



Research Paper

Design, development and evaluation of electronic slip control system for MF 285 tractor

Norooz Moradinejad ^{1*}

¹. Department of Mechanics of Biosystems Engineering, Tabriz Branch, Islamic Azad University, Tabriz, Iran..

Article History

Submitted: 2026/02/07

Revised: 2026/07/01

Accepted: 2026/08/07

Published online: 2026/09/23

Keywords:

Tractor, Slippage, Fuel consumption, Stepper motor.

Abstract

An electronic slip control system was designed and installed on MF285 tractor, and its performance was evaluated under field conditions. In this system, a rotary encoder measured ground speed, and a proximity sensor measured theoretical forward speed to calculate drive wheel slip. The sensor outputs were transmitted to the programmable logic controller (PLC). After calculating the wheel slip and comparing it with the set value, the PLC computed the error value and sent a command to the stepper motor accordingly. The stepper motor rotated the control valve, and the three-point linkage system adjusted the plow depth to keep the wheel slip within the allowable range. The results of sensor calibration showed that the measurement error for slippage was about 2 percent under field conditions. Field experiments were conducted at the two levels of control system (electronic and mechanical), the four levels of ground speed (2.5, 3.5, 4.5 and 6.2 km/h), the three levels of the set values (slippage for electronic system including 1: 10%, 2: 15% and 3:20%, the position levels of draft control lever for mechanical system including: 1: low, 2: medium and 3: high) in a sandy-loam soil with a randomized complete block design. Results of statistical analyses showed that the mean slippage in the electronic control system decreased by 35, 43, and 49 percent at three set levels (1, 2, and 3, respectively) compared with the mechanical system. The decrease in wheel slip in the electronic control system resulted in reductions in fuel consumption of 11, 31, and 36 percent at the set values of 1, 2, and 3, respectively. The results also showed a significant difference in fuel consumption between the two systems at similar speeds.

*Corresponding author email:

n.morad@iaut.ac.ir

ORCID: 
0000-0002-5058-2753



How to cite this paper:

Moradinejad , N. (2025). Design, development and evaluation of electronic slip control system for MF 285 tractor. *Journal of Research in Mechanics of Agricultural Machinery*. 40: 15-30. <https://dx.doi.org/10.22034/jrmam.2026.14908.755>. (In Persian)



Authors retain the copyright and full publishing rights. Published by [Shahrekord University](https://www.shahrekord.ac.ir). This article is an open access article licensed under the [Creative Commons Attribution 4.0 International \(CC BY 4.0\)](https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/)

<https://dx.doi.org/10.22034/jrmam.2026.14908.755>

EXTENDED ABSTRACT

Introduction

The main purpose of agricultural tractors is to perform traction work, which is defined based on pull and travel speed. Research shows that about 20 to 55 percent of the available tractor energy is wasted at the tire-soil contact surface, due to drive wheel slippage and rolling resistance. When using tillage implements, drive wheel slippage is necessary for the tractor to apply traction force. Many researchers have reported that, to achieve maximum traction efficiency, in addition to appropriate weighting of the tractor, wheel slippage should be controlled within the range of 8 to 15 percent.

Nowadays, most agricultural tractors, especially domestically manufactured tractors, have a hydro-mechanical draft control system. In this system, the compressive force in the upper arm or the draft force in the lower arms of the tractor is used as a control parameter. The response of hydro-mechanical systems to changes in soil conditions is weak (slow). The reason for this is that the spring experiences hysteresis (backlash) during loading and unloading, leading to different rates of raising or lowering the tools in the soil. Also, there is no mechanism to adjust the hydro-mechanical system's lifting sensitivity. Therefore, an electronic slip control system with appropriate accuracy, low cost, and compatibility with domestically manufactured tractors was designed, developed, and installed on the MF285 tractor.

Material and Methods

An electronic slip control system, using a proportional rotary control valve and capable of being controlled by a stepper motor, was designed and installed on a Massey Ferguson model 285 tractor. This system includes theoretical and actual tractor speed sensors, a controller unit, a display, a control valve, a stepper motor, and a stepper motor driver. The programmable logic controller (PLC) consists of a CPU unit, model CP1L-J14D, and an

analog input unit, model CP1W-AD041. A touch screen manufactured by Omron, model NB5Q-TW00B, was used to display the measured values and enter the set values. The control valve is installed at the outlet of the hydraulic pump, and its design provides three modes: lifting, neutral, and lowering. A Sanyo stepper motor with a torque of 13 kg/cm and a two-phase driver was used to rotate the control valve. The fifth-wheel method was used to measure forward speed. A 100-pulse encoder shaft sensor was used to measure the rotational speed of the fifth wheel. A magnetic pick-up sensor sensitive to iron was used to measure the rotational speed of the drive wheels.

Results and Discussion

The results of field experiments showed a significant decrease in the average slippage in the electronic system compared with the mechanical system across all similar sets, indicating that the mechanical control system has performed poorly in controlling slip compared to the electronic control system because there is no supervision of the slippage of the drive wheels in the mechanical control system.

As set values increase, regardless of the type of control system, the percentage of slip increases, but the rate of increase differs between the two systems. Given that increasing the set values increases the required traction force for the plow, increasing the draft force increases slippage at the drive wheels.

Comparing average fuel consumption across different systems and speed treatments using the LSD test at the 5% level showed that the mechanical control system has the highest fuel consumption at the minimum travel speed, while the electronic control system has the lowest at the maximum forward speed. It is also clear from the graph that increasing speed in both control systems decreases fuel consumption. There is also a significant difference at the 5% level between the averages of the two systems at all speeds, and using the electronic system has saved fuel consumption by 20%, 26%, 40%, and 32% at

speeds of 2.5, 3.5, 4.5, and 6.2 km/h, respectively. There is a significant difference at the 5% probability level in all set values between the fuel consumption of the two systems, indicating that the electronic system has lower fuel consumption than the mechanical system. Also, regardless of system type, increasing the set values has increased the amount of fuel consumed. Because increasing the set values increases the traction force required by the plow, the amount of fuel consumed also increases.

Conclusions

1 -The calibration results showed that the sensors of the system for measuring the percentage of slip have good accuracy. Also, there was a linear relationship with a high coefficient of determination between the percentage of slip measured by the system and that calculated by the formula on the asphalt surface, and the measurement error in the field was approximately 2%.

2 -The average percentage of slip when using the electronic system in all similar set values was significantly reduced compared to the mechanical system, and this led to a decrease in the average fuel consumption of the electronic system in all similar set values.

3- Due to the adjustable up-going and down-going sensitivity in the electronic system, the

control system responded promptly to changes in soil conditions, and there was no need for the driver to intervene to control the vehicle. However, in the mechanical system, in some cases the operator had to intervene to control the plowing depth.

Data Availability Statement

All relevant data and results are reported within the manuscript in the form of tables and figures.

Ethical Considerations

The authors confirm that ethical principles have been observed in conducting and publishing this research.

Conflict of Interest

The authors declare that they have no known competing financial interests or personal relationships that could have appeared to influence the work reported in this paper.

Funding Statement

This paper is derived from a research project financially supported by the Islamic Azad University, Tabriz Branch.



طراحی، ساخت و ارزیابی سامانه واپایش^۱ الکترونیکی درصد لغزش برای تراکتور MF285

نوروز مرادی نژاد*

۱. گروه مهندسی مکانیک بیوسیستم، واحد تبریز، دانشگاه آزاد اسلامی، تبریز، ایران

تاریخچه مقاله	چکیده
دریافت: ۱۴۰۴/۱۱/۱۸	در این تحقیق یک سامانه واپایش الکترونیکی درصد لغزش، طراحی، ساخت و بر روی تراکتور مسی فرگوسن مدل ۲۸۵ نصب و عملکرد مزرعه‌ای آن ارزیابی گردید. یک حسگر چرخش‌سنج برای اندازه‌گیری سرعت واقعی تراکتور و یک حسگر مغناطیسی برای اندازه‌گیری سرعت نظریه بکار برده شد. با ارسال سیگنال‌های خروجی از حسگرها به پردازشگر مرکزی، پردازشگر پس از محاسبه درصد لغزش و مقایسه آن با مقدار تنظیمی، مقدار خطا را محاسبه و مطابق آن موتور پله‌ای، شیر واپایش روغن را می‌چرخاند. متناسب با چرخش شیر واپایش، سامانه اتصال سه نقطه، عمق شخم گاواهن را تغییر داد تا درصد لغزش چرخ‌های محرک تراکتور در محدوده مجاز، ثابت نگه داشته شود. نتایج واسنجی حسگرها نشان داد که خطای سامانه اندازه‌گیری درصد لغزش در شرایط مزرعه‌ای حدود دو درصد بود. آزمون‌های مزرعه‌ای برای سامانه‌های واپایش در دو سطح (الکترونیکی و مکانیکی)، سرعت پیشروی در چهار سطح و مقادیر تنظیمی در سه سطح (درصد لغزش برای سامانه الکترونیکی (سطح ۱ (۱۰٪)، سطح ۲ (۱۵٪) و سطح ۳ (۲۰٪)) و موقعیت اهرم واپایش کشش برای سامانه مکانیکی (پایین (سطح ۱)، وسط (سطح ۲)، بالا (سطح ۳))، در قالب طرح بلوک‌های کامل تصادفی در خاک شنی لومی اجرا گردید. نتایج نشان داد که درصد لغزش در سامانه الکترونیکی در مقایسه با سامانه مکانیکی به میزان ۴۳، ۳۵ و ۴۹ درصد به ترتیب در مقادیر تنظیمی ۱، ۲ و ۳ کاهش یافته است. کاهش درصد لغزش در سامانه الکترونیکی باعث کاهش سوخت مصرفی به میزان ۱۱، ۳۱ و ۳۶ درصد به ترتیب در مقادیر تنظیمی ۱، ۲ و ۳ گردید. بین میانگین سوخت مصرفی دو سامانه در تمامی سرعت‌های مشابه اختلاف معنی‌دار وجود داشت، به طوریکه سوخت مصرفی در سامانه الکترونیکی نسبت به سامانه مکانیکی کمتر بود.

واژه‌های کلیدی:

تراکتور، درصد لغزش، سوخت مصرفی، موتور پله‌ای.

*پست الکترونیکی نویسنده

مسئول:

n.morad@iaut.ac.ir

ORCID: 

0000-0002-5058-2753



نحوه استناد به این مقاله:

مرادی نژاد، ن. (۱۴۰۵). طراحی، ساخت و ارزیابی سامانه واپایش الکترونیکی درصد لغزش برای تراکتور MF285. نشریه پژوهش‌های مکانیک ماشین‌های کشاورزی، ۴۰: ۱۵-۳۰. <https://dx.doi.org/10.22034/jrmam.2026.14908.755>

مقدمه

هدف اصلی تراکتورهای کشاورزی، انجام کار کششی (مالبندي) است که بر اساس نیروی کششی و سرعت پیشروی تعریف می‌شود. تحقیقات نشان می‌دهد که حدود ۲۰ تا ۵۵ درصد از انرژی در دسترس تراکتور در سطح تماس لاستیک و خاک و در اثر لغزش چرخ‌های محرک و مقاومت غلتشی هدر می‌رود. این انرژی باعث سایش لاستیک‌ها و فشرده‌شدن خاک می‌شود (Burt and Bailey, 1982). Brixius and Wismer (1987) اظهار داشتند که لغزش چرخ، نقش تعیین‌کننده‌ای در بهبود عملکرد کششی ایفا می‌کند. تراکتورها زمانی در حداکثر بازدهی خود عمل می‌کنند که درصد لغزش چرخ‌ها در یک محدوده بهینه ثابت نگه داشته شود (Zoz, 1972). لغزش چرخ به‌عنوان حرکت نسبی بین سطح تماس وسیله کششی (چرخ) و سطح تکیه‌گاه (خاک) در جهت پیشروی تعریف می‌شود (ASAE Standard, 1983).

به‌طور کلی، لغزش چرخ زمانی رخ می‌دهد که سرعت چرخش تأیرها بیشتر از سرعت واقعی تراکتور روی زمین باشد. در نتیجه این پدیده، کمتر از ۶۰ تا ۷۰ درصد از توان تولیدی موتور تراکتور صرف کشیدن ادوات در خاک می‌شود و این مقدار در خاک‌های سست و ماسه‌ای حتی ممکن است تا ۵۰ درصد کاهش یابد. هنگام استفاده از ادوات خاک‌ورزی، لغزش چرخ‌های محرک جهت اعمال نیروی کششی توسط تراکتور، لازم است. اما درصد لغزش زیاد باعث کاهش بازده سوخت، ظرفیت مزرعه‌ای و افزایش سایش لاستیک‌ها می‌شود. محققین زیادی گزارش کرده‌اند که به‌منظور حصول حداکثر بازده کشش، علاوه افزودن سنگین‌کننده مناسب به تراکتور، درصد لغزش چرخ‌ها بایستی در محدوده ۸ الی ۱۵ درصد واپایش گردد. همچنین ذکر شده است که لغزش کم (کمتر از ۵ تا ۷ درصد) چرخ محرک در مزرعه نامطلوب است؛ زیرا در این حالت بازده کششی کاهش یافته و توان صرف فشردن خاک می‌شود که نتیجه آن افزایش مصرف سوخت و تراکم خاک است (Ashok Kumar et al., 2017).

با آگاهی از اهمیت لغزش چرخ‌ها، پژوهشگران از روش‌های مختلفی برای اندازه‌گیری این عامل استفاده کرده‌اند (Stuchly et al., 1976; Lyne and Meiring, 1977; Grevis-James et al., 1981; Jurek and Newendorp, 1983; Khalilian et al., 1989; Reed and Turner, 1993; Raheman and Jha, 2007; Ashok Kumar et al., 2017; Shafaei et al., 2018a).

همچنین در سال‌های اخیر، تحقیقات زیادی در زمینه سامانه‌های واپایش خودکار الکترونیکی اتصال سه‌نقطه تراکتور انجام شده است (Wiegard & Hanks, 1985; Osinenko et al., 2015; Anthonis et al., 2004; Moradasgharloo et al., 2010; Ayers et al., 1989; Kovacev et al., 2008; Qiaolian and Xuhui, 2014; Bhondave et al., 2017; Lee et al., 2000).

Gupta et al., (2019) سامانه واپایش درصد لغزش-نیروی کشش مبتنی بر میکروکنترلر را برای تراکتور دوچرخ محرک طراحی، توسعه و ارزیابی کردند. این سامانه هم‌زمان درصد لغزش و نیروی کششی را اندازه‌گیری و در محدوده تنظیم شده و در شرایط مزرعه‌ای واپایش می‌کند. نتایج این تحقیق نشان داد که بازده کششی تراکتور به میزان ۹/۱۷ و ۶/۰۵ درصد به ترتیب در حین شخم با گاواهن برگردان‌دار و دیسک بهبود یافت. در پژوهش دیگری یک سامانه واپایش درصد لغزش-عمق شخم گامی ارائه و بر روی تراکتور MF399 نصب گردید. نتایج مزرعه‌ای سامانه واپایش گامی نشان داد که بازده کششی و بازده انرژی کلی تراکتور به ترتیب ۲۰ و ۷۳ درصد افزایش یافت (Shafaei et al., 2018b).

Pranav et al. (2012) سامانه واپایش خودکار درصد لغزش چرخ‌های تراکتور را ارائه دادند و نتایج مزرعه‌ای نشان داد که در سامانه واپایش درصد لغزش در مقایسه با سامانه واپایش کشش موجود بر روی همان تراکتور، مصرف سوخت کاهش (۲۰-۳۰ درصد)، ظرفیت مزرعه‌ای افزایش (۲۸-۷ درصد) و بازده کششی افزایش معنی‌داری (۱۰-۴ درصد) داشتند. مقایسه عملکرد سامانه‌های واپایش الکترونیکی درصد لغزش چرخ‌های تراکتور و واپایش مکانیکی کشش تراکتور در مزرعه نشان داد که در هنگام دیسک‌زنی استفاده از سامانه واپایش الکترونیکی، لغزش را ۲۱ درصد کاهش داد که این امر به هفت درصد کاهش در نیروی مالبندي، شش درصد افزایش در سرعت پیشروی و ۹ درصد کاهش در مصرف سوخت در واحد سطح منجر گردید. استفاده از سامانه واپایش الکترونیکی در هنگام شخم‌زنی با خاک ورز برگردان‌دار، لغزش را ۹ درصد کاهش داد. این امر منجر به سه درصد افزایش در سرعت پیشروی، ۱۱ درصد کاهش در عمق کار و کاهش شش درصدی مصرف سوخت در واحد سطح گردید (Chancellor & Zhang, 1989).

Ismail et al. (1981) نیز سامانه واپایش خودکار لغزش ارائه دادند که در آن از مبدل‌های فتوالکتریک برای اندازه‌گیری سرعت‌ها استفاده کردند. نتایج مزرعه‌ای نشان داد که در

در سامانه واپایش کشش مکانیکی نظارتی بر درصد لغزش چرخ‌ها وجود ندارد و سامانه‌های موجود قادر به واپایش هم‌زمان کشش و لغزش نیستند (Pranav et al., 2012). تحقیقات نشان می‌دهد که بیش از ۵۰ درصد کارورها در حین کار، برای جلوگیری از لغزش بیش از حد چرخ‌های محرک، مکرراً اهرم واپایش عمق را به‌صورت دستی تنظیم می‌کنند که این امر منجر به خستگی مفرط راننده و کاهش بازده عملیاتی می‌شود (Dwyer et al., 1974).

بنابراین یک سامانه واپایش الکترونیکی درصد لغزش بادقت مناسب، ارزان‌قیمت و سازگار با تراکتورهای ساخت داخل طراحی، توسعه و بر روی تراکتور MF285 نصب گردید. اهداف این تحقیق عبارتند از:

- ۱- طراحی و ساخت سامانه واپایش الکترونیکی درصد لغزش
- ۲- ارزیابی مزرعه‌ای و مقایسه عملکرد سامانه الکترونیکی با سامانه هیدرومکانیکی موجود بر روی تراکتور.

مواد و روش‌ها

سامانه واپایش الکترونیکی درصد لغزش

یک سامانه واپایش الکترونیکی درصد لغزش چرخ‌های محرک تراکتور، با بکارگیری شیر واپایش تناسبی از نوع چرخان و با قابلیت واپایش توسط موتور پله‌ای، طراحی و بر روی تراکتور مسی فرگوسن مدل ۲۸۵ نصب گردید. این سامانه شامل حسگرهای سرعت نظریه و واقعی تراکتور، واحد واپایش کننده، نمایشگر، شیر واپایش، موتور پله‌ای و درایور موتور پله‌ای است. کنترل کننده منطقی برنامه‌پذیر (PLC) شامل یک واحد CPU مدل CP1L-J14D و یک واحد ورودی آنالوگ مدل CPIW-AD041 می‌باشد. این پردازنده به دلیل داشتن قابلیت‌های مناسب و قیمت نسبتاً پایین انتخاب گردید. واحد CPU دارای هشت پایانه ورودی رقیمی و شش پایانه خروجی رقیمی و واحد ورودی آنالوگ دارای چهار پایانه ورودی است. واحد CPU، سیگنال حسگرهای سرعت را دریافت و مطابق برنامه نوشته شده، درصد لغزش چرخ‌های محرک تراکتور و سیگنال خطا را محاسبه می‌کند. یک صفحه نمایشگر لمسی ساخت شرکت امرن مدل NB5Q-TW00B برای نمایش مقادیر اندازه‌گیری شده و واردکردن مقادیر تنظیمی درصد لغزش به کار برده شد (شکل ۱).

سامانه مکانیکی راننده موقعی متوجه درصد لغزش چرخ‌ها شد که درصد لغزش بالای ۳۰ درصد بود و راننده مجبور بود در فرآیند واپایش عمق شخم دخالت کند. ولی در سامانه واپایش الکترونیکی، راننده هیچ‌گونه دخالتی در واپایش دستی اهرم واپایش کشش نداشت. در تحقیق دیگری (Ismail et al., 1983) سامانه قبلی را تصحیح و در آن به‌جای موتور الکتریکی از شیرهای سولنوئیدی استفاده کردند و عملکرد سه نوع سامانه (واپایش مکانیکی، واپایش درصد لغزش و واپایش ترکیبی درصد لغزش-نیرو) را در شرایط مزرعه‌ای ارزیابی کردند. مقایسه مستقیم عملکرد سامانه‌ها برای چهار سطح رطوبت مختلف نشان داد که سامانه واپایش درصد لغزش در واپایش نیروی کششی ضعیف عمل می‌کند، ولی نیروی کششی توسط سامانه واپایش کشش و سامانه واپایش ترکیبی به خوبی واپایش می‌شود. میانگین درصد لغزش در هر دو سامانه واپایش لغزش و ترکیبی خیلی نزدیک به سطح تنظیمی نگه داشته شد و بالاترین درصد لغزش در هنگام بکارگیری سامانه واپایش کشش به وجود آمد.

امروزه بیشتر تراکتورهای کشاورزی، بویژه تراکتورهای ساخت داخل دارای سامانه واپایش کشش هیدرومکانیکی هستند. در این سامانه از نیروی فشاری در ساق وسط یا نیروی کششی در بازوهای پایینی تراکتور به‌عنوان عامل کنترلی استفاده می‌شود و از یک حسگر فنری برای اندازه‌گیری نیروی کشش استفاده می‌شود. این فنر در بازوهای پایینی یا بازوی بالایی اتصال سه‌نقطه تراکتور تعبیه می‌شود. هنگامی که اپراتور، عمق شخم را از طریق اهرم واپایش ارتفاع (شخم) تنظیم می‌کند، یک محدوده نیروی کشش مناسب برای حسگر تعیین می‌شود. با تغییر در نیروهای وارد بر ادوات که ناشی از تغییر شرایط خاک است، نیروی کشش به طور خودکار از طریق تغییرات عمق شخم، در یک محدوده از پیش تعیین شده واپایش می‌گردد. واکنش سامانه‌های هیدرومکانیکی در برابر تغییرات شرایط خاک ضعیف (کند) است.

دلیل این امر را می‌توان این‌گونه بیان کرد که حسگر فنری در فرایند بارگذاری و باربرداری دچار پدیده هیستریزس (پس‌ماند) می‌شود که منجر به نرخ‌های متفاوت در بالابردن و پایین‌بردن ادوات در داخل خاک می‌گردد. همچنین مکانیزمی برای تنظیم حساسیت بالاروی سامانه هیدرومکانیکی وجود ندارد (Cowell and Len, 1967; Dwyer et al., 1974; Crolla and Pearson, 1975; Moradasgharloo et al., 2011).

شیر واپایش به همراه موتور پله‌ای در زیر و کنار صندلی راننده تراکتور نصب گردید (شکل ۳). جزئیات مربوط به طراحی و ساخت شیر واپایش چرخان و نحوه انتخاب موتور پله‌ای در مقاله‌ای که قبلاً به چاپ رسیده، شرح داده شده است (Ghods Azar and Moradinejad, 2022).

حسگر اندازه‌گیری سرعت واقعی

در این تحقیق، روش چرخ پنجم برای اندازه‌گیری سرعت پیشروی بکار گرفته شد. چرخ پنجم از طریق بازویی به صورت مفصلی طوری به بدنه تراکتور وصل شد که در پشت چرخ جلوی سمت چپ تراکتور قرار گیرد و مسیر چرخ جلو را دنبال کند و بتواند به راحتی در جهت عمودی جابه‌جا شود. بدین ترتیب چرخ پنجم امکان جابه‌جایی عمودی در هنگام عبور از پستی و بلندی‌های زمین را داشت.

برای اندازه‌گیری سرعت دورانی چرخ پنجم از یک حسگر چرخش‌سنج ۱۰۰ تپی استفاده شد. چرخش‌سنج توسط مکانیزمی به شکل U وارونه به چرخ پنجم متصل شد. در نصب حسگر چرخش‌سنج بر روی چرخ پنجم سعی شد، محور حسگر با محوری که به مرکز چرخ متصل شده، دقیقاً هم مرکز باشد. محور حسگر چرخش‌سنج و محور چرخ با یک لوله لاستیکی ضخیم و سفت به همدیگر متصل شدند (شکل ۴). سرعت واقعی تراکتور با استفاده از سیگنال‌های خروجی چرخش‌سنج از رابطه زیر محاسبه گردید:

$$V_a = \frac{P_s \times \pi D_5}{P_{rev} \times t} \quad (1)$$

P_s : تعداد تپ^۱ حسگر در مدت زمان مشخص

P_{rev} : تعداد تپ به ازای یک دور چرخ پنجم (۱۰۰ تپ)

D_5 : قطر چرخ پنجم (m)

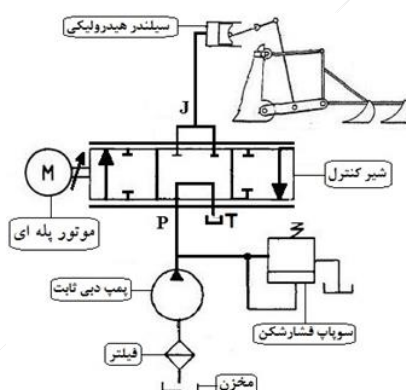
t : زمان (ثانیه)



شکل ۴- مجموعه چرخ پنجم



شکل ۱- اجزای واحد واپایش کننده سامانه الکترونیکی.



شکل ۲- تصویر سمبلیک شیر واپایش در سامانه هیدرولیک



شکل ۳- شیر واپایش الکترونیکی نصب شده در روی تراکتور

شیر واپایش در خروجی پمپ هیدرولیک نصب می‌شود و طرح آن به گونه‌ای است که سه حالت بالاروی، خنثی و پایین‌روی را فراهم می‌کند (شکل ۲). از یک موتور پله‌ای مدل سانپو با گشتاور ۱۳ کیلوگرم در سانتی متر و درایور دو گام مدل مونز آلمان جهت چرخاندن شیر واپایش استفاده گردید،

¹ Pulse

حسگر اندازه‌گیری سرعت نظریه

برای اندازه‌گیری سرعت دورانی چرخ‌های محرک از یک حسگر مغناطیسی حساس به آهن استفاده گردید. این حسگر توسط سوراخی که در پوسته دیفرانسیل ایجاد شد، دقیقاً عمود بر دندانه‌های چرخنده کرانویل نصب شد (شکل ۵). تعداد دندانه‌های چرخنده کرانویل ۳۵ عدد و نسبت دور کرانویل به دور چرخ‌ها ۴/۸ بود؛ بنابراین حسگر مغناطیسی به‌ازای یک دور چرخ‌های عقب تراکتور ۱۶۸ تپ تولید کرد. سرعت نظریه تراکتور با استفاده از سیگنال‌های خروجی حسگر مغناطیسی از رابطه زیر محاسبه گردید:

$$V_t = \frac{P_s \times \pi D_r}{P_{rev} \times t} \quad (2)$$

P_s : تعداد تپ حسگر در مدت زمان مشخص

P_{rev} : تعداد تپ به‌ازای یک دور چرخ عقب (۱۶۸ تپ)

D_r : قطر چرخ عقب (m)

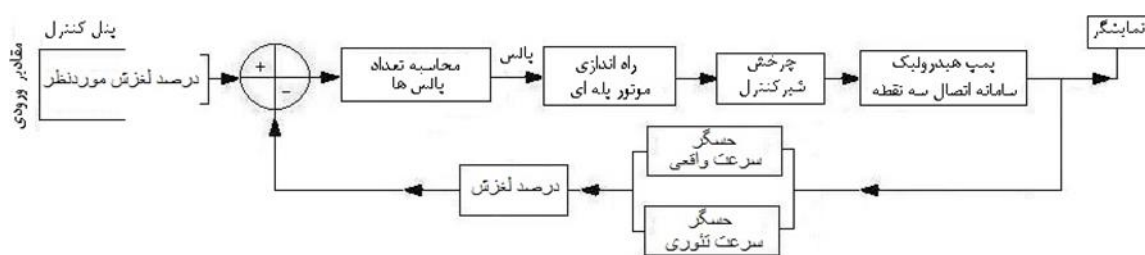
t : زمان (ثانیه)



شکل ۵- حسگر مغناطیسی

روش واپایش

دیاگرام بلوکی سامانه واپایش الکترونیکی در شکل ۶ نشان داده شده است. ابتدا درصد لغزش موردنظر و ناحیه مرگ در صفحه نمایشگر تنظیم می‌شوند. سیگنال حسگرهای سرعت پیشروی واقعی و نظریه توسط PLC دریافت و درصد لغزش واقعی در فواصل زمانی منظم و مشخص محاسبه می‌شود. در نرم‌افزار سامانه واپایش از واپایشی تناسبی استفاده شد. سیگنال خطای تناسبی به‌صورت اختلاف بین درصد لغزش واقعی و تنظیمی، محاسبه و با مقدار ناحیه مرگ (± 2 درصد) مقایسه می‌شود. اگر سیگنال خطا در محدوده مجاز (ناحیه مرگ) قرار داشته باشد، موتور پله‌ای عمل نمی‌کند. در صورتی که سیگنال خطا بزرگ‌تر از حد بالایی یا کوچک‌تر از حد پایینی ناحیه مرگ باشد، متناسب با سیگنال خطا، تعداد تپ موردنیاز جهت چرخش موتور پله‌ای محاسبه و توسط واحد خروجی رقمی به درایور موتور پله‌ای ارسال می‌شوند. موتور پله‌ای نیز مطابق با سیگنال فرمان، شیر واپایش را در جهت عقربه‌های ساعت یا عکس آن می‌چرخاند. با چرخش شیر واپایش و قرارگرفتن در وضعیت‌های بالاروی، خلاص و پایین روی، بازوهای اتصال سه‌نقطه جابه‌جا شده و از این طریق عمق شخم گاواهن طوری واپایش می‌شود تا درصد لغزش چرخ‌های محرک تراکتور در محدوده مجاز تنظیم شده، ثابت نگه داشته شود.



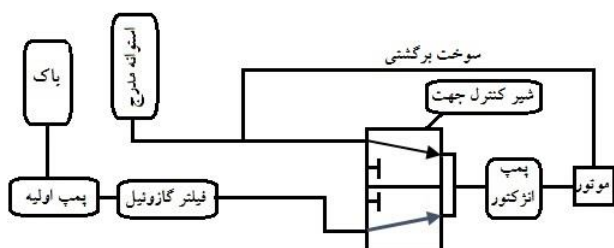
شکل ۶- دیاگرام بلوکی سامانه واپایش الکترونیکی

آزمون مزرعه‌ای

الکترونیکی و یک دستگاه گاواهن برگردان‌دار سه خیش یک‌طرفه استفاده گردید. در این پژوهش اثر سامانه واپایش در دو سطح (سامانه مکانیکی، سامانه واپایش الکترونیکی درصد لغزش)، سرعت پیشروی در چهار سطح (۲/۵، ۳/۵، ۴/۵، ۶/۲ کیلومتر در ساعت) و مقادیر تنظیمی در سه سطح مختلف (پایین (سطح ۱)، وسط (سطح ۲) و بالا (سطح ۳)) و با سه

آزمون‌های مزرعه‌ای در مزرعه دانشکده کشاورزی دانشگاه آزاد اسلامی واحد تبریز با خاک شنی لومی و میانگین رطوبت وزنی ۱۰ درصد بر مبنای وزن خشک انجام شد. برای انجام آزمایش‌های مزرعه‌ای از یک تراکتور مسی‌فرگوسن مدل ۲۸۵ تک دیفرانسیل مجهز به سامانه اندازه‌گیری و واپایش

یک داده به عنوان میانگین، اندازه گیری گردید. برای تجزیه و تحلیل آماری داده ها و تهیه جداول تجزیه واریانس و مقایسه میانگین ها از نرم افزار SAS استفاده شد و برای رسم نمودارها از نرم افزار Excel استفاده گردید. در صورت معنی دار شدن هر عامل آزمایشی، میانگین ها با حداقل تفاوت معنی داری (LSD) در سطح احتمال پنج درصد مقایسه شدند.

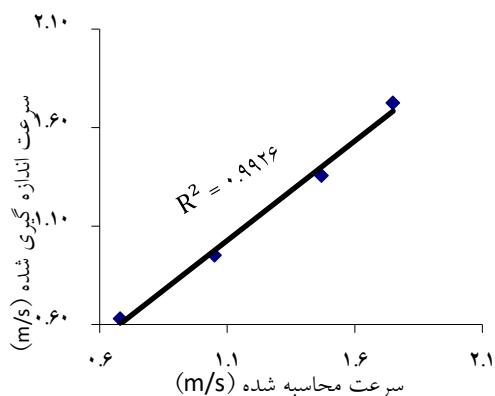


شکل ۷- شماتیک سامانه اندازه گیری سوخت مصرفی

نتایج و بحث

واسنجی حسگر اندازه گیری سرعت واقعی

برای واسنجی چرخ پنجم، در یک مسیر آسفالت مسطح ۵۰ متری، زمان پیمایش تراکتور توسط کرنومتر در دنده های سنگین مختلف (۱، ۲، ۳ و ۴) تراکتور مسی فرگوسن مدل MF285 و هر کدام با سه تکرار اندازه گیری شد. با تقسیم مسافت به زمان طی شده برای هر آزمایش، سرعت پیشروی واقعی محاسبه گردید. از طرف دیگر در حین آزمایش ها، سرعت اندازه گیری شده واقعی توسط چرخ پنجم در حافظه پردازشگر ثبت گردید. نتیجه واسنجی در شکل ۸ نشان می دهد که رابطه خطی با ضریب تبیین بالا بین سرعت اندازه گیری شده با چرخ پنجم و سرعت محاسبه شده از فرمول، وجود دارد و دقت چرخ پنجم برای اندازه گیری سرعت پیشروی مناسب است.



شکل ۸- واسنجی حسگر اندازه گیری سرعت واقعی

تکرار بر روی مصرف سوخت و درصد لغزش چرخ های محرک تراکتور بررسی گردید.

منظور از مقادیر تنظیمی در سامانه واپایش مکانیکی، سه وضعیت اهرم واپایش کشش و در سامانه واپایش الکترونیکی، سه سطح درصد لغزش است. به منظور انتخاب سطوح مختلف مقادیر تنظیمی در سامانه های واپایش الکترونیکی، ابتدا آزمایش های مزرعه ای با سامانه واپایش مکانیکی در سه موقعیت مختلف اهرم واپایش کشش انجام شد. موقعیت های اهرم واپایش کشش در روی قطاع کوادرانت علامت گذاری گردید. سپس باتوجه به درصد لغزش مشاهده شده در آزمایش های مزرعه ای، درصد لغزش متوسط مربوط به موقعیت های تنظیمی اهرم واپایش کشش (سه سطح مختلف) به ترتیب ۱۰٪، ۱۵٪، ۲۰٪ در نظر گرفته شد.

برای اندازه گیری سوخت مصرفی تراکتور در آزمون های مزرعه ای از یک مخزن استوانه ای مدرج و در مسیر بین فیلتر ثانویه و پمپ انژکتور از یک شیر واپایش جهت سه راهه دو وضعیتی استفاده شد. شکل شماتیک سامانه اندازه گیری سوخت در شکل ۷ نشان داده شده است. در این طرح، مخزن استوانه ای روی گل گیر چرخ عقب سمت راست راننده نصب شد که به دلیل داشتن ارتفاع زیاد، سوخت به راحتی به پمپ انژکتور می رسید. با قراردادن شیر واپایش جهت در یک وضعیت، سوخت مصرفی موتور از باک گازوئیل قطع و از مخزن استوانه ای تأمین شد و در وضعیت دیگر مسیر سوخت از استوانه قطع و سوخت مصرفی موتور از باک گازوئیل تأمین شد و در این وضعیت سوخت برگشتی انژکتورها، استوانه مدرج را پر می کرد. در آزمایش های مزرعه ای، روش کار به این صورت بود که قبل از هر مسیر آزمایش، استوانه مدرج توسط سوخت برگشتی انژکتور پر می شد و با شروع آزمایش، مسیر ارسال سوخت از مخزن تراکتور به پمپ انژکتور قطع و سوخت مصرفی از استوانه مدرج تأمین می شد. در موقع حمل و نقل نیز برای جلوگیری از سر ریز شدن استوانه مدرج و یا خاموش شدن تراکتور بایستی مرتباً وضعیت شیر واپایش تغییر داده می شد. برای اندازه گیری سوخت مصرفی در طول هر کرت دو تیرک به فاصله ۵۰ متر از یکدیگر نصب شدند. مقدار سوخت مصرفی تراکتور از اختلاف سطح سوخت استوانه، قبل و بعد از مسیر آزمایش، محاسبه گردید.

در تمامی آزمایش ها برای هر مسیر (کرت) آزمایشی، برای درصد لغزش در هر ثانیه یک داده اندازه گیری و میانگین داده ها توسط سامانه ذخیره شد و برای سوخت مصرفی نیز

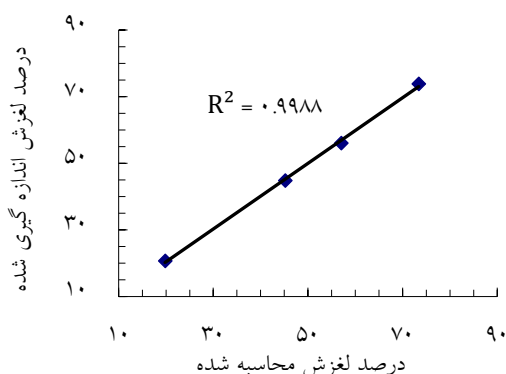
کشیده شد. تراکتور عقبی در حین آزمایش‌ها در یک دنده ثابت پایین قرار داشت و هر آزمایش سه بار تکرار شد. زمان لازم برای پیمایش ۵۰ متری در حالت بار و در حالت بی‌باری اندازه‌گیری شد. در ادامه درصد لغزش از فرمول زیر محاسبه شد:

$$S = \left(1 - \frac{T_t}{T_a}\right) \times 100 \quad (۴)$$

T_t : زمان لازم برای پیمایش مسیر ۵۰ متری در حالت بی‌باری

T_a : زمان لازم برای پیمایش مسیر ۵۰ متری در حالت بار

همچنین در حین آزمایش‌ها، درصد لغزش اندازه‌گیری شده توسط سامانه اندازه‌گیری در حافظه پردازشگر ذخیره گردید. نمودار واسنجی نشان داد که ضریب تبیینیابی بین درصد لغزش اندازه‌گیری شده و محاسبه شده وجود دارد (شکل ۱۰).

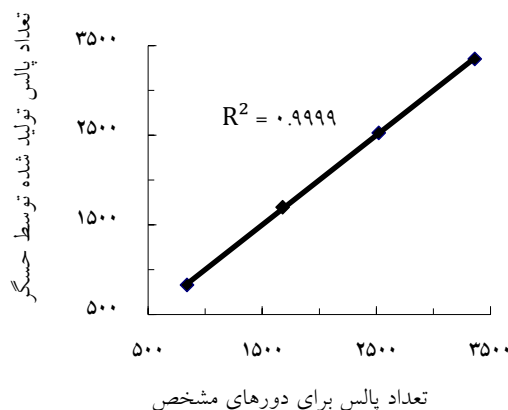


شکل ۱۰- نمودار واسنجی سامانه اندازه‌گیری درصد لغزش

برای ارزیابی سامانه اندازه‌گیری درصد لغزش در شرایط مزرعه‌ای، ابتدا تراکتور به همراه گاوآهن متصل شده، در حالیکه گاوآهن در موقعیت کاملاً بالا قرار داشت، در یک مسیر ۱۰۰ متری رانده شد و این کار در چهار سرعت مختلف، سه بار تکرار شد. آزمایش‌ها نشان داد که درصد لغزش اندازه‌گیری شده در مزرعه تقریباً ۳ درصد است. این مقدار به‌عنوان نقطه صفر (مبنای) در نظر گرفته شد. وجود این مقدار درصد لغزش در حالت بی‌باری در مزرعه ممکن است به دلیل تغییر شعاع غلتشی دینامیکی چرخ‌های عقب باشد درحالی‌که شعاع غلتشی اعمال شده در برنامه در شرایط بی‌باری (بدون گاوآهن) اندازه‌گیری شده بود. برای ارزیابی دقیق‌تر سامانه اندازه‌گیری، آزمایش‌هایی در حین شخم‌زنی نیز انجام شد. آزمایش‌ها در

واسنجی حسگر اندازه‌گیری سرعت نظریه

برای واسنجی این حسگر، تعداد تپ شمارش شده توسط حسگر به‌ازای تعداد دورهای مشخص چرخ عقب (۵، ۱۰، ۱۵ و ۲۰ دور) ثبت گردید. نتایج واسنجی در شکل ۹ نشان می‌دهد که تعداد تپ‌های شمارش شده توسط حسگر و تعداد تپ‌های واقعی (تعداد دندانه‌ها به‌ازای دورهای مشخص) تقریباً برابرند و این بیانگر این است که دقت حسگر برای اندازه‌گیری سرعت دورانی چرخ ایدئال است.



شکل ۹- نمودار واسنجی حسگر مغناطیسی

واسنجی سامانه اندازه‌گیری درصد لغزش چرخ‌های محرک

سیگنال‌های خروجی از حسگرها به پردازشگر مرکزی ارسال می‌شوند و پردازشگر مطابق برنامه نوشته در حافظه آن، با استفاده از رابطه زیر، درصد لغزش چرخ‌های محرک محاسبه می‌کند:

$$S = \left(1 - \frac{V_a}{V_t}\right) \times 100 \quad (۳)$$

V_a : سرعت پیشروی واقعی (m/s)

V_t : سرعت پیشروی نظریه (m/s)

S: درصد لغزش (%)

ابتدا جهت اطمینان از صحت کارکرد سامانه اندازه‌گیری درصد لغزش، تراکتور در حالت بدون بار در یک مسیر آسفالتی ۱۰۰ متری رانده شد و این کار در چهار سرعت مختلف، سه بار تکرار شد. مقادیر درصد لغزش اندازه‌گیری شده توسط سامانه اندازه‌گیری، نشان داد که درصد لغزش روی سطح سخت در حالت بی‌باری نزدیک به صفر است. برای ارزیابی دقیق‌تر سامانه اندازه‌گیری، تراکتور دیگری توسط این تراکتور در یک مسیر ۵۰ متری آسفالتی در چهار سرعت مختلف،

کمتر از ۲ درصد است (جدول ۱). تغییرات شعاع غلتشی در شرایط مزرعه به دلیل تغییر در میزان بار عمودی چرخ و فرو رفتن چرخ در خاک اجتناب‌ناپذیر است و این یکی از دلایل اصلی خطای ۲ درصدی مشاهده شده است.

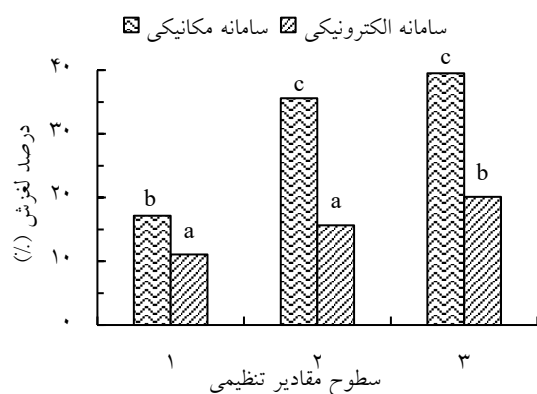
چهار سرعت پیشروی مختلف (چهار دنده‌سنگین) و با سه تکرار صورت گرفت. طول هر مسیر آزمایش ۱۰۰ متر بود و تمام آزمایش‌ها در یک موقعیت ثابت اهرم واپایش کشش روی کوادرنات اجرا گردید. نتایج نشان داد که خطای اندازه‌گیری این سامانه برای سرعت‌های ۲/۵ تا ۶/۲ کیلومتر در ساعت

جدول ۱- ارزیابی مزرعه‌ای سامانه اندازه‌گیری درصد لغزش

سرعت پیشروی (km/h)	درصد لغزش محاسبه شده (%)	درصد لغزش اندازه‌گیری شده (%)
۲/۵ (دنده سنگین ۱)	۳۱/۱	۳۰/۲
۳/۵ (دنده سنگین ۲)	۱۹/۵	۲۰/۱
۴/۵ (دنده سنگین ۳)	۲۸/۳	۲۷/۷
۶/۲ (دنده سنگین ۴)	۲۸/۶	۲۸

درصد لغزش

افزایش درصد لغزش چرخ‌های محرک می‌شود. این نتایج با نتایج دیگران در این زمینه مطابقت دارد (Ismail *et al.*, 1981). لازم به ذکر است که سامانه الکترونیکی به دلیل داشتن حساسیت مناسب، به موقع در مقابل تغییرات درصد لغزش، واکنش نشان داده و باعث می‌شود تا درصد لغزش با افزایش مقادیر تنظیمی، تغییرات قابل ملاحظه‌ای نداشته باشد و در محدوده مجاز نگه داشته شود.



شکل ۱۱- مقایسه میانگین درصد لغزش در تیمارهای مختلف سامانه و مقادیر تنظیمی

سوخت مصرفی

تجزیه واریانس داده‌های سوخت مصرفی در سطوح مختلف نوع سامانه، سرعت پیشروی و مقادیر تنظیمی در جدول ۲ نشان می‌دهد که تمامی فاکتورها و اثر متقابل دوگانه و سه گانه آن‌ها تاثیر معنی‌داری بر میزان سوخت مصرفی در سطح احتمال ۱٪ دارند.

تجزیه واریانس داده‌های درصد لغزش در سطوح مختلف نوع سامانه، سرعت پیشروی و مقادیر تنظیمی در جدول ۲ نشان می‌دهد که اثرهای اصلی و اثر متقابل سامانه و مقادیر تنظیمی تاثیر معنی‌داری بر روی میزان درصد لغزش در سطح احتمال ۱٪ دارند ولی سایر موارد معنی‌دار نیستند. مقایسه میانگین درصد لغزش با آزمون LSD در سطح احتمال ۵٪ در شکل ۱۱ نشان می‌دهد که سامانه واپایش الکترونیکی درصد لغزش، در حداقل مقدار تنظیمی کمترین مقدار درصد لغزش و سامانه مکانیکی در حداکثر مقدار تنظیمی، بیشترین مقدار درصد لغزش را دارد و این دو میانگین اختلاف معنی‌داری در سطح احتمال ۵٪ دارند. بین میانگین‌های درصد لغزش در سامانه الکترونیکی در مقایسه با سامانه مکانیکی در تمامی مقادیر تنظیمی مشابه، کاهش معنی‌داری در سطح احتمال ۵٪ وجود دارد و این بیانگر آن است که سامانه واپایش مکانیکی در واپایش درصد لغزش، در مقایسه با سامانه الکترونیکی ضعیف عمل کرده است. چون در سامانه واپایش مکانیکی نظارتی بر درصد لغزش چرخ‌های محرک وجود ندارد. این نتیجه با نتایج تحقیق دیگران همخوانی دارد (Gupta *et al.*, 2019; Shafaei *et al.*, 2018b; Pranav *et al.*, 2012; Chancellor & Zhang, 1989).

از شکل ۱۱ پیداست که با افزایش مقادیر تنظیمی، صرف‌نظر از نوع سامانه واپایش، درصد لغزش افزایش یافته است ولی شیب افزایش در سامانه‌ها متفاوت است. باتوجه‌به اینکه افزایش مقادیر تنظیمی باعث می‌شود تا نیروی کشش لازم برای گاوآهن افزایش یابد، بنابراین افزایش نیروی کشش باعث

کاهش داده است. بکارگیری سامانه الکترونیکی، سوخت مصرفی را در حداکثر مقدار تنظیمی و سرعت های ۲/۵، ۳/۵، ۴/۵ و ۶/۲ کیلومتر در ساعت به ترتیب ۲۸، ۲۹ و ۴۴ درصد کاهش داده است. در هر دو سامانه با افزایش سرعت پیشروی در تمامی مقادیر تنظیمی، سوخت مصرفی کاهش یافته است (جدول ۳).

مقایسه میانگین سوخت مصرفی در تیمارهای مختلف سامانه، مقادیر تنظیمی و سرعت پیشروی نشان می‌دهد که سامانه مکانیکی در کمترین سرعت و حداکثر مقدار تنظیمی، بیشترین مصرف سوخت را داراست. بین مقادیر سوخت مصرفی دو سامانه در اکثر تیمارهای مشابه، اختلاف معنی داری در سطح احتمال ۵٪ وجود دارد، طوری که سامانه الکترونیکی در مقایسه با سامانه مکانیکی مصرف سوخت را

جدول ۲- نتایج تجزیه واریانس سامانه‌های واپایش

F			
منابع تغییرات	درجه آزادی	درصد لغزش چرخ های محرک	سوخت مصرفی
تکرار	۲	۱/۴۴ ^{ns}	۰/۸۴ ^{ns}
سامانه	۱	۱۱۸/۴۱ ^{**}	۲۳۰/۸۶ ^{**}
سرعت	۳	۵/۸۱ ^{**}	۷۰/۹۷ ^{**}
مقادیر تنظیمی	۲	۴۵/۵۸ ^{**}	۱۱۰/۷۱ ^{**}
سامانه × سرعت	۳	۰/۸۵ ^{ns}	۵/۲۷ ^{**}
سامانه × مقادیر تنظیمی	۲	۱۰/۵۷ ^{**}	۳۳/۵۸ ^{**}
سرعت × مقادیر تنظیمی	۶	۱/۱۴ ^{ns}	۵/۹۷ ^{**}
سامانه × سرعت × مقادیر تنظیمی	۶	۰/۶۲ ^{ns}	۴/۰۶ ^{**}

ns اثر معنی داری بر درصد لغزش ندارد.

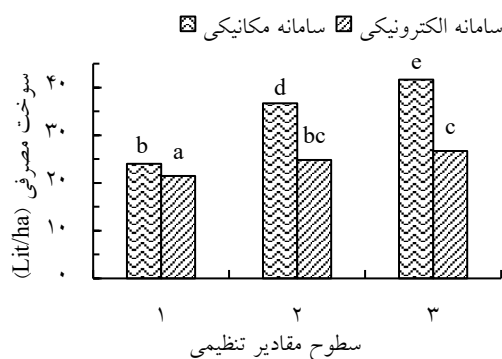
** اثر معنی داری بر درصد لغزش در سطح احتمال ۱٪ دارد.

واپایش الکترونیکی، در حداکثر سرعت پیشروی کمترین مقدار مصرف سوخت را دارند. همچنین از نمودار پیداست که با افزایش سرعت در هر دو سامانه واپایش، مقدار سوخت مصرفی کاهش یافته است. این نتایج با نتایج گزارش شده بوسیله دیگران مطابقت دارد (Naghavi et al, 2006; Abbaspour-Gilandeh et al., 2005). دلیل این تاثیر را می توان این گونه بیان کرد که با افزایش سرعت پیشروی تراکتور، تراکتور در مدت زمان کمتری واحد سطح مزرعه را طی می کند و از آنجا که دور موتور در هنگام شخم زنی توسط گاز دستی، ثابت نگه داشته می شود و افزایش یا کاهش سرعت پیشروی با تعویض دنده صورت می گیرد، در نتیجه مقدار سوخت مصرفی در واحد سطح کاهش می یابد. همچنین بین میانگین های این دو سامانه در تمامی سرعت ها اختلاف معنی دار در سطح ۵٪ وجود دارد و با استفاده از سامانه الکترونیکی به میزان ۲۰ درصد، ۲۶ درصد، ۴۰ درصد و ۳۲ درصد به ترتیب در سرعت های ۲/۵، ۳/۵، ۴/۵ و ۶/۲ کیلومتر در ساعت در مصرف سوخت صرفه جویی شده است. نتایج تحقیقات دیگران نیز نشان داد که مصرف سوخت در سامانه واپایش الکترونیکی درصد لغزش در مقایسه با سامانه واپایش مکانیکی (بدون واپایش

سامانه های واپایش مکانیکی کشش تراکتورها براساس ترکیب نیرو و عمق کار طراحی شده اند. مشاهدات مزرعه ای نشان داد که این سامانه به خوبی قادر به واپایش هم زمان عمق شخم و نیرو نمی باشد. به عبارت دیگر در این سامانه ها، این دو فاکتور با یکدیگر هماهنگ و متناسب عمل نمی کنند. به عنوان مثال در نقاطی از مزرعه که خاک نرم تری داشت، گاواهن بیش از حد به داخل خاک نفوذ می کرد و در این شرایط راننده برای رفع مشکل مجبور بود اهرم واپایش کشش را دستی بالا آورد تا گاواهن از عمق زیادتر به عمق موردنظر بالا بیاید. به دلیل وجود همین مشکل، اکثر رانندگان بر این باورند که در هنگام شخم زنی بایستی اهرم واپایش کشش را به صورت دستی واپایش کنند (Dwyer et al., 1974; Ismail et al., 1981). بنا به دلایل گفته شده در بالا، سوخت مصرفی سامانه مکانیکی در بعضی موارد اختلاف زیادی با سامانه الکترونیکی دارد.

مقایسه میانگین سوخت مصرفی در تیمارهای مختلف سامانه و سرعت با استفاده از آزمون LSD در سطح ۵٪ در شکل ۱۲ نشان می دهد که سامانه واپایش مکانیکی در حداقل سرعت پیشروی، بیشترین مقدار مصرف سوخت و سامانه

سامانه در تمامی مقادیر تنظیمی اختلاف معنی دار در سطح احتمال ۵٪ وجود دارد، طوری که سامانه الکترونیکی در مقایسه با سامانه مکانیکی مصرف سوخت را کاهش داده است. همچنین از شکل ۱۳ مشاهده می‌شود که با افزایش مقادیر تنظیمی صرف‌نظر از نوع سامانه، میزان سوخت مصرفی افزایش یافته است. چون با افزایش مقادیر تنظیمی، نیروی کششی موردنیاز گاوآهن افزایش و به تبع آن مقدار سوخت مصرفی نیز افزایش می‌یابد (Soltani & Loghavi, 2007). البته این روند افزایشی برای سامانه الکترونیکی کمتر و برای سامانه واپایش مکانیکی، بیشتر است.



شکل ۱۳- مقایسه میانگین سوخت مصرفی دو سامانه در مقادیر تنظیمی متفاوت

نتیجه‌گیری

۱- نتایج واسنجی نشان داد که حسگرهای سامانه اندازه‌گیری درصد لغزش دقت خوبی دارند. همچنین رابطه خطی با ضریب تبیین بالا بین مقادیر درصد لغزش اندازه‌گیری شده توسط سامانه و محاسبه شده با فرمول در سطح آسفالت وجود داشت و خطای اندازه‌گیری در مزرعه تقریباً دو درصد بود.

۲- میانگین‌های درصد لغزش در موقع بکارگیری سامانه الکترونیکی در تمامی مقادیر تنظیمی مشابه در مقایسه با سامانه مکانیکی کاهش معنی‌داری داشت و این امر به کاهش میانگین سوخت مصرفی سامانه الکترونیکی در تمامی مقادیر تنظیمی مشابه شد.

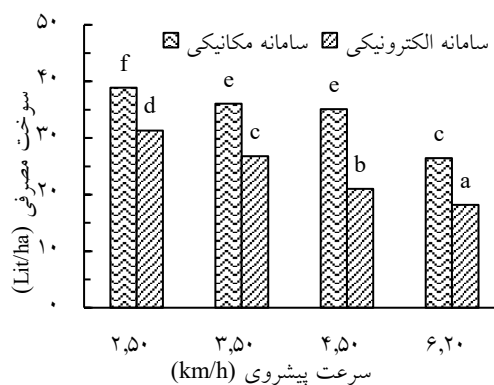
۳- آزمایشات مشاهده‌ای در مزرعه نشان داد که به دلیل قابل تنظیم بودن حساسیت بالاروی در سامانه الکترونیکی، سامانه واپایش به موقع در مقابل تغییرات شرایط خاک واکنش نشان داد و نیازی به دخالت راننده برای واپایش وسیله نبود. ولی در سامانه مکانیکی در بعضی موارد راننده مجبور بود در واپایش عمق شخم دخالت کند.

الکترونیکی) به میزان قابل توجهی کاهش یافته است که موید نتیجه این تحقیق می‌باشد (Shafaei *et al.*, 2018b; Pranav *et al.*, 2012; Chancellor & Zhang, 1989).

جدول ۳- مقایسه میانگین سوخت مصرفی بر حسب لیتر در هکتار در تیمارها با آزمون LSD در سطح ۵٪

سرعت پیشروی (km/h)	سطوح مقادیر تنظیمی	مکانیکی	سامانه الکترونیکی
۲/۵	۱	۳۵/۳۳ ^{bc}	۲۹ ^{efg}
	۲	۴۳ ^a	۳۱/۳۳ ^{cdef}
	۳	۴۶/۷۵ ^a	۳۳/۶۶ ^{bcd}
۳/۵	۱	۲۴/۶۶ ^{ghi}	۲۳ ^{hij}
	۲	۴۳/۳۳ ^a	۲۷/۳۳ ^{fgh}
	۳	۴۲/۳۳ ^a	۳۰ ^{def}
۴/۵	۱	۱۸/۶۶ ^{kl}	۱۷/۶۶ ^{kl}
	۲	۳۸ ^b	۲۲ ^{ghi}
	۳	۴۱/۶۶ ^a	۲۳/۳۳ ^{gh}
۶/۲	۱	۱۷/۳۳ ^{kl}	۱۶/۱۶ ^l
	۲	۲۷/۵ ^{fgh}	۱۸/۶۶ ^{kl}
	۳	۳۵/۳۳ ^{bc}	۱۹/۷۳ ^{ijk}

* میانگین‌های دارای حروف مشترک از نظر آماری اختلاف معنی‌داری ندارند.



شکل ۱۲- مقایسه میانگین سوخت مصرفی دو سامانه در سرعت‌های متفاوت

مقایسه میانگین سوخت مصرفی دو سامانه در مقادیر تنظیمی با آزمون LSD در سطح ۵٪ در شکل ۱۳ نشان می‌دهد که سامانه واپایش مکانیکی در حداکثر مقدار تنظیمی، بیشترین مقدار سوخت مصرفی و سامانه واپایش الکترونیکی درصد لغزش در حداقل مقدار تنظیمی، کمترین مقدار مصرف سوخت را داراست و بین این دو مقدار اختلاف معنی‌داری در سطح ۵٪ مشاهده می‌شود. بین مقادیر سوخت مصرفی دو

- Burt, E.C., & Bailey, A.C. (1982). Load and inflation pressure effects on tires. *Transaction of ASABE*, 25(4), 881–884.
- Chancellor, W. & Zhang, N. (1989). Automatic Wheel-Slip Control for Tractors. *Transaction of ASABE*, 32(1), 17-22. doi: [10.13031/2013.30956](https://doi.org/10.13031/2013.30956)
- Cowell, P.A., & Len, S.C. (1967). Field performance of tractor draught control system. *Journal of Agricultural Engineering Research*, 12(3), 205–221. doi: [10.1016/S0021-8634\(67\)80020-9](https://doi.org/10.1016/S0021-8634(67)80020-9)
- Crolla, D.A., & Pearson, G. (1975). The response of tractor draught controls to random variations in draught. *Journal of Agricultural Engineering Research*, 20(2), 181–197. doi: [10.1016/0021-8634\(75\)90085-2](https://doi.org/10.1016/0021-8634(75)90085-2)
- Dwyer, M. J., Crolla, D. A., & Pearson, G. (1974). An investigation of the potential for improvement of tractor draught controls. *Journal of Agricultural Engineering Research*, 19(2), 147-165. doi: [10.1016/0021-8634\(74\)90029-8](https://doi.org/10.1016/0021-8634(74)90029-8)
- Ghods Azar, A. & Moradinejad, N. (2022). Design, Construction and Evaluation of the Control Valve with Capable of Installing at the Pump Outlet of the MF 285 Tractor. *Journal of Agricultural Mechanization*, 6(4), 47-56. (In Persian). doi: [10.22034/jam.2022.14282](https://doi.org/10.22034/jam.2022.14282)
- Grevis-James, I.W., DeVoe, D. R., Bloome, P. D., & Batchelder, D. G. (1981). Microcomputer Based Data Acquisition System for Tractors. ASABE Paper No. 81-1578, St. Joseph, Michigan. doi: [10.13031/2013.34004](https://doi.org/10.13031/2013.34004)
- Gupta, C., Tewaria, V. K., Ashok Kumar, A., & Shrivastava, P. (2019). Automatic tractor slip-draft embedded control system. *Computer and Electronic in Agriculture*, 165, 1-11. doi: [10.1016/j.compag.2019.104947](https://doi.org/10.1016/j.compag.2019.104947)
- Ismail, S. M., Singh, G. & Gee-Clough, D. (1981). A preliminary Investigation of a Combined Slip and Draught Control for Tractors. *Journal of Agriculture Engineering Research*, 26(4), 293-306. doi: [10.1016/0021-8634\(81\)90071-8](https://doi.org/10.1016/0021-8634(81)90071-8)
- Ismail, S. M., Singh, G. & Gee-Clough, D. (1983). Comparison of the field performance of three implements control systems for a tractor. *Journal of Agriculture Engineering Research*, 28(6), 521-536. doi: [10.1016/0021-8634\(83\)90116-6](https://doi.org/10.1016/0021-8634(83)90116-6)
- Jurek, R. L., & Newendorp, B. C. (1983). In-Field Fuel Efficiency Comparisons of Various John Deere Tractors. ASABE Paper No. 83-1563, St. Joseph, Michigan.
- Khalilian, A., Hale, S., Hood, C., Garner, T., & Dodd, R. (1989). Comparison of Four Ground Speed Measurement Techniques. ASABE Paper No. 89-1040, St. Joseph, Michigan.
- Kovacev, I., Kosutic, S., Jejeic, V., Copek, K., Gospodarcic, Z., & Pliestic, S. (2008). Impact of electronic-hydraulic hitch control on rational exploitation of tractor in ploughing. *Strojarsstvo*, 50(5), 287–294.

دسترسی به داده‌ها

همه اطلاعات و نتایج در متن مقاله گزارش شده است.

اصول اخلاقی

نویسندگان اصول اخلاقی را در انجام و انتشار این مقاله رعایت نموده‌اند و این موضوع مورد تأیید همه آنها است.

تضاد منافع نویسندگان

نویسندگان اعلام می‌کنند که هیچ‌گونه منافع مالی رقابتی یا روابط شخصی شناخته شده‌ای که ممکن است بر کار گزارش شده در این مقاله تأثیر گذاشته باشد، ندارند.

حمایت مالی

این مقاله از طرح تحقیقاتی که با بودجه پژوهشی و حمایت مالی دانشگاه آزاد اسلامی واحد تبریز به انجام رسیده است، استخراج شده است.

منابع

- Abbaspour-Gilandeh, Y., Khalilian, A., Alimardani R., Keyhani A. R., & Saadati S. H. (2005). A Comparison of uniform-depth and variable-depth tillage as affected by travel speed and soil moisture. *Journal of Iranian Agricultural Science*, 37(4), 473-483. (In Persian).
- Ashok Kumar, A., Tewari, V.K., Chanchal, G., & Pareek, C.M. (2017). A device to measure wheel slip to improve the fuel efficiency of offroad vehicles. *Journal of Terramechanics*, 70, 1–11. <http://dx.doi.org/10.1016/j.jterra.2016.11.002>
- Anthonis, J., Mouazen, A. M., Saeys, W. & Ramon, H. (2004). An automatic depth control system for online measurement of spatial variation in soil compaction, part 3: design of depth control system. *Biosystems Engineering*, 89(1), 59–67. <https://doi.org/10.1016/j.biosystemseng.2004.06.013>
- ASAE Standard, 1983. Uniform Terminology for Traction of Agricultural Tractors. Self-Propelled Implements, and Other Traction and Transport Devices, S296.2, ASABE Standards. St Joseph, MI.
- Ayers, P.D., Varma, K.V., & Karim, M. N. (1989). Design and analysis of electrohydraulic draft control system. *Transaction of ASABE*, 32 (6), 1853–1855. doi: [10.13031/2013.31234](https://doi.org/10.13031/2013.31234)
- Bhondave, B., Ganesan, T., Varma, N., Renu, R., & Sabarinath, N. (2017). Design and development of electro hydraulics hitch control for agricultural tractor. *SAE Int. J. Commer. Veh.* 10 (1), 405–410. <https://doi.org/10.4271/2017-26-0227>
- Brixius, W.W., & Wismer, R. D. (1978). The Role of Slip in Traction, ASABE Paper No. 78-1538.

- Radar Methods. ASABE Paper No. 76-1070, St. Joseph, Michigan.
- Wiegard, G. K. & Hanks, T. W. (1985). Vehicle with control system having operator-actuable switch for storing parameter signal value to control vehicle-connected implement raising and lowering structure. US Patent No: 4,508,176, from [http:// www.uspto.gov](http://www.uspto.gov).
- Zoz, F. M. (1972). Predicting tractor field performance. Transaction of ASABE, 15(2), 249-255. doi: [10.13031/2013.37878](https://doi.org/10.13031/2013.37878)
- Lee, J., Yamazaki, M., Oida, A., Nakashima, H., & Shimizu, H., 2000. Field performance of proposed foresight tillage depth control system for rotary implements mounted on an agricultural tractor. Journal of Terramechanics, 37(2), 99–111. doi: [10.1016/S0022-4898\(99\)00017-8](https://doi.org/10.1016/S0022-4898(99)00017-8).
- Lyne., P.W & P. Meiring. 1977. A wheel slip meter for traction studies. Transaction of ASABE, 20(2): 238-242. doi: [10.13031/2013.35532](https://doi.org/10.13031/2013.35532)
- Moradasgharloo, N., Minaei, S., Borgheei, A., & Darvish, F. (2010). Comparison of the field performance of two automatic draft control systems on a MF-399 tractor. Iranian Journal of Biosystem Engineering (IJBSE), 41(2), 97-104. (In Persian). doi: [20.1001.1.20084803.1389.41.2.1.2](https://doi.org/20.1001.1.20084803.1389.41.2.1.2)
- Naghavi, G., Khoshtaghaza, M. & Minaeae, S. (2006). The effect of ground speed and ballasting on wheel slippage and fuel consumption of two-wheel drive ITM 285 Tractor. Journal of Agricultural Science, 12(3), 694-701. (In Persian).
- Osinenko, P. V., Geissler, M., & Herlitzius, T. (2015). A method of optimal traction control for farm tractors with feedback of drive torque. Biosystems Engineering, 129, 20–33. <https://doi.org/10.1016/j.biosystemseng.2014.09.009>
- Pranav, P. K., Tewari, V. K., Pandey, K. P., & Jha, K. R. (2012). Automatic wheel slip control system in field performance for 2WD tractors. Computer and Electronic in Agriculture, 84, 1–6. doi: [10.1016/j.compag.2012.02.002](https://doi.org/10.1016/j.compag.2012.02.002).
- Qiaolian, D., & Xuhui, C. (2014). Design on control system for electro-hydraulic hitch equipment of tractor. Adv. Mater. Res. 945(1), 1513–1516.
- Raheman. H, & S.K. Jha. (2007). Wheel slip measurement in 2WD tractor. Journal of Terramechanics, 44, 89-94. doi: [10.1016/j.jterra.2006.03.001](https://doi.org/10.1016/j.jterra.2006.03.001).
- Reed, J., & Turner, P.E. (1993). Slip Measurement Using Dual Radar Guns. ASABE/CASE, Paper No. 93-1031.
- Shafaei, S. M., Loghavi, M., & Kamgar, S. (2018a). Development and implementation of a human machine interface-assisted digital instrumentation system for high precision measurement of tractor performance parameters. Engineering in Agriculture, Environment and Food. <https://doi.org/10.1016/j.eaef.2018.08.006>.
- Shafaei, S. M., Loghavi, M., & Kamgar, S. (2018). A practical effort to equip tractor-implement with fuzzy depth and draft control system. Engineering in Agriculture, Environment and Food. <https://doi.org/10.1016/j.eaef.2018.12.008>
- Soltani, A. & Loghavi, M. (2007). The effect of axle load and draft load on fuel consumption and tractive efficiency of two tractors with 4- bottom plow in tillage operation. Environment and Agricultural Science, 40(1), 125-135. (In Persian)
- Stuchly, S. S., Townsend, J. S., & Thansandote, A. (1976). Travel Reduction Measurement by Doppler

