

بررسی امکان هدایت یک تراکتور بدون سرنشین براساس ارسال بی‌سیم تصویر ویدئویی

محمد مزیدی^{۱*} - محمد حسین عباسپور فرد^۲ - محمد حسین آق‌خانی^۳

تاریخ دریافت: ۹۱/۹/۲۵

تاریخ پذیرش: ۹۲/۸/۱۹

چکیده

اتوماسیون تراکتورها به دلیل کاربرد وسیع این وسیله در عملیات‌های مختلف کشاورزی، عمرانی و صنعتی، مورد توجه جدی محققین قرار گرفته است. در این تحقیق یک سامانه هدایت از راه دور برای تراکتور طراحی و ساخته شده است تا کاربر بتواند به دور از شرایط سخت و پرتنش کابین تراکتور عملیات هدایت تراکتور را اجرا کند. از یک دوربین مدار بسته و یک موتور الکتریکی به ترتیب جهت مشاهده مسیر و چرخاندن میل فرمان استفاده شده است. ارتباط دو طرفه بین مرکز کنترل و واحد کنترل بر روی تراکتور توسط شبکه بی‌سیم فراهم شده است. جهت ارزیابی عوامل مؤثر بر دقت هدایت، از موقعیت نصب دوربین، سرعت چرخش میل فرمان و سرعت پیشروی هر کدام در دو سطح در یک طرح فاکتوریل در قالب کاملاً تصادفی استفاده شد. از ریشه میانگین مربعات (RMSE) انحراف عرضی و فراوانی نقاط خارج از محدوده مجاز اطراف مسیر مرجع (N_{out}) به عنوان صفت مورد بررسی در جدول تجزیه واریانس استفاده شد. نتایج آزمایش‌ها بر روی دو سطح آسفالت و خاک ارائه شده است که در نهایت سطح خاک به دلیل شکل‌پذیری بیشتر حساسیت کمتری نسبت به تغییر سطوح متغیرهای طرح آزمایش مذکور داشته و پایداری خوبی از خود نشان داده است. از آنجایی که دقت سامانه هدایت از راه دور به توانایی، مهارت و تمرکز کاربر وابستگی دارد، سرعت چرخش میل فرمان به تنهایی در دقت هدایت بی‌تأثیر بوده است. جایگاه نصب دوربین در جلوی تراکتور از دقت بالاتری نسبت به جایگاه عقب تراکتور برخوردار بوده و همانند نتایج دیگر محققین با افزایش سرعت پیشروی، RMSE انحراف عرضی و N_{out} افزایش پیدا کرده است.

واژه‌های کلیدی: اتوماسیون تراکتور، دوربین مدار بسته، شبکه بی‌سیم، هدایت بدون سرنشین

مقدمه

هوایی و گرد و خاک ناشی از عملیات‌های کشاورزی از جمله این شرایط می‌باشند.

راننده با تشخیص موقعیت فعلی در مزرعه، بررسی نقطه هدف، انتخاب مسیر و هدایت در مسیر، نقش خود را بر روی تراکتور انجام می‌دهد. یک سامانه خودکار تمامی این مراحل را بدون دخالت انسان انجام می‌دهد. تحقیقاتی از جمله استفاده از سیستم تعقیب شیار (Willrodt, 1924; Kirk, 1974; Shen and Satow, 2012) و یا کابل پهن شده بر روی زمین و تشخیص مسیر توسط یک چرخ پنجم در مقابل تراکتور (Aghkhani and Abbaspour-Fard, 2009) در زمینه هدایت خودکار تراکتور انجام شده است. در این روش‌ها از خصوصیات محلی مثل شیار شخم قبلی و کابل روی زمین استفاده شده است. ماشین بینایی به عنوان پیشرفته‌ترین روش که از خصوصیات محلی استفاده می‌کند در حال حاضر مورد توجه محققین بسیاری قرار گرفته است. تشخیص ردیف چغندر قند (Keicher and Seufert, 2000)، شناسایی خط ایجاد شده بین قسمت کشت شده و نشده (Kiani et al., 2012) نمونه‌هایی هستند که جهت هدایت

تراکتورها در صورت تجهیز با ادوات مناسب می‌توانند در عملیات‌های مختلف مانند خاک‌ورزی، کاشت، وجین، کود دهی، محلول‌پاشی، حمل و نقل، چمن‌زنی و برداشت شرکت کنند. این چنین تطبیق‌پذیری، تراکتور را یک هدف اولیه برای مکانیزاسیون و اتوماسیون کشاورزی کرده است. بالاترین سطح اتوماسیون در تراکتورها حذف کامل راننده از روی این وسیله نقلیه می‌باشد. از جمله دلایلی که توسعه تراکتورهای بدون سرنشین را روزافزون کرده است، شرایط سخت کار با تراکتورها می‌باشد. ارتعاش و سروصدای فراتر از حد استاندارد ناشی از کار با تراکتورها (Maleki et al., 2008) و همچنین شرایط آب و

۱- دانشجوی دکتری گروه ماشین‌های کشاورزی دانشگاه فردوسی مشهد

*- نویسنده مسئول: (Email: mazidi.mohammad@stu.um.ac.ir)

۲- استاد گروه ماشین‌های کشاورزی دانشگاه فردوسی مشهد

۳- دانشیار گروه ماشین‌های کشاورزی دانشگاه فردوسی مشهد

شده در اینجا برای هدایت وسیله نقلیه یک موتور پله‌ای بود (Jianjun *et al.*, 2008).

انسان به‌جز تعیین نقاط هدف می‌تواند نقش برجسته‌تری در هدایت تراکتور بدون سرنشین داشته باشد. ارسال دستورات هدایت به‌صورت مستقیم در لحظاتی از مسیر و یا در کل مسیر، منجر به ایجاد یک سامانه عملیات از راه دور^۴ می‌شود. کاربرد در این سامانه کلیه فرآیند تشخیص موقعیت، بررسی نقطه هدف و تعیین مسیر را خودش انجام می‌دهد و در نهایت دستور هدایت را به عملکردی که وظیفه تغییر مسیر تراکتور را دارد می‌فرستد. در تحقیقی با استفاده از دستورات صوتی عملیات هدایت از راه دور تراکتور را انجام دادند (Will *et al.*, 1999). عملکرد سامانه طراحی شده در حالت عملیات از راه دور تنها برای سرعت‌های کمتر از 1 m s^{-1} موفقیت آمیز بوده در حالی که قابلیت سامانه نیمه خودکار استفاده شده توسط این محققین در محدوده وسیعی از سرعت مطلوب بوده است.

موراکامی و همکاران (۲۰۰۸) نیز سامانه عملیات از راه دور را در کنار سامانه نیمه خودکار کود پخش‌کن چرخ زنجیری مورد مطالعه قرار دادند. نتایج هدایت در مسیر مستقیم برای حالت نیمه خودکار براساس دقت مورد نیاز جهت عملیات کودپاشی مناسب بوده اما در حالت عملیات از راه دور مخصوصاً هنگام دور زدن‌ها خطای سامانه بیش از حد استاندارد بوده است. مهم‌ترین علت انحراف بیش از حد از مسیر تعیین شده در این تحقیق، تأخیر رسیدن عملگر سیلندر هیدرولیکی به موقعیت مورد نظر تشخیص داده شد.

در این تحقیق باتوجه به مشکلات سامانه عملیات از راه دور در تحقیقات گذشته به‌منظور بومی‌سازی این سامانه، تحقیقی مقدماتی بر روی ارزیابی پارامترهای مؤثر در سامانه هدایت از راه دور تراکتور اجرا شد. در این سامانه فرض شده است که می‌توان با استفاده از یک دوربین مدار بسته بر روی تراکتور توانایی راننده در تشخیص موقعیت، بررسی هدف و انتخاب مسیر را به کاربر در مرکز کنترل انتقال داد. همچنین فرض شده است که موتور الکتریکی کوپل شده با میل فرمان قابلیت شبیه‌سازی دستان راننده جهت تغییر جهت به موقع تراکتور در حین پیشروی را دارد. بدیهی است که راننده تراکتور علاوه بر هدایت این وسیله، کنترل مکانیزم‌های دیگری از قبیل ترمز، کلاچ و غیره را به‌عهده دارد ولی از آنجایی که مهم‌ترین پارامتر کنترل یک تراکتور بدون سرنشین هدایت آن می‌باشد، این پارامتر در اولویت بررسی و مطالعه قرار گرفت. کنترل کامل بدون سرنشین تراکتور نیازمند تحقیقات گسترده بر روی دیگر تجهیزات آن نیز است که در ادامه یک طرح جامع‌تر در دست اقدام می‌باشد. از بررسی دیگر پارامترهای موجود بر روی تراکتور در این پروژه صرف نظر شده است. در قسمت مواد و روش‌ها ابتدا به بررسی اجمالی اجزای استفاده شده

تراکتور استفاده شده‌اند. از تکنولوژی ماشین بینایی علاوه بر هدایت، در موقعیت‌یابی، تعیین جهت و سرعت نیز استفاده می‌شود که اهمیت بسیاری در هدایت خودکار وسایل نقلیه کشاورزی دارد (Nishiwaki *et al.*, 2000; Zhang *et al.*, 2006).

علاوه بر مشخصات محلی موجود در مزرعه می‌توان از مشخصات مطلق مزرعه نیز استفاده کرد. سامانه موقعیت‌یاب جهانی (GPS) می‌تواند موقعیت مطلق تراکتور در حال حرکت در مزرعه را در اختیار سامانه خودکار قرار بدهد. سامانه خودکار براساس موقعیت به‌دست آمده در نقشه مزرعه که از قبل طرح‌ریزی شده است دستورات لازم برای هدایت تراکتور را اعمال می‌کند. سامانه موقعیت‌یاب دیگری وجود دارد که موقعیت وسیله را نسبت به محور مغناطیسی زمین مقایسه می‌کند که GDS^۱ نامیده می‌شود. در تحقیقی با ترکیب GPS و GDS توانستند هدایت تراکتور را در سرعت 0.31 m s^{-1} با دقت $\pm 0.1 \text{ m}$ انجام دهند (Benson *et al.*, 1998). عدم واکنش مناسب در مقابل مشکلات پیش‌بینی نشده در مزرعه استفاده از این شیوه را محدود کرده است. ترکیب روش هدایت براساس شاخص‌های محلی و مختصات مطلق تراکتور در مزرعه می‌تواند در بالا بردن دقت و اطمینان سامانه مؤثر باشد (Stentz *et al.*, 2002; Murakami *et al.*, 2008).

دخالت انسان در فرآیند کنترل خودکار و ایجاد یک سامانه نیمه خودکار نیز در راستای بالا بردن دقت و اطمینان سامانه کنترلی می‌باشد. انسان به‌عنوان ناظر یا مکمل می‌تواند خطاهای سامانه را جبران و یا نقاط هدف جدید را در حین عملیات تعریف کند. در تحقیقی با ترکیب سنسورهای RTK-GPS^۲، FOG^۳ و سنسور شیب دو محوره، زمینه استفاده از سامانه خودکار را فراهم کردند. آن‌ها نقش انسان را به‌عنوان تعیین‌کننده نقاط هدف در طول مسیر مشخص کردند. در حقیقت سامانه بین نقاط هدف به‌صورت خودکار هدایت می‌شود و کاربر با استفاده از دوربین نصب شده بر روی تراکتور نقش نظارتی خود را ایفا می‌کند (Will *et al.*, 1999). در تحقیق دیگری از تصاویر دریافتی از نقشه گوگل با فرکانس یک هرتز برای مشاهده موقعیت لحظه‌ای کودپخش‌کن استفاده می‌کردند و در مورد نقطه هدف بعدی تصمیم‌گیری می‌کردند (Murakami *et al.*, 2008).

محققینی نیز با استفاده از بستر شبکه‌های بی‌سیم، سامانه‌ای برای نظارت بر عملکرد چندین تراکتور طراحی کردند. کاربر می‌توانست وضعیت وسیله نقلیه مورد نظر را در نرم افزار MapObjects2.2 مشاهده کند. این نرم افزار قابلیت ایجاد نقشه مزرعه و مشاهده زنده موقعیت و جهت تراکتور را دارد. عملگر استفاده

- 1- Geomagnetic direction sensor
- 2- Real time kinematic
- 3- Fiber optic gyroscope

4- Teleoperation

شبکه بی‌سیم انتخاب می‌شود. در صورت محدودیت پهنای باند جهت جلوگیری از قطع و وصل تصاویر دریافتی و وقفه بیش از حد نمایش تصویر باید از سطح کیفیت تصویر کاسته شود. جزئیات مربوط به مدارهای الکترونیکی و شبکه بی‌سیم و نحوه انتخاب اجزاء در پژوهش مزیدی (۲۰۱۲) ارائه شده است.

ارزیابی پروژه

در ابتدا توان عملیاتی^۴ و زمان پاسخگویی^۵ شبکه بی‌سیم ایجاد شده، توسط نرم افزار Ixia QCheck مورد بررسی قرار گرفت. این نرم افزار قابلیت ارزیابی و نظارت بر انواع شبکه‌ها، تحت پروتکل‌های مختلف را دارا می‌باشد. اهمیت شبکه بی‌سیم به دلیل نحوه نمایش تصاویر و ارسال به‌موقع و صحیح دستورات می‌باشد. محدوده تحت پوشش شبکه نیز با تست مزرعه‌ای اندازه‌گیری شد. ارزیابی دوربین IP برای به‌دست آوردن بهترین تنظیمات جهت کاهش وقفه نمایش تصویر نیز انجام گرفت (Hill *et al.*, 2009). مسیر انتخاب شده جهت بررسی دقت هدایت براساس طرح‌های مرسوم در مزارع (Thuilot *et al.*, 2002) بود. همچنین برای بررسی دقیق‌تر متغیرهای تأثیرگذار در دقت هدایت، یک مسیر مستقیم انتخاب شد.

جایگاه دوربین به‌عنوان یک پارامتر تأثیرگذار در تشخیص موقعیت و مسیر در دو سطح در نظر گرفته شد. موقعیت ۱ در محل متناظر با سر راننده در حین رانندگی و موقعیت ۲ در جلوی تراکتور به فاصله ۰/۷۵ m از محور جلو قرار گرفت. سرعت چرخش میل فرمان به‌عنوان عامل تأثیرگذار در جبران انحراف و تغییر مسیر در دو سطح با حداکثر سرعت چرخش (۵۰ rpm) و یک سوم حداکثر انتخاب شد. سرعت پیشروی نیز به‌عنوان یک متغیر مستقل دیگر در سرعت ۰/۵۵ m s⁻¹ و ۱/۶۶ m s⁻¹ مورد ارزیابی قرار گرفت. تأثیر این متغیرها در یک طرح فاکتوریل در قالب کاملاً تصادفی بر روی دو سطح آسفالت و خاک با سه تکرار برای هر تیمار مورد ارزیابی قرار گرفتند. برای آماده‌سازی سطح خاک از یک دستگاه لولر و غلتک به‌ترتیب جهت تسطیح و فشردن خاک استفاده شد.

آزمایش هدایت در یک مسیر مستقیم ۵۰ متری با فواصل یک متری برای اندازه‌گیری انحراف عرضی انتخاب شد. مسیر مرجع توسط یک طناب کشیده شده بین شروع و انتهای مسیر تعیین شده و از پاشش مخلوط آب و رنگ در پشت تراکتور برای تعیین مسیر طی شده استفاده شد.

در ساخت سامانه هدایت از راه دور پرداخته می‌شود. جهت ارزیابی سامانه ساخته شده از جایگاه دوربین، سرعت چرخش میل فرمان و سرعت پیشروی در یک طرح فاکتوریل در قالب کاملاً تصادفی و از ریشه میانگین مربعات (RMSE^۱) انحراف عرضی تراکتور و فراوانی خروج از محدوده مجاز اطراف مسیر مرجع (N_{out}) به‌عنوان صفات مورد بررسی استفاده شد.

مواد و روش‌ها

طراحی سامانه هدایت از راه دور

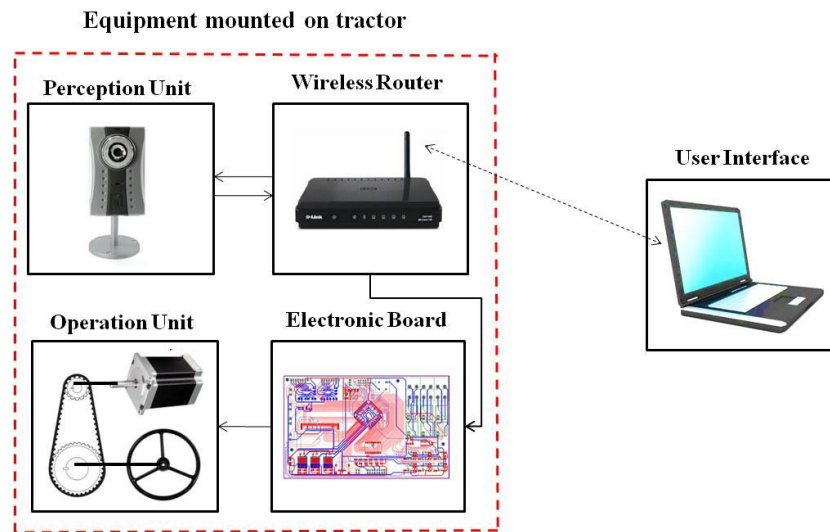
کاربر در مرکز کنترل به فاصله ۱۰ متری از نقطه شروع آزمون با استفاده از واسط کاربری با تراکتور بدون سرنشین در ارتباط می‌باشد (شکل ۱). واسط کاربری نرم افزار طراحی شده به زبان ویژوال سی شارپ می‌باشد که در یک رایانه قابل حمل پیاده‌سازی شد. مزیت استفاده از رایانه قابل حمل امکان نمایش تصویر دریافتی از دوربین مداربسته نصب شده روی تراکتور، امکان وارد کردن دستورات و تنظیمات کنترلی و در نهایت پشتیبانی از استاندارد 802,11 شبکه بی‌سیم می‌باشد.

با توجه به پروتکل‌های موجود در استاندارد 802,11، نوع n با سرعت انتقال اطلاعات و محدوده تحت پوشش بالا انتخاب شده و از یک روتر بی‌سیم^۲ DIR-601 ساخت شرکت D-Link (China) نصب شده بر روی تراکتور برای ایجاد شبکه بی‌سیم استفاده شد. دستورات تغییر جهت تراکتور در حین عملیات از طریق روتر بی‌سیم به برد کنترلی انتقال می‌یابد. این دستورات بعد از پردازش برای راه‌اندازی موتور انتخاب شده فرستاده می‌شود. انتخاب موتور الکتریکی به دلیل سرعت پاسخگویی بالاتر نسبت به عملگرهای هیدرولیکی بوده است که در تحقیق هدایت از راه دور کودپخش کن (Murakami *et al.*, 2008) به‌عنوان عامل اصلی انحراف بیش از حد از مسیر اعلام شد. با توجه به نیاز به چرخش دقیق و با گشتاور کافی از یک موتور پله‌ای هیبرید (TECO Industrial Co., DST86EM83A) استفاده شد. با استفاده از یک مکانیزم تسمه دندانه دار حرکت دورانی موتور پله‌ای با نسبت ۳ به ۱ به پولی جاسازی شده در زیر غریبک فرمان انتقال می‌یابد (شکل ۲).

جهت نمایش مسیر پیشروی از یک دوربین تحت شبکه^۳ (IP) با نام FCS-1030 ساخت شرکت Level-One (Taiwan) استفاده شد. تنظیمات دوربین شامل رنگ، وضوح، فریم بر ثانیه و کیفیت توسط کاربر در مرکز کنترل انتخاب شده و از طریق روتر بی‌سیم به دوربین اعمال شد. انتخاب کیفیت نهایی تصاویر دریافتی براساس پهنای باند

- 1- Root mean square error
- 2- Wireless router
- 3- Internet protocol

- 4- Throughput
- 5- Response time



شکل ۱- نحوه ارتباط و تعامل واحدهای مختلف سامانه عملیات از راه دور تراکتور در این تحقیق

Fig.1. Method of communication and interaction between different units of telesteering system of tractor in this study



شکل ۲- مکانیزم محرک فرمان توسط پولی و تسمه دندانه دار

Fig.2. Time belt mechanism of steering drive

سامانه و راننده آورده شده است. محدوده رنگی مستطیل شکل در دو طرف مسیر مرجع منطقه مجاز تعریف شده برای انحراف عرضی می باشد.

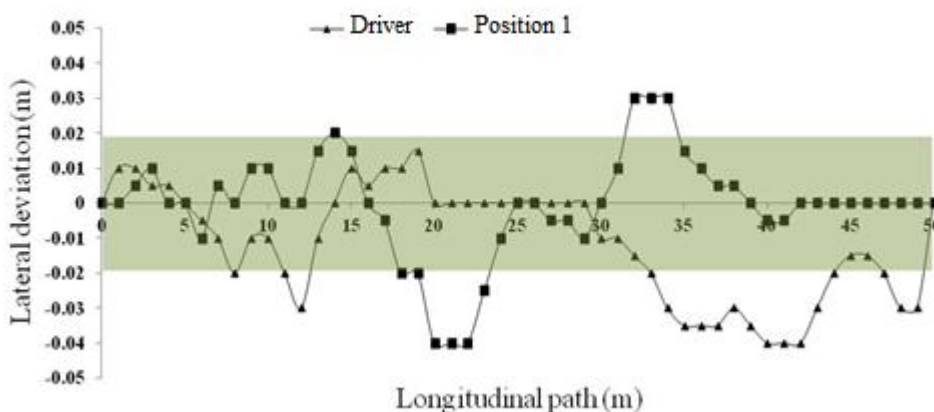
ارزیابی هدایت در هنگام دور زدن بر روی یک مسیر نیم دایره به شعاع حداقل دور زدن تراکتور با دو مسیر ۵ متری در دو طرف نیم دایره انجام شد. ابتدا کاربر مسیر رفت ۵ متری از یک طرف نیم دایره را شروع کرده و هنگام رسیدن به نیم دایره دستور چرخش اتوماتیک را ارسال کرد. چرخش اتوماتیک براساس الگوریتمی که کاربر قبلاً در مرحله کالیبراسیون سامانه به آن رسیده است انجام شد. در حقیقت موتور پله‌ای کوپل شده به فرمان یک سری چرخش‌های متوالی با سرعت، زمان و جهت مختلف را انجام داد تا چرخش ۱۸۰ درجه‌ای تراکتور اجرا شود. در انتهای چرخش دوباره کاربر وارد عملیات هدایت شد و ۵ متر مسیر مستقیم برگشت را هدایت کرد.

جهت باقی ماندن تراکتور در مسیر مستقیم از انطباق شاخص فلزی قرار گرفته در روی خط مرکزی تراکتور و جلوی دوربین با شاخص انتهای زمین که یک تخته با عرض ۰/۱۶ cm و ارتفاع ۱/۸ m بود، استفاده شد (شکل ۳). چون در این مرحله از تحقیق کنترل دیگر تجهیزات تراکتور (مثل کلاچ و ترمز) به صورت بدون سرنشین مد نظر نبود، از یک راننده کمکی جهت قرار دادن تراکتور در دنده برای شروع حرکت و متوقف کردن آن در انتهای مسیر استفاده شد.

علاوه بر RMSE می توان از فاکتور دیگری جهت مقایسه مسیر طی شده توسط راننده و سامانه هدایت از راه دور استفاده کرد. با شمردن تعداد نقاط خارج از یک محدوده مجاز در دو طرف مسیر مرجع می توان به فراوانی خروج تراکتور از محدوده مجاز پی برد. به عنوان مثال در شکل ۴ مقایسه‌ای بین دو تیمار از هدایت توسط



شکل ۳- موقعیت شاخص فلزی روبروی دوربین نسبت به تخته راهنما در تصویر
Fig.3. Position of metal index in front of camera and the index in image



شکل ۴- مقایسه فراوانی خروج از محدوده مجاز بین سامانه هدایت از راه دور و راننده
Fig.4. Frequency of out of range for driver and the telesteering system

نتایج و بحث

ارزیابی هدایت مستقیم

نتایج تجزیه واریانس هدایت در مسیر مستقیم بر روی سطوح آسفالت و خاک در جدول ۱ آمده است. در سطح آسفالت پارامتر سرعت پیشروی، سرعت چرخش میل فرمان، تأثیر متقابل سرعت پیشروی و سرعت چرخش میل فرمان و تأثیر متقابل سرعت پیشروی و موقعیت دوربین معنی‌دار شده است در حالی که در سطح خاک تنها سرعت پیشروی معنی‌دار شده است. این مسئله ناشی از سطح سفت آسفالت می‌باشد که نسبت به هرگونه تغییر واکنش سریعی را در تغییر جهت تراکتور مشاهده می‌کنیم در حالی که سطح خاک به دلیل شکل‌پذیر بودن تأثیر کمتری در منحرف شدن تراکتور از مسیر خود دارد. سرعت پیشروی به‌عنوان مهمترین عاملی که در تحقیقات گذشته (Aghkhani and Abbaspour-Fard, 2009; Will *et al.*,) (1999; Thuilot *et al.*, 2002) نیز گزارش شده محدودیت این سامانه می‌باشد.

ارزیابی شبکه بی سیم و دوربین

تأخیر ارسال اطلاعات شبکه بی سیم ۰/۰۱۵ s و تأخیر نمایش تصویر دریافتی از دوربین ۰/۱ s به دست آمد. مجموع این مقادیر تأخیر با توجه به سرعت‌های پیشروی مورد استفاده در عملیات‌های مختلف مزرعه‌ای مشکلی ایجاد نمی‌کند. توان عملیاتی شبکه ۴ برابر حداکثر پهنای باند مصرفی برای بالاترین کیفیت تصاویر ارسالی از دوربین IP به دست آمد که نشان دهنده عدم محدودیت برای نمایش با کیفیت بالا می‌باشد. محدوده تحت پوشش 240 ± 10 m برای ارسال بی سیم اطلاعات توسط روتر بی سیم نیز قابلیت اجرایی شدن این سامانه در مزارع با ابعاد کوچک تا متوسط که غالب قطعات زراعی در کشور را شامل می‌شود، مهیا می‌کند.

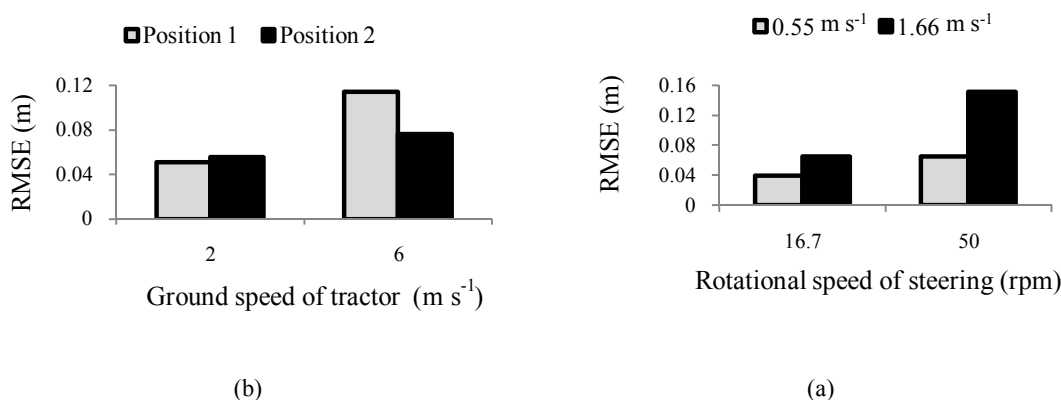
جدول ۱ - تجزیه واریانس اثر سرعت پیشروی تراکتور، سرعت چرخش میل فرمان و موقعیت دوربین بر RMSE
Table 1- Variance analysis of the effect of ground speed, steering speed and camera position on RMSE

منبع تغییر Source of variation	مجموع مربعات Sum of square		درجه آزادی df		میانگین مربعات Mean of square		F	
	آسفالت	خاک	آسفالت	خاک	آسفالت	خاک	آسفالت	خاک
	Asphalt	Soil	Asphalt	Soil	Asphalt	Soil	Asphalt	Soil
سرعت پیشروی (A) Ground speed	0.019	0.005	1	1	0.019	0.005	31.82**	14.85*
سرعت چرخش میل فرمان (B) Steering speed	0.019	0.000	1	1	0.019	0.000	31.90**	1.04 ^{ns}
موقعیت دوربین (C) Camera position	0.002	0.001	1	1	0.002	0.001	2.57 ^{ns}	3.69 ^{ns}
اثر متقابل A و B Interaction of A and B	0.006	0.000	1	1	0.006	0.000	9.56**	0.78 ^{ns}
اثر متقابل A و C Interaction of A and C	0.004	0.000	1	1	0.004	0.000	6.44*	0.91 ^{ns}
اثر متقابل B و C Interaction of B and C	0.002	0.001	1	1	0.002	0.001	3.73 ^{ns}	1.81 ^{ns}
اثر متقابل A، B و C Interaction of A, B and C	0.001	0.000	1	1	0.001	0.000	1.17 ^{ns}	0.00 ^{ns}
اشتباه Error	0.009	0.005	16	16	0.001	0.000		
کل Total	0.215	0.045	24	24				

* و ** به ترتیب معنی دار در سطح احتمال ۵ و ۱ درصد، ^{ns} غیر معنی دار
 **, * Significant at 5% and 1% of probability levels, respectively, ^{ns} Non. Significant

واکنش‌های سریع‌تری از خودش نشان بدهد که این مسئله علاوه بر مهارت کاربر به تکرار بیشتر آزمون‌ها نیز بستگی دارد. موقعیت دوربین نیز در سرعت‌های بالا اثرگذار می‌باشد. همان‌طور که در شکل ۵ b مشاهده می‌شود موقعیت ۲ (جلوی تراکتور) خطای کمتری نسبت به موقعیت ۱ دارد و این به علت درک سریع‌تر انحراف از مسیر توسط کاربر در این نقطه از زاویه دید می‌باشد.

معنی‌دار شدن اثر متقابل سرعت پیشروی و سرعت چرخش میل فرمان بر روی سطح آسفالت و اثر متقابل سرعت پیشروی و موقعیت دوربین در شکل ۵ نشان داده شده است. با افزایش سرعت پیشروی و سرعت چرخش میل فرمان مقدار مسافت طی شده به ازای یک انحراف ثابت افزایش پیدا می‌کند. علت این رخداد را می‌توان به رفتار نسبتاً ثابت کاربر در فشردن کلیدهای تغییر جهت دانست. در حقیقت کاربر باید با افزایش در سرعت پیشروی و سرعت چرخش میل فرمان،



شکل ۵ - (a) تأثیر سرعت چرخش میل فرمان بر روی RMSE، (b) تأثیر موقعیت دوربین بر روی RMSE
Fig. 5. (a) Effect of rotation speed of steering column on RMSE, (b) Effect of camera position on RMSE

مقایسه نتایج سامانه با راننده

دور افزایش یافته است. علت نتایج تقریباً مشابه سامانه هدایت از راه دور و راننده در سرعت پیشروی کم، امکان فهم سریع‌تر و بهتر انحراف و اقدام برای جبران آن می‌باشد درحالی‌که در سرعت‌های بالاتر راننده برتری درک نیروهای مقاوم ناشی از سطح به چرخ‌ها و سپس میل فرمان را دارد و می‌تواند علاوه بر بینایی، لحظه منحرف شدن را با دستان خود درک بکند.

با توجه به نتایج به‌دست آمده برای RMSE انحراف عرضی (جدول ۲)، در سرعت 0.55 m s^{-1} برای هر دو سطح خاک و آسفالت، عملکرد سامانه نسبت به هدایت توسط راننده مطلوب‌تر بوده است. در سرعت 1.66 m s^{-1} تفاوت چندانی بین RMSE انحراف عرضی مسیر طی شده توسط راننده نسبت به سرعت 0.55 m s^{-1} مشاهده نمی‌شود در حالی که با افزایش سرعت، RMSE سامانه کنترل از راه

جدول ۲- نتایج آزمایش سامانه هدایت از راه دور و راننده در مسیر مستقیم
Table 2- Result of telesteering system and driver in direct route

نقطه دید Point of view	سرعت پیشروی (m s^{-1}) Ground speed	سرعت چرخش میل فرمان (rpm) Steering speed	بیشینه انحراف عرضی* (m) Maximum deviation		RMSE (m)		N _{out}	
			آسفالت Asphalt	خاک Soil	آسفالت Asphalt	خاک Soil	آسفالت Asphalt	خاک Soil
			موقعیت ۱ دوربین Position 1	0.55	16.7 50	0.080 0.120	0.070 0.013	0.030 0.064
	1.66	16.7 50	0.270 0.470	0.120 0.150	0.070 0.186	0.050 0.072	42 48	32 37
موقعیت ۲ دوربین Position 2	0.55	16.7 50	0.130 0.135	0.120 0.050	0.048 0.065	0.024 0.014	30 38	6 3
	1.66	16.7 50	0.160 0.210	0.130 0.110	0.059 0.115	0.038 0.043	37 46	3 5
راننده Driver	0.55	-	0.125	0.050	0.035	0.022	23	17
	1.66	-	0.170	0.100	0.036	0.022	25	14

* As absolute numbers

* با در نظر گرفتن قدر مطلق اعداد

جدول ۳- تجزیه واریانس اثر سرعت پیشروی تراکتور، سرعت چرخش میل فرمان و موقعیت دوربین بر N_{out} در سطح خاک

Table 3- Variance analysis of the effect of ground speed, steering speed and camera position on N_{out} of soil surface

منبع متغیر Source of variation	مجموع مربعات Sum of square	درجه آزادی df	میانگین مربعات Mean of square	F
سرعت پیشروی (A) Ground speed (A)	532.042	1	532.042	9.725*
سرعت چرخش میل فرمان (B) steering speed	18.375	1	18.375	0.336 ^{ns}
موقعیت دوربین (C) Camera position (C)	2542.042	1	2542.042	46.465*
اثر متقابل A و B Interaction of A and B	22.042	1	22.042	0.403 ^{ns}
اثر متقابل A و C Interaction of A and C	610.042	1	610.042	11.151*
اثر متقابل B و C Interaction of B and C	26.042	1	26.042	0.476*
اثر متقابل A, B و C Interaction of A, B and C	1.042	1	1.042	0.019 ^{ns}
اشتباه Error	875.333	16	54.708	
کل Total	9529	24		

* معنی‌دار در سطح احتمال ۱ درصد، ^{ns} غیرمعنی‌دار

* Significant at 1% of probability levels, ^{ns} Non. Significant

کنترل جهت تراکتور توسط کاربر می باشد. هرچقدر تنظیمات دور زدن خودکار با دقت بیشتری صورت بگیرد نقطه شروع بهتری برای کاربر مهیا می شود.

نتیجه گیری

با توجه به ابعاد مزارع ایران، اشتغال رانندگان تراکتور و پیچیدگی و هزینه بالای سامانه های خودکار، یک سامانه عملیات از راه دور پیشنهاد شد که قابلیت تبدیل به یک سامانه نیمه خودکار را دارد. نتایج ارزیابی سامانه برای دو سطح آسفالت و خاک مورد بررسی قرار گرفت. پایداری سامانه در سطح خاک نسبت به تغییر سطح متغیرها بیشتر بود و برای RMSE انحراف عرضی تنها سرعت پیشروی معنی دار شد. مشکل ناشی از سرعت بالا همانند تحقیقات دیگر در این تحقیق نیز مشاهده شد. براساس نتایج به دست آمده از تأثیر متغیرها بر روی RMSE و N_{out} بهترین موقعیت دوربین جلوی تراکتور می باشد که نسبت به موقعیت عقب تر انحراف از مسیر را سریع تر نشان می دهد.

با توجه به نتایج جدول تجزیه واریانس (جدول ۳) تأثیر متغیرهای انتخاب شده بر روی N_{out} نقش موقعیت استقرار دوربین بیشتر از متغیرهای دیگر بوده است. عملکرد راننده بر روی سطح آسفالت نسبت به سامانه هدایت از راه دور در تمامی تیمارها مطلوب تر بوده است در حالی که در سطح خاک برای موقعیت ۲ دوربین همانند نتایج تجزیه واریانس بر روی RMSE انحراف عرضی (جدول ۱)، عملکرد سامانه مطلوب تر از راننده می باشد.

نتایج دور زدن

نتایج دور زدن تراکتور بر روی سطح آسفالت در جدول ۴ نشان داده شده است. با توجه به اینکه مسیر دور زدن برای ما اولویت نداشته بلکه عملیات صحیح دور زدن بدون خارج شدن بیش از حد از شعاع حداقل دور زدن و ورود مناسب به خط بعدی مهم بوده است، نتایج به دست آمده با حداکثر انحراف ۴۷ cm مطلوب می باشد. با ترسیم مسیر طی شده توسط تراکتور برای دور زدن به مقدار شعاع حداقل می توان دریافت که در تمامی تکرارها حداکثر انحراف از مسیر دور زدن در انتهای نیم دایره، مکانی که هدایت خودکار اتمام می پذیرد، رخ می دهد (شکل ۶). علت این رخداد در دست گرفتن

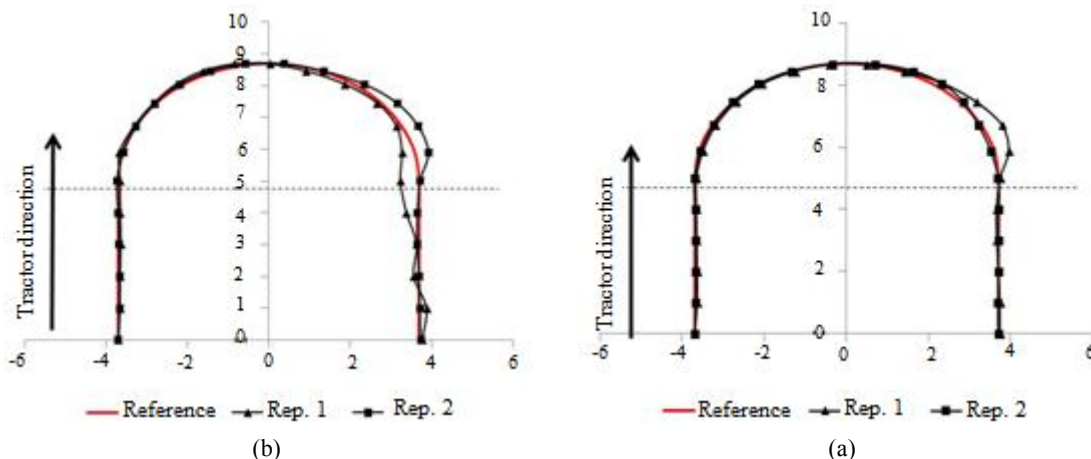
جدول ۴- نتایج دور زدن بر روی سطح آسفالت

Table 4- Result of turning on asphalt surface

ریشه میانگین مربعات (m) RMSE	بیشینه انحراف* (m) Maximum deviation*	سرعت پیشروی ($m s^{-1}$) Ground speed
0.134	0.50	0.27
0.190	0.47	0.55

* As absolute numbers

* با در نظر گرفتن قدر مطلق اعداد



شکل ۶- مقایسه مسیرهای طی شده در دو تکرار: (a) $1 m s^{-1}$ ، (b) $2 m s^{-1}$

Fig.6. Comparison of the derived route with two replications; (a) $1 m s^{-1}$, (b) $2 m s^{-1}$

از محیط عملیات نسبت داد در حالی که راننده علاوه بر مشاهده مسیر و نقطه هدف، نیروهای مقاوم ناشی از عکس‌العمل خاک بر چرخ‌ها را از طریق غربیلک فرمان احساس می‌کند و با هر گونه تغییر در جهت و یا سر خوردن تراکتور، آگاه می‌شود. در نتیجه توصیه می‌شود برای بالا بردن دقت کاربر از سنسورهای نیرو نصب شده بر روی غربیلک فرمان برای ارسال عکس‌العمل خاک به چرخ‌های تراکتور در پروژه‌های آتی استفاده گردد.

با مقایسه نتایج هدایت از راه دور و راننده می‌توان دریافت که در سطح خاک برای سرعت $0/55 \text{ m s}^{-1}$ تیمار موقعیت ۲ دوربین و سرعت چرخش ۵۰ rpm برای میل فرمان با RMSE برابر $0/14 \text{ m}$ بهترین دقت را داشته است. دقت راننده در سرعت $1/66 \text{ m s}^{-1}$ تغییر چندانی نسبت به سرعت $0/55 \text{ m s}^{-1}$ نداشته در حالی که سامانه عملیات از دور با افت عملکرد همراه بوده است. علت این امر را می‌توان مربوط به اتکا سامانه هدایت از راه دور تنها به تصویر دریافتی

منابع

1. Aghkhani, M. H., and M. H. Abbaspour-Fard. 2009. Automatic off-road vehicle steering system with a surface laid cable: Concept and preliminary tests. *Biosystems Engineering* 103: 265-270.
2. Benson E. R., T. S. Stombaugh, N. Noguchi, J. D. Will, and J. F. Reid. 1998. An evaluation of a geomagnetic direction sensor for vehicle guidance in precision agriculture applications. An ASAE Paper Meeting Presentation, Paper No. 983203. UIIU 90-7011.
3. Jianjun, Z., C. Min'Gang, Z. Man, and L. Su. 2008. Remote monitoring and automatic navigation system for agricultural vehicles based on WLAN. 4th International Wireless Communications, Networking and Mobile Computing Conference. Dalian, China.
4. Hasan Beygi Bidgoli, S. R., B. Ghobadian, P. Nassiri, and N. Kamalian. 2005. Investigation, analysis and presentation of prediction models of a power tiller noise, pulling a trailer at rural asphalt road. *Science and Technology of Agriculture and Natural Resources* 8: 225-240.
5. Hill, R., C. Madden, A. Hengel, H. Detmold, and A. Dick. 2009. Measuring latency for video surveillance systems. *Digital Image Computing: Techniques and Applications Conference*. Melbourne, VIC.
6. Keicher, R., and H. Seufert. 2000. Automatic guidance for agricultural vehicles in Europe. *Computers and Electronics in Agriculture* 25: 169-194.
7. Kiani, S., S. Kamgar, and M. H. Raoufat. 2012. Machine vision and soil trace-based guidance-assistance system for farm tractors in soil preparation operations. *Agricultural Science* 4 (7): 1-12.
8. Kirk, T. G. 1974. A furrow-following tractor guidance system. Faculty of Engineering. Mechanical Engineering. Saskatchewan University. Canada.
9. Maleki, A., S. S. Mohtasebi, A. Akram, and V. Esfahanian. 2008. Effect of driver mass on his health and comfort, and permissible riding hours/day in three commonly used tractors in Iran. *Journal of Science and Technology of Agriculture and Natural Resources*, Water and Soil Science 12: 213-221.
10. Mazidi, M. 2012. Design, construction and evaluation of a telesteering system of a tractor. Faculty of agricultural machinery. Ferdowsi University of Mashhad. Mashhad, Iran.
11. Murakami, N., A. Ito, J. D. Will, M. Steffen, K. Inoue, K. Kita, and S. Miyaura. 2008. Development of a teleoperation system for agricultural vehicles. *Computers and Electronics in Agriculture* 63: 81-88.
12. Nishiwaki, K., T. Togashi, and K. Amaha. 2002. Vision-based speed and yaw angle measurement system. *Automation Technology for Off-Road Equipment Conference*. Chicago, Illinois, USA.
13. Shen, B., and T. Satow. 2012. Development of an automatic furrow guidance system for tractor-mounted implements: outline and basic characteristic of the hydraulic control system. *Transactions of the ASABE* 55: 333-339.
14. Stentz, A., C. Dima, C. Wellington, H. Herman, and D. Stager. 2002. A system for semi-utonomous tractor operations. *Autonomous Robots* 13: 87-104.
15. Thuilot, B., C. Cariou, P. Martinet, and M. Berducat. 2002. Automatic guidance of a farm tractor relying on a single CP-DGPS. *Autonomous Robots* 13 (1): 53-71.
16. Will, J. D., D. D. Moore, E. N. Viall, J. F. Reid, and Q. Zhang. 1999. Wireless networking for control and automation of off-road equipment. An ASAE Meeting Presentation. Paper No. 993183. UIIU-ENG-99-7031.
17. Willrodt, F. L. 1924. Steering attachment for tractors in Patent US, ed.

18. Zhang, F., Y. Ying, Q. Zhang, and B. Shin. 2006. Vision-based position system for agricultural vehicle using extended kalman filter. ASAE Annual Meeting. Boston, USA.