مقایسه روش‌های اندازه‌گیری خصوصیات هندسی درختان

ایوب جعفری ملک آبادی[1*]، مهدی خجسته‌پور[2]، باقر عمادی[2]

۱ و ۲ – به ترتیب دانشجوی دکتری و دانشیار گروه مهندسی مکانیک بیوسیستم، دانشکده کشاورزی، دانشگاه فردوسی مشهد

* نویسنده مسئول: jafari.ayoub@stu.um.ac.ir

چکیده

اطلاعات مشخصات هندسی گیاهان کاربردهای بسیار زیادی در بخش کشاورزی دارد. برخی از کارهای مهم کشاورزی که می‌توانند از این اطلاعات مشخصات هندسه گیاه استفاده کنند عبارتند از: سمپاشی و آفت‌کش‌ها، آبیاری و کوددهی. این اطلاعات را با استفاده از روش‌های مختلف می‌توان بدست آورد. اما در این زمینه توجه به چند نکته فنی و اقتصادی ضروری است. نکاتی مانند بهبود سیستم‌های تشخیص، برای مرحله پس از پردازش و ارتقای سرعت محاسبات و تصمیم گیری مخصوصا با توجه به پیشرفت‌های نرم افزارها، و همچنین تولید سنسور و سیستم‌های کنترل کم هزینه به منظور تسهیل پیاده‌سازی در مقیاس بزرگ. در این پژوهش روش‌های اندازه‌گیری خصوصیات هندسی درختان مقایسه شدند. روش‌ها عبارتند از: سیستم‌های مبتنی بر فراصوت، تصویربرداری دیجیتال، حسگر نور، تصاویر رادار با وضوح بالا، بینایی ماشین و حسگر لیدار (LIDAR) . ارزان‌ترین روش که دقت آن تا حدودی مناسب می‌باشد روش حسگر التراسونیک است. سریعترین و دقیق‌ترین روش استفاده از حسگر لیدار است. اما هزینه پیاده سازی این روش زیاد است. در شرایطی که دقت و سرعت بالا مد نظر است و هزینه زیاد مشکل‌زا نیست، این روش می‌تواند تاج درخت را بخوبی مدل سازی نماید. دقت و هزینه سامانه‌های ماشین بینایی و بینایی استریو متوسط ارزیابی شد. به نظر می رسد در صورت دستیابی به الگوریتم مناسب برای مدلسازی سه بعدی درختان، این روش می‌تواند بهترین روش برای اندازه‌گیری خصوصیات هندسی درخت باشد. همچنین حسگر لیدار و سیستم دید استریو احتمالا امیدوارکننده‌ترین و تکمیل‌کننده‌ترین روش برای دستیابی به تصاویر و نقشه های سه بعدی تاج درختان هستند.

واژه‌های کلیدی: بینایی ماشین، حسگر فراصوت، حسگر لیدار، حسگر نور، مدل سه بعدی درخت.

مقدمه

جنبه‌های ساختاری تاج درختان در سطوح مختلف بسیار مهم می‌باشد. ساختار گیاه فرآیندهای بیوفیزیکی، از جمله: فتوسنتز، رشد، تبخیر و تعرق را تحت تاثیر قرار می‌دهد (Li *et al*., 2002; Pereira *et al*., 2006). همچنین ویژگی هندسی تاج درخت به طور مستقیم به رشد درخت و بهره‌وری ارتباط دارد، و از این رو می تواند مشخص کننده شاخص زیست توده درخت و برآورد رشد، پیش‌بینی عملکرد، برآورد مصرف آب و ... باشد و در دراز مدت نظارت دقیق بر بهره‌وری را به همراه دارد (Lee and Ehsani, 2009). بنابراین، بسیاری از فعالیت‌های کلیدی کشاورزی از جمله سمپاشی، آبیاری، کوددهی و تربیت و هرس محصولات، تا حد زیادی بستگی به خواص ساختاری و هندسی درختان دارند (Rosell and Sanz, 2012).

اندازه گیری اندازه تاج درخت با توجه به ساختار رشد پیچیده و اشکال نامنظم درختان پیچیده است. چرا که اندازه‌گیری هزاران جزء از درختان (تنه، شاخه، برگ، گل و میوه) مشکل است. اساسا سه دلیل برای این مشکل وجود دارد: (الف) در نظر گرفتن تعداد زیادی از عناصر، (ب) تجمع آن‌ها در یک فضای نسبتا کوچک سه بعدی، که نشان می دهد برخی از عناصر همیشه تا حدی یا کاملا پنهان خواهند بود و (ج) پیچیدگی هندسی همه این عناصر (Zheng and Moskal, 2009). در حال حاضر محققین در حال انجام تحقیقات در زمینه‌های مختلف روش‌های غیر مخرب برای اندازه‌گیری ویژگی‌های ساختاری تاج درختان، از قبیل حجم، تعداد شاخ و برگ و شاخص سطح برگ هستند. روش‌های غیرمخرب مختلف عبارتند از: تجزیه و تحلیل تصویر، تجزیه و تحلیل نفوذ نور در تاج، حسگر فراصوت و روش‌های اسکن لیزری (Rosell and Sanz, 2012). اگر چه اندازه‌گیری مشخصات هندسی درخت پیچیده است اما مهم و ضروری است. این اهمیت به این دلیل است که ویژگی تاج پوشش درخت به طور مستقیم به رشد درخت و بهره وری ارتباط دارد و در نتیجه می تواند برای تخمین رشد و زیست توده، پیش بینی عملکرد، برآورد مصرف آب و در دراز مدت نظارت بر بهره وری استفاده شود (Lee and Ehsani, 2009). ویژگی‌های تاج درخت اطلاعات ارزشمندی را برای مدیریت درخت در کاهش هزینه های تولید و نگرانی عمومی در مورد آلودگی محیط زیست ارائه می کند. بنابراین، طیف وسیعی از فعالیت‌های کلیدی کشاورزی از جمله سمپاشی، آبیاری، کوددهی و تربیت و هرس محصول تا حد زیادی بستگی به خواص ساختاری و هندسی بخش قابل مشاهده درختان دارد.

هرچند روش‌های بسیاری برای این منظور وجود دارد، اما این روش‌ها دارای نقاط قوت و ضعفی هستند و باید در زمان استفاده از آن‌ها به نکات و مشکلات پیش رو توجه شود. نکاتی مانند روش تشخیص درخت، میزان دقت، سرعت انجام کار، سرعت تصمیم-گیری انجام عملیات و همچنین هزینه پیاده سازی روش مورد نظر در مقیاس واقعی.

در این پژوهش روش‌های اندازه‌گیری خصوصیات هندسی درختان مقایسه شد. روش‌ها عبارتند از: حسگر فراصوت، تصویربرداری دیجیتال، حسگر نور، تصاویر رادار با وضوح بالا، بینایی ماشین و حسگر لیدار .

مواد و روش ها

روش‌های اندازه‌گیری مشخصات هندسی درخت

پارامترهای ساختاری و هندسی درختان، از قبیل حجم، سطح و تراکم تاج پوشش درخت معمولا به روش دستی و با اندازه‌گیری ارتفاع و عرض و نمونه برداری های مخرب از برگ انجام می‌شود که کارهای سخت و زمانبر برای باغات میوه هستند. بنابراین روش‌های سنجش از دور به عنوان روش جایگزین در طول ۱۰ سال گذشته مورد بررسی قرار گرفته است. در ادامه این روش‌ها بررسی و مقایسه می‌شوند.

حسگر فراصوت

حسگرهای فراصوت سه بخش اصلی دارند. ۱- انتشاردهنده موج فراصوت، ۲- زمان سنج و ۳- دریافت کننده موج. این حسگر بیشتر برای اندازه‌گری فاصله استفاده می‌شود. این کار بر مبنای زمان رسیدن موج از نقطه انتشار به نقطه مورد نظر است. مزیت اصلی این روش قیمت ارزان آن است. عیب اصلی آن زاویه واگرایی زیاد موج فراصوت است. این مسئله دقت و رزولوشن اندازه-گیری را محدود می کند و همچنین برای پوشش یک نمای کشاورزی نیاز به استفاده از چندین حسگر فراصوت است (Rovira-Mas *et al*., 2005). با این وجود این روش در حال حاضر بسیار استفاده می شود و نتایج خوبی نیز گزارش شده است.

حسگر فراصوت مقرون به صرفه و در شرایط فضای باز نسبتا قوی است و قادر به برآورد حجم تاج درختان به طور رضایت بخشی می‌باشد. اما در طول فصل رشد، فاصله ردیف‌ها به دلیل توسعه تاج درخت کمتر می‌شود. بنابراین، این روش برای تشخیص مناسب تاج در نهالستان‌ها و باغات با فاصله کم بین ردیف‌ها، نامناسب می‌باشد. پس یک حسگر برای اندازه‌گیری کافی نیست و نیاز به چند حسگر فراصوت است که مشکل آن تداخل آن‌ها باهم می‌باشد. با توجه به اینکه حسگرهای فراصوت در اصل برای اندازه گیری فواصل در محیط های صنعتی طراحی شده اند، که در آنجا اشیاء سفت و سخت هستند و سطح بازگشت عمود بر جهت امواج فراصوت است، مزیت آن‌ها برای اندازه‌گیری باغ ممکن است ناچیز باشد. محققین نشان دادند که دقت و تکرارپذیری اندازه گیری مافوق صوت پایین تر از اندازه گیری دستی در سرعت ۱/۵-۱ متر بر ثانیه بود (Jeon *et al*., 2011; Hocevar *et al*., 2010; Schumann and Zaman, 2005). در تحقیقی پژوهشگران نرم افزاری برای نقشه‌برداری زمان واقعی اندازه تاج درخت با استفاده از فراصوت تهیه نمودند. اطلاعات جمع آوری شده با این سامانه خودکار با داده‌های اندازه‌گیری دستی از ۳۰ درخت مقایسه شد. نتایج نشان داد تفاوت معنی‌داری بین اندازه درخت محاسبه شده توسط سامانه فراصوت و روش دستی برای ارتفاع ۴/۳-۲/۱ متر و حجم ۵۴-۶/۳ مترمکعب برای هر درخت وجود نداشت (Schumann and Zaman, 2005). در پژوهشی به منظور سمپاشی درختان انگور از سمپاش هوا-کمک دارای چند نازل که به سه حسگر فراصوت و سه الکترو سوپاپ مجهز بود، برای پاشش متناسب با عرض تاج، استفاده شد. مقدار محلول استفاده شده در حالت نرخ ثابت ۳۰۰ لیتر در هکتار در نظر گرفته شد. آن‌ها کاهش به طور متوسط ۵۸ درصدی مایع در مقایسه با حالت نرخ ثابت، با تاثیر در حفاظت محصول و نشست سم مشابه و یا حتی بهتر را

گزارش دادند. تجزیه و تحلیل دقیق نشست محلول تفاوت بین پایین، وسط و قسمت بالای محصول، با توجه به توزیع برگ در ارتفاع درخت را نشان داد. این کاهش مهم در حجم پاشش می تواند، کاهش معادل سموم حفاظت گیاه را به همراه داشته باشد اما تحقیقات بیشتری برای تضمین اثر بیولوژیکی این کاهش دوز مورد نیاز است (Gil *et al*., 2007 and Llorens *et al*., 2010). در گزارشی نتیجه استفاده از سامانه متغیر با حسگرهای فراصوت و شیرهای برقی مناسب، صرفه جویی مایع به میزان ۷۰، ۲۸ و ۳۹ درصد در مقایسه با روش متداول برای باغات زیتون، گلابی و سیب ذکر شده است (Solanelles *et al*., 2006). همچنین محققین دیگر سمپاش نرخ متغیر مجهز به حسگر فراصوت برای سمپاشی تاکستان ساختند که پاشش را بر اساس حجم درخت انجام می‌داد. روابط خوب بین حجم پاشش و مشخصات تاج مشاهده شد. صرفه‌جویی برآورد شده در هزینه‌ها نسبت به سمپاش معمولی ۲۱/۹ درصد بود (Gil *et al*., 2013).

در حالی که حسگرهای فراصوت در مطالعات قبلی برای تشخیص اندازه تاج پوشش استفاده شده است، عملکرد حسگر به خوبی تحت شرایط مزرعه مورد بررسی قرار نگرفته است. علاوه بر این، کاربرد آن چالش‌های منحصر به فردی برای یک سامانه سنجش تاج دارد، به عنوان مثال، آرایش درختان نسبتا متراکم، تغییر رنگ و اندازه تاج زیاد و فضای کاری محدود بین ردیف برای سامانه سنجش (Jeon *et al*., 2011). اگر چه عملکرد حسگر فراصوت در گزارش تحقیقات مختلف ذکر شده است، سوال در مورد عملکرد حسگر در شرایط مزرعه متراکم، کاربرد پاشش، و شرایط عملیاتی چند حسگر هنوز هم باقی مانده است. به عنوان مثال، Zaman and Salyani (۲۰۰۴) تاثیر تراکم تاج و سرعت در تشخیص تاج درخت با استفاده از حسگر فراصوت را بررسی کردند. آنها گزارش دادند که سرعت حرکت پایشگر و تراکم شاخ و برگ در اندازه‌گیری‌های حسگر اثر می‌گذارد. اگر چه حسگر فراصوت چندگانه در یک سامانه به منظور تشخیص تاج درخت مورد استفاده قرار می‌گیرد، اما، این سامانه یک گزینه عملی برای کاربرد نهالستان به دلیل تغییرات سریع اندازه تاج درخت، نیست (Jeon *et al*., 2011).

حسگر نور

ابزار تجاری قابل حمل سنجش نور (Ceptometers) وجود دارند که نور متقاطع درخت از پرتوهای بالا و پایین تاج پوشش را اندازه‌گیری می کنند. استفاده از سنسور نور بر مبنای تصاویر نور–سایه و یک سیستم شبکه سنسور سنجش نور روی زمین است (Giuliani *et al*., 2000). این سنسور یک ترانزیستور نور کم هزینه با حساسیت طیفی در باند موج ۳۰۰–۱۱۰۰ نانومتر می باشد. سایه روی زمین در طول روز برای ارائه تصویری سایه دیجیتالی ثبت می شود. اندازه و شکل تاج درخت از طریق تصویربرداری کامپیوتر با تجزیه و تحلیل تصاویر سایه های مختلف در موقعیت های متفاوت خورشیدی در طول روز به دست می آید. این سیستم دارای محدودیت های مختلف عملی است. با توجه به الزامات مورد نیاز اندازه گیری، استفاده از اسکنر های نور به روزهای آفتابی و آسمان روشن و شرایط باد با سرعت کم و همچنین پوشش گیاهی هموار (که سایه ای ایجاد کند که خطوط ان به اندازه کافی قابل مشاهده باشد) محدود شده است. مجموعه داده‌ها در هر موقعیت ثبت می‌شود، اما این باعث می‌شود که فرآیند اندازه

گیری بسیار وقت گیر شود. علاوه بر این، این مدل توانایی ایجاد مدل سه بعدی بطور مستقیم را ندارد و با استفاده از پردازش تصاویر، سایه را به دست میآورد.

تصاویر رادار

روش رادار در محدوده مایکروویو کار می کند و در نتیجه به طور نسبی مستقل از شرایط جوی است. در تحقیقات اخیر برای مدل سه بعدی تک درخت از این روش در ترکیب با روش‌های فیزیولوژیکی استفاده شده است. روش‌های تصویر برداری هوایی به منظور برآورد اندازه تاج درخت استفاده شد. تصاویر ماهواره‌ای نیز به منظور برآورد حجم تاج درختان در جنگل استفاده شده است. با این حال، مقیاس این روش‌های سنجش از راه دور نسبتا بزرگ است و در نتیجه رزولوشن (دقت) سنجش ممکن است برای برخی کاربردهای بلادرنگ مناسب نباشد. علاوه بر این، در روش های سنجش از راه دور به طور معمول یک فاصله‌ی زمانی بین تشخیص و انجام عمل، و در نتیجه اشتباهات زمان انجام عملیات وجود دارد (Jeon *et al*., 2011).

بینایی ماشین

الف) تصویر برداری دیجیتال

این روش یک تصویر دو بعدی را به ما می دهد. ابعاد درخت با پردازش نواحی سبز بدست می آید. اما بدست آوردن مدل سه بعدی درخت با این روش کمی سخت و کم دقت است. د. روش برای مدلسازی سه بعدی وجود دارد. یکی با فرض متقارن بودن درخت تصویر حول محور درخت دوران داده می شود. در روش دیگر از چند نما تصویر تهیه می شود و هر تصویر مخروط ناقص در نظر گرفته می شود. سپس از تقاطع مخروط ها حجم تاج درخت تخمین زده می شود (Rosell and Sanz, 2012).

در تحقیقی به منظور تشخیص شکل تاج درخت سیب از یک دوربین RGB (Sony ICX204) استفاده شد و تجزیه و تحلیل تصویر برای یک سمپاش نرخ متغیر زمان واقعی، مناسب تشخیص داده شد. این پروژه در حال توسعه می‌باشد و در حال حاضر بر روی یک درخت و ارزیابی مزرعه‌ای تمرکز دارد. کاهش مقدار سم و در نتیجه کاهش هزینه و آلودگی محیط زیست نتایج این تحقیق بود (Hocevar *et al*., 2010). نتایج جدیدتری از این تحقیق ارائه نشده است و در دسترس نمی‌باشد.

ب) بینایی استریو

از جمله روش‌های سه بعدی سازی در حوزه بینایی ماشین استفاده از دوربین‌های سه بعدی و دوربین‌های استریو می‌باشد. مزیت اصلی این روش بدست آوردن ابر نقاط با درجه وضوح بالا و امکان ارتباط با سیستم اطلاعات جغرافیای (GIS) است. اما این روش نیاز به کالیبراسیون مناسب دارد و در نماهای کشاورزی مناطق بدون بافت و همپوشانی زیاد نیز وجود دارد. چالش استفاده از دوربین‌های سه بعدی در محدودیت آن‌ها برای برآورد عمق می‌باشد. دوربین‌های استریو دارای دو دوربین در یک مجموعه هستند که به صورت همزمان تحریک می‌شوند. محدودیت این دوربین‌ها در تنوع آن‌ها می باشد. مثلا فاصله دوربین‌ها قابل تنظیم نمی-باشد و در بازار تنها دوربین‌هایی با فاصله لنزهای مشخص وجود دارد. برای رفع این مشکل معمولا از دو دوربین مجزا دارای

مشخصات یکسان استفاده می‌شود. در روش استریو ابتدا باید کالیبراسیون دوربین‌ها انجام شود. بعد از تصویربرداری دو عمل مهم یافتن نقاط مشترک و استخراج مدل سه بعدی توسط تطابق نقاط مشترک می‌باشد. مهمترین چالش در استفاده از این روش برای سه بعدی سازی درختان پیدا کردن نقاط مشترک می‌باشد.

تا کنون استفاده از روش بینایی استریو در تحقیقاتی دیگر (در زمینه‌های غیر از تخمین مشخصات درخت) موفقیت آمیز بوده است. اما این روش تاکنون به منظور اندازه‌گیری پارامترهای هندسی درختان و مدلسازی سه بعدی درختان استفاده نشده است. در حال حاضر تحقیق در این زمینه در گروه مهندسی بیوسیستم دانشگاه فردوسی مشهد در حال انجام می‌باشد. نتایج این پژوهش در آینده نزدیک منتشر خواهد شد.

در مطالعه‌ای تشخیص خودکار مسیر حرکت تراکتور و جداسازی نوار محصول ردیف شده از سطح مزرعه با استفاده از روش بینایی استریو و آموزش بافت انجام شد. اطلاعات شکل برای طبقه‌بندی قوی برای تغییرات بزرگ در شرایط نوری به کار گرفته شد که تا حد زیادی احتمال این که یک شی با تاثیر در سیگنال‌های سامانه دید استریو منجر به اشتباهات فاحش در تخمین موقعیت هدف شود را کاهش می‌داد. طبقه‌بندی برای داده‌های سامانه هدایت بینایی استریو روی تراکتور ارزیابی شد. این سامانه نشان داد که قادر به طبقه‌بندی نوار مواد گیاهی با آموزش ظاهر آن می‌باشد (Blas and Blanke, 2011). در تحقیقی پارامترهای رشد گیاه با استفاده از مدل بینایی استریو برآورد شد. ایشان گزارش دادند که برای استفاده عمومی از این سامانه هیچ تنظیم خاص و یا سازگاری نیاز نیست و برآورد دقیق از ارتفاع بوته (خطا ۴ درصد) و پوشش برگ (خطا ۴/۵ درصد) به دست می‌آید. همچنین، همبستگی قوی (R^2=0.94) بین زیست توده اندازه‌گیری شده گیاه و حجم برآورد شده آن وجود داشت که در آزمون اعتبار سنجی برآورد دقیق از زیست توده (خطا ۴ درصد) بدست می‌آمد. در این روش برای اندازه‌گیری حجم ابتدا مدل سه بعدی گیاه استخراج شد و سپس از مجموع وکسل‌ها حجم محاسبه شد. از آنجا که این مدلسازی سه بعدی ارائه شده ارزان، در دسترس و موثر پردازش شده است، می‌توان آن را بر روی وسایل کشاورزی برای کاربردهای بلادرنگ پیاده سازی نمود (Lati *et al*., 2013).

حسگر لیدار

تشخیص نور و مسافت‌یابی فن‌آوری جدیدی است که توسط آن می‌توان حجم تاج و یا سطح برگ درخت را برآورد نمود. در این روش فاصله بین حسگر و هدف به دو صورت اندازه‌گیری می شود ۱) اندازه‌گیری زمانی که یک پالس لیزری بین حسگر و هدف طی می‌کند و ۲) اندازه گیری اختلاف فاز بین ارسال و انعکاس پرتوهای لیزر. مزیت این روش سرعت و دقت بالای اندازه‌گیری است. البته در محیط پر از گرد و غبار کارایی آن کم می شود. استفاده از این روش ممکن است گزینه‌های مختلف مربوط به وضوح تصویر و حالت‌های اسکن داشته باشد. در نتیجه، دقت و صحت داده‌ها و پارامترهای مشتق شده حسگر لیدار متاثر از تنظیمات حسگر هستند و ممکن است با توجه به ویژگی‌های رویشی محصولات درخت متفاوت باشد (Méndez *et al*., 2013). نتایج استفاده از این سامانه‌ها تا حدودی مطلوب گزارش شده است. فاصله ردیف کم در یک

نهالستان ممکن است استفاده از حسگر لیدار را محدود کند. همچنین این حسگر نسبتا گران (۲۰۰۰–۶۰۰۰ دلار) می‌باشد. علاوه بر این، یک وسیله در باغ باید با شرایط ردیف‌های متعدد در یک زمان کار کند. هر ردیف به یک حسگر لیدار مختص برای اندازه-گیری تغییرات تاج نیاز دارد. بنابراین کنترل عملیات نیاز به چندین حسگر لیدار دارد. در این صورت، هزینه‌های استفاده از چنین سامانه‌ای افزایش می‌یابد و باعث غیرعملی شدن آن می‌شود (Jeon *et al*., 2011).

در مطالعه‌ای پژوهشگران از حسگر لیدار در یک نمونه اولیه سمپاش به منظور تنظیم میزان دوز برای کاربرد نرخ متغیر زمان واقعی استفاده نمودند. در مقایسه با سامانه‌های مرسوم، آزمایش نمونه اولیه، منجر به صرفه جویی در حجم ۴۴/۳۳ درصد شد (Escolà *et al*., 2007). همچنین در تحقیق دیگری سمپاش نرخ متغیر مجهز به حسگر لیدار برای باغ ساخته شد که پاشش را بر اساس حجم تاج درخت انجام می‌داد. رابطه قوی بین سطح مقطع تاج و نرخ جریان پاشش (R^2=0.926) مشاهده شد (Escolà *et al*., 2013).

همچنین در پژوهشی دیگر محققین نرم‌افزاری معرفی نمودند که یک باغ مجازی ایجاد می‌نماید و سپس اجازه شبیه‌سازی با استفاده از حسگر لیزری را می‌دهد. برای اعتبارسنجی تنظیمات حسگر لیزری، سطح برگ درخت شبیه‌سازی شده با پارامترهای بدست آمده از اندازه‌گیری لیدار، سطح برگ، کل مساحت (برگ و چوب) و سطح لایه بیرونی برگ، مقایسه شد (Méndez *et al*., 2013). همچنین تجزیه و تحلیل ساختار تاج درختان جنگل توسط محققین مورد بررسی قرار گرفت. آن‌ها از اسکنر لیزری برای بدست آوردن مدل استفاده نمودند. نتایج نشان داد که این روش می‌تواند مشکلات مربوط به این زمینه را حل نماید و ابزار مفید و امیدوارکننده‌ای در آینده باشد. محدودیت‌های این روش عمدتا به محدودیت‌های سخت افزاری مربوط می‌شد که احتمالا در آینده حل خواهند شد. نشان داده شد که اسکنرهای لیزری در شناسایی شکاف نسبتا کوچک تاج، به خصوص در ترکیب با جنبش های آیرودینامیک عناصر تاج، با مشکل مواجه هستند (Seidel *et al*., 2012). در تحقیقی روش های مختلف محاسبه حجم تاج درختان چنار با استفاده از اسکنر لیزری بررسی و با اندازه‌گیری دستی مقایسه شد. پارامترهای اصلی مانند قطر تاج، ارتفاع و فاصله ابتدای تاج تا زمین به صورت دستی اندازه‌گیری شد. حجم ظاهری تاج با استفاده از سه مدل هندسی مخروط، نیمکره، و قطع مخروطی محاسبه شد. به طور همزمان، این درختان با اسکنر لیزری اسکن و حجم درخت محاسبه شد. مقایسه روش اسکن با روش دستی، ضریب تعیین بالاتر از ۰/۷۸ را نشان داد. بالاترین ضریب در مقایسه بین حجم محاسبه شده با استفاده از یک قطع مخروطی، که سریع‌ترین روش نیز می‌باشد، به دست آمد (Fernández-Sarría *et al*., 2013). در مطالعه‌ای محققین روش‌های مختلف اندازه‌گیری تاج درخت را بررسی نمودند. آن‌ها حسگرهای لیدار را بهترین روش برای اندازه‌گیری معرفی نمودند. همچنین بیان کردند که با توجه به کیفیت سامانه بینایی استریو در کارهای دیگر، احتمالا این سامانه می‌تواند روش مناسب دیگری برای اندازه‌گیری هندسه درختان باشد (Rosell and Sanz, 2012).

بحث و نتایج

نتایج ارزیابی روش‌های مختلف اندازه‌گیری مشخصات هندسی درختان نشان داد که زاویه زیاد واگرایی امواج فراصوت باعث می‌شود که دقت و وضوح اندازه‌گیری محدود شود و کاربر برای رفع این مشکل مجبور به استفاده از چندین حسگر باشد. اما حسگرهای فراصوت با توجه به قیمت ارزان بیشتر مورد استفاده قرار گرفته بودند. از طرفی پیاده سازی این حسگرها آسان بود. حسگرهای نوری نیز ارزان قیمت بودند و تنظیم آنها آسان بود اما تنها در شرایط روز، آسمان آفتابی و روشن، سرعت باد کم. پوشش گیاهی هموار بخوبی کار می‌کردند. مدل سه بعدی در این روش بطور مستقیم بدست نمی آمد. همچنین فرایند اندازه‌گیری با این روش طولانی بود. بنابراین برای کاربردهای سه بعدی بلادرنگ مناسب نبودند. روش دیگر که به منظور محاسبه خصوصیات تاج درخت استفاده می شد سامانه رادار بود. این روش مستقل از شرایط جوی کار می کرد. اما وضوح ان برای کارهای کشاورزی مناسب ارزیابی نشد و پارامترهای سه بعدی درخت را بطور دقیق اندازه‌گیری نمی‌کرد. روش تصویربرداری دیجیتال روش دیگر بود. این روش ارزان و استفاده از آن آسان بود. همچنین یکی از دقیق‌ترین و سریع‌ترین روش‌ها برای اندازه گیری ارتفاع و عرض درخت بود. اما نیاز به کالیبراسیون داشت و مدل سه بعدی را به خوبی بازسازی نمی کرد. اگر چه به منظور اندازه‌گیری پارامترهای هندسی درختان از روش بینایی استریو استفاده نشده یا تحقیقی منتشر نشده استف اما نتایج تحقیقات نشان می‌داد که برخی از مشکلات روش تصویربرداری دیجیتال توسط روش بینایی استریو حل می شود. یکی از مشکلات آن روش عدم مدلسازی سه بعدی بود که در این روش حل می شد. اندازه‌گیری مستقیم ساختار سه بعدی پوشش گیاهی از ویژگی های این روش بود. این روش یک تصویر سه بعدی واقع بینانه‌ای از گیاهان و محصولات را تهیه می کرد و بسیار شبیه به بینایی انسان بود. یکی دیگر از مزای این روش این بود که پایگاه داده‌های سامانه اطلاعات جغرافیایی (GIS) از داده‌های بدست آمده از مدل سه بعدی این روش پشتیبانی می کرد. این روش نیاز به کالیبراسیون دقیق داشت. چالش اصلی این روش این است که چون درختان در برخی قسمت‌ها بدون بافت هستند، رنگ بسیاری از قسمت‌ها یکسان است و همچنین همپوشانی بسیاری در تاج پوشش یک درخت وجود دارد، بدست آوردن نقاط مشترک در دو تصویر برای تطابق و بدست آوردن مدل سه بعدی بسیار مشکل است. البته در زمینه این روش کارهای زیادی انجام نشده است و علارغم سابقه پژوهشی بینایی استریو در علوم کامپیوتر، در زمینه کشاورزی این روش در مراحل اولیه قرار دارد. توسعه الگوریتم‌های تطابق و بینایی استریو متناسب با چنین فضاهایی می تواند در آینده این روش را به یکی از روش های مفید و ارزان قیمت برای مدلسازی سه بعدی تبدیل نماید. در حال حاضر تحقیق در زمینه اندازه‌گیری پارامترهای هندسی و مدلسازی سه بعدی درختان در گروه مهندسی بیوسیستم دانشگاه فردوسی مشهد در حال انجام می‌باشد. نتایج این پژوهش در آینده نزدیک منتشر خواهد شد. استفاده از حسگر لیدار روش مناسب دیگری بود که برخی محققین مورد بررسی قرار دادند. در تعدادی از پژوهش‌ها این روش با روش فراصوت یا تصویربرداری ترکیب شده بود. سامانه‌های لیدار از اشعه ماورای بنفش (UV)، مرئی (VIS) و یا مادون قرمز (NIR) استفاده می کردند. اما اشعه مادون قرمز برای کشاورزی و جنگل مناسب‌تر ارزیابی

شد. این روش سریعترین روش اندازه‌گیری مشخصات هندسی درختان است و با دقت مناسب درخت را بطور سه بعدی مدلسازی می کند. بزرگترین عیب این روش هزینه زیاد حسگر و پیاده سازی آن است. از دیگر معایب آن می توان به محدودیت استفاده در محیط غبارآلود، مه آلود و مرطوب اشاره کرد. همچنین محاسبه حجم خیلی حساس است و تعیین فاصله از لیدار تا مرکز درختان و زاویه جهت‌گیری لیدار با خطا همراه است. پس، موتور اسکنر لیدار نیاز به دستگاه‌های اضافی و یا روشی برای کنترل و یا تصحیح این منابع خطا دارد. از طرفی هنگامی که چندین تصویر با یکدیگر پردازش می‌شوند داده‌ها افزایش زیادی می یابد که موجب طولانی شدن زمان پردازش می‌شود و این وضعیت برای کاربرد سه بعدی زمان واقعی بحرانی‌تر می‌شود. اما دقت و سرعت بالای این روش توجه به این حسگر را بیش از پیش کرده است.

خلاصه ای از نتایج بررسی و مقایسه روش‌های مختلف اندازه‌گیری مشخصات هندسی درختان در جدول ۱ آورده شده است.

جدول ۱. مقایسه انواع حسگر از نظر اصول فیزیکی و مشخصات، معایب و مزایای آن‌ها

نوع حسگر	اصول	مزیت	عیب
حسگرهای فراصوت	– استفاده از امواج صوت در فرکانسهای غیر قابل شنیدن – عمل آنها بر مبنای تعیین زمان انتقال امواج فراصوت است	– مقاوم بودن و قیمت پایین – پیاده سازی نسبتا آسان	– نقطه ضعف اصلی آنها زاویه زیاد واگرایی پرتوهای امواج فراصوت است که دقت و وضوح اندازه‌گیری را محدود می کند. – استفاده از چندین حسگر برای پوشش دادن یک تصویر عادی در کشاورزی
حسگرهای نوری	– استفاده از روش پرتونگاری برای به دست آوردن ویژگی‌های سه بعدی درختان با تجزیه و تحلیل تصاویر سایه تاج	– سامانه ارزان قیمت – تنظیم آسان دستگاه اسکنر برای موقعیت‌های مختلف	– محدود به روز، آسمان آفتابی و روشن، سرعت باد کم. پوشش گیاهی هموار – طولانی بودن فرآیند اندازه گیری – مدل ۳ بعدی بطور مستقیم بدست نمی‌آید – نامناسب برای کاربرد سه بعدی زمان واقعی
سامانه رادار	– استفاده از الکترومغناطیس در محدوده مایکروویو – اندازه گیری زمان سپری شده بین منبع و هدف	– نسبتا مستقل از شرایط جوی	– وضوح فضایی کم برای کشاورزی – عدم اندازه‌گیری دقیق مشخصات سه بعدی تاج درخت
روش	– دوربین تصویر برداری دیجیتال نور را از سطح جسم	– کم هزینه و استفاده آسان – برآورد دقیق برخی از صفات	– پیچیدگی بررسی هندسه گیاه – نامناسب برای کاربرد سه بعدی زمان واقعی

تصویربرداری	دریافت و به سیگنال های الکتریکی تبدیل می‌کند	مانند ارتفاع و حجم	– نیاز به کالیبراسیون
بینایی استریو	– ارائه یک تصویر سه بعدی با ترکیب دو عکس گرفته شده به طور همزمان – الگوریتم‌های کامپیوتری برای تبدیل مختصات دوربین هدف به مختصات واقعی لازم است – نتیجه اندازه‌گیری یک توده سه بعدی شامل نقاط با وضوح مناسب از تصاویر می‌باشد	– تهیه واقع بینانه‌ترین تصویر سه بعدی برای گیاهان و محصولات – اندازه‌گیری مستقیم ساختار سه بعدی پوشش گیاهی – ارائه اطلاعات طیفی – پشتیبانی استفاده از داده‌های تصویر سه بعدی برای پایگاه داده-های سامانه اطلاعات جغرافیایی (GIS)	– نیاز به کالیبراسیون – از دست دادن اثر تحت شرایط آب و هوایی خاص – افزایش داده‌ها هنگامی که چندین تصویر با یکدیگر پردازش می‌شوند که موجب طولانی شدن زمان پردازش می‌شود
حسگرهای لیدار	– اندازه‌گیری فاصله فرستنده‌ی لیزری تا شی یا سطح – سامانه‌های لیدار اشعه ماورای بنفش (UV)، مرئی (VIS) و یا مادون قرمز (NIR) منتشر می-کنند. NIR برای کشاورزی و جنگل مناسب‌تر است.	– سرعت بالای اندازه‌گیری – دقت بالا – ارائه تصاویر دیجیتال سه بعدی از محصولات با دقت کافی	– محدودیت استفاده در محیط غبارآلود، مه آلود و مرطوب – هزینه زیاد – محاسبه حجم خیلی حساس است و تعیین فاصله از لیدار تا مرکز درختان و زاویه جهت‌گیری لیدار با خطا همراه است. – افزایش داده‌ها هنگامی که چندین تصویر با یکدیگر پردازش می‌شوند که موجب طولانی شدن زمان پردازش می-شود و این وضعیت برای کاربرد سه بعدی زمان واقعی بحرانی‌تر می‌شود.

نتیجه‌گیری

در این پژوهش روش‌های اندازه‌گیری خصوصیات هندسی درختان شامل حسگر فراصوت، تصویربرداری دیجیتال، حسگر نور، تصاویر رادار با وضوح بالا، بینایی ماشین و حسگر لیدار مقایسه شد و بطور خلاصه نتایج زیر حاصل شد:

- ارزان‌ترین روش که دقت آن تا حدودی مناسب می‌باشد روش حسگر التراسونیک است. در شرایطی که دقت زیاد انتظار نیست و یا هزینه زیادی امکان پذیر نیست این روش بهترین روش می‌باشد.
- سریعترین و دقیق‌ترین روش استفاده از حسگر لیدار است. اما هزینه پیاده سازی این روش زیاد است. در شرایطی که دقت و سرعت بالا مد نظر است و هزینه زیاد مشکل‌زا نیست، این روش می‌تواند تاج درخت را بخوبی مدسازی نماید.

- سامانه‌های ماشین بینایی و بینایی استریو از نظر دقت و هزینه در حد وسط دو روش قبل قرار دارد. به نظر می رسد در صورت دستیابی به الگوریتم مناسب برای مدلسازی سه بعدی درختان، این روش می‌تواند بهترین روش برای اندازه‌گیری خصوصیات هندسی درخت باشد.

منابع

Blas, M.R., Blanke, M., 2011. Stereo vision with texture learning for fault-tolerant automatic baling. Computers and Electronics in Agriculture 75, 159-168.

Escolà, A., Camp, F., Solanelles, F., Llorens, J., Planas, S., Rosell, J.R., Gràcia, F., Gil, E., 2007. Variable dose rate sprayer prototype for tree crops based on sensor measured canopy characteristics. In: Precision Agriculture ‘07. Proceedings of the 6th European Conference on Precision Agriculture, Skiathos, Greece, 3-6 January 2007.

Escolà, A., Rosell-Polo, J.R., Planas, S., Gil, E., Pomar, J., Camp, F., Llorens, J., Solanelles ,F., 2013. Variable rate sprayer. Part 1 – Orchard prototype: Design, implementation and validation. Computers and Electronics in Agriculture 95, 122-135.

Fernández-Sarría, A., Martínez, L., Velázquez-Martí, B., Sajdak, M., Estornell, J., Recio, J.A., 2013 .Different methodologies for calculating crown volumes of Platanus hispanica trees using terrestrial laser scanner and a comparison with classical dendrometric measurements. Computers and Electronics in Agriculture 90, 176-185.

Gil, E., Escolà, A., Rosell, J.R., Planas, S., Val, L., 2007. Variable rate application of plant protection products in vineyard using ultrasonic sensors. Crop Protection 26, 1287-1297.

Gil, E., Llorens, J., Llop ,J., Fàbregas, X., Escolà, A., Rosell-Polo, J.R., 2013. Variable rate sprayer. Part 2 – Vineyard prototype: Design, implementation, and validation. Computers and Electronics in Agriculture 95, 136-150.

Giuliani, R., Magnanini, E., Fragassa, C., Nerozzi, F., 2000. Ground monitoring the light shadow windows of a tree canopy to yield canopy light interception and morphological traits. Plant Cell Environment 23, 783–796.

Hocevar, M., Širok, B., Jejcic, V., Godeša, T., Lešnik, M., Stajnko, D., 2010. Design and testing of an automated system for targeted spraying in orchards. Journal of Plant Diseases and Protection 117(2), 71-79.

Jeon, H.Y., Zhu, H., Derksen, R., Ozkan, E., Krause ,C., 2011. Evaluation of ultrasonic sensor for variable-rate spray applications. Computers and Electronics in Agriculture 75, 213-221.

Lati, R.N., Filin, S., Eizenberg, H., 2013. Estimating plant growth parameters using an energy minimization-based stereovision model. Computers and Electronics in Agriculture 98, 260-271.

Lee, K.H., Ehsani, R., 2009. A laser scanner based measurement system for quantification of citrus tree geometric characteristics. Applied Engineering in Agriculture 25 (5), 777‐788.

Li, F., Cohen, S., Naor, A., Shaozong, K., Erez, A., 2002. Studies of canopy structure and water use of apple trees on three rootstocks. Agricultural Water Management 55, 1‐14.

Llorens, J., Gil, E., Llop, J., Escolà, A., 2010. Variable rate dosing in precision viticulture: use of electronic devices to improve application efficiency. Crop Protection 29, 239‐248.

Méndez, V., Catalán, H., Rosell-Polo, J.R., Arnó, J., Sanz, R., 2013. LiDAR simulation in modelled orchards to optimise the use of terrestrial laser scanners and derived vegetative measures. Biosystems Engineering 115, 7-19.

Pereira, A.R., Grenn, S., Villa Nova, N.A., 2006. Penman‐Monteith reference evapotranspiration adapted to estimate irrigated tree transpiration. Agricultural Water Management 83, 153‐161.

Rosell, J.R., Sanz, R., 2012. A review of methods and applications of the geometric characterization of tree crops in agricultural activities. Computers and Electronics in Agriculture 81, 124-141.

Rovira-Mas, F., Zhang, Q., Reid, J., 2005. Creation of Three-dimensional Crop Maps based on aerial stereoimages. Biosystems Engineering 90 (3), 251–259.

Schumann, A.W., Zaman, Q.U., 2005. Software development for real-time ultrasonic mapping of tree canopy size. Computers and Electronics in Agriculture 47 (1), 25‐40.

Seidel, D., Fleck, S., Leuschner, C., 2012. Analyzing forest canopies with ground-based laser scanning: A comparison with hemispherical photography. Agricultural and Forest Meteorology 154–155, 1-8.

Solanelles, F., Escolà, A., Planas, S., Rosell, J.R., Camp, F., Gracia, F., 2006. An electronic control system for pesticide application proportional to the canopy width of tree crops. Biosystems Engineering 95 (4), 473‑481.

Zaman, Q.U., Salyani, M., 2004. Effects of foliage density and ground speed on ultrasonic measurement of citrus tree volume. Applied Engineering in Agriculture 20 (2), 173‑178.

Zheng, G., Moskal, L.M., 2009. Retrieving leaf area index using remote sensing: theories, methods and sensors. Sensors 9 (4), 2719–2745.