از هواپیما محاسبه شد. با معلوم بودن سرعت نور (c) و زمان رفت و برگشت موج (Δt)، فاصلهٔ مایل با استفاده از معادلهٔ $\left|\vec{r}\right| = c\frac{\Delta t}{2}$ تعیین شد. بنابراین با داشتن سه مشخصهٔ موقعیت نقطه ارسال لیزر، زاویهٔ ارسال لیزر و فاصلهٔ مایل بین نقطهٔ ارسال لیزر و نقطهٔ برخورد لیزر با درخت یا سطح زمین، مختصات نقطهٔ برخورد لیزر با اشیا و پدیده‌ها محاسبه شد (Baltsavias, 1999).

- تعیین درختان نمونه و اندازه‌گیری مشخصات آنها

در این تحقیق هر پایه از درخت به‌عنوان یک نمونه درنظر گرفته شد. با پیمایش در عرصه و مشاهدهٔ هرپایه از دو گونهٔ ممرز (*Carpinus betulus*) و پلت (*Acer velutinum*) که در اشکوب چیره قرار داشتند یا تداخل تاجی با درختان مجاور نداشتند به‌عنوان درخت نمونه انتخاب شدند (شکل ۲). تعداد نمونه‌های درختی از هر یک از دو گونهٔ یاد شده ۵۰

اصله بوده است. ارتفاع هر اصله درختی که به‌عنوان نمونه تعیین شد، در عرصه با استفاده از دستگاه اندازه‌گیری ارتفاع درخت Vertex IV (دقت ۱۰سانتی‌متر) اندازه‌گیری شد. برای تعیین قابلیت داده‌های لیدار در برآورد ارتفاع درختان بلند و کوتاه، دو طبقهٔ ارتفاعی برای پلت در نظر گرفته شد، اما تعداد کافی از درختان کوتاه ممرز که تاج آزاد داشته باشند در منطقهٔ تحقیق یافت نشد.

شکل۲- تصویر دو درخت نمونهٔ پلت (سمت چپ) و ممرز (سمت راست) واقع در اشکوب چیره

- برداشت موقعیت مکانی درختان

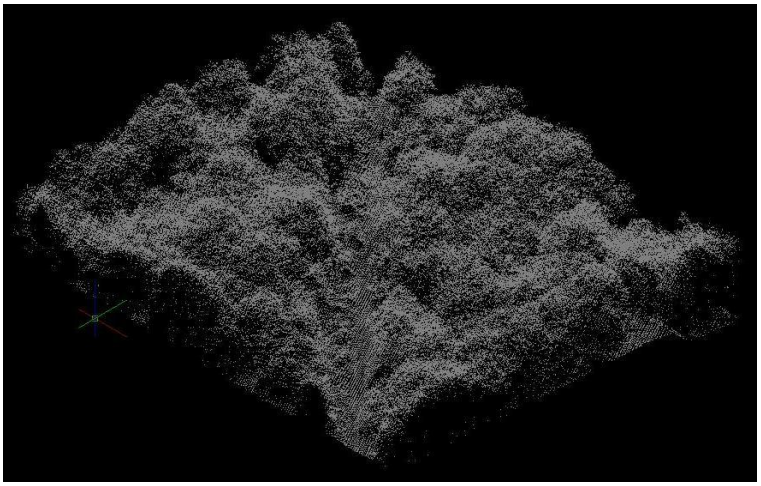
بازیابی دقیق درختان نمونه در ابرنقاط لیزری از اهمیت بسیار زیادی در این تحقیق برخوردار بوده است. به‌همین علت، برداشت مختصات مراکز درختان با دقت زیاد انجام گرفت، زیرا عدم تناظر بین درختان نمونه‌ای که در عرصه برداشت شدند با برگشت پالس‌هایی که به آنها نسبت داده می‌شوند، هر گونه محاسبه را برای تعیین مشخصات کمی درخت بی‌اعتبار می‌کند. به‌منظور تهیهٔ نقشهٔ پراکنش درختان نمونه در طبیعت و بازیابی آنها در ابرنقاط لیزر، مختصات هر پایه درخت (X,Y,Z) به‌وسیلهٔ GPS Z-max به‌روش استاتیک (Static) و همچنین از طریق اندازه‌گیری فاصلهٔ و آزیموت درختان نسبت به بنچ‌مارک و درختان با استفاده از دوربین توتال استیشن برداشت و ثبت شد. خطای مختصات نقاط برداشت‌شده با DGPS Z-max پس از پردازش سه میلی‌متر به‌دست آمد.

- استخراج داده‌های سه‌بعدی از ابرنقاط لیزر

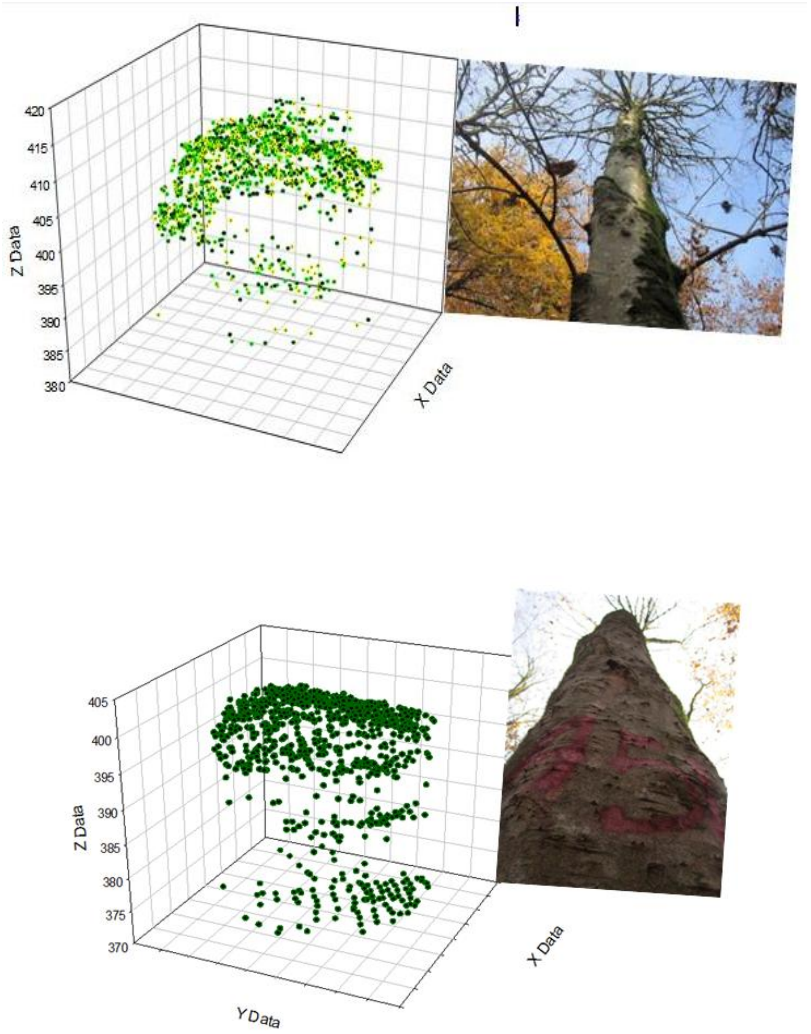
شکل ۳ مربوط به قسمتی از منطقهٔ تحقیق است که از داده‌های ابرنقاط لیزر تولید شده است. درختان نمونه با استفاده از پلی‌گونی که مراکز آنها مختصات مراکز درخت نمونه، و شعاعشان شعاع تاج درختان نمونه است در ابرنقاط لیزر بازیابی شدند و برگشت پالس‌های مربوط به هر درخت نمونه، با فرمت X,Y,Z از ابرنقاط لیزر استخراج شد.

- تعیین ارتفاع درختان نمونه با استفاده از داده‌های لیدار

قبل از استفاده از داده‌های ارتفاعی لیدار، داده‌های پرت مربوط به هر درخت نمونه در ابرنقاط لیزر بررسی شد. این‌کار با بررسی هیستوگرام ارتفاعی ابرنقاط هر درخت نمونه و با تعیین آستانهٔ ارتفاعی درختان انجام گرفت. ارتفاع هر درخت نمونه از تفاضل کمینهٔ ارتفاع نقطهٔ لیزری در بن درخت از بیشینهٔ نقطهٔ لیزری در نوک درخت به‌دست آمد و طول فلش در شکل ۴ که بر روی محور Z قرار دارد، ارتفاع درخت را نشان می‌دهد.



شکل۳- بخشی از ابر نقاط لیزر برداشت‌شده از منطقهٔ تحقیق



شکل۴- ابر نقاط لیزر دو درخت نمونه، ارتفاع هر درخت از تفاضل ارتفاع بالاترین و پایین‌ترین نقاط محاسبه می‌شود.

- تجزیه‌وتحلیل آماری داده‌ها

برای تعیین همگنی واریانس متغیرهای پیش‌بینی‌کننده از آزمون لون[1] و برای تعیین رابطهٔ بین متغیر پیش‌بینی‌کننده (ارتفاع درخت در لیزر) و متغیر وابسته (ارتفاع اندازه‌گیری‌شدهٔ درخت در زمین) از تحلیل رگرسیون خطی استفاده شد. چون پیش‌بینی می‌شود رابطهٔ رگرسیونی بین ارتفاع درخت در لیزر و ارتفاع درخت به‌دست‌آمده از طریق اندازه‌گیری زمینی در درختان ارتفاع‌های مختلف، متفاوت است، تحلیل رگرسیونی برای درختان با طبقهٔ ارتفاعی ۱۸-۵ متر و ۳۶-۲۰ متر انجام گرفت. تحلیل نقاط پرت با استفاده از آمارهٔ Case diagnostics با هدف شناسایی داده‌هایی مؤثر بر روند تغییرات رگرسیون انجام گرفت. همچنین، عدم خودهمبستگی بین خطاها با استفاده از آمارهٔ Durbin– Waston و نرمال بودن خطاهای مدل‌های رگرسیون آزمون شد. مقایسهٔ ارتفاع درخت در لیدار و ارتفاع اندازه‌گیری‌شده در زمین در دو گونه پلت و ممرز با استفاده از آزمون t- student زوجی انجام گرفت. برای تعیین کارایی مدل رگرسیونی از ضریب تبیین، جذر میانگین مربع خطاهای مدل (RMSe) رابطهٔ ۱ و میانگین خطای نسبی رابطهٔ ۲ استفاده شد.

$$RMSe = \sqrt{\frac{\sum_1^n (y-y^\circ)^2}{n}}$$ رابطهٔ ۱

$$MRe = \frac{\sum |y-y^\circ|}{ny}$$ رابطهٔ ۲

RMSe: جذر میانگین مربع خطاها، *y*: مقدار ارتفاع اندازه‌گیری‌شده در عرصه، y°: ارتفاع برآوردشده توسط مدل رگرسیون؛ *MRe*: میانگین خطای نسبی؛ و *n*: تعداد نمونه‌هاست. تجزیه‌وتحلیل آماری داده‌های لیدار و ترسیم شکل‌ها در نرم‌افزارهای SPSS16 و Excel انجام گرفت.

[1] Leven test

نتایج

براساس نتایج تحلیل رگرسیون بین ارتفاع اندازه‌گیری‌شده در زمین و ارتفاع استخراج‌شده از ابرنقاط لیزر، ضرایب تبیین و جذر میانگین مربع خطاها یا RMSe دو مدل برآوردکنندهٔ ارتفاع به‌ترتیب برای گونه‌های پلت و ممرز ۰/۹۶ و ۰/۹۵، ۱/۵متر (۶ درصد) و ۱/۸۴متر (۶ درصد) است (شکل‌های ۵ و ۷) (جدول ۳). در شکل ۶، مدل‌های رگرسیونی برای دو طبقهٔ ارتفاعی ۱۸-۵ متر و ۳۶-۲۰ متر به‌ترتیب با ضرایب تبیین ۰/۹۸ و ۰/۷۳ ارتفاع درختان پلت را برآورد کردند. بر اساس نتایج جدول ۳، میانگین خطای نسبی مدل‌های ۱ و ۲ برای برآورد ارتفاع پلت و ممرز به‌ترتیب ۴ و ۳ درصد و میانگین اختلاف بین ارتفاع استخراج‌شده از لیزر و ارتفاع اندازه‌گیری‌شده در زمین برای درخت پلت ۱/۰۴ متر و برای درخت ممرز ۱/۵۳- متر بود که به این مفهوم است که ارتفاع درخت در ممرز با استفاده از داده‌های لیدار کمتر از ارتفاع درخت در زمین برآورد شده است (جدول ۱). بین میانگین ارتفاع درخت در لیدار و ارتفاع اندازه‌گیری‌شده در زمین در دو گونهٔ پلت و ممرز با استفاده از آزمون t-student در سطح ۱ درصد اختلاف معنی‌داری مشاهده شد (جدول ۲).

بحث

در تحقیق حاضر براساس تجزیه‌وتحلیل داده‌ها، ضریب تبیین مدل‌های رگرسیونی برآوردکنندهٔ ارتفاع با استفاده از داده‌های لیدار برای گونهٔ پلت ۰/۹۶ و برای گونهٔ ممرز ۰/۹۵ و میانگین خطای نسبی به‌ترتیب ۴ و ۳ درصد برآورد شد (جدول۳). این نتایج نشان داد که با استفاده از داده‌های لیدار، برآورد ارتفاع پایه‌های درختی پلت و ممرز در اشکوب چیره با صحت زیاد امکان‌پذیر است. مقایسهٔ نتایج تحقیق حاضر با یافته‌های پژوهش‌های مشابه در جهان تا حدودی دشوار به‌نظر می‌رسد، زیرا شرایط و ساختار جنگل، سیستم‌های مختلف لیزر اسکن، متفاوت بودن

ارتفـاع پـرواز، تـراکم داده‌هـای لیـدار، زاویـهٔ اسـکن، واگرایی پرتو و قطر لکهٔ لیـزری و سـرانجام روش‌هـا و الگوریتم‌های استفاده شده تـا حـدودی نتـایج چنـین تحقیقی را تحت تأثیر قرار می‌دهند.

جدول ۱- آماره‌های توصیفی داده‌های ارتفاعی درختان استخراج‌شده از لیزر و اندازه‌گیری‌شده در زمین

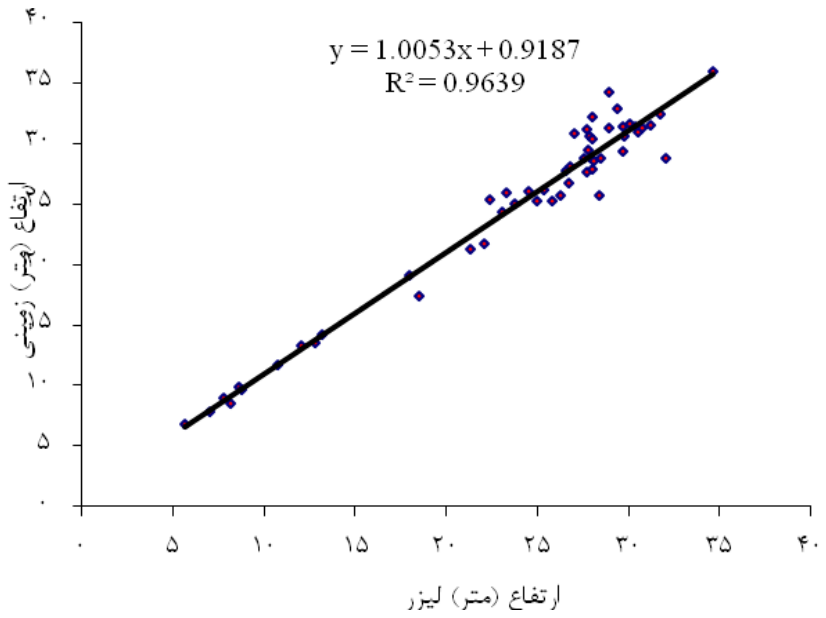
	میانگین ارتفاع (متر)		کمینه ارتفاع (متر)		بیشینه ارتفاع (متر)		انحراف معیار ارتفاع (متر)		
گونهٔ درختی	لیدار	زمین	لیدار	زمین	لیدار	زمین	لیدار	زمین	میانگین اختلاف*
ممرز	۲۸/۸۶	۳۰/۴	۱۱	۱۱	۳۴	۳۶	۵/۹۸	۵/۹۰	-۱/۵۳
پلت	۲۳/۵۸	۲۴/۹	۵/۶	۶/۸	۳۴/۶۶	۳۶	۷/۷۳	۷/۹۱	۱/۰۴

* بین ارتفاع درخت در لیدار و ارتفاع اندازه‌گیری شده در زمین(متر)

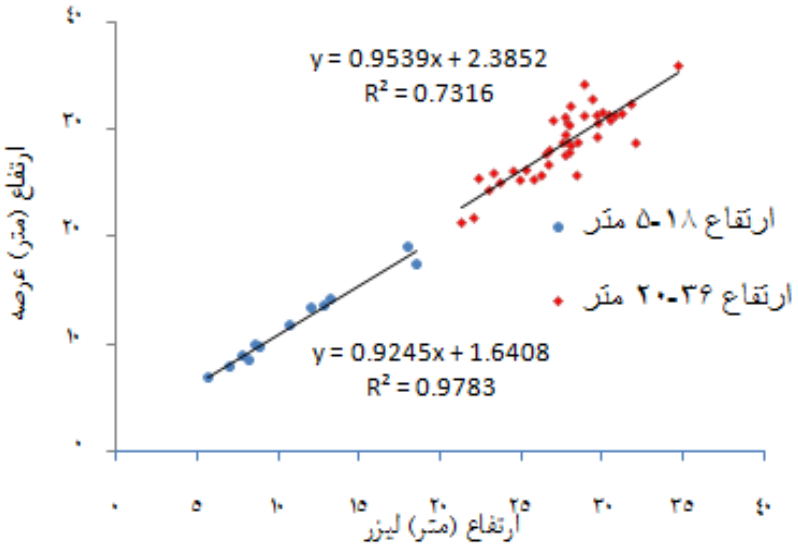
جدول ۲- مقایسهٔ میانگین ارتفاع درخت در لیدار و ارتفاع اندازه‌گیری‌شده در زمین دو گونهٔ درختی، با استفاده از t- student

گونهٔ درختی	t	P
پلت	-۵/۰۵۲	۰/۰۰۰
ممرز	-۸/۱۱۴	۰/۰۰۰

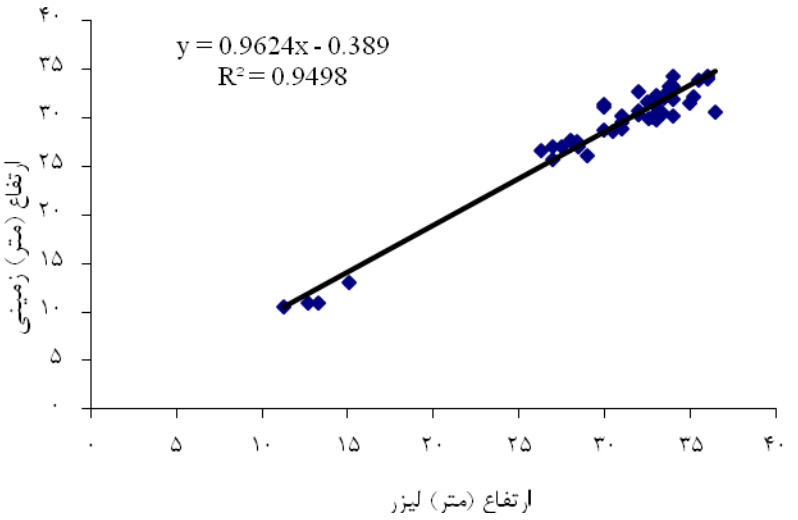
*بین میانگین ارتفاع درخت در لیدار و ارتفاع اندازه‌گیری‌شده در زمین در دو گونهٔ پلت و ممرز در سطح ۱ درصد اختلاف معنی‌داری وجود دارد.



شکل ۵- مدل رگرسیونی بین ارتفاع اندازه‌گیری‌شده در زمین و ارتفاع استخراج‌شده از داده‌های لیدار در درختان پلت



شکل ۶- مدل‌های رگرسیونی بین ارتفاع اندازه‌گیری‌شده در زمین و ارتفاع استخراج‌شده از داده‌های لیدار در درختان پلت در دو طبقهٔ ارتفاعی



شکل ۷- مدل رگرسیونی بین ارتفاع اندازه‌گیری‌شده در زمین و ارتفاع استخراج‌شده از داده‌های لیدار در درختان ممرز

جدول ۳- مشخصات مدل‌های پیش‌بینی‌کنندهٔ ارتفاع درختان پلت و ممرز براساس داده‌های لیدار

مدل	ضریب تبیین تصحیح‌شده	جذر میانگین مربع خطا (متر)	جذر میانگین مربع خطا (درصد)	میانگین خطای نسبی (درصد)
مدل۱ (پلت)	۰/۹۶	۱/۵	۶	۴
مدل۲ (ممرز)	۰/۹۵	۱/۸۴	۶	۳

در تحقیق حاضر، با استفاده از داده‌های لیدار، ضریب تبیین برآورد ارتفاع درختان پلت و ممرز به‌ترتیب ۰/۹۶ و ۰/۹۵ به‌دست آمد که با نتایج تحقیقات (Popescu *et al*., 2003; Heurich and Weinacker, 2004; Shrestha and Wynne, 2012) که ضرایب تبیین مدل‌ها را با استفاده از داده‌های لیدار برای برآورد ارتفاع در پهن‌برگان (*Betula pendula*, *Betula pubescens*)، (*Sorbus aucuparia*)، (*Fagus sylvatica*, *Acer pseudoplatanus*) ۰/۹۶، نوئل و نراد (*Abies alba*, *Picea abies*) ۰/۹۸، گونه‌های بلوط (*Quercus falcata* Michx)، (*Quercus nigra L.*) و (*Quercus stellata Wangenh.*) ۰/۹۰، کاج تدا (*Pinus taeda*) ۰/۹۶ و برای گونه‌های ارس (*Juniperus virginiana*) و نارون (*Ulmus parviflora*) ۰/۹۸ برآورد کردند، همسو است.

Kwak *et al.* (2007) با استفاده از داده‌های لیدار ارتفاع ۱۰۰ پایه از درختان *Pinus koraiensis*، *Larix leptolepis* و *Quercus spp.* را به‌ترتیب با ضرایب تبیین ۰/۷۷، ۰/۸۰ و ۰/۷۴ برآورد کردند. ضرایب تبیین مدل‌ها در تحقیقات یادشده در مقایسه با ضرایب تبیین به‌دست‌آمده در تحقیق حاضر (۰/۹۶ و ۰/۹۵) از کارایی کمتری برای برآورد ارتفاع برخوردار است. کم بودن تراکم داده‌های لیدار (۱/۸ نقطه در متر مربع) و زیاد بودن ارتفاع پرواز (۱۵۰۰ متر) در پژوهش‌های مذکور ممکن است علت ضعف کارایی مدل‌های ارائه‌شده توسط آنان باشد. در تحقیقی Takahashi *et al.* (2008) گزارش کردندکه کم بودن تراکم ابرنقاط و ارتفاع زیاد پرواز می‌تواند دقت برآورد ارتفاع درختان را با استفاده از داده‌های ارتفاعی لیزر کاهش دهد. همان‌طور که اشاره شد در تحقیق ما تراکم داده‌های لیدار ۵-۴ نقطه در متر مربع و ارتفاع پرواز حدود ۸۰۰ متر از سطح دریا بوده است.

با استفاده از داده‌های لیدار، Hyyppä *et al.*(2000) ارتفاع درختان نوئل و کاج جنگلی را با ضریب تبیین ۰/۹۷، Persson *et al.* (2002) ارتفاع همین دو گونه را با ضریب تبیین ۰/۹۸ و Gaveau and Hill (2003) ارتفاع درختان *Acer campestre*، *Quercus robur*، *Fraxinus excelsior* و *Populus tremula* را با ضریب تبیین ۰/۹۵ برآورد کردند. Brandtberg *et al.*, (2003) بلوط (*Quercus prinus*)، افرای قندی (*Acer rubrum*) و درخت لاله (*Liriodendron tuliperifera*) را در فصل خزان و در جنگل‌های پهن‌برگ خزان‌کننده با تراکم ۱۲پالس در متر مربع بررسی کرده و ارتفاع درختان را با ضریب تبیین ۰/۶۹ برآورد کردند. در کل، همهٔ محققان اخیر، ارتفاع درختان را با داده‌های لیدار کمتر از ارتفاع اندازه‌گیری‌شده در عرصهٔ جنگل برآورد کردند.

در تحقیق حاضر، میانگین اختلاف بین ارتفاع استخراج‌شده از لیزر و ارتفاع اندازه‌گیری‌شده در عرصه برای درختان ممرز و پلت به‌ترتیب ۱/۵۳- متر و ۱/۰۴ متر به‌دست آمد. این نتیجه نشان می‌دهد که در ممرز همانند پژوهش‌های محققان دیگر، ارتفاع استخراج‌شده از لیزر اندکی کمتر از ارتفاع اندازه‌گیری‌شده در عرصه است. Gaveau and Hill (2003) بیان داشتند پالس‌های لیزری که از لیزر اسکنر هوایی به‌سمت تاج‌پوشش درختان ارسال می‌شود، قبل از اصابت به نوک درخت، از فضای خالی بین شاخ و برگ‌ها عبور کرده و به قسمت‌های پایین‌تر داخل تاج درخت برخورد می‌کنند و به‌سمت سنجنده برمی‌گردند. بنابراین، اولین برگشت پالس لیزر از نوک و انتهای درخت وجود ندارد و به‌همین دلیل ارتفاع درخت در ابرنقاط لیزر معمولاً کم‌تر از ارتفاع درخت در عرصه برآورد می‌شود. علاوه بر اظهارات یادشده محققان، تصور ما این است که در صورت استفادهٔ مستقیم از ابرنقاط لیزر، به ویژه در پهن‌برگان، خطای اندازه‌گیری در عرصه موجب می‌شود که ارتفاع استخراج‌شده توسط لیزر کم‌تر از ارتفاعی باشد که در عرصه

اندازه‌گیری می‌شود، زیرا در بیشتر پهن‌برگان از جمله پلت، ممرز و بلـوط، در بـالاترین سـطح خـارجی تـاج درخت چندین نقطهٔ اوج وجـود دارد کـه ارتفـاع بـه-نسبت یکسانی دارند یا اختلاف ارتفاع چندانی ندارنـد. این ویژگی سبب می‌شود که پالس‌های لیزر دست‌کـم بـه یکـی از ایـن نقـاط اوج برخـورد کننـد و ارتفـاع استخراج‌شدهٔ درخت از ابرنقاط لیزر بـه ارتفـاع واقعـی همان درخت نزدیک شود (Koch *et al.*, 2006).

همان‌طورکه خطـوط بـرازش‌یافتـه در مـدل‌هـای رگرسیونی در شکل‌های ۵، ۶ و ۷ نشان می‌دهنـد، در درختان بلندتر، نسبت به درختان کوتاه‌تر، بـین داده-های ارتفاع در لیزر و زمین اختلاف بیشتری مشـاهده می‌شود که، احتمالاً به این دلیل است که درختانی که ارتفاع کمتری دارند، چون با صحت بیشتری در عرصه اندازه‌گیری شدند، اختلاف بین ارتفاع در عرصه و لیزر در آنها به حداقل رسیده است. در شکل ۵ کـه شـیب خـط بـرازش‌یافتـه در حـدود یـک (۱/۰۰۵) اسـت، درختانی با ارتفاع ۱۸-۵ متر به‌طور کامل بر روی خط برازش‌یافته قرار گرفته‌اند. این بدین مفهوم اسـت کـه ارتفاع درختان کوتاه در عرصه و لیزر تقریباً برابر است امـا در انتهـای همـین شـکل در درختـان بلنـد (۳۶-۲۰متر) ابرنقاط با فاصله‌ای کم در طـرفین خـط یادشده قرار دارند که بدین معنا است که بـین ارتفـاع برآوردشده از مدل و ارتفاع اندازه‌گیری‌شده در عرصـه اخـتلاف انـدکی وجـود دارد. در شـکل ۶، مـدل‌هـای رگرسـیونی در کلاسـه‌هـای ارتفـاعی ۱۸-۵ متـر و ۳۶-۲۰ متر بـه‌ترتیـب بـا ضـرایب تبیـین ۰/۹۸ و۰/۷۳، ارتفاع درختان پلت را برآورد کردند. نتایج بـه‌دسـت‌آمـده این فرضیه را تقویت می‌کند که درختان بلندتر، از عوامل کاهش کارایی مـدل‌هـای برآوردکننـدهٔ ارتفـاع هسـتند. همان‌طورکه Heurich and Weinacker (2004) نیـز بیان کردند، به‌نظر می‌رسد در زیر تاج پوشش درختان پهن‌برگ، اندازه‌گیری ارتفاع درختان چیره و بلندقامت در عرصه به‌دلیل گستردگی تاج آنهـا و تـاج درختـان مجاور، تراکم زیاد تاج‌پوشش، ناهمسالی و قرار گـرفتن درختان در لایه‌های مختلف ارتفاعی، بـا خطـا همـراه باشد. بنابر آنچه گفته شد، پیش‌بینی می‌شود چنانچـه با استفاده از دستگاه‌های پیشرفتهٔ اندازه‌گیـری ارتفـاع مانند VERTEX VL402، ارتفاع درختان بلند با دقت بیشتری اندازه‌گیری شود احتمالاً اختلاف بـین ارتفـاع درختان در لیزر و ارتفاع اندازه‌گیری‌شده در عرصه بـه حداقل کاهش خواهد یافت و مدل‌های برآوردکننده با کارآیی بیشتری ارتفاع درختان را برآورد خواهند کرد.

از برایند نتایج این تحقیق مـی‌تـوان دریافـت کـه بـا میانگین خطای نسبی ۳ تا ۴ درصـد، امکـان اسـتفاده از داده‌های لیـدار بـرای بـرآورد ارتفـاع درختـان چیـره در جنگل‌های تحت بررسی وجود دارد. ازایـن‌رو، در صـورت صـحت مناسـب آن در بـرآورد ارتفـاع دیگـر گونـه‌هـای جنگلی شمال کشور در رویشگاه‌ها و تراکم‌های مختلـف، این داده‌ها را می‌توان به‌ویژه در آماربرداری جنگـل مـورد به کـار گرفـت. تحقیقـات تکمیلـی بـرای بـرآورد ارتفـاع درختان در اشکوب‌های میانی و پـایینی، را مـی‌تـوان بـا برداشت داده‌های لیدار در فصل خزان انجـام داد. شـایان ذکر است که امروزه در برخی کشورها بـه‌ویـژه در نـروژ، فنلانـد و کانـادا از سیسـتم لیـزر اسـکنر هـوایی در آماربرداری جنگل برای تامین بخشی از داده‌هـای آمـاری اسـتفاده مـی‌شـود (Vauhkonen *et al.*, 2010). همچنین، داده‌های لیدار هم با توسط هواپیما و هم بـا ماهواره‌ها قابل دریافت است که این موضوع دسترسـی کاربران را به این داده‌هـا در آینـده نزدیـک آسـان‌تـر خواهد کرد. هرچنـد داده‌هـای لیـدار در حـال حاضـر پرهزینه به‌نظر می‌رسد، انتظار مـی‌رود هماننـد دیگـر داده‌های سنجش از دور به‌سـرعت فراگیـر شـود و بـه سهولت در اختیار کاربران قرار گیرد.

تشکر و قدردانی

از دانشگاه علوم کشـاورزی و منـابع طبیعـی گرگـان برای در اختیار قراردادن داده‌های لیدار و از شرکت رایـان نقشه برای پردازش‌های اولیه آن سپاسگزاری می‌شود.

منابع

Baltsavias, E.P., 1999. Airborne Laser Scanning: basic relation and formulas. ISPRS, *Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 54: 199-214.

Będkowski, K., and K. Stereńczak, 2008. Impact of forest stands on the accuracy of DTM derived from airborne LIDAR data. In: Proceedings of the International Conference, Landscape Ecology and Forest Managment, Chengdu, China, 16–22.

Brandtberg, T., T.A., Warner, R.E., Landenberger, and J.B. McGraw, 2003. Detection and analysis of individual leaf off tree crowns in small footprint, high sampling density LIDAR data from the eastern deciduous forest in North America, *Remote Sensing of Environment*, 85: 290-303.

Buddenbaum, H., and S. Seeling, 2006. Estimating structural forest attributes using high resolution, airborne hyperspectral and LIDAR imagery. Workshop on 3D Remote Sensing in Forestry, Vienna, Austria, 253–257.

Chen, Q., D. Baldocchi, P. Gong, and M. Kelly, 2006. Isolating individual trees in a savanna woodland using small footprint LIDAR data, *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*, 72(8): 923–932.

Coops, N.C., M.A. Wulder, D.S. Culvenor, and B. St-Onge, 2004. Comparison of forest attributes extracted from fine spatial resolution multispectral and LIDAR data, *Canadian Journal of Remote Sensing*, 6: 855–866.

Gaveau, D. L. A., and R. A. Hill, 2003. Quantifying canopy height underestimation by laser pulse penetration in small-footprint airborne laser scanning data, *Canadian Journal of Remote Sensing*, 29: 650-657.

Guo, Q., W. Li, H. Yu, and O. Alvarez, 2010. Effects of topographic variability and LIDAR sampling density on several DEM interpolation methods, *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*, 76(6): 701–712.

Heurich, M., and H. Weinacker, 2004. Automated tree detection and measurement in temperate forest of central Europe using laser scanning data. In: Proceedings of the ISPRS working group VIII/2, Laser-Scanners for Forest and Landscape Assessment, Freiburg, Germany 3– 6 October 2004, 198–203.

Holmgren, J., M. Nilsson, and H. Olsson, 2003. Estimation of tree height and stem volume on plots using airborne laser scanning, *Forest Science*, 49: 419–428.

Holmgren, J., and M. Inkinen, 1999. Detecting and estimating attributes for single trees using laser scanner, *Photogrammetric Journal of Finland*, 16(2): 27–42.

Hyyppä, J., U. Pyysalo, H. Hyyppä, and A. Samberg, 2000. Elevation accuracy of laser scanning-derived digital terrain and target models in forest environment. In: (eds.). The 4th EARSeL workshop on LIDAR Remote Sensing of Land and Sea. Dresden, Germany, 139-147.

Koch, B., U. Heyder, and H. Weinacker, 2006. Detection of individual tree crowns in airborne LIDAR data, *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*, 72(4): 357–363.

Kwak, D., W. Lee, J. Lee, G.S. Biging, and P. Gong, 2007. Detection of individual trees and estimation of tree height using LIDAR data, *Journal of Forest Research*, 12(6): 425–434.

Lee, H., K.C. Slatton, B.E. Roth, and W.P. Cropper, 2010. Adaptive clustering of airborne LIDAR data to segment individual tree crowns in managed pine forests, *International Journal of Remote Sensing*, 31(1): 117–139.

Li, W., Q. Guo, K.M. Jakubowsk, and M. Kelly, 2012. A new method for segmenting individual Trees from the LIDAR Point Cloud, *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*, 78(1): 75–84.

Lim, K., P. Treitz, M. Wulder, B. St-Onge, and M. Flood, 2003. LIDAR remote sensing of forest structure, *Progress in Physical Geography*, 27(1): 88–106.

Maltamo, M., K. Mustonen, J. Hyypä, J. Pitkänen, and X. Yu, 2004. The accuracy of estimating individual tree variables with airborne laser scanning in a boreal nature reserve, *Canadian Journal of Forest Research*, 34: 1791−1801.

Naesset, E., and K. Bjerknes, 2001. Estimating tree heights and number of stems in young forest stands using airborne laser scanner data, *Remote Sensing of Environment*, 78: 328–340.

Persson, Å., J. Holmgren, and U. Södermann, 2002. Detecting and measuring individual trees using an airborne laser scanner, *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*, 68(9): 925−932.

Popescu, S. C., R. H. Wynne, and R. H. Nelson, 2003. Measuring individual tree crown diameter with LIDAR and assessing its influence on estimating forest volume and biomass, *Canadian Journal of Remote Sensing*, 29(5): 564−577.

Rahman, M., B.G.H. Gorte, and A. Bucksch, 2009. A new method for individual tree delineation and undergrowth removal from high resolution airborne LIDAR Laserscanning. Proceedings ISPRS Workshop

Shrestha, R., and R.H. Wynne, 2012. Estimating biophysical parameters of individual trees in an urban environment using small footprint discrete-return imaging LIDAR, *Remote Sensing*, 4: 484-508.

Stereńczak, K., K. Będkowski, and H. Weinacker, 2008. Accuracy of crown segmentation and estimation of selected trees and forest stand parameters in order to resolution of used DSM and nDSM models generated from dense small footprint LIDAR data, The International Archives of the Photogrammetry, *Remote Sensing and Spatial Information Sciences.* Vol. XXXVII. Part B6b. Beijing.

Stereńczak, K., and M. Zasada, 2011. Accuracy of tree height estimation based on LIDAR data analysis, *Folia Forestalia Polonica*, series A, 53(2): 123–129.

Takahashi, T., Y. Awaya, Y. Hirata, N. Furuya, T. Sakai, and A. Sakai, 2008. Effect of flight altitude on LIDAR-derived tree heights in mountainous forests with poor laser penetration rates, *Photogrammetric Journal of Finland*, 21(1): 86-96.

Tittmann, P., S. Shafii, S. Hartsough, and B. Hamann, 2011. Tree detection, and measurement from LIDAR point cloud using RANSAC. Proceedings of SilviLaser 2011, 11th International Conference on LIDAR Applications for Assessing Forest Ecosystems, University of Tasmania, Australia, 16-20 October 2011, 1-13

Vauhkonen, J., L. Ene, S. Gupta, J. Heinzel, J.Holmgren, J. Pitkanen, S. Solberg, Y. Wang, H. Weinacker, K. M. Hauglin., V. Lien, P. Packalen, T. Gobakken, B. Koch, E. Nasset, T. Tokola, and M. Maltamo, 2010. Comparative testing of single-tree detection algorithms, silvilaser, Freiburg, Germany, September, 14-17.

Wack, R., and H. Stelzl, 2005. Laser DTM generation for South-Tyrol and 3D–visualization. In: ISPRS Workshop "Laser scanning 2005", Enschede, Netherands, 27–32.

Yu, X., J. Hyyppä, H. Kaartinen, and M. Maltamo, 2004. Automatic detection of harvested trees and determination of forest growth using airborne laser scanning, *Remote Sensing of Environment*, 90: 451–462.

Potential of LIDAR data for estimation of individual tree height of *Acer velutinum* and *Carpinus betulus*

R.A. Khorrami[1], A.A. Darvishsefat[2], M. Tabari Kochaksaraei[3*], and Sh. Shataee Jouybari[4]

[1] Ph.D student, Faculty of Natural Resources, Tarbiat Modares University, I. R. Iran
[2] Prof., Faculty of Natural Resources, University of Tehran, I. R. Iran
[3*] Associate Prof., Faculty of Natural Resources, Tarbiat Modares University, I. R. Iran
[4]Associate Prof., Faculty of Forestry, Gorgan University of Agriculture Science and Natural Resources, I. R. Iran

(Received: 7 June 2013, Accepted: 5 August 2013)

Abstract

In traditional methods, measurement of tree height in broad-leaved forests, particularly in uneven-aged, high density and multi-storey stands is difficult and time-consuming. In the growing season of 2011, airborne laser scanner system was used to acquire Light Detection and Ranging (LIDAR) data by a sampling density of 4-5 points/m^2 in a broad-leaved forest, northern Iran (Shast-Kalate forest located in southwest of Gorgan). LIDAR data was used to estimate the height of individual trees. Hundred individual tree samples belong to two species, *Acer velutinum* and *Carpinus betulus,* were selected. The trees were located in dominant storey and/or without overlay with adjacent trees. Heights of trees were measured using Vertex 1V. Center coordinates of the sample trees were determined using DGPS system and Total Station with distance and angle. Sample trees were detected in laser point clouds using their center coordinates and crown diameter. The heights of sample trees were extracted directly from laser point clouds. Linear regression model between the heights of trees in the field measurement and laser point clouds was yielded coefficients of determination (R^2) (0.96, 0.95), RMSe (1.05m (6%), 1.48m (6%), and relative error (4%, 3%) for *A.velutinum* and *C. betulus,* respectively. Mean differences between tree height of laser point cloud and field measurement were achieved 1.04m and -1.53m for *A.velutinum* and *C.betulus,* respectively. The results clarified that considering the acceptable of LIDAR height data, rapid prevail of data and its easy access for users, the employment of LIDAR data for estimating tree height in other places of northern forests of Iran is advised.

Keywords: *Acer velutinum,* Airborne laser scanner, *Carpinus betulus,* Individual tree height.

∗ Corresponding author Tel: 0911246250 Email: mtabari@modares.ac.ir