

ارزیابی سامانه تعیین موقعیت خودرهیاب غیرماهواره‌ای و مقایسه با گیرنده GNSS به منظور مسیریابی بهینه تراکتور

محمد صدفی^۱، سعید مینایی^{۲*}، حسین باخدا^۳ و جعفر امیری پریان^۴

چکیده

کشاورزی موضعی زیر مجموعه‌ای از کشاورزی دقیق است و با هدف افزایش بهره‌وری بر پایه سنجش تغییرات مکانی، ویژگی‌های خاک و گیاه و مصرف نهاده‌ها به صورت متغیر در پهنه زمان و مکان بنا شده است. موقعیت‌یابی صحیح ماشین کشاورزی در مکان مربوطه هدفی مهم است تا با توجه به آن، عملیات کشاورزی مورد نظر انجام پذیرد. در این پژوهش دستگاه موقعیت‌یاب زمینی دارای حسگرهای سنجش زاویه فرمان و تعداد دوران چرخ متحرک تراکتور ساخته شد. این سامانه با موقعیت‌یابی محلی و بدون نیاز به هرگونه خدمات‌دهنده خارجی، مورد آزمایش مزرعه‌ای قرار گرفت و داده‌ها با مقادیر خروجی گیرنده سامانه موقعیت‌یاب ماهواره‌ای (GNSS) مقایسه شدند. آزمایش‌ها در زمین‌های شخم خورده، شخم نخورده، آسفالت و در شرایط آب و هوایی آفتابی و ابری انجام گرفت. طرح آماری بر پایه بلوک‌های کاملاً تصادفی در قالب آزمون فاکتوریل به صورت $3 \times 2 \times 2$ با چهار تکرار انجام شد. طبق نتایج به دست آمده، داده‌های محورهای X و Y گیرنده GNSS و دستگاه یخودرهیاب به ترتیب در سطح ۱٪ و ۵٪ تفاوت معناداری را نشان دادند. تغییر در عوامل محیطی شامل وضعیت زمین و شرایط هوایی آفتابی یا ابری در هر دو محور X و Y تأثیر معناداری بر تعیین موقعیت توسط گیرنده GNSS و یخودرهیاب نشان نداد. میزان دقت در سامانه یخودرهیاب در محور X برابر با ۲۵ cm و برای گیرنده GNSS، ۲۵۰ cm و همچنین در محور Y برابر با ۵۰ cm و برای گیرنده GNSS، ۱۴۰ cm است. در نتیجه دستگاه خودرهیاب در هر دو محور X و Y دقیق‌تر است. مقدار انحراف از نقطه واقعی توسط گیرنده GNSS و دستگاه خودرهیاب در سطح ۱٪ دارای تفاوت معنادار بود و میزان خطای تعیین فاصله در سامانه خودرهیاب ۶۰ cm و در گیرنده GNSS برابر با ۴۰۰ cm به دست آمد. به‌طور کلی عملکرد سامانه خودرهیاب در یافتن مسیر بهینه حرکت تراکتور دقیق‌تر از گیرنده GNSS معمولی (فاقد تصحیح افتراقی) بود.

واژه‌های کلیدی: سامانه خودرهیاب، GNSS، مسیریابی محلی، کشاورزی دقیق.

ارجاع: صدفی، م. مینایی، س. باخدا، ح. و امیری پریان، ج. ۱۴۰۱. ارزیابی سامانه تعیین موقعیت خودرهیاب غیرماهواره‌ای و مقایسه با گیرنده GNSS به منظور مسیریابی بهینه تراکتور. نشریه پژوهش‌های مکانیک ماشین‌های کشاورزی. ۲۵: ۶۴-۵۵. <https://dx.doi.org/10.22034/JRMAM.2022.10170.565>

۱- دانشجوی دکتری، گروه مکانیزاسیون، دانشگاه آزاد واحد علوم تحقیقات، تهران، ایران

۲- استاد گروه مهندسی مکانیک بیوسیستم، دانشکده کشاورزی، دانشگاه تربیت مدرس، تهران، ایران

۳- استادیار گروه مکانیزاسیون، دانشگاه آزاد واحد علوم تحقیقات، تهران، ایران

۴- استادیار گروه مهندسی بیوسیستم، دانشکده کشاورزی، دانشگاه بوعلی سینا، همدان، ایران

* نویسنده مسئول: minaee@modares.ac.ir

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۱/۰۳/۱۶

تاریخ دریافت: ۱۴۰۰/۱۱/۰۶

مقدمه

نهادها از بین می‌رود و ممکن است محصولات آسیب ببینند.

برای مکان‌یابی می‌توان سامانه‌های غیرماهواره‌ای نیز بکار گرفت. روش‌های عمده مکان‌یابی غیرماهواره‌ای شامل مکان‌یابی شبکه‌ای، مکان‌یابی اینرسیایی^۵ و مثلث‌سازی^۶ است (Heege, 2015). سامانه اینرسیایی شامل یک حسگر شتاب‌سنج است که روی وسیله‌ای در حال حرکت نصب شده و با توجه به جهت‌هایی که این وسیله حرکت کرده است، هم سرعت و هم جهت حرکت وسیله را مشخص می‌کند. روش‌های مختلف برای اندازه‌گیری در حالت اینرسیایی وجود دارد که شامل روش Gimbaled و روش Strap down است (Özkan & Uçar, 2012).

یک شبکه حسگر از تعداد زیادی گره حسگر تشکیل شده است که این گره‌ها در محیط پراکنده شده‌اند و قابلیت تحریک و حس کردن شرایط محیطی را دارند. هدف از پخش این گره‌ها در محیط جمع‌آوری اطلاعات در مورد وضعیت محیط از جهات مختلف است (Koch, 2020). مثلث‌سازی روشی برای محاسبه موقعیت است که بر فاصله شناخته شده بین دو دستگاه اندازه‌گیری و زوایای اندازه‌گیری شده از آن دو نقطه تا یک جسم متکی است. این روش بر پایه قضیه تطابق مثلث زاویه-ضلع-زاویه، برای یافتن مکان یک جسم بنا شده است (Pierlot & Van Droogenbroeck, 2014).

اطلاعاتی نظیر میزان رطوبت، ویژگی‌های مختلف شیمیایی و فیزیکی خاک و حتی میزان روشنایی در مناطق مختلف زمین می‌تواند کمک قابل توجهی به کشاورزان برای تولید محصول بهتر کند. در کاربردهای کشاورزی با توجه به این که محیط مورد بررسی وسیع است باید گره‌های حسگر برد رادیویی بالایی داشته باشند که خود این مسئله مستلزم بهره‌گیری از حسگرهای گران قیمت است که یکینقص مهم در بکارگیری این فناوری در حوزه کشاورزی به شمار می‌رود (Mazlounzadeh et al., 2010). روش‌های مکان‌یابی با بکارگیری شبکه‌های حسگر شامل موارد زیر هستند: روش راهنمای متحرک^۷ (Hu and Evans, 2004)، روش مرکزگرا^۸ (Mazlounzadeh et al., 2010)، روش کشف مکان دقیق^۹ (Heege, 2015)، روش برنامه‌ریزی

بکارگیری ابزار دقیق و تجهیزات اتوماسیون و افزایش دقت در اندازه‌گیری، موجب افزایش کارایی سامانه‌ها و عملیات می‌شود. در حوزه کشاورزی دقیق بهره‌گیری از تجهیزات خاص از طریق اعمال بجا و به موقع نهاده‌ها، سبب افزایش بهره‌وری و همچنین افزایش کمی و کیفی محصولات می‌شود (Candiago et al., 2015). کشاورزی موضعی^۱ بر پایه سنجش تغییرات مکانی، ویژگی‌های خاک و گیاه و مصرف متغیر نهاده‌ها در نقاط مختلف بنا شده است (Song et al., 2020). بنابراین ابتدایی‌ترین نیاز برای رسیدن به این بیهدف، موقعیت‌یابی ماشین مربوطه در مزرعه، باغ و یا مرتع است تا با توجه به آن عملیات مورد نظر انجام پذیرد. سامانه‌ی مکان‌یابی جهانی^۲ (GNSS) یکی از روش‌هایی است که برای تعیین موقعیت به کار می‌رود. این سامانه متشکل از حداقل ۲۴ ماهواره است که با استفاده از مکان‌یابی ماهواره‌ای اطلاعاتی را به دست می‌دهد. خدمات این مجموعه در هر شرایط آب و هوایی و در هر نقطه از کره زمین در تمام شبانه‌روز در دسترس بوده و استفاده از آن رایگان و تنها نیاز به فراهم کردن یک گیرنده است (Bartholomew et al., 2020).

در بسیاری از مناطق جهان، استفاده از گیرنده‌های GPS به منظور مکان‌یابی دارای خطای زیادی است که برای بالا بردن دقت و کاهش خطای مکان‌یابی به کمک این روش می‌توان از تغییر دادن سیگنال‌ها از حالت تکی به حالت سیگنال دوتایی (El-Naggar, 2011) و یا از روش‌های یموقیت‌یابی تفاضلی (DGPS^۳) یا پروش تعیین موقعیت آبی (RTK^۴) استفاده کرد (Heege, 2015). روش RTK بسیار گران است و سیگنال‌های مورد نیاز برای تصحیح DGPS در همه کشورها وجود ندارد. از این رو، باید به دنبال راهکارهای دیگری برای موقعیت‌یابی بود. خطا در مکان‌یابی ماهواره‌ای بدون تصحیح‌گر، در برخی موارد ممکن است به ۱۰ متر نیز برسد که برای کشاورزی دقیق مناسب نیست (Yong-Won, 2012). به عنوان مثال اگر یک کرت با عرض ۱۰ متر به اشتباه در مسیر یک سمپاش قرار بگیرد و به طول ۵۰۰ متر این خطا ادامه داشته باشد، علاوه بر آسیب به محیط زیست حجم بسیار زیادی از

5- Inertia

6- Triangulation

7- Mobile Beacon

8- Centroid

9 Accurate Location Discovery

1- Site-specific Agriculture

2- Global Navigation Satellite System

3- Differential Global Positioning System

4- Real-Time Kinematic

به دلیل عدم دسترسی سراسری به سیگنال‌های اصلاحی در کشور، مد نظر یقرار نگرفت. برای حل مسئله فوق، نقشه از پیش تعیین شده مسیر حرکت تراکتور به صورت الکترونیکی برای سیستم تعریف و در حافظه پردازنده مرکزی ذخیره و سپس حرکت در این مسیر انجام شد. نتیجه حرکت بر اساس نقشه پیش فرض، عدم نیاز به مختصات کنترل کننده خارج از سامانه بود زیرا از پیش مختصات در آن تعریف و تنها مسیر تعریف شده دنبال شد.

ساختار سامانه خودرهیاب

اجزای سامانه خودرهیاب پژوهش حاضر در شکل ۱ نشان داده شده است. دو حسگر چرخش سنج^۴ برای محاسبه تعداد دوران چرخ جلو و اندازه زاویه فرمان به منظور محاسبه مقدار جابجایی طولی (Y) و عرضی (X) وسیله نقلیه به کار گرفته شد (شکل ۲). برای تعیین مسافت پیموده شده از سنجش دوران یک چرخ متحرک یبیا چرخش سنج (AUTONICS ENC-1-2-T-24 کره جنوبی) اندازه‌گیری شد. ریزینی^۵ این چرخش سنج، ۲۵ پالس بر دور یو مسافت طولی طی شده چرخ، به ازای هر پالس تولیدی آن، یک سانتی‌متر است. همچنین برای محاسبه زاویه چرخش فرمان از یک زاویه سنج دقیق (E40HB12-1024-6-1-5، کره جنوبی) بهره‌برداری شد. ریزینی این چرخش سنج، ۱۰۲۴ پالس بر دور است.

برای تسریع در فرایند پردازش، روش پردازش موازی به کار گرفته شد. به این معنی که پردازنده اول به شمارش تعداد دوران چرخش سنج چرخ می‌پردازد و هم زمان، پردازنده دوم با توجه به چرخش فرمان، زاویه انحراف را محاسبه می‌کند. تعیین جهت چرخش فرمان بر اساس مدارهای منطقی انجام شد. سپس تمامی اطلاعات روی کارت حافظه خارجی ذخیره شده و در مرحله تحلیل مورد استفاده قرار گرفت.

نصب چرخش سنج‌ها بر روی تراکتور

برای نصب چرخش سنج‌ها روی تراکتور چندین قسمت مورد امتحان قرار گرفت تا در نهایت بهترین نقطه تعیین شد (شکل ۳). به دلیل تک دیفرانسیل بودن تراکتور MF285، با توجه به متحرک بودن چرخ‌های جلو (در مقابل

نیمه قطعی^۱ (Biswas, 2004)، روش تقسیم‌بندی چندوجهی^۲ (Ma et al., 2004)، روش راهنمای گردان^۳ (Nasipuri and Li, 2002)، روش‌های Ad-Hoc positioning، Robust positioning و N-hop (Mohapatra, 2005) و Diffusion (Langendoen & Reijers, 2003). معایب این روش‌ها به طور کلی عبارتند از: مصرف زیاد انرژی، سرعت پایین پردازشی، محاسبات زیاد و وابستگی به استفاده از سامانه موقعیت‌یاب ماهواره‌ای.

با توجه به معایب ذکر شده در مورد سامانه شبکه حسگر و گران قیمت بودن سامانه اینرسیایی، نیاز به یک سامانه عملی‌تر احساس می‌شود. در این تحقیق با بکارگیری روشی بدیل، موقعیت‌یابی ادوات در مزرعه بدون استفاده از سامانه GNSS انجام شد. مقادیر حاصل از این روش با مقدار شاهد حاصل از اندازه‌گیری واقعی به کمک اندازه‌گیری با متر دستی مقایسه شد تا دقت این سامانه با گیرنده GNSS مقایسه شود و بتوان به روشی مطمئن برای یافتن مسیر بهینه حرکت تراکتور دست یافت.

مواد و روش‌ها

هدف این پژوهش، یافتن مسیر بهینه برای حرکت تراکتور بر اساس موقعیت‌یابی محلی به کمک سامانه خودرهیاب نصب شده روی تراکتور بود. با توجه به حرکت دو بعدی وسایل نقلیه، می‌بایست دو حرکت طولی و عرضی به منظور تعیین مقدار جابجایی کل، نسبت به مبدأ فرضی در نظر گرفته شود. برای رسیدن به این هدف از دو حسگر تشخیص جابجایی استفاده شده که هر یک به صورت مجزا به منظور اندازه‌گیری تغییرات طولی و عرضی حرکت تراکتور به کار گرفته شدند.

یکی از بی‌بی‌بی‌چیدگی‌هایی این پژوهش آن بود که مقدار جابجایی هر لحظه نسبت به موقعیت قرارگیری خود تراکتور و نه نسبت به مبدا، مختصات ثابت بیرونی محاسبه شده است. یعنی دستگاه به راحتی قادر به تشخیص سمت حرکت نیست و فقط موقعیت و جهت حرکت را نسبت به خود وسیله متحرک محاسبه می‌کند. در این راستا بکارگیری سامانه‌های ماهواره‌ای می‌تواند یک راه حل برای رفع مشکل مذکور باشد که در پژوهش حاضر این راهکار

1- Semi Definite Programming
2- Multi-Dimensional Scaling
3- Circling Beacon Localization

4- Rotary Encoder
5- Resolution

ابتدا سعی شد تا از مقدار جابجایی میل فرمان، مقدار چرخش مشخص شود؛ اما میل فرمان دارای خلاصی بوده و در سیستم ایجاد خطا می‌کرد. نهایتاً این حسگر روی محور شغال دست نصب شد که در این حالت حسگر هیچگونه خلاصی نداشته و دقیقاً مقدار چرخش، برابر با زاویه فرمان‌گیری بود.

با توجه به آزمایشی بودن نحوه قرارگیری حسگرها و انجام آزمون‌های کوتاه مدت در سامانه حاضر، به منظور تداوم استفاده در زمین‌های کشاورزی که دارای خاک چسبیده هستند و امکان قرارگرفتن لایه‌ای از خاک روی چرخ وجود دارد، می‌بایست از ابزاری شبیه به کاردک به منظور حذف لایه خاک (یا گل) روی چرخ انجام شود تا در قطر بخش چرخشی حسگر تأثیری نداشته باشد.

واسنجی حسگرها

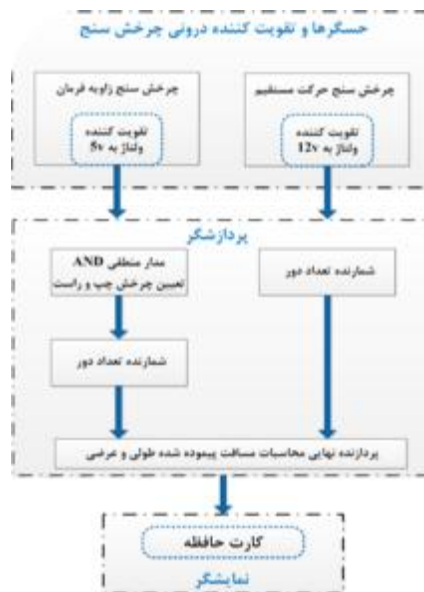
حسگر محاسبه کننده مسیر طولی، از بالای چرخ جلو به آن متصل و در نتیجه سرعت خطی در نقطه تماس برای هر دو جسم در حال دوران با هم برابر است. بنابراین مقدار جابجایی آن برابر با محیط چرخ جلو و محیط پیموده شده‌ی چرخ جلو برابر با جابجایی تراکتور است. در نتیجه به ازای هر پالس دریافتی از این حسگر، پیمایش یک سانتی‌متری محیط چرخ جلوی تراکتور ثبت می‌شود. حسگر محاسبه کننده زاویه فرمان، در یک دور چرخش ۱۰۲۴ عدد پالس خروجی داشت؛ بنابراین در هر درجه گردش ۲/۸۴ پالس خروجی تولید می‌کرد.

لازم به ذکر است که نوع پالس خروجی حسگرهای به کار رفته مربعی است و مقدار اعشاری به صورت همپوشانی روی پالس بعدی قرار می‌گیرد. در نتیجه با در نظر گرفتن مقدار تقریبی ۳ پالس برای یک درجه، این حسگر یتنظیم شد. باید در نظر داشت که مقدار بیشینه زاویه فرمان در این تراکتور ۱۳ درجه است در نتیجه بیشینه تعداد پالس-ها ۳۹ عدد (۳×۱۳=۳۹) خواهد بود. مقدار افزایش پالس خروجی نسبت به مقدار واقعی در حسگر برابر با ۰/۱۶ بود (۳-۲/۸۴=۰/۱۶). مقدار خطا در هر درجه ۰/۰۵۶ درجه بود (معادله (۱)).

$$\frac{1024}{0.16} = \frac{360}{x} \rightarrow x = 0.0056 \quad (1)$$

که در بیشینه فرمان‌گیری، این مقدار به حدود ۰/۰۷۳ درجه در ۱۳ درجه چرخش می‌رسید که جزء خطای سیستمی است.

محرک بودن چرخ‌های عقب تراکتور، از این چرخ‌ها برای نصب چرخش سنج استفاده شد. با توجه به ارتعاش بالای این چرخ‌ها در حین حرکت و نیز نیاز بخش چرخشی حسگر به تماس مناسب با لاستیک تراکتور، مکان‌های مختلف چرخ مورد بررسی قرار گرفت که در نهایت، نصب آن در بالای چرخ تراکتور به کمک نصب یک اتصال ارتجاعی لاستیکی به دور بخش چرخشی حسگر، برای تماس کامل با آن انجام گرفت.



شکل ۱- اجزای سامانه خودرهیاب



شکل ۲- چرخش سنج‌ها (rotary encoders) و گیرنده GPS

به منظور نصب حسگر چرخش سنج فرمان، تمهیداتی مورد نیاز بود، زیرا یافتن محل مناسب برای به دست آوردن مقدار واقعی چرخش فرمان، کار بسیار حساسی است. در



شکل ۳- نحوه نصب چرخش سنچ‌ها روی تراکتور MF285

حرکت بهینه مشخص می‌شد. سرعت حرکت تراکتور به صورت تقریبی برابر با ۵ کیلومتر بر ساعت در نظر گرفته شد.

تحلیل داده‌های گیرنده GNSS

با استفاده از نرم‌افزار UTM Conversion نسخه ۱/۰، اطلاعات دریافت شده در نقاط مشخص شده، بر حسب متر در دستگاه UTM تبدیل و با سایر داده‌ها مقایسه شد. همچنین به کمک این نرم‌افزار مسیر حرکت تراکتور، بر اساس نقاط فوق رسم و در قالب یک فایل DXF ذخیره شدند. نقشه مسیرهای حرکتی مختلف مورد آزمایش در شکل‌های ۴ تا ۶ ارائه شده است.

آزمایش‌ها و طرح آماری

عوامل تأثیرگذار در نتایج به دست آمده شامل نوع دستگاه (A)، شرایط جوی (B) و نوع زمین (C) است. هر یک از عوامل یاد شده در سطوح متفاوتی تأثیرگذار هستند. نوع دستگاه شامل سه سطح گیرنده GNSS، یخودرهباب (SP) و محاسبه دستی است. شرایط جوی در دو سطح آفتابی و ابری و نوع زمین در سه سطح آسفالت، شخم خورده و شخم نخورده در نظر گرفته شد.

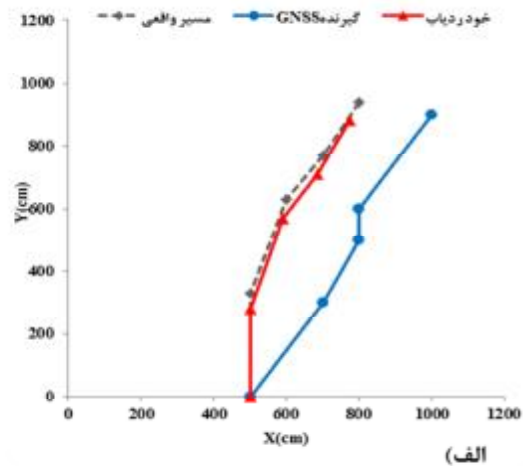
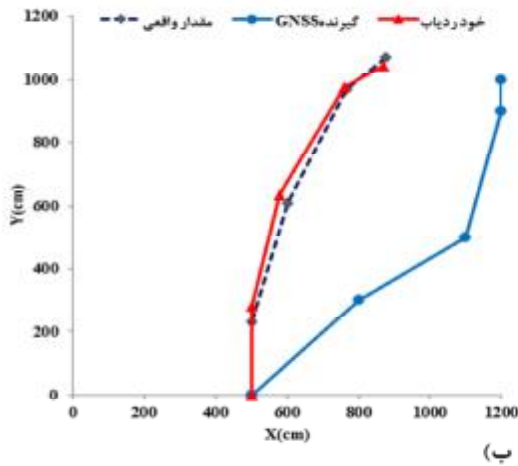
روش اندازه‌گیری و انجام آزمایش

تمامی داده‌های دو حسگر چرخش سنچ به طور هم‌زمان به پردازنده مرکزی ارسال می‌شد. در این پردازش‌گر، داده‌های مربوط به هر حسگر با توجه به شناسه دیجیتال اختصاصی، تشخیص داده می‌شد و سپس به یک مدار منطقی می‌رفت که آنجا ابتدا جهت چرخش به چپ یا راست تراکتور مشخص می‌شد، سپس بر اساس ضرایب تبدیل و کالیبراسیون، مقادیر حرکت به سمت جلو (Y) و تمایل به سمت چپ یا راست (X) در کارت حافظه به صورت یک فایل json ذخیره می‌شدند.

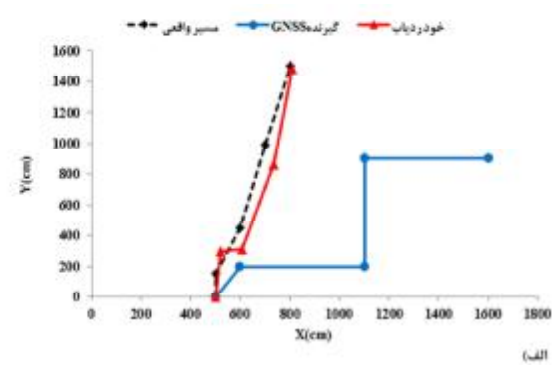
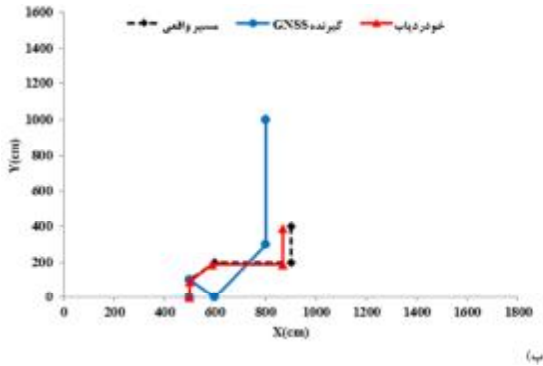
به منظور انجام آزمون، ابتدا مسیرهای حرکت مختلفی به صورت مشخص روی زمین‌های مورد آزمایش در سه حالت آسفالت، شخم خورده و شخم نخورده، همچنین در دو حالت جوی ابری و آفتابی (به منظور بررسی اثرات متغیر آنها بر سامانه تعیین موقعیت ماهواره‌ای) تعیین شدند. در این مسیرها چهار نقطه به صورت تصادفی انتخاب شد و مختصات هر یک از نقاط توسط دستگاه گیرنده GNSS و نیز به صورت دستی با متر اندازه‌گیری شد. در همان زمان اطلاعات نقاط مورد نظر در دستگاه یخودرهباب متناظر با هر نقطه ذخیره شد. سپس اختلاف مسیرهای حرکتی محاسبه شده و میزان اختلاف از مسیر برای بیان مسیر

آماري در دو مرحله برای هر مؤلفه انجام شده است. بر این اساس، از طرح آزمون فاکتوریل بر پایه بلوک‌های کامل تصادفی استفاده شد. تجزیه واریانس و آزمون مقایسه میانگین در سطح احتمال ۱٪ با استفاده از نرم افزار SPSS نسخه ۲۶ انجام شد.

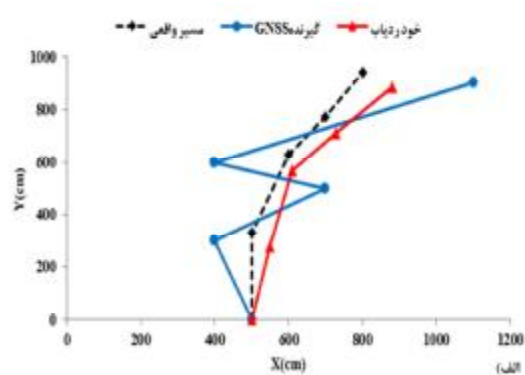
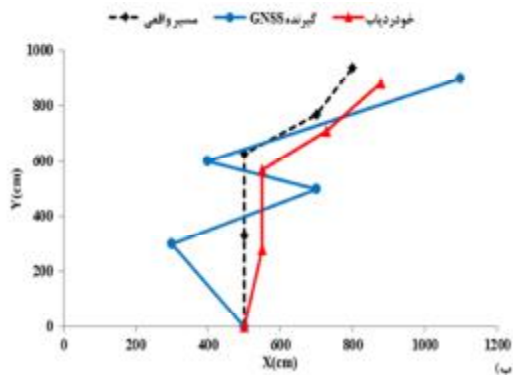
داده برداری‌های هر آزمایش در شرایط مشابه، با چهار تکرار انجام شد. برای ساده سازی روند آزمایش، اختلاف داده‌های آزمایشی از مقدار واقعی در نظر گرفته شد. در نتیجه داده‌های محاسبه دستی حذف شده و عامل A فقط در دو سطح مورد تحلیل قرار گرفت. همچنین چون مختصات دارای دو مؤلفه X و Y است، تمامی طرح‌های



شکل ۴- مسیر حرکت روی آسفالت: الف) در هوای آفتابی و ب) در هوای ابری



شکل ۵- مسیر حرکت روی خاک شخم نخورده: الف) در هوای آفتابی و ب) در هوای ابری



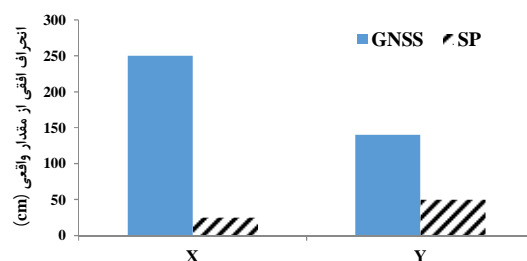
شکل ۶- مسیر حرکت روی خاک شخم خورده: الف) در هوای آفتابی و ب) در هوای ابری

نتایج و بحث

تحلیل داده‌های محورهای X و Y

با توجه به داده‌های آزمون‌ها در حالت‌های مختلف و انحراف مسیرها از مقادیر واقعی، ابتدا انحراف محور X (حرکت در عرض تراکتور) تحلیل شد. جدول ۱ نتایج مربوط به تجزیه واریانس برای داده‌های محور X را نشان می‌دهد. همان‌طور که مشاهده می‌شود، اختلاف در عامل A (نوع دستگاه مکان‌یاب) در سطح احتمال ۱٪ معنادار است و در سایر عوامل اختلاف معناداری وجود ندارد. نوع زمین و شرایط جوی در این آزمایش اختلافی در میانگین داده‌ها ایجاد نکرده است. دلیل پتانسیل معنی‌دار نوع دستگاه بر دقت موقعیت‌یابی را می‌توان به این صورت بیان نمود که داده‌های GNSS به دلیل عدم دقت کافی ناشی از عدم

وجود سامانه‌های تصحیح افتراقی خطا (differential correction) در اغلب مناطق، دچار خطای زیاد و غیر قابل قبول هستند. همان‌گونه که پیشتر اشاره شد، این دقت برای فعالیت‌های کشاورزی دقیق مناسب نیست. اما ریزبینی کافی حسگرهای مورد استفاده در سامانه خودرهیاب میزان حرکت تراکتور را با ریزبینی بسیار مناسبی (در حد یک سانتی‌متر و خطای زاویه ای ۰/۰۵۶ درجه) پایش می‌کند. مقایسه میانگین انحرافات دستگاه‌های مورد استفاده، در شکل ۷ نشان داده شده است. با توجه به این شکل مشاهده می‌شود که مقدار میانگین خطا در حرکت عرضی (X) برای دستگاه خودرهیاب ۲۵cm و برای دستگاه GNSS، ۲۵۰cm است.



شکل ۷- انحراف داده‌های X و Y از مقدار واقعی (گیرنده ماهواره‌ای در برابر سامانه این پژوهش)

جدول ۱- نتایج تجزیه واریانس انحراف X

Sig.	F	مجموع میانگین	درجه آزادی	مجموع مربعات	منابع
.۰۰۰	۱۰/۱۸۸	۱۰۱۶۳۱/۱۵۲	۱۱	۱۱۱۷۹۴۲/۶۶۷	Corrected Model
.۰۰۰	۹۸/۶۲۲	۹۸۳۸۴۱/۳۳۳	۱	۹۸۳۸۴۱/۳۳۳	Intercept
.۰۰۰	۶۷/۲۸۱	۶۷۱۱۸۷/۰۰۰	۱	۶۷۱۱۸۷/۰۰۰	A
.۰۶۶۳	۰/۱۹۳	۱۹۲۵/۳۳۳	۱	۱۹۲۵/۳۳۳	B
.۰۹۰۶	۰/۰۹۹	۹۹۱/۵۸۳	۲	۱۹۸۳/۱۶۷	C
.۰۶۱۸	۰/۲۵۳	۲۵۲۳/۰۰۰	۱	۲۵۲۳/۰۰۰	A * B
.۰۶۰۲	۰/۵۱۴	۵۱۳۰/۷۵۰	۲	۱۰۲۶۱/۵۰۰	A * C
.۰۰۰	۱۰/۷۳۳	۱۰۷۰۶۶/۵۸۳	۲	۲۱۴۱۳۳/۱۶۷	B * C
.۰۰۰	۱۰/۸۲۳	۱۰۷۹۶۴/۷۵۰	۲	۲۱۵۹۲۹/۵۰۰	A * B * C
		۹۹۷۵/۸۳۳	۳۶	۳۵۹۱۳۰/۰۰۰	خطا
			۴۸	۲۴۶۰۹۱۴/۰۰۰	کل
			۴۷	۱۴۷۷۰۷۲/۶۶۷	Corrected Total

a. R Squared = .757 (Adjusted R Squared = .683)

انجام شده و مقایسه اختلاف دستگاه‌ها در شکل ۷ نشان داده شده است. با توجه به جدول ۲، برای پارامتر حرکت در مسیر Y نیز اختلاف در عامل A در سطح احتمال ۵٪ معنادار است و در سایر عوامل اختلاف قابل توجهی وجود

با توجه ماهیت و اهمیت پایش حرکتی تراکتور در دو بعد متفاوت برای ارزیابی اثر حسگرهای مربوط به تعیین مسافت طولی و تغییرات یزایه‌ای توسط سامانه خودرهیاب، تحلیل آماری در مورد انحرافات محور Y نیز

اصلی این حرکت پیچیده‌تر از مسیر مستقیم طولی است. شاید بتوان گفت که در مسیرهای مستقیم حرکت، داده‌های ماهواره‌ای نیز می‌توانند تا حدی صحیح‌تر از زمانی باشند که در مسیر جانبی، حرکت وجود دارد. مقدار P در جدول تجزیه واریانس انحراف X صفر است اما در جدول تجزیه واریانس انحراف Y برابر با ۰/۱۸ است. در نتیجه این امکان وجود دارد که انحراف در محور X تأثیرگذارتر از محور Y باشد. همچنین با توجه به اطلاعات جدول ۳ اختلاف معناداری بین انحراف X و Y از مقدار واقعی مختصات وجود ندارد.

ندارد. با توجه به شکل ۷ می‌توان گفت که مقدار میانگین خطا در محور Y برای دستگاه خودرهیاب ۵۰ cm و برای دستگاه GNSS، ۱۴۰ cm است. علت اختلاف معنادار بین دو دستگاه را می‌توان به تفاوت و خطای ناشی از نحوه تعیین مختصات، همان‌طور که در پارامتر X بحث شد، مرتبط دانست. اما باید توجه داشت که اختلاف در حرکت جانبی (X) در سطح ۱ درصد و در حرکت طولی در سطح ۵ درصد (Y) معنادار شده است. با توجه به تحلیل آماری، کاملاً مشخص است که وجود اختلاف یجدی‌تر در حرکت جانبی، ناشی از تلفیق داده‌های دو حسگر بوده که ماهیت

جدول ۲- نتایج تجزیه واریانس انحراف Y

Sig.	F	مجموع میانگین	درجه آزادی	مجموع مربعات	منابع
۰/۲۰۶	۱/۴۲۰	۲۱۳۹۱/۰۶۶	۱۱	۲۳۵۳۰۱/۷۲۹ ^a	Corrected Model
۰/۰۰۰	۲۹/۸۹۱	۴۵۰۲۷۵/۰۲۱	۱	۴۵۰۲۷۵/۰۲۱	Intercept
۰/۰۱۸	۶/۱۸۷	۹۳۱۹۲/۱۸۷	۱	۹۳۱۹۲/۱۸۷	A
۰/۴۸۳	۰/۵۰۳	۷۵۷۵/۱۸۸	۱	۷۵۷۵/۱۸۸	B
۰/۱۲۰	۲/۲۴۹	۳۳۸۷۲/۲۷۱	۲	۶۷۷۴۴/۵۴۲	C
۰/۶۰۲	۰/۲۷۶	۴۱۶۲/۶۸۷	۱	۴۱۶۲/۶۸۷	A * B
۰/۲۲۵	۱/۵۵۴	۲۳۴۰۲/۴۳۷	۲	۴۶۸۰۴/۸۷۵	A * C
۰/۶۶۳	۰/۴۱۶	۶۲۷۲/۳۱۳	۲	۱۲۵۴۴/۶۲۵	B * C
۰/۸۹۷	۰/۱۰۹	۱۶۳۸/۸۱۳	۲	۳۲۷۷/۶۲۵	A * B * C
		۱۵۰۶۳/۷۸۵	۳۶	۵۴۲۲۹۶/۲۵۰	خطا
			۴۸	۱۲۲۷۸۷۳/۰۰۰	کل
			۴۷	۷۷۷۵۹۷/۹۷۹	Corrected Total

a. R Squared = .303 (Adjusted R Squared = .090)

جدول ۳- نتایج تجزیه واریانس اختلاف بین انحرافات محور های X و Y

Sig.	F	مجموع میانگین	درجه آزادی	مجموع مربعات	
۰/۹۳۳	۰/۰۰۷	۲۴۳/۸۴۴	۱	۲۴۳/۸۴۴	بین گروهی
		۳۴۵۰۲/۹۳۲	۹۴	۳۲۴۳۲۷۵/۶۴۶	درون گروهی
			۹۵	۳۲۴۳۵۱۹/۴۹۰	کل

پرداخته شد تا مقدار انحراف مجموع، از مختصات واقعی به‌دست آید. با توجه به جدول ۴ اختلاف در عامل A معنادار بوده و در سایر عوامل اختلاف قابل توجهی مشاهده نشد. بنابراین اثر نوع دستگاه موقعیت‌یاب بر مقدار میانگین خطای فاصله برای دستگاه خودرهیاب ۶۰ cm و برای دستگاه GNSS، ۴۰۰ cm است. مقدار خطای گیرنده GNSS نزدیک به مقدار خطای یاد شده در دفترچه راهنمای دستگاه گیرنده (۳/۶ متر) است.

مقایسه فاصله از مقدار واقعی مختصات

در این بخش ابتدا مقادیر X و Y حاصل از رابطه فیثاغورس با یکدیگر جمع شد تا مقدار فاصله از نقطه واقعی حاصل و سپس به مقایسه داده‌ها نسبت به یکدیگر انحراف فاصله در سطح احتمال ۱% معنادار بوده، اما نوع زمین و شرایط جوّی در این آزمایش اختلافی در میانگین داده‌ها ایجاد نکردند. مقایسه اختلاف دستگاه‌ها در شکل ۸ نشان داده شده است. با توجه به شکل ۸ می‌توان گفت که

است و بر این اساس حرکت بهینه تراکتور در هر مسیر تعیین شده به کمک این سامانه قابل انجام است.

نتایج نشان داد که مسیر طی شده به کمک سامانه خودرهیاب، دارای کمترین میزان انحراف از مسیر واقعی نسبت به حالتی است که از گیرنده ماهواره‌ای استفاده شده

جدول ۴ - تجزیه واریانس انحراف فاصله

Sig.	F	میانگین مربعات	درجه آزادی	مجموع مربعات	منابع
./۰۰۱	۴/۱۸۴	۱۶۷۸۴۹/۷۹۴	۱۱	۱۸۴۶۳۴۷/۷۲۹	Corrected Model
./۰۰۰	۶۸/۹۳۷	۲۷۶۵۲۸۰/۰۲۱	۱	۲۷۶۵۲۸۰/۰۲۱	Intercept
./۰۰۰	۳۱/۵۲۵	۱۲۶۴۵۷۶/۶۸۸	۱	۱۲۶۴۵۷۶/۶۸۸	A
./۵۱۷	./۴۲۷	۱۷۱۳۸/۵۲۱	۱	۱۷۱۳۸/۵۲۱	B
./۵۵۵	./۵۹۹	۲۴۰۱۴/۰۲۱	۲	۴۸۰۲۸/۰۴۲	C
./۹۴۴	./۰۰۵	۲۰۴/۱۸۷	۱	۲۰۴/۱۸۷	A * B
./۵۵۴	./۶۰۱	۲۴۱۰۱/۴۳۸	۲	۴۸۲۰۲/۸۷۵	A * C
./۰۳۳	۳/۷۵۲	۱۵۰۵۰۳/۶۴۶	۲	۳۰۱۰۰۷/۲۹۲	B * C
./۱۳۹	۲/۰۸۴	۸۳۵۹۵/۰۶۳	۲	۱۶۷۱۹۰/۱۲۵	A * B * C
		۴۰۱۱۳/۲۰۱	۳۶	۱۴۴۴۰۷۵/۲۵۰	خطا
			۴۸	۶۰۵۵۷۰۳/۰۰۰	کل
			۴۷	۳۲۹۰۴۲۲/۹۷۹	Corrected Total

a. R Squared = .561 (Adjusted R Squared = .427)

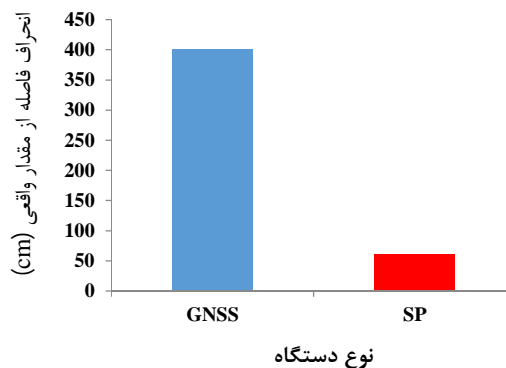
طولی آن با ادوات کشنده در پشت تراکتور، بافت خاک و شیب زمین نیاز به توجه فراوان دارند (Heege, 2015). در حالی که در سامانه خودرهیاب با استفاده از میزان غلتش چرخ محرک در هر مسیر و اندازه‌گیری چرخش غربلیک فرمان به طور مستقیم، این محدودیت‌ها وجود ندارد.

نتیجه‌گیری

با توجه به معایب سامانه‌های شبکه حسگر، گران قیمت بودن سامانه اینرسیایی و عدم پاسخ این سامانه در فرکانس‌های تشدید، همچنین خطای زیاد گیرنده‌های ماهواره‌ای (GNSS)، در این پژوهش سامانه‌ای طراحی و ساخته شد تا با بکارگیری روشی جدید، موقعیت‌یابی ادوات در مزرعه بدون نیاز به سامانه ماهواره‌ای انجام شود. خلاصه‌ای از نتایج مقایسه دستگاه خودریدیاب ساخته شده با موقعیت‌یاب ماهواره‌ای به شرح زیر است:

داده‌های محور X دستگاه خودرهیاب نسبت به گیرنده GNSS در سطح ۱٪ به طور معناداری بهتر است. مقدار خطا در سامانه خودرهیاب در محور X، ۲۵cm و برای گیرنده GNSS برابر با ۲۵۰cm بود.

تغییر در عوامل محیطی یعنی وضعیت سطح زمین (خاک شخم خورده و نخورده و نیز آسفالت) و شرایط جوی، تأثیر



شکل ۸ - انحراف فاصله از مقدار واقعی

به نظر می‌رسد با توجه به نتایج حاصل شده، استفاده از سامانه خودرهیاب و امکان یبومی‌سازی این سامانه برای اجرای عملیات کشاورزی دقیق با توجه به دقت بالای کارکرد و عدم نیاز به هزینه‌کرد سنگین به منظور نصب و بکارگیری سامانه‌های موقعیت‌یاب ماهواره‌ای که برای اغلب عملیات نیازمند تصحیح‌گرهای متفاوت همراه با هزینه‌های مربوطه هستند، مقرون به صرفه‌تر است. در بهره‌گیری از سامانه‌های ماهواره‌ای، توجه به مسیرهای شیب‌دار و نحوه اتصال ادوات به تراکتور مبحث بسیار مهمی است که با توجه به ارتفاع نصب گیرنده، فاصله

- Computer Science; *In: Tenth Annual International Conference on mobile Computing and networking*. Philadelphia, USA.
- Koch, E. (2020). Smart agriculture. A systematic overview; Master's Thesis, *Politecnico Di Milano, Italy*.
- Langendoen, K., Reijers, N. (2003). Distributed localization in wireless sensor networks: a quantitative comparison; *Networks*, 43 (4), 499-518.
- Ma, J., Gao, M., Zhu, Y., Ni, L. (2004). Anchor-free Localization with Refinement in Sensor Networks; *Department of Computer Science, Hong Kong University press, Clearwater Bay, Kowloon, Hong Kong*.
- Mazlounzadeh, S. M., Shamsi, M., & Nezamabadi-Pour, H. (2010). Fuzzy logic to classify date palm trees based on some physical properties related to precision agriculture. *Precision agriculture*, 11(3), 258-273.
- Mohapatra, P. (2005). Ad Hoc networks technologies and protocols; *University of California' Davis, S. V. krishnamurthy, University of California' Riverside, Springer Science + Business Media*.
- Nasipuri, A., Li, K. (2002). A Directionality based Location Discovery Scheme for Wireless Sensor Networks; *Proceedings of the 1st ACM international workshop on Wireless sensor networks and applications*, 105-111.
- Özkan, B., & Uçar, A. (2012). Comparison of the strapdown and gimbaled seekers utilized in aerial applications. *In Infrared Technology and Applications XXXVIII*, 8353, p. 83530K). International Society for Optics and Photonics.
- Pierlot, V. and Van Droogenbroeck, M. (2014). A New Three Object Triangulation Algorithm for Mobile Robot Positioning. *IEEE Transactions on Robotics*, 30(3), 566-577.
- Song, F. F., Xu, M. G., Duan, Y. H., Cai, Z. J., Wen, S. L., Chen, X. N., & Colinet, G. (2020). Spatial variability of soil properties in red soil and its implications for site-specific fertilizer management. *Journal of Integrative Agriculture*, 19(9), 2313-2325.
- Yong-Won Ahn. (2012). GPS Error Sources and Mitigation; *short course notes, University of New Brunswick, department of geomantic engineering*, Canada.
- معناداری بر تعیین مختصات محور X توسط گیرنده GNSS و دستگاه خودرهیاب ایجاد نمی‌کند.
- داده‌های محور Y دستگاه خودرهیاب نسبت به گیرنده GNSS در سطح ۵٪ به طور یمنی‌داری بهتر است. مقدار خطای محور Y در سامانه خودرهیاب، ۵۰ cm و برای گیرنده GNSS برابر با ۱۴۰ cm است.
- تغییر در عوامل محیطی یعنی وضعیت زمین و آب و هوا در محور Y اختلاف معنادار در تعیین موقعیت توسط گیرنده GNSS و سامانه خودرهیاب ایجاد نمی‌کند.
- مقدار انحراف از نقطه واقعی توسط گیرنده GNSS و دستگاه خودرهیاب در سطح ۱٪ تفاوت معناداری دارد. خطای تعیین فاصله در سامانه خودرهیاب ۷۰ cm و در گیرنده GNSS برابر با ۴۰۰ cm است.
- بر اساس یافته‌های یاد شده، سامانه‌ی خودرهیاب اختلاف مسیر کمتری را نسبت به سامانه ماهواره‌ای ایجاد میکند که افزون بر دقیق‌تر بودن، به منظور طی مسیر بهینه، مناسب‌تر است. البته باید این نکته مد نظر قرار گیرد که در صورت عدم جلوگیری از بروز خطا یا عدم تصحیح آن، احتمال رویداد خطای تجمعی وجود دارد که در ادامه پژوهش حاضر، راه‌کارهای مناسب برای این منظور در دست اجرا هستند.

منابع

- Bartholomew, S., Strimel, G., Byrd, V., Santana, V., Otto, J., Laureano, Z., & DeRome, B. (2020). Using data to improve precision in crop fertilization through digital agriculture. *ma*
- Biswas, P. (2004). Semi definite Programming for Ad Hoc Wireless Sensor Network Localization; *Dept. of Electrical Engineering Stanford University, CA 94305* pbiswas@stanford.edu USA.
- Candiago, S., Remondino, F., De Giglio, M., Dubbini, M., & Gattelli, M. (2015). Evaluating multispectral images and vegetation indices for precision farming applications from UAV images. *Remote sensing*, 7(4), 4026-4047.
- El-Naggar, M. (2011). Enhancing the accuracy of GPS point positioning by converting the single frequency data to dual frequency data; *Transportation Department, Faculty of Engineering, Alexandria University*.
- Heege, H. J. (2015). Precision in crop farming. Springer. Kiel, Germany.
- Hu, L., Evans, H. (2004). Localization for Mobile Sensor Networks, Department of