فصلنامه علمی - پژوهشی تحقیقات جنگل و صنوبر ایران
جلد ۲۳ شماره ۲، صفحه ۲۷۸-۲۶۹، (۱۳۹۴)

شناسایی گونه‌های درختی پلت و ممرز با استفاده از مشخصه‌های هندسی و آماری به‌دست‌آمده از داده‌های لیدار هوایی

رمضان‌علی خرمی[۱]، علی‌اصغر درویش‌صفت[۲]، مسعود طبری‌کوچکسرایی[۳*] و شعبان شتایی‌جویباری[۴]

۱- دانشجوی دکتری جنگل‌داری، دانشکده منابع طبیعی، دانشگاه تربیت مدرس، نور، ایران
۲- استاد، گروه جنگل‌داری و اقتصاد جنگل، دانشکده منابع طبیعی، دانشگاه تهران، کرج، ایران
۳*- نویسنده مسئول، استاد، گروه جنگل‌داری، دانشکده منابع طبیعی، دانشگاه تربیت مدرس، نور، ایران، پست الکترونیک: mtabari@modares.ac.ir
۴- دانشیار، دانشکده جنگل‌داری، دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی گرگان، گرگان، ایران

تاریخ دریافت: ۹۳/۰۹/۲۹ تاریخ پذیرش: ۹۳/۱۱/۰۴

چکیده

در این پژوهش امکان استفاده از مشخصه‌های هندسی و آماری به‌دست‌آمده از داده‌های لیدار برای شناسایی پایه‌های درختی پلت (*Acer velutinum*) و ممرز (*Carpinus betulus*) در سری یک جنگل آموزشی- پژوهشی شصت‌کلاته گرگان بررسی شد. برای این منظور داده‌های لیدار درختان نمونه از کل ابر نقاط لیزر منطقه مورد مطالعه با استفاده از مختصات مرکز تنه و قطر تاج (برداشت‌شده در زمین) جداسازی شد. در عملیات میدانی، ۸۰ پایه درختی از دو گونه پلت و ممرز که در آشکوب چیره واقع بودند و یا تداخل تاجی با پایه‌های مجاور نداشتند، به‌عنوان درختان نمونه انتخاب شدند. ارتفاع درختان نمونه با استفاده از دستگاه Vertex IV و شعاع تاج آنها در چهار جهت جغرافیایی به کمک فاصله‌یاب لیزری Leica Disto اندازه‌گیری شد و موقعیت مرکز آنها با استفاده از سیستم موقعیت‌یاب جهانی تفاضلی (DGPS) و نیز به روش فاصله و آزیموت با استفاده از دوربین توتال استیشن برداشت شد. ویژگی‌های مختلف آماری و هندسی از داده‌های لیدار درختان نمونه استخراج و برای تفکیک گونه پایه‌های درختی در تابع تحلیل تشخیص مورد استفاده قرار گرفت. نتایج نشان داد که متغیرهای انحراف‌معیار ارتفاعی نقاط لیزر در بالای ۰/۸ ارتفاع درخت و شیب تاج بهترین ترکیب متغیرها بودند که با صحت کلی ۸۰/۳ درصد دو گونه را از یکدیگر تفکیک کردند. این درحالی است که میانگین این دو ویژگی در ممرز بیشتر از پلت بود. به‌طور کلی، از یافته‌های پژوهش استنتاج می‌شود که مشخصه‌های هندسی و آماری به‌دست‌آمده از داده‌های لیدار نقش مهمی در شناسایی این دو گونه دارند.

واژه‌های کلیدی: پلت، تابع تحلیل تشخیص، شناسایی گونه‌های درختی ، لیدار، ممرز.

مقدمه

امروزه کاربرد سیستم‌های لیدار در جنگل‌داری به‌طور فزاینده‌ای در حال فراگیر شدن است (Ko *et al.*, 2013; Yu *et al.*, 2014)، زیرا داده‌های لیدار امکان بررسی دقیق سه‌بعدی از پوشش گیاهی و زمین را فراهم می‌کنند (Korpela *et al.*, 2010). این داده‌ها با تراکم زیاد (بیشتر از پنج نقطه لیزری در مترمربع) برای دامنه وسیعی از کاربردها در جنگل‌داری سنتی و مدرن مفیدند (Lefsky *et al.*, 2002). پیش‌بینی می‌شود با ظهور نسل‌های جدید سنجنده‌های لیدار، در آینده نزدیک داده‌هایی با تراکم بیشتر

و کیفیت بهتر با هزینه‌ای کمتر در اختیار کاربران قرار گیرد (Kaartinen *et al*., 2012). در ابتدا لیدار در جنگل‌داری برای برآوردهای کمی نظیر میانگین ارتفاع در سطح قطعه‌نمونه و توده متمرکز مورد استفاده قرار می‌گرفت، اما پس از مدتی این مسئله مطرح شد که با استفاده از داده‌های لیدار با تراکم زیاد می‌توان درختان را در آشکوب بالا آشکارسازی کرد (Li *et al*., 2012) و گونه‌های آنها را از یکدیگر تفکیک کرد. به عبارت دیگر، داده‌های لیدار بالقوه می‌توانند برای تفکیک گونه‌های درختی مورد استفاده قرار گیرند (Korpela *et al*., 2010). با اینکه پژوهشگران درمورد رابطه داده‌های لیدار با پوشش گیاهی دارای دیدگاه‌های مختلفی هستند، اما براساس یک ایده کلی، توزیع برگشت‌های لیدار از یک درخت تابع پارامترهایی چون شکل و تراکم تاج، انبوهی و آرایش ریزشاخه‌ها و شاخه‌ها، میزان بازتابندگی سطوح مختلف تاج و غیره است، به‌طوری‌که این پارامترها می‌توانند عامل تفکیک گونه‌های مختلف درختی باشند.

پژوهش‌های انجام‌شده در این زمینه را می‌توان به چند دسته اصلی تقسیم کرد. اولین سری از پژوهش‌ها به استخراج داده‌ها از قسمت بالایی تاج اشاره دارد، به‌گونه‌ای که به‌طور معمول تراکم نقاط لیزر برگشت‌یافته از یک درخت از بالا به پایین تاج و نیز از مرکز درخت به سمت خارج کاهش می‌یابد (Holmgren & Persson, 2004; Rahman & Gort, 2008). به‌این معنی که بیشتر داده‌ها از بخش مرکزی تاج قابل دریافت است. رویکرد دوم به تمرکز داده‌ها در "سطح تاج" توجه دارد (Hilker *et al*., 2008; Holmgren *et al*., 2008). پس از توسعه سریع سنجنده‌های لیدار، پالس‌های لیزر به مقدار بیشتری به داخل تاج نفوذ می‌کنند و فرصت خوبی برای بازیابی داده‌ها از داخل تاج درخت فراهم می‌شود. گروه سوم از پژوهش‌ها بازیابی داده‌ها از نقاط داخلی تاج و تجزیه‌وتحلیل توزیع عمودی ارتفاع و شدت ابر نقاط لیدار را دنبال کردند (Kim *et al*., 2009; Suratno *et al*., 2009; Korpela *et al*., 2010). از آنجاکه شکل درخت یک ویژگی مهم برای تفکیک گونه‌ها به‌شمار می‌رود، پژوهش‌های بعدی درمورد استخراج داده‌های هندسی از سطح خارجی تاج درخت انجام شد (Holmgren & Persson, 2004). به‌طور کلی، در پژوهش‌هایی که از داده‌های لیدار برای طبقه‌بندی گونه‌های درختی استفاده می‌شود، فرض بر این است که ساختار بیرونی و شکل کلی تاج و همچنین ویژگی داخلی آن که به ویژگی‌های درونی و ساختار شاخه‌زایی مربوط می‌شود، در گونه‌های مختلف یکسان نیست و داده‌های لیدار می‌توانند این ویژگی‌ها را نشان دهند (Ko *et al*., 2013).

Yu و همکاران (۲۰۱۴) با استفاده از ویژگی‌های به‌دست‌آمده از داده‌های لیدار مانند انحراف‌معیار و میانگین ارتفاع نقاط لیزر درختان و میزان درصد فراوانی نقاط لیزر در ارتفاع‌های مختلف، درختان سه گونه کاج جنگلی (*Pinus sylvestris*)، نوئل (*Picea abies*) و توس (*Betula* spp.) را با تراکم داده‌های لیدار ۱/۵ نقطه در مترمربع با صحت کلی ۶۲/۱ درصد از یکدیگر تفکیک کردند. Ko و همکاران (۲۰۱۳) با استخراج چند مشخصه هندسی از داده‌های سه‌بعدی لیدار (با تراکم۴۰ نقطه در مترمربع)، ۱۶۰ درخت از تاکسون‌های افرای قندی (*Acer saccharum* Marsh.)، کاج (*Pinus banksiana* Lamb, *P. strobus* L.) و صنوبر (*Populus tremuloides*) را با صحت کلی ۸۸/۳ درصد طبقه‌بندی و نقاط لیزری مربوط به درختان نمونه را از نقاط لیزری مربوط به درختان آشکوب‌های زیرین (به‌صورت دستی) تفکیک کردند. Vauhkonen و همکاران (۲۰۰۹) با استفاده از شکل هندسی تاج و توزیع داده‌های لیدار (با تراکم ۴۰ نقطه لیزری در مترمربع) و به کمک تابع تحلیل تشخیص (Discriminant analysis) سه گونه کاج جنگلی، نوئل و توس به‌ترتیب با تعداد پایه‌های ۱۲۲، ۷۱ و ۲۱ اصله را با صحت ۹۵ درصد تفکیک کردند. ایشان با استفاده از مختصات مکانی درختان که در عرصه برداشت شد و تعیین شعاع تاج درختان در عکس‌های هوایی، پایه‌های درختی را در ابر نقاط لیزر به‌صورت دستی آشکارسازی کردند. Holmgren و Persson (۲۰۰۴) برای تفکیک دو گونه نوئل و کاج جنگلی، ۲۰ متغیر از داده‌های

سه‌بعدی و شدت پالس برگشتی از تاج درختان استخراج کردند و توانستند با استفاده از تابع تحلیل تشخیص با صحت ۹۵ درصد دو گونه را از یکدیگر تفکیک کنند. در استفاده جداگانه از هر یک از متغیرها، متغیرهای نسبت پالس‌های برگشتی لیزر تاج به کل پالس‌ها و متغیرهای صدک‌های ارتفاعی نقاط دو گونه به‌ترتیب با بیشترین (۸۸/۳ درصد) و کمترین (۶۲/۴) صحت کلی از یکدیگر تفکیک شدند، اما با استفاده از هر یک از ویژگی‌های انحراف‌معیار ارتفاع و شکل هندسی نقاط لیزر دو گونه با صحت کلی حدود ۷۰ درصد از یکدیگر تفکیک شدند. Kim و همکاران (۲۰۱۱) با استفاده از داده‌های لیدار (با تراکم ۲۰ نقطه در مترمربع) با مشخصه نسبت طول به عرض تاج در ۱۰، ۲۵ و ۳۳ درصد فوقانی تاج، پهن‌برگان را از سوزنی‌برگان با استفاده از تابع تحلیل تشخیص به ترتیب با صحت‌های ۵۵/۳ ، ۵۸/۷ و ۶۱/۳ درصد تفکیک کردند. آشکارسازی درختان در این پژوهش به‌صورت دستی و با استفاده از برداشت‌های زمینی انجام شد. همچنین Brandtberg (۲۰۰۷) با استفاده از توزیع داده‌های ارتفاعی و توزیع داده‌های شدت لیدار سه گونه پهن‌برگ *Quercus* spp.، *Acer rubrum* و *Liriodendron tulipifera* را (با تراکم ۱۲ پالس در مترمربع) با تابع تحلیل تشخیص و با صحت ۶۰ تا ۶۴ درصد تفکیک کرد.

با توجه به پیشینه پژوهش، بیشتر پژوهش‌ها در زمینه تفکیک گونه‌های درختی با استفاده از داده‌های لیدار، در جنگل‌های اسکاندیناوی و آمریکای شمالی انجام شده است که هم ساختار و هم ترکیب گونه‌های آنها متفاوت با ساختار و گونه‌های جنگل‌های هیرکانی است، بنابراین ضروری است تا قابلیت داده‌های لیدار برای تفکیک گونه‌های درختی در جنگل‌های آمیخته هیرکانی که ساختار آن‌ها پیچیده‌تر از ساختار بسیاری از جنگل‌ها در سایر نقاط دنیا می‌باشد، مورد بررسی قرار گیرد. از این‌رو، در پژوهش پیش‌رو با استفاده از مشخصه‌های استخراج‌شده آماری و هندسی از داده‌های لیدار، امکان تفکیک گونه درختان پلت (*Acer velutinum*) و ممرز (*Carpinus betulus*) مورد بررسی قرار گرفت.

مواد و روش‌ها

منطقه مورد مطالعه

منطقه مورد مطالعه در جنوب غربی شهرستان گرگان، سری یک جنگل آموزشی- پژوهشی شصت‌کلاته، در پارسل‌های ۱۱ و ۱۲ و در دامنه ارتفاعی ۳۰۰ تا ۵۰۰ متر از سطح دریا واقع شده است. محدوده طول و عرض جغرافیایی آن به‌ترتیب ″۲۸ □۲۲ °۵۴ تا ″۰۰□۲۳ °۵۴ طول شرقی و ″۷ □۴۵ °۳۶ تا ″۳۴ □۴۶ °۳۶ عرض شمالی است. ممرز، انجیلی، پلت، شیردار و توسکا مهمترین گونه‌های درختی منطقه را تشکیل می‌دهند. توده‌های جنگل به‌طور عمومی دو تا سه‌آشکوبه هستند و درصد تاج‌پوشش آنها بین ۷۰ تا ۹۵ درصد برآورد شده است. انجیلی، ممرز و پلت سه گونه اصلی درختی در پارسل‌های منطقه مورد مطالعه هستند و دارای بیشترین فراوانی می‌باشند (Anonymous, 2008).

داده‌های لیدار و استخراج مشخصه‌های آن

داده‌های لیزر اسکنر هوایی از نوع موج‌گسسته (Discrete return) با طول موج مادون قرمز میانی (۱۰۶۴ نانومتر) هستند و در نیمه دوم مهر ۱۳۹۰ در فصل رویش که درختان دارای برگ بودند، با استفاده از سیستم لیزر اسکنر Riegl LMS Q560 و با میانگین تراکم چهار تا پنج نقطه در مترمربع برداشت شدند. متوسط ارتفاع پرواز حدود ۸۰۰ متر از سطح زمین، آزیموت خط پرواز ۵۴ درجه، زاویه اسکن حدود ۴۵ درجه، واگرایی (Divergency) پرتو نیم میلی‌رادیان و عرض نوار برداشت بین ۶۰۰ تا ۷۰۰ متر بوده است. داده‌های سه‌بعدی، عرض و دامنه پالس‌های برگشتی (برداشت‌شده با پوشش‌های پرواز طولی ۶۰ و عرضی ۴۰ درصد) پس از پردازش اولیه (به‌صورت xyz) در اختیار قرار گرفتند. پس از حذف خطاها و نویزها، داده‌های مربوط به هر درخت نمونه به‌طور مستقیم از ابر نقاط لیزر با استفاده از مختصات موقعیت درخت و سطح دایره‌ای شکل به اندازه قطر تاج جداسازی و مشخصه‌های مختلف آماری و هندسی این داده‌ها برای تفکیک گونه پایه‌های درختی استخراج

شدند. استفاده مستقیم از داده‌های نقطه‌ای لیزر می‌تواند از دست رفتن اطلاعات و میزان خطا را در فرآیند درون‌یابی این داده‌ها برای تولید مدل‌های رقومی ارتفاع زمین (DTM) و سطح (DSM) کاهش دهد (Guo *et al*., 2010; Tittmann *et al*., 2011; Li *et al*., 2012).

روش پژوهش

در این پژوهش هر پایه درخت از دو گونه ممرز و پلت که در آشکوب چیره قرار داشت و یا تداخل تاجی با درختان مجاور نداشت، به‌عنوان درخت نمونه انتخاب شد. با توجه به برداشت درختان نمونه در اشکوب بالا و درختان بدون تداخل تاجی با درختان مجاور و برای اجتناب از خطای ناشی از اختلاط داده‌های پالس‌های برگشتی درختان مجاور، نقاط لیزر واقع در بالای ۰/۸ ارتفاع درخت مورد تجزیه‌وتحلیل قرار گرفتند. این امر به این دلیل بوده است که اصولاً بیشتر پالس‌ها از قسمت‌های فوقانی تاج درخت برگشت می‌کنند، به‌طوری‌که از این پالس‌های برگشتی می‌توان داده‌های بیشتری از شکل و هندسه یک درخت به‌دست آورد (Holmgren & Persson, 2004; Chasmer *et al*., 2006).

تعداد نمونه‌های برداشت‌شده در زمین از هر یک از دو گونه یادشده حدود ۴۰ اصله بود. پس از پردازش اولیه داده‌ها، درختان نمونه‌ای که تراکم نقاط لیزری در آنها کمتر از سه نقطه در مترمربع بود، در تجزیه‌وتحلیل‌ها استفاده نشدند، بنابراین تعداد درختان نمونه استفاده‌شده در تجزیه‌وتحلیل‌ها برای هریک از گونه‌ها ۳۳ پایه بود. ارتفاع کل هر پایه درخت نمونه در عرصه با استفاده از دستگاه اندازه‌گیری ارتفاع درخت Vertex IV (دقت ۱۰ سانتی‌متر) و شعاع تاج آن نیز به کمک فاصله‌یاب لیزری Leica Disto در چهار جهت جغرافیایی اندازه‌گیری شد.

برای تهیه نقشه پراکنش درختان نمونه در طبیعت و بازیابی آنها در ابر نقاط لیزر، مختصات هر پایه درخت (x,y,z) به‌وسیله DGPS Z-max به‌روش استاتیک و همچنین ازطریق اندازه‌گیری فاصله و آزیموت درختان نسبت به بنچ‌مارک با استفاده از دوربین توتال‌استیشن برداشت و ثبت شد. پس از جداسازی نقاط لیزری مربوط به هر درخت نمونه، مشخصه‌های هندسی و آماری از داده‌های لیدار مانند انحراف‌معیار ارتفاع نقاط لیزر در بالای ۰/۸ ارتفاع درخت و ویژگی‌های دیگر از همه نقاط لیزری برگشت‌یافته از قسمت‌های مختلف درختان نمونه استخراج شد. نسبت‌های ارتفاعی نقاط لیزر در جدول ۱ حاصل تقسیم هریک از آماره‌های میانگین، میانه، انحراف‌معیار و ضریب تغییرات ارتفاع نقاط لیزر بر ارتفاع کل درخت است.

جدول ۱- مشخصه‌های آماری و هندسی استخراج‌شده از داده‌های لیدار

ویژگی‌های استخراج‌شده در بالای ۰/۸ ارتفاع درخت	ویژگی‌های استخراج‌شده از کل درخت
انحراف‌معیار ارتفاع نقاط لیزر در بالای ۰/۸ ارتفاع درخت	میانگین نسبی ارتفاع نقاط لیزر
ضریب تغییرات ارتفاع نقاط لیزر در بالای ۰/۸ ارتفاع درخت	میانه نسبی ارتفاع نقاط لیزر
میانگین نسبی ارتفاع نقاط لیزر در بالای ۰/۸ ارتفاع درخت	انحراف‌معیار نسبی ارتفاع نقاط لیزر
	شیب تاج (نسبت ارتفاع تاج به شعاع تاج)

تجزیه‌وتحلیل داده‌ها

در این پژوهش برای تفکیک دو گونه پلت و ممرز از تابع تحلیل تشخیص استفاده شد. ابتدا آزمون نرمال بودن داده‌ها و همگنی واریانس داده‌ها انجام شد و داده‌های پرت حذف شدند. داده‌هایی که نرمال نبودند با تبدیل‌های مناسب نرمال شدند و در آزمون مقایسه میانگین‌های دو نمونه‌برداری مستقل (آزمون t- student) مورد استفاده قرار گرفتند. چنانچه بین میانگین‌ها اختلاف معنی‌داری وجود

نداشت یا داده‌ها پس از تبدیل نرمال نشدند و یا واریانس داده‌ها همگن نبود، ویژگی‌های مربوطه در تابع تحلیل تشخیص مورد استفاده قرار نگرفتند. در تابع تحلیل تشخیص، میزان صحت تفکیک پلت و ممرز ابتدا به‌طور جداگانه و با استفاده از هر یک از ویژگی‌های تفکیک‌کننده تعیین شد. آنگاه با استفاده از ویژگی‌های مختلف تفکیک‌کننده در تابع تحلیل تشخیص، بهترین ترکیب ویژگی‌ها برای تفکیک دو گونه شناسایی شد. صحت طبقه‌بندی هریک از گونه‌ها و هم چنین صحت کلی طبقه‌بندی با استفاده از روش اعتبارسنجی متقابل و با دسته‌بندی تعدادی از نمونه‌ها به‌صورت داده‌های تعلیمی و تست انجام شد (Diamantidis *et al.*, 2000).

نتایج

خطای مختصات نقاط برداشت‌شده با DGPS Z-max پس از پردازش سه میلی‌متر به‌دست آمد. مقایسه بین میانگین‌های ویژگی‌های تفکیک‌کننده دو گروه مستقل (پلت و ممرز) با استفاده از آزمون t- student نشان داد که در مشخصه‌های انحراف‌معیار ارتفاع نقاط لیزر در بالای ۰/۸ ارتفاع درخت و شیب تاج، میانگین داده‌ها در ممرز بیشتر از پلت است (جدول ۲). به‌استثنای شیب، بین میانگین‌های سایر ویژگی‌های استخراج‌شده از کل درخت در سطح اطمینان ۹۹ درصد اختلاف معنی‌داری مشاهده نشد (جدول ۳). استفاده جداگانه از هر یک از مشخصه‌ها برای تفکیک دو گونه پلت و ممرز مشخص کرد که انحراف‌معیار ارتفاع نقاط لیزر در بالای ۰/۸ ارتفاع درخت با بیشترین میزان صحت طبقه‌بندی (۷۷/۳ درصد)، مهم‌ترین مشخصه تفکیک‌کننده دو گونه مورد مطالعه در این پژوهش بوده است (جدول ۴). از ویژگی‌های استفاده‌شده در تابع تحلیل تشخیص، دو مشخصه انحراف‌معیار ارتفاع نقاط لیزر در بالای ۰/۸ ارتفاع درخت و شیب تاج، بهترین ترکیب متغیرها برای تفکیک گونه درختان پلت و ممرز بودند. این دو مشخصه به‌صورت ترکیبی توانستند با صحت کلی ۸۰/۳ درصد، دو گونه مورد مطالعه را از یکدیگر تفکیک کنند (جدول ۵).

جدول ۲- مقایسه میانگین‌های ویژگی‌های تفکیک‌کننده دو گروه مستقل (پلت و ممرز) با استفاده از آزمون t- student

مشخصه‌های تفکیک‌کننده	پلت	ممرز	t	p
انحراف‌معیار ارتفاع نقاط لیزر در بالای ۰/۸ ارتفاع درخت (متر)	۱/۳	۱/۵	-۵/۷	۰/۰۰۰**
ضریب تغییرات ارتفاع نقاط لیزر در بالای ۰/۸ ارتفاع درخت (درصد)	۵/۳۲	۵/۶۵	-۲/۷۹۳	۰/۰۰۷**
شیب تاج درخت	۰/۹۵	۱/۲	-۳/۱	۰/۰۰۳**

** معنی‌دار در سطح اطمینان ۹۹ درصد

جدول ۳- مقایسه میانگین‌های ویژگی‌های استخراج‌شده از کل درخت در دو گروه مستقل (پلت و ممرز) با استفاده از آزمون t- student

مشخصه‌های آماری برای تفکیک دو گونه	پلت	ممرز	t	P
میانگین نسبی ارتفاع نقاط لیزر	۰/۷۱	۰/۷۰	۰/۱۶۹	۰/۸۷ns
میانه نسبی ارتفاع نقاط لیزر	۰/۳۷	۰/۳۲	۱/۳۸۶	۰/۱۷ns
انحراف‌معیار نسبی ارتفاع نقاط لیزر	۰/۷۹	۰/۷۸	۰/۱۷۵	۰/۸۶ns

ns عدم معنی‌داری

جدول ۴- تعیین صحت کلی طبقه‌بندی پلت و ممرز به روش اعتبارسنجی متقابل با ویژگی‌های به‌دست‌آمده از داده‌های لیدار

ویژگی‌های طبقه‌بندی‌کننده	صحت کلی طبقه‌بندی (درصد)
انحراف‌معیار ارتفاع نقاط لیزر در بالای ۰/۸ ارتفاع درخت	۷۷/۳
ضریب تغییرات ارتفاع نقاط لیزر در بالای ۰/۸ ارتفاع درخت	۶۸/۲
شیب تاج درخت	۶۴/۷

جدول ۵- تعیین صحت تفکیک گونه پایه‌های درختی پلت و ممرز با استفاده از بهترین ترکیب ویژگی‌های تفکیک‌کننده (انحراف‌معیار ارتفاع نقاط لیزر در بالای ۰/۸ ارتفاع و شیب تاج

گونه	تعداد پایه‌های برداشت‌شده در زمین	تعداد پایه‌های تفکیک‌شده در تابع تحلیل تشخیص		درصد پایه‌هایی که به خطا وارد طبقه شدند (Commission error)	درصد پایه‌هایی که به خطا به طبقات دیگر اختصاص یافتند (Emission error)	صحت کاربر (درصد)	صحت تولیدکننده (درصد)	صحت کلی تفکیک (درصد)
		پلت	ممرز					
پلت	۳۳	۲۸	۵	۲۲/۲	۱۵/۱	۸۴/۴۸	۷۷/۷۷	۸۰/۳
ممرز	۳۳	۸	۲۵	۱۶/۶	۲۴/۲۴	۷۵/۷۵	۸۳/۳۳	

بحث

یافته‌های پژوهش پیش‌رو نشان از اختلاف معنی‌دار (در سطح اطمینان ۹۹ درصد) بین میانگین‌های انحراف‌معیار ارتفاع نقاط لیزر در بالای ۰/۸ ارتفاع درخت و شیب تاج در پایه‌های درختی ممرز و پلت داشت. در پژوهش مشابه، Yu و همکاران (۲۰۱۴) با استفاده از انحراف‌معیار و میانگین ارتفاع نقاط لیزر و چند مشخصه دیگر، گونه‌های نوئل، کاج جنگلی و توس را با تراکم ۱/۵ نقطه در مترمربع و با صحت کلی ۶۲/۱ درصد از یکدیگر تفکیک کردند. این درحالی است که در پژوهش پیش‌رو انحراف‌معیار ارتفاع نقاط لیزر در تاج، بیشترین نقش را با صحت کلی ۷۷/۳ درصد در تفکیک دو گونه پلت و ممرز داشت. البته این مشخصه به‌تنهایی نمی‌تواند همه ابعاد شکل هندسی تاج یک درخت را نشان دهد، زیرا انحراف‌معیار ارتفاع نقاط، تغییرات شکل را فقط در راستای قائم و در فضای یک‌بعدی نشان می‌دهد (Ko *et al.*, 2013). با این‌حال، ویژگی‌های به‌دست‌آمده از تغییرات ارتفاعی نقاط لیزر نقش مهمی در طبقه‌بندی گونه‌های درختی دارند (Popescu & Wynne, 2004, Vauhkonen *et al.*, 2009). کمتر بودن صحت طبقه‌بندی در پژوهش Yu و همکاران (۲۰۱۴) در مقایسه با پژوهش پیش‌رو را می‌توان به تراکم کم داده‌ها در پژوهش ایشان نسبت داد. میانگین انحراف‌معیار ارتفاع نقاط لیزر که از پایه‌های درختی برگشت یافته‌اند، طبق انتظار در ممرز بیشتر از پلت بود. این می‌تواند به این دلیل باشد که به‌طور معمول در آشکوب چیره، ممرز درمقایسه با پلت تاج مخروطی‌تر دارد و برعکس پلت در این آشکوب دارای تاج گسترده‌تر و شکل آن به‌نسبت گرد و کروی و اختلاف ارتفاع بین نقاط بالای تاج کمتر می‌باشد. Holmgren و Persson (۲۰۰۴) نیز نتایجی مشابه با پژوهش پیش‌رو به‌دست آوردند. در پژوهش ایشان انحراف‌معیار ارتفاع پالس‌های برگشت‌یافته از پایه‌های درختی در نوئل بیشتر از کاج جنگلی بود که بلندتر بودن طول تاج نوئل در مقایسه با کاج جنگلی علت این اختلاف بیان شده است.

در پژوهش پیش‌رو میانگین نسبت ارتفاع تاج به شعاع

تاج (مشخصه شکل تاج) در پایه‌های درختی ممرز (۱/۲) بیشتر از پلت (۰/۹) به‌دست آمد، زیرا تاج‌های مخروطی در مقایسه با تاج‌هایی نسبتاً گرد و کروی از شیب بیشتری برخوردارند. Kim و همکاران (۲۰۱۱) با استفاده از ابر نقاط لیزر، میانگین نسبت طول تاج به عرض تاج را در هشت گونه پهن‌برگ در پارک ملی واشنگتن در بالای ۶۵ درصد ارتفاع درخت، ۰/۷۶ به‌دست آوردند. پایه‌های درختی در پژوهش یادشده در شرایط غیرجنگلی (پارک ملی واشنگتن) رشد یافته‌اند که این شرایط باعث گسترش افقی تاج آنها شده است و شیب تاج را در این درختان کاهش داده است. حال آن‌که گونه‌های مورد مطالعه در پژوهش پیش‌رو در جنگل طبیعی انبوه بود که رقابت بین پایه‌های درختی پیرامونی باعث افزایش نسبی شیب تاج در این درختان شده است.

دو ویژگی استخراج‌شده از داده‌های هندسی لیدار (انحراف‌معیار ارتفاعی نقاط لیزر در بالای ۰/۸ ارتفاع درخت و شیب تاج) بهترین ترکیب متغیرها بودند که با صحت کلی ۸۰/۳ درصد دو گونه مورد مطالعه را از یکدیگر تفکیک کردند. این نتایج هم‌سو با نتایج Ko و همکاران (۲۰۱۳) و Vauhkonen و همکاران (۲۰۰۹) است که با استفاده از داده‌های هندسی لیدار توانستند با صحت زیاد (بین ۶۸ تا ۱۰۰ درصد) جنس‌ها و گونه‌های درختی را از یکدیگر تفکیک کنند. در پژوهش Vauhkonen و همکاران (۲۰۰۹) صحت جداسازی گونه‌های نوئل، کاج جنگلی و توس برابر ۹۵ درصد بود. ایشان از داده‌های لیدار با تراکم ۴۰ نقطه در مترمربع استفاده کردند، حال آن‌که تراکم داده‌های لیدار در پژوهش پیش‌رو چهار تا پنج نقطه در مترمربع بود. از آنجایی‌که کارایی مشخصه‌های هندسی به میزان تراکم داده‌های لیدار وابسته هستند، بنابراین با تراکم بیشتر داده‌های لیدار می‌توان شکل و مشخصه‌های هندسی تاج را واقعی‌تر بازسازی و دقیق‌تر تبیین کرد و صحت طبقه‌بندی گونه‌های درختی را ارتقاء داد (Tymkow & Borkowski, 2010).

استفاده جداگانه از هر یک از مشخصه‌ها برای تفکیک دو گونه مورد مطالعه نشان داد که مشخصه انحراف‌معیار ارتفاع نقاط لیزر در بالای ۰/۸ ارتفاع درخت با بیشترین صحت کلی (۷۷/۳ درصد) دو گونه پلت و ممرز را از یکدیگر تفکیک کرد. به‌نظر می‌رسد استفاده از داده‌های نقاط لیزر در قسمت بالایی ارتفاع درخت، احتمال مخلوط‌شدن داده‌های مربوط به درختان نمونه را با داده‌های درختان پیرامونی در همسایگی و زیرآشکوب به کمترین مقدار برساند (Kim *et al*., 2009). این ویژگی قسمت فوقانی درخت مبین نقش داده‌های لیدار در قسمت فوقانی تاج برای تفکیک گونه‌های درختی در جنگل‌های آمیخته و چندآشکوبه است (Chasmer *et al*., 2006). ویژگی‌های ارتفاعی در بالای ۰/۸ ارتفاع درخت که مربوط به داده‌های نسبتاً خالص می‌شدند، قدرت تفکیک‌کنندگی خوبی در طبقه‌بندی گونه‌های مورد مطالعه در پژوهش پیش‌رو داشتند (جدول‌های ۲ و۴)، اما بین میانگین ویژگی‌هایی که همه نقاط لیزری درختان نمونه را در قسمت‌های مختلف (کل درخت) شامل می‌شدند، در پلت و ممرز اختلاف معنی‌داری مشاهده نشد (جدول ۳). زیرا نقاط لیزر در این حالت مخلوطی از داده‌های درختان نمونه و درختان پیرامونی بودند، در نتیجه این ویژگی‌ها برای تفکیک گونه‌های مورد مطالعه مناسب نیستند.

درمجموع در پژوهش پیش‌رو، با استفاده از دو مشخصه انحراف‌معیار ارتفاع نقاط لیزر و شیب تاج، پایه‌های درختی دو گونه پلت و ممرز با صحت ۸۰/۳ درصد از یکدیگر تفکیک شدند که نشان از نقش لیدار و مشخصه‌های به‌دست‌آمده از داده‌های هندسی آن در تفکیک گونه‌های مورد مطالعه دارد. این درحالی است که در پژوهش پیش‌رو داده‌های شدت لیدار و برگشت‌های مربوط به هر پالس در اختیار نبود و تراکم داده‌های لیزر چهار تا پنج نقطه در مترمربع بود. پیش‌بینی می‌شود با استفاده از مشخصه‌های هندسی شکل تاج با تراکم بیشتر ابر نقاط لیزر، داده‌های شدت لیدار، فاصله و نسبت برگشت پالس‌ها، صحت طبقه‌بندی گونه‌های مورد مطالعه بیش از این مقدار ارتقاء یابد. انتظار می‌رود در توده‌های جنگلی آمیخته شمال کشور

که درختان آن به جنس‌های مختلف تعلق دارند و در شکل تاج و ویژگی‌های هندسی آنها به‌اندازه کافی تفاوت وجود دارد، به کمک داده‌های لیدار بتوان درختان گونه‌های مختلف را از یکدیگر جداسازی کرد.

References

- Anonymous, 2008. Forest Management Plan of Shast-Kolateh Forest. Published by Forests, Range and Watershed Management Organization of Iran, Tehran, 302p (In Persian).
- Brandtberg, T., 2007. Classifying individual tree species under leaf-off and leaf-on conditions using airborne LiDAR. ISPRS J. Photogrammetry & Remote Sensing, 61: 325-340.
- Chasmer, L., Hopkinson, C. and Treitz, P., 2006. Investigating laser pulse penetration through a conifer canopy by integrating airborne and terrestrial lidar. Canadian Journal of Remote Sensing, 32: 116-125.
- Diamantidis, N.A., Karlis, D. and Giakoumakis, E.A., 2000. Unsupervised stratification of cross-validation for accuracy estimation. Artificial Intelligence, 116: 1-16.
- Guo, Q., Li, W. Yu, H. and Alvarez, O., 2010. Effects of topographic variability and LiDAR sampling density on several DEM interpolation methods. Photogrammetric Engineering & Remote Sensing, 76(6): 701-712.
- Hilker, T., Wulder, M.A. and Coops, N.C., 2008. Update of forest inventory data with LiDAR and high spatial resolution satellite imagery. Canadian Journal of Remote Sensing, 34(1): 5-12.
- Holmgren, J. and Persson, Å., 2004. Identifying species of individual trees using airborne laser scanner. Remote Sensing of Environment, 90(4): 415-423.
- Holmgren, J., Persson, A°. and Soderman, U., 2008. Species identification of individual trees by combining high resolution LiDAR data with multispectral images. International Journal of Remote Sensing, 29(5): 1537-1552.
- Kaartinen, H., Hyyppä, J., Yu, X., Vastaranta, M., Hyyppä, H., Kukko, A., Holopainen, M., Heipke, C., Hirschmugl, M., Morsdorf, F., Næsset, E., Pitkänen, J., Popescu, S., Solberg, S., Wolf, B.M. and Wu, J.C., 2012. An international comparison of individual tree detection and extraction using airborne laser scanning. Remote Sensing, 4: 950-974.
- Kim, S., Hinckley, T. and Briggs, D., 2011. Classifying individual tree genera using stepwise cluster analysis based on height and intensity metrics derived from airborne laser scanner data. Remote Sensing of Environment, 115: 3329-3342.
- Kim, S., Mcgaughey, R.J., Andersen, H. and Schreuder, G., 2009. Tree species differentiation using intensity data derived from leaf-on and leaf off airborne laser scanner data. Remote Sensing of Environment, 113(8): 1575-1586.
- Ko, C., Sohn, G. and Remmel, T.K., 2013. Tree genera classification with geometric features from high-density airborne LiDAR. Canadian Journal of Remote Sensing, 39: 73-85.
- Korpela, I., Ørka, H.O., Maltamo, M., Tokola, T. and Hyyppä, J., 2010. Tree species classification using airborne LiDAR- effects of stand and tree parameters, downsizing of training set, intensity normalization, and sensor type. Silva Fennica, 44(2): 319-339.
- Lefsky, M., Cohen, W.B., Parker, G.G. and Harding, D.J., 2002. Lidar remote sensing for ecosystem studies. Bioscience, 52(1): 19-30.
- Li, W., Guo, Q., Jakubowski, K.M. and Kelly, M., 2012. A new method for segmenting individual trees from the LiDAR point cloud. Photogrammetric Engineering & Remote Sensing, 78(1): 75-84.
- Popescu, S.C. and Wynne, R.H., 2004. Seeing the trees in the forest: Using LiDAR and multispectral data fusion with local filtering and variable window size for estimating tree height. Photogrammetric Engineering & Remote Sensing, 70(5): 589-604.
- Rahman, M. and Gort, B., 2008. Individual tree detection based on densities of high points of high resolution airborne LiDAR. In: Proceedings of GEOBIA, Pixels, Objects, Intelligence: Geographic Object Based Image Analysis for the 21st Century, University of Calgary, Calgary, Alberta, Canada, pp. 350-355.
- Suratno, A., Seielstad, C. and Queen, L., 2009. Tree species identification in mixed coniferous forest using airborne laser scanning. ISPRS

Journal of Photogrammetry and Remote Sensing, 64(6): 683-693.
- Tittmann, P., Shafii, S., Hartsough, S. and Hamann, B., 2011. Tree detection, delineation, and measurement from LiDAR point cloud using RANSAC. Book Proceedings of SilviLaser 2011, 11th International Conference on LiDAR Applications for Assessing Forest Ecosystems, University of Tasmania, Australia, 16-20 October 2011, pp. 1-13
- Tymkow, P. and Borkowski, A., 2010.Vegetation modelling based on tls data for roughness coefficient estimation in river valley. International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Science, Volume XXXVIII, Part 8, Kyoto, Japan.
- Vauhkonen, J., Tokola, T., Packalen, P. and Maltamo, M., 2009. Identification of Scandinavian comercial species of individual trees from airborne laser scanning data using alpha shape metrics. Forest Science, 55: 37-47.
- Yu, X., Litkey, P., Hyyppa, J., Holopainen, M. and Vastaranta, M., 2014. Assessment of low density full-waveform airborne laser scanning for individual tree detection and tree species classification. Forests, 5: 1011-1031.

Individual *Carpinus betulus* and *Acer velutinum* tree species delineation by geometrical and statistical characteristics derived from airborne LiDAR data

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

1- Ph.D. Student, Faculty of Natural Resources, Tarbiat Modares University, Noor, Iran

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

3∗- Corresponding author, Prof., Faculty of Natural Resources, Tarbiat Modares University, Noor, Iran

E-mail: mtabari@modares.ac.ir

4- Associate Prof., Faculty of Forestry, Gorgan University of Agriculture Sciences and Natural Resources, Gorgan, Iran

Received: 12.20.2014 Accepted: 01.24.2015

Abstract

In this research, the possibility of application of LiDAR-derived characteristics has been studied for discrimination amongst common hornbeam (*Carpinus betulus*) and Persian maple (*Acer velutinum*) trees. LiDAR data of individual sample trees were separated in laser point clouds using their measured center coordinates and crown diameter in the field. In district 1 of Shast-Kolate Education and Research Forest in Gorgan, 80 individual *A. velutinum* and *C. betulus* tree samples were selected. The trees were either located in dominant storey or were not overlaid by adjacent tree crowns. Tree heights were measured using Vertex 1V GPS device. Crown diameter was measured in four cardinal directions using Leica Disto lasermeter. Center coordinates of the sample trees were determined using both DGPS and distance/azimuth measurement by Total Station device. Different geometrical and statistical metrics of sample trees were extracted from LiDAR data. The results of discriminant analysis suggested the height standard deviation of laser points over 80% of tree height and crown slope as the selected metrics to differentiate the tree species (accuracy=80.3%). The mean of those two metrics showed larger values for hornbeam than maple. The selected LiDAR metrics were ascribed to represent the shape and height variation of returned crown laser points. It is therefore concluded that geometrical LiDAR-derived attributes could successfully helo by differentiating between the two tested tree species.

Keywords: *Acer velutinum*, discriminant analysis, identification of individual tree species, LiDAR, *Carpinus betulus*.