

طراحی، ساخت و ارزیابی سامانه لیزری تشخیص ارتفاع محصولات مزرعه‌ای

ترحم مصری گندشمین^{۱*}، پژمان عالی‌قلعه^۲ و سعید عالی‌قلعه^۳

چکیده

سیستم‌های مدیریت اطلاعات مزرعه با فراهم کردن اطلاعات دقیق مکانی از مزرعه در هر زمان به‌صورت غیرمخرب و بی‌درنگ، امکان گرفتن تصمیم مناسب را فراهم می‌کنند. امروزه لیزر در گستره وسیعی از صنایع از جمله تجهیزات نشانه‌گیری و ابزار دقیق کاربرد دارد. این پژوهش با هدف شناسایی و اندازه‌گیری ارتفاع گیاهان زراعی به‌صورت غیرمخرب به کمک تکنولوژی لیزر طراحی، اجرا و ارزیابی شد. بعد از طراحی و ساخت، سامانه لیزری در ۲ مرحله آزمایشگاهی و مزرعه‌ای بررسی شد. مرحله اول اندازه‌گیری روی گیاه برنج در محیط آزمایشگاهی انجام شد که تحلیل داده‌های جمع‌آوری شده بعد از کالیبراسیون، با روش رگرسیون خطی (ضریب تبیین ۰/۹۵) و مقایسه میانگین انجام شد که بیانگر دقت کافی سیستم در تعیین ارتفاع محصول است. در مرحله دوم از سامانه لیزری برای اندازه‌گیری ارتفاع گیاه گندم در مزرعه استفاده شد که با توجه به نتایج به دست آمده بین داده‌های ارتفاع اندازه‌گیری شده با متر و داده‌های سیستم، از نظر آماری اختلاف معنی‌داری مشاهده نشد. با توجه به نتایج به دست آمده، سامانه حسگر لیزر به‌عنوان روشی مناسب و با دقت بالا برای انواع عملیات شناسایی مکانی محصول و تعیین ارتفاع محصولات مختلف در کشاورزی دقیق توصیه می‌شود.

واژه‌های کلیدی: ارتفاع محصول، حسگر لیزر، کشاورزی دقیق.

ارجاع: مصری گندشمین ت. عالی‌قلعه پ. و عالی‌قلعه س. ۱۳۹۳. طراحی، ساخت و ارزیابی سامانه لیزری تشخیص ارتفاع محصولات مزرعه‌ای. نشریه پژوهش‌های مکانیک ماشین‌های کشاورزی. ۵: ۱۱-۱۸.

۱- استادیار گروه مهندسی بیوسیستم، دانشکده فناوری کشاورزی و منابع طبیعی، دانشگاه محقق اردبیلی.

۲- کارشناسی ارشد مکانیزاسیون کشاورزی، دانشکده فناوری کشاورزی و منابع طبیعی، دانشگاه محقق اردبیلی.

۳- کارشناسی ارشد برق- مخابرات سیستم، دانشگاه علوم و فناوری مازندران.

* نویسنده مسئول: mesrigtm@uma.ac.ir

تاریخ پذیرش: ۱۳۹۴/۰۶/۰۱

تاریخ دریافت: ۱۳۹۴/۰۳/۱۸

مقدمه

افزایش جمعیت، کمبود منابع، رقابت شدید و خطرهای زیست‌محیطی در امر تولید محصولات کشاورزی و همچنین پیشرفت سریع تکنولوژی و علوم وابسته، سبب نفوذ چشم‌گیر فناوری‌های نوین و افزایش دقت در تکنولوژی‌های کشاورزی و شیوه‌های مدیریتی شده است. اهمیت دقت بالا در انجام صحیح هر یک از عملیات که به طور مستقیم بر روی کیفیت و کمیت محصولات کشاورزی اثرگذار است، لزوم استفاده از تجهیزات مکانیزه و خودکار را امری بدیهی می‌کند. در سال‌های اخیر تکنولوژی حسگرهای الکترونیکی در بخش کشاورزی پیشرفت‌های چشم‌گیری را داشته است. حسگرهای الکترونیکی به دلیل دقت بالا و قابلیت هماهنگی با دیگر اجزای ماشین‌آلات کشاورزی، عمر طولانی آن‌ها، پاسخ زمانی سریع، کارایی در شرایط ناملایم و قیمت ارزان آن‌ها نسبت به دیگر ابزارهای اندازه‌گیری مکانیکی متداول شده‌اند (آکیلدیز و همکاران، ۲۰۰۲). در کشاورزی دقیق برای کنترل دقیق مصرف نهاده‌ها، نیاز به ثبت پیوسته و تحلیل تغییرات درون مزرعه‌ای عوامل مؤثر بر عملکرد محصول است. سیستم‌های مدیریت اطلاعات مزرعه^۱ (FMISs) با فراهم کردن اطلاعات دقیق مکانی- زمانی از المان‌های مزرعه‌ای، امکان گرفتن تصمیم مناسب را با توجه به معیارهای مختلف از جمله زمان سم‌پاشی، زمان برداشت، کاهش تلفات در زمان برداشت، صرفه‌جویی در مصرف آب و غیره را فراهم می‌کند (نیکیلا و همکاران، ۲۰۱۰). توانایی حسگرهای الکترونیکی در شناسایی و اندازه‌گیری دقیق ویژگی‌های خاص مکان ویژه مزرعه و گیاه، سبب شده که این نوع حسگرها در کشاورزی دقیق جایگاه ویژه‌ای پیدا کنند. شناسایی وجود یا عدم‌وجود محصول، عامل تعیین‌کننده در به حداقل رساندن خستگی نیروی انسانی و اتوماتیک کردن کنترل ادوات داشت (سمپاش و تنک‌کن)، برداشت (تشخیص لبه محصول) و اندازه‌گیری ارتفاع محصول است. به طور کلی برای تشخیص محصول و ارتفاع آن در مزرعه از سه روش سنجش از دور^۲، سیستم ماشین بینایی^۳ و حسگر فراصوت استفاده می‌شود که هر کدام از این روش‌ها دارای مزایا و محدودیت‌هایی هستند. مهم‌ترین

محدودیت روش‌های سنجش از دور و ماشین بینایی، پیچیده بودن، هزینه بالا، روش جمع‌آوری و پردازش داده‌ها است. اندازه‌گیری متغیرهایی چون محتوای رطوبت خاک، ارتفاع محصول و غیره به کمک حسگرهای مختلف صوتی، نوری و دمایی این مزیت را دارند که روی ماشین‌های زراعی نصب شده، با هزینه کمتر و در زمان کوتاهی به صورت در حال پیشروی متغیرهای مذکور را اندازه‌گیری کنند (مصری گندشمین، ۱۳۸۲). عالی‌قلعه و همکاران (۱۳۹۲) در محیط آزمایشگاهی با استفاده از حسگر مافوق صوت توانستند ارتفاع تاج پوشش گیاه ذرت را اندازه‌گیری کنند. با بررسی میزان دقت سیستم اندازه‌گیری فراصوتی با داده‌های حاصل از اندازه‌گیری دستی ضریب همبستگی خطی ۰/۹۷۵ به دست آمد.

آلریک ویس و پیترببر (۲۰۱۱) از تکنولوژی لیدار^۴ بعدی^۴ که جزء حسگرهای نوری محسوب می‌شود تصویر گیاه مورد نظر را به‌صورت آنالاین به دست آوردند. این پژوهش با هدف شناسایی خطوط کاشت و تعیین مسیر حرکت ادوات برای به حداقل رساندن صدمات به گیاهان و همچنین مانیتورینگ گیاهان به‌صورت تکی یا توده‌ای برای تشخیص و پیگیری مراحل رشد انجام شده بود.

زمان و همکاران (۲۰۱۱) با تشخیص ارتفاع علف هرز به کمک ۸ حسگر التراسونیک مدل MaxSonar-EZ و مقایسه آن با ارتفاع گیاه زغال اخته، مبارزه با علف هرز را با دقت ۶۹٪ تا ۷۵٪ انجام دادند. آن‌ها دریافتند که کارایی علف‌کش‌ها در مراحل اولیه رشد گیاهان هرز به مراتب بیشتر است و توصیه شد که تأثیر عملیات سمپاشی روی علف هرز در محدوده ارتفاع بین ۱۲ تا ۳۰ سانتی‌متر و ارتفاع بوته زغال اخته بین ۳۵ تا ۵۵ سانتی‌متر بیشترین کارایی را دارد.

کارکرد حسگرهای التراسونیک در تولید محصولات باغی توسط گیل و همکاران (۲۰۰۶) برای اندازه‌گیری ارتفاع و عرض درختان در زمان سمپاشی برای سمپاشی تخصصی و به‌صورت آنالاین بررسی شد. به‌کارگیری سیستم التراسونیک سبب شد تا میزان مصرف سم تا ۵۸٪ کاهش یافت. همچنین رسوبات سم روی برگ‌ها به حداقل رسید تا آستانه بیولوژیکی بودن محصول، در حد خوبی بهبود یابد.

با توجه به پژوهش‌های انجام شده حسگر التراسونیک برای

1- Farm Management Information Systems

2- Remote Sensing

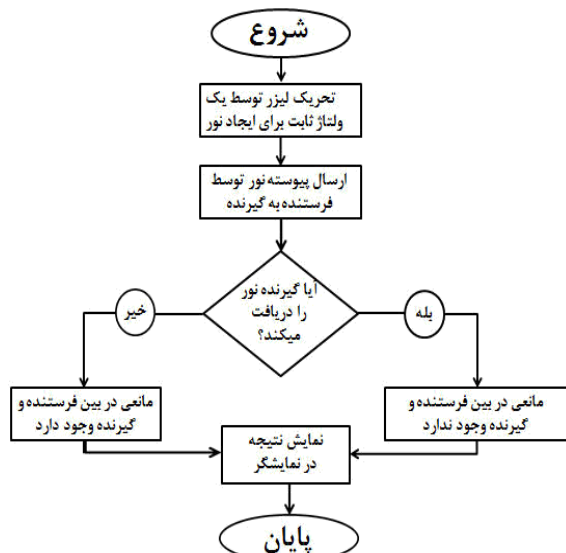
3- image processing

4- Lidar 3D

AVR (مدل atmega 128 ساخت شرکت atmel)، فرستنده لیزر (مدل لنز متغیر ۱۲ میلی‌متر با خروجی ۵ میلی‌وات)، گیرنده لیزر، LCD گرافیکی (۱۲۸ در ۶۴ پیکسل) و ترانس سوئیچینگ (۱۲ ولت) می‌باشد.

میکروکنترلرها در حقیقت نوع پیشرفته‌ای از ریزپردازنده‌ها هستند که می‌توان با نوشتن دستورات مناسب از آن‌ها خروجی‌های مطلوب گرفت. ریزپردازنده‌ها سه عمل اساسی انتقال اطلاعات، محاسبه و تصمیم‌گیری را انجام می‌دهند. از مزایای میکروکنترلر Atmega 128 می‌توان به سرعت پردازش بالا و توان مصرفی کم، حافظه داخلی ۱۲۸ کیلوبایت، قابلیت بالای نوشتن و پاک کردن حافظه اشاره کرد. برنامه‌نویسی میکروکنترلر به زبان بیسیک انجام شد و با کامپایلر بسکام به میکروکنترلر منتقل شد.

در میکروکنترلر با توجه به ورودی‌ها و خروجی‌ها و محدودیت‌های برنامه‌نویسی در ابتدا چارچوبی به صورت الگوریتم طراحی شد. الگوریتم باید به گونه‌ای طراحی شود که علاوه بر پیش‌بینی کلیه حالت‌های به وجود آمده امکان دستیابی به هدف را نیز آسان کند. در شکل ۱ الگوریتم و بلوک دیاگرام سامانه حسگر لیزر نشان داده شده است.



شکل ۱- بلوک دیاگرام مراحل کار فرستنده و گیرنده لیزر در یک مرحله

برای راه‌اندازی لیزر، فرستنده‌ها به صورت ثابت نور لیزر را به سمت گیرنده گسیل می‌کنند و گیرنده‌ها به صورت پیوسته با میکروکنترلر برای تشخیص دریافت یا عدم دریافت نور لیزر بررسی می‌شوند بدین ترتیب که ولتاژ دو سر حسگر (حسگر از نوع جریان‌ی است و با یک مقاومت به

اندازه‌گیری ارتفاع گیاهان مزرعه‌ای دارای محدودیت‌هایی است. حسگر التراسونیک برای اندازه‌گیری ارتفاع گیاهان مزرعه‌ای تابعی از زاویه برگ‌ها، سطح برگ، تراکم گیاه و ارتفاع گیاه می‌باشد و زاویه برگ مهم‌ترین عامل در قابلیت شناسایی برگ توسط سیگنال التراسونیک است (شیبایاما و همکاران، ۱۹۸۵). براساس قانون بازتاب، برگ‌های با حالت مستقیم تا حداکثر شیب ۳۰ درجه قابل شناسایی و اندازه‌گیری با حسگر التراسونیک هستند. برای اندازه‌گیری ارتفاع برگ‌هایی که حالت سهمی دارند، دامنه تغییرات شیب خط مماس روی برگ باید بین صفر تا ۳۰ درجه باشد (سامسوزانا و همکاران، ۲۰۰۴). امواج التراسونیک را نمی‌توان مانند یک بیم لیزر تاباند و زاویه تابش امواج فراصوت یکی از مهم‌ترین منابع خطا در اندازه‌گیری فاصله چشمه تا هدف است.

از بررسی مقالات ارائه شده چنین استنباط می‌شود که پژوهش‌های در مورد شناسایی گیاهان و اندازه‌گیری ارتفاع گیاهان مزرعه‌ای دارای اهمیت خاصی است که به طور موردی و آزمایشگاهی متناسب با نوع گیاه انجام شده‌اند. به طور کلی در این پژوهش هدف‌های زیر مدنظر است:

- طراحی و ساخت سامانه‌ای که برای تشخیص ارتفاع محدود به شکل گیاه و زاویه برگ‌ها نیست.
- ارزیابی و بررسی میزان دقت سامانه اندازه‌گیری.

مواد و روش‌ها

در طراحی و ساخت سامانه تشخیص ارتفاع محصولات مزرعه‌ای از مجموعه‌ی حسگر لیزر (فرستنده و گیرنده) استفاده شد. قیمت مناسب، دقت بالا و در دسترس بودن حسگر لیزر سبب گسترش بیش از پیش این تکنولوژی در عرصه‌های مختلف شده است. برتری لیزر در تولید تابش‌های کنترل شده و پرتوان است. تابش لیزر، با پهنای نوار طیفی باریک و توان تمرکزیایی شدید، چندین برابر درخشان‌تر از نور خورشید است. مزایای حسگرهای لیزری (از جمله توانایی اندازه‌گیری به صورت غیرتماسی، اندازه‌گیری تمام میدانی، دقت و سرعت بازرسی بالا) سبب شده است در آزمون غیرمخرب، دارای جایگاه ویژه‌ای باشند (سرخوش و همکاران، ۱۳۸۶).

طراحی الکترونیکی سامانه

سامانه الکترونیکی تشخیص ارتفاع متشکل از میکروکنترلر

مقابل خود را دریافت کند و نورهای ارسالی از لیزرها با هم تداخل نداشته باشند. با توجه به مطالب بالا در این پژوهش حداقل فاصله بین دو لیزر ۱ سانتی‌متر در نظر گرفته شد.

طراحی مکانیکی سامانه

در طراحی قسمت مکانیکی سامانه باید توجه شود:

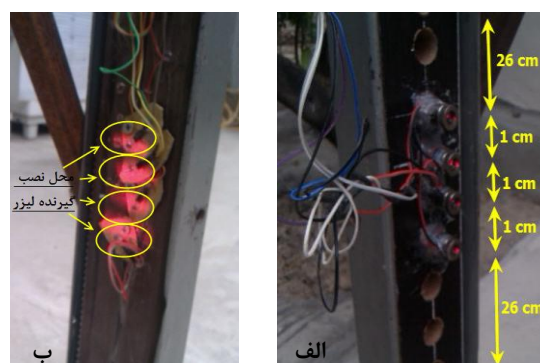
۱. فرستنده و گیرنده لیزر همواره در دو طرف محصول قرار گیرند به نحوی که محصول از بین فرستنده و گیرنده عبور کند،
 ۲. قابلیت حرکت به صورت افقی روی سطح زمین را داشته باشد،
 ۳. دارای استحکام بالا در مقابل ناهمواری زمین در زمان حرکت،
 ۴. حسگرها به آسانی روی شاسی اصلی حرکت کنند.
- بعد از طراحی اولیه، بخش مکانیکی سامانه در محیط SolidWork 2014 طراحی شد (شکل ۳).

برای نگهداری و جابجایی حسگرها از دو قطعه MDF با ضخامت ۱۰ میلی‌متر، عرض ۵ سانتی‌متر و طول ۶۰ سانتی‌متر استفاده شد که روی هر قطعه براساس شکل ۲ فرستنده و گیرنده لیزر با فاصله‌های تعیین شده از هم نصب شده‌اند (شکل ۴).

موتور

جابه‌جایی حسگرها بر اساس دستورات میکروکنترلر برای ایجاد توازن صفر با ۲ موتور الکترونیکی مدل استپر TECO 4H5609S انجام شد. دلایل انتخاب این نوع موتور قدرت و دقت بالا و قابلیت نگهداری وزنه در ارتفاع‌های مختلف بدون ایجاد خطا است. این موتور دارای قدرت مناسب (قدرت آن در محیط آزمایشگاهی با وصل کردن وزنه‌های مختلف تعیین شد که بیشینه وزنی که موتور می‌توانست جابجا کند ۸ کیلوگرم بوده است) است.

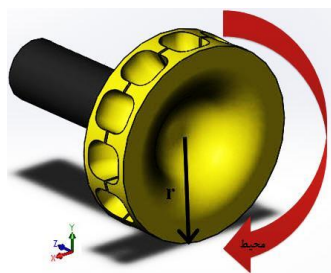
ولتاژ تغییر می‌کند) به مبدل آنالوگ به دیجیتال میکروکنترلر داده می‌شود. با توجه به نوع میکروکنترلر روی یک مدار می‌توان تعداد مشخصی از فرستنده و گیرنده نصب کرد. در این پژوهش از ۴ مجموعه حسگر لیزر استفاده شد. ۴ فرستنده لیزر همان‌طور که در شکل ۲- الف نشان داده شده‌اند با فاصله مشخص از هم نصب شده‌اند.



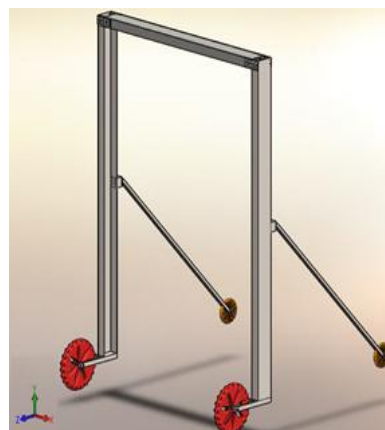
شکل ۲- (الف) فرستنده و (ب) گیرنده

لیزرها با توجه به موقیت مکانی خود دارای وزن‌های متفاوتی هستند. ترتیب وزن‌های تعریف شده برای لیزرها از بالا به پایین برای ۴ حسگر لیزر به ترتیب ۰/۷، ۰/۳، ۰/۳ و ۰/۷ است. با توجه به الگوریتم طراحی شده برای میکروکنترلر، همواره سطح محصول باید بین دو حسگر میانی قرار گیرد به عبارت دیگر سامانه حالت تعادل داشته باشد، به این ترتیب که نور لیزر دو فرستنده بالایی به گیرنده می‌رسد اما نور لیزر دو فرستنده پایینی توسط مانع (گیاه) قطع شده و با گیرنده دریافت نمی‌شود در این حالت مجموع وزن های تعریف شده برابر صفر است. اگر تعادل سامانه توسط تغییرات ارتفاع محصول از حالت توازن (صفر) خارج شود با توجه به وزن تعیین شده برای هر لیزر و وضعیت دریافت یا عدم دریافت نور با گیرنده، میکروکنترلر دستور جابجایی حسگرها را برای رسیدن به حالت تعادل به قسمت موتور سامانه ارسال می‌کند. با استفاده از چنین الگوریتم بازخورداری^۱، همواره سطح محصول بین دو حسگر میانی باقی می‌ماند. میزان دقت چنین روشی وابستگی شدید به فاصله ۲ حسگر میانی دارد به عبارتی هر میزان که دو حسگر میانی به هم نزدیک باشند دقت بیشتری حاصل می‌شود، از طرفی حداقل فاصله باید به گونه‌ای باشد که هر گیرنده فقط نور لیزر

اندازه‌گیری تعداد پله‌های جابجاشده ارتفاع هر نقطه را به دست آورد و روی صفحه نمایش نشان دهد.



شکل ۵- چرخ‌دنده شبیه‌سازی شده در محیط Solid Works 2014



شکل ۳- طراحی شاسی در نرم‌افزار SolidWork 2014



شکل ۶- برد طراحی شده با صفحه نمایشگر برای نمایش ارتفاع محصول



شکل ۴- شاسی فلزی ساخته شده

کالیبراسیون (واسنجی) سامانه اندازه‌گیری

برای واسنجی سامانه لیزری، از موانع مصنوعی با ارتفاع‌های مشخص به‌صورت تصادفی استفاده شد و نمودار خطی برازش با ارتفاع‌های و خروجی سامانه با ضریب همبستگی 0.98 به دست آمد (شکل ۷).

اندازه‌گیری در دو قسمت آزمایشگاهی و مزرعه‌ای انجام شد. اندازه‌گیری ارتفاع بوته شالی در محیط آزمایشگاهی با استفاده از سیستم طراحی شده، طی آزمایشی در 60 پلات و در 6 بلوک اجرا شد. بدین منظور بلوک‌هایی به طول 10 سانتی‌متر و عرض 10 سانتی‌متر در نظر گرفته شد و خروجی سامانه در 6 تکرار به ثبت رسید. برای آزمون مزرعه‌ای سامانه اندازه‌گیری بعد از انتقال به مزرعه گندم، ارتفاع محصول در 20 نقطه از زمین در 3 تکرار ثبت شد.

اندازه‌گیری ارتفاع محصول با سامانه

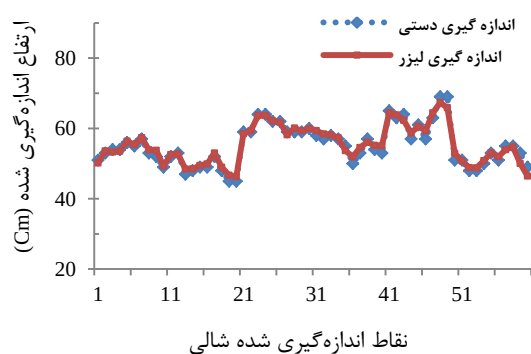
شناسایی ارتفاع محصول به کمک اندازه‌گیری دقیق میزان جابه‌جایی حسگرها با 2 استپر موتور است. یکی از مزایای اصلی استپر موتور، اندازه‌گیری دقیق مقدار جابه‌جایی است. با توجه به مشخصات فنی استپر موتور استفاده شده، میزان پله‌هایی^۱ که محور گردنده موتور برای یک دور کامل طی می‌کند برابر 200 پله است به‌عبارتی در هر پله محور گردنده $1/8$ درجه جابه‌جایی می‌شود. شکل ۵ چرخ‌دنده مخصوص برای جابجایی قاب‌های حامل فرستنده و گیرنده را نشان می‌دهد. با توجه به محیط چرخ‌دنده، میزان جابه‌جایی در هر پله از موتور برابر 0.314 سانتی‌متر محاسبه شد.

در گام آخر، بعد از اندازه‌گیری دقیق میزان حرکت در هر پله، اطلاعات به دست آمده به میکروکنترلر اضافه شد تا با

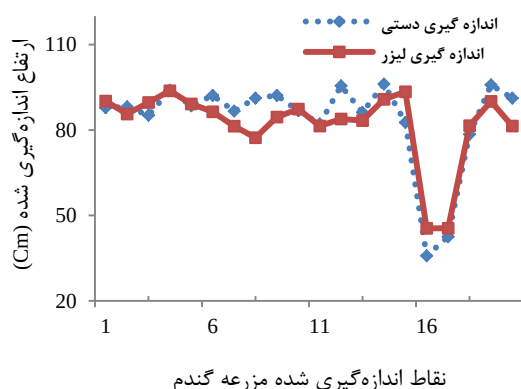
نتایج و بحث

با توجه به تصادفی بودن توزیع ارتفاع محصولات در نقاط مختلف، داده‌های جمع‌آوری شده حاصل از اندازه‌گیری با سامانه و اندازه‌گیری با متر دستی مربوط به گیاه شالی و گندم در شکل ۱۰ و شکل ۱۱ برای مقایسه نشان داده شده است.

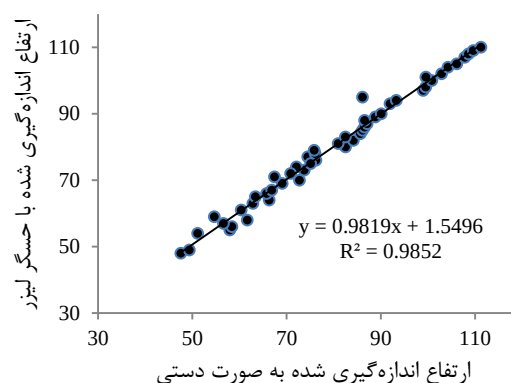
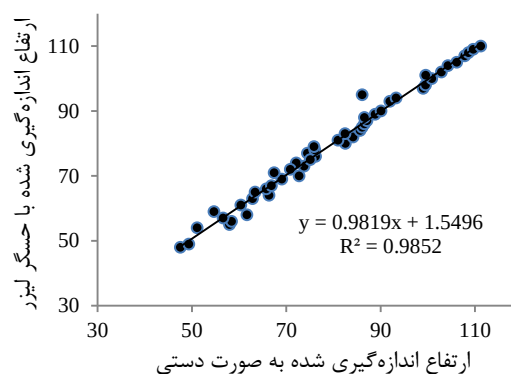
برای بررسی شدت رابطه یک به یک بین داده‌های حاصل از اندازه‌گیری دستی و خروجی، سامانه نمودار یک به یک بین دو روش اندازه‌گیری برای محصول رسم شد و ضریب همبستگی خطی بین آن‌ها محاسبه شد این مقدار برای گیاه شالی و محصول گندم به ترتیب برابر $r=0.97$ و $r=0.91$ است. با استفاده از معادلات رگرسیون، ضریب تبیین به دست آمد و مشاهده شد ضریب تبیین برای سامانه در سنجش ارتفاع گیاه شالی و محصول گندم به ترتیب برابر $R^2 = 0.96$ و $R^2 = 0.84$ است.



شکل ۱۰- مقایسه ارتفاع‌های به دست آمده سامانه و متر دستی از بوته شالی



شکل ۱۱- مقایسه ارتفاع‌های به دست آمده سامانه و متر دستی در مزرعه گندم



شکل ۷- همبستگی اندازه‌گیری دستی-اندازه‌گیری با حسگر لیزر برای موانع مصنوعی



شکل ۸- بوته‌های شالی استفاده شده برای اندازه‌گیری ارتفاع

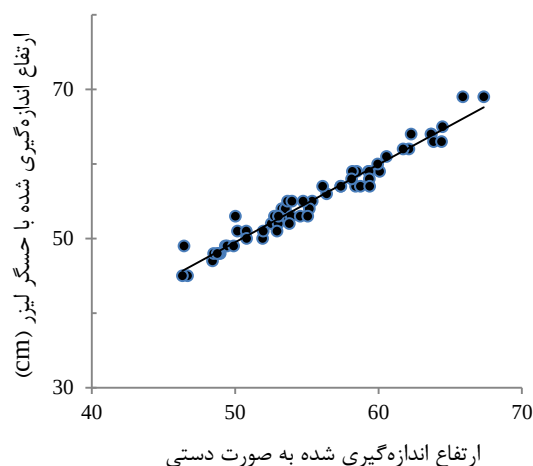


شکل ۹- اندازه‌گیری ارتفاع گندم با سامانه در مزرعه

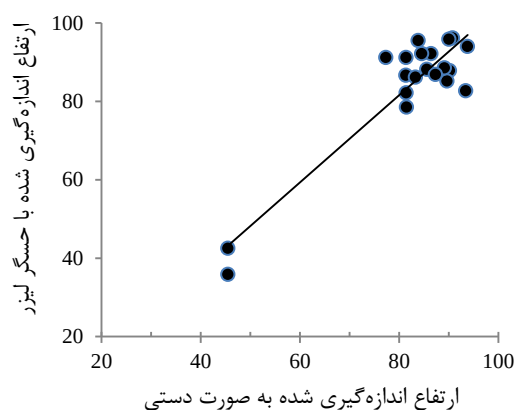
علاوه بر آزمون همبستگی خطی از مقایسه میانگین‌های همبسته نیز برای کلیه داده‌های آزمون استفاده شد، بدین منظور داده‌های حاصل از دو روش اندازه‌گیری با استفاده از آزمون t جفت شده با هم مقایسه شدند. همان‌طور که در جدول ۱ نشان داده شده است، خروجی حسگر با روش داده‌برداری دستی در سطح احتمال یک درصد اختلاف معنی‌داری ندارد و می‌توان مدعی بود که با ضریب اطمینان ۹۵٪، سامانه با دقت بالایی مقدار واقعی ارتفاع را برآورد کرده است.

نتیجه‌گیری

به‌کارگیری فن‌آوری‌های اندازه‌گیری و افزایش دقت در سیستم‌های تولید کشاورزی امری مسلم و اجتناب‌ناپذیر است. در این پژوهش ارتفاع ۲ محصول مزرعه‌ای با استفاده از فناوری لیزر با دقت مناسب اندازه‌گیری شد. با توجه به نتایج آزمایش نشان داده شده است که حسگر لیزر محدودیت‌های حسگر التراسونیک (حسگر متداول در تشخیص گیاه و اندازه‌گیری ارتفاع گیاه است) را ندارد و می‌تواند با کمترین میزان خطا در اندازه‌گیری ارتفاع گیاهان مختلف مزرعه‌ای به کار گرفته شود. سامانه طراحی شده قابلیت هماهنگ سازی با ماشین‌آلات مخصوص سم‌پاشی گیاهان ردیفی، تنک‌کن‌ها و ماشین‌آلات برداشت (با تغییرات جزئی) را دارد.



شکل ۱۲- نمودار یک به یک داده‌های حاصل از اندازه‌گیری دستی و خروجی حسگر برای شالی



شکل ۱۳- نمودار یک به یک داده‌های حاصل از اندازه‌گیری دستی و خروجی حسگر برای گندم

جدول ۱- میانگین اختلاف بین اندازه‌گیری دستی و خروجی حسگر و سطح معنی‌داری آزمون t جفت شده

رابطه	میانگین (cm)	انحراف معیار	میانگین استاندارد خطا	t
رابطه ارتفاع واقعی شالی و اندازه‌گیری با سامانه	۰/۲۵	۱/۱۹	۰/۱۵	۱/۶ ^{ns}
رابطه ارتفاع واقعی گندم و اندازه‌گیری با سامانه	۱/۸۴	۶/۳۹	۱/۴۵	۱/۲۶ ^{ns}

^{ns}: عدم وجود اختلاف معنی‌دار

منابع

۱. سرخوش ل. محمدزاده ن. شاهنده م. خادم شریعت ه و موافقی ا. ۱۳۸۶. کاربردهای فناوری لیزر در آزمون‌های غیرمخرب. کنفرانس بین‌المللی بازرسی فنی و آزمون‌های غیرمخرب. تهران. ۱۱ ص.
۲. عالی‌قلعه پ. مصری‌گندشمین ت. عالی‌قلعه س و عبدالهی ا. ۱۳۹۲. هشتمین کنگره ملی مهندسی ماشین‌های کشاورزی (بیوسیستم) و مکانیزاسیون. دانشگاه فردوسی مشهد. ۴۲۲۴-۴۲۳۵.
۳. مصری‌گندشمین ت. ۱۳۸۲. کنترل اتوماتیک عمق کاشت بذر به‌صورت تابعی از رطوبت خاک. پایان‌نامه کارشناسی ارشد رشته ماشین‌آلات کشاورزی. دانشگاه تبریز. ۱۳۴ ص.
4. Akyildiz I. F. and Su W. Sankarasubramaniam Y. and Cayirci E. 2002. Wireless sensor networks: a survey. Computer Networks. 38(4): 393-422.

5. Gil E. Escola A. Rosell J. R. Planas S. and Val L. 2006. Variable rate application of plant protection products in vineyard using ultrasonic sensors. *Crop Protection*. 26(8): 1287-1297.
6. Nikkila R. Seilonen I and Koskinen K. 2010. Software architecture for farmmanagement information systems in precision agriculture. *Computers and Electronics in Agriculture*. 70(2): 328-336.
7. Samsuzana A. Brian L. Steward A. Stuart J. Birrell T. Kaspar C and Shrestha S. 2004. Ultrasonic Sensing for Corn Plant Canopy Characterization. Fairmont Chateau Laurier The Westin Government Centre Ottawa Ontario. Canada 1 - 4 August 2004.
8. Shibayama M. Akiyama T and Munakata K. 1985. A portable field ultrasonic sensor for crop canopy characterization. *Remote Sensing of Environment*. 18(3): 269-279.
9. Weiss U and Biber P. 2011. Plant detection and mapping for agricultural robots using a 3D LIDAR sensor. *Robotics and Autonomous Systems*. 59(5): 265-273.
10. Zaman, Q. U. Esau T. Schumann A. W. Percival D. C. Chang Y. K. Read S. M and Farooque A. A. 2011. Development of prototype automated variable rate sprayer for real-time spot-application of agrochemicals in wild blueberry fields. *Computers and Electronics in Agriculture*. 76(2): 175-182.