

## بررسی حسگرهای فراصوتی جهت تخمین هوشمند حجم درختان

محمد اسکندری<sup>۱</sup> - عادل حسین پور<sup>۲\*</sup>

تاریخ دریافت: ۹۲/۵/۳۱

تاریخ پذیرش: ۹۳/۱/۱۸

### چکیده

طیف وسیعی از فعالیت‌های مهم کشاورزی از جمله تیمار آفت کش‌ها، آبیاری، کود و هرس درختان تا حد زیادی به خواص هندسی تاج پوشش درختان بستگی دارد. تحقیقات زیادی در زمینه استفاده از حسگرهای فراصوتی جهت تخمین حجم تاج پوشش درختان انجام شده است. این تحقیق به بررسی استفاده از روش‌های نرم افزاری از جمله شبکه‌های عصبی مصنوعی به منظور بهبود خطای تخمین حجم تاج پوشش درختان به کمک حسگرهای فراصوتی می‌پردازد. برای این منظور یک سیستم آزمایشگاهی مخصوص طراحی و ساخته شد. این سیستم دارای سه عدد حسگر فراصوتی است که به صورت عمودی با فاصله‌های ۶۰ سانتی‌متری بر روی یک دکل چوبی نصب شده است. با حرکت دکل چوبی حسگرهای فراصوتی ضخامت نقاط مختلف تاج پوشش درخت را با نرخ نمونه برداری ۴ هرتز اندازه‌گیری می‌کنند. آزمایش‌ها در سه سطح سرعت ۲۵، ۴۵ و ۵۵ سانتی‌متر بر ثانیه در سه تکرار و در چهار وضعیت در زوایای ۹۰ درجه برای ۵ نمونه درخت فیکوس بنجامین انجام شد. پس از عبور کامل حسگرهای فراصوتی از مقابل تاج پوشش درخت مشخصاتی همچون قطر، میانگین عرض و ارتفاع تاج پوشش درخت در سه ارتفاع متناظر با حسگرهای فراصوتی به‌عنوان ورودی شبکه‌های عصبی و حجم دستی تاج پوشش به‌عنوان خروجی شبکه‌های عصبی در نظر گرفته شد. نتایج نشان داد که مدل شبکه عصبی بهینه برای تخمین دارای ساختار ۱-۷-۱۶-۱۳ می‌باشد. میزان RMSE شبکه عصبی انتخاب شده ۰/۰۳۹۲۷۸ مترمکعب می‌باشد.

**واژه‌های کلیدی:** تاج پوشش درخت، حسگر فراصوتی، شبکه عصبی مصنوعی، فن‌آوری نرخ متغیر، کشاورزی دقیق

### مقدمه

تا حد زیادی به خواص هندسی بخش قابل مشاهده درختان بستگی دارد (Llorens et al., 2011; Rosell and Sanz, 2012). اندازه‌گیری ابعاد تاج پوشش درختان به‌علت هندسه پیچیده و نامنظم آن‌ها بسیار دشوار است. تاکنون روش‌های مختلف سنجش از راه دور مانند جذب نور<sup>۱</sup> و تصویر برداری استرواسکوپیک<sup>۲</sup> برای اندازه‌گیری ابعاد تاج پوشش درختان (Meron et al., 2000) و همچنین از تصاویر ماهواره‌ای برای برآورد حجم تاج پوشش درختان جنگل استفاده شده است (Carreiras et al., 2006; le Maire et al., 2008; Mäkelä and Pekkarinen, 2004; Mõttus et al., 2006). با این حال معمولاً مقیاس روش‌های سنجش از راه دور نسبتاً بزرگ است، بنابراین احتمال پایین بودن وضوح سنجش برای کاربردهای دبی متغیر و بلادرنگ در مزارع وجود دارد. علاوه بر این به‌طور معمول یک وقفه زمانی بین تشخیص و کاربرد شیوه‌های سنجش از راه دور وجود دارد که باعث به‌وجود آمدن خطا می‌شود؛ برای کاهش این مشکلات از حسگرهای LIDAR استفاده می‌شود. اما قیمت نسبتاً گران این نوع حسگرها (۶۰۰۰-۲۰۰۰ دلار) و لزوم استفاده از چند حسگر در برخی از کاربردها، استفاده از آن‌ها را با

یکی از دستاوردهای صنعت کشاورزی در دهه‌های اخیر، کشاورزی دقیق می‌باشد. رایج‌ترین فن‌آوری به‌کار رفته در کشاورزی دقیق فن‌آوری نرخ متغیر<sup>۳</sup> است که در آن اعمال نهاده‌های زراعی نظیر بذر، کود، مواد شیمیایی و آب براساس نیاز هر بخش از مزرعه صورت می‌پذیرد. توسعه تجهیزات خودکار با قابلیت استفاده متغیر از نهاده‌های زراعی با لحاظ ویژگی‌هایی از جمله پوشش گیاهی، یک راه حل مناسب برای کاهش قیمت تولید محصول و کاهش خطر آلودگی محیط زیست به‌شمار می‌رود.

هندسه تاج پوشش<sup>۴</sup> درختان به آرایش سه بعدی اندام‌های بالای سطح زمین درختان اطلاق می‌گردد. طیف وسیعی از فعالیت‌های مهم کشاورزی از جمله تیمار آفت کش‌ها، آبیاری، کود و هرس درختان

۱- دانشجوی کارشناسی ارشد گروه مکانیک ماشین‌های کشاورزی، دانشکده کشاورزی، دانشگاه ایلام

۲- استادیار گروه مهندسی بیوسیستم، دانشکده کشاورزی، دانشگاه ایلام

\*- نویسنده مسئول: (Email: a\_hosainpour12@yahoo.com)

5- Light interception

6- Aerial stereoscopic imaging

3- Variable rate technology

4- Canopy

ضخامت نقاط مختلف تاج پوشش درخت را با نرخ نمونه برداری ۴ هرتز اندازه‌گیری می‌کنند.

## آزمون‌ها

### تعیین ناحیه دید حسگرهای فراصوتی

از خصوصیات مهم حسگرهای فراصوتی زاویه واگرایی آن‌هاست که سبب می‌شود حسگر فراصوتی ناحیه دید وسیعی در عرض داشته باشد و هدف مورد نظر را قبل از رسیدن به آن تشخیص دهد. اطلاع از وسعت عرضی ناحیه دید حسگرهای فراصوتی، تغییرات آن با افزایش فاصله طولی و تقارن آن سبب افزایش دقت دستگاه ساخته شده می‌گردد. بنابراین برای تعیین ناحیه دید حسگرهای فراصوتی و مشاهده تغییرات آن با افزایش فاصله طولی هدف، آزمایش تعیین ناحیه دید حسگر فراصوتی طرح ریزی شد. در این آزمایش یک عدد حسگر فراصوتی بر روی دکل چوبی در ارتفاع ۲ متری نصب گردید. یک عدد کاغذ شطرنجی بزرگ در ابعاد  $400 \times 80$  سانتی‌متر با خانه‌هایی به ابعاد یک میلی‌متر در زیر و جلوی حسگر فراصوتی پهن شد. دو عدد جسم جامد با سطوح تخت به ابعاد  $63 \times 63$  میلی‌متر (شکل ۲ a) و انحنادار استوانه‌ای به شعاع و ارتفاع ۵۰ میلی‌متر (شکل ۲ b) به ترتیب از جنس چوب و پلاستیک در جلوی حسگر فراصوتی در فاصله طولی ۱۶ تا ۳۰۰ سانتی‌متری و در داخل خانه‌های کاغذ شطرنجی به ترتیب با فواصل ۲۰ و ۱۰ سانتی‌متری قرار داده شد. در هر یک از فاصله‌های طولی با جابه‌جایی جسم جامد در عرض کاغذ شطرنجی ناحیه عرضی که حسگر فراصوتی قابلیت شناسایی جسم جامد را دارد مورد بررسی قرار گرفت و نقاطی که توسط حسگر فراصوتی شناسایی شدند، علامت‌گذاری گردید (شکل ۲ c). ناحیه دید واقعی حسگر با استفاده از نرم افزار Solidworks ترسیم گردید.

### آزمون عملکرد سیستم آزمایشگاهی در هنگام حرکت

به منظور ارزیابی توانایی سیستم آزمایشگاهی ساخته شده در تعیین موقعیت اجسام آزمون عملکرد سیستم آزمایشگاهی در هنگام حرکت طرح ریزی شد. برای انجام این آزمایش یک عدد متر پارچه‌ای با دقت یک سانتی‌متر بر روی ریل آلومینیومی در طول مسافت طی شده توسط لغزنده نصب گردید. ارتفاع ریل به کمک پایه و بست‌های نگه‌دارنده به گونه‌ای تنظیم شد که فاصله نزدیک‌ترین حسگر فراصوتی (حسگر فراصوتی سوم) به سطح زمین ۶۵ سانتی‌متر باشد. یک عدد صفحه تخت چوبی به ابعاد  $120 \times 80$  سانتی‌متر در مختصات ۸۵ تا ۱۶۵ سانتی‌متری ریل در ارتفاع ۵۰ سانتی‌متری از سطح زمین در مقابل سیستم آزمایشگاهی در فاصله‌های ۵۰، ۱۰۰، ۱۵۰، ۲۰۰ و ۲۵۰ سانتی‌متری از حسگرهای فراصوتی قرار داده شد (شکل ۳).

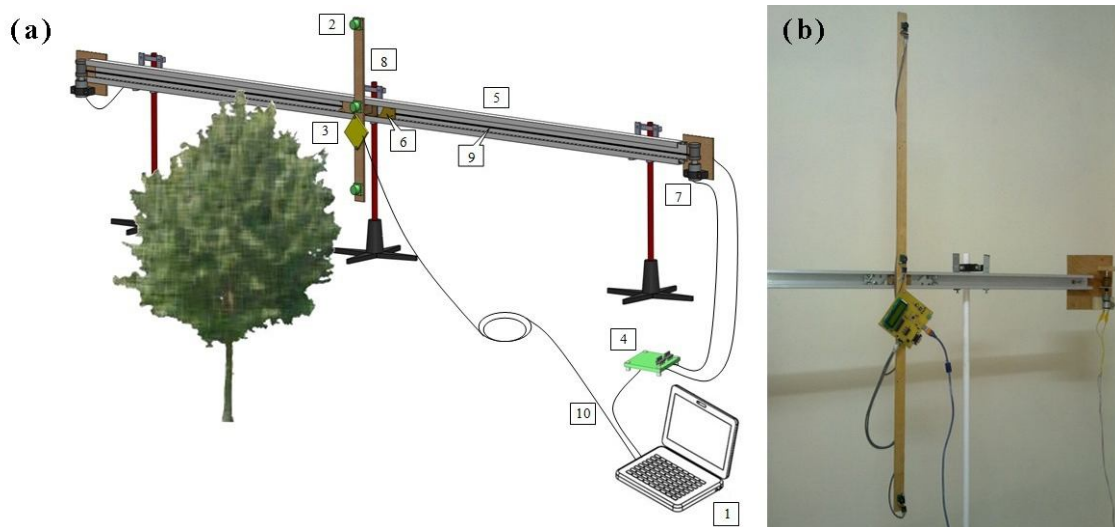
محدودیت مواجهه کرده است (Jeon *et al.*, 2011)، بنابراین استفاده از تجهیزات و حسگرهای ارزان قیمت جهت تجهیز ماشین‌آلات امری ضروری است.

تاکنون محققین زیادی از حسگرهای فراصوتی برای اندازه‌گیری حجم تاج پوشش درختان و یا در تجهیزات سمپاشی و کودپاشی برای انجام عملیات دبی متغیر استفاده کرده‌اند. در آزمایش‌های انجام شده با استفاده از یک سمپاش نرخ متغیر مجهز به حسگرهای فراصوتی در تاکستان‌ها، به‌طور متوسط ۵۸٪ صرفه‌جویی در حجم مایع اسپری شونده همراه با رسوبات برگی مناسب به‌دست آمد (Llorens *et al.*, 2010). در تحقیق دیگری جهت اندازه‌گیری حجم درخت از سیستم دیجیتالی اندازه‌گیر ساختار درختان باغی با کاربرد حسگرهای فراصوتی، استفاده شده است. نتایج آزمایش‌ها نشان داد که سیستم مذکور حجم تاج پوشش درخت را بیشتر از حجم واقعی برآورد می‌کند و دقت آن کمتر از ۸۷٪ نیست (Zhai *et al.*, 2011). محققینی با استفاده از حسگرهای فراصوتی و سیستم موقعیت‌یاب جهانی تفاضلی (DGPS) نرم افزاری برای ایجاد نقشه حجم تاج پوشش درختان باغ‌های مرکبات به‌صورت بلادرنگ طراحی کردند. نتایج آنان نشان داد استفاده از حسگرهای فراصوتی و نرم افزار طراحی شده قابلیت اندازه‌گیری حجم و ارتفاع تاج پوشش  $13/6$  درخت در هر دقیقه را با دقت و قابلیت تکرار مناسبی دارد در حالی که اندازه‌گیری حجم تاج پوشش هر درخت به‌صورت دستی بیشتر از یک دقیقه طول می‌کشد (Schumann and Zaman, 2005).

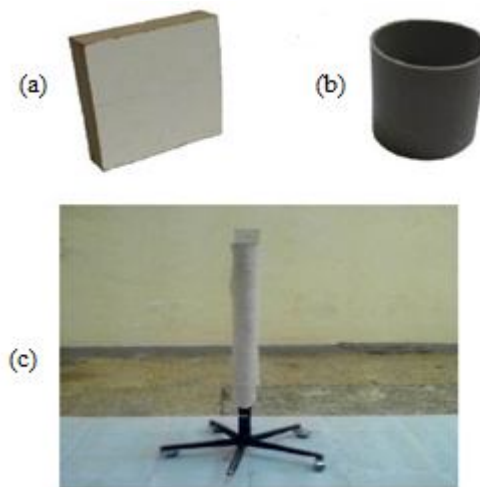
اگرچه تاکنون، تحقیقات زیادی در زمینه استفاده از حسگرهای فراصوتی جهت تخمین حجم تاج پوشش درختان و یا توسعه سمپاش‌های نرخ متغیر انجام شده است، هنوز گزارشی از کاربرد روش‌های نرم افزاری از جمله شبکه‌های عصبی مصنوعی برای بهبود داده‌های سیستم‌های برآورد حجم تاج پوشش درختان انجام نشده است. در این تحقیق، امکان استفاده از شبکه‌های عصبی مصنوعی جهت تخمین دقیق‌تر حجم تاج پوشش گیاهان مورد بررسی قرار خواهد گرفت.

## مواد و روش‌ها

سیستم آزمایشگاهی ساخته شده در این تحقیق دارای سه عدد حسگر فراصوتی مدل SRF02 ساخت شرکت Devantech کشور انگلستان است. با توجه به ارتفاع تقریبی ۱۸۰ سانتی‌متری درختان مورد بررسی، حسگرهای فراصوتی به‌صورت عمودی با فاصله‌های ۶۰ سانتی‌متری بر روی یک دکل چوبی نصب شد. دکل چوبی حامل حسگرهای فراصوتی توسط موتورهای جریان مستقیم با سرعت ثابت در یک فاصله طولی درون ریل جابه‌جا شده و حسگرهای فراصوتی



**شکل ۱- (a)** تصویر شماتیک دستگاه ساخته شده؛ (۱) رایانه، (۲) حسگر فراصوتی، (۳) برد میکروکنترلر حسگر فراصوتی، (۴) برد میکروکنترلر موتورها، (۵) ریل آلومینیومی، (۶) لغزنده، (۷) موتور جریان مستقیم، (۸) دکل چوبی، (۹) ریسمان، (۱۰) کابل USB، (b) تصویر سیستم مورد استفاده  
**Fig.1.** (a) Schematic of the digital test system; (1) Laptop, (2) Ultrasonic sensor, (3) Ultrasonic microcontroller board, (4) Motors' microcontroller board, (5) Aluminum rail, (6) Slider, (7) DC motor, (8) Wooden mast, (9) String, (10) USB cable, (b) Picture of the system



**شکل ۲- (a)** سطح تخت، (b) سطح انحنا دار استوانه‌ای، (c) کاغذ شطرنجی  
**Fig.2.** (a) Flat surface, (b) Curved surface, (c) Graph paper

هدف، از مجذور میانگین مربعات خطا (RMSE) داده‌های حسگر فراصوتی دوم مطابق رابطه (۱) استفاده شد (Masoudi *et al.*, 2010).

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n e_i^2}{n}} \quad (1)$$

در رابطه (۱)،  $e$  مقدار خطای حسگر فراصوتی دوم از فاصله

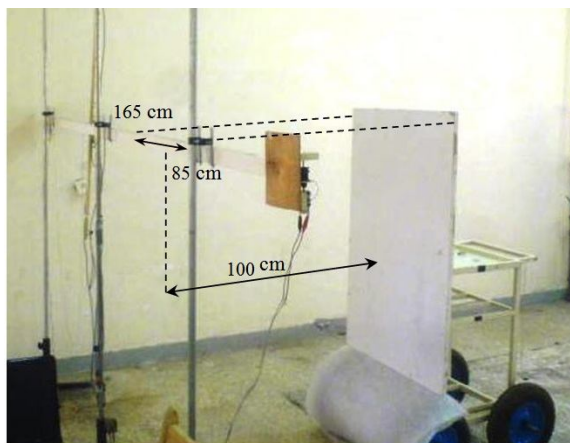
با حرکت لغزنده در داخل ریل به صورت دستی مختصات نقاط ابتدایی و انتهایی دیده شدن هدف توسط حسگرهای فراصوتی در حالت استاتیک سیستم آزمایشگاهی مشخص شد. با حرکت لغزنده در داخل ریل آلومینیومی با سرعت پیشروی در محدوده ۳۳-۳۵ سانتی‌متر بر ثانیه (میانگین سرعت پیشروی  $34 \text{ cm s}^{-1}$ ) به وسیله موتورهای جریان مستقیم، مقادیر خروجی حسگرها در هر لحظه در حافظه رایانه ثبت شد. آزمایش‌ها در هر فاصله در سه تکرار انجام شد. برای مقایسه مقادیر خروجی حسگرهای فراصوتی با فاصله واقعی

*Ficus benjamina* از خانواده Moraceae جهت اندازه‌گیری حجم تاج پوشش به روش دستی و با استفاده از حسگرهای فراصوتی انتخاب شد. جدول ۱ ابعاد پنج اصله درخت شامل ارتفاع درخت، قطر تاج پوشش موازی با ردیف درختان و قطر تاج پوشش عمود بر ردیف درختان که به صورت دستی اندازه‌گیری شده‌اند، را نشان می‌دهد.

واقعی هدف، n تعداد نقاط داده برداری شده در هنگام تشخیص هدف می‌باشد.

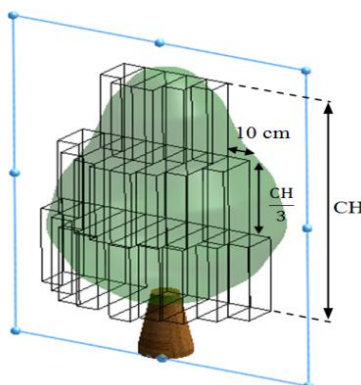
### اندازه‌گیری دستی حجم درخت

تعداد پنج اصله درخت فیکوس بنجامین با نام علمی



شکل ۳- محاسبه حجم درخت با المان‌های مستطیلی

Fig.3. Rectangular elements for the manual measurement of the volume tree



شکل ۴- بررسی عملکرد سیستم آزمایشگاهی در هنگام حرکت در فاصله ۱۰۰ سانتی متری

Fig.4. Performance of the experimental system during movement in 100 cm distance

جدول ۱- ابعاد تاج پوشش درختان

Table 1- Dimensions of tree canopy

قطر عمود بر ردیف درختان Canopy diameter perpendicular to row (m)	قطر موازی با ردیف درختان Canopy diameter parallel to row (m)	ارتفاع درخت Canopy height (m)	شماره درخت Tree number
0.90	0.90	1.85	1
0.10	0.90	1.78	2
1.05	0.93	1.84	3
1.00	1.10	1.76	4
0.55	0.60	1.81	5

مورد استفاده قرار گرفت. آزمایش‌ها در سه سطح سرعت ۳۵، ۴۵ و ۵۵ سانتی‌متر بر ثانیه در سه تکرار و در چهار وضعیت در زوایای ۹۰ درجه برای هر نمونه انجام شد.

### پردازش داده‌ها و استخراج ویژگی

پس از عبور کامل حسگرهای فراصوتی از مقابل تاج پوشش درختان، مشخصاتی همچون میانگین عرض تاج پوشش در سه ارتفاع متناظر با حسگرهای فراصوتی، قطر تاج پوشش در سه ارتفاع متناظر با حسگرهای فراصوتی و ارتفاع تاج پوشش درخت به‌عنوان ورودی شبکه عصبی و حجم دستی به‌عنوان خروجی از شبکه عصبی در نظر گرفته شد.

حداکثر ارتفاع تاج پوشش درخت با اسکن تمام آرایه داده‌های به‌دست آمده از سه حسگر فراصوتی در بازه‌های ۱ ثانیه محاسبه شد. اسکن داده‌ها در یک برنامه حلقه‌ای از بالاترین حسگر فراصوتی تا پایین‌ترین حسگر فراصوتی که نیم تاج پوشش درخت را شناسایی کرده است، انجام شد. حاصل ضرب تعداد حسگرهای فراصوتی که تاج پوشش درخت را شناسایی کرده است در فاصله بین دو حسگر فراصوتی مجاور (۶۰ سانتی‌متر) معرف ارتفاع تاج پوشش درخت در هر ثانیه است و ماکزیمم آن‌ها نشان دهنده ماکزیمم ارتفاع تاج پوشش درخت است.

میانگین عرض تاج پوشش درخت در ارتفاع‌های متناظر با هر یک از حسگرهای فراصوتی با میانگین‌گیری از هشت داده ماکزیمم عرض تاج پوشش درخت در هر ارتفاع محاسبه شد. عرض تاج پوشش درخت در نقاط اندازه‌گیری شده با استفاده از رابطه (۲) محاسبه گردید (شکل ۶ a).

$$C_{w_i} = D - X_i \quad (2)$$

در رابطه (۲)،  $C_{w_i}$  عرض تاج پوشش درخت برحسب متر،  $D$  فاصله تنه درخت تا حسگرهای فراصوتی برحسب متر،  $X$  فاصله اندازه‌گیری شده از حسگر فراصوتی تا سطح خارجی تاج پوشش برحسب متر و اندیس  $i$  بیانگر شماره حسگر است.

قطر تاج پوشش درخت در ارتفاع‌های متناظر با هر یک از حسگرهای فراصوتی با استفاده از نرخ نمونه برداری، سرعت لغزنده و تعداد نقاطی که حسگر فراصوتی تاج پوشش درخت را تشخیص داده است، محاسبه شد (رابطه ۳ و شکل ۶ b).

$$CD_i = \frac{(n_i - 1) \times V}{(S_f - 1)} \quad (3)$$

در رابطه (۳)،  $CD$  قطر تاج پوشش درخت برحسب متر،  $V$  سرعت لغزنده برحسب متر بر ثانیه،  $S_f$  نرخ نمونه برداری حسگر فراصوتی برحسب هرتز،  $n_i$  تعداد نقاطی که تاج پوشش درخت را شناسایی کرده است و اندیس  $i$  بیانگر شماره حسگر فراصوتی می‌باشد.

حجم تاج پوشش درختان به روش دستی به کمک یک متر دستی و با استفاده از المان‌های مکعب مستطیل شکل محاسبه شد (شکل ۴). در این روش ارتفاع بخش پوشش‌دار درخت با متر دستی اندازه‌گیری شد و به سه قسمت با ارتفاع‌های یکسان تقسیم شد. هر یک از قسمت‌ها به المان‌های مکعب مستطیل شکل به ارتفاع یک سوم ارتفاع کل تاج پوشش، عرض ۱۰ سانتی‌متر و عمق متغیر تقسیم بندی شد. عمق تاج پوشش درخت در وجه‌های بالایی و پایینی هر یک از المان‌ها از سطح خارجی تاج پوشش درخت تا صفحه عبوری از وسط تاج پوشش درخت (صفحه آبی رنگ) با متر دستی اندازه‌گیری شد. حجم هر المان با ضرب میانگین عمق به‌دست آمده از وجه‌های بالایی و پایینی المان، یک سوم ارتفاع کل تاج پوشش و عرض ۱۰ سانتی‌متر به‌دست آمد. با جمع حجم به‌دست آمده از هر یک از المان‌ها حجم یک سمت تاج پوشش تا صفحه عبوری از وسط تاج پوشش درخت محاسبه شد. با انجام مراحل ذکر شده در سمت دیگر تاج پوشش حجم نیمه دیگر تاج پوشش محاسبه گردید و حجم کل از مجموع حجم دو سمت تاج پوشش به‌دست آمد.

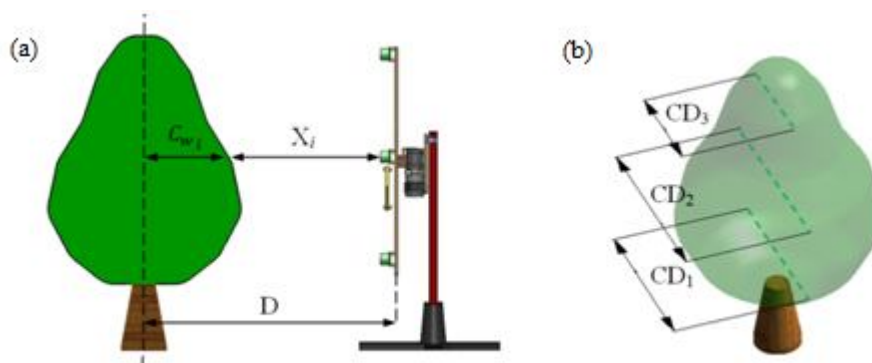


شکل ۵- اندازه‌گیری فراصوتی حجم درخت

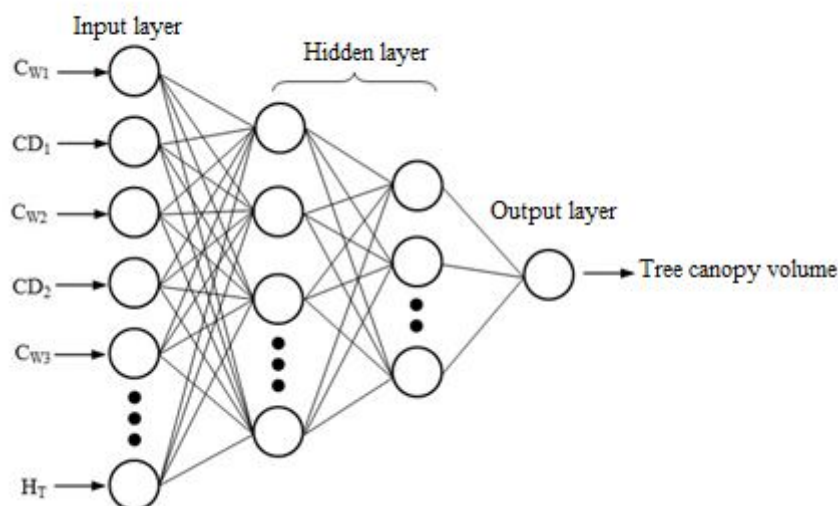
Fig.5. Ultrasonic measurement of tree canopy volume

### اندازه‌گیری حجم درخت با استفاده از حسگرهای فراصوتی

برای اندازه‌گیری حجم درخت با استفاده از حسگرهای فراصوتی هر یک از نمونه‌های مورد استفاده به‌صورت انفرادی در فاصله ۲۷۰ سانتی‌متری در جلوی حسگرهای فراصوتی قرار گرفتند. با حرکت لغزنده با سرعت ثابت حسگرهای فراصوتی با فرکانس نمونه برداری ۴ هرتز به‌صورت ترتیبی فاصله تا سطح خارجی تاج پوشش را به‌کمک محاسبه زمان ارسال تا دریافت سیگنال فراصوتی به‌دست آورده و از طریق پورت USB بورد میکروکنترلر حسگرهای فراصوتی به رایانه منتقل می‌کند (شکل ۵). نرم افزار MATLAB نصب شده بر روی رایانه شخصی جهت اکتساب و پردازش داده‌ها



شکل ۶- (a) اندازه‌گیری فاصله تا لایه خارجی تاج پوشش درخت، (b) قطرهای تاج پوشش درخت  
 Fig.6. (a) Distance to the external layout of the canopy, (b) Tree canopy diameter



شکل ۷- شبکه عصبی پرسپترون چند لایه  
 Fig.7. Multi layer perceptron neural network

فعال سازی غیرخطی سیگموید<sup>۲</sup> در لایه‌های پنهان و تابع خطی در لایه خروجی استفاده شد. تعداد نرون مناسب در لایه‌های پنهان برای هر شبکه (متناظر با هر بردار مشخصات) از روش سعی و خطا تعیین شد. بدین منظور هر شبکه با تعداد ۱ تا ۳۰ نرون در لایه‌های پنهان آموزش داده شد و نتایج حاصله ثبت گردید. تعداد کل داده‌های مورد استفاده برای تخمین حجم نصف تاج پوشش ۱۸۰ الگو و برای تخمین حجم کل تاج پوشش ۹۰ الگو است. جهت جلوگیری از آموزش بیش از حد شبکه که باعث یادگیری نامناسب مدل می‌شود، ۷۰٪ از داده‌ها در آموزش، ۱۵٪ در آزمون و ۱۵٪ باقی مانده نیز جهت اعتبار سنجی

### شبکه عصبی مصنوعی

مدل‌های مختلف شبکه عصبی پرسپترون چند لایه با یک و یا دو لایه پنهان برای یافتن مناسب‌ترین بردار مشخصات ورودی، خروجی و ساختار شبکه متناظر با آن‌ها، مورد بررسی قرار گرفتند (شکل ۷). به‌منظور تعیین بهترین نوع الگوریتم برای مسأله حاضر، الگوریتم‌های مختلف برای آموزش شبکه‌های عصبی مصنوعی مورد استفاده قرار گرفت. الگوریتم آموزش کاهش شیب با گشتاور (GDM<sup>۱</sup>) به‌دلیل اضافه شدن مومنتم دارای عملکرد بهتری نسبت به سایر الگوریتم‌ها بود و برای آموزش شبکه‌های عصبی مصنوعی انتخاب شد. تابع

2- Sigmoid

1- Gradient descent with momentum

**نتایج آزمون عملکرد سیستم آزمایشگاهی در هنگام حرکت**  
شکل ۹ عملکرد سیستم آزمایشگاهی در حال حرکت را، در یکی از تکرارها نشان می‌دهد. مختصات فرارگیری هدف با خط مشکی نشان داده شده است. مختصات نقاط ابتدایی و انتهایی دیده شدن هدف توسط حسگرهای فراصوتی در وضعیت استاتیک سیستم آزمایشگاهی به صورت خط چین در بخش حسگرهای دوم و سوم نشان داده شده است.

با توجه به ارتفاع ۵۰ سانتی‌متری تخته از سطح زمین حسگر فراصوتی اول در هیچ یک از فاصله‌ها هدف را تشخیص نداد. در تمام فاصله‌ها خطای چند سانتی‌متری در تشخیص هدف در هر دو وضعیت استاتیک و در حال حرکت مشاهده شد. حداکثر مقدار اختلاف بین فاصله واقعی هدف و خروجی حسگر فراصوتی ۵ سانتی‌متر به دست آمد. محدوده RMSE اندازه‌گیری حسگر فراصوتی دوم در فاصله ۵۰ تا ۲۵۰ سانتی‌متری هدف ۴/۳۷ - ۲ سانتی‌متر است (جدول ۲). با افزایش فاصله هدف از حسگرهای فراصوتی موقعیت دیده شدن آن توسط حسگرهای فراصوتی افزایش یافته است به طوری که کمترین میزان افزایش ناحیه دید برای تخته چوبی در فاصله ۱۰۰ سانتی‌متری به میزان ۲ سانتی‌متر و بیشترین آن در فاصله ۲۵۰ سانتی‌متری به میزان ۲۳ سانتی‌متر است (جدول ۳). این امر به علت بزرگ شدن نشانگر اندازه‌گیر حسگر فراصوتی با افزایش فاصله می‌باشد. محققینی نیز در تحقیق خود بیان کردند که نشانگر اندازه‌گیر حسگر فراصوتی تغییر پذیر است و با افزایش فاصله افزایش می‌یابد (de Martí *et al.*, 2006). بزرگ شدن نشانگر اندازه‌گیر فراصوتی باعث بروز خطای اجتناب ناپذیر در تعیین موقعیت هدف در شروع و پایان آن شده است. عدم تقارن ناحیه دید حسگر فراصوتی باعث شده است که حسگر فراصوتی هدف را قبل از رسیدن به موقعیت واقعی خود تشخیص دهد که بیشترین مقدار آن در فاصله ۲۵۰ سانتی‌متری اتفاق افتاده است ولی موقعیت پایانی هدف را نسبتاً خوب تشخیص داد (شکل ۹).

### نتایج تخمین هوشمند حجم درخت با استفاده از مشخصات به دست آمده از حسگرهای فراصوتی

برای بررسی عملکرد شبکه پرسپترون چند لایه از ساختارهای مختلف با تعداد نرون‌های مختلف مورد استفاده قرار گرفت. در گام اول از شبکه عصبی مصنوعی با یک لایه پنهان استفاده شد. با توجه به میانگین مربعات خطا بالا و ضریب همبستگی پایین شبکه‌های عصبی با یک لایه پنهان، نتایج حاصل از آن‌ها برای پیش‌بینی حجم تاج پوشش درختان رضایت بخش نبود. بنابراین از شبکه عصبی با دو لایه پنهان استفاده شد.

داده‌ها مورد استفاده قرار گرفتند. نرخ یادگیری شبکه ۰/۳ با ضریب گشتاور ۰/۲ در نظر گرفته شد. معیار توقف آموزش شبکه تعداد تکرارها یا میانگین مربعات خطا ( $MSE^1$ ) داده‌های آموزشی قرار داده شد. جهت انتخاب بهترین شبکه از ضریب همبستگی  $R^2$  و حداقل MSE داده‌های اعتبار سنجی استفاده شد. شبکه عصبی انتخاب شده با ۵ داده که قبلاً در آموزش شبکه‌های عصبی مورد استفاده قرار نگرفته بودند، ارزیابی شد. برای مقایسه مقادیر خروجی شبکه عصبی با حجم واقعی تاج پوشش نمونه‌ها، از RMSE داده‌ها استفاده شد. کلیه مراحل ایجاد و آموزش شبکه پرسپترون چند لایه در جعبه ابزار شبکه عصبی نرم افزار MATLAB 7.4 انجام شده است.

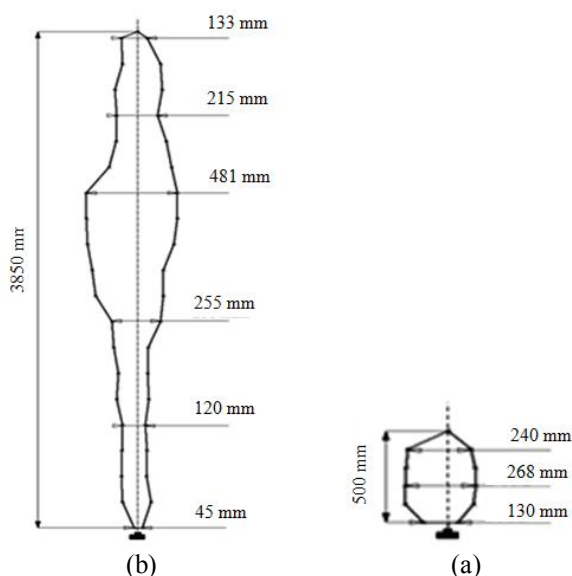
## نتایج و بحث

### نتایج آزمون تعیین ناحیه دید حسگرهای فراصوتی

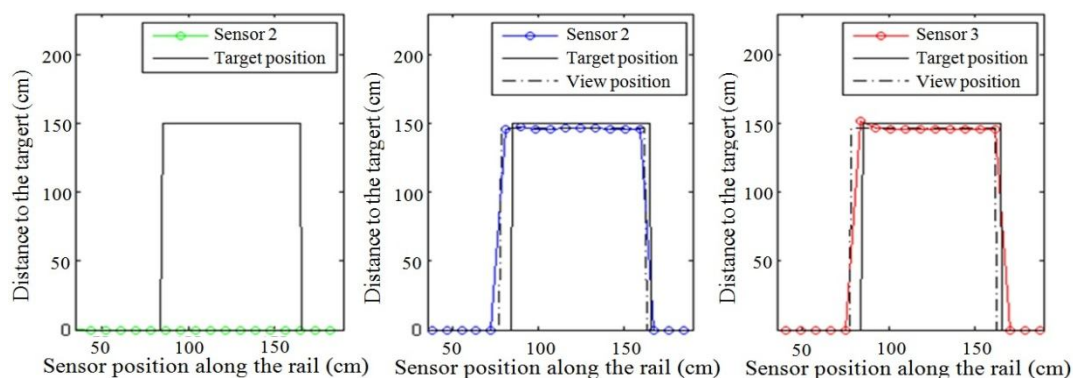
حداکثر عرض و طول ناحیه دید حسگرهای فراصوتی SRF02 برای سطح تخت به ترتیب ۴۸۱ و ۳۸۵۰ میلی‌متر و برای سطح انحنادار استوانه‌ای به ترتیب ۲۶۸ و ۵۰۰ میلی‌متر است (شکل ۸). افزایش عرض ناحیه دید برای اجسام مدور ناشی از پراکنده شدن امواج فراصوتی در اثر برخورد با سطح استوانه‌ای است. محققان نیز در تحقیقات خود نشان دادند که ناحیه دید عرضی امواج فراصوتی برای اجسام انحنادار بزرگ‌تر از اجسام مسطح است (Escola *et al.*, 2011; Masoudi *et al.*, 2010). همچنین عدم بازتاب آینه‌ای امواج فراصوتی در اثر برخورد با سطح انحنادار باعث کاهش طول ناحیه دید حسگر فراصوتی در این نوع سطوح شده است که با نتایج مسعودی و همکاران (۲۰۱۰) مطابقت دارد. سطح تاج پوشش درختان از برگ‌های کوچک تشکیل شده است که در جهت‌های مختلف قرار گرفته‌اند. در نتیجه انعکاس امواج فراصوتی پراکنده‌تر از سطح تخت است و ناحیه دید حسگرهای فراصوتی آن بین سطح تخت و استوانه‌ای قرار دارد. شکل هندسی هدف و موقعیت نسبی آن نسبت به حسگر فراصوتی تا حد زیادی بر ردپای تشخیص حسگر فراصوتی تأثیر می‌گذارد (Escola *et al.*, 2011). با توجه به شکل ۸ مشاهده می‌شود که ناحیه دید حسگر فراصوتی دارای تقارن مناسبی نیست و به طور کلی ناحیه دید سمت چپ حسگر فراصوتی بزرگ‌تر از ناحیه دید سمت راست است. عدم تقارن سمت چپ و راست حسگرهای فراصوتی سبب می‌شود دقت حسگرهای فراصوتی در تعیین شروع و پایان تاج پوشش یکسان عمل نکنند و سیستم در محاسبات میزان نهاده‌های مورد نیاز عملیات داشت مانند کودپاشی و سمپاشی دچار خطا شود.

1- Mean square error

2- Coefficient of correlation



شکل ۸- ناحیه دید حسگرهای فراصوتی؛ (a) سطح انحنادار استوانه‌ای، (b) سطح تخت  
**Fig.8.** Detection area of ultrasonic sensor; (a) Cylindrical object, (b) Squared plane object



شکل ۹- خروجی حسگرهای فراصوتی در حالت استاتیک و حرکت در تعیین موقعیت هدف در فاصله ۱۵۰ سانتی‌متری  
**Fig.9.** Output ultrasonic sensors in static and move mode for locating the target position on 150 cm distance

جدول ۲- RMS خطای حسگرهای فراصوتی در فاصله‌های مورد آزمایش

**Table 2-** RMS error of ultrasonic sensors on the tested distances

	فاصله هدف					
	Distance of target (cm)					
	50	100	50	150	200	250
مجذور میانگین مربعات خطا	2.65	2.39	2.65	3.56	4.37	3.71
RMSE (cm)	2.76	2.00	2.76	3.61	4.37	3.66
میانگین مجذور میانگین مربعات خطا	2.03	2.12	2.03	3.48	4.35	3.64
Mean RMSE (cm)	2.48	2.17	2.48	3.55	4.36	3.67
انحراف معیار	0.39	0.20	0.39	0.07	0.01	0.04
Standard deviation						



جدول ۳- موقعیت دیده شدن هدف در حالت استاتیک توسط حسگر فراصوتی دوم

Table 3- Detecting position of the target in static mode by second ultrasonic sensor

فاصله هدف Distance of target (cm)	موقعیت اصلی هدف Actual position of the target (cm)	موقعیت به دست آمده توسط حسگر فراصوتی The achievement position by ultrasonic sensors (cm)	میزان افزایش ناحیه دید Value of increasing of detection area (cm)
50	85-165	81-167	6
100	85-165	81-163	2
150	85-165	78-162	4
200	85-165	71-169	18
250	85-165	62-165	23

جدول ۴- عملکرد برخی از شبکه‌های عصبی برای زیر مجموعه‌ای از خصوصیات

Table 4- Performance of ANN models for subsets of features

مشخصات Features	خروجی Output	ساختار شبکه Topology	ضریب همبستگی Cross validation R	میانگین مربعات خطا Cross validation MSE	تکرار Epochs
CD <sup>a</sup> <sub>(1,2,3)</sub> + CW <sup>b</sup> <sub>(1,2,3)</sub> + HS <sup>c</sup>	HVRE <sup>d</sup>	7-10-1	0.923150	0.0040950	1000
CD <sub>(1,2,3)</sub> + CW <sub>(1,2,3)</sub> + HS	HVRE	7-8-3-1	0.570500	0.0197350	1000
CD <sub>(1,2,3)</sub> + CW <sub>(1,2,3)</sub> + HS	VRE <sup>e</sup>	7-4-1	0.039905	0.0745540	1000
CD <sub>(1,2,3)</sub> + CW <sub>(1,2,3)</sub> + HS	VRE	7-15-1	0.027455	0.0714810	1000
CD <sub>(1,2,3)b</sub> + CW <sub>(1,2,3)f</sub> + CD <sub>(1,2,3)f</sub> CW <sub>(1,2,3)b</sub> + HS	VRE	13-15-1	0.862220	0.0070764	1000
CD <sub>(1,2,3)b</sub> + CW <sub>(1,2,3)f</sub> + CD <sub>(1,2,3)f</sub> CW <sub>(1,2,3)b</sub> + HS	VRE	13-9-5-1	0.928550	0.0129950	1000
CD <sub>(1,2,3)b</sub> + CW <sub>(1,2,3)f</sub> + CD <sub>(1,2,3)f</sub> CW <sub>(1,2,3)b</sub> + HS	VRE	13-16-7-1	0.983620	0.0027716	1000

<sup>a</sup> قطر تاج پوشش درخت، <sup>b</sup> عرض تاج پوشش درخت، <sup>c</sup> ارتفاع درخت به دست آمده توسط حسگر فراصوتی، <sup>d</sup> حجم نصف تاج پوشش درخت به روش المان مستطیلی، <sup>e</sup> حجم کل تاج پوشش درخت به روش المان مستطیلی، اندیس i بیانگر شماره حسگر فراصوتی و اندیس f و b به ترتیب بیانگر روبه‌رو و پشت تاج پوشش درخت است.

<sup>a</sup> Canopy diameter, <sup>b</sup> Canopy width, <sup>c</sup> Canopy height, <sup>d</sup> The half volume of the tree with rectangular element method, <sup>e</sup> The volume of the tree with rectangular element method, i indicates the number of ultrasonic sensors and f and b represent front and back of the tree canopy.

مناسبی دارا می‌باشند. در تحقیقات پیشین گزارش شده است که سرعت حرکت حسگرهای فراصوتی اثر معناداری بر عملکرد سیستم فراصوتی آن‌ها جهت تخمین حجم تاج پوشش درخت ندارد (Giles *et al.*, 1988; Jeon *et al.*, 2011; Zaman and Salyani, 2004). مشابه به نتایج آن‌ها، نتایج حاصل از شبکه‌های عصبی مصنوعی نشان داد که افزایش سرعت حرکت حسگرهای فراصوتی تأثیری بر روی عملکرد شبکه عصبی برگزیده ندارد.

خطای تخمین حجم تاج پوشش توسط شبکه عصبی منتخب در محدوده ۳۷٪ تا ۸۷٪ قرار گرفته و میزان RMSE برای پنج نمونه ۰/۳۹۲۷۸ سانتی‌متر مکعب می‌باشد (جدول ۵). خطای کمتر از ۸٪ نشان می‌دهد که با وجود ویژگی‌های سطح تاج پوشش درختان از جمله وجود حفره و برآمدگی، جهت‌دار بودن برگ‌ها و زاویه واگرایی حسگرهای فراصوتی، شبکه‌های عصبی با مشخصات به دست آمده از حسگرهای فراصوتی قابلیت تخمین حجم تاج پوشش را با دقت

جدول ۵- نتایج آزمون تخمین حجم با شبکه عصبی منتخب

Table 5- Tree volume estimation with selected neural network

شماره نمونه Specimen number	1	2	3	4	5
حجم دستی Manual volume (m <sup>3</sup> )	0.7572	0.7440	0.9816	1.1196	0.3676
حجم تخمین زده توسط شبکه Estimation volume with ANN (m <sup>3</sup> )	0.724111	0.761003	1.057930	1.106072	0.385506
خطای تخمین شبکه Error (%)	-4.37	2.29	7.78	-1.21	4.87
مجذور میانگین مربعات خطا RMSE (m <sup>3</sup> )			0.039278		

## نتیجه‌گیری

به‌طور کلی، در این تحقیق یک روش براساس تلفیق خصوصیات فیزیکی تاج پوشش درخت و شبکه عصبی، جهت تخمین حجم تاج پوشش درخت مورد مطالعه قرار گرفت. دقت و ارزانی ابزار مورد استفاده از مهم‌ترین مزایای سیستم مورد ارائه می‌باشد. بررسی ناحیه دید حسگرهای فراصوتی نشان داد که بزرگی این ناحیه علاوه بر

زاویه واگرایی حسگرهای فراصوتی به موقعیت و شکل هندسی اجسام نیز بستگی دارد اما با این وجود شبکه‌های عصبی مصنوعی قادر به تخمین حجم کل تاج پوشش با دقت مناسب را دارا می‌باشند. پیشنهاد می‌گردد در تحقیقات بعدی با افزایش تعداد حسگرهای فراصوتی فاصله بین آن‌ها بر روی دکل چوبی کاهش یابد و بدین صورت می‌توان دقت تخمین حجم تاج پوشش درخت را افزایش داد.

## منابع

1. Carreiras, J. M. B., J. M. C. Pereira, and J. S. Pereira. 2006. Estimation of tree canopy cover in evergreen oak woodlands using remote sensing. *Forest Ecology and Management* 223: 45-53.
2. de Martí, S. P., J. R. R. Polo, E. G. Moya, L. V. Monterola, and A. E. Agustí. 2006. Optimizing pesticide spray application in tree crops. In *ASAE Annual Meeting*, Boston, Massachusetts. Oregon Convention Center, Portland, Oregon.
3. Escola, A., S. Planas, J. R. Rosell, J. Pomar, F. Camp, F. Solanelles, F. Gracia, J. Llorens, and E. Gil. 2011. Performance of an ultrasonic ranging sensor in apple tree canopies. *Sensors (Basel)* 11: 2459-2477.
4. Giles, D. K., M. J. Delwiche, and R. B. Dodd. 1988. Electronic measurement of tree canopy volume. *Transactions of the ASAE* 31: 264-272.
5. Jeon, H. Y., H. Zhu, R. Derksen, E. Ozkan, and C. Krause. 2011. Evaluation of ultrasonic sensor for variable-rate spray applications. *Computers and Electronics in Agriculture* 75: 213-221.
6. le Maire, G., C. François, K. Soudani, D. Berveiller, J. Y. Pontailler, N. Bréda, H. Genet, H. Davi, and E. Dufréne. 2008. Calibration and validation of hyperspectral indices for the estimation of broadleaved forest leaf chlorophyll content, leaf mass per area, leaf area index and leaf canopy biomass. *Remote Sensing of Environment* 112: 3846-3864.
7. Llorens, J., E. Gil, J. Llop, and A. Escolà. 2010. Variable rate dosing in precision viticulture: Use of electronic devices to improve application efficiency. *Crop Protection* 29: 239-248.
8. Llorens, J., E. Gil, J. Llop, and A. Escola. 2011. Ultrasonic and LIDAR sensors for electronic canopy characterization in vineyards: Advances to improve pesticide application methods. *Sensors (Basel)* 11: 2177-2194.
9. Mäkelä, H., and A. Pekkarinen. 2004. Estimation of forest stand volumes by Landsat TM imagery and stand-level field-inventory data. *Forest Ecology and Management* 196: 245-255.
10. Masoudi, H., R. Alimardani, M. Omid, S. S. Mohtasebi, and S. Bagheri Shooraki. 2010. A Laboratory study of ultrasonic sensors to determine position and orientation of mobile robots for greenhouse. *Iranian Journal of Biosystems Engineering* 41: 69-79. (In Farsi).
11. Meron, M., S. Cohen, and G. Melman. 2000. Tree shape and volume measurement by light interception and aerial photogrammetry. *Transactions of the American Society of Agricultural Engineers* 43: 475-481.
12. Möttus, M., M. Sulev, and M. Lang. 2006. Estimation of crown volume for a geometric radiation model from detailed measurements of tree structure. *Ecological Modelling* 198: 506-514.
13. Rosell, J. R., and R. Sanz. 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.
14. Schumann, A. W., and Q. U. Zaman. 2005. Software development for real-time ultrasonic mapping of tree canopy size. *Computers and Electronics in Agriculture* 47: 25-40.
15. Zaman, Q. U., and M. Salyani. 2004. Effects of foliage density and ground speed on ultrasonic measurement of citrus tree volume. *Applied Engineering in Agriculture* 20: 173-178.
16. Zhai, C., X. Wang, C. Zhao, W. Zou, D. Liu, and Y. Mao. 2011. Orchard tree structure digital test system and its application. *Mathematical and Computer Modelling* 54: 1145-1150.