

استخراج درختان منفرد جنگل شهری از داده‌های لیدار هوایی با تراکم نقطه بالا

عباس مرادی^{۱*}، مهران ستاری^۲ و مهدی مؤمنی^۳

^۱ دانشجوی کارشناسی ارشد گروه مهندسی ژئوماتیک، دانشکده مهندسی عمران و حمل‌ونقل، دانشگاه اصفهان، اصفهان
^۲ استادیار گروه مهندسی ژئوماتیک، دانشکده مهندسی عمران و حمل‌ونقل، دانشگاه اصفهان، اصفهان
^۳ دانشیار گروه مهندسی ژئوماتیک، دانشکده مهندسی عمران و حمل‌ونقل، دانشگاه اصفهان، اصفهان

(تاریخ دریافت: ۱۳۹۵/۵/۲۸؛ تاریخ پذیرش: ۱۳۹۶/۸/۱۳)

چکیده

لیدار هوایی، قابلیت زیادی در تهیه مستقیم اطلاعات لازم برای کاربردهای تحقیقاتی و عملیاتی مرتبط با مدیریت اکوسیستم‌های جنگل و درختان منطقه شهری دارد. بیشتر روش‌های ارائه‌شده برای استخراج درختان منفرد با داده لیدار، متکی به شناسایی نقاط بالا یا پایین درخت و سپس اجرای یکی از الگوریتم‌های قطعه‌بندی درخت که از این نقاط شروع می‌شوند، هستند. در این الگوریتم‌ها، تعداد و مکان نقاط شروع تشخیص داده‌شده، به شدت در فرایند تشخیص درختان منفرد تأثیر می‌گذارد. علاوه بر این، درصد امکان شناسایی درختان جوان بسیار کم است. در این تحقیق، الگوریتمی جدید برای استخراج درختان منفرد با استفاده از نقاط با فاصله تقریباً ۱۰ سانتی‌متری لیدار ارائه شده است. در این روش، درختان منفرد با یافتن قطعه‌های امن و نقاط داخل آنها برای هر درخت و تخصیص نقاط باقی‌مانده براساس این مناطق استخراج می‌شوند. این تحقیق روی درختان دو منطقه مورد مطالعه در شهر زیبروگس بلژیک اجرا شد. ارزیابی نتایج این روش با تصویر هوایی نشان داد که ۷۴/۵۱ درصد از کل درختان به‌درستی طبقه‌بندی شدند و میزان خطای افزونگی و حذف‌شدگی در طبقه‌بندی به ترتیب ۳/۹۲ و ۲۱/۵۷ درصد بود.

واژه‌های کلیدی: ابر نقاط، استخراج درخت، تحلیل مؤلفه‌های اصلی، خوشه‌بندی OPTICS

مقدمه

داده‌های لیدار با هواپیما که با عنوان اسکنر لیزری هوابرد^۱ شناخته می‌شود، وسیله‌ای مقرون‌به‌صرفه برای به‌دست آوردن داده از ساختار جنگل برای مناطق جغرافیایی وسیع با قدرت تفکیک مکانی و صحت موقعیتی زیاد است. مزیت اسکنر لیزری هوابرد در کاربردهای جنگلداری، توانایی استخراج اطلاعات سه‌بعدی ساختار تاج جنگل با صحت بالا است. در این دستگاه‌ها، با ثبت موقعیت سنجنده با سیستم موقعیت‌یاب جهانی^۲ و سیستم ناوبری اینرسی^۳،

برداشت و پایش عوارض زمینی برای رسیدن به اهداف ملی و بین‌المللی محیطی، نیازی ضروری است. جمع‌آوری اطلاعات موقعیت و ویژگی‌های مرتبط با اکوسیستم‌های جنگل از طریق برداشت‌های میدانی با عملیات زمینی، بسیار پرهزینه است. طی دهه گذشته، جمع‌آوری عملیاتی چنین اطلاعاتی با توسعه فناوری لیدار دچار تغییرات اساسی شده است. اخذ

^۱. Airborne Laser Scanner (ALS)

^۲. Global Positioning System (GPS)

^۳. Inertial Navigation System (INS)

هدف، تغییرات نور ناشی از توپوگرافی و اثر سایه‌روشن فرایند تفسیر و استخراج در تصاویر را محدود می‌کنند (Gupta, 2010). لیدار هوایی قابلیت نفوذ در تاج درخت، ارائه اطلاعات هندسی و نمایش برخی ساختارهای داخلی درخت را دارد و این قابلیت با افزایش تراکم نقطه، بیشتر هم می‌شود. توانایی زیاد لیدار هوایی در تهیه مستقیم اطلاعات سه‌بعدی و دریافت سیگنال‌های بازگشتی متعدد از پوشش‌های گیاهی آن را به جایگزین مناسبی برای تصویر در کارهای بزرگ‌مقیاس تبدیل کرده است. تشخیص درخت منفرد با استفاده از لیدار هوایی اولین بار در سال ۱۹۹۹ پیشنهاد شد و متعاقب آن به یک موضوع پذیرفته‌شده توسط محققان تبدیل شد (Gupta, 2010).

بیشتر الگوریتم‌های تشخیص درختان منفرد، از مدل ارتفاعی حاصل از درون‌یابی روی ابرنقطه لیدار هوایی استفاده می‌کنند. جدول ۱ برخی از این روش‌ها را نشان می‌دهد.

جدول ۱- روش‌های مختلف تشخیص درختان منفرد براساس مدل ارتفاعی به‌دست‌آمده از لیدار هوایی

الگوریتم	مرجع	نوع جنگل	شرایط برگ	تعداد نقطه بر متر مربع	درصد صحت
Pouring algorithm	Koch et al. (2006)	خزان‌کننده	دارای برگ	۵_۱۰	۷۲/۷۳
density of high point	Rahman & Gorte (2009)	سوزنی‌برگ و پهن‌برگ	دارای برگ	۷۰	۶۰<
Local maxima, adaptive Filtering	Ene et al. (2012)	سوزنی‌برگ و پهن‌برگ	هر دو حالت	۱۰/۴	۴۶-۵۰
Watershed	Duncanson et al. (2014)	سوزنی‌برگ و پهن‌برگ	هر دو حالت	۵۰	۷۰
Hierarchy Directed Acyclic Graph	Strîmbu & Strîmbu (2015)	سوزنی‌برگ و پهن‌برگ	بدون برگ	۳۰	۶۱/۱-۹۸/۸ در شرایط مختلف
localized contour tree	Wu et al. (2016)	پهن‌برگ	دارای برگ	۷/۷۶<	۷۵/۰۵<

می‌رسند؛ سپس قله درختان براساس فیلتر بیشینه محلی مشخص می‌شود. در نهایت، تاج درختان با استفاده از الگوریتم Pouring به‌دست می‌آید

ابرنقطه سه‌بعدی سطح اسکن‌شده به‌دست می‌آید. از این‌رو اسکنر لیزری هوای به‌عنوان رکن ضروری مدیریت عملیاتی جنگل در کارهای بزرگ مقیاس در چندین کشور ثبت شده است.

تاکنون مطالعات زیادی در زمینه استخراج درخت به کمک تصاویر هوایی و ماهواره‌ای انجام گرفته است (Kalapala, 2014). با افزایش قدرت تفکیک مکانی و طیفی سنجنده‌ها، کاهش هزینه‌های اخذ داده و افزایش قدرت محاسبات، سطح اطلاعات (دو یا سه‌بعدی) لازم برای استخراج خودکار درختان منفرد افزایش یافته است. با این حال ساختار عمودی درختان، در هم رفتن تاج آنها و تشخیص خودکار در سطح جزئیاتی که تصاویر سنجش از دور ارائه می‌دهند، از جمله چالش‌های پیش روی محققان در استخراج درخت است. علاوه بر این، از آنجا که فرایند استخراج درخت از روی تصویر به اختلاف طیفی بین پیکسل‌های تاج درخت و پیکسل‌های زمینه وابسته است، تغییرات اتمسفری، هندسه خورشید-سنجنده و

به‌عنوان نمونه، در الگوریتمی که Koch et al. (2006) توسعه دادند، مدل ارتفاعی زمین و سطح به‌دست می‌آید و با تفاضل این دو مدل، به مدل ارتفاعی تاج

(Gupta, 2010). هرچه نرم‌شدگی بیشتر باشد، امکان از دست رفتن قله‌ها بیشتر است و این می‌تواند سبب تشخیص ندادن درختان کوچک شود (خطای حذف‌شدگی) و اگر نرم‌شدگی کم باشد، امکان ایجاد قله‌های اضافی بیشتر می‌شود (خطای افزونگی). مطابق جدول ۲، در تحقیق (Kumar, 2012) تأثیر انتخاب درجه نرم‌کنندگی بر تعداد قله‌های تشخیص داده‌شده به‌وضوح مشاهده می‌شود:

جدول ۲- تعداد قله‌های شناسایی‌شده در مدل ارتفاعی تاج با درجه نرم‌شدگی سه، پنج، هفت و نه (Kumar, 2012)

درجه نرم‌شدگی	تعداد قله‌های شناسایی‌شده
سه	۱۶۴۷۸۷
پنج	۹۲۸۶۷
هفت	۷۲۶۰۹
نه	۵۴۱۹۴

روش‌ها را نشان می‌دهد. این روش‌ها دیگر خطای درون‌یابی را ندارند؛ اما تعریف نقاط قله در درختان خزان‌کننده و درختان جوانی که زیر چتر درختان دیگرند، در استفاده از ابرنقطه دشوار است (Wang et al., 2008). در تحقیق (Li et al., 2012) با توجه به مختصات سه‌بعدی نقاط لیدار، از آستانه‌گذاری روی فاصله برای قطعه‌بندی نقاط به درخت هدف استفاده کردند. با این‌حال، تعریف آستانه‌های مناسب به‌ویژه در جنگل‌های متراکم دشوار است. آستانه نامناسب سبب افزایش خطاهای قطعه‌بندی می‌شود (Gupta 2010; Li et al., 2012). مشکل دیگر این است که تک‌تک نقاط باید در فرایند قطعه‌بندی و طبقه‌بندی شرکت کنند و این به‌خودی خود زمان محاسبات را افزایش می‌دهد؛ بنابراین افزایش تراکم نقاط لیدار برای کاهش اشتباه در فرایند طبقه‌بندی، ممکن است صرفه زمانی نداشته باشد. در تحقیق (Lu et al., 2014) روشی برای تشخیص نقاط تنه درخت براساس مقادیر بیشتر شدت ارائه داده شد که در آن قطعه‌بندی درختان از

(Gupta, 2010). خطا و عدم قطعیت به‌وجودآمده از روش‌های درون‌یابی سبب می‌شود که درختان همسایه به‌درستی از هم جدا نشوند یا یک گروه درخت به‌عنوان یک درخت شناسایی شود (Gupta, 2010; Li et al., 2012). برای افزایش دقت در تشخیص، می‌توان یک تابع گوسی نرم‌کننده به مدل ارتفاعی اعمال کرد؛ اما استفاده از فیلتر نرم‌کننده با برآورد اشتباه ارتفاع درخت همراه است

علاوه بر ابراد بالا، با آنالیزهای پیکسلی امکان شناسایی درختان کوچک و درختانی که زیر تاج درختان دیگرند، در جنگل‌های انبوه وجود ندارد (Gupta, 2010). در تحقیق (Duncanson et al., 2014)، درختان لایه میانی دچار خطای افزایش شدند، درختان همسایه‌ای که ارتفاع یکسان داشتند و تاج آنها درهم رفته بود و درختان لایه زیرین حتی در شرایط بدون برگ دچار خطای کاهش شدند. برای غالب آمدن بر این مشکل (Alonzo et al., 2014) تلاش کردند فاصله بین قله‌های شناسایی‌شده را با اعمال یک یا چند آستانه کنترل کنند. با این‌حال، نمی‌توان از یک یا چند آستانه برای شناسایی درختان متنوع (تنوع در گونه، سن، شرایط محیطی و میزان رشد) استفاده کرد؛ بدین ترتیب نمی‌توان تمام درختان را به‌درستی شناسایی کرد.

برخلاف روش‌های بالا، روش‌هایی که به‌تازگی برای استخراج درخت منفرد از داده لیدار به کار گرفته می‌شوند، روش‌هایی‌اند که به‌طور مستقیم از ابرنقطه لیدار استفاده می‌کنند. جدول ۳ برخی از این

نقاط پایین درختان آغاز می‌شود و بالطبع این روش در برخی نواحی تحت تأثیر بوته‌ها قرار می‌گیرد.

جدول ۳- روش‌های مختلف تشخیص درختان منفرد براساس ابرنقطه لیدار هوایی

الگوریتم	مرجع	نوع جنگل	شرایط برگ	تعداد نقطه بر مترمربع	درصد صحت
Region growing	(Solberg et al., 2006)	سوزنی‌برگ	دارای برگ	۵	۶۰
Voxel space projection	(Wang et al., 2008)	سوزنی‌برگ و پهن‌برگ	-	۷-۸	۷۲/۱۲
Adaptive multi-scale filter	(Lee et al., 2010)	سوزنی‌برگ مدیریت‌شده	دارای برگ	۱۴/۲	۹۵
Region growing	(Li et al., 2012)	سوزنی‌برگ	دارای برگ	> ۶	۹۰
2D and 3D spacing thresholds	(Lu et al., 2014)	پهن‌برگ	بدون برگ	۱۰/۲۸	۹۰

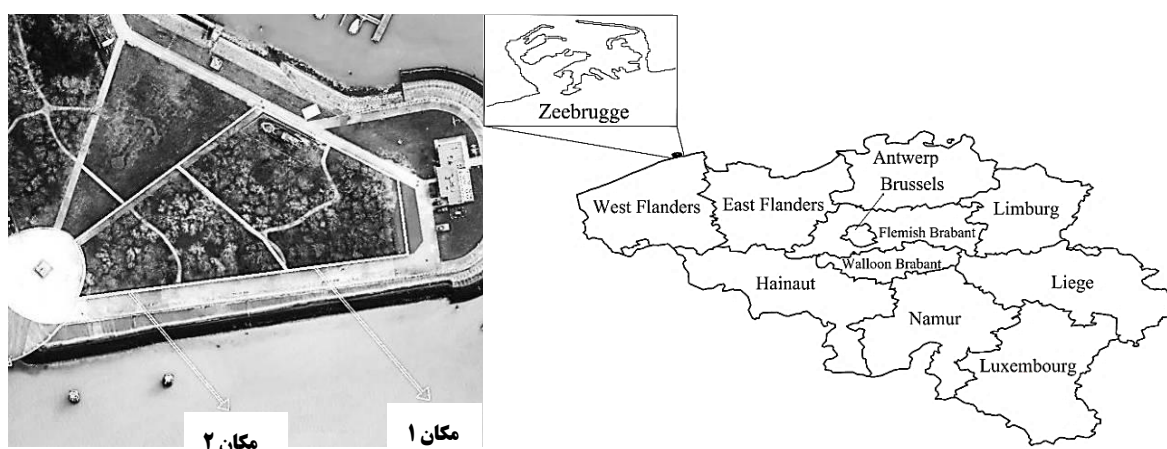
تعلق نقاط داخل آن به یک درخت مطمئنیم، به‌عنوان قطعه امن برای آن درخت در نظر گرفته می‌شود.

مواد و روش‌ها

منطقه پژوهش

روش پیشنهادی، روی درختان واقع در شهر زیبروگس در بلژیک با مختصات جغرافیایی $51^{\circ} 19' 48''$ شمالی و $3^{\circ} 12' 00''$ شرقی اجرا شد. مکان‌های مورد مطالعه، مکان ۱ و ۲ به ترتیب با مساحت ۴۹۰۰ و ۳۳۰۰ مترمربع هستند (شکل ۱). درختان هر دو مکان از نوع پهن‌برگ خزان‌کننده هستند.

تمام روش‌های بالا، به جست‌وجوی نقاط شروع برای اجرای الگوریتم قطعه‌بندی می‌پردازند. نقاط شروع به‌عنوان نقاط بالا یا پایین درختان انتخاب می‌شوند و فرایند قطعه‌بندی به ترتیب از بالا به پایین یا از پایین به بالا انجام می‌گیرد؛ بنابراین تعداد و مکان نقاط شروع تشخیص داده‌شده، به‌طور مستقیم در فرایند تشخیص تأثیر می‌گذارند. در این تحقیق، روشی جدید برای استخراج درخت منفرد از ابرنقطه لیدار بدون نیاز به نقاط شروع توسعه داده شده است. ایده اصلی در این روش، یافتن قطعه‌های مطمئن برای نقاط درختان منفرد و سپس بررسی میزان تعلق نقاط دیگر به آنهاست. در این تحقیق، ناحیه‌ای که از



شکل ۱- موقعیت مناطق تحقیق

تحت عنوان نرمال سازی داده لیدار شناخته می شود. بدین منظور، پس از درون یابی نقاط زمین با استفاده از کریجینگ معمولی^۱، مدل ارتفاعی رقومی تولید شد. سپس ارتفاع خام (اندازه گیری های لیدار) منهای ارتفاع زمین (مدل ارتفاعی رقومی) محاسبه و لحاظ شد (Gupta 2010; Li et al., 2012). بعد از نرمال سازی، ارتفاع نرمال نشان دهنده ارتفاع زمین تا نقطه (ارتفاع مطلق نقطه) است.

الگوریتم استخراج درخت منفرد: در این مطالعه، با یافتن نقاط قطعه های امن درختان منفرد و تخصیص سایر نقاط براساس این مناطق، درختان منفرد از ابر نقطه لیدار استخراج می شوند. با توجه به شکل عموم درختان، استوانه به عنوان شکلی که بتوان به عنوان یک ناحیه امن برای هر درخت در نظر گرفت، انتخاب شد. این استوانه ها براساس شعاع و جهتی که باید از هر درخت استخراج شوند، تعریف می شوند. ابتدا تنه درختان به شرح زیر استخراج خواهند شد:

گام اول - استخراج تنه درختان: ابتدا با اعمال آستانه ارتفاعی کمینه، نقاط بوته ای و نقاط زمین را از ابرنقطه حذف می کنیم (شکل ۳- الف). به منظور طبقه بندی ابرنقطه حاصل به دو طبقه تنه و غیرتنه، از آستانه ارتفاعی بیشینه استفاده می شود. برای حذف نقاط برگ ها تا حد امکان، از نقاط طبقه تنه، آستانه گذاری سوم روی شدت نقاط لیدار انجام می گیرد (شکل ۳- ب). این آستانه گذاری روی شدت نقاط ناشی از این نکته است که «انرژی پالس های لیزری که سنجنده لیدار تولید و ارسال می کند، با هم برابرند. هر پالس لیدار هنگام برخورد به هدف ممکن است چندین بازتاب داشته باشد. هرچه تعداد بازتاب های یک پالس کمتر باشد، انرژی بازتاب های آن بیشتر خواهد بود.

داده مورد استفاده، توسط سنجنده لیدار هوایی با مشخصات مذکور در جدول ۴ و در شرایط بدون برگ از منطقه مورد مطالعه اخذ شد. تراکم نقطه سنجنده لیدار در حدود ۶۵ نقطه بر متر مربع است که به فاصله نقاط تقریباً ۱۰ سانتی متری منجر می شود. برای صحت سنجی روش پیشنهادی نیز از تصاویر قائم هوایی با قدرت تفکیک ۵ سانتی متر مربوط به منطقه استفاده شد (IEEE GRSS Data Fusion Contest (2015).

روش اجرای پژوهش

روش پیشنهادی در پژوهش حاضر، شامل دو مرحله اصلی ۱. پیش پردازش ابرنقطه لیدار و ۲. الگوریتم استخراج درختان منفرد است. شکل ۲ فلوچارت روش پیشنهادی را نشان می دهد. در ادامه این مقاله جزئیات این روش تشریح می شود.

پیش پردازش داده: پیش پردازش داده های لیدار در این تحقیق شامل فرایندهای طبقه بندی درخت/ غیردرخت و نرمال سازی ابرنقطه است. این فرایندها به شرح زیرند:

فرایند طبقه بندی درخت/ غیردرخت: از آنجا که از ابرنقطه جنگل شهری برای استخراج درختان منفرد استفاده می شود، ابتدا با استفاده از یک پلان شهری طبقه ابرنقاط درختان از طبقه دیگر اشیا مثل جاده و ساختمان جدا شد.

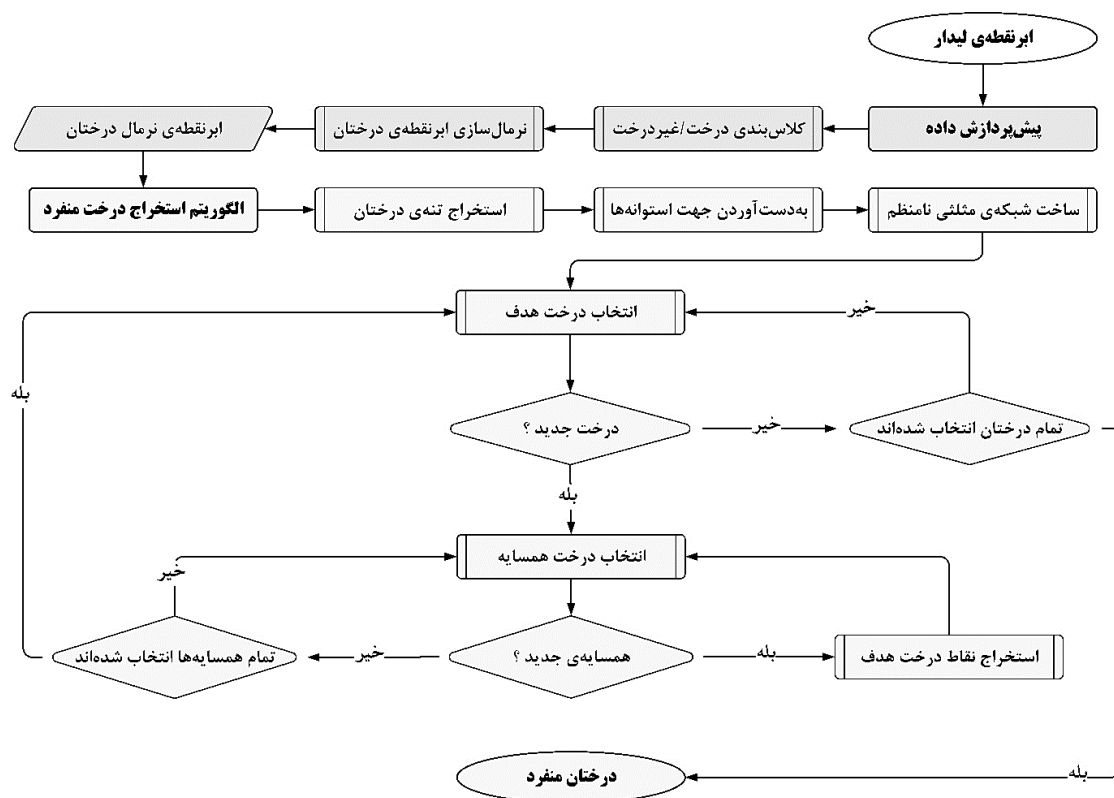
فرایند نرمال سازی داده لیدار^۱: در بخشی از الگوریتم پیشنهادی برای استخراج درختان منفرد، از آستانه های ارتفاعی برای استخراج تنه درختان و از فاصله نسبی نقاط برای تخصیص آنها به درختان استفاده می شود. بنابراین، باید اختلافات در اندازه گیری ارتفاع ناشی از توپوگرافی محلی زمین برای به دست آوردن ارتفاع نسبی هر نقطه لیدار، حذف شود (Zhang & Qiu, 2012)، به عبارت دیگر قبل از فرایند آستانه گذاری (روی کل ابرنقطه) باید تأثیر زمین از ارتفاع نقاط حذف شود (Lu et al., 2014). فرایند یادشده در متون علمی

¹. LiDAR data normalizing

². Ordinary Kriging

جدول ۴- مشخصات سنجنده لیدار و داده ثبت شده توسط آن

مشخصات سنجنده لیدار	
تاریخ پرواز	۱۳ مارس ۲۰۱۱ میلادی
ارتفاع پرواز	۳۰۰ متر
فرکانس نمونه برداری ^۱	۴۹ هرتز
نرخ نمونه برداری ^۲	۱۲۵ هرتز
زاویه جاروب ^۳	۲۰ درجه
مشخصات داده اخذ شده	
فرمت ذخیره سازی	LAS v1.2
فرمت ثبت داده نقطه ای ^۴	صفر، $(x, y, z, intensity)$
عدد بازگشت	مشخص نشده
تعداد بازگشت ها	مشخص نشده
طبقه بندی	صفر (بدون طبقه)
جهت نمونه برداری	مشخص نشده



شکل ۲- فلوچارت الگوریتم پیشنهاد شده در پژوهش حاضر به منظور استخراج درختان منفرد

¹. Scan frequency

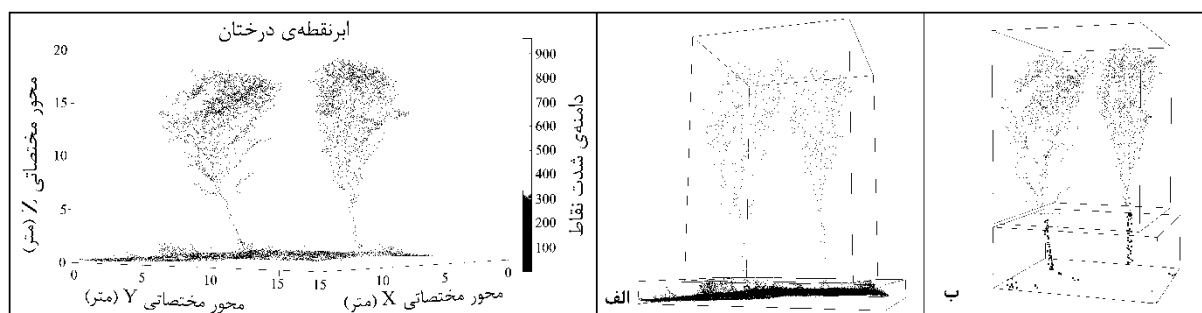
². Laser scan rate

³. Scan angle

⁴. Point data record format

نقاط برگ‌هاست». پس از آزمون و خطا روی درختان منطقه تحقیق، آستانه‌های ارتفاعی کمینه و بیشینه و آستانه شدت به ترتیب برابر با ۱/۴ متر، ۴/۵ متر و ۲۵ انتخاب شدند. شدت ۲۵ شدتی بود که بهترین شکل توانست نقاط برگ را از نقاط تنه شناسایی کند.

به‌طور معمول تعداد بازتاب‌های پالسی که به تنه و شاخه‌های درخت برخورد می‌کند، کمتر از تعداد بازتاب‌های پالسی است که به برگ‌ها برخورد می‌کند. سنجنده لیدار انرژی بازتاب‌ها را ثبت می‌کند؛ بنابراین میزان شدت نقاط تنه‌ها و شاخه‌ها بیشتر از شدت



شکل ۳- طبقه‌بندی‌های اولیه برای استخراج طبقه تنه؛ (الف) اعمال آستانه ارتفاعی کمینه، (ب) اعمال آستانه ارتفاعی بیشینه و آستانه شدت به ترتیب روی ارتفاع و شدت نقاط لیدار.

عمودی به ترتیب بیانگر ترتیب نقاط در نمودار^۲ و فاصله دسترسی^۳ هر نقطه است و هر دره بیانگر نماینده یک خوشه است. برای انتخاب مقادیر مناسب برای K و ϵ برای این مطالعه، نیمی از طبقه تنه در منطقه مطالعاتی اول انتخاب شد (شکل ۴-الف). با آزمون و خطا، عدد ۸ برای K و عدد ۰/۵ برای ϵ به دست آمد. نمودار حاصل از اجرای الگوریتم $OPTICS$ روی این بخش در شکل ۴-ب آمده است. در این نمودار هر دره نماینده یک تنه است. با قرار دادن هر نقطه در خوشه نزدیک‌ترین نماینده‌اش، تنه‌ها به دست می‌آیند (شکل ۵-الف).

تنه‌های به دست آمده با برخی نقاط بوته‌ای همراه‌اند؛ این نقاط تا حد امکان باید حذف شوند. این کار از طریق عملیات آستانه‌گذاری روی فاصله اقلیدسی نقاط خوشه تا میانگین همان خوشه انجام می‌گیرد. این آستانه براساس انحراف معیار فاصله

از آنجا که جهت و قطر تنه‌ها و ارتفاع درختان با هم تفاوت دارند باید تعریف استوانه برای هر درخت جداگانه صورت گیرد؛ بدین منظور با اجرای الگوریتم خوشه‌بندی $OPTICS$ (Ankerst et al., 1999) در طبقه تنه، هر تنه در یک خوشه قرار می‌گیرد. الگوریتم $OPTICS$ یک روش خوشه‌بندی بر مبنای تراکم داده‌هاست؛ به این معنا که هر جا تراکم داده‌ها زیاد باشد، احتمالاً یک الگو وجود دارد. ورودی الگوریتم دو پارامتر K یعنی حداقل نقاط و ϵ یعنی شعاع همسایگی است. اگر حداقل K نقطه در شعاع ϵ برای یک نقطه وجود داشته باشد، آن نقطه یک نقطه هسته‌ای تلقی می‌شود. نقاط هسته‌ای متصل به هم بیانگر یک الگو هستند و نماینده آن الگو نقطه‌ای از نقاط متصل به هم است که تراکم نقاط اطراف آن از بقیه بیشتر باشد. خروجی الگوریتم $OPTICS$ نموداری است که این ساختار را به صورت دوبعدی نمایش می‌دهد. در این نمودار، محور افقی و

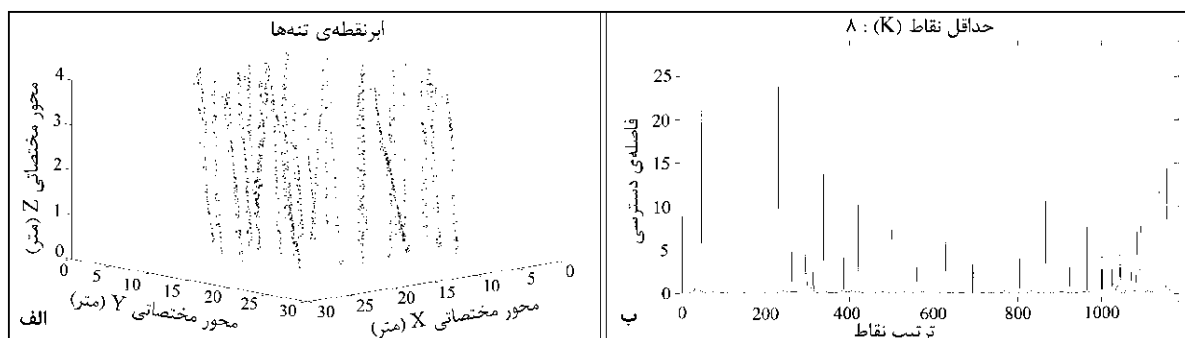
¹. Ordering Points To Identify the Clustering Structure

². Order

³. Reachability Distance (RD)

عملیات تنه‌های نهایی به‌دست می‌آیند (شکل ۵-ب).

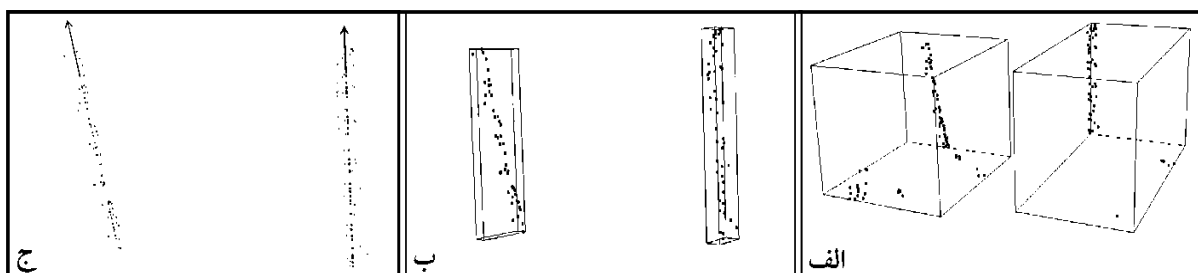
اقلیدسی برای هر خوشه مشخص می‌شود. پس از این



شکل ۴- اجرای الگوریتم خوشه‌بندی OPTICS؛ (الف) ابرنقطه بخشی از طبقه تنه در منطقه مطالعاتی اول، (ب) خروجی الگوریتم OPTICS روی نقاط آن.

اصلی^۱ به‌دست می‌آید و سپس جهت استوانه هر درخت برابر با جهت تنه متناظر آن تعریف می‌شود. شکل ۵-ج جهت تنه‌های استخراج‌شده دو درخت منفرد همسایه را نشان می‌دهد.

گام دوم- به‌دست آوردن جهت استوانه‌ها: رشد درخت اغلب در راستای تنه آن است؛ بنابراین محور مرکزی استوانه باید در امتداد تنه تعریف شود. بدین ترتیب، جهت تنه‌ها با استفاده از آنالیز مؤلفه‌های



شکل ۵- اجرای آنالیز مؤلفه‌های اصلی؛ (الف) نتیجه خوشه‌بندی OPTICS، (ب) تنه‌های نهایی، (ج) جهت دو درخت همسایه

از ابرنقطه را می‌یابیم که از تعلق آنها به تاج متناظر با همان تنه اطمینان داریم.

گام چهارم- تشکیل مناطق امن با انتخاب درخت هدف و درختان همسایه‌اش: به‌صورت اتفاقی، تنه یک درخت منفرد به‌عنوان درخت هدف انتخاب می‌شود و درختان همسایه آن، از نزدیک‌ترین تا دورترین فاصله مرتب می‌شوند. سپس درخت هدف و نزدیک‌ترین همسایه‌اش به‌عنوان یک زوج درخت انتخاب می‌شوند

گام سوم- ساخت شبکه مثلی نامنظم: در ابتدا، مرکز ثقل هر تنه را به‌دست می‌آوریم و یک شبکه مثلی نامنظم با آنها تشکیل می‌دهیم. براساس رابطه مکانی به‌دست‌آمده از ساخت مثلث‌ها، درختان همسایه برای هر درخت مشخص می‌شوند. علاوه‌بر ارتباط مکانی درختان، شبکه مثلی برای محدود کردن تعداد نقاطی که تحت فرایند طبقه‌بندی‌اند، اجرا می‌شود.

در ادامه الگوریتم پیشنهادی، برای هر تنه نقاطی

¹. Principal Component Analysis (PCA)

رابطه ۳

$$d_2 = \frac{T_2}{T_1} d_1 (l_1 \sin \alpha + l_2 \sin \beta) \quad \text{و} \quad d_1 = \frac{T_1}{T_1 + T_2}$$

که در آن، l_1 و l_2 به ترتیب فاصله عمودی قلعه تنه درخت‌های ۱ و ۲ تا فصل مشترک صفحات عمود بر خط مرکزی تنه درختان است. اگر دو درخت همسایه به هم نزدیک شوند و خطوط مرکزی تنه درختان متقاطع باشند (شکل ۶-ج)، معادله‌ها مشابه حالت قبل تعریف می‌شوند، با این تفاوت که نواحی استوانه‌ای را با یک صفحه (break plane) محدود می‌کنیم. این صفحه به گونه‌ای تعریف می‌شود که با صفحه عمود بر خط مرکزی درخت ۱ زاویه α و با صفحه عمود بر خط مرکزی درخت ۲ زاویه β بسازد. بدین ترتیب امکان تغییر شعاع استوانه‌ها بر اساس این صفحه به وجود می‌آید. این تغییر شعاع کمک می‌کند تا استوانه‌ها مفهوم منطقه امن بودن را حفظ کنند. در نهایت همان‌طور که در شکل ۶-د نشان داده شده است، اگر دو درخت همسایه به هم نزدیک شوند و خطوط مرکزی تنه درختان متنافر باشند، مخروط‌های ناقص را به جای استوانه تعریف می‌کنیم. در این حالت شعاع این مناطق را مطابق رابطه ۴ تعریف می‌کنیم:

رابطه ۴

$$r_{\min,1} = \frac{T_1}{T_1 + T_2} D_2, \quad r_{\max,1} = \frac{T_1}{T_1 + T_2} D_3,$$

$$r_{\min,2} = \frac{T_2}{T_1 + T_2} D_2, \quad r_{\max,2} = \frac{T_2}{T_1 + T_2} D_3$$

که در آن D_2 و D_3 به ترتیب نزدیک‌ترین و دورترین فاصله بین دو تنه، $r_{\min,1}$ و $r_{\max,1}$ شعاع‌های مخروط ناقص برای درخت اول و $r_{\min,2}$ و $r_{\max,2}$ شعاع‌های مخروط ناقص برای درخت دوم هستند.

و دو ناحیه امن برای آنها تعریف می‌شود. فرایند تشکیل نواحی امن به شرح زیر است:

مطابق ساختار رشد درختان هرچه قطر تنه درخت بزرگ‌تر باشد، تاج آن بزرگ‌تر است. همچنین در بخش‌های انبوه، رشد عرضی تاج درختان کمتر می‌شود یا تاج‌ها در هم فرو می‌روند. بر این اساس تعریف شعاع استوانه‌ها را تابعی از این دو پارامتر یعنی قطر و فاصله می‌دانیم. هرچه قطر تنه درختان بزرگ‌تر باشد یا دو درخت از هم دورتر باشند، شعاع استوانه آنها می‌تواند بزرگ‌تر باشد. برای فهم بهتر الگوریتم، مراحل اجرا را برای دو درخت که در همسایه هم هستند بیان می‌کنیم. r_1 و r_2 به ترتیب شعاع استوانه درخت‌های ۱ و ۲ را بر اساس روابط زیر مشخص می‌کنیم:

اگر راستای تنه دو درخت همسایه تقریباً موازی باشند (شکل ۶-الف)، شعاع استوانه‌ها بر اساس قطرشان از فاصله D_1 سهمیم می‌شوند. در این حالت، شعاع استوانه‌ها را مطابق رابطه ۱ تعریف می‌کنیم:

رابطه ۱

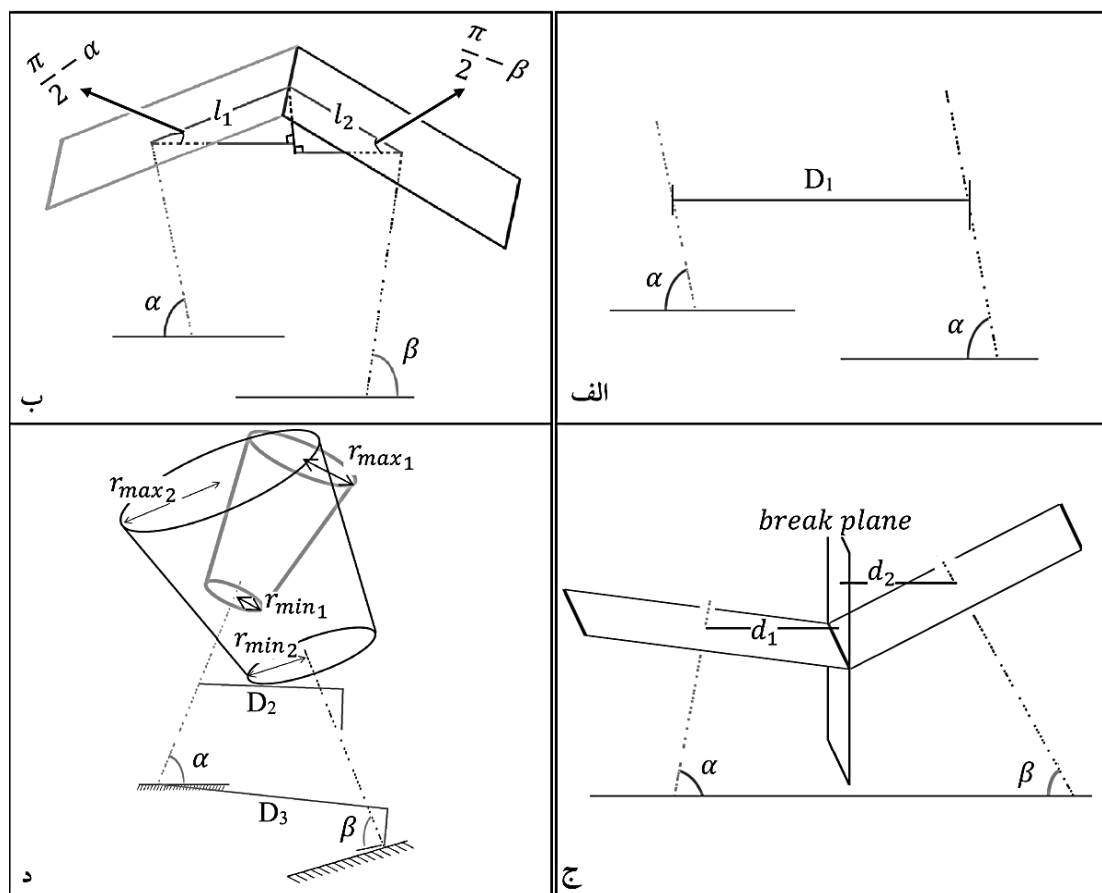
$$r_1 = \frac{T_1}{T_1 + T_2} D_1 \quad \text{و} \quad r_2 = \frac{T_2}{T_1 + T_2} D_1$$

که در آن، D_1 فاصله بین مراکز تنه درختان است. T_1 و T_2 به ترتیب قطر تنه درخت‌های ۱ و ۲ هستند. اگر دو درخت همسایه از هم دور شوند (شکل ۶-ب) شعاع استوانه‌ها را مطابق رابطه ۲ تعریف می‌کنیم:

رابطه ۲

$$r_2 = \frac{d_2}{\sin \beta} \quad \text{و} \quad r_1 = \frac{d_1}{\sin \alpha}$$

که در آن، α و β به ترتیب زاویه راستای تنه درخت ۱ و ۲ نسبت به افق هستند و d_1 و d_2 مطابق رابطه ۳ تعریف می‌شوند:



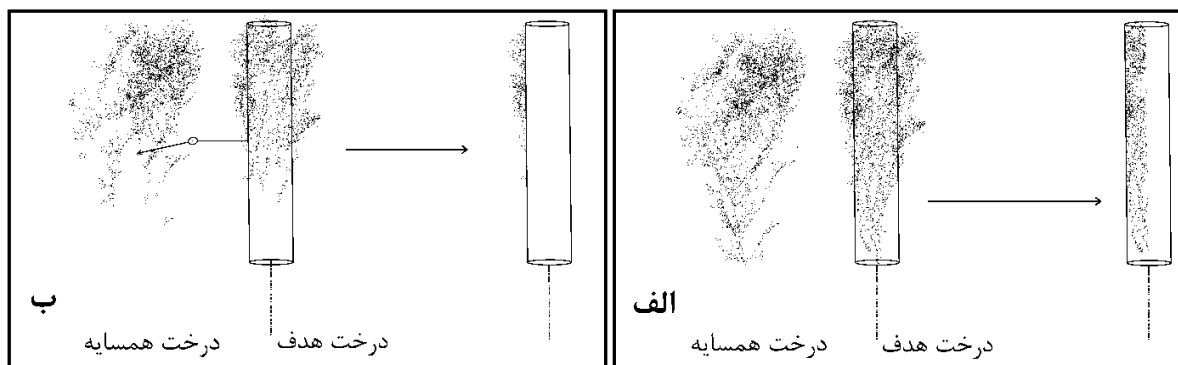
شکل ۶- وضعیت‌های مختلف دو درخت همسایه: (الف) دو درخت موازی، (ب) دو درخت دورشونده، (ج) دو درخت نزدیک‌شونده که راستای خط مرکزی تنه‌ها متقاطع است، (د) دو درخت نزدیک‌شونده که راستای خط مرکزی تنه‌ها متناظر است.

درخت هدف (همسایه) تخصیص یابند، احتمالاً متعلق به درخت هدف (همسایه) هستند و مجدداً با عنوان نقاط اولیه درخت هدف (همسایه) نام‌گذاری می‌شوند. نقاط اولیه درخت همسایه، برای درخت هدف مورد بررسی از ابرنقطه حذف شده و برای درخت هدف بعدی به ابرنقطه اضافه می‌شوند. نقاط اولیه درخت هدف، در فرایند طبقه‌بندی درخت همسایه بعدی شرکت داده می‌شوند.

فرایند مذکور در گام پنجم، برای هر درخت هدف تا آخرین همسایه‌اش تکرار می‌شود. در انتها، آخرین نقاط اولیه هر درخت هدف، به‌عنوان نقاط نهایی آن درخت لحاظ می‌شوند.

گام پنجم- استخراج نقاط درخت هدف: فرایند تخصیص نقاط براساس مناطق امن، مطابق مراحل زیر اجرا می‌شود: ابتدا، نقاط بین زوج انتخابی که داخل منطقه امن درخت هدف (همسایه) قرار دارند، احتمالاً متعلق به درخت هدف (همسایه) هستند و تحت عنوان نقاط اولیه درخت هدف (همسایه) نام‌گذاری می‌شوند (شکل ۷-الف).

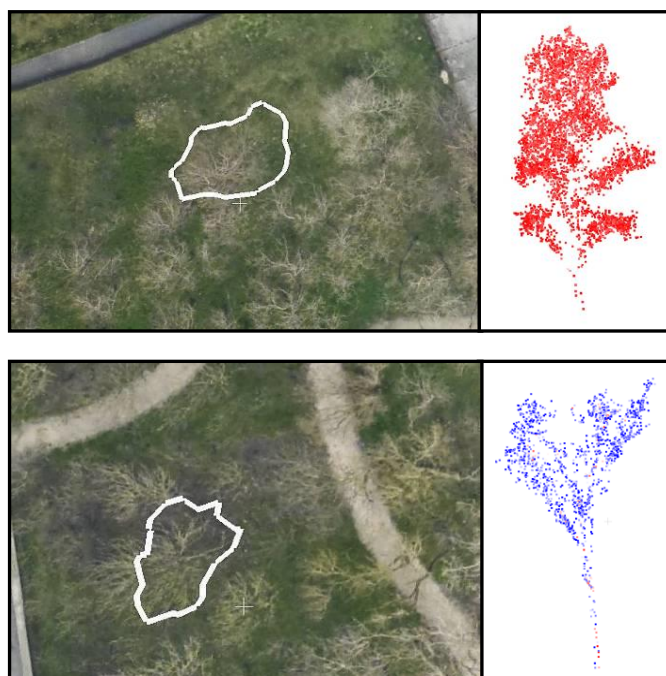
سپس، فاصله عمودی بین هر نقطه خارج از مناطق امن تا مرز این مناطق به‌دست می‌آید. این نقاط براساس کمترین فاصله‌شان، به یکی از مناطق امن تخصیص می‌یابند (شکل ۷-ب). نقاطی که به



شکل ۷- تخصیص نقاط براساس مناطق امن: (الف) تخصیص نقاط داخلی، (ب) تخصیص نقاط خارجی.

مکان آنها تعریف می‌شوند (Kumar, 2012). در این تحقیق، بررسی تناظر مکانی یک‌به‌یک بین نتایج استخراج درختان با الگوریتم پیشنهادی و نتایج حاصل از استخراج دستی درختان با تصاویر هوایی قائم (تطبیق درختان برحسب روابط هندسی)، برای سنجش صحت استفاده شده است. بدین منظور تصویر قائم روی ابر نقطه لیدار هوایی برهم‌نمایی^۱ شد (شکل ۸). سپس هر درخت توسط یک اپراتور خبره استخراج شد.

آزمون و ارزیابی صحت: کیفیت قطعه‌بندی، به کیفیت داده (نویز و تراکم نقطه) و تنظیم بهینه ویژگی‌های الگوریتم برای تطبیق نتایج قطعه‌بندی روی درختان مرجع وابسته است؛ بنابراین می‌توان با اتکا به بحث تطبیق عوارض براساس روابط هندسی و توپولوژی بین آنها، نتایج قطعه‌بندی را ارزیابی و توصیف کرد. روابط توپولوژی برحسب مرز و میزان همپوشانی بین دو عارضه و روابط هندسی با مقایسه

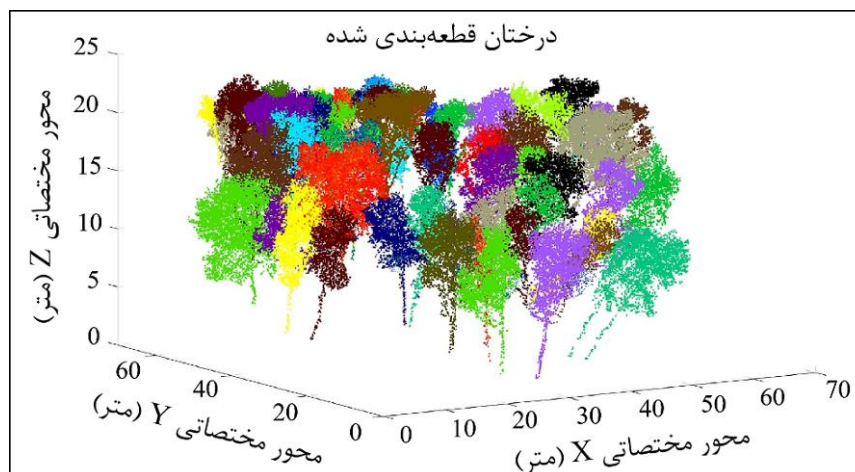


شکل ۸- استخراج دستی دو نمونه درخت با استفاده از تصاویر هوایی قائم

^۱. Superimpose

جدول ۵- نتیجه ارزیابی صحت حاصل از مقایسه طبقه‌بندی روش پیشنهادی با نتایج استخراج‌شده از تصاویر هوایی

مکان مورد مطالعه	تعداد درختان	صحت کلی (%)	خطای حذف‌شدگی (%)	خطای افزونگی (%)
۱	۵۷	۷۳/۶۸	۲۲/۸۱	۳/۵۱
۲	۴۵	۷۵/۵۶	۲۰/۰۰	۴/۴۴
مجموع	۱۰۲	۷۴/۵۱	۲۱/۵۷	۳/۹۲



شکل ۹- نتایج قطعه‌بندی نهایی برای بخشی از درختان منطقه تحقیق

بحث

در این مطالعه، روشی جدید برای استخراج درختان منفرد از داده ابرنقطه لیدار ارائه شد. اساس روش ما ساخت مناطق امن برای هر درخت و تخصیص نقاط به هر درخت براساس این مناطق است. این روش، امکان می‌دهد که طبقه تعداد زیادی از نقاط را در مدت زمانی مقرون‌به‌صرفه تشخیص دهیم و همزمان از فرایندی ساده به منظور طبقه‌بندی تعداد کمتری از نقاط خارج از مناطق غیرامن استفاده کنیم.

دستگاه‌های لیدار هوایی با ثبت بازتاب‌های گسسته، پروفایل قائم تاج را به‌طور کامل ثبت نمی‌کنند؛ بدین ترتیب قسمت‌هایی از درختان کوچک یا درختان زیر تاج درختان دیگر ثبت نمی‌شوند. علی‌رغم این محدودیت ذاتی، توانایی الگوریتم پیشنهادی در جست‌وجوی درختانی که زیر تاج درختان دیگرند، یک مزیت به‌شمار می‌رود. بیشتر

الگوریتم‌های قطعه‌بندی مدل ارتفاعی تاج، نظیر تحقیق (Strîmbu & Strîmbu, 2015) و برخی از الگوریتم‌های نقطه‌ای، نظیر تحقیق (Zhang et al., 2015)، از قابلیت نفوذ در تاج بهره‌ای نمی‌برند و به همین دلیل درختان لایه‌های پایین یا میانی را شناسایی نمی‌کنند.

همچنین در بیشتر الگوریتم‌ها، پوشش تاج درخت از بالا به پایین^۱ آنالیز می‌شود. در این دسته از الگوریتم‌ها، نظیر مطالعه (Liu et al., 2013)، غالب درختان جوان و درختان کوچک از فرایند بررسی خارج می‌شوند و استخراج درختان خزان‌کننده (به‌ویژه گروه‌های درختی شامل درختان خزان‌کننده) با خطاهای به نسبت زیادی همراه است. اغلب درختان و به‌ویژه درختان خزان‌کننده، در قسمت تنه‌ها

^۱. Top-Down Methods

مختلف، ثبت نشدن نقاط تنه در برخی درختان و وجود بوته‌های مجاور تنه‌ها به‌ویژه در بخش‌های انبوه است. شایان ذکر است که تنظیم ویژگی مذکور با افزایش پیچیدگی ساختار جنگل، سخت‌تر می‌شود. به‌عنوان نمونه، مقدار مناسب برای ویژگی کمترین نقطه در قسمت‌های شامل درختان جوان و کوچک، کمتر از مقدار مناسب آن در قسمت‌های شامل درختان بزرگ و قدیمی است و علت آن ثبت تعداد کمتر نقاط تنه در درختان جوان است. بنابراین انتخاب مقدار بزرگ برای این ویژگی به حذف درختان جوان (خطای کاهش در قطعه‌بندی) و انتخاب مقدار کوچک‌تر منجر به قطعه‌بندی اضافی درختان قدیمی یا بزرگ (خطای افزایش در قطعه‌بندی) منجر می‌شود. برای غلبه بر این مشکل در الگوریتم پیشنهادی، مقدار ویژگی مذکور، در قسمت‌های شامل درختان جوان انتخاب شد و متعاقب آن از دانش قبلی کمترین فاصله بین تنه‌ها برای ادغام قطعه‌های اضافی مجاور استفاده شد.

دیگر موضوع شایان ذکر، تعریف آستانه‌های ارتفاعی مناسب در فرایند طبقه‌بندی تنه/غیرتنه است. در قسمت‌هایی که بوته وجود داشته باشد، برقراری تعادل میان ارتفاع بوته‌ها و آستانه ارتفاعی کمینه و همچنین برقراری تعادل میان آستانه ارتفاعی بیشینه و ارتفاع پایه تاج در مناطق شامل درختان جوان، برای اجرای صحیح فرایند خوشه‌بندی مهم است. افزایش آستانه ارتفاعی بیشینه از ارتفاع پایه تاج یا کاهش آستانه ارتفاعی کمینه از ارتفاع بوته‌های موجود، خطای افزایش در قطعه‌بندی را زیاد می‌کند. بنابراین تعیین صحیح این دو آستانه در بخش‌های شامل بوته‌ها و درختان جوان، به تعامل با کاربر نیاز دارد. به هر حال هنوز به کار تحقیقاتی بیشتری برای حذف مرحله آموزش و انتخاب صحیح آستانه‌ها از فرایند استخراج درختان نیاز است.

نتایج صحت‌سنجی نهایی نشان می‌دهد که روش پیشنهادی پتانسیل خوبی در استخراج درختان منفرد

کمترین درهم‌رفتگی و در قسمت تاج بیشترین درهم‌رفتگی را دارند؛ بنابراین روش‌هایی که درختان منفرد را از پایین به بالا^۱ استخراج می‌کنند، ممکن است در فرایند استخراج موفق‌تر باشند. متأسفانه اغلب روش‌های موجود در این دسته، نظیر مطالعه Lu et al. (2014)، به جست‌وجوی نقاط شروع برای اجرای الگوریتم قطعه‌بندی می‌پردازند. نقاط شروع به‌عنوان نقاط انتهایی هر درخت انتخاب می‌شوند. تعریف این نقاط در درختان خزان‌کننده و درختان جوانی که زیر چتر درختان دیگرند، در استفاده از ابرنقطه دشوار است (Wang et al., 2008). این در حالی است که، تعداد و مکان نقاط شروع تشخیص داده‌شده، به‌طور مستقیم در فرایند قطعه‌بندی تأثیر می‌گذارند (Kumar, 2012). یکی از مزایای الگوریتم پیشنهادی ما، این است که درختان منفرد را از پایین به بالا و بدون اتکا به نقاط شروع، قطعه‌بندی و استخراج می‌کند. به‌عبارت دیگر، شناسایی و استخراج درختان منفرد براساس قطعه‌های متراکم موجود در ابرنقطه که به‌صورت مشخص نماینده تنه‌ها هستند، شروع می‌شود. با این وجود، بدیهی است که تعداد کل درختان شناسایی‌شده توسط الگوریتم پیشنهادی، لزوماً با تعداد صحیح درختان برابر نیست. علت این مشکل، در تعیین مقدار مناسب آستانه‌های ارتفاعی در فرایند طبقه‌بندی تنه/غیرتنه و ویژگی کمترین تعداد نقطه در فرایند خوشه‌بندی OPTICS، قابل بیان است.

در این مطالعه، تعداد درختان موجود در منطقه تحت آزمایش، توسط الگوریتم خوشه‌بندی OPTICS تعیین شد. همچنین تعداد تنه‌های شناسایی‌شده توسط الگوریتم خوشه‌بندی، تحت تأثیر مستقیم ویژگی کمترین تعداد نقطه قرار داشت. یافتن مقدار مناسبی برای این ویژگی، به تجربه و تعامل با کاربر نیاز دارد و علت آن تفاوت تراکم نقطه در قسمت‌های

^۱. Bottom-Up Methods

الگوریتم‌های موجود با استفاده از دیگر منابع داده، نظیر داده موج-پیوسته^۱ است. بررسی تلفیق اطلاعات داده لیدار و تصاویر فراطیفی برای بهبود صحت استخراج و توصیف ویژگی‌های درختان از طریق فنون ادغام داده، یکی از پیشنهادهای اصلی برای تحقیقات آینده است.

سپاسگزاری

از آکادمی ارتش سلطنتی بلژیک، برای اخذ و ارائه داده‌های به‌کاررفته در این تحقیق و نیز از کمیته فنی IEEE GRSS سپاسگزاریم.

دارد. در مقایسه با روش‌های دیگر در مناطق مشابه، نظیر آنچه توسط Gupta (2010) انجام گرفته است، روش پیشنهادی در این مقاله بهبود در صحت کلی از ۵۸ درصد به ۷۴ درصد را نشان می‌دهد. با وجود این، با توجه به وابستگی نتایج روش‌ها به تراکم و نوع درختان در هر منطقه، پیشنهاد می‌شود روش‌های دیگر بر روی داده‌های این مقاله اجرا و نتایج مقایسه شود. در پایان گفتنی است نتایج حاصل، تنها با استفاده از ابرنقطه لیدار به‌عنوان ورودی الگوریتم استخراج درخت منفرد به‌دست آمده و صحت تشخیص درختان در منطقه تحقیق، بدون داده مرجع و با استخراج دستی درختان ارائه شده است. بدین ترتیب، الگوریتم پیشنهادی، انگیزه‌ای برای توسعه

References

- Alonzo, M., Bookhagen, B., & Roberts, D.A. (2014). Urban tree species mapping using hyperspectral and lidar data fusion. *Remote Sensing of Environment*, 148, 70-83.
- Ankerst, M., Breunig, M.M., Kriegel, H.P., & Sander, J. (1999). OPTICS: ordering points to identify the clustering structure. In, *ACM Sigmod Record*, 49-60.
- Duncanson, L., Cook, B., Hurtt, G., & Dubayah, R. (2014). An efficient, multi-layered crown delineation algorithm for mapping individual tree structure across multiple ecosystems. *Remote Sensing of Environment*, 154, 378-386.
- Ene, L., Næsset, E., & Gobakken, T. (2012). Single tree detection in heterogeneous boreal forests using airborne laser scanning and area-based stem number estimates. *International Journal of Remote Sensing*, 33, 5171-5193.
- Gupta, S. (2010). Single tree detection and modeling using airborne laser scanner data. PhD Thesis, Faculty of Forest and Environmental Sciences, Albert-Ludwigs-Universität Freiburg im Breisgau.
- IEEE GRSS Data Fusion Contest, 2015. Online: <http://www.grss-ieee.org/community/technical-committees/data-fusion>.
- Kalapala, M. (2014). Estimation of Tree Count from Satellite Imagery through Mathematical Morphology. *International Journal of Advanced Research in Computer Science and Software Engineering*, 4(1), 490-495.
- Koch, B., Heyder, U., & Weinacker, H. (2006). Detection of individual tree crowns in airborne lidar data. *Photogrammetric Engineering & Remote Sensing*, 72(4), 357-363.
- Kumar, V. (2012). Forest inventory parameters and carbon mapping from airborne LIDAR. In: MSc Thesis University of Twente Faculty of Geo-Information and Earth Observation (ITC), Enschede.

¹ Full-waveform (FWF)

- Lee, H., Slatton, K.C., Roth, B., & Cropper Jr, W. (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., Guo, Q., Jakubowski, M.K., & Kelly, M. (2012). A new method for segmenting individual trees from the lidar point cloud. *Photogrammetric Engineering & Remote Sensing*, 78(1), 75-84.
- Liu, J., Shen, J., Zhao, R., & Xu, S. (2013). Extraction of individual tree crowns from airborne LiDAR data in human settlements. *Mathematical and Computer Modelling*, 58, 524-535.
- Lu, X., Guo, Q., Li, W., & Flanagan, J. (2014). A bottom-up approach to segment individual deciduous trees using leaf-off lidar point cloud data. *ISPRS journal of photogrammetry and remote sensing*, 94, 1-12.
- Rahman, M., & Gorte, B. (2009). Tree crown delineation from high resolution airborne lidar based on densities of high points. 38(3/W8), Paris, France, 123-128.
- Solberg, S., Naesset, E., & Bollandsas, O.M. (2006). Single tree segmentation using airborne laser scanner data in a structurally heterogeneous spruce forest. *Photogrammetric Engineering & Remote Sensing*. 72, 1369-1378.
- Strîmbu, V.F., & Strîmbu, B.M. (2015). A graph-based segmentation algorithm for tree crown extraction using airborne LiDAR data. *ISPRS journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 104, 30-43.
- Wang, Y., Weinacker, H., Koch, B., & Sterenczak, K. (2008). Lidar point cloud based fully automatic 3D single tree modelling in forest and evaluations of the procedure. *International Archives of Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, 37(B6b), 45-51.
- Wu, B., Yu, B., Wu, Q., Huang, Y., Chen, Z., & Wu, J. (2016). Individual tree crown delineation using localized contour tree method and airborne LiDAR data in coniferous forests. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, 52, 82-94
- Zhang, C., & Qiu, F. (2012). Mapping individual tree species in an urban forest using airborne lidar data and hyperspectral imagery. *Photogrammetric Engineering & Remote Sensing*, 78(10), 1079-1087.
- Zhang, C., Zhou, Y., & Qiu, F. (2015). Individual Tree Segmentation from LiDAR Point Clouds for Urban Forest Inventory. *Remote Sensing*, 7(6), 7892-7913.



Extracting the individual trees of urban forests from high density airborne LiDAR data

A. Moradi^{1*}, M. Satari², and M. Momeni³

¹MS. student of Geomatics Eng., Department of Civil Eng. and Transportation, University of Isfahan, Isfahan, I. R. Iran

²Assistant Prof., Dept. of Geomatics Eng., Dept. of Civil Eng. and Transportation, University of Isfahan, Isfahan, I. R. Iran

³Associate Prof., Dept. of Geomatics Eng., Dept. of Civil Eng. and Transportation, University of Isfahan, Isfahan, I. R. Iran

(Received: 18 August 2016; Accepted: 4 November 2017)

Abstract

Airborne LiDAR (Light Detection and Ranging) has a high potential to provide 3D data for research and operational applications in a wide range of disciplines related to management of forest ecosystems and urban trees. Most proposed methods for extracting the individual trees first detect the points of tree top or bottom and then use them as starting points in a segmentation algorithm. Hence, in these methods, the number and the locations of detected peak points effect on the process of detecting individual trees heavily. In this study, a new method is presented to extract the individual tree segments using LiDAR points with 10 cm point density. In this method, a two-step strategy is performed for the extraction of individual tree LiDAR points: finding deterministic segments of individual trees points and allocation of other LiDAR points based on these segments. This research is performed on two study areas in Zeebrugge, Bruges, Belgium. The accuracy assessment of this method showed that with the increasing detection rate of young trees, it could correctly classified 74.51% of trees with 21.57% and 3.92% under- and over-segmentation errors, respectively.

Keywords: OPTICs clustering, Point cloud, Principal Components Analysis, Tree extraction