

## طراحی، ساخت و ارزیابی سامانه دیجیتالی اندازه‌گیری لغزش و سرعت پیشروی مناسب برای تراکتورهای دو چرخ محرک موجود در کشور

مهدی خسروی<sup>۱\*</sup> - محمد حسین عباسپورفرد<sup>۲</sup> - محمد حسین آق‌خانی<sup>۳</sup>

تاریخ دریافت: ۹۰/۴/۸

تاریخ پذیرش: ۹۰/۱۰/۴

### چکیده

سرعت پیشروی و لغزش پارامترهای تعیین کننده بازده کشتی در تراکتور هستند. اغلب تراکتورهای موجود به دلیل عدم وجود استاندارد در زمینه تجهیز تراکتورها به وسایل اندازه‌گیری، فاقد ابزاری جهت اندازه‌گیری و نمایش لغزش و سرعت پیشروی هستند. در این پژوهش سامانه‌ای جهت اندازه‌گیری توام لغزش و سرعت پیشروی در تراکتورهای دوچرخ محرک طراحی و پس از ساخت، ارزیابی گردید. برای تعیین سرعت پیشروی واقعی و تئوری تراکتور از چهار انکودر چرخان برای اندازه‌گیری همزمان چرخش چرخ‌های جلو و عقب تراکتور استفاده شد. برای تعیین لغزش و سرعت پیشروی برنامه‌ای در یک میکروکنترلر ATmega16PU با استفاده از خروجی انکودرها تدوین گردید، که قادر به نمایش دیجیتالی مقادیر اندازه‌گیری شده بود. میکروکنترلر به گونه‌ای برنامه‌ریزی شد که اثر سرش (لغزیدن) چرخ‌های جلوی تراکتور بر روی مقادیر اندازه‌گیری شده حذف شود. در مرحله ارزیابی لغزش و سرعت پیشروی اندازه‌گیری شده به وسیله سامانه با مقادیر محاسبه شده لغزش و سرعت پیشروی به روش متعارف، مقایسه گردیدند. نتایج ارزیابی سامانه نشان داد که متوسط بیشینه اختلاف بین مقادیر سرعت پیشروی و لغزش اندازه‌گیری شده توسط سامانه با مقادیر متناظر محاسبه شده به روش متعارف، در همه شرایط ارزیابی (بر روی آسفالت و در مزرعه) به ترتیب برابر با  $0/2$  و  $2/4$  درصد بود. سامانه با تغییرات اندک قابلیت کنترل لغزش در محدوده بیشینه بازده کشت و نصب بر روی انواع تراکتور دوچرخ محرک را دارا می‌باشد.

واژه‌های کلیدی: انکودر چرخان، لغزش، سرعت پیشروی، میکروکنترلر

### مقدمه

هایی به بازار عرضه می‌شوند که بسیاری از پارامترهای عملکردی مربوط بخود را اندازه‌گیری و کنترل می‌کنند، اما به دلیل قیمت بالایی که دارند بسیاری از کشاورزان ایرانی که بصورت خرده‌پا هستند توانایی خرید آن‌ها را ندارند. با این وجود می‌توان با بهینه‌سازی و تجهیز وسایل موجود به سامانه‌های مختلف کنترلی، عملکرد مزرعه‌ای تراکتورها و ادوات کشاورزی را بهبود داده و از این طریق گامی مؤثر در مسیر تکامل مکانیزاسیون کشاورزی در شرایط جدید کشور برداشت. سرعت پیشروی و لغزش تراکتور از پارامترهای مهم در فرایندهای آزمون، ارزیابی و بهینه‌سازی عملکرد مزرعه‌ای تراکتور و ادوات کشاورزی هستند که باید اندازه‌گیری شوند. به‌عنوان مثال برای محاسبه توان لازم برای کشیدن ادوات کشاورزی، دانستن سرعت پیشروی و برای به‌دست آوردن بهترین بازده کشتی، دانستن لغزش لازم است (Behroozi-Lar., 1989).

امروزه فن‌آوری‌های مختلفی مانند استفاده از انواع حسگرها و سامانه موقعیت یاب جهانی (GPS) برای اندازه‌گیری سرعت پیشروی

با توجه به محدود بودن منابع سوخت‌های فسیلی و مکانیزه شدن عملیات کشاورزی، توسعه ماشین‌آلات در جهت استفاده از سوخت‌های غیرفسیلی، برای دسترسی به بازده بالاتر و مصرف سوخت کم‌تر مهم و ضروری می‌نماید. از طرفی با توجه به اجرای طرح هدفمندکردن یارانه‌ها و واقعی شدن قیمت حامل‌های انرژی، فشار ناشی از آن به بخش کشاورزی جدی است. در نتیجه بهبود راندمان مصرف انرژی در فعالیت‌های مختلف کشاورزی اجتناب ناپذیر می‌باشد. تراکتورها از منابع مهم قدرت در کشاورزی مکانیزه می‌باشند که بخش عمده‌ای از انرژی مصرفی در بخش کشاورزی را به خود اختصاص می‌دهند. اگرچه امروزه در سطح جهانی تراکتورها و ماشین

۱، ۲ و ۳- به ترتیب دانش‌آموخته کارشناسی ارشد مکانیک ماشین‌های کشاورزی و دانشیاران گروه مهندسی ماشین‌های کشاورزی، دانشگاه فردوسی مشهد  
(\*) نویسنده مسئول: (Email: m\_khohaf@yahoo.com)

جلو در تراکتورهای دو چرخ محرک (Beppler and Shaw, 1980; James et al., 1981; Raheman and Jha., 2007; Parnav et al., 2010). در این روش اندازه‌گیری سرعت واقعی به شرایط خاک، نوع خاک‌ورزی و همچنین سرش در چرخ‌های جلو بستگی دارد. بیشترین خطای مشاهده شده در نتایج اندازه‌گیری سرعت واقعی در این روش ۲ درصد گزارش شده است (James et al., 1981).

۳- اندازه‌گیری مستقیم سرعت به‌وسیله حسگرهای راداری که با اثر داپلر<sup>۳</sup> کار می‌کنند و یا از طریق تعیین موقعیت لحظه‌ای وسیله با استفاده از سیستم موقعیت یاب جهانی. (Tsuha et al., 1982; Turner., 1993; Keskin and Sait., 2006; Chosa et al., 2007). استفاده از حسگرهای راداری و گیرنده‌های GPS دقت بالایی در اندازه‌گیری سرعت واقعی فراهم می‌کنند، اما قیمت بالای آن‌ها از دامنه کاربردشان کاسته است.

بررسی منابع نشان می‌دهد که اندازه‌گیری سرعت واقعی از طریق چرخ‌های جلو به دلیل توزیع وزن تراکتور و شناوری بهتر، در همه شرایط کاری تراکتور، دقت بالاتری نسبت به چرخ پنجم دارد (James et al., 1981).

استفاده از گیرنده‌های GPS، اگر چه از توانایی بالقوه‌ای در اندازه‌گیری سرعت واقعی تراکتور برخوردارند، ولی به دلیل هزینه نسبتاً بالا و محدودیت‌هایی که برای کشورهایی مثل ایران از طرف مسئولین این سامانه ایجاد می‌شود، عموماً دارای خطای زیادی است که برای این چنین کاربردی قابل قبول نبوده و حتی در برخی از شرایط غیرقابل استفاده است. حسگرهای راداری از دقتی متناسب با هزینه اولیه برخوردار نبوده و قادر به نشان دادن سرعت‌های کمتر از  $0.5 \text{ kmh}^{-1}$  نیز نمی‌باشند. این حسگرها به خصوص در زمین‌هایی که حاوی بقایای گیاهی بلندتر از ۳۵ Cm هستند و هنگام وزش باد، از خطای زیادی در اندازه‌گیری سرعت واقعی برخوردار هستند (Turner., 1993).

در مزرعه لغزش اغلب با شمارش دوران چرخ‌های تراکتور و محاسبات تئوری اندازه‌گیری می‌شود. از متداولترین روش‌های محاسبه لغزش در مزرعه، روش ۱۰ دور است که در سال ۱۹۸۳ توسط مؤسسه انرژی و یومینگ در غالب این رابطه ارائه شد (Turner, 1993):

$$S = \left[ \frac{10 - n}{10} \right] \times 100 \quad (2)$$

در این رابطه مسافتی که تراکتور تحت بار به ازای چرخش ۱۰ دور چرخ محرک می‌پیماید، علامت گذاری می‌شود. سپس تعداد دوران

و لغزش توسعه و کاربرد پیدا کرده اند (Tompkins et al., 1988; Raheman and Jha., 2007; Parnav et al., 2010). با توجه به نازل بودن قیمت حسگرها در قیاس با دستگاه‌های گیرنده GPS و از طرفی محدودیت دسترسی به این سامانه در مناطق مختلف، کاربرد حسگرها برای اندازه‌گیری سرعت پیشروی و لغزش بیشتر شده است.

اندازه‌گیری دقیق لغزش در شرایط کاری تراکتور در مزرعه، کار آسانی نیست. علی‌رغم وجود ابزارهای اندازه‌گیری لغزش، بسیاری از تراکتورهایی که وارد بازار کشور می‌شوند و تمامی مدل‌های قدیمی موجود، فاقد سیستمی برای اندازه‌گیری و نمایش لغزش هستند. بر این اساس در شرایط کاری تراکتور در مزرعه، لغزش اغلب به صورت دستی اندازه‌گیری و یا تخمین زده می‌شود که برای عملیات دقیق کشاورزی و امور تحقیقاتی مناسب نیست (Turner, 1993). از آنجا که اندازه‌گیری لغزش به طور مستقیم امکان پذیر نیست، لغزش را با اندازه‌گیری سرعت یا مسافت پیموده شده در دو حالت تحت بار و بدون بار می‌توان محاسبه نمود. معادله‌ای که لغزش (S) را بر حسب درصد بیان کند به شرح زیر است:

$$S = \left[ 1 - \frac{U_0}{U_1} \right] \times 100 \quad (1)$$

در این رابطه  $U_0$  و  $U_1$  به ترتیب مقدار اندازه‌گیری شده (سرعت یا مسافت) تحت بار و بدون بار است. اگر سرعت‌ها اندازه‌گیری شوند، مقدار اندازه‌گیری شده تحت بار همان سرعت پیشروی واقعی در حین استفاده از نیروی مالبندی تراکتور و مقدار اندازه‌گیری شده بدون بار همان سرعت تئوری حاصل از دوران چرخ‌های محرک تراکتور خواهد بود. در حالتی که مسافت‌های پیموده شده اندازه‌گیری می‌شوند، صورت معادله فاصله پیموده شده تحت بار و مخرج آن فاصله پیموده شده بدون بار است (Paulsen and Zebra, 1971).

لغزش همچنین از طریق اندازه‌گیری سرعت دورانی و شعاع غلشی چرخ‌ها قابل محاسبه است. در تراکتورهای دو چرخ محرک سرعت تئوری با اندازه‌گیری تعداد دوران چرخ‌های محرک و سرعت واقعی از یکی از روش‌های زیر محاسبه می‌شوند:

۱- اندازه‌گیری مقدار دوران چرخ کمکی (چرخ پنجم) (Luth et al., 1978; Bedri et al., 1981; Tompkins et al., 1988). اندازه‌گیری سرعت واقعی از این روش به نوع خاک و سرش<sup>۲</sup> در چرخ پنجم وابسته است و باید شناوری چرخ در ناهمواری‌های زمین فراهم گردد.

۲- اندازه‌گیری دوران یکی از چرخ‌های متحرک تراکتور مثل چرخ

یک چرخ دندانه‌دار یا یک صفحه مدور شفاف<sup>۲</sup> حاوی خطوط تاریک<sup>۳</sup> است. رزولوشن<sup>۴</sup> حسگر به تعداد دندانه‌های چرخ دندانه‌دار یا تعداد خطوط تاریک صفحه شفاف وابسته است. این حسگرها برای هر دور چرخش چرخ ۳۶۰ پالس تولید می‌کنند.

سرعت تئوری چرخ‌های چپ و راست تراکتور از طریق پالس دریافتی از انکودرهای هر کدام از چرخ‌های محرک طرف چپ و راست تراکتور و محیط غلتشی همان چرخ (با توجه به مشخصات تایر مورد استفاده در چرخ) محاسبه می‌شود. سرعت تئوری تراکتور نیز از حاصل ضرب میانگین پالس‌های دریافتی از انکودرهای چرخ‌های عقب در محیط غلتشی همان چرخ‌ها تعیین می‌گردد. سرعت واقعی تراکتور از حاصل ضرب میانگین پالس‌های دریافتی از انکودرهای چرخ‌های جلو در محیط غلتشی همان چرخ‌ها (با توجه به مشخصات تایر مورد استفاده در چرخ) محاسبه می‌شود.

### تدوین برنامه محاسباتی میکروکنترلر

میکروکنترلرها در واقع نوع پیشرفته‌ای از ریزپردازنده‌ها<sup>۵</sup> هستند که می‌توان با دادن و نوشتن دستورات مناسب از آن‌ها خروجی‌های مطلوب گرفت. به بیان دیگر میکروکنترلرها، کنترل کننده‌های قابل برنامه‌ریزی هستند. همه ریز پردازنده‌ها سه عمل اساسی انتقال اطلاعات، محاسبه و منطق و تصمیم‌گیری را انجام می‌دهند. در این پژوهش از یک میکروکنترلر ATMEGA16PU ساخت شرکت Atmel استفاده شده است. از محاسن آن می‌توان به سرعت پردازش بالا و توان مصرفی کم، حافظه برنامه و داده غیر فرار و قابلیت بالای نوشتن و پاک کردن حافظه داخلی اشاره نمود. برنامه نویسی میکروکنترلر به زبان بیسیک انجام شد و با استفاده از کامپایلر بسکام<sup>۶</sup> به میکروکنترلر منتقل شد. خروجی انکودرها به صورت دیجیتالی به جعبه حاوی میکروکنترلر و نمایشگر ارسال می‌شود و بدین ترتیب لغزش و سرعت پیشروی محاسبه شده بر روی نمایشگر نشان داده می‌شود.

تعداد دور چرخ‌های جلو و عقب تراکتور بر مبنای پالس‌های ارسالی از انکودرهای چرخان در مدت زمان T ثانیه به ترتیب از روابط ۳ و ۴ محاسبه می‌شوند:

$$N_{Fi} = \frac{E_{Fi}}{360 \times T}; i = l, r \quad (3)$$

چرخ محرک تراکتور در حالت بدون بار ( $n$ ) برای پیمودن همان مسافت شمرده و لغزش محاسبه می‌شود.

هدف از انجام این پژوهش طراحی و ساخت دستگاه اندازه‌گیری است که لغزش و سرعت را در تراکتورهای دو چرخ محرک با دقت قابل قبولی نمایش دهد، قابلیت کنترل لغزش در محدوده بیشینه بازده کششی را داشته باشد، هزینه ساخت و تعمیر و نگهداری آن در حد قابل قبولی بوده و بر روی تراکتورهای متداول کشور قابل نصب باشد. در این پژوهش برای اندازه‌گیری سرعت واقعی از دو حسگر بر روی چرخ‌های جلوی تراکتور استفاده شد و میکروکنترلر به گونه‌ای برنامه‌ریزی گردید که سرش این چرخ‌ها (سرعت دورانی صفر) در محاسبات سرعت واقعی بی‌اثر باشد. علاوه بر این با نصب دو حسگر بر روی چرخ‌های محرک، سرعت تئوری نیز برای هر چرخ محرک تراکتور مجزا اندازه‌گیری شد، تا لغزش چرخ‌های محرک تراکتور جداگانه اندازه‌گیری و نمایش داده شوند.

### مواد و روش‌ها

در سامانه ساخته شده سرعت پیشروی تئوری تراکتور (سرعت پیشروی متناظر با سرعت دورانی چرخ‌های محرک) از روی میانگین سرعت دورانی چرخ‌های محرک (عقب تراکتور) و سرعت پیشروی واقعی تراکتور از روی میانگین سرعت دورانی چرخ‌های جلوی تراکتور محاسبه می‌گردد. به این منظور سیگنال‌های ارسالی از حسگرهای (انکودر شافت) روی هر چهار چرخ تراکتور به طور هم‌زمان به میکروکنترلر ارسال می‌شود. برای اندازه‌گیری و نمایش لغزش چرخ‌های محرک چپ و راست تراکتور، سرعت تئوری هر کدام از چرخ‌های محرک به طور جداگانه از طریق سرعت دورانی همان چرخ محاسبه می‌شود. علاوه بر لغزش چرخ‌های چپ و راست، میانگین آن‌ها (بر حسب درصد) به همراه سرعت پیشروی تراکتور بر حسب  $\text{kmh}^{-1}$  بر روی نمایشگر سامانه که به صورت مجتمع با یک صفحه کلید ساخته شده است (شکل ۱)، نمایش داده می‌شوند.

### انتخاب انکودر و نصب آن

برای اندازه‌گیری سرعت دورانی چرخ‌های تراکتور ۴ انکودر نوری چرخان<sup>۱</sup> مدل E50S8-360-T-24 ساخت کارخانه Autonics کره جنوبی انتخاب و بر روی بدنه تراکتور نصب شدند (شکل ۲). انکودرهای مورد استفاده دارای فرستنده، چرخ مبدل و گیرنده هستند که با قطع و وصل پرتو نوری ارسالی از فرستنده توسط چرخ مبدل خروجی به صورت آنالوگ و نهایتاً دیجیتال تولید می‌کنند. چرخ مبدل

1- Rotary Encoder

2- Transparent Disk

3- Opaque Stripes

4- Resolution

5- Micro Processor

6- Bascom

$$N_{Ri} = \frac{E_{Ri}}{360 \times T}; i = l, r \quad (4)$$



شکل ۱- نمایشگر سامانه و محل نصب آن بر روی داشبورد تراکتور

Fig. 1. Overall view of measuring system and the location of display box on tractor's dashboard



شکل ۲- استقرار انکودرهای چرخان بر روی تراکتور: (۱) محل نصب انکودرهای چرخ‌های عقب، (۲) محل نصب انکودرهای چرخ‌های جلو

Fig. 2. Installation of rotary encoders on tractor: (1) position of rear wheel encoders, (2) Front wheel encoders

$$V_r = R_r(N_{Rr} + N_{Fr}) \quad (6)$$

$$V_l = R_l(N_{Rl} + N_{Fl}) \quad (7)$$

لغزش‌های چرخ سمت چپ (%، راست (%، و لغزش میانگین (%)  
از روابط ۸ و ۹ محاسبه می‌شوند:

$$S_r = \left[ 1 - \left( \frac{V_r}{V_m} \right) \right] \times 100; i = l, r \quad (8)$$

$$S_{avr} = \left[ 1 - \left( \frac{V_{av}}{V} \right) \right] \times 100 \quad (9)$$

در روابط فوق  $E$  و  $N$  به ترتیب بیانگر تعداد دور و تعداد پالس‌های دریافت شده از چرخ مورد نظر، اندیس‌های  $R$  و  $F$  متناظر با چرخ‌های جلو و عقب و اندیس‌های  $l$  و  $r$  متناظر با چرخ‌های سمت راست و چپ می‌باشند.

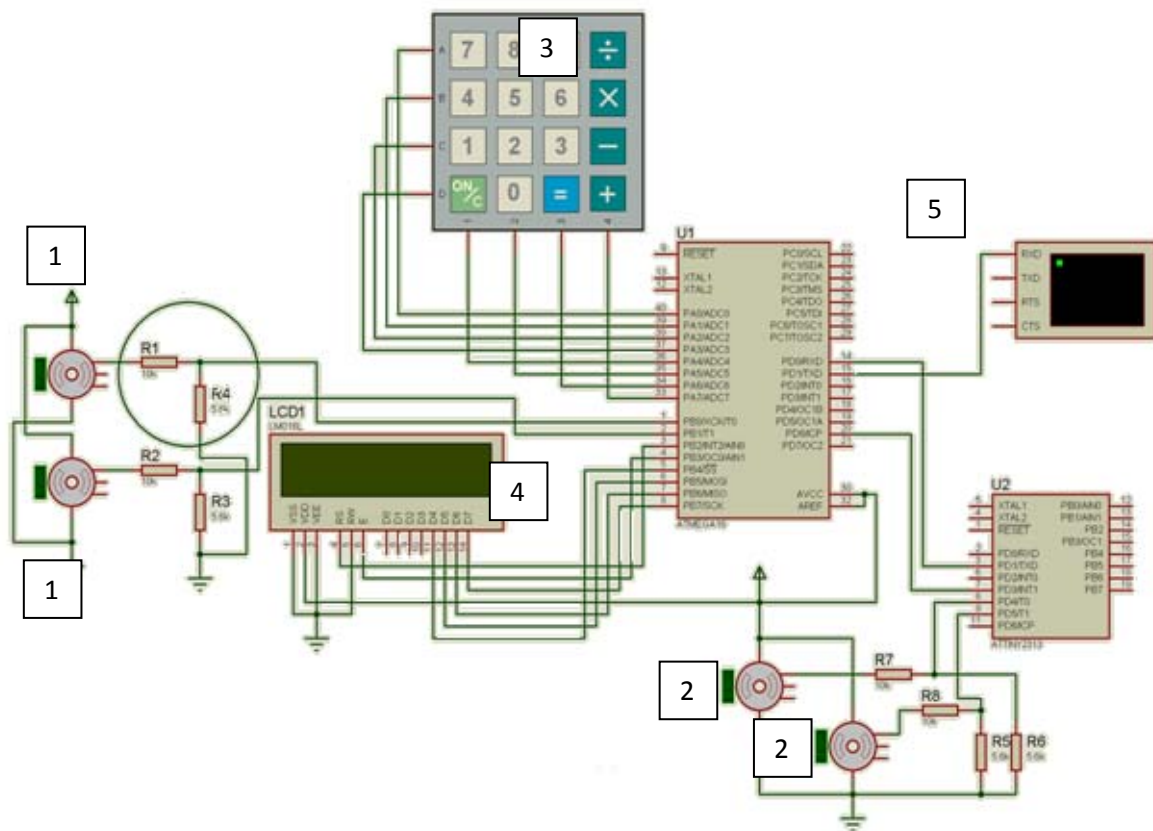
بر این اساس سرعت تئوری چرخ‌های چپ و راست، سرعت تئوری میانگین و سرعت واقعی تراکتور به ترتیب از روابط ۵، ۶ و ۷ محاسبه می‌گردند:

$$V_{Tl} = 2R_l N_{Rl}; i = l, r \quad (5)$$

$$V = \pi R_F (N_{FV1} + N_{FV2}) \quad (10)$$

سرعت پیشروی تراکتور ( $\text{kmh}^{-1}$ ) نیز از رابطه ۱۰ به دست

می‌آید.



شکل ۳- شماتیک نحوه اتصال اجزای سامانه: (۱) حسگر چرخ عقب، (۲) حسگر چرخ جلو، (۳) صفحه کلید، (۴) نمایشگر و (۵) خروجی قفل دیفرانسیل

Fig. 3. Schematic diagram of measurement system: (1) rear wheel sensor, (2) front wheel sensor, (3) keyboard, (4) LCD and (5) output for differential lock.

قفل دیفرانسیل را آزاد کند. تکمیل مکانیزم‌های الکترو مکانیکی این فرایند در تکمیل این پروژه صورت می‌گیرد. برای تغییر در ابعاد تایر تراکتورها جهت نصب سامانه بر روی انواع تراکتور دو چرخ محرک، صفحه کلیدی به صورت مجتمع با نمایشگر سامانه در نظر گرفته شد که در شکل ۱ قابل رویت است.

بدین ترتیب لغزش و سرعت پیشروی توسط سامانه اندازه‌گیری و بر روی نمایشگر نشان داده می‌شوند. در شکل ۳ نحوه اتصال اجزای سامانه به پایه‌های میکروکنترلر نشان داده شده است.

### اعتبارسنجی سامانه<sup>۱</sup>

#### مشخص نمودن دقت انکودرهای سامانه

برنامه به گونه‌ای نوشته شده که اگر سرعت دورانی چرخ‌های جلوی تراکتور هنگام عملیات شدید کشاورزی به صورت لحظه‌ای صفر گردد (بروز پدیده سرش لحظه‌ای چرخ)، به منظور پایداری محاسبات، میانگین ۴ پالس قبلی دریافتی به محاسبات وارد گردد. در برنامه تدوین شده تدبیری جهت کنترل لغزش نیز لحاظ شده است. با توجه به اینکه در خاک‌های کشاورزی بیشترین بازده کشش در لغزش بین ۱۰ تا ۱۵ درصد اتفاق می‌افتد، هنگامی که لغزش چرخ سمت چپ، راست و یا لغزش میانگین آن‌ها به ۱۵ درصد و یا بیشتر برسد توسط برنامه یک پالس تحریک ارسال می‌گردد. از طرف دیگر با کاهش مقادیر فوق به کمتر از ۱۱ درصد نیز یک پالس دیگر ارسال می‌گردد. بدین ترتیب می‌توان قفل دیفرانسیل را با یک مکانیزم هیدرولیکی و تحریک الکتریکی در لغزش بیشتر از ۱۵ درصد درگیر نمود تا مقدار لغزش کاهش یافته و تحریک دوم در لغزش ۱۱ درصد

پالس‌های دریافتی از انکودرها و لغزش‌های اندازه‌گیری شده توسط سامانه ثبت گردید. نتایج این بررسی‌ها در شکل‌های ۴ و ۵ نشان داده شده است. ضریب همبستگی بسیار نزدیک به یک، ضریب زاویه نزدیک به یک و میزان انحراف از مبدا خیلی کوچک و نزدیک به صفر نشان از صحت و دقت بالای میکروکنترلر در محاسبه مقادیر مورد نظر از روابط دارد. اختلافات جزئی رخ داده می‌تواند به دقت اندازه‌گیری حسگرها و گرد کردن اعداد در طی انجام محاسبات مرتبط باشد.

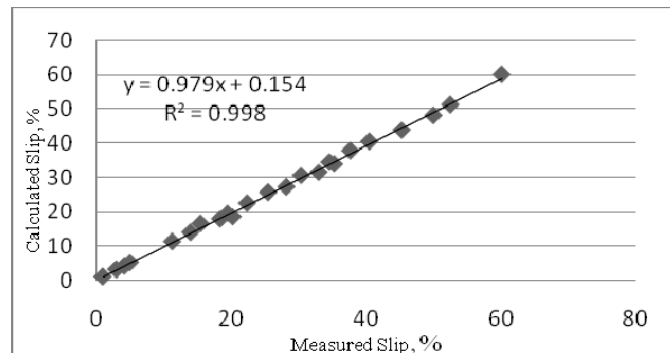
#### بررسی انطباق مقادیر اندازه‌گیری شده در شرایط معلوم لغزش

در این مرحله به بررسی و ارزیابی عملکرد سامانه از طریق لغزش‌هایی پرداخته شد که مقدار آن‌ها از قبل مشخص بودند. به این منظور به ترتیب چرخ‌های محرک طرف چپ و راست تراکتور بالا برده شد و لغزش چپ و راستی که سامانه اندازه‌گیری می‌کرد، ثبت گردید.

دقت انکودرهای چرخان سامانه به کمک یک دورسنج دیگر (دارای رزولوشن به مراتب بالاتر) موجود در آزمایشگاه ابزار و اندازه‌گیری گروه ماشین‌های کشاورزی دانشگاه فردوسی مشهد مورد بررسی قرار گرفت. دورسنج مذکور یک نمونه انکودر چرخان بود که در هر دور چرخش ۳۶۰۰ پالس تولید می‌کرد. به این منظور هر دو چرخ محرک تراکتور همزمان بالا برده شد و در دور ثابت موتور و دنده‌های مختلف، دور چرخ یک طرف با شفت انکودر و طرف دیگر با دور سنج فوق‌الذکر اندازه‌گیری گردید. بیشینه اختلاف مقادیر اندازه‌گیری شده  $\pm 0/1$  دور بود که به اختلاف رزولوشن حسگرها مربوط می‌شد.

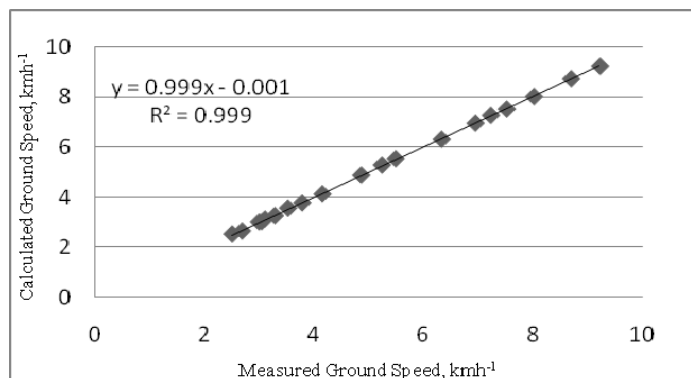
#### بررسی صحت و دقت محاسباتی میکروکنترلر

در مرحله دوم به کمک نرم افزار Code Vision پالس‌های ارسالی از شفت انکودرها و مقادیر سرعت پیشروی و لغزشی که سامانه نشان می‌داد ثبت شدند. سپس لغزش و سرعت پیشروی از روی پالس‌های دریافتی و با توجه به روابط ارائه شده در بخش‌های قبل این مقاله، محاسبه شدند. عملیات فوق برای سرعت‌های مختلف تراکتور (دور ثابت موتور و استفاده از دنده‌های مختلف) تکرار شد و



شکل ۴- مقایسه لغزش اندازه‌گیری شده توسط سامانه با لغزش محاسبه شده از روابط

Fig. 4. Comparison of measured slip by developed system and calculated from equations



شکل ۵- مقایسه سرعت پیشروی اندازه‌گیری شده توسط سامانه با سرعت پیشروی محاسبه شده از روابط

Fig. 5. Comparison of measured ground speed by developed system and calculated from equations

برای ارزیابی سامانه لغزش سنج بر روی سطح آسفالت، ابتدا باد لاستیک چرخ‌های عقب تراکتور فرگوسن 285 تا 20 Psi و چرخ‌های جلو آن تا 35 Psi تنظیم گردید. برای دستیابی به لغزش‌های بالا، به وسیله تراکتور 285 یک تراکتور دیگر که نیروی مقاوم در برابر حرکت ایجاد می‌کرد، به تراکتور مورد آزمایش متصل گردید. تراکتوری که به صورت یدک کشیده می‌شد، دارای یک شیر قابل تنظیم بر روی مانیفولد گازهای خروجی<sup>۱</sup> بود. در حالی که تراکتور خاموش بود و در دنده 4 سنگین کشیده می‌شد با تنظیم مقدار بسته شدن شیر مذکور، مقدار نیروی مقاوم در برابر حرکت افزایش می‌یافت. برای ایمنی بیشتر، مخزن سوخت این تراکتور تخلیه شده بود. بدین ترتیب لغزشی که سامانه در دور موتور ثابت 2000 دور در دقیقه در دنده‌های 2 سنگین (2L)، 3 سنگین (3L) و 4 سنگین (4L) اندازه‌گیری می‌نمود با لغزشی که از رابطه 2 محاسبه می‌شد، مقایسه گردید.

نتایج ارزیابی سامانه بر روی آسفالت (شکل 6) نشان داد مقادیر اندازه‌گیری شده و محاسبه شده لغزش به روش متعارف با ضریب 0/95 همبستگی داشتند. بیشترین اختلاف مشاهده شده بین مقادیر لغزش اندازه‌گیری شده توسط سامانه با لغزشی که از رابطه 2 محاسبه شده بود  $\pm 1/6$  درصد بود که غالباً در لغزش‌های بیشتر از 30 درصد اتفاق افتاده بود.

بیشترین اختلاف بین مقادیر سرعت پیشروی که نمایشگر سامانه نشان می‌داد با مقادیر محاسبه شده  $\pm 0/2$  کیلومتر بر ساعت بود و ضریب همبستگی بین مقادیر اندازه‌گیری شده توسط سامانه و مقادیر محاسبه شده بیش از 0/99 بود (شکل 7). همان‌طور که در نمودار شکل 7 مشخص است با توجه به پارامترهایی مثل ضریب همبستگی، ضریب زاویه خط بسیار نزدیک به یک و میزان انحراف از مبدأ ناچیز می‌توان نتیجه گرفت که سرعت پیشروی با دقت مطلوبی اندازه‌گیری می‌شود. به علاوه این مقایسه با یک مقدار مطلق صورت نگرفته، بلکه مقایسه‌ای با مقدار سرعت پیشروی محاسبه شده به روش مسافت - زمان است که خود نیز دارای خطای ناشی از اندازه‌گیری مسافت و زمان می‌باشد.

### ارزیابی سامانه در مزرعه

برای ارزیابی سامانه در مزرعه، لغزش اندازه‌گیری شده توسط سامانه در حالی که تراکتور مسی فرگوسن 285 با گاوآهن برگردان دار 3 خیش زمین را شخم می‌زد، با لغزشی که از رابطه 2 محاسبه می‌شد، مقایسه گردید. برای دستیابی به لغزش‌های مختلف جهت

با توجه به اینکه در شرایطی که یکی از چرخ‌های تراکتور از زمین بلند شود و تراکتور در دنده قرار گیرد سرعت پیشروی صفر خواهد بود، در حالی که چرخ محرک طرف چپ تراکتور بالا بود، نمایشگر سامانه مقادیر زیر را نمایش می‌داد:

$$S_x = 100 (\%), \quad S_y = 0 (\%), \quad S_{\text{ave}} = 0 (\%), \quad V = 0 (\text{kmh}^{-1})$$

و در حالی که چرخ محرک طرف راست تراکتور بالا بود،

نمایشگر سامانه مقادیر زیر را نمایش می‌داد:

$$S_x = 0 (\%), \quad S_y = 100 (\%), \quad S_{\text{ave}} = 0 (\%), \quad V = 0 (\text{kmh}^{-1})$$

بدین ترتیب مقادیر لغزشی که سامانه نشان می‌داد با مفروضات

لغزش مطابقت داشت.

### بررسی عملکرد سامانه در اندازه‌گیری سرعت پیشروی و حذف اثر سرش

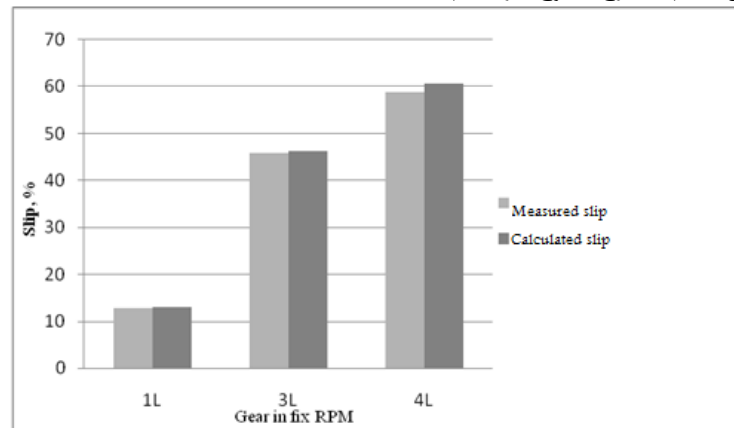
برای مشخص نمودن دقت سرعت پیشروی نمایش داده شده توسط سامانه، هر دو چرخ جلوی تراکتور بالا برده شد و با سرعت‌های دورانی متفاوت به حرکت در آمد. سپس تعداد دور چرخ‌های هر طرف در مدت زمان 10 ثانیه شمرده و سرعت محاسبه گردید و با مقداری که نمایشگر نشان می‌داد مقایسه شد. در حالی که دور چرخ‌های جلوی تراکتور متفاوت بود، بیشترین مقدار تفاوت بین سرعتی که نمایشگر نشان می‌داد با سرعت محاسبه شده  $\pm 0/1 \text{ kmh}^{-1}$  بود.

همان‌گونه که پیشتر ذکر گردید، چنانچه سرعت دورانی چرخ‌های جلو در حین حرکت صفر گردد (چرخ سرش داشته باشد)، میکروکنترلر میانگین 4 پالس قبلی را که از همان چرخ ارسال می‌شود، در نظر می‌گیرد. برای مشخص نمودن ادعای فوق، چرخ‌های جلوی تراکتور پس از بالا رفتن به حرکت درآورده شدند. سپس به ترتیب یکی از چرخ‌های طرف چپ و راست برای مدت زمان یک ثانیه ثابت شده و دوباره چرخ مذکور به حرکت در آمد. مقادیر سرعت پیشروی که سامانه اندازه‌گیری می‌کرد در طول فرآیند ثبت گردید. با توجه به این که مقدار سرعت پیشروی از رابطه 10 از میانگین دور چرخ‌های جلو به دست می‌آید، هنگامی که یکی از چرخ‌های جلوی تراکتور از حرکت باز بایستد، باید سرعتی که نمایشگر سامانه نشان می‌دهد حداقل نصف گردد. اما تغییر محسوسی در سرعت پیشروی که نمایشگر سامانه نشان می‌داد مشاهده نشد. بنابراین تدبیر اتخاذ شده در تدوین برنامه میکروکنترلر جهت حذف اثر سرش لحظه‌ای در مقدار سرعت پیشروی و لغزش اندازه‌گیری شده توسط سامانه مفید بود.

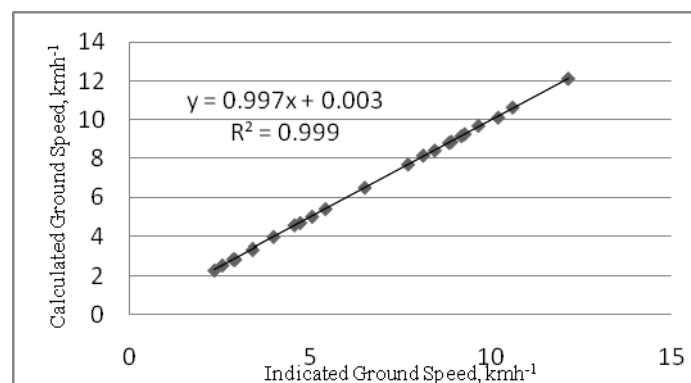
### نتایج و بحث

#### ارزیابی سامانه بر روی آسفالت

ارزیابی سامانه، آزمایش‌ها با متغیرهای مستقلی از قبیل سرعت پیشروی، فشار باد تایرها و عمق شخم به شرح سطوح زیر انجام شد:



شکل ۶ - نمودار مقایسه لغزش‌ها بر روی آسفالت  
Fig. 6. Comparison of slip on asphalt surface



شکل ۷ - نمودار مقایسه سرعت پیشروی نشان داده شده توسط سامانه با سرعت پیشروی محاسبه شده بر حسب (kmh<sup>-1</sup>) بر روی آسفالت  
Fig. 7: Comparison of indicated ground speed (kmh<sup>-1</sup>) and calculated ground speed (kmh<sup>-1</sup>) on asphalt surface

مقادیر اندازه‌گیری و محاسبه شده را می‌توان به تغییرات شدید لحظه‌ای در مقادیر اندازه‌گیری شده و این واقعیت که به هر صورت هر دو روش دارای خطای اندازه‌گیری هستند مرتبط دانست. بیشترین اختلاف مشاهده شده بین سرعت پیشروی که نمایشگر سامانه نشان می‌داد و سرعت پیشروی که از روش مسافت-زمان در مزرعه محاسبه شده بود برابر با  $\pm 0.2$  کیلومتر بر ساعت بود. در شکل ۹ نمودار مقایسه بین سرعت اندازه‌گیری شده توسط سامانه و سرعت اندازه‌گیری شده به روش متعارف در مزرعه نشان داده شده است. برای این کمیت نیز با توجه به ضریب زاویه، انحراف از مبدأ و ضریب همبستگی می‌توان نتیجه گرفت که سامانه به‌خوبی و دقت لازم این کمیت را اندازه‌گیری می‌کند.

### نتیجه‌گیری

سامانه قابلیت اندازه‌گیری و نمایش لغزش چرخ‌های محرک چپ و راست را به طور جداگانه دارد. در آزمون‌های انجام شده مقادیر

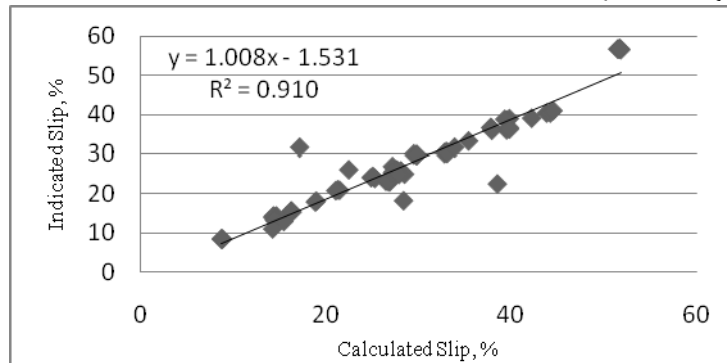
اندازه‌گیری‌ها در سه فشار مختلف باد تایرها برحسب Psi به صورت (۱۶، ۲۰ و ۲۵ برای چرخ‌های عقب و به ترتیب ۳۰، ۳۵ و ۴۰ برای چرخ‌های جلو)، در دو عمق ۱۵ و ۳۰ سانتی‌متر و در دور موتور ثابت ۱۸۰۰ دور در دقیقه برای سه سرعت پیشروی مختلف در دنده‌های ۲، ۳ و ۴ سنگین انجام شد.

کلیه مراحل ارزیابی سامانه در مزرعه تحقیقاتی دانشگاه فردوسی مشهد انجام گرفت.

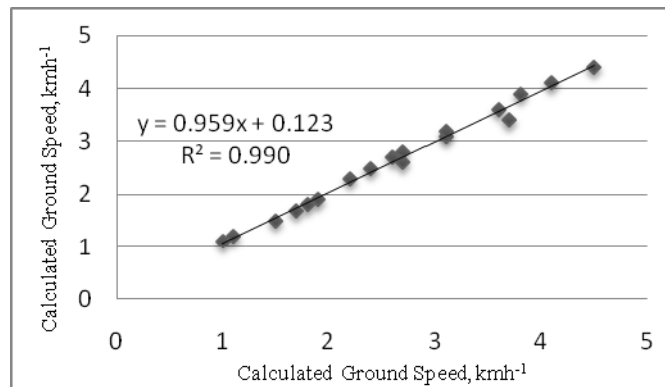
نتایج مقایسه لغزش‌های اندازه‌گیری شده توسط سامانه با لغزش‌های محاسبه شده به روش متعارف و با استفاده از رابطه ۲ در شکل ۸ نشان داده شده است. بیشترین مقدار اختلاف بین مقادیر لغزش اندازه‌گیری شده و محاسبه شده  $\pm 2/4$  درصد بود که در لغزش‌های بیشتر از ۳۵ درصد اتفاق افتاده بود. در مجموع با توجه به نمودار و مقادیر ضریب زاویه، ضریب همبستگی و انحراف از مبدأ می‌توان نتیجه گرفت که سامانه اندازه‌گیری متناسب با روش تجربی مقدار لغزش را تشخیص و اندازه‌گیری نموده است. دلیل عدم انطباق



لغزش اندازه‌گیری شده توسط سامانه با مقادیر لغزشی که از شمارش تعداد دور همان چرخ محاسبه شده بود، مقایسه گردید.



شکل ۸- نمودار مقایسه لغزش نشان داده شده توسط سامانه با لغزش محاسبه شده برگرفته از همه داده‌های آزمون در مزرعه  
 Fig. 8. Comparison between indicated and calculated slip from all data of farm tests



شکل ۹- نمودار مقایسه سرعت پیشروی نشان داده شده توسط سامانه با سرعت پیشروی محاسبه شده بر حسب (kmh<sup>-1</sup>) در مزرعه  
 Fig. 9: Comparison between indicated ground speed (kmh<sup>-1</sup>) and calculated Ground Speed (kmh<sup>-1</sup>) on farm

تراکتور در حین عملیات شخم بر مقدار لغزش و سرعت پیشروی که سامانه اندازه‌گیری می‌کرد موثر نبود و تدبیر اتخاذ شده در تدوین برنامه جهت حذف اثر سرش موثر بود. کاربرد دو انکودر چرخان برای اندازه‌گیری سرعت چرخ‌های جلو جهت افزایش دقت مقادیر اندازه‌گیری شده نیز مفید بود. ارزیابی سامانه در آسفالت و مزرعه نشان داد دقت اندازه‌گیری لغزش با افزایش لغزش تغییر محسوسی نداشت و سامانه برای لغزش‌های بالا از قابلیت اعتماد مناسبی برخوردار بود. چنانچه سامانه ساخته شده به صورت تجهیزات استاندارد توسط کارخانه‌های سازنده بر روی تراکتور نصب گردد، در مدیریت مصرف انرژی در شرایط مختلف کاری تراکتور نقش بسزایی خواهد داشت.

اما در پژوهش‌هایی که توسط سایر محققین انجام گرفته بود همواره لغزش میانگین اندازه‌گیری شده با لغزشی که از شمارش دوران یا سرعت خطی یکی از چرخ‌های محرک محاسبه می‌شد، مقایسه شده بود. بدیهی است مقایسه دو کمیت متفاوت (لغزش میانگین اندازه‌گیری شده و لغزش یکی از چرخ‌های محرک که محاسبه شده بود) توسط سایر محققین، مقایسه درستی نبوده و ممکن است نتایج پژوهش‌های انجام گرفته در این زمینه را دستخوش تغییر کرده باشد. زیرا در مقادیر اندازه‌گیری شده لغزش توسط سامانه در همه شرایط آزمایش حداقل ۱/۴ درصد اختلاف بین مقادیر لغزش‌های چپ، راست و لغزش میانگین مشاهده شد. بررسی‌ها نشان داد اثر سرش (لغزیدن) در چرخ‌های جلوی

## منابع

- 1- Bedri, A.R., W., Marely, W.F., Buchele, and T. Smay. 1981. Tractor performance monitor based on a single-chip microcomputer. ASAE, Paper No: 49085.
- 2- Behrooz-Lar, M. 1989. Tractors Construction & Application. Iranian Agricultural Extension Publications, Tehran, Iran

- 3- Beppler, D.C., and M.D. Shaw. 1980. Tractor instrument package for field energy studies. ASAE, Paper No: 80-1522.
- 4- Chosa, T.N., M., Omine, and K. Itani. 2007. Dynamic performance of global positioning system velocity sensor for extremely accurate. *Journal of Biosystem Engineering*, 97: 3-9.
- 5- James, G., D.R., DeVoe, and D. Batchelder. 1981. A microcomputer based data acquisition system for tractors. ASAE, Paper No: 81-1578.
- 6- Keskin, M., and Sait, M.D. 2006. Feasibility of low-cost receivers for ground speed measurement. *Computer and Electronics in Agriculture*, 54: 36-43.
- 7- Luth, H.J., V.G., Floyd, and R.P. Heise, 1978. Evaluating energy requirements of machines in the field. ASAE, Paper No: 78-1588.
- 8- Parnav, P.K., K.P., Pandey, and V.K. Tewari. 2010. Digital slipmeter for agricultural 2WD tractors. *Computer and Electronics in Agriculture*, 73: 188-193.
- 9- Paulsen, G., and G.C. Zebra. 1971. Automatic indication of Tractor-Wheel slip. ASAE, Paper No: 71-584.
- 10- Raheman, H., and Jha, S.K. 2007. Wheel slip measurement in 2WD tractor. *Journal of Terramechanics*, 44: 89-94.
- 11- Tompkins, F.D., W.E., Hart, R.S., Freeland, L., Wikerson, and R. Wilhelm, 1988. Comparison of tractor ground speed measurement techniques. ASAE, 31(2): 369-372.
- 12- Tsuha, W.K., A.M., McConnell, and P.A. Witt, 1982. Radar ground speed measurement for agricultural vehicles. ASAE, Paper No:82-5513
- 13- Turner, P.E. 1993. Slip measurement using dual radar guns. ASAE, Paper No: 93-1031.