

بررسی دقت LiDAR آیفون در تهیه ابر نقاط تنه درختان (مطالعه موردی: زاگرس میانی - جنگل‌های بلوط استان لرستان)

الهام کریم‌زاده جعفری^۱، جواد سوسنی^{۲*}، مسعود ورشوساز^۳، حامد نقوی^۴

^۱ دانشجوی دکتری مدیریت جنگل، دانشگاه لرستان
Elli.karimzadeh@gmail.com

^۲ دانشیار گروه مدیریت جنگل، دانشگاه لرستان
Soosani.j@lu.ac.ir

^۳ دانشیار گروه فتوگرامتری دانشگاه خواجه نصیرالدین طوسی
Varshosazm@Kntu.ac.ir

^۴ استادیار گروه مدیریت جنگل، دانشگاه لرستان
naghavi.ha@lu.ac.ir

(تاریخ دریافت: خردادماه ۱۴۰۱، تاریخ تصویب: دی‌ماه ۱۴۰۱)

چکیده

جنگل‌های زاگرس از مناطق مهم و استراتژیک کشور محسوب می‌شوند. آماربرداری جنگل در مناطقی چون زاگرس با توجه به دسترسی دشوار و تراکم اندک درختان هزینه‌بر و زمان‌بر است. روش‌های اسکن لیزری جهت تهیه ابر نقاط و تولید نقشه اطلاعات ارزشمند و قابل ملاحظه‌ای را در مدیریت جنگل فراهم می‌کنند. با عرضی سنسور تشخیص نور برد کوتاه LiDAR در سال ۲۰۲۰ توسط شرکت اپل، امکان استفاده از روش‌های جایگزین اسکن فراهم گردید. در مطالعه‌ی حاضر، جهت بررسی دقت LiDAR آیفون در تهیه ابر نقاط تنه درختان، ۳۷ درخت بلوط ایرانی انتخاب و بر روی تنه آن‌ها فواصل طولی و عرضی مشخص علامت‌گذاری شد. صحت بالای ابر نقاط برای این فواصل منتج به همبستگی بالای بین ابر نقاط تولید شده و فواصل واقعی گردید. میزان RMSE% به ترتیب برای فواصل طولی ۱/۳۳ و برای فواصل عرضی ۲/۲۳ سانتی‌متر به دست آمد که گواه دقت بالای فناوری مذکور و قابلیت بالای آن در استخراج مولفه‌های کمی تنه درختان می‌باشد.

واژگان کلیدی: جنگل‌های زاگرس، اسکن، گوشی هوشمند، صحت‌سنجی، اپل، همبستگی پیرسون

* نویسنده مسئول

۱- مقدمه

هستند و نیز ابزاری چون هواپیماهای بدون سرنشین (UAV)^۵ که قابلیت پرواز در قسمت‌های زیرین و بالای تاج را دارند و همین‌طور اسکنر لیزر سیار توسعه داده شده‌اند [۹].

در سال‌های گذشته لیزر اسکنر هوایی (ALS)^۶ با فراهم آوردن ابر نقاط در توصیف دقیق درختان و زمین بکار گرفته شد. لیزر اسکنر هوایی دارای محدودیت‌هایی از جمله تفکیک‌پذیری در مدل‌هایی با شبکه ۲ تا ۳ پیکسل سایز است که چندان زیاد نمی‌باشد [۱۰]. اما با توجه به امکان دستیابی به اطلاعات سه بعدی دقیق در مورد جنبه‌های ساختاری جنگل‌ها همچنان مورد توجه است [۱۱]، [۱۲] از طرفی، داده‌های لیزر اسکنر هوایی به علت پیکسل سایز بزرگ قابلیت اندازه‌گیری قطر برابر سینه و قطر در ارتفاع بالای ساقه را با دقت مورد نیاز برای ما فراهم نمی‌کنند. پهپادها اغلب برای اندازه‌گیری پارامترهای جداگانه درخت مانند؛ موقعیت درخت، قطر در ارتفاع برابر سینه و قطر در ارتفاعات بالاتر ساقه به سبب تراکم ابر نقاط کمتر در روش هوایی مناسب نیستند [۱۳]. دلیل آن است که تاج درختان مانع از اندازه‌گیری قسمت‌های زیرین شاخه و برگ ساقه توسط اسکنر لیزری می‌شود [۱۵]، [۱۴]، [۱۳].

لیزر اسکنر زمینی (TLS)^۷ نیز که بر اساس تشخیص نور برد کوتاه (لیدار) شناخته می‌شود، راه‌حلی مؤثر برای جمع‌آوری داده‌های مرجع است. این فن‌آوری در برآورد مشخصه‌های کمی جنگل با تمام محدودیت‌های اجرا و عملکرد مخصوصاً در سطوح جنگلی وسیع قابل استفاده است؛ اما وقت‌گیر، پرهزینه، با زحمت فراوان در حمل و سوار کردن دستگاه و در نهایت پردازش داده‌ها با دشواری زیادی همراه خواهد بود [۱۶].

در سالیان اخیر لیزر اسکنر سیار (MLS)^۸ و اسکن لیزر شخصی (PLS)^۹ نیز به عنوان ابزارهایی که با دقت بالا ساختار کامل جنگل را در محورهای عمودی اسکن می‌کنند، مطرح شده‌اند. به‌طور ویژه MLS و PLS در کوتاه‌ترین زمان ممکن حتی در شرایط سخت و ناهموار توپوگرافی زمین قابلیت اسکن را دارا هستند [۱۷] و به نسبت لیزر اسکنر زمینی از دشواری کمتری برخوردار هستند، مخصوصاً زمانی که لیزر اسکنر زمینی در یک حالت اسکن چندگانه استفاده گردد

جنگل‌های زاگرس از زیست بوم‌های مهم و با ارزش ایران هستند که با گستره‌ای بیش از پنج میلیون هکتار از حساس‌ترین و مهم‌ترین جنگل‌های کشور به حساب می‌آیند [۱]. جنگل‌های زاگرس دارای خدمات اکوسیستمی فراوانی هستند و از لحاظ راهبردی، استراتژیک و ارائه خدمات محیط-زیستی از جمله تأمین و حفاظت منابع آب، ترسیب کربن و تأمین نیازهای اقتصادی-اجتماعی جمعیت قابل توجهی از مردم ایران، دارای اهمیت هستند [۱]. گونه غالب جنگل‌های زاگرس را بلوط ایرانی^۱ تشکیل می‌دهد، ساختار اولیه این جنگل‌ها ابتدا به صورت دانه‌زاد^۲ بوده به مرور بر اثر تخریب، تغییرات آب و هوایی و شرایط جوی، به منظور حفظ بقای خود به شکل شاخه‌زاد^۳ در آمده‌اند [۲].

اولین گام در مدیریت پوشش گیاهی، دستیابی به اطلاعات دقیق و به‌روز است [۳]. کسب آگاهی برای مدیریت و برنامه‌ریزی مؤثر در جنگل، نیازمند آماربرداری زمینی، استفاده از داده‌های سنجنش از دور^۴ و بهره‌گیری مناسب از سامانه‌های اطلاعات مکانی است [۴]. در جنگل‌داری روش‌های اسکن لیزری و فتوگرامتری اطلاعات ارزشمند و قابل استفاده‌ای را در مدیریت جنگل فراهم می‌کنند. فتوگرامتری از جمله روش‌های اقتصادی می‌باشد که به‌کارگیری آن در فضای جنگل به علت پیچیدگی عوارض طبیعی و مسائلی چون عدم ایجاد بافت مناسب در درختان و مسئله‌ی کمبود نور گاه‌ها محدودیت‌هایی را ایجاد می‌کند و این در حالی است که در روش‌های اسکن لیزری قیمت نسبتاً بالای دستگاه‌ها یا روش‌های پیچیده اندازه‌گیری و پردازش اغلب مانع از به‌کارگیری گسترده اپلیکیشن‌ها در سطوح وسیع می‌گردد [۶].

در پردازش‌های ثانویه داده‌های سه بعدی، تکنیک‌های جدید امکانات تازه‌ای را برای تشخیص و ارزیابی مولفه‌های مورد نیاز جنگل در اختیار کاربران قرار می‌دهند [۷]. داده‌های سه بعدی در آماربرداری جنگل مخصوصاً در مواردی چون مدل‌سازی با ادغام تکنیک‌های سه بعدی ارزشمند می‌شوند [۸]. اخیراً روش‌های خودکار برای جمع‌آوری داده‌های میدانی که شامل ابزاری بعضاً قابل حمل به صورت کوله‌پشتی یا دستی

۵ Unmanned aerial vehicle (UAV)

۶ Airborne Laser Scanner (ALS)

۷ Terrestrial Laser Scanner (TLS)

۸ Mobile Laser Scanner (MLS)

۹ Personal Laser Scanning (PLS)

۱ Quercus brantii

۲ جنگلی که از تجدید حیات یا تولید مثل از طریق بذر حاصل شده باشد.

۳ جنگلی که از تجدید حیات یا تولید مثل از طریق جست (پاجوش یا ریشه جوش) حاصل شده باشد.

۴ Remote Sensing

[۱۸]، [۱۳]. همین قضیه در مورد فتوگرامتری برد کوتاه با اخذ تعداد عکس زیاد از موقعیت‌های ممکن نیز صادق است [۱۳]، از طرفی سیستم MLS نسبتاً پیچیده، سنگین و هزینه‌بردار است [۱۶].

هرچند ابزارهای موجود نظیر؛ اسکنرهای لیزری، دوربین‌های متریک، سیستم‌های حرارتی یا مادون قرمز، سیستم لیدار هوایی و یا ترکیبی از آن‌ها امکان اخذ داده‌ها را با سرعت و دقت زیاد فراهم می‌آورند، اما همچنان استخراج اطلاعات سه بعدی گران‌قیمت بوده و علاوه بر بودجه‌ی زیاد، تجربه‌ی اپراتورهای متخصص در برداشت و پردازش داده را در این زمینه می‌طلبد.

در دو دهه اخیر با توسعه‌ی تکنیک‌های اندازه‌گیری جدید (اسکنر لیزری و لیدار) و افزایش قدرت محاسباتی ابزارهای شخصی و گوشی‌های هوشمند شکل رایج، آمار برداری سنتی جنگل در موجودی و ساختار تغییر یافت [۱۴]، [۷]. روش‌های جایگزین اسکن که هیچ تماس فیزیکی با سطوح ندارند به انواع مختلفی تقسیم می‌شوند، فن‌آوری‌هایی از جمله فتوگرامتری، نور ساختار یافته و فناوری زمان پرواز (TOF) [۱۹].

دوربین‌های زمان پرواز جایگزین مناسبی برای LiDAR^۲ و سیستم‌های لیزری هستند در واقع مبنای اصلی آن‌ها با LiDAR سازگار است، با این تفاوت که دوربین‌های TOF به‌طور کلی از مادون قرمز (لیزرهای نامرئی برای چشم انسان) به عنوان منبع نور استفاده می‌کنند و برای اندازه‌گیری از اسکن نقطه به نقطه استفاده نمی‌کنند بلکه از یک ماتریس یکپارچه چند سنسوری برای اندازه‌گیری چندین فاصله‌ی هم‌زمان استفاده می‌کنند [۲۰]، [۱۶]. دوربین‌های TOF قدرتمندتر و کوچک‌تر از LiDAR هستند به گونه‌ای که قابلیت اتصال به گوشی‌های همراه را دارند [۲۱]. همین مزیت می‌تواند دلیل مناسبی برای رشد و توسعه‌ی رویکرد فتوگرامتری برد کوتاه در طی یک دهه اخیر باشد.

با پیشرفت‌های اخیر در دستگاه‌های تجاری مانند گوشی‌های هوشمند و تبلت‌ها، علاوه بر فتوگرامتری، اسکن کردن با LiDAR و True Depth نیز امکان‌پذیر شده‌است. LiDAR شامل اندازه‌گیری‌های TOF است که مدت‌زمان پیمایش یک شی، ذره یا موج را تعیین می‌کند؛ به این صورت

که، LiDAR یک پالس یا سیگنال نور تعدیل‌شده را ساطع می‌کند و زمان بازگشت موج را اندازه می‌گیرد [۲۲]، [۱۹]. True Depth از فن‌آوری تابش سطحی حفره عمودی لیزر با شکست عنصر نور^۳ (VCSEL) استفاده می‌کند و شامل یک دوربین عادی، یک دوربین مادون قرمز، یک سنسور مجاورت و یک پروژکتور نقطه‌ای و همین‌طور یک دریچه نورگیر است. این سیستم توسط اپل^۴ نام‌گذاری و ثبت شده‌است. پروژکتور نقطه‌ای بیش از ۳۰۰۰۰ نقطه نور مادون قرمز را ساطع می‌کند که بر روی سطح منعکس می‌گردد. در نتیجه، دوربین مادون قرمز مجدد این نقاط نور را می‌گیرد و الگو توسط نرم‌افزار برای ساختن نقشه عمق آنالیز می‌گردد. با استفاده از این نقشه عمق، یک مدل ریاضیاتی توسط الگوریتم‌های یادگیری ماشین ساخته می‌شود [۲۴]، [۲۳]، [۱۹]. TrueDepth عمده‌تاً برای تشخیص چهره و تشخیص سطوح سه بعدی استفاده می‌گردد، در حالی که LiDAR قادر است تا با شتاب بخشیدن به تشخیص سطح ویژگی‌های جدیدی را برای واقعیت افزوده^۵ فراهم آورد [۱۹].

در سال ۲۰۲۰ شرکت اپل یک سنسور تشخیص نور برد کوتاه (LiDAR) مبتنی بر تشخیص عمق و یک رابط برنامه‌نویسی (API)^۶ واقعیت افزوده پیشرفته را بر روی دستگاه‌های iPhone pro^{۱۲} و iPad pro^{۲۰۲۰} عرضه کرد. LiDAR و True Depth فن‌آوری‌های موجود در جدیدترین دستگاه‌های اپل هستند که امکانات پیشرفته‌تری را برای دیجیتالی کردن اشیاء واقعی ارائه می‌دهند [۱۹]. LiDAR برخلاف فناوری نسل پیش از خود (Tango) اندکی تحت تاثیر شرایط نوری قرار می‌گیرد. بنابراین، اسکن سه بعدی در فضاهای باز و متاثر از نور طبیعی با این فناوری به راحتی امکان‌پذیر است و این در حالی است که سنسورهای RGB - D در فناوری Tango بشدت تحت تاثیر شرایط روشنایی قرار داشتند و از این رو، به‌طور کلی برنامه‌های کاربردی قابلیت اجرا تحت تاثیر نور متغیر طبیعی در فضای باز را نداشتند [۱۳].

هدف از این مطالعه، بررسی دقت ابر نقاط مترامک از LiDAR آیفون در محدوده‌ی تنه درختان در جنگل‌های زاگرس میانی با تأکید بر به حداقل رساندن محدودیت‌های عنوان‌شده، رسیدن به دقت بیشتر و بعضاً کم هزینه‌تر نسبت به روش‌های متداول و رایج در مطالعات پیشین است. چراکه

^۴ Apple Inc, Cupertino, CA, USA

^۵ Augmented Reality (AR)

^۶ Application Programming Interface

^۱ Time of Flight (TOF)

^۲ Light Detection and Ranging (LiDAR)

^۳ Vertical- Cavity Surface emitting Laser

فناوری جدید iPhone/iPad LiDAR نشان‌دهنده گام بعدی (پس از فناوری‌های UAV، TLS، PLS) به سمت یک روش مدرن، کارآمد و کم‌هزینه در برآورد مؤلفه‌های کمی ساختار و موجودی جنگل است.

علی‌رغم مدت‌زمان کوتاهی که از اضافه‌کردن مازول LiDAR بر روی ایفون و آپید می‌گذرد، در مطالعات گوناگونی از جمله مطالعات مربوط به جنگلداری کارایی این فناوری آزموده شده‌است. نتایج مطالعات عمدتاً بیانگر قابل اعتماد و اتکا بودن ابر نقاط به‌دست آمده از اندازه‌گیری‌های پارامترهای درختان حاصل از این فناوری بودند. در مطالعه‌ی کنونی متمرکز بر دقت ابر نقاط حاصل از این فناوری در شرایط جنگل‌های زاگرس میانی شدیم تا پیش از پرداختن به پارامترهای ساختاری و برآورد حجم درختان، در شرایط جنگل‌های ایران از فناوری مذکور اطمینان حاصل شود. در اینجا به برخی از مطالعات مرتبط با موضوع تحقیق می‌پردازیم: Gollob و همکاران (۲۰۲۱)، در حوزه آموزشی و پژوهشی دانشگاه علوم زیستی و منابع طبیعی وین در ۲۱ قطعه نمونه دایره‌ای، جهت برآورد قطر برابر سینه با ابر نقاطی از آپید پرو ۲۰۲۰ و هم‌زمان اسکنر لیزر شخصی با پنج روش متفاوت با احتساب زمان در هر قطعه نمونه گزارش کردند: زمان مورد نیاز برای آپید پرو دو برابر طولانی‌تر از اسکنر لیزر شخصی و دو و نیم برابر کمتر از ابزار سنتی متداول در جنگل است [۱۳].

Mokros و همکاران (۲۰۲۱)، در منطقه‌ی Kermnica اسلاواکی در ۸ قطعه نمونه مربعی شکل با ابزاری چون TLS، PLS، آپید پرو ۲۰۲۰ و طراحی یک دوربین چندگانه بر عملکرد تفکیک درخت و برآورد قطر برابر سینه متمرکز شدند. از بین ابزار به‌کار گرفته‌شده، بالاترین دقت پس از TLS در تفکیک درخت و نیز برآورد قطر برابر سینه مربوط به آپید پرو ۲۰۲۰ بود. طی این پژوهش مشخص شد، چنانچه هدف اندازه‌گیری قطر برابر سینه باشد دستگاهی چون آپید پرو می‌تواند جایگزین مناسبی برای ابزارهای هزینه‌بر و تخصصی باشد [۷].

Çakir و همکاران (۲۰۲۱)، در تحقیقی به بررسی قابلیت LiDAR موجود در آپید پرو برای اندازه‌گیری قطر برابر سینه و فاصله‌ی بین درختان پرداختند. آنان با مقایسه داده حاصل از آپید و روش‌های سنتی بیان کردند که

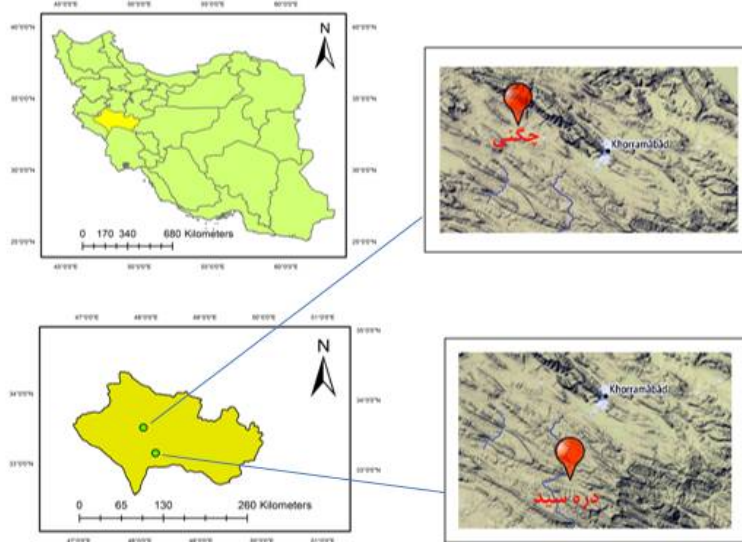
اندازه‌گیری دقیق مشخصه‌های جنگل با یک تبلت هزینه‌ای به مراتب پایین‌تر از برخی تجهیزات تخصصی دارد [۲۵]. Wang و همکاران (۲۰۲۱)، با اسکن ۱۰۱ درخت توسط LiDAR آپید پرو ۲۰۲۰ در حالت‌های چند درختی و تک درخت، با ۱۲ ترکیب و تنظیمات متفاوت در یک پارک شهری واقع در Zvolen به ارزیابی این فناوری برای اندازه‌گیری قطر برابر سینه اقدام کردند. تمامی ترکیب‌های به‌کار گرفته‌شده برای قطر برابر سینه نتایج قابل قبولی ارائه دادند. برای حالت چند درختی بهترین نتیجه با رزولوشن ۱۵ میلی‌متر و $RMSE\% = 7.52\%$ و برای اسکن در حالت تک‌درخت نتیجه با رزولوشن ۲۰ میلی‌متر و $RMSE\% = 7$ مطلوب‌ترین حالت گزارش گردید [۲۶].

۲- مواد و روش‌ها

۲-۱- منطقه مورد مطالعه

مناطق مورد مطالعه متشکل از دو سایت جنگلی دره سید از توابع شهرستان خرم‌آباد و بخشی از جنگل‌های شهرستان چگنی است که به ترتیب سایت اول در محدوده $17^{\circ} 33'$ تا $33^{\circ} 20'$ شمالی و در حدود طول $8^{\circ} 48'$ تا $13^{\circ} 48'$ شرقی و سایت دوم در محدوده طول جغرافیایی $50^{\circ} 47'$ تا $56^{\circ} 47'$ شرقی و $36^{\circ} 33'$ تا $42^{\circ} 33'$ شمالی قرار دارند (شکل-۱). با توجه به ماهیت داده‌ی مورد نیاز در این تحقیق، نمونه‌برداری از بین درختان بلوط ایرانی تک تنه، که اعوجاج کمی در تنه داشتند به صورت تصادفی انجام شد. تمرکز این مطالعه بر درختان تک‌تنه‌ای بود که در جنگل‌های زاگرس اهمیت ویژه‌ای از نظر حفظ خاک، زادآوری دانه و ساختار اصلی جنگل و گونه‌های گیاهی و جانوری در منطقه دارا می‌باشند. در انتخاب درختان نمونه نکاتی چند مدنظر قرار گرفت:

- ۱) نمونه لزوماً تک تنه باشد.
- ۲) ارتفاع شروع تاج بالاتر از قطر برابر سینه باشد و قبل از آن تاج منشعب نشده باشد.
- ۳) قطر قابل ملاحظه در تحقیق حداقل قطر تجاری (۲۰ سانتی‌متر) باشد.
- ۴) حداقل فاصله مناسب از جست گروه‌ها یا پایه‌های مجاور جهت برداشت ابر نقاط رعایت گردد.



شکل ۱- موقعیت مناطق مورد مطالعه در استان لرستان و کشور ایران

۲-۲- شرح روش تحقیق

۲-۲-۱- گواشی هوشمند مورد استفاده

استخراج ابر نقاط زمینی با اسکن گواشی هوشمند آیفون ۱۲ پرو با نمایشگر ۶/۱ اینچ، که شامل یک ماژول LiDAR در بخش عقب دستگاه در کنار دوربین‌های چندگانه است، انجام گرفت.

۲-۲-۱-۱- اپلیکیشن مورد استفاده

فرآیند اسکن در محیط اپلیکیشن Scaniverse انجام شد. هنگام استفاده از برنامه مذکور یک مثلث‌بندی^۱ در حال حرکت با ژيروسکوپ که از سه محور داخلی تشکیل شده و همانند یک واحد اندازه‌گیری است، شکل می‌گیرد. این مثلث‌بندی داخلی اپل با غلبه بر محدودیت‌های اندازه تا حدی با دقت مدل‌های سه بعدی برابری می‌کند.

خروجی ابر نقاط اخذ شده توسط سنسور LiDAR با برنامه Scaniverse، نقاط ابری خام نبوده و فرآیند ARkit LiDAR مستقیماً با محدودیت ۱۲ میلیون نقطه در هر ثانیه به ابر نقاط اجازه‌ی ثبت و خروجی گرفتن را می‌دهد [۲۷].

۲-۲-۱-۲- ماژول LiDAR

در مهندسی معکوس ماژول LiDAR (شکل ۲-۲) شامل یک لیزر ساطع‌کننده (تابش سطحی حفره عمودی لیزر با شکست عنصر نور)^۲ و یک گیرنده (تک فوتون) مادون قرمز نزدیک مبتنی بر آرایه دیود بهمنی^۳ نیمه هادی در سنسور تصویر است که بر اساس فناوری زمان پرواز مستقیم شناخته می‌شود و با کمک ماژول دوربین عریض (اصلی) و ماژول فوق عریض، سیستم عامل مربوطه امکان تولید مدل‌های سه بعدی رنگی و همچنین دستیابی به سنسورها و نداشت محیط سه بعدی داخلی را از طریق فناوری ARkit فراهم می‌آورد (شکل ۳-۳) [۱۳].

۲-۲-۲- اندازه‌گیری و جمع‌آوری داده

حجم درخت نشأت‌گرفته از برآیند دو عامل اصلی قطر و ارتفاع است که دقت متعامد طول و عرض به صورت توانی خود را در برآورد حجم نشان می‌دهد. با فرض عدم تأثیر اعوجاج ناشی از رویش نامنظم و عدم همگنی تنه، با در نظر گرفتن محدوده‌ای بین ۱۰ تا ۳۰ سانتی‌متر به صورت طولی و عرضی بر روی تنه درختان، به نحوی که اعوجاج حاصل از رویش قطری و نامنظم بودن گسترش رویش در طول تنه بر صاف و مستقیم بودن این فواصل اثرگذار نباشد (شکل-

^۳ Avalanche diode

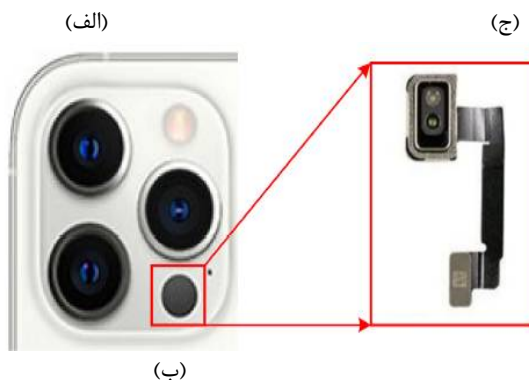
^۱ Mesh

^۲ VCSEL DOE (vertical -cavity surface emitting)

۴؛ در مجموع ۳۷ اصله درخت با قرار دادن نشانگرهایی^۱ قابل تشخیص (طول ۱/۵ و عرض ۱/۵ سانتی متر) (شکل-۶) در جهت طولی و عرضی تنه نشانه گذاری شدند.

۲-۲-۳- نحوه اسکن کردن

هر درخت با قدم زدن در اطراف آن تنها یک بار اسکن شد. زمان اسکن کردن می بایست پیشرفت اسکن درخت با صفحه‌ی نمایشگر گوشی هوشمند کنترل گردد تا اطمینان حاصل شود که درخت کاملاً اسکن شده است (شکل-۵).



شکل ۲- الف) دوربین‌های چندگانه گوشی آیفون ۱۲ پرو، ب) ماژول LiDAR و ج) بزرگ‌نمایی ماژول LiDAR نصب‌شده بر روی گوشی آیفون ۱۲ پرو

RMSE% (رابطه-۲)، آماره اریبی (رابطه ۳) Bias% (رابطه-۴) استفاده گردید. در این روابط، n تعداد نشان‌گرها و x_i و x_{ir} و \bar{x} به ترتیب مقادیر فواصل اندازه‌گیری شده توسط LiDAR، مقادیر اندازه‌گیری شده توسط کولیس و متوسط اندازه‌گیری فواصل نشان‌گرها توسط کولیس می‌باشد.

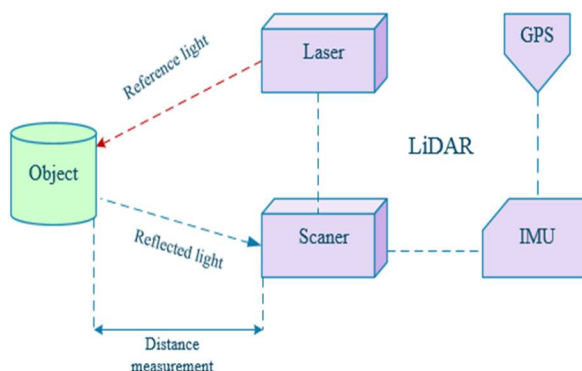
$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (x_i - x_{ir})^2}{n}} \quad (1)$$

$$RMSE\% = \frac{RMSE}{\bar{x}} \times 100 \quad (2)$$

$$Bias = \frac{\sum_{i=1}^n (x_i - x_{ir})}{n} \quad (3)$$

$$Bias\% = \frac{Bias}{\bar{x}} \times 100 \quad (4)$$

جهت تعیین شدت و نوع رابطه‌ی (مستقیم یا معکوس) بین دو روش اندازه‌گیری نیز از همبستگی پیرسون استفاده گردید.



شکل ۳- گردش کار فناوری LiDAR

۳- تجزیه و تحلیل آماری

جهت صحت‌سنجی فواصل طولی و عرضی، تا دقت میلی‌متر، توسط کولیس اندازه‌گیری شد. در محیط نرم‌افزار cloud compare ابر نقاط برداشت‌شده با فرمت ply وارد و پس از بهبود ابر نقاط، با استفاده از ابزارهای اندازه‌گیری موجود در محیط نرم‌افزار، فواصل نشانگرهای مشخص در قسمت تنه درختان اندازه‌گیری گردید (اشکال ۷ و ۸).

به منظور مقایسه‌ی مقادیر اندازه‌گیری شده توسط کولیس و مقادیر حاصل از ابر نقاط فناوری LiDAR از شاخص‌های اعتبارسنجی نظیر؛ RMSE (رابطه-۱)،



شکل ۵- وضعیت تنه و نشان‌گرها پس از اسکن تنه



شکل ۴- وضعیت تنه و نشان‌گرها پیش از اسکن تنه



شکل ۶- نشان‌گرهای نصب‌شده بر روی تنه درختان



شکل ۸- اندازه‌گیری فواصل عرضی نقاط بر روی تنه



شکل ۷- اندازه‌گیری فواصل طولی نقاط بر روی تنه

۴- نتایج

نقاط اندازه‌گیری‌شده‌ی طولی و عرضی در حالت مستقیم (اندازه‌گیری با کولیس) با فواصل نقاط اندازه‌گیری‌شده طولی و عرضی در حالت غیر مستقیم (اندازه‌گیری ابر نقاط توسط فناوری LiDAR) به نتایج آزمون همبستگی پیرسون پرداخته شد.

گونه مورد بررسی در این پژوهش بلوط ایرانی بوده که در جدول (۱)، آمار توصیفی فواصل نقاط اندازه‌گیری‌شده مستقیم (کولیس) در جهات طولی و عرضی و همین‌طور بررسی فواصل نقاط اسکن‌شده توسط فناوری LiDAR آورده شده‌است. به جهت تعیین نوع و شدت رابطه‌ی فواصل

جدول ۱- آمار توصیفی متغیرهای پژوهش (برحسب سانتی متر)

متغیر	تعداد	حداقل مقدار	حداکثر مقدار	میانگین	انحراف استاندارد
فواصل نقاط طولی - کولیس	۱۱۱	۲۰	۳۰	۲۹/۰۱	۳/۰۰۲
فواصل نقاط طولی - LiDAR	۱۱۱	۱۹/۰	۳۱/۰	۲۹/۰۱۷	۳/۰۸۸۶
فواصل نقاط عرضی - کولیس	۱۱۱	۱۰	۱۵	۱۳/۷۸	۲/۱۵۵
فواصل نقاط عرضی - LiDAR	۱۱۱	۸/۸	۱۶/۰	۱۳/۷۲۶	۲/۲۱۲۱

جدول ۲- نتایج آزمون همبستگی پیرسون

متغیرها	ضریب همبستگی	p-مقدار
فواصل نقاط طولی کولیس و نقاط طولی LiDAR	۰/۹۹۲	<۰/۰۰۱
فواصل نقاط عرضی کولیس و نقاط عرضی LiDAR	۰/۹۹۱	<۰/۰۰۱

می توان نتیجه گرفت که همبستگی میان اندازه‌ها، در هر دو جفت، مستقیم و قوی است. به منظور مقایسه‌ی روش اندازه‌گیری توسط فناوری LiDAR با اندازه‌گیری مستقیم توسط کولیس در برآورد فواصل نقاط طولی و عرضی از شاخص‌های RMSE، RMSE% و Bias% استفاده شد که نتایج آن در جدول (۳)، نشان داده شده‌است.

با توجه به مثبت بودن و مقادیر بالای همبستگی مقدار p-value (۰/۰۰۱) (جدول ۲)، می توان نتیجه گرفت که میان مقادیر فواصل نقاط طولی کولیس با فواصل نقاط طولی LiDAR و همین‌طور مقادیر فواصل عرضی کولیس با مقادیر فواصل عرضی LiDAR همبستگی معناداری وجود دارد. به علاوه با توجه به مثبت بودن و نزدیک بودن مقادیر ضرایب همبستگی به عدد ۰/۰۰۱، در جدول

جدول ۳- اعتبارسنجی ابر نقاط از LiDAR ایفون بر مبنای اندازه‌گیری مستقیم به وسیله کولیس

متغیرها	RMSE (cm)	RMSE%	اریبی (cm)	درصد اریبی
فواصل نقاط طولی کولیس و نقاط طولی LiDAR	۰/۳۹	۱/۳۳	۰/۲۶	٪۰/۹
فواصل نقاط عرضی کولیس و نقاط عرضی LiDAR	۰/۳۱	۲/۲۳	۰/۱۲	٪۰/۹

دو نقطه هم‌راستا (طولی و عرضی) بوده و این در حالی است که در مطالعات قبلی صحبت از پارامترهایی چون قطر برابر سینه و سطح مقطع می‌باشد که در این صورت مقایسه از این منظر چندان مطلوب به نظر نمی‌رسد. (جدول ۱)، ستون انحراف استاندارد نحوه‌ی پراکندگی (تغییرات) داده‌ها حول میانگین‌شان قابل رؤیت است که برای فواصل عرضی نقاط اندازه‌گیری شده توسط کولیس و فناوری LiDAR کمتر از مقادیر مربوط به فواصل نقاط طولی برآورده گردیده‌است.

در بررسی عوامل اثرگذار بر اسکن سه‌بعدی LiDAR آپید پرو ۲۰۲۰، Vogt و همکاران (۲۰۲۱) گزارش کردند؛ در حالی که سخت‌افزار و نرم‌افزار داخلی دستگاه تا حدی تعیین‌کننده‌ی دقت اسکن هستند، با این وجود عوامل خارجی چون بازتاب، شکل، رنگ و همچنین بافت سطوح

۵- بحث و نتیجه‌گیری

با پیشرفت‌های اخیر در دستگاه‌های تجاری مانند گوشی‌های هوشمند و تبلت‌ها اسکن کردن با LiDAR و True depth امکان‌پذیر گردید. تا قبل از این فناوری اکثر مطالعات مشابه معطوف بر پروژه‌ی Tango بود که در آن توسعه‌دهندگان برنامه‌های کاربردی عمدتاً بر واقعیت افزوده متمرکز بودند [۷]. با مرور نتایج مربوط به مطالعات Tango دقت RMSE% را در برآورد پارامترهای درختی از ۲٪ تا ۱۲/۶٪ متغیر می‌یابیم [۱۶]، [۷۱۴]، [۶]. با مراجعه به جدول (۳)، مقدار RMSE% فواصل عرضی در این محدوده قرار می‌گیرد اما برای فواصل طولی این مقدار کمتر از دامنه برآورد شده در مطالعات پیشین است. نکته قابل تذکر آن است که مطالعه‌ی کنونی متمرکز بر فاصله بین

برابرسینه در پژوهش Mokroš و همکاران عنوان کرد. از طرفی با فوکوس دوربین در حد برابر سینه، فاصله پرتاب مادون قرمز در ارتفاع بالاتر بیشتر می‌شود و از حالت پرتاب به صورت مستقیم منحرف می‌گردد به همین جهت، در ارتفاعات بالاتر و پایین‌تر از حد برابر سینه میزان نویز بازگشتی در برگشت نور بیشتر می‌گردد.

در یک جمع‌بندی می‌توان گفت طی مطالعه‌ی کنونی با تست ابر نقاط از فناوری LiDAR آیفون در جنگل‌های زاگرس به این نتیجه رسیدیم که، شرایط جنگل‌های زاگرس به گونه‌ای است که به علت تاج پوشش تنک، نور به اندازه‌ی کافی به تنه درختان می‌رسد و از آنجایی که این فناوری هم از نور در محدوده‌ی طیف مرئی و هم لیزر استفاده می‌کند دقت لازم را برای ما فراهم می‌آورد. از طرفی در شرایط جنگل‌های هیرکانی به علت زیراشکوب متراکم و فاصله نزدیک درختان امکان اندازه‌گیری تنه به راحتی میسر نمی‌گردد؛ همچنین، در شرایط جنگل‌های متراکم هیرکانی به سبب رطوبت بالا در منطقه و همین‌طور متراکم بودن تاج پوشش و نفوذ نور کمتر امکان ایجاد نویز در تصاویر فراهم می‌گردد اما در شرایط زاگرس به علت ارتفاع کم درختان و انشعابات تاج درختان در ارتفاع پایین‌تر، در بیشتر موارد، کل ارتفاع تنه قابل اندازه‌گیری است و این در حالی است که در شرایط گونه‌های هیرکانی تنها امکان دسترسی به بخشی از تنه درختان فراهم می‌گردد. در این مطالعه به سبب آنکه شکل طبیعی گونه‌ی بلوط در حالت تک تنه مدنظر بود، لذا در این مطالعه شکل شاخه‌زاد بلوط که حالت تخریب یافته این گونه است مورد مطالعه قرار نگرفت.

با توجه به نتایج تحقیق و با در نظر گرفتن قابلیت‌های فناوری LiDAR نظیر توان بالای اندازه‌گیری، پردازش اولیه‌ی ابر نقاط اخذ شده در محیط اپلیکیشن، تولید تصاویر رنگی، سبک و قابل حمل بودن ابزار، تعامل هرچه راحت‌تر با فناوری واقعیت افزوده، عدم نیاز به آموزش و اپراتور خاص و هزینه پایین که از مزایای فناوری LiDAR آیفون هستند، پیشنهاد می‌شود کارایی این فناوری در سایر مناطق جنگلی و با گونه‌های بیشتری بررسی گردد.

بر کیفیت اسکن اثرگذار می‌باشند و در مطالعه‌ی کنونی نیز اثرات عواملی چون عدم صافی پوست تنه درختان و بازتابش ضعیف چوب مشهود است. آنان همچنین بیان می‌کنند که برای اسکن اشیا کوچکی همچون لگو، فناوری LiDAR به‌تنهایی کفایت نمی‌کند اما برای کمک به واقعیت افزوده یا برای اسکن کردن اشیا بزرگ‌تر کارایی لازم را داراست [۱۹]. در بررسی اندازه تنه درختان نتایج مطالعات Gollob و همکاران (۲۰۲۱) و Mokros و همکاران (۲۰۲۱) مؤد دقت ابر نقاط از آپید پرو ۲۰۲۰ در تشخیص درخت و تولید ابر نقاط می‌باشد [۱۳]، [۷]. درجایی دیگر Bronoski و همکاران (۲۰۲۲) گزارش کردند که در فرآیند اسکن تنه زبری پوست درخت، اندازه‌ی تنه و فاصله از درخت نیز به تناسب اندازه درخت می‌تواند بر کیفیت اسکن اثرگذار باشد [۲۸]. پیش‌تر Bauwens و همکاران (۲۰۱۶) نیز بیان کرده بودند که عامل زبری پوست و اندازه تنه درخت می‌تواند عوامل اثرگذار بر PBH^۱ و DBH^۲ باشند [۲۹]. در اینجا نیز RMSE% پایین‌تر فواصل نقاط طولی نسبت به فواصل نقاط عرضی به سبب صاف بودن پوست تنه و همین‌طور تقارن بیشتر در جهت طولی تنه است. در مطالعه کنونی گونه بلوط مورد بررسی قرار گرفت که پوست تنه در گونه‌ی بلوط دارای رتیدوم است و دارای پوست اندازی اندک است. محدودیتی که شیاهای زیاد رتیدوم ایجاد می‌کند میزان انعکاس طیفی تنه را کم می‌کند و سبب می‌گردد در بلوط به دقت مناسب برسیم اما در گونه‌هایی مثل راش و مثل ملج که سطح تنه صاف است و پوست تنه رنگ روشنی دارد [۳۰] انعکاس طیفی و بافت تنه خود باعث ایجاد خطا (نویز) می‌شوند و ممکن است دقت مورد نیاز را در اندازه‌گیری‌های ما تأمین نکنند. تغییر زمان در اندازه‌گیری گونه‌هایی که دارای پوست تنه روشن هستند در نور کم صبحگاهی یا قبل از غروب آفتاب و تغییر فاصله از شیء هدف ممکن است در کاهش خطاهای احتمالی در سایر درختان اثرگذار باشد. در بررسی مقدار خطای اندازه‌گیری (جدول-۳)، با پژوهش Mokroš و همکاران (۲۰۱۸) مقدار خطای اندازه‌گیری را در ارتفاع ۱/۳۰ متر کمتر از ۰/۸ سانتی‌متر برآورد کردند [۷] که با اغماض از اختلاف جزئی از نتایج این تحقیق در توجیه مقدار ۰/۹ (جدول-۳)، می‌توان علت را در اندازه‌گیری حد

^۲ Diameter at Breast Height (DBH)

^۱ Perimeter at Breast Height (PBH)

- [۱] Jafarzadeh, A.A., Mahdavi, A., Fallah Shamsi, R. and Yousefpour, R. (۲۰۲۰). Economic evaluation of some of the most important ecosystem services in Zagros forests. *Environmental Sciences*. Vol. ۱۸/ No. ۱. PP. ۱۳۷-۱۵۰, (in Persian).
- [۲] Karamshahi, A., Karami, A. and Mohammadi, G. (۲۰۱۶). Offering structure quantitative spatial analysis model of Persian Oak species in two types of high forest and coppice of West Oak Forests (Case study: Karzan forests, Ilam Province). *Forest Research and Development*, Vol. ۲, No. ۳. PP. ۲۰۵-۲۱۸, (in Persian).
- [۳] Erfanfard, Y., Chenari, A., Dehghani, M. and Amiraslani, F. (۲۰۱۹). Effect of spatial resolution of UAV aerial images on height estimation of wild pistachio (*Pistacia atlantica* Desf.) trees. *Iranian Journal of Forest and Poplar Research* Vol. ۲۷ No. ۲. PP. ۱۶۹-۱۸۱, (in Persian).
- [۴] Pourahmad, M., Oladi, J. and Fallah, A. (۲۰۱۸). "Detection of Tree Species in Mixed Broad-Leaved Stands of Caspian Forests Using UAV Images (Case study: Darabkola Forest)." *Ecology of Iranian Forests* Vol. ۶, No. ۱۱. PP. ۶۱-۷۵, (in Persian).
- [۵] Tomaščík, J., Saloň, S., Tunák, D., Chudý, F. and Kardoš, M. (۲۰۱۷). "Tango in forests – An initial experience of the use of the new Google technology in connection with forest inventory tasks." *Comput. Electron. Agric.* vol. ۱۴۱, pp. ۱۰۹-۱۱۷, ۲۰۱۷, doi: ۱۰.۱۰۱۶/j.compag.۲۰۱۷.۰۷.۰۱۵.
- [۶] Mokoř, M., Mikita, T., Singh, A., Tomaščík, J., Chudá, J., Wezyk, P., Kuželka, K., Surový, P., Klimánek, M., Zięba-Kulawik, K., Bobrowski, R. and Liang, X. (۲۰۲۱). "Novel low-cost mobile mapping systems for forest inventories as terrestrial laser scanning alternatives." *International Journal of Applied Earth Observations and Geoinformation*. Vol. ۱۰۴. <https://doi.org/10.1016/j.jag.2021.102512>.
- [۷] Fabrika, M., Valent, P. and Scheer, L. (۲۰۱۸). "Thinning trainer based on forest-growth model, virtual reality and computer-aided virtual environment." *Environ Modelling and software*. Vol. ۱۰۰, pp. ۱۱-۲۳. <https://doi.org/10.1016/j.envsoft.2017.11.015>.
- [۸] Hyypä, E., Muhojoki, J., Yu, X., Kukko, A., Kaartinen, H. and Hyypä, J. (۲۰۲۱). "Efficient coarse registration method using translation- and rotation-invariant local descriptors towards fully automated forest inventory." *ISPRS Open Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*. vol. ۲ <https://doi.org/10.1016/j.ophoto.2021.100007>.
- [۹] Aicardi, I., Dabove, P., Lingua, A.M. and Piras, M. (۲۰۱۶). "Integration between TLS and UAV photogrammetry techniques for forestry applications." *IForest, Biogeosciences and Forestry*. Vol. ۱۰, no. ۱. PP. ۴۱-۴۷. Doi: ۱۰.۳۸۳۲/ifor17۸۰۰۰۹.
- [۱۰] Maltamo, M., Næsset, E. and Vauhkonen, J. (Eds). (۲۰۱۴). "Forestry Applications of Airborne Laser Scanning; Managing Forest Ecosystems." Springer Netherlands, Dordrecht, The Netherlands, ۲۷, ISBN ۹۷۸-۹۴-۰۱۷-۸۶۶۲-۱.
- [۱۱] Krause, S., Sanders, T.G.M., Mund, J.P. and Greve, K. (۲۰۱۹). "UAV-Based Photogrammetric Tree Height Measurement for Intensive Forest Monitoring". *Remote Sensing*. Vol. ۱۱, no. ۷. ۷۵۸; doi: ۱۰.۳۳۹۰/rs11۰۷۰۷۵۸.
- [۱۲] Gollob, C., Ritter, T., Kraßnitzer, R., Tockner, A. and Nothdurft, A. (۲۰۲۱). "Measurement of Forest Inventory Parameters with Apple iPad Pro and Integrated LiDAR Technology." *Remote Sensing*. Vol. ۱۳, no. ۱۶, ۳۱۲۹. <https://doi.org/10.3390/rs13163129>.
- [۱۳] Liang, X., Kukko, A., Kaartinen, H., Hyypä, J., Yu, X., Jaakkola, A. and Wang, Y. (۲۰۱۴). "Possibilities of a Personal Laser Scanning System for Forest Mapping and Ecosystem Services." *Sensors*. Vol. ۱۴, no. ۱. PP. ۱۲۲۸-۱۲۴۸. <https://doi.org/10.3390/s14011228>.
- [۱۴] Maltamo, M., Bollandsas, O.M., Naesset, E., Gobakken, T. and Packalen, P. (۲۰۱۱). "Different plot selection strategies for field training data in ALS-assisted forest inventory." *Forestry*. Vol. ۸۴. PP. ۲۳-۳۱.
- [۱۵] Fan, Y., Feng, Z., Mannan, A., Ullah Khan, A., Shen, C. and Saeed, S. (۲۰۱۸). "Estimating Tree Position, Diameter at Breast Height and Tree Height in Real-Time Using a Mobile Phone with RGB-D SLAM." *Remote Sensing*. Vol. ۱۰, no. ۱۱. ۱۸۴۵. <https://doi.org/10.3390/rs10111845>.
- [۱۶] Balenović, I., Liang, X., Jurjević, L., Hyypä, J., Seletković, A. and Kukko, A. (۲۰۲۰). "Hand-held personal laser scanning—current status and perspectives for forest inventory application." *Croat. J. For. Eng.*, ۲۰۲۰, vol. ۴۲, PP. ۱۶۵-۱۸۳.
- [۱۷] Gollob, C., Ritter, T., Wassermann, C. and Nothdurft, A. (۲۰۱۹). "Influence of Scanner Position and Plot Size on the Accuracy of Tree Detection and Diameter Estimation Using Terrestrial Laser Scanning on Forest Inventory Plots." *Remote Sensing*. Vol. ۱۱, no. ۱۳. ۱۶۰۲; <https://doi.org/10.3390/rs11131602>.
- [۱۸] Vogt, M., Rips, A. and Emmelmann, C. (۲۰۲۱). "Comparison of iPad's LiDAR and TrueDepth capabilities with an Industrial 3D Scanning solutions." *Technologies*. vol. ۹, no. ۲۵. <https://doi.org/10.3390/technologies9020250>.
- [۱۹] Foix, S., Alenya, G. and Torras C. (۲۰۱۱). "Lock-in time-of-flight (ToF) cameras: A survey." *IEEE Sensors Journal*. Vol. ۱۱, no. ۹. PP. ۱۹۱۷-۱۹۲۶.

- [۲۱] Aijaz, M. and Sharma, A. (۲۰۱۶). Google Project Tango. In Proceedings of the ۲۰۱۶ International Conference on Advanced Computing, Moradabad, India, ۲۲-۲۳ January ۲۰۱۶.
- [۲۲] Schuon, S., Theobalt, C., Davis, J. and Thrun, S. (۲۰۰۸). "High-quality scanning using time-of-flight depth superresolution." In Proceedings of the ۲۰۰۸ IEEE Computer Society Conference on Computer Vision and Pattern Recognition Workshops, Anchorage, AK, USA, ۲۳-۲۸ June ۲۰۰۸; IEEE: Piscataway, NJ, USA, ۲۰۰۸. ISBN ۹۷۸۱۴۲۴۴۲۳۳۹۲.
- [۲۳] Carey, N., Nagpal, R. and Werfel, J. (۲۰۱۷). "Fast, accurate, small-scale ۳D scene capture using a low-cost depth sensor." IEEE Winter Conf. Appl. Comput. Vis. ۲۰۱۷, ۱۲۶۸-۱۲۷۶.
- [۲۴] Alfaro-Santafé, J., Gómez-Bernal, A., Lanuza-Cerzócimo, C., Alfaro-Santafé, J.V., Pérez-Morcillo, A. and Almenar-Arasanz, A.J. (۲۰۲۰). "Three-axis measurements with a novel system for ۳D plantar foot scanning: iPhone X." *Footwear Science*. Vol. ۱۲, no. ۲. PP. ۱۲۳-۱۳۱.
- [۲۵] Çakir, G.Y., Post, C.J., Mikhailova, E.A. and Schlautman, M.A. (۲۰۲۱). "۳D LiDAR Scanning of Urban Forest Structure Using a Consumer Tablet." *Urban Science*. Vol. ۵, no. ۴. <https://doi.org/10.3390/urbansci5040088>.
- [۲۶] Wang, Y.; Hyypä, J.; Liang, X.; Kaartinen, H.; Yu, X.; Lindberg, E.; Holmgren, J.; Qin, Y.; Mallet, C. and Ferraz, A. (۲۰۱۶). "International benchmarking of the individual tree detection methods for modeling ۳-D canopy structure for silviculture and forest ecology using airborne laser scanning." *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sens.* Vol. ۵۴, no. ۹. PP ۵۰۱۱-۵۰۲۷.
- [۲۷] Luetzenburg, G., Kroon, A. and Bjørk, A.A. (۲۰۲۱). "Evaluation of the Apple iPhone ۱۲ Pro LiDAR for an Application in Geosciences." *Scientific Reports*. Vol. ۱۱. <https://doi.org/10.1038/s41598-021-01763-9>.
- [۲۸] Bobrowski, R., Monika, W., Kulawik, Z.K and Piotr, W. (۲۰۲۲). "Best Practices to Use the Ipad Pro Lidar for Some Procedures of Data Acquisition in the Urban Forest." Available at SSRN: <https://ssrn.com/abstract=۴۰۳۰۵۷۲> or <http://dx.doi.org/10.2139/ssrn.4030572>.
- [۲۹] Bauwens, S., Bartholomeus, H., Calders, K. and Lejeune, P. (۲۰۱۶). "Forest inventory with terrestrial LiDAR: A comparison of static and hand-held mobile laser scanning." *Forests*. vol. ۷, no. ۶. <https://doi.org/10.3390/f7061127>.
- [۳۰] Fatohollahi, M., Soosani, J., Mohamadzadeh, A., Puttonen, E. and Hosseinzadeh, R. (۲۰۲۲). "The effectiveness of smartphone time-of-flight technology in estimating the diameter of some one of the representative trees of the Hyrcanian forests." *Journal of Geomatics science and Technology*. Vol. ۱۱, no. ۴.