

تحلیل مهم‌ترین عوامل مدیریتی اثرگذار بر بازده انرژی کل ترکیب تراکتور- خاک‌ورز از طریق پایش لحظه‌ای پارامترهای عملکرد

نواب کاظمی^{*۱} - مرتضی الماسی^۲ - هوشنگ بهرامی^۳ - محمد جواد شیخ داوودی^۴ - موسی مسگرباشی^۵

تاریخ دریافت: ۹۲/۹/۱

تاریخ پذیرش: ۹۲/۱۱/۵

چکیده

بازده انرژی کل تراکتور شاخصی مهم در مصرف انرژی در عملیات خاک‌ورزی است. برای اندازه‌گیری دقیق و هم‌زمان این فاکتور و سایر عوامل مؤثر بر آن، ابتدا تراکتور مسی فرگوسن ۳۹۹ را به انواع حسگرها و واحد جمع‌آوری اطلاعات تجهیز نموده به‌طوری‌که پارامترهای میزان مصرف سوخت، سرعت پیشروی، سرعت خطی و بکسواد چرخ‌های محرک و سرش چرخ‌های متحرک تراکتور، دور موتور، نیرو و توان کششی را طی اجرای عملیات دیسک‌زنی، با سرعت داده‌برداری ۱۰۰۰ داده در ثانیه اندازه‌گیری و به‌صورت بی‌سیم تا ۱/۵ کیلومتر بر روی کامپیوتر کاربر نمایش و هم‌زمان با فرمت اکسل ذخیره می‌شود. سخت‌افزار به کار رفته و طراحی برنامه به زبان CSHARP به گونه‌ای است که پایش هم‌زمان بر تغییرات پارامترهای عملکردی و ذخیره‌سازی برای کاربران در فواصل دورتر از طریق اینترنت نیز مقدور است. سپس با اجرای طرح آزمایشی فاکتوریل در قالب طرح کرت‌های خرد شده، سه عامل مهم مدیریتی سنگین‌سازی، انتخاب دنده و حالت محور محرک مورد بررسی قرار گرفت و با روش‌های تجزیه واریانس، پس از واریانس و تجزیه علیت تحلیل گردید. نتایج نشان داد، استفاده از تجهیزات الکترونیک و پایش از راه دور داده‌ها در شرایط کاملاً واقعی و دقیق با تعداد بسیار بالای نمونه‌برداری (تا هر میلی‌متر پیشروی تراکتور یک داده) بوده که موجب کسب نتایج قابل اعتماد است. همچنین تجزیه علیت حاکی از معرفی سه پارامتر درصد بکسواد، مصرف سوخت و درصدی از توان لازم معادل محور تواندهی تراکتور به‌عنوان اثرگذارترین پارامترها بر بازده انرژی کل ترکیب تراکتور - خاک‌ورز است و نتایج تجزیه واریانس نشان می‌دهد اثرات عوامل دنده و محور محرک در سطح ۱٪ معنی‌دار است اما سنگین‌سازی، تأثیر معنی‌داری بر بازده انرژی کل تراکتور ندارد.

واژه‌های کلیدی: بازده انرژی کل، بی‌سیم، پایش، حسگر، مصرف سوخت

مقدمه

تراکتور نیز به‌عنوان اصلی‌ترین ماشین کشاورزی ۵۰-۳۵ درصد توان مزرعه را تأمین می‌کند لذا اعمال مدیریت صحیح انتخاب ماشین و حرکت در راستای کشاورزی دقیق موجب کاهش نهاده‌های مصرفی، انرژی و هزینه‌ها می‌گردد.

محققین افزایش بازده انرژی کل^۶ ترکیب تراکتور- ادوات و تطبیق درست تراکتور با ماشین‌های کشاورزی را از جمله راه‌های مؤثر در کاهش مصرف سوخت می‌دانند. طبق تعریف، بازده انرژی کل، نسبت انرژی منتقل شده از طرف تراکتور برای راه‌اندازی ادوات، به معادل انرژی سوخت مصرفی مورد نیاز برای انجام عملیات است (Alluvino et al., 2011).

همان‌گونه که بین تراکتور و ادوات در مزرعه جهت بهینه کردن عملکرد متأثر از دقت راننده در به‌کارگیری آن دسته از عملگرها یا تصمیم‌گیری‌هایی است که در اختیار دارد. از جمله؛ دور موتور، دنده و

در بخش کشاورزی به‌طور متوسط میزان انرژی مصرفی برای تولید محصولات زراعی از ۱۷/۴ گیگاژول در هکتار در سال ۱۹۷۵ تا ۴۷/۴ گیگاژول در هکتار در سال ۲۰۰۰ رسیده است (Burhan et al., 2004)، که این مقدار برای کشور ایران رقمی در حدود ۲۵-۳۰ گیگاژول در هکتار است (Mohtasebi et al., 2008). از طرفی مصرف سوخت‌های فسیلی عملیات ماشینی در تولید محصولات زراعی سهم بالایی از کل انرژی ورودی را به‌خود اختصاص می‌دهد و

۱- عضو هیأت علمی گروه مکانیزاسیون دانشگاه کشاورزی و منابع طبیعی رامین
(نویسنده مسئول: Email: navab20@yahoo.com)

۲- استاد گروه مهندسی مکانیک ماشین‌های کشاورزی و مکانیزاسیون دانشگاه شهید چمران اهواز

۳، ۴ و ۵ - دانشیار گروه مهندسی مکانیک ماشین‌های کشاورزی و مکانیزاسیون دانشگاه شهید چمران اهواز

محققین دانشگاهی و یا از طریق سفارش به تولیدکنندگان یک سری از ابزار دقیق را به شیوه‌های مختلفی روی تراکتور نصب کرده‌اند که نظر به نوع و یا مدل حسگرهای به کار رفته به لحاظ سخت‌افزاری و همچنین نرم‌افزاری با همدیگر متفاوت هستند (Kheiralla and Yahya, 2001; Alimardani, 1987; Lackas *et al.*, 1991; Singh, 2011; Wang and Zeorb, 1990). بسیاری از این سامانه‌ها سفارشی و گران قیمت بوده و ویژه یک تراکتور خاصی طراحی شده است و به آسانی سازگار با سایر تراکتورها نیست (Al-Suhabani *et al.*, 2010).

لغوی و ملا صادقی (۲۰۰۲) در ارزیابی و مقایسه‌ی دو تراکتور مسی فرگوسن ۲۸۵ و اونیورسال ام^۴ ۶۵۰ به این نتیجه رسیدند وقتی که چرخ‌های محرک مسی فرگوسن ۲۸۵ سنگین‌سازی شوند روند نزولی بازده کشتی در طی افزایش عمق به‌طور چشمگیری بهبود می‌یابد و حداقل آن را به ۶۳٪ ارتقا می‌دهد (Loghavi and MollaSdeghi, 2002). طی تحقیقی دیگر اثر چهار سطح سنگین‌کننده با آب، صفر، ۲۵، ۵۰ و ۷۵ درصد روی عملکرد مزرعه‌ای یک تراکتور دو چرخ محرک ارزیابی شد. آن‌ها نشان دادند که سطوح ۵۰٪ به بالای سنگین‌کننده اثر معنی‌داری روی بهبود عملکرد زراعی تراکتور دارد به‌طوری‌که بکسواد هرس دیسکی از بدون سنگین‌کننده تا ۷۵٪ سنگین شده، ۲۶/۷٪ کاهش یافت (Abbouda *et al.*, 2011). سنگین کردن صحیح، می‌تواند بکسواد، مصرف سوخت، فرسایش تایرها و هزینه‌ی عملیات را کاهش دهد به‌طوری‌که کاربرد مناسب سنگین‌کننده موجب صرفه‌جویی ۳۳٪ - ۲۶٪ در مصرف میزان سوخت می‌گردد (Qisrani *et al.*, 1996).

هدف از این تحقیق تعیین شاخص بازده انرژی کل و برخی پارامترهای عملکردی با استفاده از سامانه جمع‌آوری داده و پایش لحظه‌ای به‌صورت بی‌سیم^۵ است. همچنین معرفی مهم‌ترین پارامترهای اثرگذار بر شاخص مذکور در اثر اعمال چند عامل مهم مدیریتی با تجزیه علیت است.

مواد و روش‌ها

این تحقیق در سال ۱۳۹۲ در مزارع تحقیقاتی و کارگاه‌های فنی گروه مکانیزاسیون دانشگاه کشاورزی رامین خوزستان انجام گردید. این مزرعه دارای خاکی با بافت لوم رسی^۶ با درجه شوری ۸/۳ میلی‌موس و وزن مخصوص ۴۳/۱ گرم بر سانتی‌متر مکعب و آیش بود. روند اجرا و روش کار شامل سه مرحله است: الف) تجهیز تراکتور چهار چرخ محرک به ابزار دقیق برای اندازه‌گیری، پایش و ذخیره‌سازی داده‌ها، ب) اجرای طرح آزمایشی مزرعه‌ای و ج) تجزیه و

سرعت مناسب و استفاده به موقع از قابلیت‌هایی همچون، قفل دیفرانسیل، دو یا چهار چرخ محرک، سنگین‌کننده‌ها و اهرم گاز دستی است. به‌عنوان نمونه استفاده از تکنیک یک درجه دنده را سبک‌تر کردن با گاز کمتر^۱ می‌تواند تا ۲۰ درصد موجب کاهش مصرف سوخت گردد (Takashi *et al.*, 2010) و یا در شرایط تک دیفرانسیل و سنگین کردن چرخ‌های محرک تراکتور مسی فرگوسن ۳۹۹ بکسواد چرخ‌های محرک از ۵۹ درصد به ۳۴/۶ درصد و مصرف سوخت از ۳۱/۵ لیتر به ۲۷/۴ لیتر در هکتار کاهش یافته است (Soltani and Loghavi, 2007).

در شناخت، بررسی و بهبود عملکرد کشتی تراکتور بایستی درک درستی از پارامترهای عملیاتی وجود داشته باشد. در این راستا تحقیقات فراوانی با شیوه‌های متنوع جهت اندازه‌گیری و محاسبه این پارامترها در خاک‌ها و ادوات مختلف برای رسیدن به بالاترین بازده انرژی کل و تحلیل تیمارهای گوناگون صورت گرفته است. اما متغیر بودن مشخصه‌های مکانیکی و فیزیکی یک خاک قابل کشت و عکس‌العمل‌های مختلف ماشین‌ها موجب می‌شود بازده عملکرد تراکتور مهم و پیچیده گردد. از طرفی اجرای عملیات‌های مربوط به کشاورزی دقیق نیازمند این است که فاصله زمانی بین اندازه‌گیری پارامترهای عملیاتی فوق حتی‌الامکان کوتاه و در شرایط واقعی مزرعه باشد و این شرایط نیز مستلزم وجود سامانه‌ای دقیق با ضریب اطمینان بالا است تا بتواند هم‌زمان با اجرای عملیات‌ها در مزرعه اندازه‌گیری‌ها را انجام و ثبت نماید (Kolator and Bialobrzewiski, 2011). به‌طوری‌که در روش‌های جدید مدیریت مزرعه، بر توسعه‌ی سامانه‌های اکتساب داده‌ها^۲ برای محاسبه‌ی پارامترهای عملکردی مزرعه^۳ بسیار تأکید شده است (Lackas *et al.*, 1991). بنابراین در این تحقیق تلاش شده در ابتدا تراکتور را به‌گونه‌ای تجهیز نمود، تا اندازه‌گیری و ثبت و ذخیره اطلاعات مربوطه به‌طور آنی و بسیار دقیق انجام شود و طراحی نرم‌افزار سامانه نیز به‌گونه‌ای باشد تا بتوان هم‌زمان با اجرای عملیات پایش بازده انرژی کل در کنار سایر پارامترها برای کاربر مقدور گردد.

در خصوص سرعت پیشروی واقعی، روش‌های زیادی ابداع شده است اما همه آن‌ها از دقت کافی برخوردار نیستند (Pranav *et al.*, 2012). از جمله روش‌هایی که محققین مختلف به کار برده‌اند عبارت هستند از کاربرد گیرنده‌های GPS، رادار داپلر، حسگرهای صوتی، چرخ غیر محرک پنجم و برآورد سرعت پیشروی بر مبنای سرعت متوسط چرخ‌های غیرمحرک جلو (Norozlo *et al.*, 2010; Khalilian *et al.*, 1989; Keskin and Say, 2006; Lotfi *et al.*, 2007; Khosravi *et al.*, 2012). به‌طور کلی در دهه‌های اخیر

4- U650
5- Wireless
6- Clay loam

1- Gear up throttle down (GUTD)
2- Data acquisition systems (DAS)
3- Field performance parameter

انرژی کل ضروری بوده را به وسیله تراکتور تجهیز شده به‌طور هم‌زمان با اجرای آزمایش‌ها (Online) اندازه‌گیری نموده و یا بعد از اجرا و با فرمول نویسی روابط آن‌ها در محیط اکسل (Offline) محاسبه و ذخیره می‌شوند. به عبارتی در هر لحظه تغییرات متغیر اصلی یعنی بازده انرژی کل و کلیه پارامترهای مرتبط همچون سرعت واقعی پیشروی، بکسواد، نیروی کششی، توان، مصرف سوخت به‌طور هم‌زمان با اجرای عملیات نمایش و ذخیره می‌گردد.

بازده انرژی کل (OEE)

تنها صفت یا متغیری است که می‌بایست تغییراتش در اثر عوامل تعیین شده (۳ فاکتور B, W و G) در قالب ۸ ترکیب تیماری مورد بررسی و مطالعه قرار گیرد (Bower, 1989):

$$OEE = \frac{V_a D_r}{10.2 \times FC} \times 3.6 \quad (1)$$

V_a : سرعت واقعی (کیلومتر بر ساعت)

D_r : نیروی کششی (کیلو نیوتن)

FC: مصرف سوخت (لیتر بر ساعت)

همگی به‌طور لحظه‌ای اندازه‌گیری می‌شوند.

OEE: بازده انرژی کل بر حسب درصد

۱۰/۲ ارزش حرارتی سوخت گازوئیل (بر اساس گازوئیل تولید

ایران) بر حسب کیلووات - ساعت بر لیتر.

بکسواد چرخ‌ها و سرعت پیشروی واقعی

برای اندازه‌گیری درصد بکسواد یا سرش کلیه چرخ‌ها می‌بایست سرعت واقعی پیشروی و سرعت تئوری هر یک از چهار چرخ به‌طور هم‌زمان اندازه‌گیری شود. برای این کار از دورسنج‌های نوری شفت انکودر مدل E50S8-100-3-T-24 در چرخ‌های عقب و حسگر نوع القای مدل P-R-L-18-8D برای چرخ‌های جلو استفاده شد (شکل ۱ بخش‌های ۸ و ۱۱). همچنین با طراحی چرخ غیرمحرک پنجم و نصب یک دستگاه شفت انکودر ۵۰۰ پالسی موجب شد تا سرعت واقعی پیشروی با دقت بسیار بالا اندازه‌گیری و ثبت شود. این چرخ بر روی مسیر نسبتاً هموار شده توسط چرخ جلو حرکت کرده و مانعی برای ادوات دنباله بند ایجاد نمی‌کند و مطابق شکل ۱ با اتصالات لولایی موجب می‌شود تا در سطح عمودی از پستی و بلندی‌های بعضاً عمیق تبعیت کرده و قابلیت فرمان‌پذیری به پیروی از چرخ‌های جلو نیز فراهم شود و در زمان دنده عقب، ۱۸۰ درجه گردش نموده تا بدون ایجاد فشار جانبی به شاسی و چرخ به سمت عقب حرکت کند.

تحلیل داده‌ها جهت مطالعه اثرات عوامل تعیین شده بر بازده انرژی کل تراکتور - خاک‌ورز است.

این تحقیق پس از آماده‌سازی تراکتور در قالب ۸ ترکیب تیماری و سه فاکتور مهم مدیریتی سنگین‌کننده (با سنگین‌کننده و بدون سنگین‌کننده^۱)، محور محرک (دو چرخ محرک و چهار چرخ محرک^۲) و دنده (سبک و سنگین^۳) با عمق یکسان در ۶ تکرار و در مجموع ۴۸ کرت به ابعاد ۱۵۰ متر مربع به صورت آزمایش فاکتوریل در قالب طرح کرت‌های خرد شده^۴ اجرا نموده تا اثرات این فاکتورها بر بازده انرژی کل (متغیر وابسته) مشخص گردد و نهایتاً تجزیه تحلیل داده‌های طرح با روش‌های ANOVA و POST ANOVA و تحلیل رگرسیونی تجزیه علیت^۵ و رسم نمودارها با کمک نسخه‌های جدید نرم افزارهای SAS 9.2 و Sigma Plot، Excel، SPSS21 انجام شد.

پایش لحظه‌ای بر پارامترهای عملکردی از راه دور

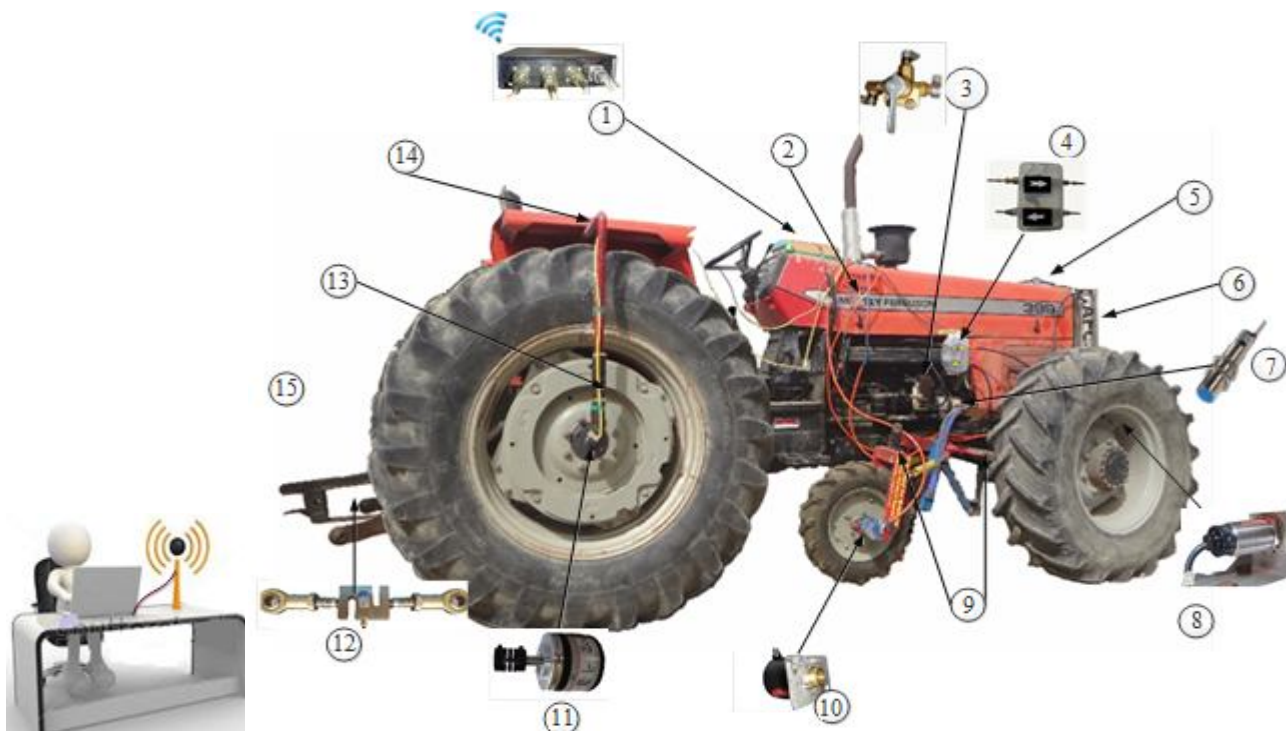
در ابتدا تراکتور MF-399 چهار چرخ محرک را به ابزار دقیق مطابق شکل ۱ تجهیز نموده تا بتوان بازده انرژی کل را با دقت بالا اندازه‌گیری نموده و در هر لحظه نظارت بر عملکرد تراکتور انجام شود، به این صورت که کلیه داده‌های دریافتی از حسگرها پردازش شده، توسط یک فرستنده بی‌سیم از درون واحد پردازش با تکنولوژی Zigbee به قسمت گیرنده که با اتصال USB به لپ‌تاب یا PC کاربر وصل شده ارسال می‌شوند (شکل ۱ بخش ۱) و کاربر نیز با نرم افزار سامانه کنترل داده‌برداری را در اختیار دارد و ضمن مشاهده‌ی آنی نتایج اندازه‌گیری پارامترها، قادر است منحنی تغییرات لحظه‌ای بین دو پارامتر نسبت به هم و یا نسبت به زمان (به دلخواه) را نیز مشاهده کرده و در پایان ذخیره‌سازی نماید. علی‌رغم برد مفید ۱/۵ کیلومتری بی‌سیم، در نرم افزار مربوطه آیکون (زبان) IP قرار داده شد تا کاربر که نقش سرور را دارد در صورت تمایل آن را فعال کرده و به شرط پوشش شبکه اینترنت کد IP را به شخص دیگر اعلام کند و هم‌زمان برای ایشان شرایط پایش داده‌ها^۶ در هر جای دنیا فراهم شود.

نوع و روش اندازه‌گیری متغیرها یا صفات تصادفی

به‌طور کلی در این تحقیق تمام متغیرها یا صفاتی که وجودشان برای تفسیر، توصیف و تحلیل اثرات سه فاکتور ذکر شده بر بازده

- 2- Ballast and un ballast (B and UNB)
- 2- 2 Wheel drive and 4 wheel drive (2WD and 4WD)
- 3- Gear-low and gear-high (GL and GH)
- 4- Split-plot design
- 5- Path analysis
- 6- Data monitoring

7- Overall energy efficiency



شکل ۱- نصب تجهیزات ابزار دقیق روی تراکتور مسی فرگوسن ۳۹۹ برای پایش از دور پارامترهای عملکردی؛ (۱) واحد پردازش مرکزی، (۲) مدار نوسان‌گیر، (۳) شیر کنترل، (۴) سوخت‌سنج‌ها، (۵) پمپ برقی، (۶) باک مدرج، (۷) و (۸) حسگرهای القایی، (۹) لولای چرخ پنجم، (۱۰) و (۱۱) شفت انکودر، (۱۲) نیروسنج

Fig.1. The MF 399 instrumented tractor for performance monitoring; (1) Processing unit, (2) Noise control, (3) Control valve, (4) Flow meters, (5) Electrical pump, (6) Measurement tank, (7) and (8) Proximity sensors, (9) Pivot, (10) and (11) Encoder shaft, (12) Loadcell

$$RPM_t = \frac{P_t - P_{t-T}}{T \times n_p} \times 60000 \quad (5)$$

$$V_{ta} = \frac{60 \times RPM_t \times P}{1000} \quad (6)$$

C: محیط چرخ (متر)

r: شعاع چرخ (متر)

S_p: کمترین مسافت طی شده در هر پالس (میلی‌متر بر پالس)

n_p: پالس ارسالی در هر دور

T: فاصله زمانی ثبت هر داده (میلی‌ثانیه)

RPM_t: دور بر دقیقه چرخ در لحظه t ام

V_{ta}: سرعت واقعی پیشروی در لحظه t ام (کیلومتر بر ساعت)

P_{t-T}: تعداد پالس‌های تجمعی در لحظه t (t-T) ام

P_t: تعداد پالس‌های تجمعی در لحظه t ام

$$ASRW = \frac{SRRW \% + SLRW \%}{2} \quad (7)$$

بنابراین با ثبت آنی سرعت‌های کلیه چرخ‌ها و چرخ پنجم و با استفاده از روابط (۲) تا (۶) درصد بکسواد (+%S) و سرش (%S-) هر کدام از چرخ‌ها نسبت به سرعت پیشروی واقعی (km h⁻¹) محاسبه، و نرم افزار سامانه طبق روابط (۷) و (۸)، درصد بکسواد جفت چرخ‌های عقب و جلو را نیز به‌طور هم‌زمان در یک کاربرگ جداگانه در فایل اکسل نتایج ذخیره می‌کند.

$$TRR = 100 \left[1 - \frac{V_a}{V_t} \right] \quad (2)$$

V_a: سرعت پیشروی واقعی (سرعت چرخ پنجم) و V_t: سرعت تئوری (چرخ‌های عقب یا جلو) می‌باشد. در واقع رابطه (۲) میزان کاهش پیشروی یا کاهش سرعت نسبت به مسافت یا سرعت تئوری است و عموماً به بکسواد یا درصد سرش معروف است که چرخ می‌چرخد اما پیشروی صورت نمی‌گیرد (ASAE, 1997).

$$C = 2\pi r \quad (3)$$

$$SP = \frac{C}{n_p} \quad (4)$$

در این طرح برای اندازه‌گیری نیروی کششی تک نقطه از یک نیروسنج ۵ تنی مدل S شکل با خروجی آنالوگ استفاده شد (شکل ۱ بخش ۱۲)، و برای کالیبراسیون آن از یک ترازوی دیجیتال و یک سری وزنه‌های با جرم مشخص از ۱ تا ۱۰۰۰ کیلوگرمی استفاده شد. به طوری که، ابتدا وزنه‌ها توسط ترازو وزن شده و در دو مرحله افزایشی و کاهشی به نیروسنج آویزان شدند و بر اساس مشخصات فنی نیروسنج، رابطه بین سیگنال خروجی و بار اعمالی با وزنه‌های مختلف از روابط (۱۲) و (۱۳) استخراج، و کالیبراسیون نیروسنج کامل گردید.

$$\text{Load} = (\text{ADC} \times \text{Offset}) \times \text{Coef} \quad (12)$$

$$\text{Coef} = \frac{(\text{Scale} \times 40)}{(\text{Volt} \times \text{mv} \times \text{Zero-Load})} \quad (13)$$

ADC: مقدار خوانده شده از حسگر

Coef: ضریب ثابت حسگر

Scale: حداکثر مقدار قابل سنجش توسط حسگر (۵۰۰۰ کیلوگرم)

Volt: مقدار ولتاژ تغذیه حسگر

mv: مقدار ولت بر میلی‌ولت حسگر

Zero-Load: مقدار حسگر در حالت بی‌باری

Offset, نیز همان مقداری است که اضافه می‌شود تا خطای

حسگر گرفته شود که در این مورد عدد ۴۰ است.

مصرف سوخت

برای اندازه‌گیری لحظه‌ای مصرف خالص سوخت از دو دستگاه سوخت‌سنج نوع صوتی ساخت کشور انگلیس با هزار پالس بر لیتر استفاده شد و با تغییراتی در لوله برگشتی انژکتورها طبق شکل ۱ بخش ۴ روی مسیرهای رفت و برگشت قرار داده و با نصب یک مخزن کمکی مدرج که از طریق یک پمپ کوچک برقی توسط راننده از مخزن اصلی تغذیه می‌شود. مراحل تست و کالیبراسیون انجام گردید. شکل ۲ منحنی‌های تست آزمایشگاهی تکی سوخت‌سنج‌ها را نشان می‌دهد که هرچه دبی عبوری از ۱۵۰ سانتی‌متر مکعب بیشتر گردد رابطه خطی قوی‌تر خواهد بود و این با داده‌های ذکر شده در برگه مشخصات سوخت‌سنج‌ها^۹ یکسان بود.

نتایج و بحث

سامانه جمع‌آوری اطلاعات (DAS)

پس از نصب کلیه حسگرها، طراحی و برنامه‌ریزی واحد پردازشگر یا دیتالاگر^{۱۰} کلیه مراحل تست و کالیبراسیون درون کارگاهی و مزرعه‌ای برای سنجش پارامترهای مهم عملکردی با موفقیت و دقت

$$\text{ASF} = \frac{\text{SRFW \%} + \text{SLFW \%}}{2} \quad (8)$$

ASRW^۱: متوسط درصد بکسواد چرخ‌های عقب

ASFW^۲: بکسواد یا سرش چرخ‌های جلو

SRRW^۳: درصد بکسواد چرخ عقب سمت راست

SLRW^۴: درصد بکسواد چرخ عقب سمت راست

SRFW^۵: درصد بکسواد چرخ جلو سمت راست

SLFW^۶: درصد بکسواد چرخ جلو سمت چپ

بازده کششی (TE)

از شاخص‌های مهم در بررسی بازده انرژی کل بازده کششی می‌باشد و توسط رابطه (۹) بیان می‌شود.

$$\text{TE} = \frac{F_{db}}{F_{db} + F_R} (1-S) \quad (9)$$

TE: درصد بازده کششی

F_{db}: نیروی مقاومت کششی خالص (کیلو نیوتن)

F_R: نیروی مقاومت غلتشی (کیلو نیوتن)

S: درصد بکسواد

توان کششی مورد نیاز معادل با توان محور تواندهی (P_{EQ})

توان کششی مورد نیاز وسیله خاک‌ورز در اجرای عملیات برابر چه مقدار از بیشترین توان تراکتور برحسب توان PTO است و از روابط (۱۰) و (۱۱) محاسبه می‌شود.

$$\text{PEQ} = \frac{P_{db} \times 100}{\text{TE} \times 0.96 \times \text{MAX } P_{pto}} \quad (10)$$

$$P_{db} = \frac{F_{db} \cdot V_a}{3.6} \quad (11)$$

P_{EQ}: برحسب درصد

TE: بازده کششی برحسب درصد

P_{db}: توان کششی مورد نیاز به وسیله‌ی خاک‌ورز برحسب کیلووات

MAX P_{pto}: حداکثر توان تراکتور معادل محور توان‌دهی^۸

برحسب کیلووات

V_a: سرعت واقعی پیشروی بر حسب کیلومتر بر ساعت

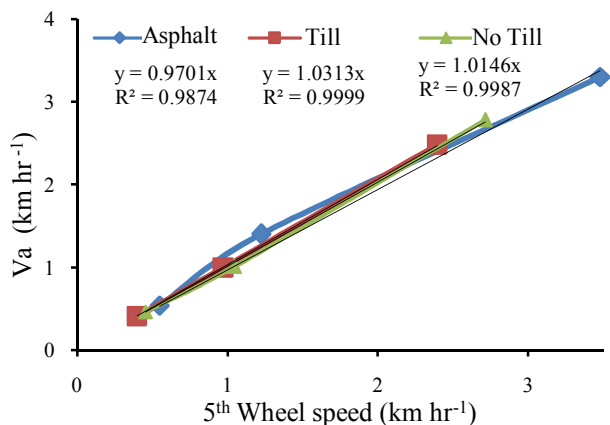
۰/۹۶، بازده انتقال توان به محور اکسل تراکتورها می‌باشد.

- 1- Average slip rear wheels
- 2- Average slip front wheels
- 3- Slip right rear wheel
- 4- Slip left rear wheel
- 5- slip right front wheel
- 6- Slip left front wheel
- 7- The equivalent power
- 8- Power take off shaft (PTO)

9- Data sheet

10- Data logger

تیبین بالا بین سرعت ثبت شده توسط سامانه جمع‌آوری داده و سرعت واقعی اندازه‌گیری شده به‌ویژه برای کار در مزرعه وجود دارد لذا در مجموع نتایج بیانگر عملکرد درست چرخ پنجم است.



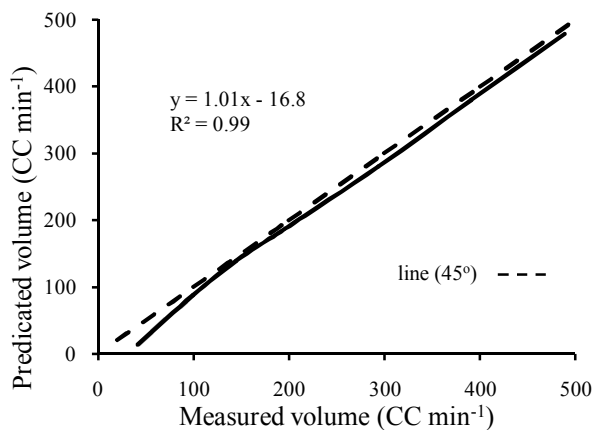
شکل ۳- منحنی مقایسه سرعت واقعی و به‌دست آمده به‌وسیله چرخ پنجم در سه سطح متفاوت

Fig.3. Comparison of predicted speed by 5th-wheel and measured via distance-time (V_a) for 3 Surfaces

روی تراکتور با دقت بسیار بالا نسبت به ثبت داده‌ها به‌طور آنی و هم‌زمان اجرای عملیات را انجام می‌دهد.

نتایج مربوط به اندازه‌گیری هم‌زمان مصرف سوخت با سوخت‌سنج‌های آلتراسونیک، نیروی کششی با نیروسنج ۵ تنی و سرعت واقعی با چرخ پنجم و ثبت داده‌های آن‌ها توسط سامانه نصب شده به‌گونه‌ای است که با استفاده از آن‌ها پارامترهای مهمی همچون مصرف ویژه سوخت (SFC) امکان پذیر شده و در شکل سه بعدی (شکل ۵) یک نمونه واقعی از ارتباط بین SFC و توان مالیندی دیسک کششی نسبت با اندازه‌گیری سوخت لحظه‌ای مربوط به تیمار 2WD-GH-B ترسیم شده است که به خوبی نشان دهنده عملکرد تجهیزات نصب شده است.

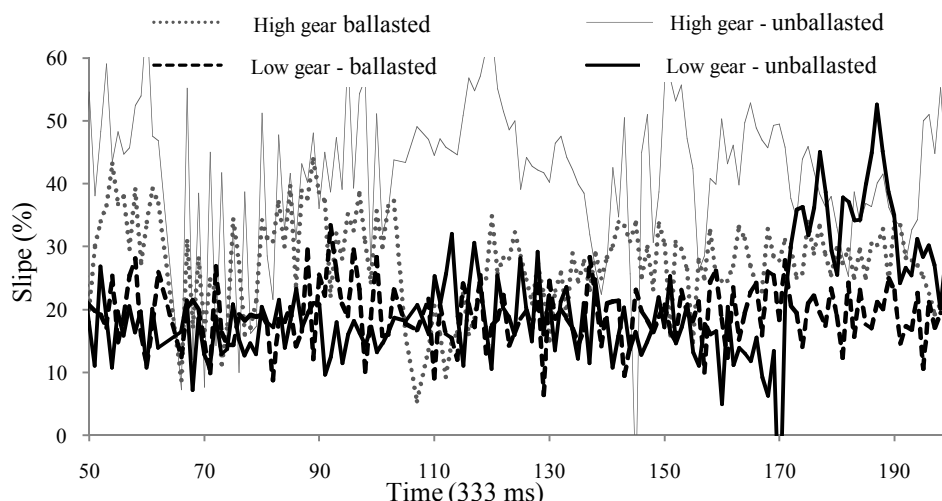
بسیار بالا انجام شد. نتایج آزمایش‌های انجام شده در شرایط مختلف (زمین شخم شده، شخم نشده و آسفالت) نشان داد که همواره تعداد دورهای ثبت شده با تعداد دورهای واقعی چرخ پنجم برابر است که نشان دهنده دقت انکودر ۵۰۰ پالسی و نصب صحیح آن است. منحنی‌های شکل ۳ نیز نشان می‌دهند که رابطه خطی قوی با ضریب



شکل ۲- همبستگی بین مقادیر شدت جریان اندازه‌گیری شده با مقادیر سوخت‌سنج‌ها

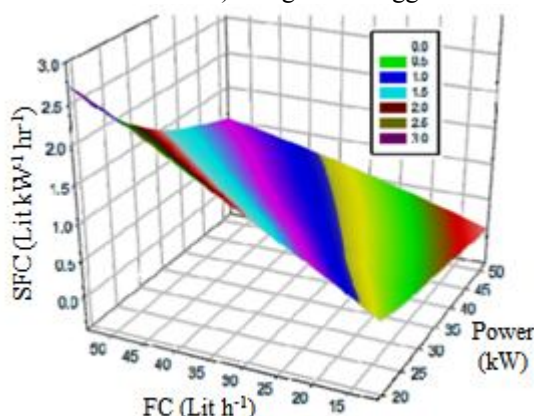
Fig.2. Correlation between measured values against the predicted flow rate by Flow meters

با اندازه‌گیری لحظه‌ای سرعت کلیه چرخ‌ها و سرعت پیشروی توسط چرخ پنجم درصد بکسواد و سرش هر چرخ و متوسط جفت چرخ‌ها به‌طور لحظه‌ای نمایش و ثبت می‌شوند. در شکل ۴ منحنی‌های تغییرات لحظه‌ای متوسط درصد بکسواد چرخ‌های عقب مربوط به کلیه تیمارها که با دو چرخ محرک اجرا شده‌اند به تفکیک با و بدون سنگین‌کننده رسم شده است، این منحنی‌ها که به‌عنوان نمونه‌ای واقعی از طرح آزمایشی اجرا شده با دیسک افسست کششی است حاکی از آن است که بالاترین درصد بکسواد به‌ترتیب مربوط به دنده سبک‌تر و بدون سنگین‌کننده؛ دنده سنگین و بدون سنگین‌کننده؛ دنده سبک با سنگین‌کننده و دنده سنگین با سنگین‌کننده است، به‌عبارتی نقش سنگین‌کننده در کاهش بکسواد به وضوح دیده می‌شود. بنابراین به‌خوبی می‌توان نتیجه گرفت که سامانه نصب شده



شکل ۴- تغییرات بکسواد چرخ‌های عقب مربوط به ترکیب تیماری سنگین‌کننده، دنده و دو چرخ محرک ثبت شده با دیتالاگر

Fig.4. Real time change of rear wheels slip in the experiment field (B-GH-2WD, B-GL-2WD, UB-GH-2WD and UB-GL-2WD) using a data logger



شکل ۵- منحنی تغییرات لحظه‌ای مصرف ویژه سوخت با تغییرات لحظه‌ای توان کششی لازم و مصرف سوخت بر اساس داده‌های برداشت شده توسط دیتالاگر

Fig.5. Three dimensional real time change SFC ($\text{Lit kW}^{-1} \text{hr}^{-1}$) as a function of power (kW) and FC (Lit h^{-1}) recorded data by data logger

محرک استفاده شده است، بازده انرژی کل ۱۰/۱۴ درصد و در حالت چهار چرخ محرک ۱۴/۳۶ درصد است. علی‌رغم عدم معنی‌داری اثرات متقابل (B×W)، طبق جداول تجزیه واریانس برش‌دهی بر اساس سطوح عامل سنگین‌کننده (B×W/B) تفاوت بین دو وضعیت دو چرخ و چهار چرخ محرک در شرایط با سنگین‌کننده (B) و بدون سنگین‌کننده (UB) بسیار معنی‌دار بوده به طوری که بازده انرژی کل چهار چرخ محرک حدود ۴ درصد بیشتر از دو چرخ محرک است.

بازده انرژی کل ترکیب تراکتور - خاکورز (OEE)

متغیر اصلی مورد بررسی بازده انرژی کل (OEE) است. لذا جدول تجزیه واریانس (جدول ۱) نشان می‌دهد که در مجموع اثرات دو عامل نوع محور محرک (2WD و 4WD) و عامل دنده (GL و GH) به شکل بسیار معنی‌داری بر بازده انرژی کل تأثیر داشته‌اند اما عامل سنگین‌سازی تراکتور (B و UB) به طور کلی تأثیر معنی‌داری بر بازده انرژی کل نداشته است. در خصوص محور محرک (W) با مراجعه به جدول مقایسه میانگین‌ها (جدول ۲)، دیده می‌شود در مجموع وقتی از حالت دو چرخ

جدول ۱- تجزیه واریانس اثر سه عامل سنگین‌سازی، دنده و وضعیت محور محرک بر بازده انرژی کل و سایر صفات اندازه‌گیری
Table1- ANOVA of the effect of 3 factors (ballasting, gear, drive Mod) on OEE and measured viruses varieties

منبع تغییر Source of variation	درجه آزادی df	میانگین مربعات Mean of square						
		OEE	ASFW	ASRW	TE	PEQ	FCHR	FCHA
REP	5	7.05 ^{ns}	0.93 ^{ns}	38.49*	19.86 ^{ns}	149.20**	7.17 ^{ns}	5.47 ^{ns}
B	1	3.58 ^{ns}	64.10**	53.73 ^{ns}	124.74**	158.74**	0.33 ^{ns}	25.70*
R×B	5	1.65 ^{ns}	1.69 ^{ns}	6.66 ^{ns}	5.69 ^{ns}	7.54 ^{ns}	2.52 ^{ns}	2.95 ^{ns}
W	1	213.57**	4159.14**	4222.50**	3169.00**	218.60*	22.08**	175.00**
B×W	1	0.75 ^{ns}	20.42 ^{ns}	203.03**	197.55**	189.70*	0.02 ^{ns}	8.02 ^{ns}
R×W×(B)	10	1.38 ^{ns}	11.80**	8.40 ^{ns}	5.62 ^{ns}	30.60 ^{ns}	1.39 ^{ns}	2.92 ^{ns}
G	1	35.38**	31.28**	65.80*	3.10 ^{ns}	218.33 ^{ns}	20.96**	15.90**
B×G	1	2.00 ^{ns}	28.81**	31.50*	8.13 ^{ns}	227.08**	2.34 ^{ns}	2.34 ^{ns}
W×G	1	0.93 ^{ns}	1.51 ^{ns}	22.28 ^{ns}	29.29*	40.46 ^{ns}	4.94 ^{ns}	2.59 ^{ns}
B×W×G	1	0.46 ^{ns}	28.93**	14.24 ^{ns}	16.90 ^{ns}	24.84 ^{ns}	0.00 ^{ns}	6.10*
CV %	-	10.76 ^{ns}	35.70 ^{ns}	11.59 ^{ns}	10.20 ^{ns}	11.14 ^{ns}	6.10 ^{ns}	9.70 ^{ns}

(%) OEE بازده انرژی کل، ASFW و ASRW متوسط درصد بکسواد چرخ‌های جلو و عقب، TE بازده کششی، FCHR و FCHA مصرف سوخت بر حسب لیتر بر هکتار و لیتر بر ساعت، PEQ توان معادل محور تواندهی نیروی کششی. * و ** به ترتیب معنی‌دار در سطح احتمال ۵ و ۱ درصد، ^{ns} غیرمعنی‌دار
 * ** Significant at 5% and 1% of probability levels, respectively, ^{ns} Non. Significant

جدول ۲- مقایسه میانگین صفات مختلف نسبت به عوامل B، W و G
Table 2- Comparison of various variation averages in 3 factor (B,W and G)

صفات Factors	سنگین کننده Ballast	بدون سنگین کننده Un Ballast	LSD	دو چرخ محرک 2WD	چهار چرخ محرک 4WD	LSD	دنده سنگین GL	دنده سبک GH	LSD
OEE	12.52 ^a	11.98 ^a	1.49	10.14 ^b	14.36 ^a	0.75	13.11 ^a	11.40 ^b	1.08
ASRW	23.13 ^b	29.84 ^a	3.00	35.80 ^b	17.09 ^a	1.80	27.15 ^b	35.40 ^a	2.50
ASFW	-1.72 ^b	5.50 ^a	1.50	-7.38 ^b	11.23 ^b	2.20	3.70 ^a	1.31 ^a	1.40
TE	63.00 ^b	59.80 ^a	2.77	53.29 ^b	69.50 ^a	1.50	63.16 ^a	61.00 ^a	2.83
PEQ	66.48 ^b	60.00 ^a	3.10	60.07 ^b	64.00 ^a	3.50	64.30 ^a	60.00 ^b	3.80
FCHR	24.20 ^b	24.10 ^b	1.80	24.80 ^a	23.50 ^b	0.75	23.00 ^b	24.80 ^a	1.30

حروف لاتین مشابه در هر سطر حاکی از عدم تفاوت معنی‌دار در سطح ۱ درصد است
 The Same letters in columns show no significant difference at probability of 1%

جدول ۳- تجزیه واریانس برش‌دهی B×W / W
Table3- Post ANOVA –B×W Slice by W

صفات Factors	دو چرخ محرک 2WD			چهار چرخ محرک 4WD		
	باسنگین کننده Ballast	بدون سنگین کننده UN Ballast	MS	با سنگین کننده Ballast	بدون سنگین کننده UN Ballast	MS
	OEE	10.54	9.70	3.800 ^{ns}	14.51	14.20
ASRW	30.45	41.25	700.480**	15.80	18.40	39.880 ^{ns}
ASFW	-10.38	-4.30	215.940**	6.90	15.50	444.620**
TE	56.93	49.65	318.130**	69.16	69.96	4.166 ^{ns}
PEQ	59.90	60.24	0.689 ^{ns}	68.14	60.53	347.600*
FCHR	24.98	24.78	0.248 ^{ns}	23.06	23.46	0.096 ^{ns}

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

دو چرخ محرک به تنهایی موجب افزایش معنی‌دار بازده انرژی کل می‌شود و دیگر نیازی به سنگین کننده نمی‌باشد (جدول‌های ۳ و ۴). دلایل عدم تأثیر سنگین کننده بر بازده انرژی کل این است که وقتی تراکتور از دو چرخ به چهار چرخ محرک تبدیل می‌شود بدون

اما با دقت در ارقام جدول تجزیه واریانس برش‌دهی بر اساس محور محرک (B×W/W)، بازده انرژی کل در مقایسه با سنگین کننده و بدون سنگین کننده در هر دو وضعیت 2WD و یا 4WD تفاوت معنی‌داری وجود ندارد. به عبارتی انتخاب چهار چرخ محرک به جای

دلیل افزایش سرش چرخ‌های جلو با سنگین شدن این بود که حرکت آب موجود در چرخ‌ها موجب افزایش سرش شده است. همچنین بر اساس جدول تجزیه واریانس برش‌دهی (جدول ۳) تفاوتی بین درصد توان معادل محور تواندهی به‌کار رفته وجود ندارد و این در حالی است که میزان به‌کارگیری از حداکثر توان تراکتور فاکتوری مؤثر بر بازده کششی و بازده انرژی کل است لذا عدم بهبود بازده انرژی کل با سنگین‌کننده در وضعیت 2WD منطقی است. در خصوص درصد بکسواد و بازده کششی، سلطانی و لغوی (۲۰۰۷) نتایج مشابهی با تراکتور یکسان ولی برای گاوآهن برگرداندار گرفته‌اند. همچنین با نتایج جنانی و باشفورد (۱۹۹۵)، که در مجموع تراکتورهای 2WD و 4WD را مقایسه کرده و سیرلکاتیم و همکاران (۲۰۰۱) که روی دیسک کششی کار کرده مطابقت دارد.

اینکه سنگین شود متوسط درصد بکسواد چرخ‌های عقب کاهش قابل توجهی دارد (از ۴۱/۲۵ به ۱۸/۴ درصد کاهش می‌یابد) و این در حالی است که اثر سنگین‌کننده در وضعیت چهار چرخ تنها موجب کاهش در حد ۳ درصد شده است (جدول ۳)، بنابراین با کاهش شدید بکسواد چرخ‌های عقب (2WD)، انتظار افزایش بازده کششی را داشته که طبق جدول ۴ این افزایش در حد ۲۰ درصد است (از ۴۹/۶ به ۶۹/۹۶ درصد). همچنین نتایج نشان می‌دهد که میزان تأثیر سنگین شدن تراکتور در وضعیت دو چرخ محرک بودن برای کاهش بکسواد، بیشتر است از وقتی که تراکتور چهار چرخ باشد و سنگین شود. چون که سنگین کردن درصد بکسواد چرخ‌های عقب در وضعیت 2WD را از ۴۱/۲۵ به ۳۰/۴۵ درصد می‌رساند و علی‌رغم کاهش ۱۰ درصدی، هنوز در محدوده بالایی قرار دارد و این مورد بر پایه گزارش جنانی و همکاران (۱۹۹۶)، موجب افزایش بازده انرژی نمی‌شود. از طرفی سنگین‌کننده باعث افزایش درصد سرش چرخ‌های جلو از ۴/۳- درصد به ۱۰/۳۸- درصد شده که اثری منفی بر بازده انرژی کل دارد.

جدول ۴- تجزیه واریانس برش‌دهی B×W/B

Table 4- Post ANOVA –B×W Slice by B

صفات Factors	با سنگین‌کننده Ballast			بدون سنگین‌کننده UN Ballast		
	دو چرخ محرک	چهار چرخ محرک	MS	دو چرخ محرک	چهار چرخ محرک	MS
	2WD	4WD		2WD	4WD	
OEE	10.54	14.50	94.48**	9.70	14.20	1119.00**
ASRW	30.45	15.80	1286.00**	41.30	18.30	1338.00**
ASFW	-10.30	6.92	1798.30**	-4.30	15.50	2381.20**
TE	56.90	69.13	892.06**	49.60	69.96	2474.50**
PEQ	59.90	68.10	407.80**	60.20	60.50	0.51 ^{ns}
FCHR	24.90	23.60	11.67 ^{ns}	24.70	23.50	10.40 ^{ns}
FCHA	13.20	10.20	54.00**	15.50	10.80	128.90**

* و ** به ترتیب معنی‌دار در سطح احتمال ۵ و ۱ درصد، ^{ns} غیرمعنی‌دار

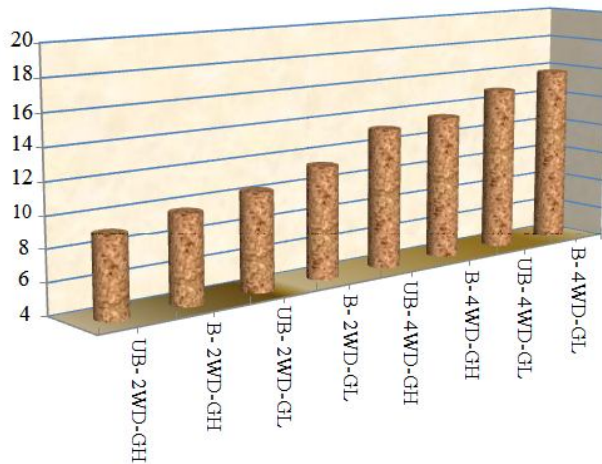
** Significant at 5% and 1% of probability levels, respectively, ^{ns} Non. Significant

GL، بازده کششی نیز به‌طور معنی‌داری بیشتر از GH است. لذا تفاوت در مقادیر این پارامترها که هر کدام به‌طور مستقیم بر OEE تأثیرگذار هستند نشان از افزایش منطقی بازده انرژی کل GL نسبت به GH دارد.

نتایج مقایسه اثرات ۸ ترکیب تیماری در نمودار شکل ۶ آمده است، دقت در مقادیر بازده انرژی کل به تفکیک هر تیمار نشان می‌دهد که بالاترین بازده انرژی کل به تیمارهای با حالت چهار چرخ محرک و دنده سنگین‌تر اختصاص دارد و پایین‌ترین بازده انرژی کل مربوط به دو چرخ محرک، بدون سنگین‌کننده و با دنده سبک‌تر است. در مجموع مقادیر به‌دست آمده از بازده انرژی کل در این تحقیق شامل کمترین ۸/۸ درصد و بالاترین ۱۵/۳ درصد است این محدوده در مقایسه با تحقیقات باور و همکاران (۱۹۹۰)، طی چند سال متمادی بر روی ماشین‌های خاک‌ورزی، بازده انرژی کل را از ۱۳ تا ۱۹/۶ درصد گزارش کرده‌اند و نیز با تحقیق روی دیسک افست این بازده ۹

با مراجعه به جدول تجزیه واریانس (جدول ۱) مشاهده می‌گردد که اثر اصلی عامل دنده بسیار معنی‌دار شده است و طبق جدول مقایسه میانگین (جدول ۲) در مجموع متوسط بازده انرژی کل در دنده سنگین‌تر (GL) ۱۳/۱۱٪ در مقابل دنده سبک‌تر (GH) که ۱۱/۴٪ شده است، به عبارتی تجزیه‌ی آماری نشان می‌دهد در حالت GH که دور موتور برابر ۸۰٪ دور مشخصه موتور است دارای بازده انرژی کل کمتری در قیاس با GL که میانگین دور موتور با دوری معادل ۹۰٪ دور مشخصه بوده زیرا در شرایط دنده سبک که اصولاً گشتاور کمتری دارد و در عمل نیز دور کم به‌ویژه در 2WD تراکتور تمایل به خاموش شدن داشت، گاورنر در این لحظه سوخت بیشتری را ارسال می‌کند. ارقام طبق جدول ۲ نیز حاکی از این است که مصرف ساعتی سوخت و درصد بکسواد چرخ‌های عقب در شرایط GL به ترتیب ۲۳ لیتر بر ساعت و ۲۷ درصد بوده و به‌طور معنی‌داری کمتر از GH با ۲۴/۸ لیتر بر ساعت و ۳۵ درصد است. همچنین در وضعیت

مستقیمی که PEQ بر افزایش بازده انرژی کل دارد (۰/۵۶۹) برابر اثر مستقیمی است که درصد بکسواد بر کاهش این بازده دارد (۰/۵۶۴) و در مقام مقایسه کلی نتایج اثرات هر سه متغیر، حاکی از آن است که اثرات درصد بکسواد چرخ‌های عقب و این‌که چند درصد از توان ماکزیمم تراکتور معادل محور تواندهی به کار می‌رود (PEQ) برابر اما هم‌جهت نیستند و این اثر به‌مراتب بیشتر از اثر مستقیم مصرف سوخت بر بازده انرژی کل است، منحنی سه بعدی در شکل ۸ وضعیت تغییرات دو متغیر با تأثیر بیشتر نسبت به بازده انرژی کل تراکتور - خاک‌ورز را نشان می‌دهد و حاکی از آن است که با افزایش درصد توان به کار رفته از توان ماکزیمم تراکتور (PEQ) و کاهش درصد بکسواد، بازده انرژی کل افزایش می‌یابد.



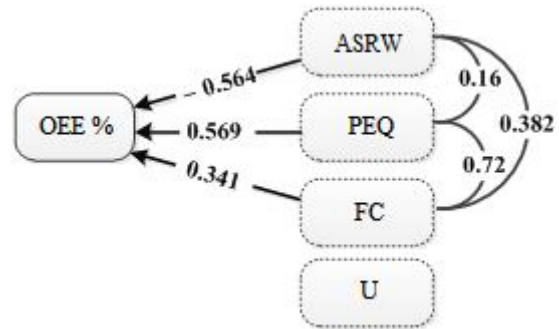
شکل ۷- منحنی درصد بازده انرژی کل
Fig.7. Percentage of the overall energy efficiency

تا ۱۷ درصد اعلام شده است (Kheiralla et al., 2004). لذا محدوده بازده انرژی کل ۲۰-۸ درصد است.

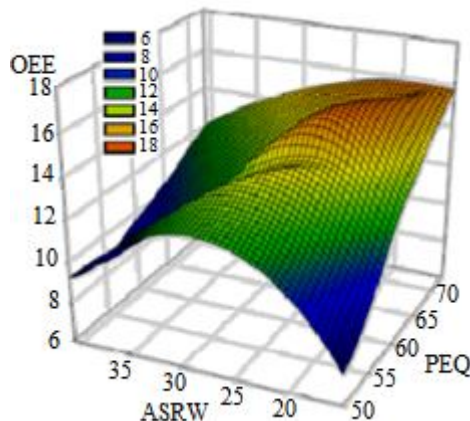
تجزیه علیت

علاوه بر تجزیه واریانس اثرات عوامل مدیریتی بر بازده انرژی کل، با تجزیه رگرسیونی مسیر یا تجزیه علیت (PA) اثرگذارترین متغیر با تعیین میزان و جهت اثرات مستقیم و غیر مستقیم آن‌ها استخراج شده و طبق نمای مسیر در شکل ۷، عبارت است از: بکسواد چرخ‌های عقب (ASRW%)، توان به کار رفته معادل محور تواندهی (PEQ%) و مصرف سوخت (لیتر بر ساعت).

توجه به ضرایب مسیر طبق روش تجزیه علیت حاکی از آن است که پارامترهای درصد بکسواد چرخ‌های عقب به‌طور مستقیم اثری منفی و قوی (۰/۵۶۴-) همچنین به‌طور غیر مستقیم و از طریق مصرف سوخت (۰/۱۹۷-) بر بازده انرژی کل دارد. همچنین اثر



شکل ۶- نمای مسیر اثرات مهم‌ترین عوامل از طریق تجزیه علیت
Fig.6. Path diagram of major factors via path analysis



شکل ۸- بازده انرژی کل درمقابل بکسواد و توان به کار رفته معادل محور تواندهی
Fig.8. Real time OEE change (%) as function of PEQ (%) and ASRW(%)

4WD نسبت به 2WD و دنده سنگین‌تر (GL) نسبت به دنده سبک‌تر (GL) بازده انرژی کل را به‌طور معنی‌داری افزایش می‌دهد اما عامل سنگین‌کننده در مجموع اثر معنی‌داری بر بازده انرژی کل ندارد. همچنین نتایج نهایی تجزیه علیت، سه پارامتر PEQ، ASRW و FC را به‌عنوان اثرگذارترین پارامتر بر بازده انرژی کل تراکتور-خاک‌ورز معرفی می‌کند. در کل نیز می‌توان نتیجه گرفت که مدیریت صحیح عوامل مدیریتی موجب بازده انرژی کل ۱۵/۳ درصد و در صورت عدم انتخاب صحیح این عوامل تا ۸/۸ درصد تقلیل می‌یابد که در هر صورت محدوده‌ی ۱۵/۳-۸/۸ درصد نشان دهنده اتلاف دست‌کم ۸۴ درصدی انرژی است.

در مجموع درصد بکسواد و مصرف سوخت هر دو به‌طور مستقیم اثر منفی روی OEE دارند و PEQ اثر مستقیم مثبت دارد و در نهایت سهم این سه متغیر در توجیه و پیش‌بینی OEE، ۸۵٪ است که ۱۵٪ دیگر به عوامل غیر از آن‌ها (عوامل ناشناخته (رابطه ۱۴)) مربوط می‌شود.

$$U = \sqrt{1 - (0.798)^2} = 0.15 \quad (14)$$

نتیجه‌گیری

نتایج نهایی برداشت اطلاعات هم‌زمان بازده انرژی کل و پارامترهای عملکردی با فرکانس سه داده در ثانیه نشان می‌دهد که عامل‌های سنگین‌کننده (B) نسبت به سنگین نشدن (UB) و عامل

منابع

1. Abbouda, S. K., H. A. Alhashem, and M. O. Saeed. 2011. The effect of some operating parameters on field performance of 2WD tractor. *Scientific Journal of King Faisal University* 2 (1): 153-166.
2. Alimardani, R. 1987. A computer based instrumentation system for measuring tractor field performance. Ph.D. Thesis, Iowa State University, Ames, IO, USA.
3. Alluvione, F., B. Moretti, D. Sacco, and C. Grignani. 2011. EUE (Energy use efficiency) of cropping systems for a sustainable agriculture. *Journal of Energy Engineering* 36 (7): 4468- 4481.
4. Al-suhaibani, S. A., A. Janobi, and Y. Majhadi. 2010. Development and evolution of tractors and tillage implements instrumentation system. *American Journal of Engineering and Applied Sciences* 3 (2): 363-371.
5. ASAE Standards. 1997. ASAE D497.3: Agricultural Machinery Management Data. in: Hahn, R. H., M. A. Purschwitz, and E. E. Rosentreter, (Eds), ASAE Standards 1997, 44th Ed. ASAE, pp. 363-370.
6. Bower, C. G., Jr. 1990. Tillage draught and energy measurements of twelve southeastern soil series. *Transactions of the ASABE* 32 (5): 1492-1502.
7. Burhan, O., H. Akcaoz, and C. Fert. 2004. Energy input-output analysis in Turkish agriculture. *Renewable Energy* 29 (1): 39-51.
8. Jenane, C., and L. L. Bashford. 1995. Field tractive performance comparisons between a tractor operated in the 2WD and 4WD mode. 1995. *Actes inst. Agron. Vet (maroc). Sciences Agronomiques et veterinaires* 15 (1): 47-57.
9. Jenane, C., L. L. Bashford, and G. Monroe. 1996. Reduction of fuel consumption through improved tractive performance. *Journal of Agricultural Engineering Research* 64 (2): 131-138.
10. Khalilian, A., S. A. Hale, C. H. Hood, T. H. Garner, and R. B. Dodd. 1989. Comparison of four ground speed measurement techniques. ASAE Paper No. 89-1040. ASAE, St. Joseph, MI. 49085-9659 USA.
11. Kheiralla, A. F., and A. Yahya. 2001. A tractor data acquisition system for power and energy demand monitoring of agriculture field operations. *Journal of Science and Technology* 9 (1): 51-67.
12. Kheiralla, A. F., A. Yahya, M. Zohadie, and W. Ishak. 2004. Modeling of power and energy requirements for tillage implements operating in serdang sandy clay loam, Malaysia. *Soil and Tillage Research* 78 (1): 21-34.
13. Khosravi, M., M. H. Abbaspour-Fard, and M. H. Aghkhani. 2012. Design and evaluation a digital system for measuring slip and forward speed of 2WD tractor in Iran. *Journal of Agricultural Machinery Engineering* 2 (1): 1-10. (In Farsi).
14. Kolator, B., and I. Bialobrzewski. 2011. A simulation model of 2WD tractor performance. *Journal of Computer and Electronics in Agriculture* 76 (2): 231-239.
15. Lackas, G. M., R. D. Grisso, M. Yasin, and L. L. Bashford. 1991. Portable data acquisition system for measuring energy requirements of soil-engaging implements. *Journal of Computers and Electronics in Agriculture* 5 (4): 285-296.

16. Loghavi, M., and A. Mollasadeghi. 2002. Comparison and evaluation traction efficiency of U650 and MF285 tractors in plowing with moldboard plow. *Science and Technology of Agriculture and Natural Resources, Water and Soil Science* 6 (2): 177-185. (In Farsi).
17. Lotfi, D., A. Hemmat, and M. R. Akhanan Sarraf. 2007. Development and evaluation of a three-point hitch dynamometer and a fifth wheel for mounted implement draft and tractor speed measurements. *Science and Technology of Agriculture and Natural Resources, Water and Soil Science* 11 (1): 147-163. (In Farsi).
18. Mohtasebi, S. S., M. Behrozi Lar, and M. Safa. 2008. Computer of direct and indirect energy coefficients for seeding and fertilizing in irrigated wheat production. *World Applied Sciences* 3 (3): 353-358.
19. Keskin, M., and S. M. Say. 2006. Feasibility of low-cost GPS receivers for ground speed measurement. *Computers and Electronics in Agriculture* 54: 36-43.
20. Norozlo, M. A., R. Alimardani, S. Minaee, and M. Borgheei. 2010. Evaluate and compare the field performance of automatic traction control system on MF399 tractor. 6th National Conference on Agricultural Machinery Engineering and Mechanization, Kraj, Iran. (In Farsi).
21. Pranav, P. K., V. K. Tewari, K. P. Pandey, and K. R. Joha. 2012. Automatic wheel slip control system in field operations for 2WD tractors. *Journal of Computer and Electronics in Agriculture* 84:1-6.
22. Qaisrani, A. R., C. Bingcong, and M. A. Farooq. 1996. Tractor ballasting and its effects on wheel slip and fuel consumption. *International Conference on Agricultural Engineering, Beijing, China.*
23. Singh, C. D., and R. C. Singr. 2011. Computerized instrumentation system for monitoring the tractor performance in the field. *Journal of Terra Mechanics* 48 (5): 333-338.
24. Soltani, A., and M. Loghavi. 2007. The effect of axle load and second directional on fuel consumption and farm efficiency of MF 399 tractors with 4- bottom plow in tillage operation. *Journal of Iranian Agricultural Science* 38 (4): 641-649. (In Farsi).
25. Takashi, G., T. Tsukasa, Y. Sugiura, H. Takahashi, K. Shimizu, and E. Seki. 2010. Reduction rates of fuel consumption by gear up end throttle down on an agricultural tractor. *The Japan Agricultural Research Quarterly* 44 (4): 369-374.
26. Wang, G., and G. C. Zoerb. 1990. A farm tractor driver's information system. *Journal of Computer and Electronics in Agriculture* 4 (3):191-207.