

## بررسی میدانی و آزمایشگاهی قابلیت حسگرهای فراصوتی USS3 برای سنجش غیرتماسی ساختار هندسی توده درخت پسته

حسین مقصودی<sup>۱</sup> - سعید مینایی<sup>۲\*</sup> - برات قبادیان<sup>۳</sup> - حسن مسعودی<sup>۴</sup>

تاریخ دریافت: ۹۲/۳/۲۲

تاریخ پذیرش: ۹۳/۲/۲۷

### چکیده

ساختار شناسی الکترونیکی به منظور تعیین ویژگی‌های فیزیکی توده گیاهان یکی از مباحث مهم در مدیریت محصولات درختی می‌باشد. حسگرهای فراصوتی و نوری تاکنون بیشترین کاربرد را در این زمینه داشته‌اند. هدف این پژوهش ارزیابی عملکرد حسگر فراصوتی USS3 در شرایط آزمایشگاه و مزرعه به منظور سنجش قابل اعتماد اندازه‌گیری‌های فاصله برای تخمین حجم تاج درخت پسته بود. برای رسیدن به این هدف، روش بررسی برای تحلیل عملکرد حسگر در رابطه با تشخیص فاصله شاخ و برگ و اثر تداخل میان حسگرهای مجاور که به طور هم‌زمان کار می‌کنند، طراحی شد. نتایج نشان داد که خطای میانگین برای اندازه‌گیری فاصله با اشیاء توسط حسگر فراصوتی در شرایط آزمایشگاه ۰/۶۴ سانتی‌متر است. افزایش تغییرات در شرایط میدانی، به‌ویژه تحرک و غیرصلب بودن شاخ و برگ درختان، دقت این نمونه از حسگرها را هنگام برآورد فاصله تا توده گیاه کاهش می‌دهد. خطای میانگین در چنین شرایطی ۳/۱۹ سانتی‌متر به‌دست آمد. هنگام بررسی اثر تداخل حسگرهای مجاور در فاصله ۳۰ سانتی‌متری، خطای میانگین ۱۴/۶۵ سانتی‌متر و زمانی که فاصله حسگرهای مجاور به ۶۰ سانتی‌متر افزایش یافت خطای میانگین ۶/۷۳ سانتی‌متر محاسبه گردید. آزمایش‌ها نشان داد که این حسگرها زمانی که در فاصله ۶۰ سانتی‌متری یا بیشتر نسبت به یکدیگر قرار گیرند، برای تخمین فاصله تا درخت در شرایط باغ پسته مناسب بوده و می‌توان با اطمینان از این حسگرها در یک سامانه برای تخمین پارامترهای ساختاری توده گیاه در محبت باغبانی دقیق استفاده کرد.

واژه‌های کلیدی: اندازه‌گیری فاصله، تداخل امواج فراصوتی، توده درخت، حسگر فراصوتی

### مقدمه

پژوهشگران شروع به طراحی سامانه‌های الکترونیکی برای تعیین پارامترهای هندسی توده‌های گیاهان کردند. اولین طرح‌های پیشنهادی برای تخمین حجم درخت از حسگرهای فراصوتی متعدد روی یک دکل عمودی (McConnell *et al.*, 1983) یا به صورت سوار شده روی سمپاش متصل به تراکتور (Giles *et al.*, 1988) سود می‌برند. برخی اختراعات ثبت شده (Giles *et al.*, 1989b; Roper, 1988) و همچنین کارهای پژوهشی (Balsari and Tamagnone, 1988; Brown *et al.*, 2008; Giles *et al.*, 1987; Giles *et al.*, 1989a) به کارگیری حسگرهای فراصوتی را تنها برای شناسایی وجود درخت گزارش دادند. نمونه دیگر کاربرد حسگرهای فراصوتی، سمپاشی درختان مرکبات از فاصله ثابت بود (Moltó *et al.*, 2000). افشانک‌ها روی یک بازوی متحرک که مرز درخت را با توجه به اطلاعات جمع‌آوری شده از حسگرها تعقیب می‌کرد، قرار می‌گرفتند. در این پژوهش دقت حسگرها در دو حالت مختلف قرارگیری در فواصل عمودی ۵۰ و ۷۵ سانتی‌متر بررسی شد. خطای میانگین در اندازه‌گیری فاصله در باغ مرکبات ۱۱/۴ سانتی‌متر گزارش شد. به هر حال، اطلاعات در مورد اهمیت تأثیر توده گیاه بر مخروط صدا<sup>۵</sup>

امواج صوتی، امواج مکانیکی طولی هستند که از ارتعاش مولکول‌های هوا حاصل می‌شوند. فیزیک امواج مکانیکی طولی در گستره وسیعی از بسامدها به وجود می‌آیند که این امواج صوتی در محدوده‌ی ۲۰ تا حدود ۲۰۰۰۰ هرتز، گستره‌ی شنوایی انسان نامیده می‌شوند. فیزیک امواج مکانیکی طولی را که بسامدشان بالای این گستره باشد، امواج فراصوتی گویند (Maghsoudi and Minaei, 2013). بیش از ۴۰ سال است که حسگرهای فراصوتی با هدف‌های مختلفی در بخش کشاورزی به‌کار برده شده‌اند (Planas *et al.*, 2011). یکی از این کاربردها تشخیص و فاصله سنجی برای استخراج اطلاعات هندسی از درختان میوه است. نخستین پیشرفت‌ها در این زمینه به کاربرد آفت‌کش‌ها و قارچ‌کش‌ها در باغ‌های میوه مربوط می‌شد. از زمانی که تنظیم مقدار مصرف این مواد بر مبنای تراکم توده گیاه مطرح شد (Byers *et al.*, 1971; Morgan, 1964) برخی

۱، ۲ و ۳- به ترتیب دانش‌آموخته دکتری و دانشیاران گروه مهندسی مکانیک بیوسیستم، دانشکده کشاورزی، دانشگاه تربیت مدرس تهران

۴- استادیار گروه مهندسی مکانیک بیوسیستم، دانشگاه شهید چمران اهواز

\*- نویسنده مسئول: (Email: minaei@modares.ac.ir)

جلو و همچنین تأثیرگذاری دمای هوا در مدت زمان پرواز<sup>۳</sup> امواج صوتی گزارش شد. خطای دیگر مربوط به انحراف در مسیر پیشروی بود. با این حال، اطلاعاتی درباره تأثیر ساختار درخت بر خروجی حسگر یا دیگر پارامترهای بالقوه مؤثر بر بازتاب امواج فراصوتی، ارائه نشده است. اخیراً به منظور تعیین دقت حسگرهای فراصوتی هنگام اندازه‌گیری فاصله تا توده‌های محصولات باغی مطالعاتی انجام شده است (Jeon *et al.*, 2011). اگرچه نتایج این آزمایش‌ها رضایت بخش بود، ولی تعمیم این نتایج به درختان مختلف با ساختارهای متفاوت مشکل می‌باشد.

اکثر کاربردهای معرفی شده از حسگرهای فراصوتی در شناسایی ویژگی‌های توده گیاهی بر همبستگی برآوردهای دستی از عرض یا حجم توده گیاهی، با نتایج به‌دست آمده توسط حسگرها تمرکز دارند. این پژوهش‌ها هیچ‌گونه اطلاعاتی درباره برهم‌کنش میان امواج فراصوتی و توده گیاه و همچنین چگونگی تداخل با تخمین‌های حسگرهای فراصوتی ارائه نکرده‌اند (Maghsoudi and Minaei, 2014). در کاربردهای فاصله سنجی، حسگرهای فراصوتی برای تخمین فاصله تا هدف (با سطح صلب) با به‌کارگیری بازتاب آینه‌ای امواج فراصوتی طراحی می‌شوند. سطح درخت پسته از برگ‌های با سطح کوچک که در زوایای مختلف قرار گرفته‌اند تشکیل شده است. در نتیجه بازتاب امواج فراصوتی در مقایسه با سطح اشیای صلب پراکندگی بیشتری داشته و این پراکندگی به شدت بر فاصله برآورد شده توسط حسگرها تأثیرگذار است. در این مقاله یک حسگر فراصوتی به‌منظور بررسی مناسب بودن عملکرد و قابلیت اطمینان توانایی برآورد فاصله تا درخت در باغ پسته، ابعاد درخت از جمله ضخامت توده مورد تحلیل قرار گرفت. آزمون‌ها در آزمایشگاه و باغ به‌صورت ثابت برای ارزیابی توانایی برآورد فاصله تا درخت پسته و تأثیر تداخل حسگرهای مجاور اجرا شد. این مطالعه گام نخست از یک پژوهش جامع است که در آن از این حسگرها برای تخمین حجم توده درختان میوه به‌منظور کاربرد در تجهیزات تیمار متغیر در قالب باغبانی دقیق استفاده خواهد شد.

## مواد و روش‌ها

### حسگر و سامانه داده برداری

حسگرها روی یک دکل عمودی متصل شدند که توسط تراکتور در باغ جابه‌جا می‌شد. از باتری ۱۲ ولت به‌منظور تأمین ولتاژ مورد نیاز برای راه‌اندازی حسگرها استفاده شد. در این پروژه حسگرهای فراصوتی مدل USS3 ساخت شرکت Best Technology کشور ژاپن به‌کار گرفته شدند (جدول ۱). این حسگرها از دو عدد سونار<sup>۴</sup>

یا تأثیر تداخل امواج روی مقادیر خطا مهیا نشد. همین پژوهشگران سمپاش دیگری را طراحی کردند که قادر به پاشیدن ۳ دبی متفاوت بر پایه برآورد عرض درخت توسط حسگرهای فراصوتی بود (Moltó *et al.*, 2001). این سه حالت عبارت بودند از: بدون پاشش، در صورت عدم وجود پوشش گیاهی، پاشش نیمی از دبی، هنگام تشخیص پوشش گیاهی کم و پاشش دبی کامل، هنگامی که عرض درخت از آستانه پیش فرض بیشتر باشد. این طراحی به روشی برای تغییرات پیوسته دبی با توجه به تغییرات پوشش گیاهی در طول ردیف‌های درختان میوه، انگور و مرکبات منجر شد (Escolà *et al.*, 2007; Escolà *et al.*, 2002; Gil *et al.*, 2007; Llorens *et al.*, 2010; Solanelles *et al.*, 2002; Solanelles *et al.*, 2006). پژوهش‌های زیادی برای تخمین ابعاد درخت در باغ مرکبات انجام شده است. کارهای نخستین روی مقایسه برآورد حجم درخت به‌صورت دستی، بر پایه اندازه‌گیری‌های انجام شده با حسگرهای فراصوتی و لیدار<sup>۱</sup> تمرکز داشتند (Tumbo *et al.*, 2002). برآورد حسگرهای فراصوتی و لیدار همبستگی نسبتاً خوبی داشتند، در حالی که همبستگی با تخمین‌های دستی پایین‌تر بود. اختلاف با اندازه‌گیری‌های دستی را به ریزبینی نمونه برداری بالاتر توسط حسگرها منسوب کردند. سامانه فراصوتی شامل یک دکل عمودی با ده حسگر فراصوتی در هر سمت بود. برای پرهیز از تداخل امواج، حسگرها به‌صورت متناوب به‌ترتیب در گروه‌های مختلف فعال شدند. این سامانه برای تهیه نقشه حجم توده درخت در باغ‌های مرکبات با متصل کردن گیرنده DGPS نیز به‌کار گرفته شد (Schumann and Zaman, 2005; Zaman and Schumann, 2005; Zamahn and Salyani, 2004). در درختان با تراکم کمتر، اختلافات بیشتری میان برآوردهای دستی و حسگری وجود داشت و اطلاعات حجم توده گیاهی برای تنظیم دبی کود (Schumann *et al.*, 2006; Zaman *et al.*, 2005) و برآورد میزان محصول در باغ‌های مرکبات به‌کار برده شد (Zaman *et al.*, 2006). در رابطه با ریزبینی<sup>۲</sup> نمونه برداری عمودی، حسگرهای لیدار در یک تخمین دقیق‌تر، اطلاعات بسیار بیشتری در مقایسه با آرایه‌ای از نتایج حسگرهای فراصوتی از پارامترهای توده گیاه فراهم می‌کنند (Arnó *et al.*, 2009; Palleja *et al.*, 2010; Rosell *et al.*, 2009a; Rosell *et al.*, 2009b). کاربرد دیگر داده‌های حجم توده برآورد شده با حسگرهای فراصوتی، برای تعیین نواحی مدیریتی در باغ‌های مرکبات می‌باشد (Mann *et al.*, 2011; Zaman and Schumann, 2006). همچنین منابع خطا در برآورد حجم درختان مرکبات با سامانه توصیف شده در مقایسه با اندازه‌گیری‌های دستی مطالعه شد (Zaman *et al.*, 2007). مهم‌ترین منابع خطا دقت ناکافی گیرنده DGPS در برآورد سرعت حرکت رو به

1- Lidar

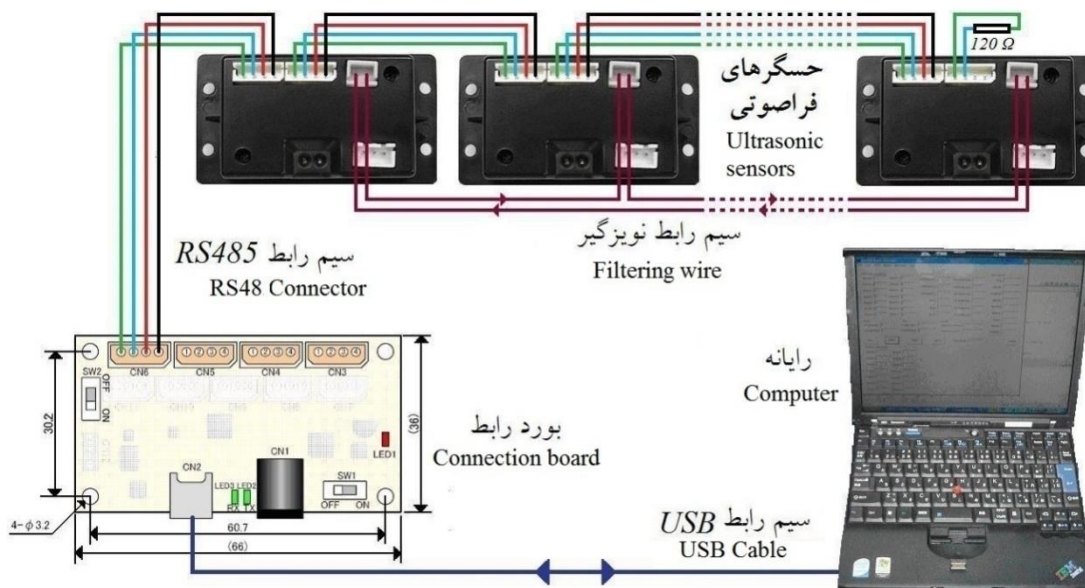
2- Resolution

3- Time of flight

4- Sonar

فراصوتی نصب شده‌اند. یکی از این سونارها برای فرستادن امواج فراصوتی و دیگری برای دریافت آن‌ها به کار می‌رود (شکل ۱).

(وسيله‌ای که می‌تواند پالس‌های الکتریکی را به امواج فراصوت و امواج فراصوتی را به پالس‌های الکتریکی تبدیل کند) تشکیل شده که روی یک برد الکترونیکی شامل مدارهای فرستنده و گیرنده امواج



شکل ۱- حسگر فراصوتی USS3 و نحوه اتصال آن‌ها به رایانه (Masoudi et al., 2012)

Fig.1. USS3 ultrasonic sensor and their connection to computer

جدول ۱- ویژگی‌های حسگر فراصوتی USS3

Table 1- Features of USS3 ultrasonic sensor

ویژگی Feature	مقدار Value
وزن Weight	19 g
ابعاد Dimensions	W62×D34×H21 mm
حداکثر فاصله اندازه‌گیری The maximum measurement distance	10 m
ریزبینی Measurement resolution	1cm
فرکانس پاسخ Resonance frequency	40 kHz
چرخه اندازه‌گیری Measurement cycle	3~128 ms
نوع سیگنال فرمان Command Signal	Digital packet
ولتاژ برق ورودی Range of power-supply voltage	DC 6.5~36 V
مقدار توان مصرفی Current consumption	400 mW
نوع خروجی Output type	Digital and Analoge

حرکت می‌کنند (تقریباً در فاصله‌ای کمتر از نصف این فاصله تا مرکز ردیف قرار می‌گیرند) محدوده اندازه‌گیری حسگرها از ۲۰ تا ۲۰۰ سانتی‌متر در نظر گرفته شد و پارامترهای داخلی حسگر تثبیت شد. هر تغییری در محدوده اندازه‌گیری حسگر موجب تغییر در زاویه موج ساطع شده می‌شود، یعنی شناسایی محدوده کوتاه‌تر شامل زاویه مخروط باریک‌تر و عرض کمتر می‌شود. لذا به دلیل تغییر تنظیمات حسگر و همچنین وجود تفاوت میان محصولات مختلف، عملکرد حسگر فراصوتی پیش از به کارگیری برای تعیین ویژگی‌های ساختاری درختان پسته مورد ارزیابی قرار گرفت. تنظیمات اعمال شده روی حسگرها در جدول ۲ ارائه شده‌اند.

#### سامانه داده برداری برای ارتباط سخت افزار و رایانه

برای دریافت اطلاعات حسگرها و انتقال آن‌ها، از رابط کاربری یا سامانه داده برداری بهره‌گیری شد. سامانه داده برداری یک رابط کاربری بر مبنای میکروکنترلر AVR است که از طریق درگاه USB با رایانه در ارتباط است و اطلاعات وارد شده به ورودی‌ها را به رایانه منتقل می‌کند. برنامه‌ریزی میکروکنترلر با زبان C و با کامپایلر Codevision انجام و همچنین برنامه کنترلی در نرم افزار پر قدرت Visual Studio 2008 نوشته شد.

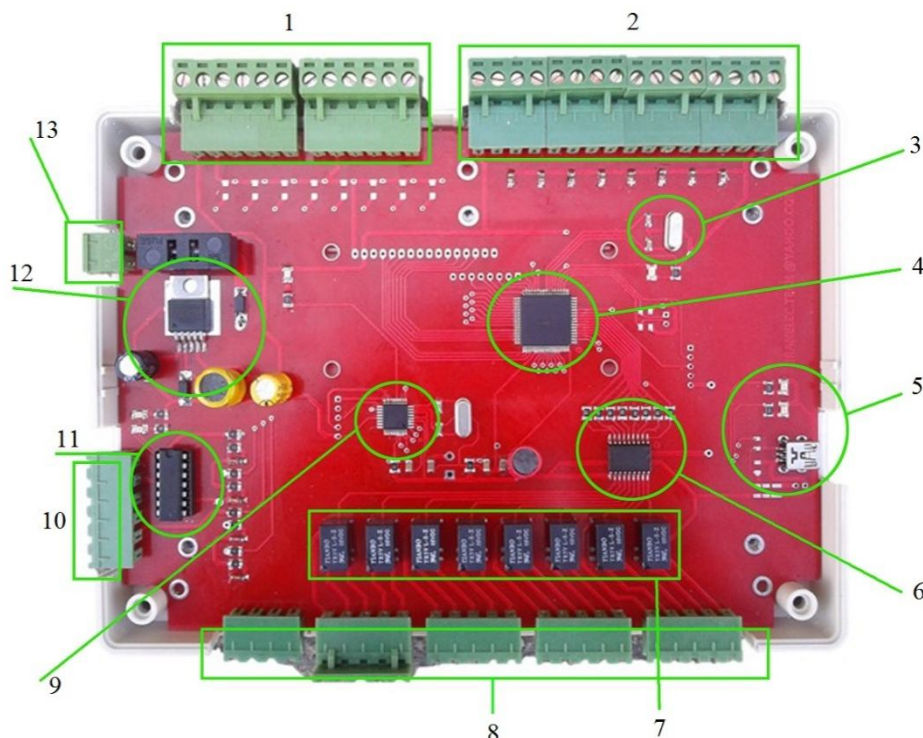
این حسگر با تولید امواج فراصوتی، انتشار و دریافت بازتاب آن‌ها پس از برخورد با یک سطح، فاصله را اندازه‌گیری می‌کند. این حسگر دارای دو نوع خروجی است، یکی خروجی رقومی که مقدار آن فاصله حسگر تا نزدیک‌ترین جسم برحسب سانتی‌متر (با دقت ۱ سانتی‌متر) و دیگری خروجی آنالوگ که ولتاژی متناسب با فاصله است و به صورت خطی از صفر تا ۱۰ ولت (برای صفر تا ۱۰ متر) تغییر می‌کند (Masoudi et al., 2012). سیگنال آنالوگ تولیدی توسط این حسگرها، متناسب با فاصله تا هدف تشخیصی است، که با توجه به این فاصله و سایر فواصل (عرض و ارتفاع)، حجم هدف قابل محاسبه می‌باشد. عرض درخت به وسیله ضرب سرعت پیشروی در مدت زمان حس کردن توده توسط حسگر حاصل می‌شود و ارتفاع با توجه به موقعیت نصب حسگرها میسر می‌گردد.

مقادیر متغیرهای داخلی حسگر با توجه به شرایط کاری و فاصله مورد نیاز آن تعیین و در ابتدای کار تنظیم شد (جدول ۲). این مدل حسگر دارای دامنه کاری وسیعی از چهار تا ۱۰۰۰ سانتی‌متر می‌باشد که با توجه به شرایط کاری و فاصله مورد نیاز مقادیر پارامترهای داخلی آن برای تشخیص اجسام در فواصل ۲۰ تا ۲۰۰ سانتی‌متر تعیین و در ابتدا تنظیم شد (Masoudi et al., 2011). با توجه به این که در باغ‌های میوه معمولاً فاصله بین ردیف درختان ۴ متر یا کمتر است و حسگرها که توسط تراکتور بین ردیف‌ها

جدول ۲- مقادیر انتخاب شده برای پارامترهای داخلی حسگرهای فراصوتی USS3

Table 2- Selected values for internal parameters of USS3 ultrasonic sensors

مشخصه Parameter	محدوده تعیین شده Range	مقادیر انتخاب شده Selected values
شماره شناسه ID	0~253	0~4
سرعت ارسال داده‌ها Baud rate	7843~2000000 bit s <sup>-1</sup>	57600 bit s <sup>-1</sup>
زمان تأخیر بازگشت پالس Return delay time	0~508 μs	160μs
تعداد پالس‌ها Number of pulses	2~250 PPS	5 PPS
سیکل کاری Cycle	3~128 ms	64 ms
باند مرده Dead band	0~128 ms	800 ms
سطح تشخیص Detect level	0~4095	768
سرعت امواج فراصوتی Sound speed	0~999 m s <sup>-1</sup>	348 m s <sup>-1</sup>
دامنه کاری Distance range	4~1000 cm	10~200 cm



**شکل ۲-** سامانه داده برداری برای ارتباط سخت افزار با رایانه شامل: (۱) ورودی دیجیتال، (۲) ورودی آنالوگ، (۳) کریستال ۴ مگاهرتز، (۴) تراشه اصلی ATmega128 برای اجرای برنامه اصلی و ارسال اطلاعات به رایانه، (۵) اتصال USB و مبدل سریال FT232، (۶) درایور رله ULN2803، (۷) رله خروجی، (۸) فیش‌های خروجی دیجیتال، (۹) تراشه کمکی ATmega 8 برای شمارش پالس‌های انکودر و ارسال به تراشه اصلی، (۱۰) فیش انکودر، (۱۱) تشخیص جهت چرخش انکودر ۴۰۱۳، (۱۲) مبدل ولتاژ ۱۲ به ۵ ولت LM2576، (۱۳) فیش منبع تغذیه ۱۲ ولت مستقیم

**Fig.2.** Data acquisition system to connect with computer consists of: (1) Digital input socket, (2) Anologe input socket, (3) Crystal 4 MHz, (4) Main microcontroller ATmega128 execute main program send values to PC, (5) USB connector and serial convertor FT232, (6) Relay driver ULN2803, (7) Output relay, (8) Digital output socket, (9) Auxialary microcontroller ATmega8 calculate encoder pulses send encoder values to main microcontroller, (10) Encoder socket, (11) Encoder direction detector 4013, (12) 12 to 5 volt convertor LM2576, (13) Power supply socket 12 volt DC

نکته قابل توجه درباره حسگرها زاویه پرتوهای فراصوتی ساطع شده می‌باشد. شرکت سازنده حسگرها مدعی است که اشیاء در زوایای بین ۱۵ تا ۴۵ درجه توسط حسگرها قابل شناسایی هستند و شکل و اندازه مخروط صدا بسته به هدف مورد شناسایی متفاوت می‌باشد. به‌منظور بررسی ادعای مطرح شده، سطحی با طول و عرض ۲ متر به مربع‌های کوچک‌تر به ضلع ۲۰ سانتی‌متر تقسیم شد و اجسام با شکل‌های مختلف به ترتیب در هر یک از خانه‌های آن گذاشته شدند. اهداف مورد نظر شامل یک جسم با سطح مستطیلی ۲۰×۱۰ سانتی‌متر مربع و یک جسم استوانه‌ای شکل با قطر ۱۰ سانتی‌متر بودند. در هر نقطه " دیده شدن " جسم توسط حسگر بررسی شد و در پایان ناحیه دید واقعی حسگر با استفاده از نرم افزار Excel ترسیم گردید. برای به‌دست آوردن محدوده قابل شناسایی توسط حسگرها، جسم مستطیلی یک بار در بهترین وضعیت بازتاب و بار دیگر عمود بر محور مرکزی مخروط صدا قرار گرفت (شکل ۴). برای فهم بهتر به شکل ۸ رجوع شود.

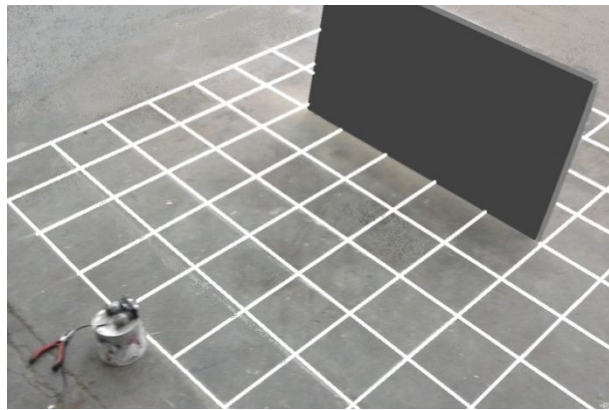
#### اندازه‌گیری فاصله در آزمایشگاه

این آزمایش‌ها با هدف دستیابی به قابلیت‌های حسگرهای فراصوتی در شرایط ایده‌آل توسط یک هدف صلب فلزی با سطح صاف به ابعاد ۱۰۰×۵۰ سانتی‌متر مربع در دانشکده کشاورزی دانشگاه تربیت مدرس انجام شدند. این سطح صلب در فواصل مختلف از ۲۰ تا ۲۲۰ سانتی‌متر جابه‌جا شد و خروجی حسگرها در هر موقعیت ثبت گردید (شکل ۳). آزمایش‌ها در حالت کاملاً ایستا و شرایط بدون باد اجرا شد. تحلیل‌های آماری شامل برازش مدل رگرسیون خطی (رابطه ۱) به‌منظور ایجاد یک رابطه کاربردی میان فاصله تا حسگر و خروجی آنالوگ حسگر می‌باشد. کیفیت برازش انجام شده توسط تحلیل فاصله اندازه‌گیری شده در مقابل خروجی حسگر و با ضریب تعیین ارزیابی گردید.

$$d = \beta_0 + \beta_1 V \quad (1)$$

در رابطه (۱)،  $d$  فاصله برآورد شده،  $\beta_0$  و  $\beta_1$  پارامترهای ثابت و  $V$  خروجی حسگر به‌عنوان متغیر مستقل می‌باشد.





شکل ۳- طرح آزمایش برای اندازه‌گیری فاصله با حسگر فراصوتی در آزمایشگاه

Fig.3. Test layout designed to measure the distance from the ultrasonic sensor in laboratory



شکل ۴- آزمون تعیین ناحیه دید واقعی حسگرهای فراصوتی با اجسام گرد و تخت؛ (a) سطح انحنادار، (b) سطح تخت

Fig.4. Examination of actual field of view of ultrasonic sensors with round and flat objects; (a) Round surface, (b) Flat surface

تا برگ‌ها استفاده شد. این عمل ۶۰ بار در نواحی مختلف برای بررسی‌های آماری انجام شد.

#### بررسی اثر تداخل امواج

هدف این آزمایش بررسی تأثیر بازتاب امواج حسگرهای مجاور روی حسگر مرکزی است که به‌طور هم‌زمان کار می‌کنند. برای جلوگیری از به‌وجود آمدن تداخل میان امواج بازگشتی، تعیین فاصله عمودی بین حسگرها به‌صورت تجربی ضروری است. در این آزمایش دو جفت حسگر در فاصله‌های  $\pm 30$  و  $\pm 60$  سانتی‌متر اطراف حسگر مرکزی قرار گرفتند (شکل ۵ الف). این فواصل با توجه به قابلیت استفاده عملی در این پژوهش و براساس ویژگی‌های پوشش درخت انتخاب شدند. لازم به ذکر است که برای برآورد بهتر پارامترهایی چون سطح مقطع یا حجم پوشش درخت، فاصله نزدیک‌تر حسگرها نسبت به یکدیگر موجب تفکیک نمونه برداری عمودی بیشتری می‌شود.

#### اندازه‌گیری فاصله در شرایط واقعی

هدف این آزمایش مقایسه خروجی آنالوگ حسگرها هنگام اندازه‌گیری فاصله‌های مختلف تا درخت با خروجی حسگر هنگام اندازه‌گیری فاصله تا هدف ایده‌آل (کاملاً صلب با سطح صاف) می‌باشد. این آزمایش‌ها در باغ‌های پسته روستای پیک شهرستان ساوه و در اوایل فصل تابستان انجام شد. برای این منظور ابتدا حسگر در مقابل درخت ثابت شد و خروجی حسگر مرکزی ثبت گردید (شکل ۵ ا). پس از آن با کمک یک لیزر نقطه‌ای نخستین برگ شناسایی شده موازی با حسگر فراصوتی (عمود بر امواج تابیده شده) قرار گرفت (شکل ۵ ب). مرحله بعد اندازه‌گیری دستی فاصله حسگر تا برگ مشخص شده بود (شکل ۵ ج). سپس، کاغذ مقوای هدف با ابعاد  $20 \times 10$  سانتی‌متر در مقابل حسگر قرار گرفت تا به ولتاژ قبلی برسد (شکل ۵ د) و سرانجام توسط متر نواری فاصله تا مقوا اندازه‌گیری شد (شکل ۵ ع). فاصله تا مقوا برای ارزیابی فاصله‌های اندازه‌گیری شده



شکل ۵- (a) دکل عمودی به همراه حسگرهای فراصوتی برای اندازه‌گیری فاصله و بررسی اثر تداخل، (b)، (c)، (d) و (e) مراحل متوالی برای بررسی فاصله

Fig.5. (a) Vertical mast with ultrasonic sensors to determine distance and interference, (b), (c), (d) and (e) Sequence of the procedure for distance assessment



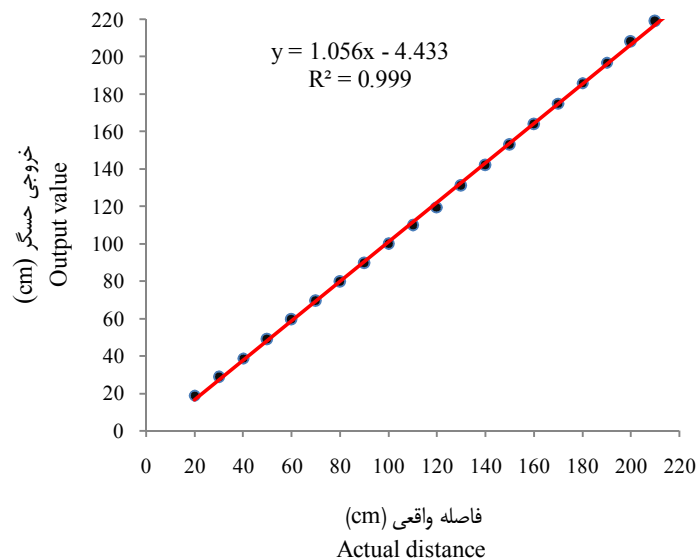
ایستا ممکن است مفید باشد ولی به هیچ وجه برای سامانه متحرک رضایت بخش نیست. با این حال تعیین حداقل فاصله بین حسگرهای فعال به منظور به دست آوردن بالاترین تفکیک عمودی برای برآورد بهتر پارامترهای درخت بدون کمترین میزان تداخل ضروری است که این فاصله عمودی مناسب برای نصب حسگرها در این حالت باید با آزمون و خطا مشخص شود.

## نتایج و بحث

### اندازه‌گیری فاصله در آزمایشگاه

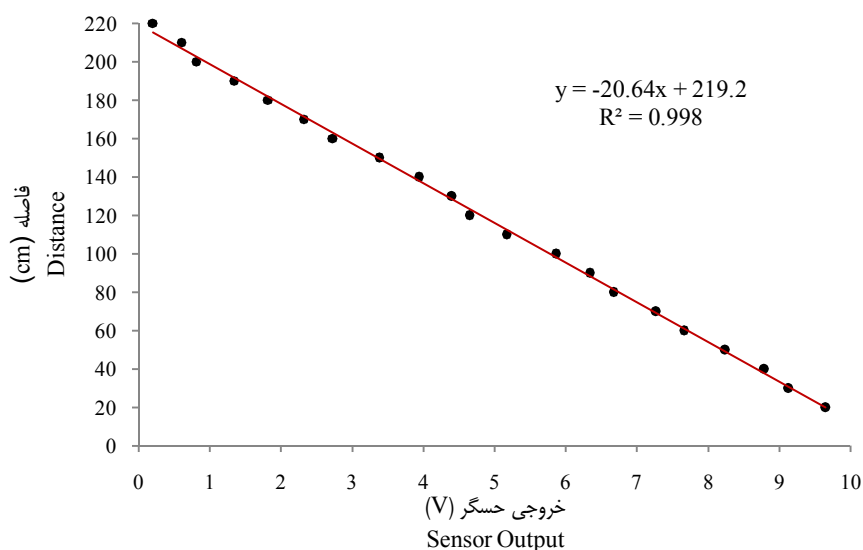
شکل ۶ مقادیر خروجی حسگر فراصوتی در برابر مقادیر واقعی فواصل در زاویه صفر درجه را نشان می‌دهند. ملاحظه می‌شود که در فواصل کم خطا زیاد است. بیشترین خطا در فاصله ۲۰ سانتی‌متری است که ۶ درصد می‌باشد. با افزایش فاصله حسگر از دیواره مقدار خطا نیز کاهش می‌یابد، به گونه‌ای که در فواصل ۶۰ تا ۱۳۰ سانتی‌متری میزان این خطا به کمتر از یک درصد می‌رسد، ولی با افزایش فاصله مجدداً مقدار خطا زیاد می‌شود. با توجه به افزایش شدید میزان خطا از فاصله ۲۲۰ سانتی‌متری به بعد بدیهی است که با مقادیر انتخاب شده برای پارامترهای داخلی حسگرهای فراصوتی USS3 نمی‌توان این حسگرها را با دقت کافی در فواصل بیشتر از ۲۲۰ سانتی‌متری استفاده نمود. از آنجا که فاصله بین ردیف‌های درختان رایج در باغ‌ها حدود ۴ متر است، لذا می‌توان این حسگرها را با تنظیمات انتخاب شده، در باغ‌ها به کار برد.

در تحقیقات دیگران فاصله بین حسگرها ۵۰ و ۷۵ سانتی‌متر در نظر گرفته شده است (Moltó *et al.*, 2000). در این پژوهش با توجه به محدوده قابل تشخیص حسگرها، اثر تداخل برای فاصله‌ای کمتر از ۵۰ سانتی‌متر (۳۰ سانتی‌متر) و همچنین فاصله‌ای بین ۵۰ و ۷۵ سانتی‌متر (۶۰ سانتی‌متر) برای تعیین حداقل فاصله قابل اعتماد حسگر تعیین گردید. در این آزمایش حسگر مرکزی به تنهایی و همچنین هم‌زمان با حسگرهای مجاور به ترتیب در فواصل  $\pm 30$  و  $\pm 60$  فعال شده و مقادیر خطای آن‌ها با یکدیگر مقایسه شد. برای بررسی‌های آماری، این فرآیند ۴۰ بار در نواحی مختلف تکرار شد. حسگرهای فراصوتی نسبت به تداخل امواجی که از حسگرهای مجاور ساطع می‌شوند بسیار حساس می‌باشند. در حالتی که جسم به صورت مورب نسبت به حسگر فراصوتی قرار گیرد، ممکن است موج منعکس شده از حسگر مجاور دریافت شود و موجب خطا شود. به منظور جلوگیری از تداخل امواج بازتابی حسگرهای دیگر برای خواندن داده‌های دقیق‌تر روشی برای همگام سازی (سنکرون کردن) حسگرها توسط شرکت سازنده ارائه شده که دارای معایبی می‌باشد. در این روش همگام سازی که حسگرها به نوبت فعال می‌شوند، زمان پاسخ طولانی لازم است چون هر حسگر فقط در مدت زمان کوتاهی فعال است و تا زمانی که تمام حسگرهای دیگر موجود در مدار شلیک نکنند، باید برای فعال شدن مجدد منتظر بماند. این امر موجب می‌شود آرایه‌ای از حسگرها قادر به اکتساب هم‌زمان خواننده‌ها نباشند که در کاربردهای عملی مسبب برآورد غیردقیق پارامترهایی چون سطح مقطع یا حجم توده درخت می‌شود. این راه حل برای سامانه



شکل ۶- مقادیر خروجی حسگر فراصوتی در برابر مقادیر واقعی فواصل  
 Fig.6. Output values of ultrasonic sensors versus actual distance values





شکل ۷- نمودار خروجی حسگر در برابر فاصله تا هدف

Fig.7. Sensor outputs versus distance to target

قابل بیان می‌باشد.

$$d = 219.28 - 20.648 V \quad (2)$$

رابطه (۲) در شرایط کنترل شده آزمایشگاهی به‌دست آمده و در آن فاصله برآورد شده (برحسب سانتی‌متر) و  $V$  سیگنال ولتاژ خروجی (برحسب ولت) است.

شکل‌های ۸ و ۹ ناحیه دید حسگرهای فراصوتی USS3 برای اجسام با سطوح تخت و انحنادار را نشان می‌دهد. همچنین برای مقایسه بهتر، محدوده معرفی شده توسط شرکت سازنده نیز روی نمودارها اضافه شده است (محدوده بین ۱۵ تا ۴۵ درجه). کاملاً واضح است که شکل جسم هدف و موقعیت قرارگیری آن در برابر امواج فراصوتی، بر قدرت شناسایی حسگر تأثیرگذار است. نتایج به‌دست آمده از این آزمون نشان داد که فاصله دو حسگر فراصوتی از یکدیگر روی دکل نمی‌تواند بیشتر از ۷۰ سانتی‌متر باشد. با توجه به این نتایج اگر حسگرهای فراصوتی در فاصله حدود ۶۰ سانتی‌متر از یکدیگر بر روی دکل قرار گیرند، مجموع میدان دید آن‌ها تقریباً تمام ارتفاع درخت را پوشش خواهد داد.

#### اندازه‌گیری فاصله در شرایط واقعی

تعداد کل مشاهدات برای آزمایش‌های درون باغ ۶۰ عدد بود و تعدادی از مشاهدات که در مقایسه با اندازه‌گیری‌های دستی غیر واقعی بودند، کنار گذاشته شدند. مدل برازش شده بر داده‌های حاصل شده قادر به تشریح ۹۷٪ تغییرات فاصله تا برگ اول می‌باشد. همچنین خطای میانگین برای این آزمایش‌ها ۳/۱۹ سانتی‌متر به‌دست آمد. شکل ۱۰ ولتاژ خروجی حسگر در مقابل مقادیر فاصله تا

خروجی حسگرهای فراصوتی با نوفه‌هایی<sup>۱</sup> همراه است. از آنجا که نوع نوفه‌های موجود در خروجی این حسگرها لحظه‌ای و غیریکتواخت (تصادفی) است، لذا برای حذف آن‌ها به‌کارگیری فیلتر میانه<sup>۲</sup> بهترین روش است (Masoudi *et al.*, 2012). این فیلتر قادر است نوفه‌های موجود در خروجی حسگرهای فراصوتی را به‌خوبی حذف نماید. هر چند ممکن است که کاربرد فیلتر میانه موجب یک تأخیر زمانی چند ثانیه‌ای (بسته به تعداد داده‌های انتخاب شده برای میانه‌یابی) در خروجی نهایی حسگرها شود، ولی با توجه به سرعت پایین رو به جلوی تراکتور (کمتر از ۸ کیلومتر در ساعت) در حین انجام عملیات، این تأخیر زمانی (در حد میلی‌ثانیه) تأثیر منفی قابل ملاحظه‌ای بر عملکرد تعیین شده نخواهد داشت (Maghsoudi, 2013).

#### نتایج آزمون تعیین ناحیه دید واقعی حسگرهای فراصوتی

نتایج آزمایش‌های اولیه در آزمایشگاه برای استخراج رابطه میان ولتاژ خروجی حسگر در مقابل جسم صلب در شکل ۷ نشان داده شده است. مقدار خطای میانگین ۰/۶۴ سانتی‌متر به‌دست آمد. با توجه به شکل ۷ به وضوح پیداست که میان سیگنال خروجی حسگر و فاصله جسم هدف همبستگی زیادی وجود دارد و مدل برازش شده قادر به تشریح ۹۹/۸٪ تغییرات پاسخ می‌باشد. در پژوهش‌های دیگر نیز به نتایج مشابهی اشاره شده است (Planas *et al.*, 2011). لذا با توجه به مدل رگرسیون، رابطه (۲) برای تبدیل خروجی حسگر به فاصله

1- Noise

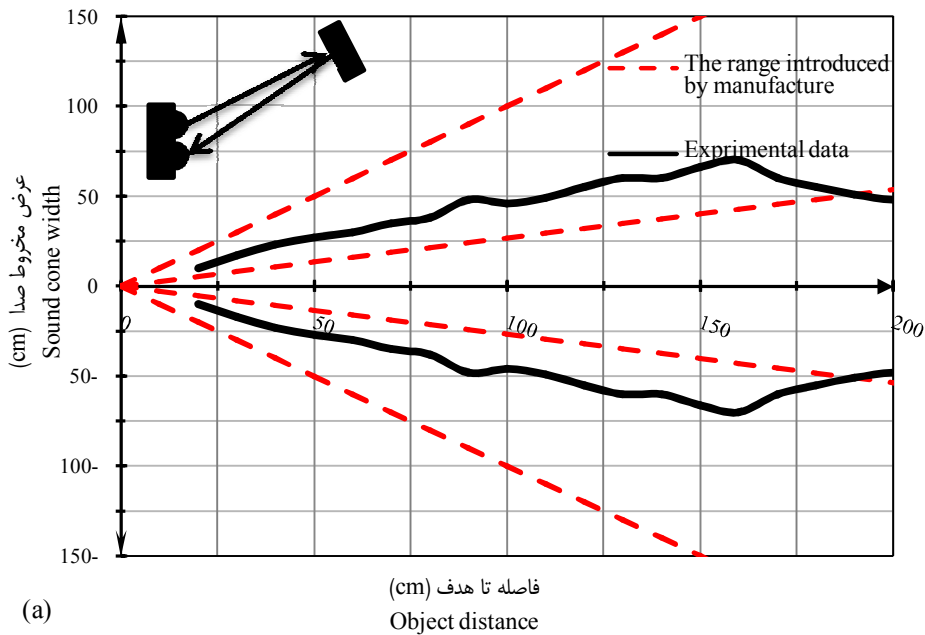
2- Median filter

کاهش دقت مشاهده شده برای اندازه‌گیری‌های درون باغ برای توده درخت، بر پارامتر نهایی برآورد شده (ضخامت) بسیار تأثیرگذار است. به‌عنوان مثال، چند سانتی‌متر اختلاف در اندازه‌گیری، هنگامی که سطح مقطع توده درخت تنها با یک حسگر فراصوتی انجام می‌شود، نسبت به حالتی که از دو یا چند حسگر استفاده شود، تأثیر منفی بیشتری خواهد داشت.

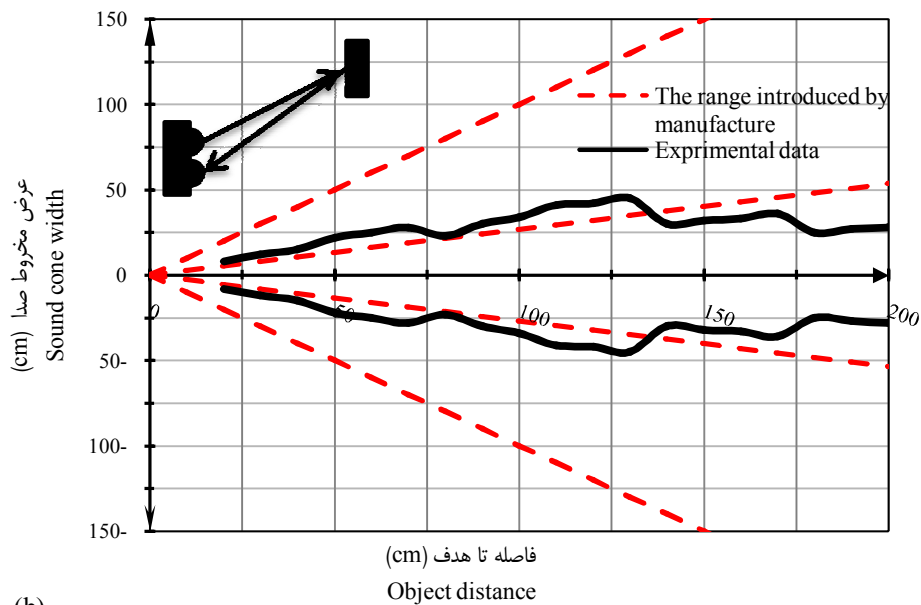
هدف را نشان می‌دهد که بر این پایه، فاصله از رابطه (۳) قابل محاسبه است.

$$d = 194.47 - 17.379 V \quad (3)$$

در رابطه (۳) که در شرایط میدانی به‌دست آمده،  $d$  فاصله برآورد شده (برحسب سانتی‌متر) و  $V$  سیگنال ولتاژ خروجی (برحسب ولت) می‌باشد.



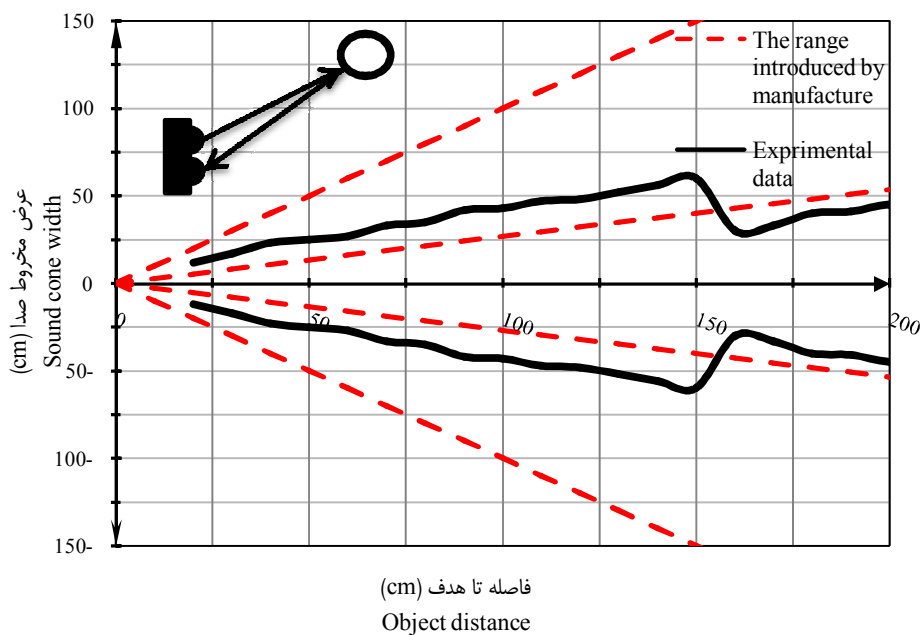
(a)



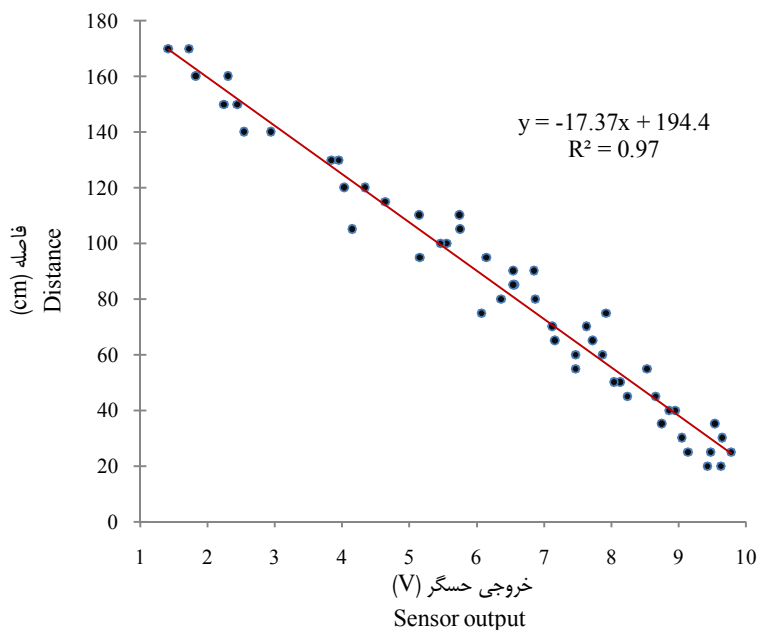
(b)

شکل ۸- نمودار مخروط صدا برای جسم تخت در دو حالت مختلف قرارگیری هدف؛ (a) بهترین وضعیت بازتاب، (b) عمود بر محور مرکزی مخروط

Fig.8. Sound cone diagrams for flat object in two different orientations aligned with; (a) The most optimum reflection, (b) Perpendicular to the ultrasonic cone axis



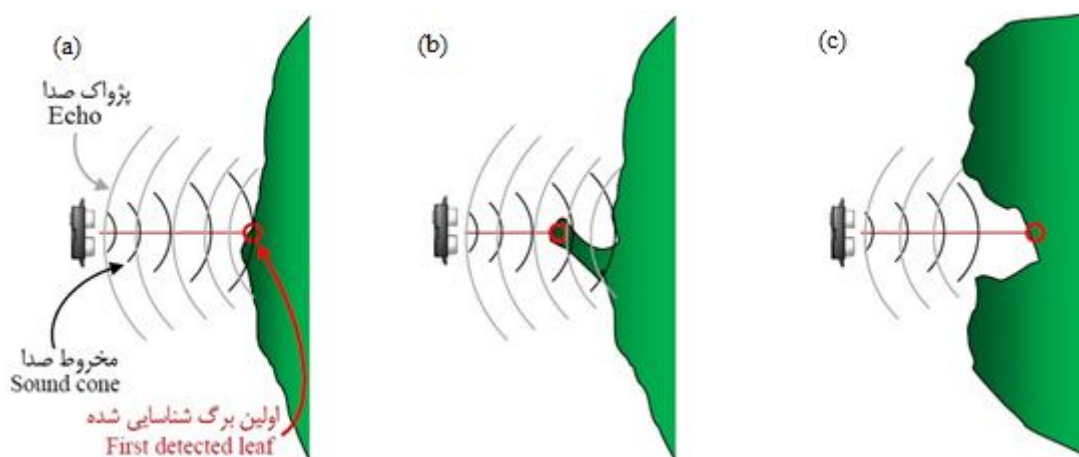
شکل ۹- نمودار مخروط صدا برای جسم گرد به همراه محدوده نامی زاویه مخروط صدا  
**Fig.8.** Sound cone diagrams for cylindrical object superimposed with nominal beam angle cone



شکل ۱۰- رابطه میان خروجی حسگر و فاصله تا هدف  
**Fig.10.** The relationship between the sensor output and the distance to the target

فاصله صحیح، نیازمند تشخیص گروهی از برگ‌ها است که به‌طور تقریبی در سطح عمودی یکسان قرار گرفته باشند (شکل ۱۱ a). اگر گروه برگ‌ها برای تولید بازتاب مناسب کافی نباشند، نمی‌تواند در آن محل بازتاب را ایجاد کند، بلکه در فاصله‌ای عقب‌تر که جرم بزرگ‌تری باشد، ایجاد می‌گردد (شکل ۱۱ b).

ویژگی‌های سطح درخت تغییرپذیری زیادی در برآوردهای فاصله به‌وجود می‌آورد، این تغییرپذیری توسط قابلیت برگ‌ها به‌منظور تولید بازتاب کافی برای حسگر ایجاد می‌شود. برای فهم بهتر، شکل ۱۱ چگونگی واکنش توده گیاه به امواج فراصوتی را نشان می‌دهد. اغلب اوقات یک برگ به‌تنهایی برای ایجاد بازتاب مناسب به‌دلیل سطح کوچک و همچنین زاویه آن، کافی نیست. حسگر برای برآورد



شکل ۱۱- برهم کنش‌های ممکن میان امواج فراصوتی و توده درخت برای؛ (a) سطح عمودی تقریباً یکسان، (b) قسمت بیرون‌زده، (c) سطح فرورفته

Fig.11. Interaction possibilities between ultrasonic waves and tree canopy for; (a) Approximately in the same vertical plane, (b) Outstanding part, (c) Indented surface

### بررسی اثر تداخل

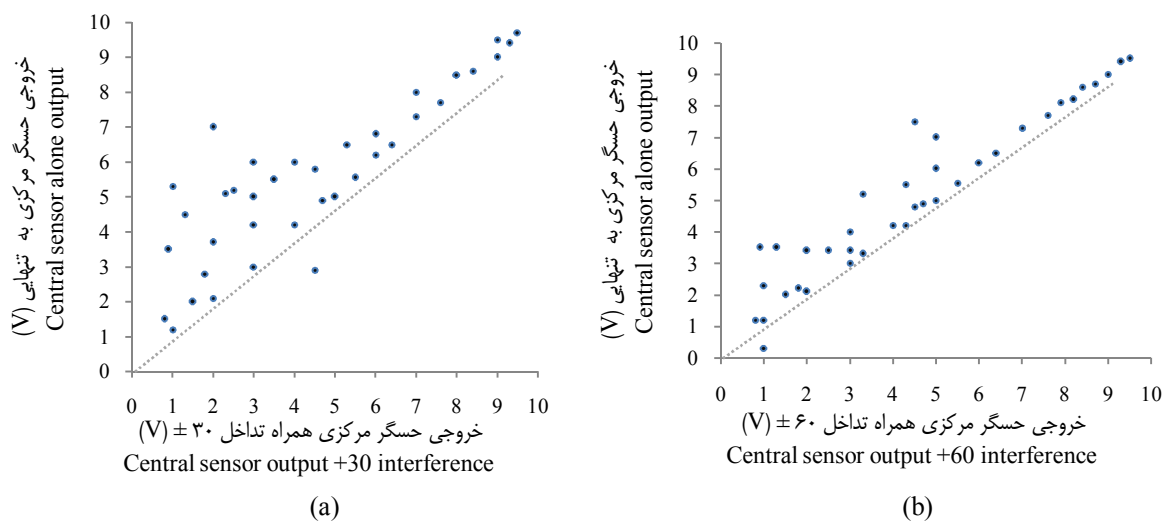
شکل ۱۲ خروجی حسگر مرکزی هنگامی که به تنهایی و همچنین هم‌زمان با دیگر حسگرهای مجاور  $\pm 30$  و  $\pm 60$  فاصله را اندازه‌گیری می‌کند، مورد ارزیابی قرار می‌دهد. چنانچه این شکل نشان می‌دهد خروجی حسگرهای  $\pm 30$  و  $\pm 60$  موجب تداخل در خروجی حسگر مرکزی می‌شوند. زمانی که حسگرها در فاصله  $\pm 60$  سانتی‌متری قرار می‌گیرند در ۱۰۰ سانتی‌متر اول حساسیت کمتری به تداخل نسبت به سایر محدوده اندازه‌گیری نشان دادند، در حالی که تداخل به‌وجود آمده به‌وسیله حسگرهای  $\pm 30$  تقریباً کل محدوده را تحت تأثیر قرار می‌دهند. همچنین نمودارها نشان داد که خروجی حسگر مرکزی که تحت تأثیر تداخل قرار می‌گیرد، به‌طور غیرطبیعی بزرگ‌تر از چیزی است که باید باشد. با توجه به رابطه (۳) تداخل موجب کاهش فاصله برآوردی می‌شود که در نتیجه منجر به تخمین اضافی ضخامت درختان می‌شود. در مورد به‌کارگیری حسگر فراصوتی برای تعیین شکل درخت به‌منظور تنظیم دبی آفت‌کش‌ها، بیش برآورد اندازه درخت در اثر تداخل به اندازه کم تخمین زدن مضر نیست. برآورد کمتر از اندازه واقعی موجب کاهش بازده سمپاشی و افزایش مقاومت آفات می‌شود.

اگرچه عملاً بیشتر اندازه‌گیری‌ها تحت تأثیر تداخل قرار نگرفته‌اند، ولی برخی از آن‌ها به شدت متأثر از این پدیده بودند. میانگین خطا هنگام اندازه‌گیری با حسگرهای مجاور در فاصله  $\pm 30$  سانتی‌متری  $14/65$  سانتی‌متر و در مورد حسگرهای مجاور  $\pm 60$  سانتی‌متری میانگین خطا  $6/73$  سانتی‌متر بود. نتایج به‌دست آمده و همچنین اطلاعات شرکت سازنده نشان می‌دهد که هرچه فاصله

در چنین موقعیتی فاصله اندازه‌گیری شده میان حسگر و توده گیاه کمتر از اندازه برآورد شده توسط مدل خواهد بود و بنابراین اندازه‌گیری زیر خط رگرسیون قرار خواهد گرفت (شکل ۱۰). همچنین ممکن است که در سطح خارجی درخت تورفتگی وجود داشته باشد. وقتی که حسگر در مقابل چنین شکاف‌هایی قرار بگیرد، ممکن است که بازتاب موج فراصوتی به‌جای برگ‌های داخل شکاف، توسط برگ‌های محیط بیرونی شکاف ایجاد شود (شکل ۱۱ c). در چنین موقعیتی فاصله اندازه‌گیری شده میان حسگر و توده گیاه بزرگ‌تر از اندازه برآورد شده توسط مدل خواهد بود و بنابراین اندازه‌گیری بالای خط رگرسیون خواهد افتاد (شکل ۱۰). این شرایط بستگی به شکل مخروط صدا به‌همراه زاویه قرارگیری و اندازه برگ‌ها دارد. داده‌های آزمایش‌های دقیق انجام شده، خروجی حسگر فراصوتی را با توجه به شکل و زاویه قرارگیری جسم هدف روی سه نمودار مختلف نشان داد (شکل‌های ۸ و ۹). در تمام این نمودارها محدوده قابل تشخیص بزرگ‌تر از زاویه ۱۵ درجه می‌باشد که برای تشخیص یک هدف قابل اعتماد است. بنابراین محدوده قابل تشخیص حسگرها با توجه به فاصله تا هدف تفاوت می‌کند. به دیگر سخن، هرچه توده گیاه در فاصله دورتری قرار گرفته باشد، تورفتگی‌های کمتری شانس دیده شدن را دارند. با این حال تعیین مخروط صدا هنگام سنجش در شرایط مزرعه به‌دلیل پارامترهای زیادی که باید مد نظر قرار گیرند، کار آسانی نیست. بنابراین محدوده ترسیم شده در شکل‌های ۸ و ۹ تنها کمینه ابعاد شکاف‌های سطح درخت را که با این نمونه حسگر قابل تشخیص هستند، برآورد می‌کند. نتایج پژوهش روی درختان سیب در اسپانیا نیز با نتایج به‌دست آمده تطابق دارند (Planas et al., 2011).



حسگرها نسبت به یکدیگر بیشتر باشد، تأثیر تداخل کمتر خواهد بود.



**شکل ۱۲-** پراکندگی خروجی حسگر مرکزی به تنهایی و هم‌زمان کار کردن با حسگر مجاور؛ (a) در فاصله  $\pm 30$  سانتی‌متر، (b) در فاصله  $\pm 60$  سانتی‌متر

**Fig.12.** Scatter diagram of central sensor alone output and simultaneously working with adjacent sensors; (a) At  $\pm 30$  cm, (b) At  $\pm 60$  cm during the field interference trial

است، به طوری که خطای میانگین در شرایط مزرعه  $3/19$  سانتی‌متر به دست آمد. تأثیر تداخل حسگرهای مجاور زمانی بیشتر شد که حسگرها در فاصله  $30$  سانتی‌متری نسبت به یکدیگر، با میانگین خطای  $14/65$  سانتی‌متر، قرار گرفتند. اما وقتی حسگرها در فاصله  $60$  سانتی‌متری یکدیگر نصب شدند، میانگین خطای  $6/73$  سانتی‌متر به دست آمد. بنابراین برای جلوگیری از ایجاد تداخل بهتر است که حسگرها در فاصله‌ای بیشتر از  $60$  سانتی‌متر نسبت به هم قرار گیرند. حسگر بررسی شده در این پژوهش نشان داد که توانایی اندازه‌گیری فاصله تا توده گیاه را در شرایط باغ پسته دارد و می‌توان با نصب چند عدد از آنها، تصویری مجازی از ساختار شکلی درخت تهیه کرد. لذا می‌توان نتایج به دست آمده را برای رقم‌های مختلف پسته و همچنین سایر محصولات که ساختار گیاهی و برگ‌های مشابه دارند، تعمیم داد. باید مد نظر قرار داد که افزایش تغییرات به دلیل ویژگی‌های سطح درخت و اصول کاری حسگر فراصوتی، دقت اندازه‌گیری را کاهش می‌دهد و همچنین تأثیر تداخل هنگامی که حسگر در فاصله نزدیک به هم قرار می‌گیرند، بسیار مهم می‌باشد.

اگرچه باید تعادلی میان فاصله قرارگیری حسگرها و بالاترین ریزینی عمودی (بیشترین تعداد حسگر برای برآورد قسمت بیرونی درخت با بالاترین دقت) برقرار شود. با این حال اثر تداخل را می‌توان با به کارگیری یک فیلتر مناسب مانند فیلتر میانه (Moltó *et al.*, 2000) برطرف کرد تا از تغییر شدید خروجی حسگرها جلوگیری شود (Masoudi *et al.*, 2012; Moltó *et al.*, 2000).

## نتیجه‌گیری

این پژوهش به منظور بررسی توانایی حسگرهای فراصوتی در سنجش ساختار ظاهری درختان پسته برای کاربرد در دستگاه سمپاش دقیق صورت گرفت. در شرایط آزمایشگاه، حسگر فراصوتی مورد بررسی قادر به برآورد دقیق فاصله با خطای میانگین  $0/64$  سانتی‌متر بود. اما هنگام استفاده در شرایط مزرعه، برای برآورد فاصله تا درخت، حسگر بایستی به شکل بهتری تنظیم شود. با این حال تفاوت با برآورد آزمایشگاهی با توجه به سایر منابع بروز خطا، نسبتاً کوچک است. تغییرات موجود در برآورد فاصله درون باغ به طور واضح نسبت به آنچه که در شرایط آزمایشگاه با هدف مصنوعی به دست آمد، بیشتر

## منابع

1. Arnó, J., A. Escolà, J. M. Vallès, R. Sanz, J. Masip, J. Palacín, and J. R. Rosell. 2009. Use of a ground-based LIDAR scanner to measure leaf area and canopy structure variability of grapevines. In Precision Agriculture '09; 7<sup>th</sup> European Conference on Precision Agriculture, ECPA 2009, Wageningen, Netherlands. pp. 177-184.

2. Balsari, P. T., and M. Tamagnone. 1997. An automatic spray control for airblast sprayers: First results. In *Precision Agriculture '97; Proceedings of the 1st European Conference on Precision Agriculture*. BIOS Scientific Publishers Ltd: Oxford, UK, 1997; pp. 619-626.
3. Brown, D., D. Giles, M. Oliver, and P. Klassen. 2008. Targeted spray technology to reduce pesticide in runoff from dormant orchards. *Crop Protection* 27: 545-552.
4. Byers, R., K. Hickey, and C. Hill. 1971. Base gallonage per acre. *Virginia Fruit* 60: 19-23.
5. Escolà, A., F. Camp, F. Solanelles, J. Llorens, S. Planas, J. R. Rosell, F. Gràcia, and E. Gil. 2007. Variable dose rate sprayer prototype for tree crops based on sensor measured canopy characteristics. In *Precision Agriculture '07; Proceedings of 6<sup>th</sup> European Conference on Precision Agriculture*, Skiathos, Grècia, Stafford, J.V., Ed. Wageningen Academic Publishers: Wageningen, The Netherlands, June 2007, pp. 563-571.
6. Escolà, A., F. Solanelles, S. Planas, and J. R. Rosell. 2002. Electronic control system for proportional spray application to the canopy volume in tree crops. *proceedings of EurAgEng Conference*. Budapest, Hungary.
7. Gil, E., J. Rosell, S. Planas, and L. Val. 2007. Variable rate application of plant protection products in vineyard using ultrasonic sensors. *Crop Protection* 26: 1287-1297.
8. Giles, D. K., M. J. Delwiche, and R. B. Dodd. 1987. Control of orchard spraying based on electronic sensing of target characteristics. *Transactions of the ASABE* 30: 1624-1636.
9. Giles, D. K., M. J. Delwiche, and R. B. Dodd. 1988. Electronic measurement of tree canopy volume. *Transactions of the ASAE* 31: 264-272.
10. Giles, D. K., M. J. Delwiche, and R. B. Dodd. 1989a. Sprayer control by sensing orchard crop characteristics: orchard architecture and spray liquid savings. *Journal of Agricultural Engineering Research* 43: 271-289.
11. Giles, D. K., M. J. Delwiche, and R. B. Dodd. 1989b. Method and apparatus for target plant foliage sensing and mapping and related materials application control. US 4823268 A Patent.
12. 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.
13. Llorens, J., E. Gil, and J. Llop. 2010. Variable rate dosing in precision viticulture: Use of electronic devices to improve application efficiency. *Crop Protection* 29: 239-248.
14. Maghsoudi, H. 2013. Variable rate orchard sprayer with mechatronic target detectin system using ultrasonic sensors. Ph.D Dissertation, Tarbiat Modares University. (In Farsi).
15. Maghsoudi, H., and S. Minaei. 2013. Variable rate spraying a methodology for sustainable development. *The 1st National Conference on Solutions to Access Sustainable Development in Agriculture, Natural Resources and the Environment*, Tehran, Iran. (In Farsi).
16. Maghsoudi, H., and S. Minaei. 2014. A review of applicable methodologies for variable-rate spraying of orchards based on canopy characteristics. *Journal of Crop Protection* 3 (4): 531-542.
17. Mann, K., A. Schumann, and T. Obreza. 2011. Delineating productivity zones in a citrus grove using citrus production, tree growth and temporally stable soil data. *Precision Agriculture* 12: 457-472.
18. Masoudi, H., R. Alimardani, M. Omid, S. Mohtasebi, and S. Bagheri Shooraki. 2011. Design, fabrication and evaluation of a mobile robot for spraying in greenhouses. *Journal of Agricultural Engineering Research* 12: 87-100.
19. Masoudi, H., R. Alimardani, M. Omid, S. Mohtasebi, and N. Noguchi. 2012. Determination of ultrasonic sensor ability for use as guidance sensors of mobile robots. *Sensors and Materials* 24: 115-126.
20. Mcconnell, R., K. Elliot, S. Blizzard, and K. Koster. 1983. Electronic measurement of tree-row-volume. *National Conference on Agricultural Electronics Applications*, Hyatt Regency Illinois Center, Chicago, Illinois. USA.
21. Moltó, E., B. MartíN, and A. Gutiérrez. 2000. PM-power and machinery: Design and testing of an automatic machine for spraying at a constant distance from the tree canopy. *Journal of Agricultural Engineering Research* 77: 379-384.

22. Moltó, E., B. MartíN, and A. Gutiérrez. 2001. PM-power and machinery: Pesticide loss reduction by automatic adaptation of spraying on globular trees. *Journal of Agricultural Engineering Research* 78: 35-41.
23. Morgan, N. G. 1964. Gallons per acre of sprayed area an alternative standard term for the spraying of plantation crops. *World Crops* 16: 64-65.
24. Palleja, T., M. Tresanchez, M. Teixido, R. Sanz, J. Rosell, and J. Palacin. 2010. Sensitivity of tree volume measurement to trajectory errors from a terrestrial LIDAR scanner. *Agricultural and Forest Meteorology* 150: 1420-1427.
25. Planas, S., J. R. Rosell, J. Pomar, F. Camp, F. Solanelles, F. Gràcia, J. Llorens, and E. Gil. 2011. Performance of an ultrasonic ranging sensor in apple tree canopies. *Sensors* 11: 2459-2477.
26. Roper, B. E. 1988. *Grove Sprayer*. US 4768713 A Patent.
27. Rosell, J. R., J. Llorens, R. Sanz, J. Arnó, M. Ribes-Dasi, J. Masip, F. Camp, F. Solanelles, F. Gràcia, and E. Gil. 2009a. Obtaining the three-dimensional structure of tree orchards from remote 2D terrestrial LIDAR scanning. *Agricultural and Forest Meteorology* 149: 1505-1515.
28. Rosell, J. R., R. Sanz, J. Llorens, J. Arnó, M. Ribes-Dasi, J. Masip, F. Camp, F. Gràcia, F. Solanelles, and T. Pallejà. 2009b. A tractor-mounted scanning LIDAR for the non-destructive measurement of vegetative volume and surface area of tree-row plantations: A comparison with conventional destructive measurements. *Biosystems Engineering* 102: 128-134.
29. 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.
30. Schumann, A. W., W. M. Miller, Q. U. Zaman, K. H. Hostler, S. Buchanon, and S. Cugati. 2006. Variable rate granular fertilization of citrus groves: Spreader performance with single-tree prescription zones. *Applied Engineering in Agriculture* 22: 19-24.
31. Solanelles, F., S. Planas, A. Escola, and J. Rosell. 2002. Spray application efficiency of an electronic control system for proportional application to the canopy volume. *Aspects of Applied Biology* 66: 139-146.
32. Solanelles, F., S. Planas, J. Rosell, F. Camp, and F. Gràci. 2006. An electronic control system for pesticide application proportional to the canopy width of tree crops. *Biosystems Engineering* 95: 473-481.
33. Tumbo, S., M. Salyani, J. Whitney, T. Wheaton, and W. Miller. 2002. Investigation of laser and ultrasonic ranging sensors for measurements of citrus canopy volume. *Applied Engineering in Agriculture* 18: 367-372.
34. Zaman, Q. U., and A. W. Schumann. 2005. Performance of an ultrasonic tree volume measurement system in commercial citrus groves. *Precision Agriculture* 6: 467-480.
35. Zaman, Q. U., A. W. Schumann, and W. M. Miller. 2005. Variable rate nitrogen application in Florida citrus based on ultrasonically-sensed tree size. *Applied Engineering in Agriculture* 21: 331-335.
36. Zaman, Q. U., A. W. Schumann, and H. K. Hostler. 2006. Estimation of citrus fruit yield using ultrasonically-sensed tree size. *Applied Engineering in Agriculture* 22: 39-44.
37. Zaman, Q. U., and A. W. Schumann. 2006. Nutrient management zones for citrus based on variation in soil properties and tree performance. *Precision Agriculture* 7: 45-63.
38. Zaman, Q. U., A. W. Schumann, and H. K. Hostler. 2007. Quantifying sources of error in Ultrasonic measurements of citrus orchards. *Applied Engineering in Agriculture* 23: 449-453.
39. Zamahn, Q., 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.