

## کارایی تلفیق ابرنقاط TOF و TLS در اندازه‌گیری مشخصه‌های کمی درختان شهری

معصومه فتح‌الهی<sup>۱</sup>، جواد سوسنی<sup>۲\*</sup>، علی محمدزاده<sup>۳</sup>، Eetu Puttonen<sup>۴</sup>، رامین حسین‌زاده<sup>۵</sup>

۱- دانشجوی دکتری علوم جنگل، دانشکده کشاورزی و منابع طبیعی دانشگاه لرستان، خرم‌آباد، ایران. (massomefatholahi@ymail.com)

۲- دانشیار، گروه جنگلداری، دانشکده کشاورزی و منابع طبیعی دانشگاه لرستان، خرم‌آباد، ایران. (soosani.j@lu.ac.ir)

۳- دانشیار گروه فتوگرامتری، دانشکده نقشه‌برداری، دانشگاه خواجه نصیرالدین طوسی، تهران، ایران. (a\_mohammadzadeh@kntu.ac.ir)

۴- مدیر تحقیقات گروه سنجش از دور و فتوگرامتری، موسسه تحقیقات فضایی فنلاند. (eetu.puttonen@nls.fi)

۵- دکتری علوم جنگل، دانشکده کشاورزی و منابع طبیعی دانشگاه لرستان، خرم‌آباد، ایران. (ramin.hosseinzadeh@yahoo.com)

تاریخ دریافت: ۱۴۰۱/۱۰/۰۲ تاریخ پذیرش: ۱۴۰۲/۰۱/۲۰

## چکیده

در فضای سبز شهری بسته به هدف، از گونه‌های مختلف پهن‌برگ و سوزنی‌برگ استفاده می‌شود که دارای ویژگی‌های متنوع و پیچیده هستند. در این پژوهش برای دستیابی به اطلاعات دقیق درختان و با هدف پوشش نقاط ضعف دو فناوری TLS و TOF از تلفیق آن‌ها استفاده شد. برای این منظور تعداد ۲۰ اصله درخت از گونه‌های پهن‌برگ (نارون و زبان گنجشک) و سوزنی‌برگ (سروناز و سرونقره‌ای) فضای سبز دانشگاه خواجه نصیرالدین طوسی انتخاب و ابرنقاط آن‌ها با استفاده از TLS و TOF تولید شد. پس از پردازش ابرنقاط متغیرهای قطر و سطح مقطع برابرسینه و مساحت تاج اندازه‌گیری شد. RMSE اندازه‌گیری قطر برابرسینه درختان گونه‌های پهن‌برگ و سوزنی‌برگ با استفاده از فناوری TOF به ترتیب ۰/۳۳ و ۰/۳۸ سانتی‌متر و با فناوری TLS، ۰/۵۹ و ۰/۶۲ سانتی‌متر به دست آمد. خطای اندازه‌گیری قطر پهن‌برگان به علت پوست نازک‌تر، نسبت به سوزنی‌برگان کمتر بود. سطح مقطع اندازه‌گیری شده با استفاده از فناوری TOF از دقت بیشتری نسبت به TLS برخوردار بود؛ در مقابل فناوری TLS در اندازه‌گیری مساحت تاج عملکرد دقیق‌تری دارد. سطح مقطع و مساحت تاج درختان پهن‌برگ به علت شکل نامتقارن و نامنظم تنه و تاج این درختان خطای بیشتری نسبت به سوزنی‌برگان نشان داد. با توجه به نتایج به دست آمده و بررسی نقاط قوت و ضعف این فناوری‌ها، تلفیق این دو، نتایج دقیق‌تر و جامع‌تری را در پی دارد. بنابراین توصیه می‌شود در پژوهش‌های علمی دقیق که مبنای کارهای اجرایی قرار می‌گیرند، از تلفیق این فناوری‌ها استفاده شود.

واژه‌های کلیدی: اسکن لیزر زمینی، سطح مقطع، مساحت تاج، مدت زمان پرواز

## مقدمه

کمی سازی ساختار پیچیده درختان و توده های جنگلی را فراهم کرده است (Liang et al., 2016; Mokroš et al., 2020). در پژوهش های متعددی به توانایی TLS در استخراج متغیرهای مختلف درختان تأکید شده که در این میان می توان به پژوهش های Abolhasani and Kükénbrink et al. (2020) و (2021) و Hunčaga et al. (2020) اشاره کرد که به بررسی قطر در ارتفاعات مختلف تنه، حجم، پروفیل ساقه و ابعاد تاج پرداخته اند. با این حال، مشکل اصلی TLS عدم جابجایی و به تبع آن ایجاد نقاط کور است. برای کاهش خطای حاصل از نقاط کور، راهکارهایی مانند اسکن چندگانه پیشنهاد شده است (Liang et al., 2016) که البته در مکان های شهری به دلیل نزدیکی به بناها و محل عبور و مرور اسکن با محدودیت هایی مواجه می شود. علاوه بر این، اسکن چندگانه به زمان بیشتری برای برداشت داده و تلاش بیشتری برای پردازش ابرنقاط نیاز دارد (Liang et al., 2016; Del Perugia et al., 2019). این محدودیت ها منجر به ارائه فناوری هایی شده که قادر به تولید ابرنقاط سه بعدی به شیوه "آماده استفاده" (ready-to-use) شدند. این رویکرد نسبت به اسکن لیزر زمینی (TLS) که در مکان برداشت ثابت است، از نظر کاهش نقاط کور برتری دارد.

با بهبود توان پردازشی تراشه ها و توسعه فناوری های مبتنی بر فتوگرامتری، امکان قرارگیری سیستم RGB-D SLAM (حسگر رنگی تشخیص عمق با قابلیت مکان یابی و نقشه برداری هم زمان) بر روی گوشی های هوشمند فراهم شده است (Neuville et al., 2021). یکی از این فناوری ها، فناوری TOF (Time of Flight) به کار رفته در فبلت هوشمند Lenovo Phab 2 Pro است. این فناوری نیز نقاط قوت و ضعف خاص خود را دارد. در پژوهش های Fan et

درختان عناصر ضروری از زیرساخت های سبز شهری هستند و در توسعه شهرها و حفظ محیط زیست بسیار دارای اهمیت اند. پوشش گیاهی مناسب، اثرهای مثبتی بر کیفیت زندگی شهری دارد و خدمات اکوسیستمی متعددی مانند افزایش تنوع زیستی، کاهش احتمال وقوع سیل، تعدیل دما (Kükénbrink et al., 2021)، صرفه جویی در مصرف انرژی (Schmohl et al., 2022)، کاهش دی اکسید کربن (Abdollahzadeh et al., 2019) و تصفیه هوا (Janhäll, 2015) را برای شهروندان به ارمغان آورده و همچنین سلامت روانی آنان را بهبود می بخشد (Wang et al., 2021).

علاوه بر خدمات عمومی که اغلب درختان ارائه می دهند، برخی از گونه ها دارای قابلیت های ویژه ای مانند ایجاد سایبان، عایق صدا و کاهش آلودگی هوا هستند. با توجه به نقش و اهمیت درختان، انتخاب گونه های مناسب برای مکان های مختلف یکی از اقدامات اساسی در برنامه ریزی و مدیریت فضاهای سبز شهری است. از این رو داشتن اطلاعات جامع از ویژگی های فیزیکی و رفتاری گونه های مختلف برای رسیدن به نتایج مطلوب اهمیت فراوانی دارد. اندازه گیری درختان با ابزارها و روش های سنتی از نظر دقت و برداشت مشخصه های کمی مختلف با محدودیت های زیادی روبرو است. مانند اینکه اغلب اطلاعاتی که به طور مستقیم برداشت می شوند تک بعدی یا دوبعدی همراه با خطای اندازه گیری محسوس هستند؛ در صورتی که برای شناخت دقیق خصوصیات فردی و اجتماعی درختان ساختار سه بعدی (چندوجهی نامنظم) آن ها به مراتب اهمیت بیشتری دارد.

توسعه فناوری هایی مانند اسکن لیزر زمینی (TLS) و افزایش قدرت محاسباتی دستگاه های شخصی و تلفن همراه (RGB-D SLAM) در دو دهه گذشته، امکان

کمی درختان شهری (شامل قطر، سطح مقطع و مساحت تاج)، کارایی تلفیق ابرنقاط دو فناوری TLS و TOF مورد آزمون قرار گرفته است.

### مواد و روش‌ها

#### منطقه مورد بررسی

این پژوهش در فضای سبز دانشکده نقشه‌برداری دانشگاه خواجه نصیرالدین طوسی و با استفاده از اسکن لیزر زمینی Riegl LMS-Z420i و فبلت هوشمند Lenovo Phab 2 Pro مجهز به فناوری TOF انجام شد. برای این پژوهش پنج اصله درخت از هر گونه زبان گنجشک (*Fraxinus Ornus L.*)، نارون (*Ulmus umbraculifera*)، سروناز (*Cupressus sempervirens L.*) و سرو نقره‌ای (*Cupressus arizonica Greene*) انتخاب شدند. در شکل ۱ نمایی از درختان اسکن شده به وسیله TLS مشاهده می‌شود. در ادامه مشخصات این ابزارها شرح داده شده است.

Fathollahi et al. (2018) و Gimenez et al. (2022) RGB-D SLAM و دقت ابرنقاط برای اندازه‌گیری قطر برابر سینه، ارتفاع و تعیین موقعیت درختان تأیید شده است. با این وجود محدودیت‌هایی مانند برد حداکثری ۶ متر (که توسط سازنده برای برداشت اطلاعات عمق بیان شده است) و تأثیر نور محیط بر حسگر مادون قرمز در فضای باز که منجر به کاهش دامنه مؤثر حسگر و افزایش اختلال (نویز) دریافتی از سطح اشیاء هدف می‌شود، از نقاط ضعف این فناوری است (Mcglade et al., 2022).

در فضای سبز شهری بسته به اهداف مورد نظر از گونه‌های مختلف پهن‌برگ و سوزنی‌برگ استفاده می‌شود. با توجه به سرشت و خصوصیات زیستی متفاوت این گونه‌ها به‌ویژه شکل و موقعیت تاج، کمی‌سازی جامع این متغیرها چالش‌های مختلفی را در پی دارد. در پژوهش حاضر به‌منظور بهبود اندازه‌گیری مشخصه‌های



شکل ۱- نمایی از اسکن درختان توسط اسکن لیزر زمینی

Figure 1. A view of tree scanning by terrestrial laser scanning

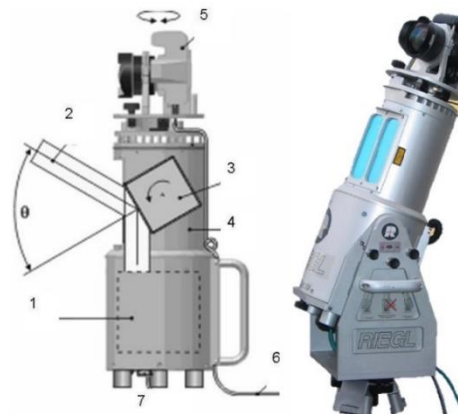
برد برداشت این دستگاه تا ۱۰۰۰ متر، اسکن ۰ تا ۸۰ درجه عمودی و ۰ تا ۳۶۰ درجه افقی، دقت برداشت تا ۲ میلی‌متر، سرعت برداشت ۱۱۰۰۰ نقطه در ثانیه و برد یا شعاع عملیاتی تا ۲۰۰۰ متر است.

#### اسکن لیزر زمینی

اسکن لیزر زمینی مدل Riegl LMS-Z420i ساخت شرکت Riegl اتریش است (Riegl 2010). سخت‌افزار اسکن لیزر LMS-Z420i امکان اندازه‌گیری‌های سه-بعدی با سرعت، وضوح و دقت زیاد را فراهم می‌کند.

داده‌های اسکن که شامل دامنه، زاویه و دامنه سیگنال است، از طریق کابل‌های داده به پردازنده منتقل می‌شود (۶). یک دوربین (۵) با گردش ۱۸۰ درجه در محور عمودی اسکنر قرار دارد. (۷) داده‌های رقومی را برای پردازنده ارسال می‌کند (Murphy, 2012).

تجهیزات الکترونیکی اسکنر در شکل ۲ نشان داده شده است. (۱) بدنه اصلی اسکنر است. انحراف عمودی پرتو لیزر نشان داده شده در (۲) به سمت جسم هدف توسط یک چندضلعی (۳) هدایت می‌شود که از تعدادی سطوح بازتابنده تشکیل شده است. اسکن افقی با چرخش هد نوری (۴) تا ۳۶۰ درجه انجام می‌شود.

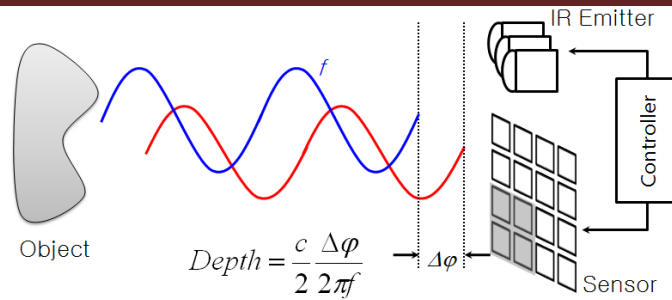


شکل ۲- اسکن لیزر زمینی Riegl LMS-Z420i (Murphy, 2012)  
Figure 2. Terrestrial laser scanning Riegl LMS-Z420

سپس به دوربین مادون قرمز نزدیک دستگاه باز می‌گردد (Mcglade et al., 2022). شکل ۳ اصل سنجش عمق ToF را نشان می‌دهد. یک موج IR که با رنگ قرمز نشان داده شده است به سمت شی مورد نظر هدایت شده و حسگر مولفه IR منعکس شده را تشخیص می‌دهد. با اندازه‌گیری اختلاف فاز بین امواج IR تابشی و منعکس شده، می‌توانیم فاصله تا جسم را محاسبه کنیم (Hansard et al., 2012).

#### فناوری TOF

دوربین TOF، نوعی از فناوری است که اطلاعات رنگ و عمق تصویر را با هم تلفیق می‌کند و نسبت به دوربین‌های رایج از مزایای زیادی برخوردار است. دستگاه‌های RGB-D که از فناوری TOF برای گرفتن اطلاعات سه‌بعدی استفاده می‌کنند، با محاسبه فاصله میدان دید بین دستگاه و سطح شی کار می‌کنند. این رویکرد بر اساس مدت زمانی است که تابش الکترومغناطیسی توسط یک واحد روشنایی ساطع می‌شود، شی آن را به‌طور مستقیم منعکس می‌کند و



شکل ۳- سنجش عمق توسط TOF (Hansard et al., 2012)

Figure 3. Depth measurement by TOF (Hansard et al., 2012)

ساقه می‌شود. بنابراین در این مقاله، هیچ فرض قبلی در مورد هندسه ساقه انجام نشده است. همچنین تاج هر درخت با استفاده از تکنیک‌های تشخیص لبه مشخص و مقطع عرضی تاج از داده‌های TLS استخراج شد. برای بررسی نقاط قوت و ضعف هر کدام از این فناوری‌ها و همچنین مقایسه آن‌ها با اندازه‌گیری و محاسبات دستی؛ چهار گونه پرکاربرد در فضای سبز شهری شامل گونه‌های سوزنی‌برگ سروناز و سرو سیمین و گونه‌های پهن‌برگ توت و نارون با تعداد پنج پایه از هر کدام انتخاب و متغیرهای قطر برابرینه (DBH)، سطح مقطع و مساحت تاج اندازه‌گیری شد. برای مقایسه روش‌های اندازه‌گیری از شاخص‌های اعتبارسنجی: مجذور میانگین مربعات خطا (RMSE) (رابطه ۱)، RMSE% (رابطه ۲)، آماره اریبی (Bias) (رابطه ۳) و Bias% (رابطه ۴) استفاده شد. در این روابط،  $n$  تعداد درختان و  $x_i$ ،  $x_{ir}$  و  $\bar{x}$  به ترتیب مقدار مشخصه برآوردی، داده مرجع و متوسط مقدار داده مرجع است.

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (x_i - x_{ir})^2}{n}} \quad \text{رابطه (۱)}$$

$$RMSE\% = \frac{RMSE}{\bar{x}} \times 100 \quad \text{رابطه (۲)}$$

$$Bias = \frac{\sum_{i=1}^n (x_i - x_{ir})}{n} \quad \text{رابطه (۳)}$$

$$Bias\% = \frac{Bias}{\bar{x}} \times 100 \quad \text{رابطه (۴)}$$

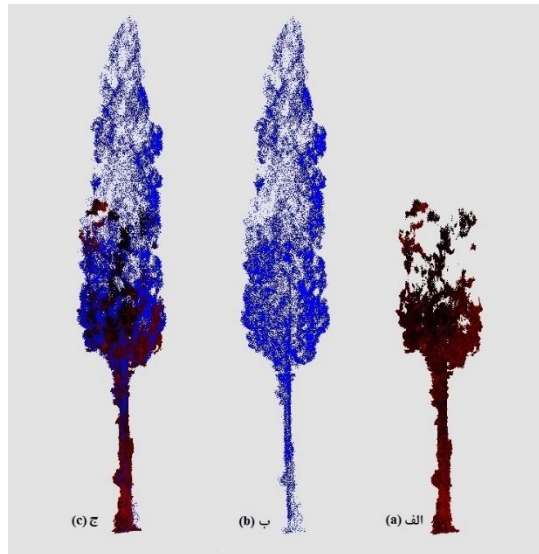
نتایج

روش کار

برای برداشت با اسکن لیزر زمینی، ۵ ایستگاه در فواصل مختلف در نظر گرفته شد. پیش‌پردازش با نرم‌افزار RiScan Pro انجام شد (Riegler, 2010). به منظور تولید ابرنقاط TOF ضمن حرکت دوار در اطراف هر درخت؛ با استفاده از فیلتر هوشمند Phab 2 Pro اسکن سه‌بعدی انجام و در محیط اپلیکیشن Matterport Scenes ابرنقاط ایجاد شد. ابرنقاط TLS و TOF به عنوان داده‌های ورودی در نظر گرفته شدند. در مرحله پیش‌پردازش ابتدا ابرنقاط هر درخت به صورت جداگانه استخراج و نقاط اضافی شامل زمین، گیاهان کف و غیره از داده‌های ورودی حذف شدند، سپس با استفاده از نرم‌افزار Context Capture تراکم ابرنقاط بهبود یافت و در ادامه با استفاده از ابزارهای اندازه‌گیری نرم‌افزار CloudCompare (v.2.12.4) قطر و سطح مقطع در ارتفاع برابر سینه درختان اندازه‌گیری شد. برای این منظور از اندازه‌گیری دستی استفاده شد تا تأثیر مواردی مانند روش‌های تقریبی (تناسب دایره، اجماع نمونه تصادفی (RANSAC)، پوش محدب و غیره)، نویز باقی‌مانده در اطراف تنه و نقص ابرنقاط (دوتایی شدن ساقه، بازتاب ساقه) جلوگیری شود. بسیاری از تکنیک‌های پیشرفته اندازه‌گیری ساقه را با استفاده از اشکال هندسی منظم، مانند دایره، بیضی و استوانه انجام می‌دهند که نمی‌توانند شکل هندسی ساقه سه‌بعدی را با دقت ثبت کنند در نتیجه منجر به خطاهای مدل‌سازی

محدودیت بوده و تاج درخت را به صورت ناقص ثبت کرده است. در مقابل TLS اسکن کاملی از درخت ارائه کرده اما ساقه درخت نسبت به TOF کیفیت پایین تری دارد که این نواقص با تلفیق ابرنقاط رفع شده است. در ادامه نتایج مربوط به اندازه گیری متغیرها و مقایسه های انجام شده آمده است.

همانطور که گفته شد درختان انتخاب شده، با دو فناوری TLS و TOF اسکن و ابرنقاط آنها در محیط نرم افزار برای اندازه گیری متغیرهای مورد نظر پردازش شد. در شکل ۴، ابرنقاط حاصل از اسکن درخت سروناز به- وسیله این فناوری ها نشان داده شده است. همان طور که مشاهده می شود TOF در اندازه گیری ارتفاع دارای



شکل ۴- الف) ابرنقاط TOF، ب) ابرنقاط TLS ج. تلفیق دو فناوری

Figure 4. a. TOF point cloud b. TLS point cloud c. combining two technologies

دارند. مقادیر صحت سنجی قطر به تفکیک روش اندازه گیری و نوع گونه ها در جدول ۱ ارائه شده که بر اساس آن TOF با مقدار خطا و اریبی کمتر از دقت بیشتری برخوردار است.

#### قطر برابر سینه

در این پژوهش به دلیل اندازه گیری مستقیم قطر به وسیله کالیپر، این داده به عنوان مبنای مقایسه برای بررسی دقت ابرنقاط TLS و TOF در نظر گرفته شد. نتایج نشان داد هر دو فناوری در برآورد قطر عملکرد بسیار دقیقی

جدول ۱- صحت سنجی قطر به تفکیک روش اندازه گیری و نوع گونه ها

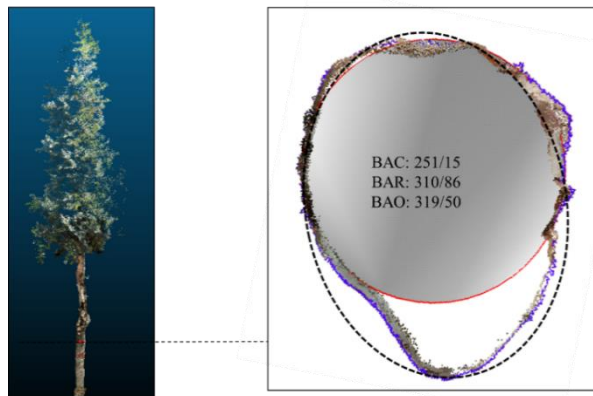
Table 1. Validation of the DBH measurement method and type of species

TLS		TOF		آماره صحت سنجی Validation statistic
پهن برگ Broadleaf	سوزنی برگ Coniferous	پهن برگ Broadleaf	سوزنی برگ Coniferous	
0.59	0.62	0.33	0.38	RMSE (cm)
2.86	2.94	1.57	1.86	RMSE%
-0.35	-0.31	0.06	0.03	Bias (cm)
-1.70	-1.52	0.31	0.15	Bias%

یکی از درختان دارای تنه نامتقارن با سه روش برازش دایره (RANSAC)، مساحت واقعی (کاربر محور) و مساحت بیضی مقایسه شده؛ که در حالت دایره بسیار کمتر و در فرمول بیضی اندکی بیش از مساحت واقعی برآورد شده است.

### سطح مقطع برابر سینه

در بیشتر پژوهش‌ها برای محاسبه سطح مقطع تنه و تاج از فرمول دایره یا بیضی استفاده می‌شود در صورتی که این متغیرها اغلب از شکل هندسی مشخصی تبعیت نمی‌کنند. در شکل ۵، سطح مقطع در ارتفاع برابر سینه



شکل ۵- تفاوت بین سطح مقطع واقعی (BAR)، برازش دایره بر ابرنقاط (BAC)، مساحت بیضی (BAO)

Figure 5. Difference between reference basal areas (BAR), circle-fitting basal area (BAC), oval area (BAO)

است، از این رو با توجه به دقت مناسب ابرنقاط TOF در اندازه‌گیری قطر، این فناوری به‌عنوان مبنا اندازه‌گیری سطح مقطع در نظر گرفته شد. طبق جدول ۲ مقدار RMSE ابرنقاط TOF نسبت به برآورد هندسی برای پهن‌برگان بیشتر از سوزنی‌برگان محاسبه شد.

ابزار TLS فقط زمانی که از روش برداشت چند اسکن استفاده شود مقطع درختان را به‌صورت کامل در اختیار ما قرار می‌دهد، اما در روش تک اسکن تنها یک سمت درخت به‌خوبی قابل مشاهده است. در این پژوهش با اسکن کامل تنه به‌وسیله ابزار TOF سطح مقطع به‌صورت کامل قابل مشاهده

جدول ۲- صحت سنجی سطح مقطع بر مبنای TOF به تفکیک نوع گونه‌ها

Table 2. Validation of the basal area based on TOF by different types of species

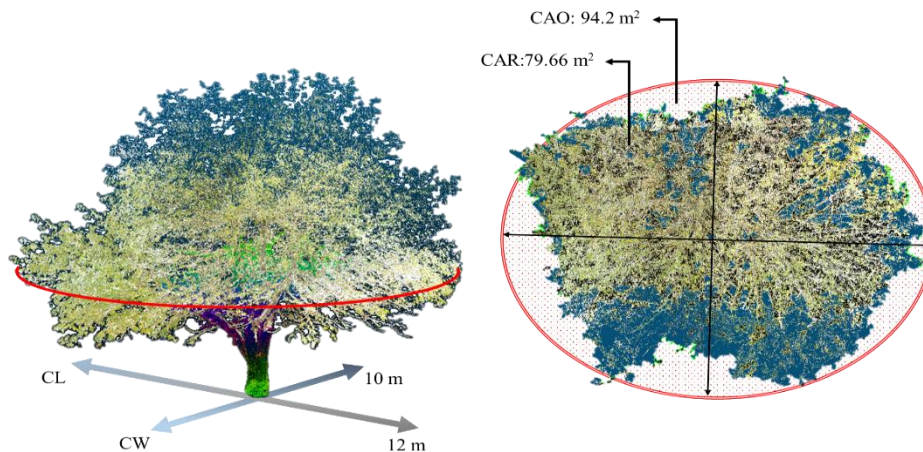
پهن‌برگ	سوزنی‌برگ	آماره صحت‌سنجی
Broadleaf	Coniferous	Validation statistic
75.5	42.97	RMSE (cm <sup>2</sup> )
16.98	12.59	RMSE%
5.03	6.02	Bias (cm <sup>2</sup> )
1.13	1.76	Bias%



## مساحت تاج

اندازه‌گیری مساحت تاج به روش هندسی به دلیل فرم پیچیده آن اغلب از دقت کافی برخوردار نیست. در صورتی که با استفاده از ابرنقاط TLS به خوبی می‌توان

مؤلفه‌های فیزیکی تاج را استخراج کرد و این در حالی است که TOF با توجه به محدودیت برد ارتفاعی از این امکان برخوردار نیست. شکل ۶، مساحت تاج درخت را در مقایسه با روش اندازه‌گیری زمینی نشان می‌دهد.



شکل ۶- مساحت واقعی و برآورد هندسی (بیضی قرمز رنگ) تاج

Figure 6. Reference area and geometric estimate (red oval) of the crown

مقادیر صحت‌سنجی مساحت تاج به تفکیک گونه‌ها در جدول ۳ ارائه شده؛ که کمترین و بیشترین مقدار خطا به ترتیب مربوط به پهن‌برگان و سوزنی‌برگان

است. مقادیر ارزیابی نشان می‌دهد مساحت‌های برآورد شده در روش زمینی نسبت به اندازه واقعی بزرگترند.

جدول ۳- صحت‌سنجی مساحت تاج بر مبنای TLS به تفکیک نوع گونه‌ها

Table 3. Validation of crown area based on TLS by different types of species

پهن‌برگ	سوزنی‌برگ	آماره صحت‌سنجی
Broadleaf	Coniferous	Validation statistic
17.61	0.94	RMSE (m <sup>2</sup> )
33.66	21.50	RMSE %
15.47	0.73	Bias (m <sup>2</sup> )
29.57	16.70	Bias %

## بحث

بر اساس نتایج صحت‌سنجی برای متغیر قطر برابر سینه، مقدار خطای اندازه‌گیری TOF و TLS بسیار ناچیز بوده که بیانگر دقت زیاد این تکنولوژی‌ها است. با این وجود عملکرد TOF اندکی بهتر از TLS بود (جدول ۱). در پژوهش‌هایی همچون Fan et al. (2018) و Fathollahi

et al. (2022) در برآورد قطر توسط گوشی هوشمند و de Abolhasani and Mohammadzadeh (2020) و Paula Pires et al. (2022) و Harikumar et al. (2022) در برآورد قطر توسط TLS به نتایج مشابهی دست پیدا کردند. از نظر تئوری شیوه TLS چند اسکن بهترین روش برای برآورد متغیرهای درخت است، زیرا



درختان به‌طور کامل با ادغام ابرنقاط پوشش داده می‌شوند؛ اما در قطعات نمونه متراکم و یا مناطق شهری به‌دلیل انسداد دید و محدودیت تعداد ایستگاه برداشت، اغلب تنه درختان به‌طور کامل اسکن نمی‌شود در حالی که TOF به‌دلیل توانایی مانور بیشتر و اسکن از فاصله نزدیک ابرنقاط متراکم باکیفیت و کاملی تولید می‌کند که برای برداشت تنه از عملکرد بهتری برخوردار است. از این رو برای تعیین دقت روش هندسی برآورد سطح مقطع، داده‌های TOF مبنای مقایسه قرار گرفتند که مقدار RMSE% برای پهن‌برگان ۱۶/۹۸ و برای سوزنی‌برگان ۱۲/۵۹ درصد محاسبه شد. این مقادیر خطا ارقام قابل توجهی هستند که علت آن عدم تبعیت سطح مقطع از شکل هندسی مشخص است. در تفکیک گونه‌ها، سوزنی‌برگان به‌دلیل تنه متقارن خطای اندازه‌گیری کمتری داشته‌اند. (Witzmann et al. (2022 معتقدند که داده‌های سه‌بعدی نسبت به اندازه‌گیری سنتی مانند کالیپر از دقت بیشتری برخوردارند و استفاده از اندازه‌گیری‌های زمینی به‌عنوان داده‌های مرجع را مورد تردید قرار داده‌اند. همچنین de Paula Pires et al. (2022 بیان کردند بسته به فاصله سنسور تا ساقه درخت دقت اندازه‌گیری تنه درخت متفاوت است و هرچه این فاصله کمتر باشد خطای اندازه‌گیری نیز کمتر است. با توجه به فاصله اندک سنسور TOF از تنه درخت، این داده می‌تواند به‌عنوان یکی از دقیق‌ترین روش‌ها برای اندازه‌گیری ویژگی‌های تنه درختان مورد استفاده قرار گیرد. در میان متغیرهای درخت، شکل تاج پیچیدگی بیشتری دارد که این پیچیدگی سبب بروز خطای محسوس در برداشت مؤلفه‌های لازم می‌شود. در اغلب موارد فبلت Phab2Pro نیز قادر به برداشت کامل تاج

نیست. در روش‌های معمول اندازه‌گیری، معمولاً با اندازه‌گیری دو قطر بزرگ و کوچک با استفاده از روابط ریاضی و تقریب شکل تاج به یکی از اشکال هندسی، مساحت تاج برآورد می‌شود؛ در مقابل در اندازه‌گیری با استفاده از اسکن لیزر زمینی، شکل دقیق تاج و پیچیدگی‌های آن در نظر گرفته شده، بنابراین اسکن لیزر زمینی در اندازه‌گیری مساحت و شکل تاج عملکرد دقیق‌تر و متمایزی دارد. بر اساس نتایج، اندازه‌گیری شکل تاج منجر به خطای بیشتر نسبت به دیگر متغیرها شده که در گونه‌های پهن‌برگ به‌علت گستردگی و شکل نامنظم تاج این خطا بیشتر از سوزنی‌برگان است. Fleck et al. (2011) و Kükenbrink et al. (2021) نیز به کارآیی فناوری TLS در برآورد مساحت تاج تأکید کرد.

#### نتیجه‌گیری کلی

همان‌طور که مشخص شد هر کدام از این فناوری‌ها نقاط قوت و ضعف خود را دارند و تلفیق ابرنقاط TLS و TOF موجب بهبود اندازه‌گیری مشخصه‌های کمی درختان شهری شد و نتایج دقیق و جامع‌تری حاصل شد. بنابراین توصیه می‌شود از تلفیق این دو فناوری در پژوهش‌های دقیق علمی به‌عنوان مبنای کارهای اجرایی چون ایجاد و توسعه فضای سبز شهری، استفاده شود. همچنین پیشنهاد می‌شود کارآیی تلفیق این دو روش در توده‌های جنگلی نیز مورد بررسی قرار گیرد.

#### تشکر و قدردانی

در پایان از مسئولین محترم دانشکده نقشه‌برداری دانشگاه خواجه نصیرالدین طوسی به‌دلیل فراهم کردن امکان استفاده از دستگاه اسکن لیزر زمینی، سپاسگزاریم.

## References

- Abdollahzadeh, B.; Hojjati, S. M.; Sagheb Talebi, K.; Kooch, Y., Impact of plantation with Robinia pseudoacacia and Pinus eldarica on soil physic-chemical properties and Co2 emission in Tehran urban landscape. *Forest Research and Development* **2019**, *4* (4), 463-476. (in persian)
- Abolhasani, H.; Mohammadzadeh, A., Detection of some Tree Species from Terrestrial Laser Scanner Point Cloud Data Using Support-vector Machine and Nearest Neighborhood Algorithms. *Journal of Geomatics Science and Technology* **2020**, *9* (3), 29-40. (In Persian)
- Fan, Y.; Feng, Z.; Mannan, A.; Khan, T. U.; Shen, C.; Saeed, S., Estimating tree position, diameter at breast height, and tree height in real-time using a mobile phone with RGB-D SLAM. *Remote Sensing* **2018**, *10* (11), 1845.
- Fathollahi, M.; Soosani, J.; Mohammadzadeh, A.; Puttonen, E.; Hosseinzadeh, R., The efficiency of TOF technology in smartphones to estimate the diameter of some Hyrcanian forest index trees. *Journal of Geomatics Science and Technology* **2022**, *11* (4), 131-140. (in persian)
- Fleck, S.; Mölder, I.; Jacob, M.; Gebauer, T.; Jungkunst, H. F.; Leuschner, C., Comparison of conventional eight-point crown projections with LIDAR-based virtual crown projections in a temperate old-growth forest. *Annals of Forest Science* **2011**, *68* (7), 1173-1185.
- Gimenez, J.; Sansoni, S.; Tosetti, S.; Capraro, F.; Carelli, R., Trunk detection in tree crops using RGB-D images for structure-based ICM-SLAM. *Computers and Electronics in Agriculture* **2022**, *199*, 107099.
- Hansard, M.; Lee, S.; Choi, O.; Horaud, R. P., *Time-of-flight cameras: principles, methods and applications*. Springer Science & Business Media: 2012.
- Harikumar, A.; Liang, X.; Bovolo, F.; Bruzzone, L., Void-Volume-Based Stem Geometric Modeling and Branch-Knot Localization in Terrestrial Laser Scanning Data. *IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing* **2022**, *15*, 3024-3040.
- Hunčaga, M.; Chudá, J.; Tomašík, J.; Slámová, M.; Koreň, M.; Chudý, F., The comparison of stem curve accuracy determined from point clouds acquired by different terrestrial remote sensing methods. *Remote Sensing* **2020**, *12* (17), 2739.
- Janhäll, S., Review on urban vegetation and particle air pollution–Deposition and dispersion. *Atmospheric Environment* **2015**, *105*, 130-137.
- Kükenbrink, D.; Gardi, O.; Morsdorf, F.; Thürig, E.; Schellenberger, A.; Mathys, L., Above-ground biomass references for urban trees from terrestrial laser scanning data. *Annals of Botany* **2021**, *128* (6), 709-724.
- Liang, X.; Kankare, V.; Hyypä, J.; Wang, Y.; Kukko, A.; Haggrén, H.; Yu, X.; Kaartinen, H.; Jaakkola, A.; Guan, F., Terrestrial laser scanning in forest inventories. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing* **2016**, *115*, 63-77.
- McGlade, J.; Wallace, L.; Reinke, K.; Jones, S., The potential of low-cost 3D imaging technologies for forestry applications: Setting a research agenda for low-cost remote sensing inventory tasks. *Forests* **2022**, *13* (2), 204.
- Mokroš, M.; Výboštok, J.; Grznárová, A.; Bošela, M.; Šebeň, V.; Merganič, J., Non-destructive monitoring of annual trunk increments by terrestrial structure from motion photogrammetry. *PLoS One* **2020**, *15* (3), e0230082.
- Murphy, M. Historic building information modelling (HBIM): For recording and documenting classical architecture in Dublin 1700 to 1830. Trinity College Dublin, 2012.
- Neuville, R.; Bates, J. S.; Jonard, F., Estimating forest structure from UAV-mounted LiDAR point cloud using machine learning. *Remote Sensing* **2021**, *13* (3), 352.
- Del Perugia, B.; Giannetti, F.; Chirici, G.; Travaglini, D., Influence of scan density on the estimation of single-tree attributes by hand-held mobile laser scanning. *Forests* **2019**, *10* (3), 277.
- de Paula Pires, R.; Olofsson, K.; Persson, H. J.; Lindberg, E.; Holmgren, J., Individual tree detection and estimation of stem attributes with mobile laser scanning along boreal forest roads. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing* **2022**, *187*, 211-224.
- Riegl. Long Range & High Accuracy 3D Terrestrial Laser Scanner: LMS-Z420i Data Sheet. 2010; 4p.
- Schmohl, S.; Narváez Vallejo, A.; Soergel, U., Individual tree detection in urban ALS point

- clouds with 3D convolutional networks. *Remote Sensing* **2022**, *14* (6), 1317.
- Wang, X.; Singh, A.; Pervysheva, Y.; Lamatunga, K.; Murtinová, V.; Mukarram, M.; Zhu, Q.; Song, K.; Surový, P.; Mokroš, M., Evaluation of ipad pro 2020 lidar for estimating tree diameters in urban forest. *ISPRS Annals of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences* **2021**, *8*, 105-110.
- Witzmann, S.; Matitz, L.; Gollob, C.; Ritter, T.; Kraßnitzer, R.; Tockner, A.; Stampfer, K.; Nothdurft, A., Accuracy and precision of stem cross-section modeling in 3D point clouds from TLS and caliper measurements for basal area estimation. *Remote Sensing* **2022**, *14* (8), 1923.

## Visual The effectiveness of combining TOF and TLS point clouds in measuring the quantitative characteristics of urban trees

Masume Fatholahi<sup>1</sup>, Javad Soosani<sup>\*2</sup>, Ali Mohammadzadeh<sup>3</sup>, Eetu Puttonen<sup>4</sup> and Ramin Hosseinzadeh<sup>5</sup>

1- Ph.D. Student of Forestry, Faculty of Agriculture and Natural Resources, Lorestan University, Khorramabad, I. R. Iran. (Massomefatholahi@gmail.com)

2- Associate Professor, Department of Forestry, Faculty of Agriculture and Natural Resources, Lorestan University, Khorramabad, I. R. Iran. (soosani.j@lu.ac.ir)

3- Associate Professor, Department of Photogrammetry and Remote Sensing, K. N. Toosi University of Technology, Tehran, I. R. Iran. (a\_mohammadzadeh@kntu.ac.ir)

4- Project Manager at Finnish Geospatial Research Institute FGI, National Land Survey of Finland. Finland. (Eetu.puttonen@nls.fi)

5- Ph.D. of Forestry, Faculty of Agriculture and Natural Resources, Lorestan University, Khorramabad, I. R. Iran. (ramin.hosseinzadeh@yahoo.com)

Received: 23 December 2022

Accepted: 09 April 2023

### Abstract

Depending on the purpose, different species of broadleaf and coniferous trees are used in the urban green space, which has diverse and complex characteristics. In this study, to obtain accurate information about trees and to cover the weaknesses of two technologies, TLS and TOF, their combination was used. For this purpose, 20 trees were selected from broadleaf (*Fraxinus Ornus L. & Ulmus umbraculifera*) and coniferous (*Cupressus sempervirens L. & Cupressus arizonica Greene*) species in the green space of Khajeh Nasir Toosi University and their point clouds were produced using TLS and TOF. After processing point clouds, the parameters of breast diameter, basal area, and crown area were measured. The RMSE of measuring the diameter at the breast of broadleaf and coniferous trees using TOF technology was 0.33 and 0.38 cm and TLS technology was 0.59 and 0.62 cm respectively. The diameter measurement error of the broadleaf is less than the coniferous due to the thinner bark. The basal area measured using TOF technology is more accurate than TLS; On the other hand, TLS technology has a precise and unique function in measuring the crown area. The basal area and crown area of broadleaf trees showed more errors than coniferous trees due to the asymmetric and irregular shape of the stem and crown. According to the obtained results and the examination of the strengths and weaknesses of these technologies, the combination of these two leads to more accurate and comprehensive results. Therefore, it is recommended to use the integration of these technologies in detailed scientific studies that are the basis of executive works.

**Keywords:** Basal area, Crown area, Terrestrial Laser Scanning, Time of Flight.

---

\* Corresponding author

Tel: +989166598005