University of Tehran

Journal of Forest and Wood Products

Online ISSN: 2383-0530

Home Page: https://jfwp.ut.ac.ir

Assessing the performance of a handheld mobile laser scanner to estimate tree height

Seyed Ali Naghibi Rad[1] | Ali Asghar Darvishsefat[2] | Parviz Fatehi[3*] | Manouchehr Namiranian[4] | Mohammad Saadat Seresht[5] | Mehdi Boroumand[6]

1. Department of Forestry and Forest Economics, Faculty of Natural Resources, University of Tehran, Karaj, Iran. Email: alirad_naghibi@ut.ac.ir
2. Department of Forestry and Forest Economics, Faculty of Natural Resources, University of Tehran, Karaj, Iran. Email: adarvish@ut.ac.ir
3. Corresponding Author, Department of Forestry and Forest Economics, Faculty of Natural Resources, University of Tehran, Karaj, Iran. Email: parviz.fatehi@ut.ac.ir
4. Department of Forestry and Forest Economics, Faculty of Natural Resources, University of Tehran, Karaj, Iran. Email: mnamiri@ut.ac.ir
5. Department of Photogrammetry and Remote Sensing, School of Surveying and Geospatial Engineering, College of Engineering, University of Tehran, Tehran, Iran. Email: msaadat@ut.ac.ir
6. Nama Pardaz Rayaneh Company, Tehran, Iran. Email: mehdi.boroumand68@gmail.com

ARTICLE INFO

Article type:
Research Article

Article History:
Received: 14 August 2024
Revised: 26 October 2024
Accepted: 05 January 2025
Published online: 05 March 2025

Keywords:
Forest,
Mobile laser scanner,
Point cloud,
Total height,
Trunk height.

ABSTRACT

Measuring and estimating the structural attributes of trees is a fundamental component of forest management and essential for most research in forest sciences. Nowadays, laser scanners (terrestrial and mobile) enable continuous scanning of forested areas, generating point clouds to estimate tree structural attributes. This study evaluated the ability of the GeoSLAM ZEB-REVO handheld mobile laser scanner to estimate tree structural attributes, specifically total height and trunk height. The research was conducted in Karaj Botanical Garden, covering 7.2 hectares with uneven-aged, multi-layered tree stands. Two approaches, i.e. manual and automatic, were applied to the processed point clouds to estimate total and trunk height. For validation, these attributes were measured in the field using a laser range finder. The results showed that the manual and automatic methods estimated total height with RMSE values of 3.17 and 3.21 meters and rRMSE values of 25.48% and 25.80%, respectively. Trunk height estimation yielded RMSE and rRMSE values of 0.47 and 2.56 meters and 12.66% and 69.67% for the manual and automatic methods, respectively. Based on our results, GeoSLAM's ability to estimate total height is weak, while trunk height can be estimated with high accuracy.

Cite this article: Naghibi Rad, S.A., Darvishsefat, A.A., Fatehi, P., Namiranian, M., Saadat Seresht, M., Boroumand, M. (2025). Assessing the performance of a handheld mobile laser scanner to estimate tree height. *Journal of Forest and Wood Products*, 77 (4), 391-405. DOI: http//doi.org/10.22059/jfwp.2025.380870.1308

© The Author(s) **Publisher:** University of Tehran Press.
DOI: http//doi.org/10.22059/jfwp.2025.380870.1308

دانشگاه تهران

نشریهٔ جنگل و فرآورده‌های چوب

سایت نشریه: https://jfwp.ut.ac.ir

شاپا الکترونیکی: ۰۵۳۰-۲۳۸۳

ارزیابی قابلیت لیزر اسکنر دستی متحرک در برآورد مشخصه‌های ارتفاع کل و ارتفاع تنهٔ درختان در توده‌های درختی

سید علی نقیبی راد[۱] | علی‌اصغر درویش‌صفت[۲] | پرویز فاتحی[۳*] | منوچهر نمیرانیان[۴] | محمد سعادت سرشت[۵] | مهدی برومند[۶]

۱. گروه جنگلداری و اقتصاد جنگل، دانشکدهٔ منابع طبیعی، دانشگاه تهران، کرج، ایران. رایانامه: alirad_naghibi@ut.ac.ir

۲. گروه جنگلداری و اقتصاد جنگل، دانشکدهٔ منابع طبیعی، دانشگاه تهران، کرج، ایران. رایانامه: adarvish@ut.ac.ir

۳. نویسنده مسئول، گروه جنگلداری و اقتصاد جنگل، دانشکدهٔ منابع طبیعی، دانشگاه تهران، کرج، ایران. رایانامه: parviz.fatehi@ut.ac.ir

۴. گروه جنگلداری و اقتصاد جنگل، دانشکدهٔ منابع طبیعی، دانشگاه تهران، کرج، ایران. رایانامه: mnamiri@ut.ac.ir

۵. گروه فتوگرامتری و سنجش‌ازدور، دانشکدهٔ مهندسی نقشه‌برداری و اطلاعات مکانی، دانشگاه تهران، تهران، ایران. رایانامه: msaadat@ut.ac.ir

۶. شرکت نماپرداز رایانه، تهران، ایران. رایانامه: mehdi.boroumand68@gmail.com

اطلاعات مقاله

نوع مقاله:
پژوهشی

تاریخ‌های مقاله:
تاریخ دریافت: ۱۴۰۳/۰۵/۲۴
تاریخ بازنگری: ۱۴۰۳/۰۸/۰۵
تاریخ پذیرش: ۱۴۰۳/۱۰/۱۶
تاریخ انتشار: ۱۴۰۳/۱۲/۱۵

کلیدواژه:
ابر نقطه،
ارتفاع تنه،
ارتفاع کل،
جنگل،
لیزر اسکنر دستی متحرک.

چکیده

اندازه‌گیری و برآورد مشخصه‌های ساختاری درختان همواره جزء اصلی و ضروری برای مدیریت و اطلاعات اولیه برای اغلب پژوهش‌ها در علوم جنگل است. امروزه می‌توان با استفاده از لیزر اسکنرها عرصه‌های جنگلی، درختان و عوارض موجود را به‌صورت پیوسته اسکن نمود و ابر نقاط حاصل را برای برآورد مشخصه‌های ساختاری درختان مورد استفاده قرار داد. در این پژوهش، قابلیت لیزر اسکنر دستی متحرک ژئواسلم ZEB-REVO در برآورد مشخصهٔ ارتفاع کل و ارتفاع تنهٔ درختان مورد ارزیابی قرار گرفته است. این پژوهش در باغ گیاه‌شناسی کرج به مساحت ۷/۲ هکتار با توده‌های درختی با ساختار ناهمسال و چند اشکوبه انجام شده است. مشخصه‌های ارتفاع کل و تنهٔ درختان با دو روش دستی و خودکار در ابر نقاط پردازش و آماده شده، برآورد شد. به‌منظور ارزیابی برآوردها، مشخصه‌های ذکر شده با استفاده از دستگاه فاصله‌یاب لیزری در عرصه اندازه‌گیری شد. نتایج آماره‌های ریشهٔ میانگین مربعات خطا (RMSE) و ریشهٔ میانگین مربعات خطا نسبی (rRMSE)، در برآورد ارتفاع کل به روش دستی به‌ترتیب ۳/۱۷ متر و ۲۵/۴۸ درصد و در روش خودکار، ۳/۲۱ متر و ۲۵/۸۰ درصد بود. در ارزیابی نتایج، مشخصهٔ ارتفاع تنه نیز با دو روش دستی و خودکار، مقدار آماره‌های RMSE و rRMSE به‌ترتیب ۰/۴۷ و ۲/۵۶ متر و ۱۲/۶۶ و ۶۹/۶۷ درصد به‌دست آمد. براساس آماره‌های ارزیابی، قابلیت این دستگاه برای برآورد ارتفاع کل و تنه را می‌توان به‌ترتیب نامناسب و مناسب بیان کرد.

استناد: نقیبی راد؛ سید علی، درویش‌صفت؛ علی‌اصغر، فاتحی؛ پرویز، نمیرانیان؛ منوچهر، سعادت سرشت؛ محمد، برومند؛ مهدی (۱۴۰۳). ارزیابی قابلیت لیزر اسکنر دستی متحرک در برآورد مشخصه‌های ارتفاع کل و ارتفاع تنهٔ درختان در توده‌های درختی. *نشریهٔ جنگل و فرآورده‌های چوب*، ۷۷ (۴)، ۴۰۵-۳۹۱.
DOI: https://doi.org/10.22059/jfwp.2025.380870.1308

© نویسندگان.
ناشر: مؤسسه انتشارات دانشگاه تهران.
https://doi.org/10.22059/jfwp.2025.380870.1308

۱. مقدمه

مدیریت عرصه‌های جنگلی نیاز به آگاهی از شرایط و ویژگی درختان موجود و سطح عرصه دارد. اطلاع از مشخصه‌های ساختاری درختان برای مدیریت عرصه‌های جنگلی و درختی ضروری است. بسیاری از مشخصه‌های ساختاری اولیهٔ درختان نظیر ارتفاع و قطر برابرسینه علاوه بر اهمیت اولیهٔ خود که سبب آگاهی از میزان رشد و شرایط رویشگاه می‌شوند سبب دستیابی به مشخصه‌های ساختاری ثانویه همچون حجم، زی‌تودهٔ روی زمین درختی خواهد شد که در گذشته به‌طور معمول از طریق مدل‌سازی براساس قطر و ارتفاع و تهیهٔ جداول حجم امکان‌پذیر بوده است و بنابراین دستیابی و دسترسی به مشخصه‌های ساختاری درختان امری با اهمیت است [۱].

اندازه‌گیری زمینی مشخصه‌های کمی درختان از جمله ارتفاع، معمولاً با وسایلی انجام می‌گیرد که دارای محدودیت‌هایی چون سختی پیمایش در عرصه است و نیاز به دقت فراوان در انتخاب محل قرارگیری و اندازه‌گیری دارد [۲]. با پیشرفت تکنولوژی استفاده از ابزارهای نوین اندازه‌گیری چون مسافت‌سنج‌های لیزری، دقت و سرعت اندازه‌گیری مشخصهٔ ارتفاع درختان افزایش یافته است [۳]. نکتهٔ مشترک اندازه‌گیری در اکثر ابزارهای اندازه‌گیری مشخصهٔ ارتفاع درختان، اندازه‌گیری هر درخت به‌صورت منفرد است. با پیشرفت‌های چشمگیر تکنولوژی و استفاده از لیزر اسکنرهای زمینی[1] می‌توان در تودهٔ درختی و جنگلی به‌صورت همزمان تمامی درختان را اسکن نمود و نتایج را در قالب ابر نقطه[2] و سه‌بعدی مشاهده و با پردازش‌هایی، مشخصه‌های ساختاری درختان از جمله ارتفاع کل و ارتفاع تنهٔ درختان را برآورد نمود [۴].

لیزر اسکنر یک سامانهٔ سنجش‌ازدور فعال است که فاصلهٔ پدیده‌ها از سنجنده را با ارسال امواج لیزر و محاسبهٔ زمان رفت‌وبرگشت آن به‌دست می‌آورد [۵]، این سامانهٔ سنجش از دوری می‌تواند نقاط بازگشتی را به شکل ابر نقطه دارای مختصات ثبت نماید. داده‌های حاصل از لیزر اسکنر با امکان برداشت اطلاعات از تمام جهت‌ها [۶] واقعیتی سه‌بعدی در قالب ابر نقطه فراهم می‌کند که باعث توجه روزافزون به این فن به‌عنوان یک ابزار کاربردی در پژوهش‌های مربوط به ساختار تودهٔ جنگلی شده است [۷ ، ۸]. لیزر اسکنرها در انواع زمینی، هوایی و فضایی هستند و تفاوت اصلی آنها در ارتفاع سکو، نحوهٔ برداشت اطلاعات و تراکم نقاط و زاویهٔ برداشت است که می‌تواند برای کاربردهای گوناگونی در سطح تک‌درخت و تودهٔ جنگلی استفاده گردد [۹]. استفاده از لیزر اسکنرها در جنگل با فناوری لیزر اسکنر هوایی اجرایی شد. در این روش، پالس‌های لیزر به شکلی عمودی سطح جنگل و زمین را اسکن می‌کند. از دههٔ ۱۹۸۰، زمینهٔ استفاده از لیزر اسکنرها برای اندازه‌گیری در علوم جنگل فراهم شده است [۱۰] و با پیشرفت‌های سخت‌افزاری و نرم‌افزاری کاربردهای آن در علوم جنگل رو به گسترش است. در لیزر اسکنرهای زمینی ثابت محدودهٔ جنگلی و درختان از پایین (افقی) اسکن می‌شود. وجود مشکلاتی چون زمان زیاد استقرار آن و همچنین وجود نقاط غیرقابل‌برداشت در پشت عوارض موجود، سبب شده تا راه‌حل نوینی برای اسکن زمینی مورد توجه قرار گیرد و آن استفاده از لیزر اسکنرهای دستی متحرک[3] بوده است. در این لیزر اسکنرها، با توجه به وزن کم و همچنین سرعت بالای برداشت می‌توان محدوده‌ای وسیع را در زمانی کم و در تمامی جهات اسکن نمود. ویژگی‌هایی چون سرعت بالای برداشت، عدم نیاز به استقرار در ایستگاهی مشخص، وجود و استفاده از الگوریتم‌های اسلم[4] که سبب ترکیب داده‌های لیزر اسکنر دوبعدی با داده‌های حاصل از واحد اندازه‌گیری اینرسی[5] برای تولید ابرهای نقاط سه‌بعدی می‌شود [۱۱]، سبب کارایی بالای لیزر اسکنرهای دستی متحرک شده است. در این راستا، پژوهش‌های انجام شده با لیزر اسکنر زمینی ثابت و دستی متحرک برای برآورد مشخصهٔ ارتفاع کل و ارتفاع تنهٔ درختان در جدول ۱ ارائه شده است.

با جستجو در پژوهش‌های داخل کشور، تنها یک پژوهش در زمینهٔ استفاده از فناوری لیزر اسکنر زمینی ثابت در برآورد مشخصهٔ ارتفاع درختان یافت شد و در زمینهٔ استفاده از لیزر اسکنر دستی متحرک در این زمینه هیچ پژوهشی مشاهده نشد. در مرور پژوهش‌های خارج از کشور نیز در اغلب موارد از لیزر اسکنرهای زمینی ثابت استفاده شده است چراکه مدت زمان بیشتری

[1] Terrestrial Laser Scanners (TLS)
[2] Point Cloud
[3] Handheld Mobile Laser Scanners (HLS)
[4] Simultaneous Localization And Mapping (SLAM)
[5] Inertial Measurement Unit (IMU)

در دسترس محققان بوده است. در داخل کشور نیز به‌علت هزینه‌های بسیار زیاد، تعداد محدودی از این دستگاه‌ها موجود است. مطابق آنچه بیان شد تاکنون پژوهشی در کشور در زمینهٔ برآورد مشخصهٔ ارتفاع کل و ارتفاع تنهٔ درختان از داده‌های لیزر اسکنر دستی متحرک انجام نشده و همچنین در خارج از کشور نیز پژوهش‌های بسیار اندکی در این زمینه انجام شده است؛ از این‌رو هدف از این تحقیق ارزیابی قابلیت لیزر اسکنر دستی متحرک در برآورد مشخصهٔ ارتفاع کل و ارتفاع تنهٔ درختان در توده‌های درختی است.

جدول ۱. مرور پژوهش‌های انجام شده در زمینه استفاده از لیزر اسکنرهای زمینی و دستی متحرک برای ارزیابی قابلیت برآورد ارتفاع درختان

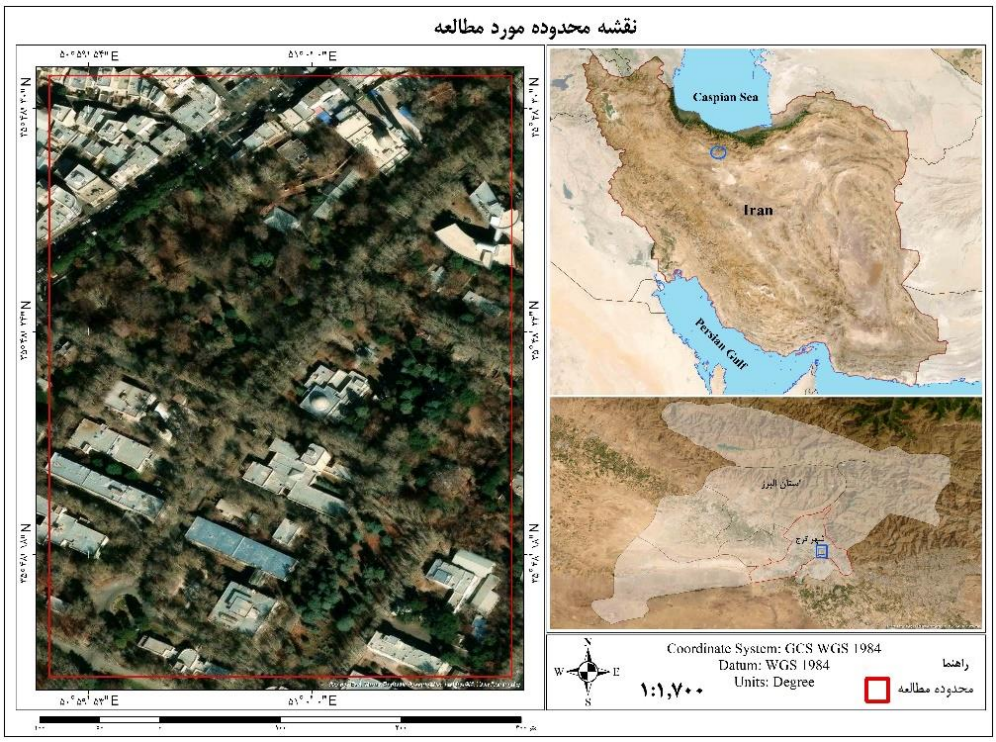
نویسنده	هدف و محدوده مطالعه	لیزر اسکنر	دستگاه اندازه‌گیری ارتفاع	برآورد ارتفاع	نتایج ارزیابی	نوع تودهٔ درختی
[۱۲]	با هدف مدل‌سازی پیش‌بینی هزینه‌های ساخت یک کیلومتر جادهٔ جنگلی و برآورد هزینه‌های مربوط به قطع و حمل درختان در استان گیلان اقدام به اسکن عرصه با لیزر اسکنر زمینی نمودند.	RIEGL LMS-Z420i	شیب‌سنج سنتو	روش دستی و در نرم‌افزار Cloud Compare و LAStools	R^2[1] ۰/۹۶ و RMSE[2] ۳/۳۷ متر	پهن‌برگ
[۱۳]	برای ارزیابی قابلیت لیزر اسکنر زمینی ثابت در برآورد مشخصه‌های درختان از جمله ارتفاع کل، پژوهشی را در ۱۶ قطعه‌نمونهٔ دایره‌ای با شعاع ۲۰ متر در جنوب غربی سوئد انجام دادند.	Leica ScanStation C10	ارتفاع سنج کلاسیک (نظیر شیب سنج سنتو)	روش خودکار در نرم افزار MATLAB	RMSE ۴/۳ متر و بایاس منفی ۰/۱ متر	سوزنی و پهن‌برگ
[۱۴]	عملکرد لیزر اسکنر زمینی ثابت در برآورد ارتفاع کل درختان در یک محدودهٔ جنگلی در کشور یونان را مورد بررسی قرار دادند. این بررسی در ۶ پلات و با وسعتی حدود ۹۵۴۰ مترمربع صورت گرفت.	Faro Focus 3D × 330	–	روش دستی در نرم افزار Cloud Compare	میانگین R^2 ۰/۸۶ و RMSE ۱/۰۶ متر	سوزنی‌برگ
[۱۵]	اقدام به برآورد مشخصهٔ ارتفاع درختان با استفاده از لیزر اسکنر زمینی ثابت نمودند. محدودهٔ مطالعه شامل ۳۹ پلات در استان یونان چین بود.	Leica P40	Trueyard laser rangefinder SP1500H	روش خودکار –	RMSE ۱/۴ متر	سوزنی و پهن‌برگ
[۱۶]	قابلیت لیزر اسکنر زمینی ثابت و لیزر اسکنر دستی متحرک را برای برآورد ارتفاع درختان مورد بررسی قرار دادند. این پژوهش در محدودهٔ جنگل شهری با مساحت ۱ هکتار و با ۱۹۵ درخت و جنگلی در محدودهٔ روستایی با مساحت ۰/۵ هکتار و ۷۶ درخت در اسپانیا انجام شد.	ZEB-REVO و FARO Focus3D	ارتفاع حاصل از لیزر اسکنر زمینی	روش خودکار –	RMSE لیزر اسکنر زمینی و دستی در دو محدوده به‌ترتیب برابر با ۱/۳۴ و ۹/۴۴۰ متر	سوزنی‌برگ
[۷]	به‌منظور برآورد مشخصهٔ ارتفاع کل با استفاده از لیزر اسکنر زمینی ثابت در محدوده‌ای به مساحت ۹۵۰۰ مترمربع و دارای ۳۷ اصله درخت در محوطهٔ دانشگاه استانبول اقدام نمودند.	Z+F IMAGER 5010C	Haglöf Vertex IV	روش خودکار در نرم‌افزار 3D Forest	R^2 ۰/۹۸ و RMSE ۰/۷۲ متر	سوزنی و پهن‌برگ
[۱۷]	عملکرد لیزر اسکنر دستی متحرک در برآورد مشخصه‌های ارتفاع کل و ارتفاع تنهٔ درختان در جنوب توسکانی در ایتالیا را با فواصل مختلف ۱۰ و ۱۵ متر مورد ارزیابی قرار دادند.	ZEB1	ارتفاع سنج کلاسیک	روش خودکار در نرم‌افزار Computree	ارتفاع کل: R^2 بالاتر از ۰/۹۴ و rRMSE[3] کمتر از ۸ درصد. ارتفاع تنه: R^2 بالاتر از ۰/۸۷ و rRMSE کمتر از ۱۸ درصد	پهن‌برگ
[۱۸]	با استفاده از لیزر اسکنر دستی متحرک در ۶ قطعه‌نمونهٔ دایره‌ای به شعاع ۲۰ متر از جنگل‌های اتریش مشخصه‌های ساختاری درختان را مورد بررسی قرار دادند.	ZEB-Horizon	Haglöf Vertex IV	روش خودکار در نرم‌افزار R	RMSE و rRMSE برای ارتفاع کل ۲/۶ متر و ۱۰/۹۶ درصد، و ارتفاع تنه ۲/۵۷ متر و ۲۲/۱ درصد	سوزنی و پهن‌برگ

[1] R squared (R^2)
[2] Root Mean Square Error (RMSE)
[3] Relative Root Mean Square Error

۲. روش‌شناسی پژوهش

۲-۱. محدودهٔ مطالعه

این پژوهش در باغ گیاه‌شناسی دانشکدگان کشاورزی و منابع طبیعی دانشگاه تهران در شهر کرج (شکل ۱) با متوسط ارتفاع از سطح دریا ۱۳۴۱ متر انجام شد. این باغ با قدمتی بیش از ۱۲۰ سال به‌لحاظ گونه‌های درختی دارای توده‌های آمیخته و متنوع سوزنی‌برگ و پهن‌برگ با ساختاری ناهمسال و چنداشکوبه بوده که محیطی همچون یک جنگل طبیعی را فراهم کرده است. وجود درختان کهن سال، زیر اشکوب علفی و زادآوری فراوان در فصل رویش، از دیگر موارد شباهت‌های این عرصه به یک جنگل طبیعی است. در شکل ۲ چند تصویر از محدودهٔ مطالعه ارائه شده است.



شکل ۱. نقشهٔ محدودهٔ مورد مطالعه، دانشکدگان کشاورزی و منابع طبیعی دانشگاه تهران در شهر کرج

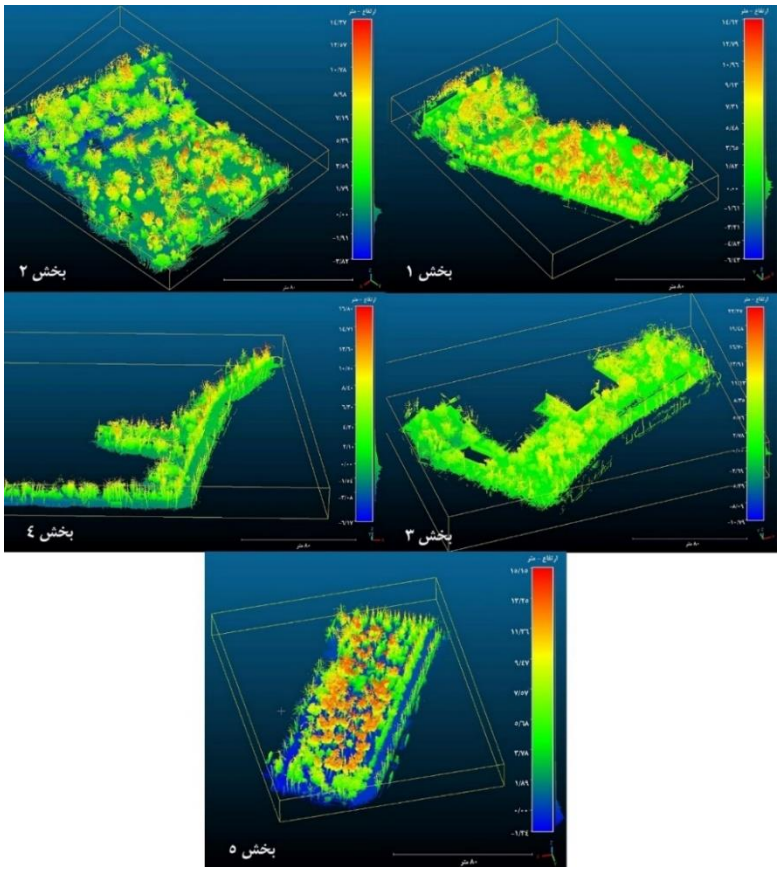
شکل ۲. تصاویر تهیه شده از محدودهٔ مطالعه شامل پوشش درختی ناهمسال سوزنی‌برگ و پهن‌برگ به‌همراه زیراشکوب متراکم

۲-۲. برداشت زمینی

دستگاه لیزر اسکنر دستی متحرک مورد استفاده در این پژوهش، GeoSLAM ZEB-REVO بوده که زاویه دید کلی[1] ۲۷۰ ×۳۶۰ درجه، فاصلهٔ مؤثر برداشت ۳۰ متر، برداشت ۴۳ هزار نقطه در ثانیه و دارای دقت یک تا سه سانتی‌متری است [۱۹ ، ۲۰] ابرنقاط برداشت شده توسط این دستگاه دارای پارامترهای XYZ است و پارامترهای دیگر از جمله مختصات استاندارد، شدت[2] و رنگ را ندارد. با توجه به‌وجود ساختار ناهمسال و آمیخته، زادآوری و زیر اشکوب متراکم و همچنین محدودیت در ثبت اطلاعات، این برداشت در پنج زیربخش و در زمستان سال ۱۳۹۸ صورت گرفت تا بتوان از حداکثر قابلیت و توان لیزر اسکنر بهره گرفت. اطلاعات مربوط به تعداد نقاط برداشت شده و مساحت هر بخش در جدول ۲ ارائه شده است. نمایی از داده‌های برداشتی با لیزر اسکنر و تصویر دستگاه لیزر اسکنر دستی متحرک مورد استفاده به‌ترتیب در شکل‌های ۳ و ۴ ارائه شده است.

جدول ۲. اطلاعات تعداد نقاط برداشت‌شده در محدودهٔ مورد مطالعه به تفکیک هر بخش

بخش	مجموع نقاط	مساحت (هکتار)
۱	۲۶۴۸۹۸۶۲	۱/۲۱
۲	۲۳۵۰۶۸۱۶	۱/۸۰
۳	۲۳۲۳۱۹۹۶	۱/۵۷
۴	۱۳۸۱۲۵۱۱	۱/۵۷
۵	۳۰۶۰۴۷۸۸	۱/۰۶
مجموع	۱۱۷۶۴۵۹۷۳	۷/۲۰



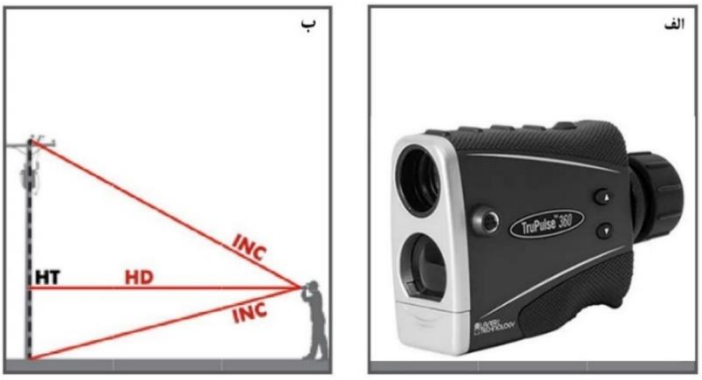
شکل ۳. نمای سه بعدی ابر نقاط حاصل از لیزر اسکنر در بخش‌های مورد مطالعه

[1]Field of View (FOV)
[2]Intensity

شکل ٤. لیزر اسکنر دستی متحرک GeoSLAM-ZebRevo (https://geoslam.com)

۲–۳. تهیهٔ داده‌های مرجع

برای ارزیابی نتایج حاصل از برآورد مشخصه‌ها، مقایسهٔ آنها با داده‌های مرجع دقیق امری ضروری و اجتناب‌ناپذیر است. به‌منظور تهیهٔ داده‌های مرجع در این پژوهش اندازه‌گیری‌های زمینی ارتفاع کل و تنهٔ تمامی درختان در بخش‌های ۱ تا ۳ با استفاده از دستگاه فاصله‌یاب لیزری[1] با نام تجاری TruPulse® 360°B از اسفندماه سال ۱۳۹۹ تا مردادماه سال ۱۴۰۰ انجام شد. نمایی از این دستگاه و شیوهٔ اندازه‌گیری ارتفاع با آن در شکل ۵ ارائه شده است. در شکل (۵ ب) HT ارتفاع کل درخت، HD فاصلهٔ افقی کاربر تا درخت و INC مقدار شیب است. این دستگاه با اندازه‌گیری دو مؤلفهٔ فاصلهٔ افقی کاربر تا درخت و درصد شیب زاویهٔ نوک و بن درخت، ارتفاع درخت را محاسبه می‌نماید.



شکل ۵. دستگاه فاصله‌یاب لیزری TruPulse® 360°B (الف) و نحوه اندازه‌گیری ارتفاع درخت (ب) (https://lasertech.com)

۲–۴. آماده‌سازی داده‌های ابر نقطهٔ لیزر اسکنر برای برآورد مشخصهٔ درختان

استفاده از داده‌های لیزر اسکنر در مرحلهٔ برآورد مشخصه‌های درختان نیازمند پیش‌پردازش و آماده‌سازی‌های اولیه است. ابتدا ابر نقاط خام برداشت شده در عرصه، مورد پیش‌پردازش‌هایی چون بررسی نویز و هم مرجع‌سازی قرار گرفت و سپس با استفاده از الگوریتم‌های مختلفی از جمله الگوریتم Octree-Based Segmentation (OBS) اقدام به جداسازی ابر نقاط زمینی و غیر زمینی شد و سپس در ابر نقاط غیر زمینی، ابرهای نقاط درختان جداسازی گردید. این فرآیند [۲۱] بر روی ابر نقاط خام در ۵ بخش با مجموع ۱۱۸ میلیون نقطه انجام شد و ابرهای نقاط درختی نهایی برای برآورد مشخصه‌های ساختاری درختان استفاده شد.

۲–۵. برآورد مشخصه‌های ارتفاع کل و ارتفاع تنهٔ درختان

منظور از ارتفاع کل فاصلهٔ عمودی بالاترین نقطهٔ تاج درخت تا پایین‌ترین نقطه از تنهٔ درخت و ارتفاع تنه نیز فاصلهٔ عمودی پایین‌ترین نقطه از تنهٔ درخت تا ارتفاعی از تنه است که از آنجا تاج درخت شروع می‌شود [۲۲]. این مشخصه‌ها به دو روش دستی

[1] Laser Rangefinder

و خودکار از ابر نقاط درختی برآورد شد. در روش دستی، این مشخصه‌ها به‌صورت دستی بر روی صفحهٔ نمایش و به‌کمک نرم‌افزار Cloud Compare (ver.2.12.4) اندازه گرفته شد، درحالی‌که در روش دوم به شیوهٔ خودکار توسط نرم‌افزار محاسبه شد. در روش خودکار، برای‌آنکه نرم‌افزار درخت مورد نظر و پایین‌ترین نقطه مربوط به آن را شناسایی نماید نیاز به استفاده از ابر نقطهٔ زمینی مربوط به آن درخت دارد. در خصوص فرآیند جداسازی می‌توان به منابع مراجعه نمود [۲۱].

۲-۶. ارزیابی صحت برآورد مشخصه‌های ارتفاع کل و ارتفاع تنه

آماره‌های گوناگونی با ویژگی‌های خاص برای ارزیابی کارایی و صحت‌سنجی نتایج وجود دارد. استفاده از یک آماره به‌تنهایی ممکن است سبب خطای تصمیم‌گیری شود [۲۳] در مقابل، استفاده از چند آماره، دید کامل‌تری دربارهٔ کارایی الگوریتم‌ها و مقایسهٔ آنها ارائه می‌دهد و به ارزیابی دقیق‌تر نتایج کمک می‌کند [۲۴، ۲۵]. از این‌رو در این تحقیق، آماره‌هایی چون ریشهٔ میانگین مربعات خطا (RMSE)، ریشهٔ میانگین مربعات خطا نسبی (rRMSE)، میانگین قدرمطلق خطا (MAE)[1]، میانگین مجذور خطا (MSE)[2]، میانگین درصد مطلق خطا (MAPE)[3]، ضریب تعیین (R^2)، ضریب تعیین تعدیل‌شده (R_a^2)، باياس (Bias) و باياس نسبی (rBias) محاسبه و مورد بررسی قرار گرفت. نحوهٔ محاسبهٔ آماره‌های بیان شده در رابطه‌های ۱ تا ۹ ارائه شده است. در تمامی رابطه‌های زیر X_i مشخصهٔ برآوردشده، Y_i مشخصه زمینی مرجع، $\bar{Y}$ میانگین مشخصهٔ مرجع، n تعداد درخت و k تعداد مشخصه‌های مورد استفاده در مدل می‌باشد.

رابطهٔ ۱) $MAE = \frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n}|Y_i - X_i|$

رابطهٔ ۲) $MAPE = \frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n}\left|\frac{Y_i - X_i}{Y_i}\right| \times 100$

رابطهٔ ۳) $MSE = \frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n}(Y_i - X_i)^2$

رابطهٔ ۴) $RMSE = \sqrt{\frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n}(Y_i - X_i)^2}$

رابطهٔ ۵) $rRMSE = \frac{RMSE}{\bar{Y}} \times 100$

رابطهٔ ۶) $BIAS = \frac{\sum_{i=1}^{n}(Y_i - X_i)}{n}$

رابطهٔ ۷) $rBIAS = \frac{BIAS}{\bar{Y}} \times 100$

رابطهٔ ۸) $R^2 = 1 - \frac{\sum_{i=1}^{n}(Y_i - X_i)^2}{\sum_{i=1}^{n}(Y_i - \bar{Y})^2}$

رابطهٔ ۹) $R_a^2 = R^2 - \left(\frac{k \times (1 - R^2)}{n - k - 1}\right)$

روندنمای اجرای تحقیق را می‌توان در شکل ۶ مشاهده نمود.

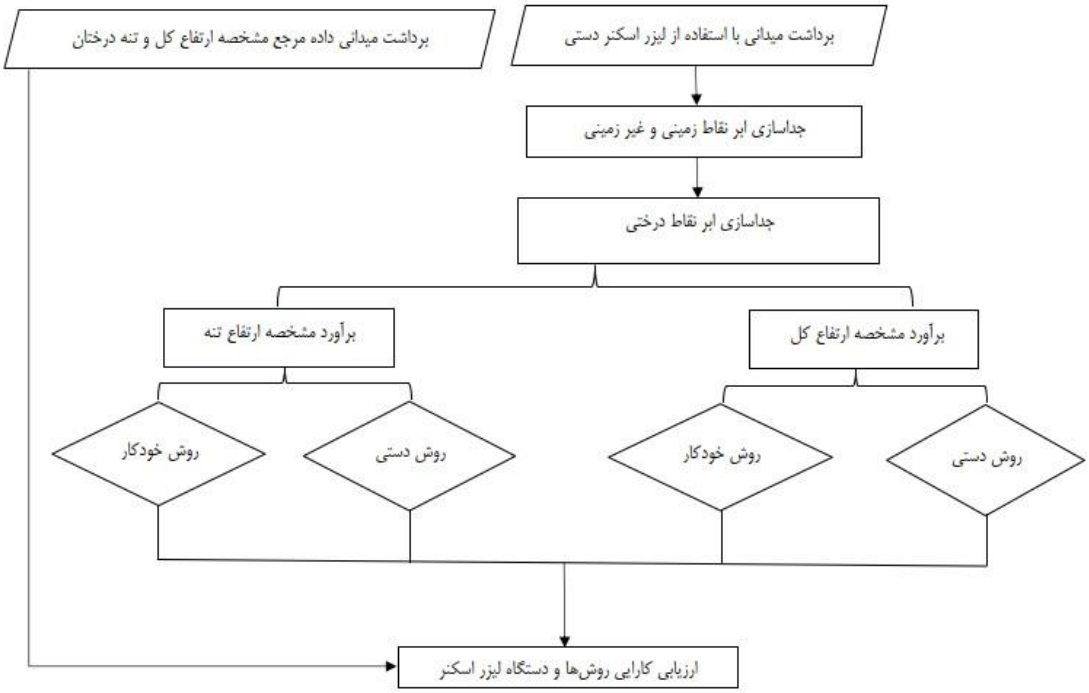
۳. یافته‌های پژوهش

شکل ۷ نمایشی از ابر نقاط خام و درختان جداسازی شده در ابر نقاط یکی از بخش‌های محدودهٔ مطالعه می‌باشد.

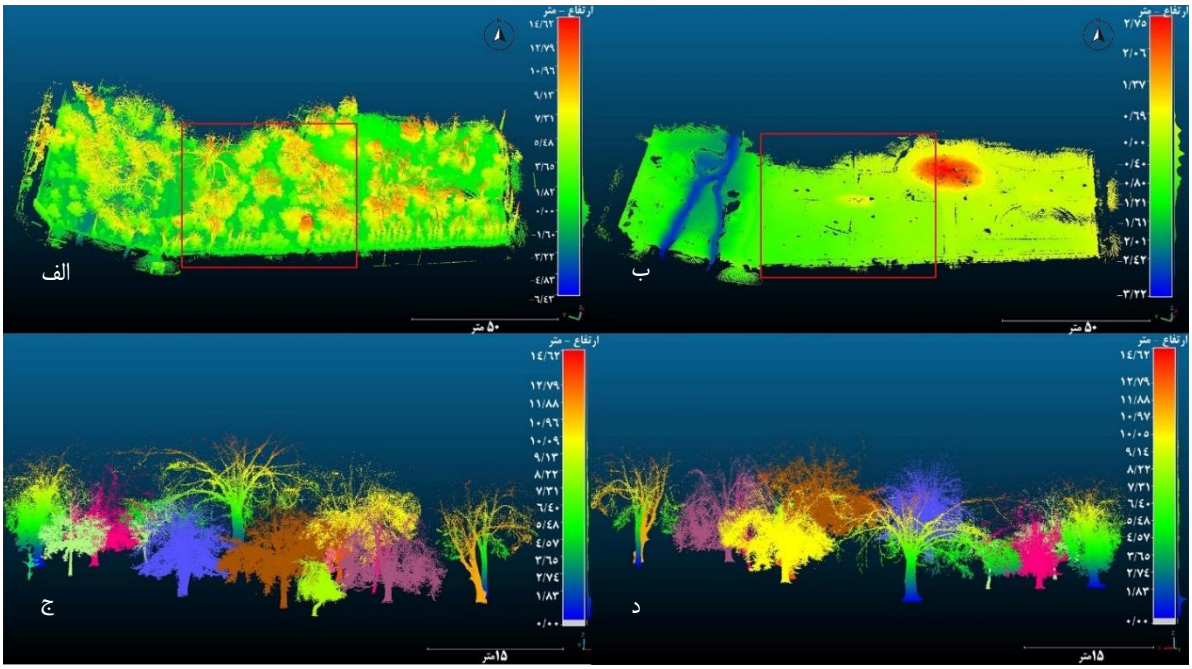
بررسی ابر نقاط نشان داد در ارتفاع بیشتر از ۲۰ متر هیچ نقطه‌ای از تاج درختان ثبت نشده و در عمل لیزر اسکنر توانایی ثبت نقاط بیش از این ارتفاع را نداشته است، از این‌رو درختان با ارتفاع بیش از مقدار مذکور از تجزیه و تحلیل‌ها حذف شدند. در جدول ۳ آماره‌های توصیفی مشخصهٔ ارتفاع کل و ارتفاع تنهٔ درختان حاصل از روش‌های اندازه‌گیری و برآوردی نشان داده شده است. در شکل ۸ و جدول ۴ نتایج مقایسهٔ مقادیر برآورد شده ارتفاع کل با روش‌های دستی و خودکار با مقادیر مرجع آمده است.

[1]Mean Absolute Error
[2]Mean Square Error
[3]Mean Absolute Percentage Error

براساس شکل ۸ و جدول ۴ می‌توان دریافت که در عمل برآورد مشخصهٔ ارتفاع کل درختان در دو روش دستی و خودکار تفـاوتی ندارد. در شکل ۹ و جدول ۵ نتایج مقایسهٔ مقادیر برآورد شده ارتفاع کل با روش‌های دستی و خودکار با مقادیر مرجع آمده است.



شکل ٦. روندنمای پژوهش (مراحل پژوهش از ابتدای برداشت داده‌های میدانی تا بخش پایانی ارزیابی برآورد نتایج ارتفاع درختان حاصل از لیزر اسکنر)

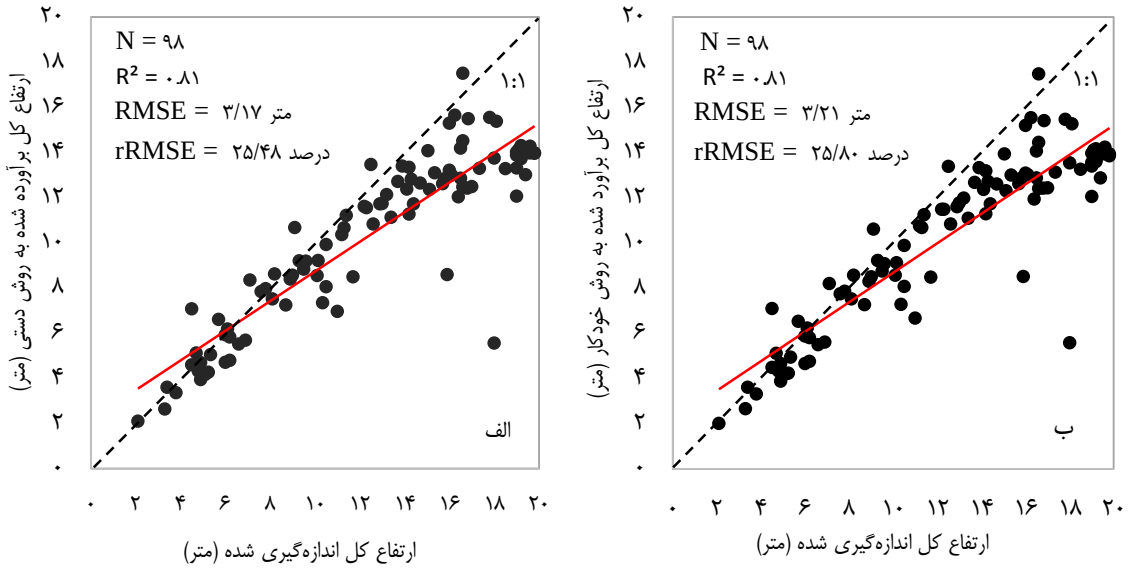


شکل ۷. جداسازی نقاط در ابر نقاط خام و تهیهٔ ابر نقاط تک درختان

(الف: ابر نقاط خام ب: ابر نقاط زمینی ج: ابر نقاط درختی از زاویهٔ دید افقی (جنوبی) ، د: ابر نقاط درختی از زاویهٔ دید افقی شمالی)

جدول ۳. آماره‌های توصیفی مشخصهٔ ارتفاع کل و ارتفاع تنهٔ اندازه‌گیری و برآورد شده

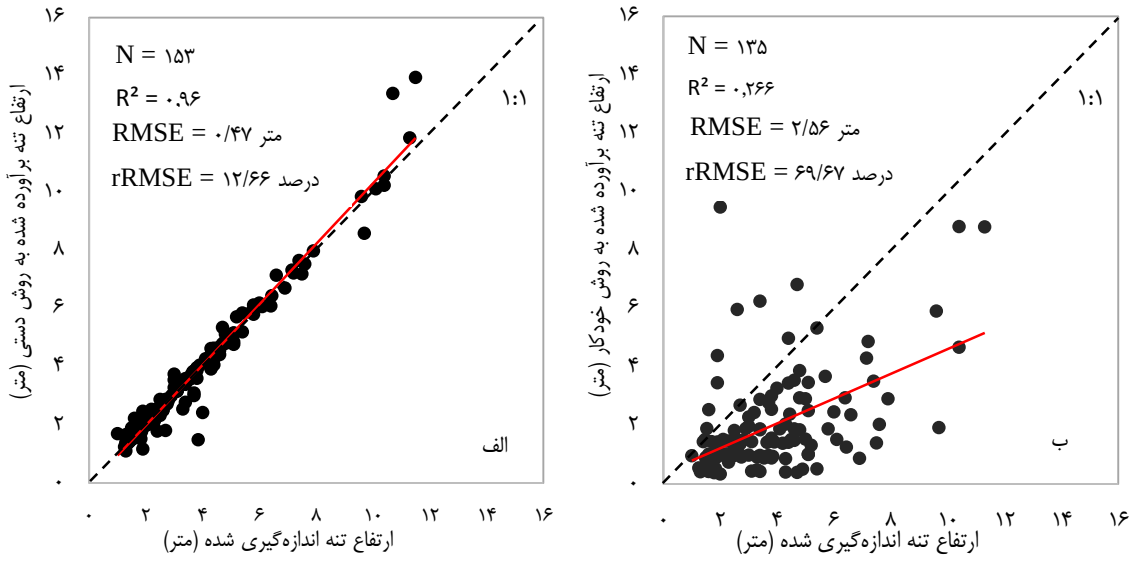
آماره توصیفی	ارتفاع کل (متر)			ارتفاع تنه (متر)		
	اندازه‌گیری شده	برآورد شده		اندازه‌گیری شده	برآورد شده	
		دستی	خودکار		دستی	خودکار
تعداد	۹۸	۹۸	۹۸	۱۵۳	۱۵۳	۱۳۵
کمترین مقدار	۲/۱۰	۲/۱۰	۲/۰۱	۱	۱/۱۰	۰/۳۴
بیشترین مقدار	۱۹/۸۰	۱۷/۵۰	۱۷/۴۸	۱۱/۵۰	۱۳/۹۵	۹/۴۸
میانه	۱۳/۱۰	۱۱/۵۸	۱۱/۵۰	۳/۱۰	۳/۰۱	۱/۴۳
میانگین	۱۲/۴۳	۱۰/۳۲	۱۰/۲۸	۳/۶۸	۳/۷۳	۱/۹۴
دامنه	۱۷/۷۰	۱۵/۴۰	۱۵/۴۷	۱۰/۵۰	۱۲/۸۵	۹/۱۴
انحراف معیار	۵/۱۰	۳/۷۲	۳/۷۰	۲/۲۶	۲/۳۹	۱/۷۱



شکل ۸. مقایسهٔ مقادیر اندازه‌گیری و برآوردی ارتفاع کل درختان به دو روش دستی (الف) و خودکار (ب)

جدول ٤. نتایج عملکرد روش‌های دستی و خودکار برآورد مشخصهٔ ارتفاع کل در مقایسه با مقادیر اندازه‌گیری با استفاده از آماره‌های ارزیابی

مشخصه	روش برآورد	آماره‌های ارزیابی								
		میانگین قدرمطلق خطا (متر)	میانگین مجذور خطا (متر)	میانگین درصد مطلق خطا (درصد)	ریشهٔ میانگین مربعات خطا (متر)	ریشهٔ میانگین مربعات خطا نسبی (درصد)	ضریب تعیین	ضریب تعیین تعدیل‌شده	بایاس (متر)	بایاس نسبی (درصد)
ارتفاع کل	دستی	۲/۳۰	۱۰/۰۳	۱۶/۵۰	۳/۱۷	۲۵/۴۸	۰/۸۱	۰/۸۱	۲/۱۰	۱۶/۹۳
	خودکار	۲/۳۴	۱۰/۲۸	۱۶/۷۷	۳/۲۱	۲۵/۸۰	۰/۸۱	۰/۸۱	۲/۱۵	۱۷/۳۲



شکل ۹. مقایسهٔ مقادیر اندازه‌گیری و برآوردی ارتفاع تنه به دو روش دستی (الف) و خودکار (ب)

جدول ۵. نتایج عملکرد روش‌های دستی و خودکار برآورد مشخصهٔ ارتفاع تنه در مقایسه با مقادیر اندازه‌گیری با استفاده از آماره‌های ارزیابی

روش برآورد	آماره‌های ارزیابی								
	میانگین قدرمطلق خطا (متر)	میانگین مجذور خطا (متر)	میانگین درصد مطلق خطا (درصد)	ریشهٔ میانگین مربعات خطا (متر)	ریشهٔ میانگین مربعات خطا نسبی (درصد)	ضریب تعیین	ضریب تعیین تعدیل‌شده	بایاس (متر)	بایاس نسبی (درصد)
دستی	۰/۲۴	۰/۲۲	۷/۴۱	۰/۴۷	۱۲/۶۶	۰/۹۶	۰/۹۶	−۰/۰۵	−۱/۴۴
خودکار	۲/۰۶	۶/۵۶	۵۶/۷۶	۲/۵۶	۶۹/۶۷	۰/۲۷	۰/۲۶	۱/۷۴	۴۷/۲۶

اختلاف تعداد درختانی که به روش خودکار ارتفاع تنه آنها برآورد شده‌اند، در مقایسه با روش دستی، به‌دلیل عدم امکان برآورد ارتفاع تنهٔ بعضی درختان در روش خودکار بوده است که ناشی از عدم وجود تعداد نقاط کافی و یا عدم شناسایی محدودهٔ تاج درختان در ابر نقاط است. براساس شکل ۹ و جدول ۵ می‌توان دریافت در برآورد مشخصهٔ ارتفاع تنهٔ درختان تنها روش برآورد دستی از قابلیت قابل قبولی برخوردار است و روش خودکار، کارایی مطلوبی ندارد.

۴. بحث

در روش دستی، برآورد ارتفاع با انتخاب آگاهانه نقاط توسط کاربر انجام می‌شود، درحالی‌که در روش خودکار، الگوریتم‌ها دارای پیش‌شرط‌ها و ملزوماتی برای اجرا هستند از جمله وجود ابر نقاط زمینی برای برآورد ارتفاع هر درخت، بنابراین می‌توان بیان نمود که نتایج حاصل از روش‌های دستی بیان‌کنندهٔ قابلیت دستگاه و نتایج حاصل از روش‌های خودکار، بیان‌کنندهٔ قابلیت الگوریتم‌ها در برآورد مشخصه‌ها هستند. برآورد مشخصهٔ ارتفاع کل درختان با استفاده از ابر نقاط لیزر اسکنر به دو روش دستی و خودکار با RMSE ۳/۱۷ و ۳/۲۱ متر و rRMSE ۲۵/۴۸ و ۲۵/۸۰ درصد به‌دست آمد. این مقادیر بیانگر ضعف دستگاه در برآورد دقیق ارتفاع کل درختان است. عدم کسب نتیجهٔ مطلوب، می‌تواند ناشی از دو عامل اساسی باشد: نخست، کاهش قابلیت و توان ثبت اطلاعات توسط دستگاه لیزر اسکنر با افزایش فاصله (حداکثر برد دستگاه ۳۰ متر) و دوم، انبوهی و تراکم توده‌های درختی و تاج پوشش در عرصه و همچنین میزان آمیختگی گونه‌های سوزنی و پهن‌برگ. در منطقهٔ مورد مطالعه، انبوهی بالا و درهم تنیدگی تاج درختان و همچنین حضور و آمیختگی درختان سوزنی و پهن‌برگ سبب محدودیت در رسیدن پالس‌های لیزر به

بخش‌های بالای تاج درختان و عدم ثبت اطلاعات دقیق از این بخش‌ها شده است. در این زمینه و هم‌راستا با نتایج این پژوهش، Olofsson و همکاران (۲۰۱۴) گزارش کردند که در جنگلی آمیخته از سوزنی‌برگان و پهن‌برگان، RMSE برابر با ۴/۹ متر و rRMSE برابر با ۲۰/۳ درصد بوده است [۱۳]. این نتایج نشان‌دهندهٔ تأثیر تراکم و انبوهی تاج پوشش بر صحت برآوردها می‌باشد. انبوهی و تراکم بالای تاج‌پوشش سبب کاهش عملکرد لیزر اسکنرهای زمینی در ثبت اطلاعات خواهد شد، آمیختگی توده‌های درختی نیز این کاهش عملکرد را تشدید خواهد نمود، اما تحقیقات نشان می‌دهد همزمان عوامل دیگری مانند افزایش تعداد و قرارگیری محل بهینهٔ اسکن می‌تواند تا حد زیادی سبب افزایش عملکرد و دستیابی به نتایج مطلوب در برداشت اطلاعات شود [۲۶]. در این رابطه می‌توان به نتایج پژوهش‌های Ghimire و همکاران (۲۰۱۷) در محدودهٔ جنگلی سوزنی‌برگ با RMSE ۱/۰۶ متر [۱۴]، Liu و همکاران (۲۰۱۸) در توده‌ای آمیخته با RMSE ۰/۹۵ متر [۱۵] و Yurtseven و همکاران (۲۰۱۹) نیز در توده‌ای آمیخته با RMSE ۰/۷۴ متر اشاره نمود [۷]. برپایهٔ پژوهش‌های ذکر شده، برآورد مشخصهٔ ارتفاع کل درختان با وجود و یا عدم وجود آمیختگی گونه‌های سوزنی و پهن‌برگ درختی نتایج مطلوبی را نشان داد. لازم به ذکر است در مطالعات فوق، از دستگاه لیزر اسکنر زمینی ثابت استفاده شده است و با توجه به نتایج حاصل می‌توان بیان داشت که این دستگاه‌ها به جهت قابلیت بالا در ثبت اطلاعات در فاصله‌هایی دورتر نسبت به لیزر اسکنرهای دستی متحرک و توان برداشت نقاط بیشتر در هر لحظه (ارسال ۲ میلیون نقطه در ثانیه)، یک ابزار دقیق و با قابلیت ثبت اطلاعات مطلوب است، اما استفاده از آن برای برداشت توده‌های جنگلی با صرف هزینه و زمان بیشتری همراه است. در پژوهش Cabo و همکاران (۲۰۱۸)، برآورد ارتفاع کل درختان در یک تودهٔ سوزنی‌برگ با استفاده از لیزر اسکنر زمینی ثابت و لیزر اسکنر دستی متحرک (Zeb-Revo) مورد مقایسه قرار گرفت [۱۶]. مقدار RMSE برای لیزر اسکنر زمینی ثابت و دستی متحرک به‌ترتیب ۱/۳۴ و ۹/۴۴ متر گزارش شد که اختلاف قابل توجهی را نشان می‌دهد. هم‌راستایی نتیجهٔ این پژوهش با تحقیق حاضر به‌دلیل استفاده از لیزر اسکنر دستی متحرک یکسان، نشان‌دهندهٔ قابلیت پایین دستگاه لیزر اسکنر دستی متحرک مورد استفاده در برآورد مشخصهٔ ارتفاع کل درختان است.

همان‌طور که در شکل ۸ نشان داده شد با افزایش ارتفاع درختان، برآوردها با میزان بیشتری از مقادیر مرجع فاصله گرفته‌اند. بررسی نمودار نشان می‌دهد که کم‌برآوردی از حدود ارتفاع ۱۰ متری آغاز شده و در ارتفاع‌های ۱۵ تا ۲۰ متری به بیشترین میزان خود می‌رسد. این امر نه به‌دلیل خطا در اندازه‌گیری و اسکن از عرصه، بلکه ناشی از عدم توانایی لیزر اسکنر (با توجه به برد حداکثر ۳۰ متری) در ثبت نقاط بالای تاج درختان بلند باشد. علاوه براین شرایط محیطی از جمله انبوهی تاج درختان و درهم‌تنیدگی آنها تاثیر قابل توجهی بر توانایی دستگاه در ثبت اطلاعات تاج درختان دارد. همان‌طور که در پژوهش Cabo و همکاران (۲۰۱۸) بیان شده است، در توده‌هایی که درختان بلندتری دارند، کم برآوردی بیشتری رخ می‌دهد [۱۶]. بنابراین می‌توان بیان نمود که با افزایش ارتفاع درختان، برآورد ارتفاع با لیزر اسکنر دستی متحرک به‌سمت کم‌برآوردی گرایش پیدا می‌کند. این مسئله، عمدتاً به محدودیت زاویهٔ اسکن و توان ارسال امواج لیزر توسط دستگاه مربوط می‌شود. در تحقیق حاضر عملاً در ارتفاع بیشتر از ۲۰ متر، نقطه‌ای از تاج درختان اسکن و ثبت نشده است. از این‌رو درختان بالای ۲۰ متر برای ارزیابی مشخصهٔ ارتفاع کل در نظر گرفته نشد. این امکان وجود دارد تا از ابزارهای جانبی همچون دسته‌های نگهدارندهٔ بلند و یا بالابرها برای افزایش برد ارتفاعی دستگاه بهره جست، اما استفاده از این ابزارهای جانبی در جنگل عملی نخواهد بود. براساس تحقیق Tockner و همکاران (۲۰۲۲)، نسل بعدی این دستگاه لیزر اسکنر با نام ZEB Horizon با قابلیت بسیار بالاتری ساخته شده (ارسال ۳۰۰ هزار نقطه در ثانیه و برد مفید ۱۰۰ متر) و قادر است مشخصهٔ ارتفاع کل را با روش برآورد خودکار در یک تودهٔ آمیختهٔ سوزنی و پهن‌برگ شامل ۱۳۴ درخت و متوسط ارتفاع ۲۳/۷ متر را با RMSE برابر با ۲/۶۰ متر و rRMSE برابر با ۱۰/۹۶ درصد برآورد کند [۱۸].

نتایج برآورد دستی مشخصهٔ ارتفاع تنه از ابر نقاط قابل‌قبول بود که به‌دلیل دقت عمل بیشتر کاربر در تعیین دستی نقاط در مقایسه با روش خودکار است. مقدار RMSE برابر با ۰/۴۷ متر و rRMSE برابر با ۱۲/۶۶ درصد در روش برآورد دستی نشان‌دهندهٔ قابلیت خوب دستگاه لیزر اسکنر مورد استفاده در برآورد مشخصهٔ ارتفاع تنه است. اما در مقابل، روش خودکار با RMSE ۲/۵۶ متر و rRMSE ۶۹/۶۷ درصد عملکرد قابل قبولی ندارد. نتایج روش خودکار با پژوهش Tockner و همکاران

(۲۰۲۲) هم‌راستا است که در آن مشخصهٔ ارتفاع تنهٔ درختان را با روش برآورد خودکار در یک تودهٔ آمیختهٔ درختی سوزنی و پهن‌برگ با مقدارهای RMSE و rRMSE به‌ترتیب ۵/۷۲ متر و ۴۹/۱۴ درصد برآورد کردند [۱۸]. در این پژوهش، مقادیر بالاتر آماره‌های گزارش شده برای ارتفاع تنه به نسبت مشخصهٔ ارتفاع کل نشان از مشکلات و پیچیدگی‌هایی است که روش‌های خودکار برای تشخیص ارتفاع تنه باید مورد توجه قراردهند و این فرآیند در عمل بسیار پیچیده‌تر از برآورد مشخصهٔ ارتفاع کل است. با توجه به‌وجود تاج درختان در اطراف تنه به‌ویژه در درختان با شاخه‌هایی آویزان، الگوریتم خودکار برآورد در فضای ابر نقطه، برای تشخیص ارتفاع تنه با مشکل مواجه است. تجربهٔ اجرای روش دستی نشان داد که ممکن است کاربر با صرف وقت با دقت مطلوبی توانایی جداسازی این مشخصه را به‌صورت دستی داشته باشد، در حالی که در روش خودکار وجود تاج در اطراف درخت بزرگ‌ترین عامل ایجاد خطا خواهد بود، البته این صرف وقت در سطوح وسیع منطقی و اجرایی نخواهد بود. Del Perugia و همکاران (۲۰۱۹) با لیزر اسکنر دستی متحرک ZEB1 که مدل قدیمی‌تر لیزر اسکنر ZEB-REVO می‌باشد، مشخصهٔ ارتفاع تنه را با استفاده از روش خودکار مقدار RMSE ۰/۴۹ متر و rRMSE ۱۸/۰۱ درصد برآورد نمودند [۱۷]. نتایج این پژوهش نشان داد اگر هدف برآورد دقیق ارتفاع تنهٔ درختان باشد و مسیر بهینهٔ اسکن برای این منظور انتخاب شود، به‌دلیل ثبت تعداد کافی نقاط در ابر نقطه از پایین تاج و تنهٔ درختان روش خودکار نیز می‌تواند عملکرد مطلوبی را نشان دهد. یکی از دلایل کاهش توان و ضعف لیزر اسکنرهای زمینی در اسکن و ثبت اطلاعات جنگل‌هایی با تراکم و آمیختگی بالا، عدم دریافت اطلاعات مکانی کافی از سامانه‌های موقعیت‌یابی جهانی است. در این میان استفاده از لیزر اسکنرهای دستی متحرک به‌دلیل بهره‌گیری از الگوریتم‌های SLAM و سامانه‌های اینرسی تا حدود زیادی نیاز به سامانه‌های موقعیت‌یابی جهانی را برطرف کرده است و همچنین سرعت اسکن را در محدوده‌های جنگلی در مقایسه با لیزر اسکنرهای زمینی ثابت افزایش داده است. همچنین دستیابی به مقادیر صحیح و دقیق مشخصه‌های ساختاری درختان و برآورد صحیح این مشخصه‌ها از داده‌های لیزر اسکنر نیازمند برداشت‌های کامل از محدوده است، به‌طوری‌که نواحی پنهان و برداشت نشده به حداقل ممکن برسد. در توده‌های درختی متراکم و انبوه، وجود و افزایش نواحی پنهان و برداشت نشده تاج درختان امری معمول است که به نوبهٔ خود تأثیر قابل توجهی بر عدم برآورد صحیح مشخصه‌های ساختاری درختان از جمله ارتفاع کل و ارتفاع تنه دارد. بنابر آنچه بیان شد استفاده از لیزر اسکنر دستی متحرک در مقایسه با لیزر اسکنر زمینی ثابت به‌دلیل حرکت کاربر در عرصه و توجه به عوارض در عمل نقاط پنهان بسیارکمتری را در اسکن‌ها باقی می‌گذارند. در نهایت، می‌توان انتظار داشت اندازه‌گیری مشخصه‌های ساختاری درختان به‌خصوص ارتفاع کل و ارتفاع تنه در عرصه، بسته به تراکم و انبوهی گیاهان و ساختار هندسی درختان با وجود خطای اندازه‌گیری توسط کاربر همراه باشد، بنابراین باید به این نکته نیز توجه نمود که نتایج اندازه‌گیری‌ها و خطاهای همراه آن، تأثیر مستقیمی در نتایج برآوردهای خودکار و دستی داشته که ممکن است از چند دسی‌متر تا چند سانتی‌متر باشد.

۵. نتیجه‌گیری

در این پژوهش، قابلیت لیزر اسکنر دستی متحرک GeoSLAM ZebRevo برای برآورد مشخصهٔ ارتفاع کل و ارتفاع تنهٔ درختان در یک تودهٔ جنگلی آمیخته مورد ارزیابی قرار گرفت. نتایج نشان داد که در ارتفاع بیش از ۲۰ متر هیچ نقطه‌ای از تاج درختان اسکن و ثبت نشده است بنابراین تنها اقدام به ارزیابی نتایج درختان با ارتفاع کل کمتر از ۲۰ متر شد. برآورد مشخصهٔ ارتفاع کل با دو روش دستی و خودکار به‌ترتیب دارای RMSE برابر با ۳/۱۷ و ۳/۲۱ متر و rRMSE ۲۵/۴۸ و ۲۵/۸۰ درصد است که نشان‌دهندهٔ قابلیت ضعیف دستگاه در برآورد ارتفاع کل درختان در توده‌های جنگلی می‌باشد. در مقابل، برآورد مشخصهٔ ارتفاع تنهٔ درختان با روش‌های دستی و خودکار به‌ترتیب RMSE معادل ۰/۴۷ و ۲/۵۶ متر و rRMSE معادل ۱۲/۶۶ و ۶۹/۶۷ درصد را نشان می‌دهد که تنها روش دستی را به‌عنوان یک روش مطلوب برای برآورد این مشخصه معرفی می‌کند. به‌طور کلی می‌توان بیان نمود که وضعیت و ساختار توده و درهم‌آمیختگی تاج درختان نقش بسیار تعیین کننده‌ای در نتایج برآوردها دارد و می‌تواند تغییرات قابل توجهی را به‌همراه داشته باشد. همچنین محدودیت اندازه‌گیری ارتفاع حداکثر ۲۰ متر در این مدل از دستگاه اسکنر، کاربرد آن را برای برآورد مشخصهٔ ارتفاع کل در همهٔ توده‌ها محدود می‌کند، اما همچنان دستگاهی مناسب و دارای قابلیت

مطلوب در برآورد ارتفاع تنهٔ درختان است.

۶. سپاسگزاری

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

۷. منابع

[1] Seidel, D., Ehbrecht, M., Dorji, Y., Jambay, J., Ammer, C., & Annighöfer, P. (2019). Identifying architectural characteristics that determine tree structural complexity. *Trees*, 33(3), 911-919.

[2] Shashkov, M., Ivanova, N., Shanin, V., & Grabarnik, P. (2019). Ground surveys versus UAV photography: the comparison of two tree crown mapping techniques. In Information Technologies in the Research of Biodiversity: Proceedings of the International Conference" Information Technologies in the Research of Biodiversity", 11–14 September, 2018, Irkutsk, Russia (pp. 48-56). Cham: Springer International Publishing.

[3] Sasanifar, s., & Namiranian, M. (2017). Survey equality of two instrument of measurement set of distance and azimuth (Trupulse360) and sonto Clinometers in measurement of tree height. *Journal of Conservation and Utilization of Natural Resources*, 6(1), 15-26. (In Persian)

[4] Wilkes, P., Lau, A., Disney, M., Calders, K., Burt, A., de Tanago, J.G., Bartholomeus, H., Brede, B., & Herold, M. (2017). Data acquisition considerations for terrestrial laser scanning of forest plots. *Remote Sensing of Environment*, 196, 140-153.

[5] Vosselman, G., & Maas, H.G. (2010). Airborne and terrestrial laser scanning. CRC press.

[6] Forsman, M., Holmgren, J., & Olofsson, K. (2016). Tree stem diameter estimation from mobile laser scanning using line-wise intensity-based clustering. *Forests*, 7(9), 206.

[7] Yurtseven, H., Çoban, S., Akgül, M., & Akay, A. O. (2019). Individual tree measurements in a planted woodland with terrestrial laser scanner. *Turkish Journal of Agriculture and Forestry*, 43(2), 192-208.

[8] St-Onge, B., & Vepakomma, U. (2004). Assessing forest gap dynamics and growth using multi-temporal laser-scanner data. *Power*, Vol. XXXVI - 8/W2, 173-178.

[9] Balenović, I., Liang, X., Jurjević, L., Hyyppä, J., Seletković, A., & Kukko, A. (2021). Hand-held personal laser scanning–current status and perspectives for forest inventory application. *Croatian Journal of Forest Engineering: Journal for Theory and Application of Forestry Engineering*, 42(1), 165-183.

[10] Ducey, M., Astrup, R., Pretzsch H.C., Seifert S., Tikina A., Larson B.C., & Coates, K.D. (2011). Use of terrestrial LIDAR for quantifying crown competition, crown efficiency, tree growth and site type.

[11] Chen, S., Liu, H., Feng, Z., Shen, C., & Chen, P. (2019). Applicability of personal laser scanning in forestry inventory. *PLoS One*, 14(2), e0211392.

[12] Pazhouhan, I., Najafi, A., Kamkar Rouhani, A., & Vahidi, J. (2017). Extraction of individual tree parameters by using terrestrial laser scanner data in Hyricanian Forest. *Ecopersia*, 5(3), 1837-1847.

[13] Olofsson, K., Holmgren, J., & Olsson, H. (2014). Tree stem and height measurements using terrestrial laser scanning and the RANSAC algorithm. *Remote Sensing*, 6(5), 4323-4344.

[14] Ghimire, S., Xystrakis, F., & Koutsias, N. (2017). Using Terrestrial Laser Scanning to Measure Forest Inventory Parameters in a Mediterranean Coniferous Stand of Western Greece. *PFG–Journal of Photogrammetry, Remote Sensing and Geoinformation Science*, 85(4), 213-225.

[15] Liu, G., Wang, J., Dong, P., Chen, Y., & Liu, Z. (2018). Estimating individual tree height and diameter at breast height (DBH) from terrestrial laser scanning (TLS) data at plot level. *Forests*, 9(7), 398.

[16] Cabo, C., Del Pozo, S., Rodríguez-Gonzálvez, P., Ordóñez, C., & González-Aguilera, D. (2018). Comparing terrestrial laser scanning (TLS) and wearable laser scanning (WLS) for individual tree modeling at plot level. *Remote Sensing*, 10(4), 540.

[17] Del Perugia, B., Giannetti, F., Chirici, G., & Travaglini, D. (2019). Influence of scan density on the estimation of single-tree attributes by hand-held mobile laser scanning. *Forests*, 10(3), 277.

[18] Tockner, A., Gollob,C., Kraßnitzer, R., Ritter, T., & Nothdurft, A. (2022) Automatic tree crown segmentation using dense forest point clouds from Personal Laser Scanning (PLS). I*nternational Journal of Applied Earth Observations and Geoinformation*, 114, 103025.

[19] Nocerino, E., Menna, F., Remondino, F., Toschi, I., & Rodríguez-Gonzálvez, P. (2017, June). Investigation of indoor and outdoor performance of two portable mobile mapping systems. In Videometrics, Range Imaging, and Applications XIV (Vol. 10332, pp. 125-139). SPIE.

[20] 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(4), 317-339.

[21] Naghibi Rad, S.A., Darvishsefat, A.A., Fatehi, P., Namiranian, M., Saadat Seresht, M., & Boroumand, M. (2024). Evaluation of Octree-Based Segmentation (OBS) Method to Seperate Ground Point Based on the Handheld Laser Scanner Data. *Iranian Journal of Forest*, 16(1), 137-155. (In Persian)

[22] Namiranian, M. (2010). Measurement of Tree and Forest Biometry. University of Tehran Press, Tehran. (In Persian)

[23] Powers, D.M. (2020). Evaluation: from precision, recall and F-measure to ROC, informedness, markedness and correlation. arXiv preprint arXiv:2010.16061.

[24] Taye, M., Mengistu, D., & Sahlu, D. (2023). Performance evaluation of multiple satellite rainfall data sets in central highlands of Abbay Basin, Ethiopia. *European Journal of Remote Sensing*, 56(1), 2233686.

[25] 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.

[26] Kushwaha, S. K. P., Singh, A., Jain, K., Vybostok, J., & Mokros, M. (2023). Qualitative Analysis of Tree Canopy Top Points Extraction from Different Terrestrial Laser Scanner Combinations in Forest Plots. *ISPRS International Journal of Geo-Information*, 12(6), 250.