



ارزیابی روش قطعه‌بندی مبتنی بر Octree در جداسازی ابر نقاط زمینی در داده‌های لیزر اسکنر دستی

سید علی نقی‌بی راد^۱، علی اصغر درویش‌صفت^{۲*}، پرویز فاتحی^۳، منوچهر نمیرانیان^۴، محمد سعادت‌سرشت^۴ و مهدی برومند^۵

^۱دانشجوی دکتری مدیریت جنگل، دانشکده منابع طبیعی، دانشگاه تهران، کرج، ایران

^۲استاد گروه جنگلداری و اقتصاد جنگل، دانشکده منابع طبیعی، دانشگاه تهران، کرج، ایران

^۳استادیار گروه جنگلداری و اقتصاد جنگل، دانشکده منابع طبیعی، دانشگاه تهران، کرج، ایران

^۴دانشیار گروه فتوگرامتری و سنجش از دور، دانشکده مهندسی نقشه‌برداری و اطلاعات مکانی، دانشگاه تهران، تهران، ایران

^۵کارشناس ارشد مهندسی نقشه‌برداری، شرکت نمایرداز رایانه، تهران، ایران

(تاریخ دریافت: ۱۴۰۲/۰۷/۰۸؛ تاریخ پذیرش: ۱۴۰۲/۰۹/۰۵)

چکیده

مقدمه: یکی از مهم‌ترین داده‌های پایه برای برنامه‌ریزی و مدیریت جنگل، وجود مدل‌های رقومی ارتفاعی (DEMs) دقیق است. برای تهیه این داده‌ها از روش‌های مختلفی استفاده می‌شود که لیزر اسکنرهای دستی متحرک، از کاراترین و دقیق‌ترین آنهاست. داده‌های حاصل از لیزر اسکنرها به شکل ابر نقاط خام هستند و باید پردازش‌هایی مختلفی برای آماده‌سازی این داده‌ها صورت گیرد. یکی از اصلی‌ترین مراحل پردازش ابر نقاط، جداسازی نقاط زمینی و غیر زمینی است، زیرا بروز خطا در این قسمت از پردازش‌ها به تهیه مدل‌های رقومی غیردقیق منجر خواهد شد. برای اجرای این مرحله، الگوریتم‌های گوناگونی مانند قطعه‌بندی مبتنی بر واکسل، فیلتر شبیه‌سازی پارچه و الگوریتم‌های مبتنی بر یادگیری عمیق ایجاد شده است. هدف این پژوهش، ارزیابی قابلیت الگوریتم قطعه‌بندی مبتنی بر Octree در جداسازی خودکار نقاط زمینی و غیر زمینی و تعیین مقادیر بهینه پارامترهای این الگوریتم در توده‌های درختی است.

مواد و روش‌ها: پنج محدوده از باغ گیاه‌شناسی کرج به مساحت ۷/۲ هکتار که در بردارنده توده‌های درختی و دارای ساختار ناهمسال و چنداشکوبه است، انتخاب و با استفاده از لیزر اسکنر دستی ژئواسلم برداشت و بررسی شد. به منظور تهیه مرجعی مطمئن برای ارزیابی نتایج الگوریتم یادشده، جداسازی نقاط زمینی با دقتی زیاد و به‌طور دستی انجام گرفت و صحت نتایج در مقایسه با این مرجع واقعیت زمینی بر پایه آماره‌های ضریب همبستگی متیوز، ضریب کاپا و IoU تعیین شد.

یافته‌ها: میانگین حاصل از مقادیر آماره‌های ارزیابی کارایی مدل در پنج محدوده تحت بررسی نشان داد که الگوریتم قطعه‌بندی مبتنی بر Octree با ضریب همبستگی متیوز، ضریب کاپا و IoU به ترتیب ۰/۸۹۵، ۰/۸۹۱ و ۰/۹۰۲ صحت مطلوبی ارائه داده است. همچنین در محدوده‌های تحت بررسی مقدار بهینه ابعاد مکعب برای اجرای الگوریتم بازه ۱۵ تا ۲۲ سانتی‌متری تعیین شد.

نتیجه‌گیری: می‌توان بیان کرد که الگوریتم قطعه‌بندی مبتنی بر Octree در صورت انتخاب مقادیر بهینه پارامترهای ورودی، از کارایی مطلوبی برای جداسازی نقاط زمینی و غیر زمینی در عرصه‌های جنگلی برخوردار است.

واژه‌های کلیدی: جنگل، قطعه‌بندی، لیزر اسکنر دستی، مدل‌های رقومی ارتفاعی (DEMs)، Octree.

مقدمه

به دلیل عواملی چون تراکم زیاد تاج پوشش و چنداشکوبه بودن توده‌های جنگلی (Aguilaret et al., 2018) اصلی‌ترین عوامل ایجاد و تشدید خطا در تهیه مدل‌های رقومی زمین در بعضی از روش‌ها هستند. بنابراین ضعف و خطای این داده‌ها در مناطق دارای پوشش جنگلی از بزرگ‌ترین چالش‌های مدیریت جنگل به شمار می‌آید. امروزه یکی از سریع‌ترین روش‌های تهیه مدل رقومی زمین با دقت زیاد و در مناطق نه‌چندان وسیع، استفاده از لیزر اسکنرهای زمینی است (Puletti et al., 2022; Trier et al., 2019). لیزر اسکنرها در دهه ۱۹۶۰ اختراع شدند. در اواخر دهه ۱۹۸۰ همزمان با استفاده تجاری از فناوری سامانه موقعیت‌یابی جهانی^۳ (GPS) و واحد اندازه‌گیری اینرسی^۴ (IMU) در لیزر اسکنرها، داده‌های حاصل قابلیت استفاده عمومی پیدا کرد و در دسترس پژوهشگران قرار گرفت و در دهه ۱۹۹۰ میلادی به صورت گسترده در بخش‌های تجاری و علمی بهره‌برداری شد (Heritage & Large, 2009). لیزر اسکنرهای زمینی و هوایی به دلیل سهولت جابه‌جایی و توانایی زیاد در برداشت اطلاعات در همه جهت‌ها، گزینه بسیار مطلوبی برای تهیه مدل‌های رقومی زمین در عرصه‌های جنگلی است (Gollob et al., 2020; Starek et al., 2020). داده‌های حاصل از این روش به صورت ابر نقاط سه‌بعدی و با تراکم بسیار زیاد است (Wilkes et al., 2017). استفاده از لیزر اسکنرهای زمینی به دلیل امکان وجود گیاهان علفی و بوته‌ها و ساختارهای مختلف شاخه و برگ موجود در جنگل با محدودیت نفوذ نکردن پالس‌های لیزر در برخورد با این عوارض همراه است و برای دستیابی به کارایی بهینه، جابه‌جایی دستگاه لیزر اسکنر و برداشت‌های چندجانبه ضرورت دارد. بدین منظور استفاده از لیزر اسکنرهای دستی و متحرک مدنظر قرار گرفته که با حرکت در عرصه و برداشت داده از موقعیت‌های

مدل‌های رقومی زمین از اصلی‌ترین داده‌های پایه کاربردی در حوزه‌های مختلف اطلاعات مکانی هستند که در زمینه علوم و مدیریت جنگل نیز استفاده می‌شوند (d'Alessandro & Tebaldini, 2019)، از جمله آمایش اراضی جنگلی، تعیین شبکه جاده، مناطق مستعد سیلاب، مناطق مناسب برای احداث سد، برنامه‌ریزی‌های گردشگری، مطالعات اقلیمی و ریزاقلیمی و غیره. ارتفاع درختان که از مهم‌ترین متغیرهای مدیریت جنگل است (Khorrami et al., 2014)، از اختلاف بین مدل رقومی زمین^۱ (DTM) و مدل رقومی سطح^۲ (DSM) حاصل از داده‌های سنجش از دوری مانند داده‌های لیزر اسکنرهای هوایی و عکس‌های رقومی هوایی با پوشش مشترک برآورد می‌شود (Sadeghi et al., 2016; Mielcarek et al., 2020)؛ بنابراین تهیه دقیق مدل رقومی زمین سبب بهبود در برآورد مشخصه‌های ساختار جنگل می‌شود. برای تهیه مدل‌های رقومی زمین از داده‌ها و روش‌های مختلفی مانند تصاویر ماهواره‌ای مرئی و تهیه عکس‌های هوایی استریو (Arefi et al., 2011)، تصاویر پهپاد و تهیه مدل‌های سه‌بعدی (Jiménez- Jimenez et al., 2021)، تصاویر راداری و فنون پلاریمتری (Dalagan & Principe, 2021) و لیزر اسکنرهای فضایی و هوایی (Dalagan & Principe, 2021) استفاده می‌شود. تهیه مدل‌های رقومی زمین با استفاده از منابع ذکر شده برای کاربران با چالش‌هایی از جمله شناخت ناقص داده و روش‌های پردازش آنها، منابع خطا، برآورد خطا و هزینه تهیه بعضی از انواع این داده‌ها همراه است. این چالش‌ها سبب می‌شوند که کاربران برای کارهای اجرایی در پی استفاده از مدل‌های رقومی زمین آماده باشند. نفوذ نکردن کامل امواج الکترومغناطیس به درون توده درختان، نرسیدن امواج به سطح زمین و وجود سایه (Moradi et al.,

3. Global Positioning System (GPS)
4. Inertial Measurement Unit (IMU)

1. Digital Terrain Models (DTM)
2. Digital Surface Model (DSM)

تنها به پارامتر اندازه ابعاد مکعب نیاز دارد. در این زمینه مروری بر پژوهش‌های مرتبط در جدول ۱ نشان داده شده است.

در خارج از کشور پژوهش‌های زیادی در زمینه جداسازی نقاط زمینی و غیر زمینی در داده‌های لیزر اسکنر (هوایی و زمینی) انجام گرفته است، ولی پژوهشی که به ویژگی و تنظیم پارامترهای الگوریتم OBS پرداخته باشد دیده نشد. این نکته در خصوص پژوهش‌های داخلی نیز مصداق دارد. براساس مرور منابع به نظر می‌رسد که به الگوریتم جداسازی نقاط زمینی و غیر زمینی، اجرای بهینه آن و سپس تهیه واقعیت زمینی کامل، توجه لازم صورت نگرفته است. در مقابل به سرعت عمل فرایند جداسازی توجه شده و تمرکز اصلی بر مدل‌های درون‌یابی و الگوریتم‌های تهیه مدل رقومی زمین بوده است. در پژوهش‌های مرتبط با تهیه مدل رقومی زمین با استفاده از داده‌های لیزر اسکنر، مدل حاصل تنها برپایه تعداد اندک نقطه ارزیابی شده است، حال آنکه در صورت وجود خطا و نبود دقت کافی در جداسازی نقاط، عملاً ممکن است خطاهایی در تهیه مدل رخ داده باشد. در چنین مواردی به دلیل عدم تهیه واقعیت زمینی کامل، نمی‌توان از آن خطاها آگاه شد و نمی‌توان دریافت که آیا خطا، حاصل از روش مدل‌سازی نهایی بوده و یا حاصل از مرحله جداسازی نقاط است. انتخاب صحیح الگوریتم جداسازی نقاط زمینی و غیر زمینی و بهینه کردن آن به منظور استفاده حداکثری از ظرفیت الگوریتم، تهیه واقعیت زمینی کامل از منطقه برای آگاهی و ارزیابی کامل نتایج اجرای الگوریتم‌های جداسازی نقاط و در نهایت بهره جستن از داده‌های لیزر اسکنر زمینی به دلیل برداشت نقاط با تراکم زیاد و برتری آن به لیزر اسکنر هوایی در تهیه مدل رقومی زمین در عرصه‌های جنگلی، ضرورت این تحقیق را نشان می‌دهد.

مختلف تا حد زیادی مشکلات قبل را برطرف کرده است (Bauwens et al., 2016). بعد از اسکن عرصه و برداشت ابر نقاط خام، در بخش پردازش داده‌ها یکی از مراحل اصلی، مرحله جداسازی و تفکیک نقاط است که در نتیجه آن، ابر نقاط زمینی و غیر زمینی از ابر نقاط اولیه و خام جدا می‌شود. سپس با استفاده از ابر نقاط زمینی، پردازش مربوط به تهیه مدل رقومی زمین با کیفیت و دقت زیاد امکان‌پذیر خواهد بود. از روش‌های گوناگونی برای جداسازی نقاط زمینی و غیر زمینی استفاده می‌شود، از جمله روش‌های مبتنی بر شیب^۱، مورفولوژی ریاضی^۲ و مبتنی بر سطح^۳. الگوریتم‌های مبتنی بر شیب همچون Vosselman (2000) بر تغییر تدریجی شیب بین نقاط مجاور استوارند. روش‌های مبتنی بر مورفولوژی ریاضی با ایجاد یک پنجره به حذف نقاط غیر زمینی اقدام می‌کنند. به‌طور کلی روش‌های مبتنی بر مورفولوژی ریاضی از نظر مفهومی ساده‌اند، ولی انتخاب ابعاد مناسب پنجره در این روش‌ها بسیار مهم است. در روش‌های مبتنی بر سطح، الگوریتم تلاش دارد با اندازه‌گیری مکرر نقاط زمینی از داده اصلی، سطحی را ایجاد کند که نزدیک‌ترین فاصله را به زمین اصلی و بدون پوشش داشته باشد. در این زمینه می‌توان به پژوهش‌های Kraus & Pfeifer (1998) و Axelsson (2000) اشاره نمود. به‌طور کلی عملکرد الگوریتم‌ها با توجه به ویژگی‌های توپوگرافی منطقه تغییر می‌کند و اجرای این روش‌ها نیازمند استفاده و تعیین پارامترهای مختلفی برای دستیابی به نتایج رضایت‌بخش است؛ زیرا پارامترهای بهینه از منطقه‌ای به منطقه دیگر ممکن است متفاوت باشد. برای حل مشکل استفاده از تعداد زیادی پارامتر، این تحقیق استفاده از الگوریتم OBS^۴ (الگوریتم قطعه‌بندی مبتنی بر Octree) را بررسی کرده است که برای اجرا

1. Slope-Based Methods
2. Mathematical Morphology-Based Methods
3. Surface-Based Methods
4. Octree-Based Segmentation (OBS)

جدول ۱- مرور پژوهش‌ها
Table 1. Literature Review

ویژگی‌های مهم - (Important Features)	مواد، روش و یافته‌ها - (Material, Methods and Results)	نویسندگان - سال (Authors - Year)
عدم تهیه واقعبینانه زمین‌آزمایی نکردن نتایج عدم جداسازی نقاط زمینی به صورت جداگانه بی‌توجهی به مقادیر بهینه اجرای الگوریتم پژوهش در محدوده شهری با پوشش گیاهی کم	بر روی داده‌های لیزر اسکنر هوایی و زمینی در منطقه‌ای با وسعت ۲۵ هکتار اقدام به جداسازی ابر نقاط با استفاده از الگوریتم OBS نمودند و بیان داشتند این الگوریتم برای اجرا بر روی هر دو داده بخوبی قابل استفاده است. نتایج نشان داد الگوریتم توانایی جداسازی بیش از ۹۶ درصد نقاط را دارد.	Wang & Tseng, 2004
عدم تهیه واقعبینانه زمین‌آزمایی نکردن نتایج عدم جداسازی نقاط زمینی به صورت جداگانه بی‌توجهی به مقادیر بهینه اجرای الگوریتم پژوهش در محدوده شهری با پوشش گیاهی کم	با استفاده از داده‌های لیزر اسکنر زمینی در یک محدوده مسکونی در سوئیس و لیزر اسکنر هوایی در بخشی از دانشگاه آلبرتا در کانادا، روشی تطبیقی را به منظور جداسازی ابر نقاط بررسی کردند. در این پژوهش به منظور جداسازی عوارض موجود در ابر نقاط از الگوریتم OBS استفاده شد. نتایج نشان داد که این روش قابلیت اجرایی خوبی بر روی هر دو داده لیزر اسکنر زمینی و هوایی و با تراکم متفاوت نقاط دارد.	Lari et al., 2012
تهیه واقعبینانه زمین‌آزمایی نکردن نتایج عدم جداسازی نقاط زمینی به صورت جداگانه بی‌توجهی به مقادیر بهینه اجرای الگوریتم پژوهش در محدوده شهری با پوشش گیاهی کم	به منظور بررسی قابلیت الگوریتم OBS در جداسازی عوارض سطح زمین حاصل از داده‌های لیزر اسکنر زمینی و هوایی در سه محدوده در ایرلند پرداختند و بیان داشتند که این الگوریتم قابلیت خوبی برای اجرا روی هر دو داده دارد. ارزیابی نتایج مقدار آماره امتیاز FI را بین ۷۸ تا ۹۱ درصد نشان داد.	Vo et al., 2015
ارزیابی نتایج با آماره امتیاز FI بی‌توجهی به مقادیر بهینه اجرای الگوریتم پژوهش در محدوده شهری با پوشش گیاهی کم	در دو محدوده شهری در آمریکا به جداسازی عوارض سطح زمین با استفاده از داده‌های لیزر اسکنر هوایی و الگوریتم OBS پرداختند. نتایج قابلیت خوب این روش را در هر دو محدوده با صحت کل بیشتر از ۹۴ درصد نشان داد.	Varney et al., 2016
عدم استفاده از داده واقعبینانه زمین‌آزمایی نکردن نتایج با آماره‌های خطای نوع اول و دوم بی‌توجهی به مقادیر بهینه اجرای الگوریتم پژوهش در محدوده جنگلی	در پژوهش خود قابلیت الگوریتم OBS و افزایش عملکرد این الگوریتم بر روی داده‌های حاصل از لیزر اسکنر هوایی را در منطقه‌ای جنگلی در استان گانسو در چین در سه بخش با شرایط متفاوتی از عرصه بررسی کردند. آنان بیان داشتند که این الگوریتم برای تهیه مدل رقومی زمین در مناطق جنگلی گزینه مطلوبی است.	Yang et al., 2018
استفاده از لیزر اسکنر دستی GeoSLAM ZEB-REVO استفاده نکردن از داده واقعبینانه زمین‌آزمایی نکردن نتایج استفاده نکردن از الگوریتم OBS پژوهش در محدوده جنگلی	قابلیت لیزر اسکنر هوایی پهپاد DJI Zenmuse L1 و لیزر اسکنر زمینی GeoSLAM ZEB-REVO و ترکیب داده‌های حاصل از این دو ابزار را به منظور تهیه مدل رقومی زمین در یک محدوده جنگلی دوهکتاری برای تهیه مسیر جاده جنگلی در چین بررسی کردند. نتایج قابلیت خوب هر دو ابزار را نشان داد. پژوهشگران تأکید کردند که استفاده از داده‌های لیزر اسکنر نسبت به روش‌های سنتی با صرف هزینه و زمان کمتری، می‌تواند مدل رقومی زمین قابل اطمینانی را تهیه نمود.	Song et al., 2022

به‌طور دقیق بررسی نشده است. بر این اساس، هدف این پژوهش، ارزیابی قابلیت الگوریتم OBS در جداسازی خودکار نقاط زمینی و غیر زمینی و تعیین مقادیر بهینه پارامترهای این الگوریتم در عرصه‌های جنگلی بود.

در زمینه جداسازی ابر نقاط که لازمه تحلیل‌های گوناگون از جمله تهیه مدل رقومی زمین و ارتفاع پوشش زمین است، الگوریتم‌های متعددی توسعه یافته‌اند که OBS از قابل قبول‌ترین آنهاست. تنها پژوهش‌های اندکی در خارج کشور در مورد این الگوریتم صورت گرفته و تا کنون عملکرد این الگوریتم

مواد و روش‌ها

منطقه پژوهش: این پژوهش در باغ گیاه‌شناسی دانشکدگان کشاورزی منابع طبیعی دانشگاه تهران واقع در شهر کرج با عرض جغرافیایی $53^{\circ} 59' 50''$ تا 07° شمالی و طول جغرافیایی $35^{\circ} 48' 14''$ تا $32^{\circ} 48' 32''$ شرقی و متوسط 1341 متر ارتفاع از سطح دریا انجام گرفت. این باغ که قدمتی بیش از 120 سال دارد حالتی جنگلی دارد. با توجه به وسعت محدوده و توانایی دستگاه لیزر اسکنر در برداشت اطلاعات و همچنین تغییرات عوارض موجود در منطقه، برداشت و بررسی محدوده در پنج بخش انجام گرفت. اطلاعات پنج بخش بررسی شده در جدول ۲ ارائه شده است. این بخش‌ها به لحاظ گونه‌های درختی جنگلی، دارای توده‌های آمیخته و متنوع سوزنی و پهن‌برگ با ساختاری ناهمسال و چنداشکوبه است که کاملاً محیطی همچون یک جنگل طبیعی را فراهم کرده است. شایان ذکر است که وجود درختان کهنسال، زیراشکوب علفی و زادآوری فراوان در فصل رویش درختان، از دیگر موارد شباهت

این عرصه به جنگل طبیعی است.

شیوه اجرای پژوهش

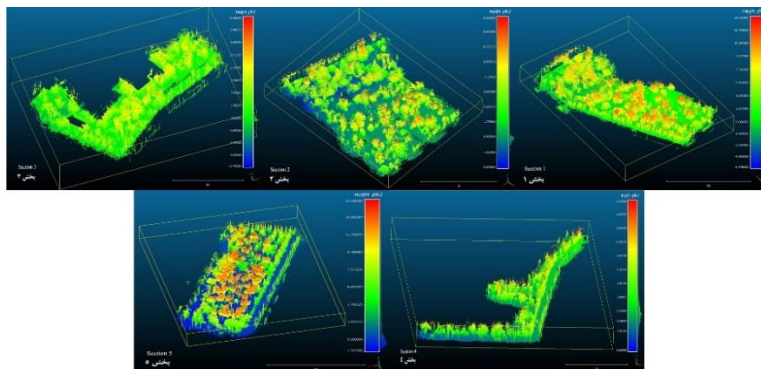
برداشت زمینی

دستگاه لیزر اسکنر دستی استفاده شده در این پژوهش (GeoSLAM ZEB-REVO) است که میدان دید زمینی (Field of view) 270×360 درجه، فاصله مؤثر برداشت 30 متر، برداشت 43 هزار نقطه در ثانیه و دقت 1 تا 3 سانتی‌متری دارد (Nocerino et al., 2017; Sammartano & Spanò, 2018). ابر نقاط برداشت شده توسط این دستگاه دارای پارامترهای XYZ بوده و فاقد هر گونه پارامتر دیگر از جمله مختصات استاندارد، شدت و رنگ است. برداشت داده‌ها در زمستان 1398 صورت پذیرفت تا از حداکثر قابلیت لیزر اسکنر در برداشت اطلاعات از محیط بهره گرفته شود. بی‌برگی درختان و نبود گیاهان علفی سبب شد تا در حد ممکن بتوان داده‌هایی با ثبت بیشترین جزئیات از سطح زمین برداشت کرد. نمایی از داده‌های برداشتی با لیزر اسکنر در شکل ۱ آورده شده است.

جدول ۲- اطلاعات عوارض موجود در محدوده توده درختی بررسی شده به تفکیک هر بخش

Table 2. Description of Different Sections in the Study Area

بخش (Section)	عارضه (Features)	مجموع نقاط (Total Points)	مساحت (هکتار) (Area (ha))
1	تپه و رودخانه (Hill and River)	26489862	1.21
2	ساختمان، تپه و رودخانه (Building, Hill and River)	23506816	1.80
3	ساختمان و رودخانه (Building and River)	23231996	1.57
4	جاده و ساختمان (Road and Building)	13812511	1.57
5	جاده، آبراهه و کانال آب (Road, Stream and Conduite)	30604788	1.06
مجموع (Total)	-	117645973	7.20



شکل ۱- نمای سه‌بعدی ابر نقاط حاصل از لیزر اسکنر در بخش‌های بررسی شده

Figure 1. Three-Dimensional View of Point Clouds Obtained from Laser Scanner in the Studied Sections

داخل پایین‌ترین مکعب‌های تشکیل‌شده جای دارند، به‌عنوان نقاط زمینی در نظر گرفته می‌شوند. انتخاب مقادیر کم برای ابعاد مکعب، تأثیر بسزایی در انتخاب دقیق‌تر نقاط زمینی خواهد داشت؛ اما می‌تواند موجب انتخاب نقاط غیرمرتبط بیشتری نیز بشود (Trochta et al., 2017). در این پژوهش به‌منظور دستیابی به مقادیر بهینه این مؤلفه (Voxel Size) در مجموع ۱۵۵ پردازش در همه بخش‌ها اجرا شد. به‌عبارتی با تغییر ابعاد مکعب (هر ۱ سانتی‌متر) از مقدار ۱ تا ۲۵ سانتی‌متر ۲۵ پردازش، با تغییر ابعاد مکعب (هر ۱۰ سانتی‌متر) از مقدار ۳۰ تا ۵۰ سانتی‌متر سه پردازش و در پایان با تغییر ابعاد مکعب (هر ۵۰ سانتی‌متر) سه پردازش برای هر بخش جداگانه انجام گرفت. به بیان دیگر این پردازش‌ها با تغییر ابعاد مکعب از مقدار ۱ سانتی‌متر تا ۲ متر انجام گرفت و برای این منظور با هر بار تغییر ۱ سانتی‌متری از مقدار ۱ تا ۲۵ سانتی‌متر، سپس با هر بار تغییر ۱۰ سانتی‌متری از مقدار ۳۰ تا ۵۰ سانتی‌متر و در نهایت با هر بار تغییر ۵۰ سانتی‌متری از مقدار ۵۰ تا ۲۰۰ سانتی‌متر انجام پذیرفت. این پردازش‌ها به رایانه‌ای به‌نسبت قدرتمند نیاز دارد. در این پژوهش از رایانه‌ای با ۸ گیگابایت رم و پردازنده Intel Pentium G4400 3.3GHz استفاده شد، الگوریتم در نرم‌افزار 3D Forest v0.52 اجرا شد و هر بار پردازش کل منطقه حدود ۱۴۰ دقیقه زمان برد.

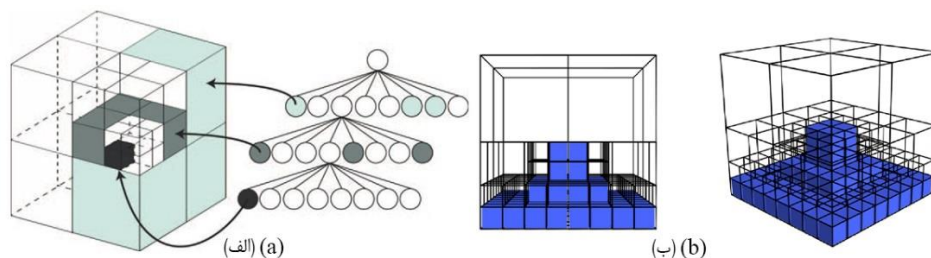
تهیه داده‌های مرجع

برای ارزیابی نتایج پردازش و مدل‌سازی‌ها، مقایسه آنها با داده‌های مرجع دقیق، ضروری و اجتناب‌ناپذیر است. به‌منظور تهیه داده‌های مرجع در این پژوهش، به‌صورت چشمی و با صرف زمان زیادی، جداسازی نقاط زمینی و غیر زمینی صورت گرفت (Hsieh & Ruan, 2023; Martens et al., 2023; Pierdicca et al., 2020; Vo et al., 2015).

الگوریتم OBS

Octree یک ساختار داده درختی است که فضای سه‌بعدی را به گره‌هایی تقسیم می‌کند (Meagher et al., 1982; Wilhelms & Van Gelder, 1992). این گره‌ها به‌شکل مکعب‌های سه‌بعدی نشان داده شده و هر یک به هشت زیر بخش کوچک‌تر تقسیم می‌شود تا به حداقل اندازه مکعب مدنظر کاربر برسد (Fahle et al., 2023). چگونگی عملکرد الگوریتم OBS در شکل ۲ نشان داده شده است.

این ساختار می‌تواند برای نمایش و تجزیه و تحلیل داده‌های سه‌بعدی ابر نقاط استفاده شود (Xu et al., 2015). ابتدا یک مکعب محدوده ابر نقاط را در بر می‌گیرد (Vo et al., 2015)؛ سپس در داخل این مکعب، هشت مکعب جدید ایجاد خواهد شد و این فرایند تا زمانی که ابعاد مکعب‌ها به مقدار تعیین‌شده توسط کاربر برسد ادامه خواهد داشت. نقاطی که به لحاظ ارتفاعی در



شکل ۲- الف): ساختار درختی تقسیم سه‌بعدی فضا در الگوریتم OBS (Lavrenov et al., 2017)، ب): عملکرد الگوریتم OBS در انتخاب و جداسازی نقاط زمینی (Yuan & Chen, 2023)

Figure 2. (a): A Tree Structure of Three-Dimensional Segmentation in the OBS Algorithm (Lavrenov et al., 2017), (b): The OBS Algorithm Principle to Separate the Ground Points (Yuan & Chen, 2023)

صحت‌سنجی کارایی الگوریتم

دارای اهمیت زیادی باشند یا داده‌ها در کلاسه‌ها از تعداد یکسان برخوردار نباشند، مقادیر زیاد صحت کل ممکن است ناشی از نادیده گرفتن مقادیر کلاس کمتر باشد؛ از این‌رو این نکته را می‌توان یکی از عیب‌های اصلی این آماره در این صحت‌سنجی برشمرد (Hossin & Sulaiman, 2015).

امتیاز F1 (F1 Score)

در جداسازی و طبقه‌بندی‌های دو کلاسه‌ای، این آماره بر کلاسه اول (کلاسه زمین) و مقادیر خطا در هر دو کلاسه متمرکز بوده و نمایانگر میزان کارایی الگوریتم در تفکیک کلاسه اول است. بنابراین اگر این کلاسه از اهمیت بیشتری برخوردار باشد، بهتر است از این آماره استفاده شود (Chicco et al., 2021). این آماره به‌طور مستقیم تحت تأثیر انتخاب نمونه‌ها برای هر کلاسه است (Tharwat, 2020) دامنه این آماره صفر تا ۱ است.

$$F1 = \frac{2*TP}{2*TP + FP + FN} \quad \text{رابطه ۲}$$

صحت متوازن (Balanced Accuracy (BA)

این آماره با توجه به استفاده توأم همه مقادیر صحیح و غیر صحیح در محاسبات، می‌تواند نسبت به آماره امتیاز F1 عملکرد بهتری هنگام کار با کلاسه‌های نابرابر (به لحاظ تعداد نقاط) ارائه کند. دامنه این آماره نیز بین صفر تا ۱ است که به ترتیب بیانگر بدترین و بهترین نتیجه است (Tharwat et al., 2017). به‌طور کلی می‌توان انتظار داشت که مقدار نهایی این آماره، مقداری کمتر از صحت کلی را نشان دهد؛ بنابراین یکی از راه‌های پی بردن به نابرابری کلاسه‌ها در داده‌های ورودی، می‌تواند تشابه و نزدیک بودن مقادیر حاصل از آماره‌های صحت کلی و صحت متوازن باشد.

$$Balanced Accuracy = \frac{1}{2} * \left(\frac{TP}{TP + FN} + \frac{TN}{TN + FP} \right) \quad \text{رابطه ۳}$$

همه ابرهای نقاط زمینی و غیر زمینی حاصل از اجرای الگوریتم به طور کامل با داده مرجع تهیه‌شده ارزیابی شد. آماره‌های گوناگونی با ویژگی‌هایی خاص خود برای ارزیابی کارایی و صحت سنجی نتایج وجود دارد (De Diego et al., 2022). استفاده از یک آماره به‌تنهایی ممکن است سبب خطای تصمیم‌گیری شود (Powers, 2020)؛ بنابراین استفاده از چند آماره دیدگاه مناسب‌تری درباره کارایی الگوریتم‌ها و مقایسه آنها ارائه می‌دهد و می‌تواند به ارزیابی دقیق‌تر الگوریتم منجر شود (Hossin & Sulaiman, 2015). در این پژوهش نتایج جداسازی ابر نقاط زمینی و غیر زمینی حاصل از اجرای الگوریتم OBS با آماره‌های گوناگونی (صحت کلی، امتیاز F1، صحت متوازن، شاخص جاکارد یا IoU، ضریب همبستگی متیوز و ضریب کاپا) که از قابلیت زیادی در ارزیابی عملکرد الگوریتم‌های جداسازی ابر نقاط برخوردارند سنجیده شد که نحوه محاسبه آنها در رابطه‌های ۱ تا ۶ ارائه شده است. در رابطه‌های زیر TP و TN به ترتیب بیانگر نقاط متعلق به زمین و غیر زمین هستند که به‌درستی توسط الگوریتم، به‌عنوان زمین و غیر زمین جدا شده‌اند. FP نقاطی است که متعلق به زمین نیست و توسط الگوریتم به اشتباه به‌عنوان زمین جدا شده است. همچنین FN نمایانگر نقاطی است که متعلق به غیر زمین است، اما به اشتباه توسط الگوریتم به‌عنوان نقاط زمین جداسازی شده است. آماره‌های استفاده‌شده در پژوهش عبارت است از:

صحت کلی (Overall Accuracy (OA)

این آماره از تقسیم نقاطی که به‌درستی توسط الگوریتم جداسازی شده بر تعداد کل نقاط به‌دست می‌آید (Congalton, 1991).

$$Overall Accuracy = \frac{TP + TN}{TP + FN + TN + FP} \quad \text{رابطه ۱}$$

در صورتی که در یک طبقه‌بندی دو کلاسه، نتایج طبقه دوم (کلاسه غیر زمین)، هرچند بسیار اندک

است. مقدار عددی این آماره تنها در صورتی زیاد است که طبقه‌بندی‌کننده در هر دو کلاسه عملکرد خوبی داشته باشد (Chicco et al., 2021).

$$MCC = \frac{(TP*TN)-(FP*FN)}{\sqrt{(TP+FP)(TP+FN)(TN+FP)(TN+FN)}} \quad \text{رابطه ۵}$$

ضریب کاپا (Kappa Coefficient)

این آماره که توسط کوهن (Cohen, 1960) ارائه شده سعی دارد نقش توافق اتفاقی و تصادفی را حذف کند (Delgado & Tibau, 2019). مقدار بیشتر ضریب کاپا توافقی قوی‌تری را نشان می‌دهد. مقدار مثبت ۱ نشان‌دهنده طبقه‌بندی کامل و مقدار صفر نشان‌دهنده نبود طبقه‌بندی صحیح و تصادفی بودن نتایج است. مقدار کمتر از صفر نیز به معنای ناسازگاری کامل و طبقه‌بندی‌های کاملاً غلط است (Chicco et al., 2021). مقدار بیشتر از ۰/۶ توافق متوسط و مقدار بیشتر از ۰/۸ توافق عالی را نشان می‌دهد (McHugh, 2012).

$$k = \frac{2*(TP*TN)-(FP*FN)}{(TP+FP)*(FP+TN)+(TP+FN)*(FN+TN)} \quad \text{رابطه ۶}$$

روند اجرای تحقیق را می‌توان در شکل ۳ مشاهده کرد.

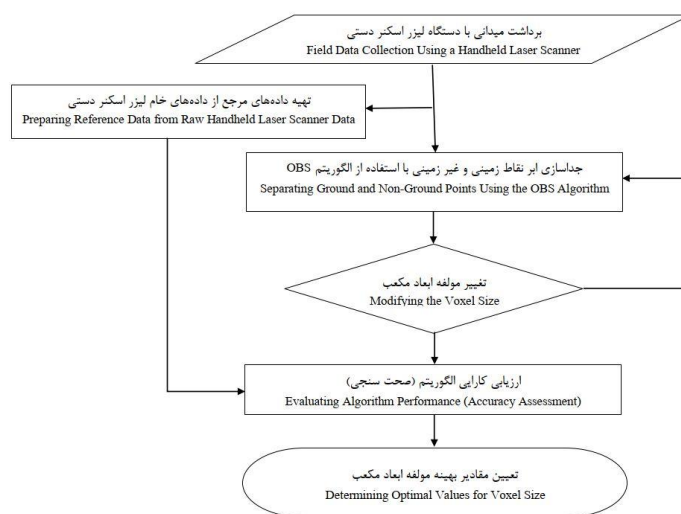
شاخص جاکارد Intersection over Union (IoU)

شاخص جاکارد (Jaccard index یا JI) یا آماره IoU میزان شباهت یک کلاسه با مقدار واقعی آن را بیان می‌کند. این آماره یکی دیگر از آماره‌های متداول و پرکاربرد در پژوهش‌های مرتبط با الگوریتم‌های یادگیری عمیق محسوب می‌شود. این آماره در ابر نقاط میزان همپوشانی (تطابق) کلاسه حاصل از اجرای الگوریتم و واقعیت را می‌سنجد و با مقادیری بین صفر تا ۱ نشان می‌دهد (Cho, 2021). صفر نشانه عدم شباهت و ۱ به معنای شباهت یا تطابق کامل است.

$$IoU \text{ or } JI = \frac{TP}{TP+FP+FN} \quad \text{رابطه ۴}$$

ضریب همبستگی متیوز Matthews Correlation Coefficient (MCC)

این آماره توسط برایان متیوز در سال ۱۹۷۵ معرفی شد (Matthews, 1975) و بیانگر اثر یک متغیر بر دیگری است با دامنه منفی ۱ تا مثبت ۱. مقدار مثبت ۱ بیانگر طبقه‌بندی کامل و مقدار صفر نشان‌دهنده طبقه‌بندی ناصحیح و نتایج اتفاقی است. مقدار منفی ۱ نیز نشان‌دهنده ناسازگاری کامل بین طبقه‌بندی و واقعیت است. این آماره هنگام کار با کلاسه‌های نابرابر از قابلیت بسیار خوبی برخوردار



شکل ۳- روند نمای پژوهش

Figure 3. The Flowchart of the Applied Methodology

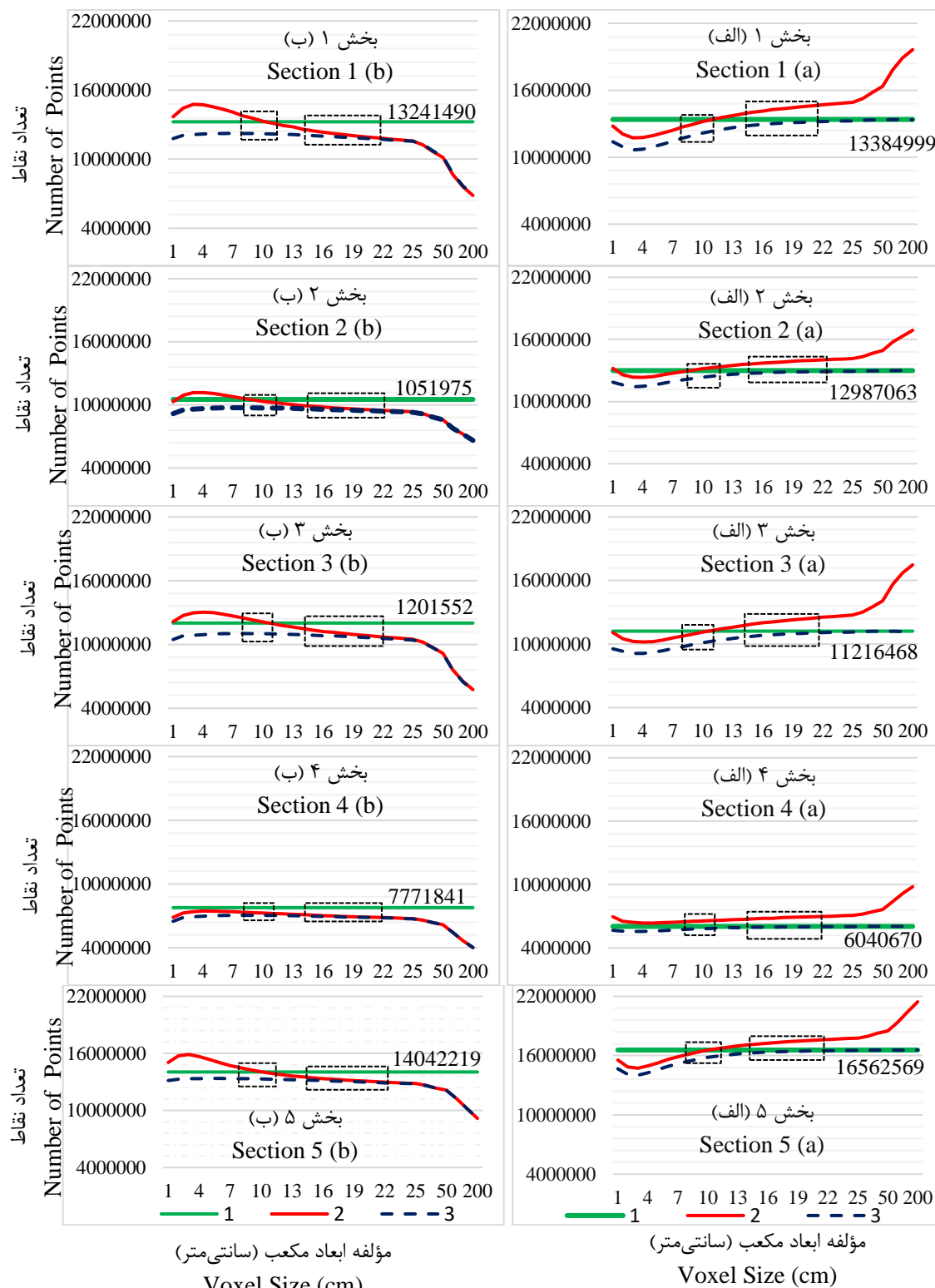
نتایج

نتایج حاصل از جداسازی نقاط زمینی (الف) و غیر زمینی (ب) با الگوریتم OBS به تفکیک بخش‌های مطالعه در شکل ۴ نشان داده شده است. به‌طور کلی در دامنه ۹ تا ۱۲ سانتی‌متری (مشخص شده در شکل‌ها با کادر مستطیل)، نقاط زمینی و غیر زمینی تفکیک‌شده توسط الگوریتم در مقایسه با داده‌های مرجع، کمترین فاصله را دارند؛ از این‌رو با بررسی همه شکل‌ها می‌توان دریافت که این بازه نشان‌دهنده شروع عملکرد الگوریتم به سمت انتخاب و جداسازی صحیح نقاط است. با بررسی شکل‌ها می‌توان نتیجه گرفت که در قسمت الف یعنی شکل‌های جداسازی نقاط زمینی توسط الگوریتم، با تعیین ابعاد مکعب در محدوده ۱۵ تا ۲۲ سانتی‌متری (مشخص شده در شکل‌ها با کادر مستطیل)، تعداد کل نقاط جداسازی‌شده به‌عنوان نقاط زمینی توسط الگوریتم و همه نقاطی که به‌درستی به‌عنوان نقاط زمینی جداسازی شده‌اند از خط مرجع در حالت بهینه بوده (خط ۱ به رنگ قرمز و خط ۳ به حالت مقطع) است؛ زیرا همزمان در این بازه نقاطی که صحیح جداسازی شده‌اند به سمت نقاط مرجع میل کرده (خط ۲ به رنگ سبز) و در ادامه با آن برابر شده است و همچنین کل نقاط جداسازی شده نیز دارای خطای به نسبت یکسانی است. سپس بعد از این مقدار با افزایش ابعاد مؤلفه بیش از ۲۲ سانتی‌متر، الگوریتم با خطای افزونگی (بیش‌برآورد) مواجه شده و با افزایش ابعاد مکعب، نقاطی که اشتباه جداسازی شده‌اند افزایش یافته است (خط ۱ روند افزایشی داشته) و نقاط غیر زمینی را به اشتباه به‌عنوان نقاط زمینی جداسازی می‌کند؛ اما همچنان نقاطی که به‌صورت صحیح به زمین تعلق دارند و جداسازی شده‌اند از این بازه به بعد بدون تغییر و با مقادیر مرجع برابر است.

در قسمت ب یعنی شکل‌های جداسازی نقاط غیر زمینی نیز در همان بازه ۹ تا ۱۲ سانتی‌متری جداسازی نقاط توسط الگوریتم به خط نقاط مرجع بیشترین نزدیکی را دارد و بنابراین می‌توان دریافت که در این

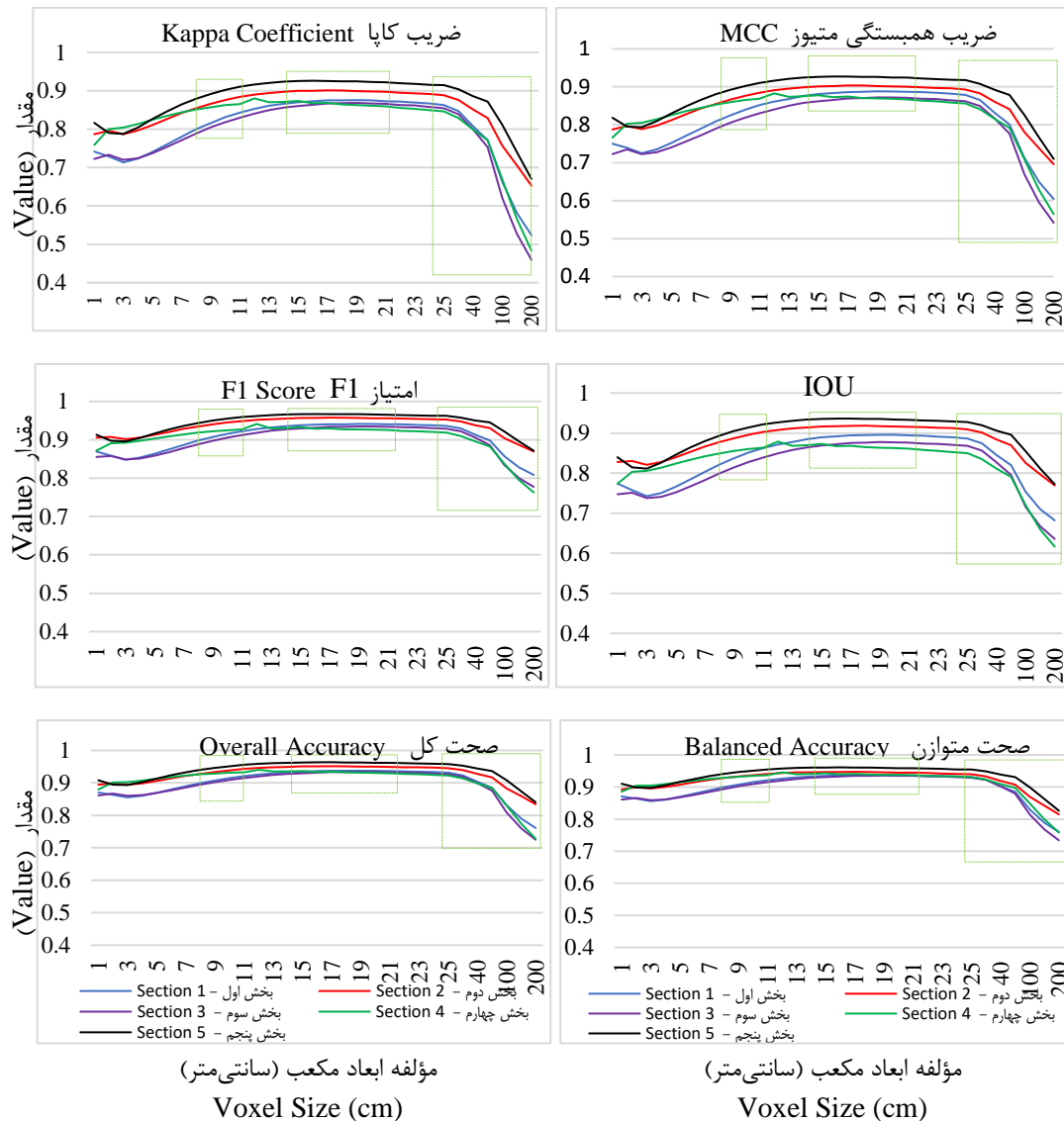
بازه عملکرد الگوریتم به سمت جداسازی بهینه نقاط پیش خواهد رفت. با افزایش ابعاد مکعب، نتایج حاصل از جداسازی نقاط از خط مرجع فاصله گرفته و به‌طور کلی در بازه ۱۵ تا ۲۲ سانتی‌متری همه جداسازی‌های نقاط غیر زمینی توسط الگوریتم، صحیح بوده و خطای الگوریتم در جداسازی نقاط غیر زمینی کمترین مقدار خواهد بود، ولی بعد از این بازه با افزایش ابعاد مؤلفه، عملکرد الگوریتم کاهش می‌یابد و نقاط غیر زمینی به اشتباه در بخش زمینی قرار می‌گیرند؛ اما همچنان همه نقاطی که به‌عنوان غیر زمینی جداسازی می‌شوند به‌صورت صحیح جداسازی شده‌اند.

به‌منظور دستیابی به مقدار یا بازه‌ای از مقادیر بهینه مؤلفه مورد بحث، رفتار و عملکرد الگوریتم نسبت به تغییر این مؤلفه توسط آماره‌های ارزیابی و صحت‌سنجی بررسی شد که در شکل ۵ نشان داده شده است. در همه این شکل‌ها بازه‌های بررسی شده یعنی ۹ تا ۱۲ و ۱۵ تا ۲۲ سانتی‌متر با کادرهای مستطیلی نمایش داده شده است. مطابق آنچه بیان شد، در بازه ۹ تا ۱۲ سانتی‌متری شیب کاهنده مقدار آماره حکایت از بازه‌ای دارد که الگوریتم در سرآغاز ورود به مقدار بهینه است و عملکرد الگوریتم به سمت قابل قبول بودن پیش می‌رود. در بازه ۱۵ تا ۲۲ سانتی‌متری نیز ثبات در مقدار آماره ارزیابی، آشکارا نشان‌دهنده بازه‌ای از مقادیر قابل قبولی است که الگوریتم عملکرد بهینه را از خود نشان می‌دهد. در این شکل‌ها از مقدار مؤلفه ۲۵ سانتی‌متری به بعد (سومین کادر) با شیب زیاد الگوریتم عملکرد غیرقابل قبولی را نشان می‌دهد. با توجه به نتایج به‌دست‌آمده به‌وضوح می‌توان دریافت که افزون‌بر بازه بهینه تعیین‌شده ۱۵ تا ۲۲ سانتی‌متری، مقادیر ابعاد مکعب در نزدیکی این بازه نیز می‌تواند کارایی مطلوبی از الگوریتم را نشان دهد. همچنین نتایج نشان‌دهنده این است که در این بازه هیچ تغییر چشمگیری در کارایی الگوریتم رخ نداده است؛ بنابراین انتخاب مقادیر ابعاد مکعب برای اجرای الگوریتم در کارهای اجرایی در این بازه کاملاً قابل قبول خواهد بود.



شکل ۴- تغییر مؤلفه ابعاد مکعب و تأثیر آن بر جداسازی نقاط زمینی (الف) و نقاط غیر زمینی (ب) (راهنمای خطوط: خط قرمز: تعداد نقاط جداسازی شده حاصل از اجرای الگوریتم، خط سبز: تعداد نقاط مرجع، خط منقطع: تعداد نقاطی که به صورت صحیح توسط الگوریتم جداسازی شده است، راهنمای کادرها: کادر کوچک مقادیر ۹-۱۲ و کادر بزرگ مقادیر ۱۵-۲۲ سانتی متر را نشان می دهد).

Figure 4. Changes in the Voxel Size and Their Impact on the Ground Point (a) and Non-Ground Point (b) Separation (Lines Legend: Red Line: Separated Points by the Algorithm, Green Line: Reference Points, Dashed Line: Number of Points Correctly Separated by the Algorithm, Boxs Legend: Small Box Represent Values From 9-12, and Large Box Represent Values From 15-22 Centimeters.)

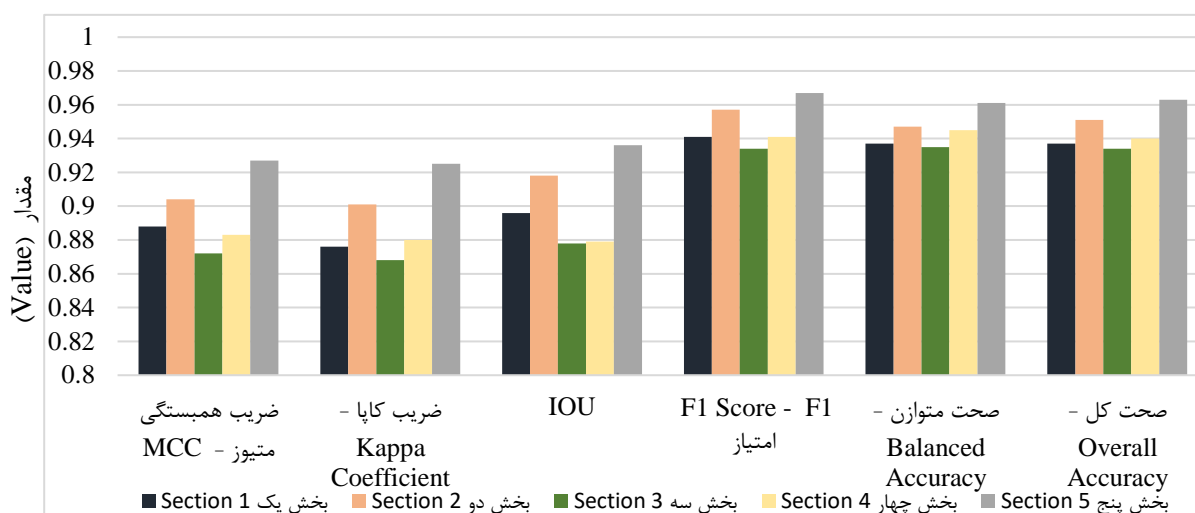


شکل ۵- عملکرد الگوریتم با تغییر مؤلفه ابعاد مکعب، (کادرها از چپ به راست: مقادیر ۹-۱۲، ۱۵-۲۲، مقادیر بیشتر از ۲۵ سانتی‌متر)

Figure 5. Algorithm Performance with the Changes in the Voxel Size (Boxes from Left to Right: 9-12, 15-22, and Values Greater than 25 Centimeters)

صحت کل و صحت متوازن با دیگر آماره‌های بررسی‌شده، مقادیر این دو آماره به صورت اعشاری بیان شده است.

از مجموع ۱۵۵ پردازش در همه بخش‌ها، نتایج بیشترین مقادیر ارزیابی الگوریتم OBS با استفاده از آماره‌های ارزیابی و صحت‌سنجی در شکل ۶ ارائه شده است. به منظور مقایسه هرچه ساده‌تر مقادیر آماره‌های



آماره‌های ارزیابی (Evaluation Metrics)

شکل ۶- بیشترین مقدار صحت عملکرد الگوریتم OBS در هر بخش براساس آماره‌های ارزیابی

Figure 7. The Highest Obtained Accuracy of the OBS Algorithm in Each Section Based on Evaluation Metrics

به‌اشتباه به‌عنوان نقاط زمینی طبقه‌بندی شده‌اند، در واقع با بررسی ابعاد مکعب کوچک‌تر از ۹ سانتی‌متر می‌توان دریافت که الگوریتم، نقاط غیر زمینی فراوانی را به‌اشتباه به‌عنوان نقاط زمینی جداسازی کرده است. مقایسه نتایج قسمت‌های الف و ب در همه بخش‌ها (شکل ۵) نشان می‌دهد که در بخش الف قبل از بازه ۹ سانتی‌متری نقاط زمینی صحیح کمتری به‌عنوان زمین جداسازی شده‌اند و دقیقاً در همان بازه در جداسازی نقاط غیر زمینی شاهد انتخاب نادرست نقاط زمینی به‌عنوان نقاط غیر زمینی هستیم. همین‌طور با افزایش ابعاد مکعب بیش از ۲۵ سانتی‌متر شاهد وجود قرینه‌ای مجدد هستیم و آن افزایش اشتباه در جداسازی نقاط غیر زمینی و قرار دادن این نقاط در بخش زمین است. مطابق موارد ذکر شده می‌توان انتظار داشت که با افزایش ابعاد مکعب به‌دلیل انتخاب نقاط بسیار زیاد و نزدیک به یکدیگر عملاً نقاط غیر زمینی زیادی به‌اشتباه به بخش زمین اختصاص داده شود. نتایج این پژوهش در شکل ۵ نشان‌دهنده این نکته است که مقدار خطای عملکرد الگوریتم در ابعاد بزرگ‌تر مکعب یعنی ۲۵ سانتی‌متر و بیشتر، بسیار چشمگیر و بیشتر از خطا در

بحث

انتظار می‌رفت با انتخاب کوچک‌ترین ابعاد مکعب در الگوریتم، به‌واسطه تشکیل تعداد مکعب‌های بیشتر با ابعاد کوچک‌تر و در نتیجه قرارگیری تعداد کمتری از نقاط در هر مکعب، جداسازی بهتر نقاط زمینی و غیر زمینی از یکدیگر رخ دهد، اما در عمل این‌گونه نیست. این نکته را می‌توان این‌چنین توجیه کرد که انتخاب ابعاد کوچک‌تر مکعب سبب تشکیل مکعب‌های بیشتر ولی کوچک‌تری می‌شود که نقاط کمتری را در خود جای می‌دهند. این نقاط با فاصله بسیار کمی از یکدیگر قرار گرفته‌اند، بنابراین الگوریتم در هنگام اجرا سعی می‌کند مکعب‌های نزدیک‌تر را انتخاب کند و با توجه به قرارگیری و نزدیکی نقاط زمینی و غیر زمینی عملاً سبب انتخاب مکعب‌هایی خواهد شد که متعلق به زمین نیستند؛ هرچند امکان وجود نقاط زمینی در آن مکعب‌ها نیز وجود دارد و برعکس. این عمل سبب می‌شود که الگوریتم نتواند عملکرد مناسبی در جداسازی نقاط داشته باشد. همان‌گونه که در شکل ۴ نشان داده شده است در قسمت‌های الف و ب در همه بخش‌های پژوهش در ابعاد کوچک‌تر مکعب، نقاط غیر زمینی زیادی

همراه با پوشش گیاهی ارزیابی کردند که نشان از اهمیت اجرای روش در مناطق شهری افزون بر مناطق طبیعی و جنگلی دارد. همان‌طور که در جدول ۲ و شکل ۱ بیان شده است، بخش‌های ۱ تا ۳ از نظر توپوگرافی سطوحی تقریباً مشابه داشتند که با تفاوت‌هایی در عوارض روی زمین همراه بوده است، برای این بخش‌ها مقدار بهینه مؤلفه اجرای الگوریتم به ترتیب ۱۹، ۱۸ و ۱۹ سانتی‌متر به دست آمد، در بخش ۴ که از نظر توپوگرافی دارای خیابانی مسطح به همراه عوارض ذکر شده در جدول ۲ است، مقدار بهینه مؤلفه ۱۲ سانتی‌متر به دست آمد. بخش ۵ سطحی تقریباً همگن و تغییراتی اندک نسبت به بخش‌های ۱ تا ۳ داشت. همچنین ساختار درختان در همه سطح این بخش تقریباً همگن و مشابه بود. مقدار بهینه مؤلفه در این بخش ۱۶ سانتی‌متر به دست آمد. بررسی کارایی الگوریتم و تعیین مقادیر بهینه مؤلفه تأثیرگذار نه تنها یک عدد مشخص، بلکه بازه‌ای از مقادیر بهینه برای اجرای الگوریتم را نشان داد که به وضوح نشان‌دهنده تأثیرات تغییر سطح عرصه و عوارض موجود در آن بر نتایج حاصل از اجرای الگوریتم بوده است. بخش ۴ با بیشترین همگنی سطح کمترین مقدار بهینه مؤلفه و بخش ۱ با بیشترین ناهمگنی و تغییرات توپوگرافی سطح، بزرگ‌ترین مقدار بهینه مؤلفه را کسب کردند؛ بنابراین می‌توان انتظار داشت در سطوحی با تغییرات اندک توپوگرافی مقادیر کمتر و برای مناطقی با تغییرات توپوگرافی شدیدتر استفاده از مقادیر بیشتر برای اجرای بهینه الگوریتم مفید خواهد بود. همچنین همان‌گونه که در شکل ۵ نشان داده شده با افزایش مقدار ابعاد مؤلفه، خطای الگوریتم بیشتر شده است و نقاط غیر زمینی بیشتری به خطا در بخش زمینی قرار گرفته‌اند. همان‌طور که مشخص است در بخش چهار عملکرد الگوریتم از نظر مجموع جداسازی نقاط و تعداد نقاطی که به درستی جداسازی شده‌اند به مقدار مرجع بسیار نزدیک است، در صورتی که در دیگر بخش‌ها با

ابعاد کوچک‌تر از ۹ سانتی‌متری بوده است؛ بنابراین نتایج بیان می‌کند که مقدار خطای الگوریتم در جداسازی نقاط زمینی و غیر زمینی در ابعاد بزرگ‌تر مکعب در مقایسه با ابعاد کوچک‌تر بسیار بیشتر خواهد بود. از عوامل چالش‌زا در جداسازی نقاط زمینی و غیرزمینی می‌توان به عوارض اشاره کرد که سبب افزایش ناهمگنی و غیریکنواختی در محیط می‌شوند. عوارض موجود در جنگل‌های طبیعی و کم‌تر دست‌خورده که موجب تشدید این ناهمگنی می‌شوند عبارت‌اند از: شکل و فرم تنه درختان، درختان بادافتاده، زادآوری‌ها، بوته‌ها و درختچه‌ها، هرگونه پوشش کف جنگل و روی تنه درختان، دولین‌ها، شیب زمین و موارد دیگر که در نتیجه فعالیت‌های انسانی همچون بهره‌برداری، جاده‌سازی، مسیرهای چوب‌کشی و تنه‌های باقی‌مانده از عملیات بهره‌برداری هستند. بنابراین هرچه محیط به سمت یکنواختی و همگنی مانند جنگلکاری‌های دست‌کاشت میل کند، الگوریتم در جداسازی نقاط با چالش کمتری روبه‌رو خواهد بود. در محدوده پژوهش نیز وجود دو عارضه تپه و رودخانه سبب ایجاد چالش‌های بزرگی در جداسازی نقاط زمینی از غیر زمینی توسط الگوریتم شد. عوامل اصلی تأثیرگذار در کارایی الگوریتم‌های جداسازی نقاط زمینی و غیر زمینی، عوارض موجود روی سطح، تغییرات شیب و ارتفاعی است (Xu et al., 2015). بنابراین مناسب‌ترین الگوریتم در جداسازی نقاط زمینی و غیر زمینی و همین‌طور تعیین پارامترهای بهینه هر الگوریتم، با توجه به هر عرصه تحت بررسی ممکن است متفاوت باشد (Roberts et al., 2019)؛ از این‌رو جا دارد که با بررسی‌های بیشتر در مناطق مختلف جنگلکاری و جنگل‌های طبیعی، به الگوریتم‌های مناسب دست یافت. در این زمینه Yang et al. (2018) عملکرد جداسازی الگوریتم OBS را در یک محدوده جنگلی ارزیابی کردند. در دیگر پژوهش‌های بررسی‌شده در این تحقیق عملکرد الگوریتم را در مناطق شهری

بررسی عملکرد الگوریتم‌ها از خود نشان می‌دهند. در مجموع می‌توان بیان کرد که ضریب همبستگی متیوز آماره‌ای مناسب برای ارزیابی یک ماتریس خطاست و بیشترین اطلاعات را درباره‌ی طبقه‌بندی ارائه می‌کند (Chicco et al., 2021). در این پژوهش به‌دلیل ضرورت بررسی همزمان مقادیر جداسازی شده صحیح و اشتباه در هر دو کلاس زمینی و غیر زمینی برای ارزیابی کارایی الگوریتم تأکید ویژه‌ای بر استفاده از آماره‌های ضریب همبستگی متیوز، ضریب کاپا و IoU شده است و بیان مقادیر دیگر آماره‌ها به‌دلیل مقایسه و آشکارسازی هرچه بیشتر نتایج حاصل از اجرای الگوریتم است. در پژوهش‌های تحت بررسی در بخش پیشینه پژوهش (Vo et al., 2015) از آماره امتیاز F1، (Varney et al., 2016) از آماره صحت کل و (Yang et al., 2018) از آماره خطای نوع اول و دوم استفاده کردند. در دیگر پژوهش‌های تحت بررسی، هیچ‌گونه ارزیابی نتایج صورت نگرفته است. نتایج حاصل از اجرای الگوریتم OBS نشان از کارایی مناسب این الگوریتم در جداسازی نقاط زمینی و غیر زمینی دارد و در صورت انتخاب صحیح و بهینه مقادیر ابعاد مکعب، نتایج این الگوریتم بسیار چشمگیر است و کارایی زیادی خواهد داشت. در این الگوریتم، تنها یک مؤلفه تأثیرگذار، به نام مؤلفه ابعاد مکعب، توسط کاربر تغییرپذیر است که با تعیین مقدار بهینه آن، می‌توان کارایی این الگوریتم را تا حد زیادی افزایش داد (Ayala et al., 1985). نتایج نشان داد که در محدوده بین ۱۵ تا ۲۲ سانتی‌متری، الگوریتم در حالت بهینه خود است و جداسازی نقاط زمینی و غیر زمینی در این بازه به بهترین نحو انجام گرفته است؛ اما باید توجه کرد که به‌دلیل فاصله بسیار اندک نتایج ارزیابی کارایی الگوریتم در این محدوده، نتایج تا سه رقم اعشار بیان شد، بنابراین می‌توان دریافت که در مقادیری نزدیک به این بازه نیز الگوریتم از کارایی قابل قبولی برخوردار است. در تأیید یافته‌های این پژوهش، (Elseberg et al., 2013) در پژوهش خود در

تغییرات بیشتر توپوگرافی عملکرد الگوریتم نیز با خطای بیشتری روبه‌رو بوده است. افزایش ابعاد مؤلفه بیش از ۲۵ سانتی‌متر به‌مراتب سبب انتخاب نقاط اشتباه بیشتری نسبت به کاهش ابعاد این مؤلفه در مقادیر کمتر از ۹ سانتی‌متر می‌شود و با توجه به اینکه بخش زمین شامل محدوده‌ای کاملاً مشخص است می‌توان گفت با افزایش ابعاد مؤلفه بیش از ۲۵ سانتی‌متر در همه بخش‌ها، نقاط غیر زمینی عملاً به‌اشتباه توسط الگوریتم به زمین اختصاص داده می‌شود و عملکرد الگوریتم مختل می‌شود، اما همزمان با مشکل ایجادشده در بخش زمین خللی در انتخاب دقیق نقاط غیر زمینی پیش نمی‌آید و تنها به‌دلیل انتخاب بسیاری از نقاط غیر زمینی به‌اشتباه در بخش زمینی، عملاً این بخش از تعداد اصلی خود دارای نقاط کمتری خواهد بود. یکی از ضروری‌ترین بخش‌ها بعد از اجرای الگوریتم ارزیابی نتایج خواهد بود. در این زمینه، تهیه واقعیت زمینی بخش جدانشدنی از ارزیابی است. (Vo et al., 2015) به‌صورت دستی اقدام به تهیه واقعیت زمینی کردند. (Varney et al., 2016) از داده‌های واقعیت زمینی که در گذشته تهیه شده بود برای ارزیابی الگوریتم در پژوهش خود استفاده کردند. در دیگر پژوهش‌های تحت بررسی تهیه واقعیت زمینی و ارزیابی نتایج حاصل از اجرای الگوریتم صورت نگرفته است که احتمالاً ناشی از ضرورت نداشتن انجام آن به دلایلی همچون اهداف غیرمقایسه‌ای یا تمرکز بر اجرا در آن تحقیق بوده است. در زمینه ارزیابی آماره‌های صحت‌سنجی عملکرد الگوریتم باید بیان داشت که آماره صحت کلی متداول است، اما نمی‌تواند آماره کاملی باشد. آماره امتیاز F1 هنگام کار با کلاسه‌های نابرابر مناسب است و ممکن است به‌دلیل برآورد بیش از حد، معیاری گمراه‌کننده باشد (Chicco & Jurman, 2020). بنابراین پیشنهاد می‌شود که به‌همراه این آماره‌ها از آماره صحت متوازن نیز استفاده شود. آماره ضریب همبستگی متیوز، ضریب کاپا و IoU قابلیت زیادی در

دخالت‌های انسانی در آن صورت گرفته باشد، بنابراین می‌توان انتظار داشت که نتایج این تحقیق راهگشای بسیاری از تحقیقات آینده باشد که در جنگل‌های طبیعی یا محیط‌های شهری بررسی خواهند شد. براساس نتایج برای دستیابی به حداکثر کارایی، استفاده از مقادیر بهینه پارامترهای ورودی الگوریتم OBS ضروری است. همچنین می‌توان بیان داشت که این الگوریتم در جداسازی نقاط زمینی و غیر زمینی در عرصه‌های جنگلی کارایی مطلوبی دارد و به دلیل نیاز نداشتن به تنظیمات پیچیده در اجرا و سرعت زیاد پردازش به‌عنوان انتخاب مطلوب قابل استفاده خواهد بود. پیشنهاد می‌شود که این پژوهش در مناطق جنگلی که ناهمگنی‌های محیطی بیشتری دارند نیز تکرار شود تا کارایی الگوریتم برای کارهای اجرایی به‌طور قطعی روشن شود.

سپاسگزاری

از شرکت محترم نماپرداز رایانه بابت در اختیار قرار دادن دستگاه اسکنر تشکر و قدردانی می‌شود.

زمینه بررسی حجم ابر نقاط و زمان پردازش به این یافته رسیدند که مقادیر خیلی بزرگ یا خیلی کوچک از ابعاد مکعب، سبب کاهش چشمگیر کارایی الگوریتم OBS در جداسازی نقاط زمینی و غیر زمینی می‌شود و آنها بازه ۱۰ تا ۱۰۰ سانتی‌متری از این مؤلفه را مناسب توصیف کردند. همچنین لیزر اسکن زمینی استفاده‌شده در این تحقیق با پژوهش Song et al. (2022) یکسان است و نتایج هر دو پژوهش به قابلیت مناسب داده‌های حاصل از این دستگاه در تهیه مدل رقومی زمین اشاره می‌کنند.

نتیجه‌گیری

در این پژوهش قابلیت الگوریتم OBS برای جداسازی نقاط زمینی و غیر زمینی داده‌های لیزر اسکنر در محدوده جنگلی دست‌کاشت بررسی شد. محدوده‌های تحت بررسی به دلیل دارا بودن زادآوری درختی، درختان سوزنی‌برگ و پهن‌برگ در سنین مختلف، اشکوب‌بندی، تخته‌سنگ، مسیره‌های پیاده‌روی، ساختمان و جاده به‌طور کلی نمای کوچکی از یک جنگل طبیعی را به نمایش گذاشت که

References

- Aguilar, F.J., Rivas, J.R., Nemmaoui, A., Peñalver, A., & Aguilar, M.A. (2019). UAV-based digital terrain model generation under leaf-off conditions to support teak plantations inventories in tropical dry forests. A Case Of The Coastal Region Of Ecuador. *Sensors*, 19(8), 1934. <https://doi.org/10.3390/s19081934>
- Arefi, H., d'Angelo, P., Mayer, H., & Reinartz, P. (2011). Iterative approach for efficient digital terrain model production from CARTOSAT-1 stereo images. *Journal of Applied Remote Sensing*, 5(1), 053527-053527. <https://doi.org/10.1117/1.3595265>
- Axelsson, P (2000). DEM generation from laser scanner data using adaptive TIN models. *International archives of photogrammetry and remote sensing*, 33, 111–118.
- Ayala, D., Brunet, P., Juan, R., & Navazo, I. (1985). Object representation by means of nonminimal division quadtrees and octrees. *ACM Transactions on Graphics (TOG)*, 4(1), 41-59. <https://doi.org/10.1145/3973.3975>
- Bauwens, S., Bartholomeus, H., Calders, K., & Lejeune, P. (2016). Forest inventory with terrestrial LiDAR: A comparison of static and hand-held mobile laser scanning. *Forests*, 7(6), 127. <https://doi.org/10.3390/f7060127>
- Chicco, D., & Jurman, G. (2020). The advantages of the Matthews correlation coefficient (MCC) over F1 score and accuracy in binary classification evaluation. *BMC genomics*, 21, 1-13. <https://doi.org/10.1186/s12864-019-6413-7>

- Chicco, D., Warrens, M.J., & Jurman, G. (2021). The Matthews correlation coefficient (MCC) is more informative than Cohen's Kappa and Brier score in binary classification assessment. *IEEE Access*, 9, 78368-78381. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2021.3084050>
- Chicco, D., Tötsch, N., & Jurman, G. (2021). The Matthews correlation coefficient (MCC) is more reliable than balanced accuracy, bookmaker informedness, and markedness in two-class confusion matrix evaluation. *BioData mining*, 14(1), 1-22. <https://doi.org/10.1186/s13040-021-00244-z>
- Cho, Y.J. (2021). Weighted Intersection over Union (wIoU): A New Evaluation Metric for Image Segmentation. arXiv preprint arXiv:2107.09858. <https://doi.org/10.48550/arXiv.2107.09858>
- Cohen, J. (1960). A coefficient of agreement for nominal scales. *Educational and psychological measurement*, 20(1), 37-46. <https://doi.org/10.1177/001316446002000104>
- Congalton, R.G. (1991). A review of assessing the accuracy of classifications of remotely sensed data. *Remote sensing of environment*, 37(1), 35-46. [https://doi.org/10.1016/0034-4257\(91\)90048-B](https://doi.org/10.1016/0034-4257(91)90048-B)
- Dalagan, A.C., & Principe, J.A. (2021). Gis-Based Landslide Volume Estimation Using Digital Terrain Models Derived from LIDAR and Radar Systems: Case of Pidigan, Abra. *International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, 46, 4. <https://doi.org/10.5194/isprs-archives-XLVI-4-W6-2021-109-2021>
- d'Alessandro, M.M., & Tebaldini, S. (2019). Digital terrain model retrieval in tropical forests through P-band SAR tomography. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 57(9), 6774-6781. <https://doi.org/10.1109/TGRS.2019.2908517>
- De Diego, I.M., Redondo, A.R., Fernández, R.R., Navarro, J., & Moguerza, J.M. (2022). General Performance Score for classification problems. *Applied Intelligence*, 52(10), 12049-12063. <https://doi.org/10.1007/s10489-021-03041-7>
- Elseberg, J., Borrmann, D., & Nüchter, A. (2013). One billion points in the cloud—an octree for efficient processing of 3D laser scans. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 76, 76-88. <https://doi.org/10.1016/j.isprsjprs.2012.10.004>
- Fahle, L., Petruska, A.J., Walton, G., Brune, J.F., & Holley, E.A. (2023). Development and Testing of Octree-Based Intra-Voxel Statistical Inference to Enable Real-Time Geotechnical Monitoring of Large-Scale Underground Spaces with Mobile Laser Scanning Data. *Remote Sensing*, 15(7), 1764. <https://doi.org/10.3390/rs15071764>
- Gollob, C., Ritter, T., & Nothdurft, A. (2020). Comparison of 3D point clouds obtained by terrestrial laser scanning and personal laser scanning on forest inventory sample plots. *Data*, 5(4), 103. <https://doi.org/10.3390/data5040103>
- Heritage, G., & Large, A. (Eds.). (2009). Laser scanning for the environmental sciences. *John Wiley & Sons*. <https://doi.org/10.1002/9781444311952>
- Hossin, M., & Sulaiman, M.N. (2015). A review on evaluation metrics for data classification evaluations. *International journal of data mining & knowledge management process*, 5(2), 1. <https://doi.org/10.5121/ijdkp.2015.5201>
- Hsieh, C.S., & Ruan, X.J. (2023). Automated Semantic Segmentation of Indoor Point Clouds from Close-Range Images with Three-Dimensional Deep Learning. *Buildings*, 13(2), 468. <https://doi.org/10.3390/buildings13020468>
- Jiménez-Jiménez, S.I., Ojeda-Bustamante, W., Marcial-Pablo, M.D.J., & Enciso, J. (2021). Digital terrain models generated with low-cost UAV photogrammetry: Methodology and accuracy. *ISPRS International Journal of Geo-Information*, 10(5), 285. <https://doi.org/10.3390/ijgi10050285>
- Khorrani, R.A., Darvishsefat, A.A., Tabari Kochaksaraei, M., & Shataee Jouybari, S. (2014). Potential of LIDAR data for estimation of individual tree height of *Acer velutinum* and *Carpinus betulus*. *Iranian Journal of Forest*, 6(2), 127-140. (In Persian)

- Kraus, K., & Pfeifer, N. (1998). Determination of terrain models in wooded areas with airborne laser scanner data. *ISPRS Journal of Photogrammetry and remote Sensing*, 53(4), 193-203. [https://doi.org/10.1016/S0924-2716\(98\)00009-4](https://doi.org/10.1016/S0924-2716(98)00009-4)
- Lari, Z., Habib, A., & Kwak, E. (2012). An adaptive approach for segmentation of 3D laser point cloud. *The International Archives of the Photogrammetry. Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, 38, 103-108. <https://doi.org/10.5194/isprsarchives-XXXVIII-5-W12-103-2011>
- Lavrenov, R., Zakiev, A., & Magid, E. (2017). Automatic mapping and filtering tool: From a sensor-based occupancy grid to a 3D Gazebo octomap. In 2017 International Conference on Mechanical, System and Control Engineering. *IEEE*, 190-195. <https://doi.org/10.1109/ICMSC.2017.7959469>
- Martens, J., Blut, T., & Blankenbach, J. (2023). Cross domain matching for semantic point cloud segmentation based on image segmentation and geometric reasoning. *Advanced Engineering Informatics*, 57, 102076. <https://doi.org/10.1016/j.aei.2023.102076>
- Matthews, B.W. (1975). Comparison of the predicted and observed secondary structure of T4 phage lysozyme. *Biochimica et Biophysica Acta (BBA)-Protein Structure*, 405(2), 442-451. [https://doi.org/10.1016/0005-2795\(75\)90109-9](https://doi.org/10.1016/0005-2795(75)90109-9)
- McHugh, M.L. (2012). Interrater reliability: the kappa statistic. *Biochemia medica*, 22(3), 276-282.
- Meagher, D. (1982). Geometric modeling using octree encoding. *Computer graphics and image processing*, 19(2), 129-147. [https://doi.org/10.1016/0146-664X\(82\)90104-6](https://doi.org/10.1016/0146-664X(82)90104-6)
- Mielcarek, M., Kamińska, A., & Stereńczak, K. (2020). Digital aerial photogrammetry (DAP) and airborne laser scanning (ALS) as sources of information about tree height: Comparisons of the accuracy of remote sensing methods for tree height estimation. *Remote Sensing*, 12(11), 1808. <https://doi.org/10.3390/rs12111808>
- Moradi, A., Satari, M., & Momeni, M. (2018). Extracting the individual trees of urban forests from high density airborne LiDAR data. *Iranian Journal of Forest*, 10(1), 27-42. (In Persian)
- Nocerino, E., Menna, F., Remondino, F., Toschi, I., & Rodríguez-González, P. (2017). Investigation of indoor and outdoor performance of two portable mobile mapping systems. In Videometrics, Range Imaging, and Applications XIV. *SPIE*, 10332, 125-139 <https://doi.org/10.1117/12.2270761>
- Pierdicca, R., Paolanti, M., Matrone, F., Martini, M., Morbidoni, C., Malinverni, E.S., Frontoni, E., & Lingua, A. M. (2020). Point cloud semantic segmentation using a deep learning framework for cultural heritage. *Remote Sensing*, 12(6), 1005. <https://doi.org/10.3390/rs12061005>
- Powers, D.M. (2020). Evaluation: from precision, recall and F-measure to ROC, informedness, markedness and correlation. *arXiv preprint arXiv*, 2010, 16061. <https://doi.org/10.48550/arXiv.2010.16061>
- Puletti, N., Grotti, M., Masini, A., Bracci, A., & Ferrara, C. (2022). Enhancing wall-to-wall forest structure mapping through detailed co-registration of airborne and terrestrial laser scanning data in Mediterranean forests. *Ecological Informatics*, 67, 101497. <https://doi.org/10.1016/j.ecoinf.2021.101497>
- Roberts, K.C., Lindsay, J.B., & Berg, A.A. (2019). An analysis of ground-point classifiers for terrestrial LiDAR. *Remote Sensing*, 11(16), 1915. <https://doi.org/10.3390/rs11161915>
- Sadeghi, Y., St-Onge, B., Leblon, B., & Simard, M. (2016). Canopy height model (CHM) derived from a TanDEM-X InSAR DSM and an airborne lidar DTM in boreal forest. *IEEE, Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing*, 9(1), 381-397. <https://doi.org/10.1109/JSTARS.2015.2512230>
- Sammartano, G., & Spanò, A. (2018). Point clouds by SLAM-based mobile mapping systems: accuracy and geometric content validation in multisensor survey and stand-alone acquisition. *Applied geomatics*, 10, 317-339. <https://doi.org/10.1007/s12518-018-0221-7>

- Song, D., Li, S., Li, S., Jin, S., Tang, D., & Tan, Y. (2022). A Method of Making DEM by Data Fusion of Multi-Device Point Cloud. In IOP Conference Series: Earth and Environmental Science. *IOP Publishing*, 1101(7), 072007. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/1101/7/072007>
- Starek, M.J., Chu, T., Mitasova, H., & Harmon, R.S. (2020). Viewshed simulation and optimization for digital terrain modelling with terrestrial laser scanning. *International Journal of Remote Sensing*, 41(16), 6409-6426. <https://doi.org/10.1080/01431161.2020.1752952>
- Tharwat, A., Moemen, Y.S., & Hassanien, A.E. (2017). Classification of toxicity effects of biotransformed hepatic drugs using whale optimized support vector machines. *Journal of biomedical informatics*, 68, 132-149. <https://doi.org/10.1016/j.jbi.2017.03.002>
- Tharwat, A. (2020). Classification assessment methods. *Applied Computing and Informatics*, 17(1), 168-192. <https://doi.org/10.1016/j.aci.2018.08.003>
- Trier, Ø.D., Cowley, D.C., & Waldeland, A.U. (2019). Using deep neural networks on airborne laser scanning data: Results from a case study of semi-automatic mapping of archaeological topography on Arran, Scotland. *Archaeological Prospection*, 26(2), 165-175. <https://doi.org/10.1002/arp.1731>
- Trochta, J., Krůček, M., Vrška, T., & Král, K. (2017). 3D Forest: An application for descriptions of three-dimensional forest structures using terrestrial LiDAR. *PloS one*, 12(5), e0176871. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0176871>
- Varney, N.M., Asari, V.K., & Sargent, G.C. (2016). A novel feature extraction methodology for region classification in lidar data. In Image and Signal Processing for Remote Sensing XXII. *SPIE*, 10004, 151-164. <https://doi.org/10.1117/12.2242163>
- Vo, A.V., Truong-Hong, L., Laefer, D.F., & Bertolotto, M. (2015). Octree-based region growing for point cloud segmentation. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 104, 88-100. <https://doi.org/10.1016/j.isprsjprs.2015.01.011>
- Vosselman, G. (2000). Slope based filtering of laser altimetry data. *International archives of photogrammetry and remote sensing*, 33(3), 935-942.
- Wang, M., & Tseng, Y.H. (2004). Lidar data segmentation and classification based on octree structure. *parameters*, 1(5).
- Wilhelms, J., & Van Gelder, A. (1992). Octrees for faster isosurface generation. *ACM Transactions on Graphics (TOG)*, 11(3), 201-227. <https://doi.org/10.1145/130881.130882>
- Wilkes, P., Lau, A., Disney, M., Calders, K., Burt, A., de Tanago, J.G., ... & Herold, M. (2017). Data acquisition considerations for terrestrial laser scanning of forest plots. *Remote Sensing of Environment*, 196, 140-153. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2017.04.030>
- Xu, H., Cheng, L., Li, M., Chen, Y., & Zhong, L. (2015). Using octrees to detect changes to buildings and trees in the urban environment from airborne LiDAR data. *Remote Sensing*, 7(8), 9682-9704. <https://doi.org/10.3390/rs70809682>
- Yang, M.Z., Huo, L., & Gao, L. (2018). Improved octree filtering algorithm of airborne LiDAR data in forest environment. *Journal of Beijing Forestry University*, 40(11), 102-111. <https://doi.org/10.13332/j.1000-1522.20180130>
- Yuan, M.S., & Chen, M. (2023). Improved lazy theta* algorithm based on octree map for path planning of UAV. *Defence Technology*, 23, 8-18. <https://doi.org/10.1016/j.dt.2022.01.006>



Evaluation of Octree-Based Segmentation (OBS) Method to Separate Ground Point Based on the Handheld Laser Scanner Data

S.A. Naghibi Rad¹, A.A. Darvishsefat^{2*}, P. Fatehi³, M. Namirani², M. Saadat Seresht⁴, and M. Boroumand⁵

¹Ph.D. Student, Dept. of Forestry and Forest Economics, Faculty of Natural Resources, University of Tehran. I.R. Iran

²Prof., Dept. of Forestry and Forest Economics, Faculty of Natural Resources, University of Tehran. I.R. Iran

³Assistant Prof., Dept. of Forestry and Forest Economics, Faculty of Natural Resources, University of Tehran. I.R. Iran

⁴Associate Prof., Dept. of Photogrammetry and Remote Sensing, School of Surveying and Geospatial Engineering, College of Engineering, University of Tehran. I.R. Iran

⁵MSc in Surveying, Nama Pardaz Rayaneh Co. I.R. Iran

(Received: 30 september 2023; Accepted: 26 November 2023)

Abstract

Introduction: Accurate digital elevation models (DEMs) are crucial for effective forest planning and management. Various methods exist for generating DEM data, with handheld mobile laser scanners being the most efficient and precise approach. The raw point clouds obtained from these scanners require several preprocessing steps, one of which involves separating ground and non-ground points. Errors in this part of the process can lead to the generation of an inaccurate digital model with high uncertainty and errors. Various algorithms, such as voxel-based segmentation, simulation filters, and deep learning-based approaches, have been developed for this purpose. This study evaluates the performance of the OBS algorithm in automatically separating ground points from non-ground points in handheld laser scanner data.

Material and Methods: The study area comprised five different sections within the Karaj Botanical Garden, covering a total area of 7.2 hectares. These areas contained forest stands characterized by heterogeneous structures and multi-story tree layers. Data were acquired using a handheld GeoSLAM laser scanner. To generate a reliable reference for evaluating the algorithm's results, ground points were manually separated. The performance of the algorithm was evaluated by comparing it with the manually separated ground truth using statistical metrics, including Matthew's correlation coefficient, Kappa coefficient, and Intersection over Union (IoU).

Results: The statistical metrics across the five study areas demonstrated the effectiveness of the OBS algorithm in separating ground points from non-ground points, with Matthew's correlation coefficient, Kappa coefficient, and IoU values of 0.895, 0.891, and 0.902, respectively. Additionally, the optimal voxel size for the algorithm was determined to be within the range of 15 to 22 centimeters.

Conclusion: We conclude that the OBS algorithm, when configured with optimal input parameters, provides high performance in automatically separating ground points from non-ground points, especially in heterogeneous forested environments. The importance of configuring the optimal input parameters is also highlighted.

Keywords: Digital Elevation Model, Forest, Handheld Laser Scanner, Octree, Segmentation.