

بکارگیری انرژی برق از تراکتور جهت تأمین توان ارتعاشی زیرشکن ارتعاش دورانی

بهروز گودرزی^۱، نواب کاظمی^{۲*}، بهرام رشیدی^۳ و محمد امین آسودار^۴

چکیده

کشاورزی دقیق از بهترین راه‌کارهای اجرای عملیات مکانیزه برای حفظ منابع طبیعی و اقتصادی است. رسیدن به این مهم با بکارگیری انواع حسگرها، فناوری‌های متنوع هیدرولیکی، الکترونیکی و مکانیکی در ماشین‌های کشاورزی کنترل و برنامه‌ریزی برای اعمال نرخ متغییر VRA به‌ویژه با رفع مشکل تأمین برق مورد نیاز مهیا خواهد شد، ازطرفی گسترش بکارگیری انرژی برق به دلیل انتقال آسان‌تر، هزینه پایین، بازدهی بالا و قابلیت برنامه‌ریزی هوشمند در صنایع مختلف به‌ویژه خودروسازی، طی چند دهه اخیر نشان از ضرورت ورود آن به تراکتورها و ماشین‌های کشاورزی دارد، اما نوع و میزان توان الکتریکی موجود در تراکتورها عامل محدود کننده اصلی است. در این پژوهش با مروری بر روش‌های تأمین برق ادوات کشاورزی، یک روش جدید برای ارتعاش یک زیرشکن برقی پیشنهاد و آزمایش گردید. اساس این پیشنهاد طراحی یک اینورتر DC با ورودی برق از باتری تراکتور است که مدولاسیون عرض پالس و یک پتانسیومتر وظیفه اعمال دور مناسب برای الکتروموتورها و بسامد ارتعاش متغییر را بر عهده داشته و بسامدهای سامانه ارتعاش زیرشکن (بسامد صفر: F1 بسامد ۱۸+ :F2، ۱۸- :F3، ۳۶+ :F4 و ۳۶- :F5) با توان مورد نیاز تا ۱ کیلووات فراهم شد. نتایج شاخص‌های خاکورزی زیرشکن ارتعاش دورانی با انرژی برق نشان داد که تأثیر سطوح بسامد ارتعاش بر نیروی مقاومت کششی و کاهش قطر کلوخه در سطح ۵٪ معنی‌دار شده است. لذا برقی‌سازی ادوات کشاورزی موجب بهبود عملکرد آنها شده و با طراحی اینورتر علاوه بر تأمین توان الکتریکی لازم، سادگی، کاهش هزینه‌ها و استفاده توان مستقل از دور موتور تراکتور شرایط را برای اعمال کشاورزی دقیق فراهم می‌نماید.

واژه‌های کلیدی: توان الکتریکی، زیرشکن ارتعاشی، مدولاسیون پالس، کشاورزی دقیق.

ارجاع: گودرزی ب. کاظمی ن. رشیدی ب. و آسودار م. ا. ۱۴۰۲. بکارگیری انرژی برق از تراکتور جهت تأمین توان ارتعاشی زیرشکن ارتعاش دورانی. نشریه پژوهش‌های مکانیک ماشین‌های کشاورزی. ۲۶: ۶۹-۸۱. <https://dx.doi.org/10.22034/JRMAM.2023.13905.593>

۱- دانش آموخته دکتری، گروه مهندسی ماشین‌های کشاورزی و مکانیزاسیون، دانشکده مهندسی زراعی و عمران روستایی، دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی خوزستان.
۲- استادیار گروه مهندسی ماشین‌های کشاورزی و مکانیزاسیون، دانشکده مهندسی زراعی و عمران روستایی، دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی خوزستان.
۳- استادیار گروه برق و الکترونیک، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه آیت‌الله بروجردی.
۴- استاد گروه مهندسی ماشین‌های کشاورزی و مکانیزاسیون، دانشکده مهندسی زراعی و عمران روستایی، دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی خوزستان.

* نویسنده مسئول: navab@asnrk.ac.ir

تاریخ دریافت: ۱۴۰۱/۰۳/۲۶ تاریخ پذیرش: ۱۴۰۱/۰۷/۱۰

مقدمه

مکانیزاسیون کشاورزی با ورود اسببخار به مزرعه و کاهش سختی انجام کار و جلوگیری از کاهش تولید ناشی از به موقع انجام نشدن عملیات کشاورزی، جایگاه ویژه‌ای پیدا نمود، علاوه بر این اشتغال‌زایی ناشی از افزایش تولید، کاهش هزینه‌ها را نیز موجب شد و از طرفی افزایش مصرف انرژی بخصوص سوخت‌های فسیلی و تخریب اجباری محیط زیست، دست‌اندرکاران و تصمیم‌گیران را به سمت اعمال دقیق، به‌اندازه و متناسب انواع نهاده و عملیات ماشینی یا همان کشاورزی دقیق سوق داده است. بخش قابل توجهی از سوخت‌های فسیلی در بخش کشاورزی با رقمی حدود ۱۱٪ از کل مصرف، سومین بخش پرمصرف نفت و گاز کشور است (Bagherzadeh & Rafati, 2018). در کشورهای توسعه یافته، کشاورزی دقیق با بکارگیری حسگرها و تلفیق انواع فناوری‌ها همچون سامانه‌های هیدرولیکی، مکانیکی، نئوماتیکی، الکتریکی و الکترونیکی و توسعه نرم افزارها به عنوان یک راهبرد در کنار سایر صنایع به سرعت در حال پیشرفت است. از طرفی تفاوت عمده بین گذشته، حال و آینده تغییرات به سمت برقی‌سازی^۲ است.

از آنجایی که اکثر ماشین‌های کشاورزی یا توسط تراکتور در مزرعه کشیده شده (انواع خاک‌ورزها، کارنده‌ها، سم‌پاش‌ها و ...) و یا خودکششی هستند (کمباین، ماشین‌های برداشت، باغبند، ...) و منبع تأمین توان ادوات دنباله‌بند شامل یک یا ترکیبی از چند توان کششی، هیدرولیکی و یا چرخشی است و در موارد بسیار جزئی مانند روشنایی لامپ‌ها، برخی حسگرها، پمپ‌هایی با توان پایین و غیره از توان الکتریکی استفاده می‌شود. در تراکتورها که عموماً دیزلی هستند و نیازی به سامانه جرقه‌زنی هم ندارند، توان الکتریکی در آنها توسعه چندانی نداشته است (Pakdel, 2017). اما در مقابل صنعت خودروسازی به لحاظ بکارگیری انرژی الکتریکی در گام نخست، عمدتاً ابزار رفاهی- ایمنی مانند بخاری، برف‌پاک‌کن، شیشه‌بالابر، گرمکن شیشه و تجهیزات تنظیم صندلی را از حالت مکانیکی به برقی تبدیل نموده و سپس به‌طور پیوسته فراتر رفته و با تجهیز ماشین به انواع موتورهای الکتریکی برای به‌کارانداختن، پمپ‌ها، فن‌ها و ... توان حرکتی با انرژی برقی استفاده شده است. در مسیر توسعه و بکارگیری الکترونیکی می‌توان از

جایگزینی سامانه ۱۲ ولت با سامانه ۴۸ ولت به منظور تأمین توان بیش‌تر با بازدهی بالاتر نام برد. در همین راستا پیش‌تر، در برخی ماشین‌های سنگین و تراکتورها به دلیل توان بالای مورد نیاز هنگام روشن شدن موتورهای دیزلی، با وجود ۱۲ ولتی بودن سامانه الکتریکی از سامانه ۲۴ ولتی برای الکتروموتور استارت استفاده شده است (Kumar Kumawat, A. & Kumar Thakur, 2017). با این روند رو به رشد در زمینه‌ی گسترش و تنوع استفاده از توان الکتریکی که منجر به تولید خودروهای کاملاً الکتریکی شده است و با توسعه‌ی پیوسته باتری‌ها، الکتروموتورهای چند فاز و سامانه‌های الکترونیکی مبدل، با کاهش قیمت و افزایش کارایی، قابلیت رقابت بیش‌تری با سامانه‌های احتراقی پیدا نموده که این گسترش در آینده تراکتورها و ماشین‌های کشاورزی نیز رخ خواهد داد. هرچند مهم‌ترین مؤلفه‌های تأثیرگذار بر طراحی مؤثر سامانه‌ی الکتریکی ماشین‌های متحرک عبارتند از نوع موتور، سامانه مدیریت انرژی الکتریکی و عضو ذخیره‌ی انرژی که همان باتری است (Ebbesen et al., 2013). در راستای توسعه کاربرد توان الکتریکی، مشکلات مختلفی از جمله: بهینه‌سازی ظرفیت موتورهای الکتریکی و سامانه‌های ذخیره انرژی، مورد بحث قرار گرفته است.

در میان ادوات کشاورزی کششی به دلیل تحرک تراکتور- ماشین و انتقال هزینه‌بر توان مکانیکی، هیدرولیکی و نئوماتیکی از تراکتور به ماشین، در صورت وجود یا تأمین توان الکتریکی و الکتروموتور مناسب، انتقال توان الکتریکی بسیار آسان، ایمن، کم‌صدا و کم‌استهلاک خواهد بود (Gharabaghi & Abbasfalipour, 2015). همچنین در ماشین‌های بزرگ و گران‌قیمتی مانند کمباین و ماشین‌های برداشت، ده‌ها انشعاب توان هیدرولیکی و مکانیکی وجود دارد، از نظر طراحی، هزینه، ایمنی، استهلاک، تلفات انرژی و عدم کنترل دقیق، موجب پیچیدگی این ماشین‌ها شده است، در صورتی که با تأمین توان الکتریکی برای انشعابات، این مشکلات تا حدود زیادی برطرف خواهند شد (Khtawkar et al., 2019).

در سال ۱۹۵۴ میلادی برای اولین بار یک ماشین الکتریکی بسته‌بند علوفه به عنوان ضمیمه‌ای برای تراکتور Farmall 400 طراحی و ساخته شد. کلیه قطعات متحرک این بسته‌بند توسط توان الکتریکی فعال شده و این توان

۱۱kW، مجهز و در نهایت با ماشین معمولی هیدرولیکی مقایسه شده است. از این دو الکتروموتور یکی برای هدایت کود و دیگری برای سامانه تحویل بذر بود. نتایج نشان داد که تا ۳۰ درصد نسبت به نوع معمولی کاهش مصرف انرژی کاهش یافته است.

به‌کارگیری توان الکتریکی در ادوات سمپاشی به نسبت متداول‌تر از سایر ادوات کشاورزی است، زیرا ماهیت عملیات سمپاشی به خوبی با سازوکار راه‌اندازهای الکتریکی هوشمندسازی و کنترل پذیر شده و از هدر رفت آب، سم و انرژی جلوگیری می‌گردد. به عنوان مثال، در ماشین سمپاش الکتریکی آمازون^۱، که بدون انتقال قدرت مکانیکی هدایت می‌شوند و با جداسازی راه‌اندازپاشش از موتور اولیه، اجازه کنترل ویژه‌ی مستقل در سازوکار پاشش فراهم شده است. بنابراین تحویل شیمیایی سم و مسیر آب به طور جداگانه و مستقل از موتور و سرعت پیش‌روی، کنترل شده و کاربرد نرخ متغیر را برای کشاورز، امکان‌پذیر می‌سازد (Amazone, 2009).

شرکت AGCO نیز یک نمونه سمپاش هیبریدی برقی-دیزلی چهار چرخ محرک را توسعه داده است و روی چرخ‌های محرک الکتروموتورهای ۳ فاز AC با توان ۸۴ کیلووات نصب شده و تامین توان از طریق یک ژنراتور با خروجی ۶۵۰ ولت DC بوده که قادر به تولید توان از ۲۰۰ تا ۲۴۰ کیلووات در سرعت‌های ۱۵۰۰ و ۱۹۰۰ دور بر دقیقه همراه مبدل برق مستقیم به متناوب است. در اوایل سال ۲۰۱۰، عملکرد این سمپاش برقی با نوع مرسوم در مزارع مسطح و شیب‌دار با سرعت‌های ۱۹ و ۲۹ کیلومتر در ساعت توسط شرکت مذکور مورد مقایسه و ارزیابی قرار گرفت. نتایج نشان داد، بطور متوسط سمپاش نوع برقی-دیزلی علی‌رغم اینکه ۸۰۰ کیلوگرم سنگین‌تر است، ۲۰ تا ۳۰ درصد سوخت کم‌تری نسبت به سمپاش مرسوم مصرف می‌کند (Dipak et al., 2019).

در پژوهشی، Rauch (2010) عملکرد سازوکارهای مختلف بشقاب موزع شامل نوع مکانیکی، هیدرولیکی و برقی را در پراکندن کود بررسی نمود. نوع برقی شامل موتورهای سه فاز، ۴۸۰ V، ۱۳kW، با سرعت چرخش ۵۰۰۰ دور در دقیقه بود. طبق نتایج بهترین بازده کودپخش‌کن برقی در حداکثر گشتاور بشقاب پخش کود است، بدین معنا که کودپخش‌کن برقی در حداکثر ظرفیت مزرعه‌ای دارای

از یک ژنراتور سه فاز ۲۰۸ ولت با توان ۱۰ کیلووات تأمین شده بود. این گام اولیه نشان داد که توان الکتریکی که از توان مکانیکی تراکتور ایجاد شده انتقال آن به ادوات دنباله‌بند امکان‌پذیر است. اما به دلیل آشنا نبودن کشاورزان، مستقل نبودن مقدار ولتاژ از دور موتور و نبودن راه‌اندازهای کنترل امروزی، این طرح از استقبال کافی برخوردار نشد (Michael, 2012; Stoss et al., 2013) و تا گام‌های بعدی کاربرد الکتریسیته در کشاورزی، زمانی بیش از معمول سپری شد. با توسعه‌ی راه‌اندازهای جریان مستقیم و متناوب در دو تا سه دهه‌ی اخیر، جهش ناگهانی در کاربرد الکتریسیته در ادوات کشاورزی به وجود آمده است.

در اتریش با نصب ژنراتور دیزلی در عقب، پهلو یا جلوی تراکتور و ماشین‌های خودکششی، همچنین نصب ژنراتور روی برخی ادوات با اتصال به محور تواندهی تراکتور برای راه‌اندازی ولتاژهای بالا، نظر تولیدکنندگان درباره آینده این شیوه تأمین توان برای ماشین‌های برداشت جمع‌آوری شد. یک سوم تولیدکنندگان نسبت به فراگیر شدن در کوتاه مدت خوش بین بودند، یک سوم بعدی منتظر اقدامات دیگر رقیبان بودند و یک سوم آخر هم نظر خود را در این باره بیان نکردند. همچنین ۴۷ درصد از تولیدکنندگان یک سوم اول، به دلایل فنی بر اثربخشی درایوهای برقی متمرکز شدند و ۵۳ درصد باقی مانده بر توسعه‌ی اهداف عملکردی بهبود یافته‌ی ناشی از توان الکتریکی تأکید داشتند (Karner et al 2012).

در یک پژوهش، Götz et al., (2012) نسخه‌ای از کارنده‌ی برقی را معرفی نمودند که ویژگی بارز راه‌انداز الکتریکی به کار رفته در این کارنده، ضمن توانایی حفظ فاصله ثابت در طول ردیف‌های کاشت، سر و صدای قطعات مکانیکی مانند محورها، زنجیر چرخ‌ها و چرخ‌دنده‌ها نیز کاهش می‌یابد.

در پژوهشی دیگر، Rahe et al., (2013) آزمایش‌های میدانی در ماشین‌های کاشت را با استفاده از تراکتورهای مجهز به تولیدکننده انجام داده‌اند. این ماشین کاشت از یک تولیدکننده PMS ۵۰ کیلوواتی با یک موتور دیزل اولیه ۱۶۴ کیلووات راه‌انداز، استفاده کرده است. پنکه خنک‌کننده موتور توسط یک موتور الکتریکی ۱۵ کیلووات راه‌اندازی شده و قسمت کاشت نفوماتیک EDX eSeed Amazone به دو الکتروموتور سه فاز، ۴۰۰ V و

روش می‌توان تا ۶۰ درصد پیچیدگی طراحی در قطعات انتقال توان و به تبع آن آلودگی‌های صوتی را کاهش داد.

استفاده از توان الکتریکی در انجام آزمایش‌ها و ابزار دقیق کشاورزی

کاربرد الکتریسیته در وسایل نقلیه جاده‌ای و خارج از جاده شامل دستگاه‌های عمرانی و کشاورزی از اهمیت ویژه‌ای در تحقیقات و توسعه‌ی حاضر در سطح جهان برخوردار است. (Ponomarev et al., 2015) اظهار داشتند تولید کنندگان برای باقی ماندن در بازار باید انواع پیش‌رانه‌های هیبریدی را با مزایایی همچون صرفه جویی در مصرف انرژی به خریداران تحویل دهند. مسلماً استفاده از کاربرد الکتریسیته، بیش از وسایل نقلیه شهری، در تراکتورهای مزرعه، موجب ایجاد امکانات و مزایای جدید برای کشاورزی خواهد شد، زیرا ماشین‌های مزرعه با تنوع بالا و پیچیده‌ای از مسیرهای عملکردی درگیر هستند (Kärner et al., 2013).

در گزارشی، (Pohlandt & Geimer, 2015) برخی مزایا و معایب را در مورد سازوکارهای الکتریکی و هیدرولیکی مطرح کردند. مفهوم بازیابی انرژی با سهولت نسبی در مورد وسایل نقلیه الکتریکی شهری اتخاذ شده است و به طور مشابه، در مورد ماشین‌هایی که عملیات تکراری دارند مانند حمل و نقل تریلری و بالابرها، قادر به بازیابی انرژی جنبشی هستند که در آن انرژی قابل توجهی بازیافت می‌شود (Somà et al., 2015).

به دلیل احساس نیاز و گسترش توان الکتریکی در ماشین‌ها و ادوات کشاورزی؛ سازمان الکترونیک در صنعت کشاورزی (AEF) در اکتبر ۲۰۰۸ شامل هفت تولیدکننده تجهیزات بین‌المللی کشاورزی و دو انجمن فروشندگان تولید تجهیزات در ایالات متحده (AEM) و فدراسیون مهندسی آلمان (VDMA) تأسیس شده و پس از یک اجماع علمی جهانی، مهم‌ترین اهداف سازمان را در سه بخش اعلام کردند که عبارتند از:

- توسعه و گسترش بین‌المللی فن‌آوری کاربرد الکتریسیته (الکترونیکی و الکتریکی) ماشین‌آلات کشاورزی
- هماهنگی بین‌المللی در پژوهش و تولید فن‌آوری کاربرد الکتریسیته در ماشین‌های کشاورزی

بازدهی انرژی بهتری است. یکی دیگر از مزیت‌های کودپخش‌کن برقی این است که بشقاب‌های دوار با استفاده از ترمز برقی با سرعت بیش‌تری متوقف می‌شوند و از تلفات در انتهای زمین یا اتمام کار می‌کاهند.

در تحقیقی دیگر، (Küpfer & Leu, 2013) با جایگزینی سازوکار الکتریکی با کنترل کننده‌هایی مبتنی بر حسگرهای الکترونیکی در بسته‌بندهای استوانه‌ای موفق شدند با سنجش و کنترل میزان گشتاور عامل از پاره شدن و باز شدن نوار علوفه جلوگیری گردد و یا کمتر از نیم ثانیه عملیات بسته بندی متوقف شود. همچنین (Biziorek, 2012) یک بسته‌بند استوانه‌ای را با چرخ‌های دارای سازوکار موتور الکتریکی داخلی به شکلی که هم سرعت محور و هم جهت چرخش به صورت الکترونیکی قابل کنترل باشد را توسعه داد. کنترل چرخش دوطرفه روی حرکت غلتک، این امکان را برای کاربر فراهم می‌نمود تا هنگام بارگیری، خطر گیرکردن بسته‌بند را کاهش دهد. مزیت دیگر سازوکار الکتریکی این است که به دلیل کنترل دقیق و خودکار، غلتک هدایت علوفه می‌تواند در مرحله شروع پس از خروج بسته‌ی قبلی به آهستگی و بدون درگیری روند کار را روی بسته‌ی بعدی آغاز کند.

در یک بررسی، (Bernhard & Schreiber, 2005) فرضیه‌ای مبنی بر این که اگر یک کمباین الکتریکی شود، وزن دستگاه و هزینه اولیه افزایش می‌یابد را مطرح نموده و اعلام کردند که به طور میانگین نسبت توان به وزن (P/W) در سازوکارهای برقی به دلیل سنگینتر بودن قطعات و الکتروموتورها بیش‌تر از سازوکارهای هیدرولیکی است. اما با کاربرد الکتریسیته، دقت در کنترل مسیرهای برقی افزایش یافته و مصرف سوخت نیز کاهش خواهد یافت. از طرف دیگر با در نظر گرفتن وزن بالای کمباین‌ها، این وزن اضافه شده تنها سه درصد بوده و قابل چشم‌پوشی است.

Gallmeier در سال ۲۰۰۹ یک سازوکار راه‌انداز الکتریکی ترکیبی برای عملکرد دماغه در کمباین برداشت ذرت علوفه‌ای متناسب با عملکرد مزارع را ایجاد کرد. نتایج این تغییرات افزایش بازدهی ۲۳/۳ درصدی، دقت و سادگی کنترل اجزا در کمباین دارای راه‌انداز الکتریکی نسبت به نوع هیدرولیکی معمول بود. همچنین با استفاده از این

با نصب اینورتر در تابلوی برق این دستگاه، امکان تنظیم فرکانس- ولتاژ، گشتاور الکترومپم و ثابت نگه‌داشتن سرعت نفوذسنجی طبق استاندارد فراهم شده است. همچنین به دلیل اینکه کل توان مورد نیاز دستگاه کم‌تر از یک کیلووات است، امکان افزودن وسایل جانبی- رفاهی مانند تجهیزات روشنایی و شارژ کننده‌ها و تجهیزات پیشرفته آزمایشگاهی و خاکشناسی الکتریکی وجود دارد. بررسی منابع مرتبط نشان می‌دهد، برقی‌سازی در صنعت خودروسازی، حمل‌ونقل ریلی و زمینی و صنایع گوناگون دیگر با شتاب در حال توسعه است که ناشی از نتایج مثبت فنی، اقتصادی و حتی زیست محیطی آن است. بنابراین در راستای سیاست‌های جهانی مرتبط با تغییرات آب‌وهوایی و توصیه‌های مراکز و مجامع علمی جهانی، حرکت به سمت برقی‌سازی و جایگزینی قطعات مکانیکی و هیدرولیکی با قطعات برقی در مکانیزاسیون کشاورزی ضروری است. از طرفی رواج کشاورزی دقیق و هوشمندسازی با به‌کارگیری توان الکتریکی و قطعات مربوط ساده‌تر و امکان‌پذیرتر است. دو مسئله در این راستا وجود دارد، یکی برقی نمودن تمام یا برخی از سازوکارها یا فرآیندهای یک ماشین خودکششی یا دنباله‌بند کشاورزی و دوم تأمین انرژی الکتریکی در مزرعه. مورد اول با توسعه فناوری قابل انجام است اما مورد چگونگی تأمین توان به‌ویژه در شرایطی که مقدار توان مورد نیاز ماشین افزایش می‌یابد مسئله اصلی تحقیق حاضر بوده و هدف اصلی ابتدا مروری مختصر به انواع روش‌های ممکن و سپس طراحی مداری است که بتواند توان الکتریکی مورد نیاز یک ماشین کشاورزی را از تراکتور تأمین نماید. در گام بعدی ماحصل این روش به عنوان یک محصول بومی دانش‌پایه مورد استفاده توسط محققین و تولیدکنندگان توسعه کشاورزی دقیق قرار گیرد.

مواد و روش‌ها

تحقیق حاضر در واقع فاز سوم ضرورت دامنه گسترش کاربرد الکتریسیته در ادوات کشاورزی است که مرحله اول آن در سال ۹۲ با ساخت یک دستگاه کشتکار تک ساق ارتعاش برقی در نمونه آزمایشگاهی انجام شد (شکل ۱، الف). در این مرحله توان الکتریکی مورد نیاز از ۲۰۰ تا ۶۰۰ وات بود و نتایج عملکردی قابل قبول نیز

• مدیریت توسعه‌ی پیشرفت‌های فنی و اجرای استانداردهای الکترونیکی (با عنوان قانون ISOBUS) مانند: آزمایش‌های صدور گواهینامه، آموزش، کارگاه‌های آموزشی، فعالیتهای بازاریابی و مشاوره

در پژوهشی، (Goudarzi et al. (2015) به منظور امکان‌سنجی و تأثیر به‌کارگیری ارتعاش از نوع دورانی در ساخت یک کشتکار تک ساق با طرح تیغه‌ی عامل پنجه‌غازی مورد بررسی و آزمایش قرار داد (شکل ۲). در این آزمایش دوران جرم نابرابر با الکتروموتور سه فاز، ۱/۱ کیلووات و تغییر جهت دوران با کلید سلکتور دوطرفه انجام شد. برای تأمین توان الکتریکی مورد نیاز از اتصال یک تولیدکننده با روش پولی و تسمه به محور توان‌دهی تراکتور، تأمین شد. پیوستگی دور تولیدکننده با محور توان‌دهی و موتور تراکتور، نیازمند دقت در انتخاب سرعت پیشروی بود تا ولتاژ و فرکانس لازم با سرعت پیشروی هماهنگی داشته باشد. از طرفی چون خاک‌ورز پنجه‌غازی، آزمایشی و تک‌ساق بود تراکتور مسی فرگوسن ۳۹۹ در تمامی دنده‌ها قادر به تأمین توان و گشتاور شروع حرکت و خاک‌ورزی بود.

در خصوص ابزار اندازه‌گیری مشخصات خاک یک دستگاه نفوذسنج مخروطی- مقاومت‌سنج برشی خاک توسط (Yahya et al. (2003)، طراحی و ساخته شده است. واحدهای سنجش نفوذ و برش از دو موتور برقی مرحله‌ای گشتاور بالا برای نفوذ و چرخش در خاک استفاده می‌کنند. برای کنترل ماشین از واحد کنترل کننده منطق قابل برنامه‌ریزی (PLC) استفاده شده است. کسب داده‌ها شامل موقعیت مکانی (DGPS)، رطوبت، شیب زمین و عوامل عملکرد نفوذسنجی و مقاومت تنشی، برای کاربرد آن در (GIS) و هدف نهایی که ترسیم نقشه است، توسط رایانه انجام می‌شود و تأمین توان کل این مجموعه یک تولیدکننده دیزل سه کیلووات و در یک جعبه عایق صدا در سمت چپ پایین تراکتور نصب شده است. همچنین (Kazemi et al., (2018) برای ساخت و توسعه‌ی یک نفوذسنج مخروطی- نمونه‌بردار پشت تراکتوری با دقت بالا، از توان الکتریکی استفاده نمودند. این ماشین توسط اتصال سه نقطه تراکتور حمل شده و توان مورد نیاز آن از طریق نصب یک تولیدکننده سه فاز جریان متناوب پنج کیلووات و اتصال به محور توان‌دهی تراکتور تأمین می‌شود.

مؤلفه‌های مربوط به خاک، مقاومت کششی و سرعت پیشروی قابل برنامه‌ریزی و اجرای بسامد، بهینه خواهد بود؛ اما امکان تأمین توان الکتریکی ارتعاش دورانی که مسئله اصلی این تحقیق است، همچنین طراحی بر اساس دانش بومی، سادگی کاربری و کاهش هزینه‌ها در اولویت هستند. مراحل اول و دوم استفاده از انرژی الکتریکی و در شرایط فعلی به سه حالت می‌توان توان الکتریکی را تأمین نمود: ۱) تولیدکننده متصل به محور توان دهی تراکتور (شکل ۲)، ۲) موتور- تولیدکننده جداگانه و ۳) استفاده از سامانه‌ی توان الکتریکی ۱۲ ولت موجود در تراکتور است.



شکل ۲- الف) اتصال ژنراتور با پولی و تسمه به پی تی او (Goudarzi et al., 2015) و ب) اتصال با کوپلینگ و شفت و ۴ شاخه گاردان (Kazemi et al., 2018)

حالت اول با نصب یک تولیدکننده بر روی تراکتور و اتصال محور آن به محور تواندهی بوده که در تحقیقات قبلی در دو حالت نصب روی تراکتور و نصب روی وسیله دنباله‌بند (شکل ۲) انجام شده است. در حالت دوم نیازی به تجهیزات و یا تغییرات فنی خاصی وجود ندارد و فقط با جایابی و سپس نصب مجموعه کامل یک ژنراتور انجام می‌شود. اما حالت سوم که ضرورت آن در تحقیق حاضر بیان شد امکان راه‌اندازی یک الکتروموتور از برق باتری تراکتور برای اهدافی هم‌چون تأمین انرژی ارتعاشی زیرشکن با بیشینه توان یک کیلووات است. تا شرایط اعمال نرخ متغیر (VRA) مستقل از دور موتور و سرعت پیشروی تراکتور مهیا گردد. حالت سوم نیازمند طراحی یک مدار اینورتر بوده تا بتواند توان ارتعاشی لازم برای

حاصل شد (Goudarzi et al., 2015). در مرحله‌ی دوم زیرشکن ارتعاشی تک ساق در ابعاد واقعی ساخته و مجهز به مکانسیم ارتعاش برقی گردید (Goudarzi et al., 2020) (شکل ۱، ب) در این زیرشکن توان الکتریکی مورد نیاز به ۱۰۰۰ وات رسید و به جای حرکت رفت و برگشتی، از نوع ارتعاش دورانی با سامانه جرم نابرابر استفاده شد (شکل ۳) که در دو بعد آزادی حرکت دارد. مهم‌تر اینکه تعویض جهت دوران به منظور بهره‌وری کامل از مزایای ارتعاش دورانی و خودکارسازی لحظه‌ای بسامد ارتعاش بر اثر مقدار کشش مورد نیاز نیز فراهم گردید که از مزایای بکارگیری برق و ارتعاش دورانی نسبت به حالت رفت و برگشتی که تأمین توان آن بطور مکانیکی از محور تواندهی مکانیکی تأمین می‌شد بود. همچنین توان مورد نیاز کم‌تر، استهلاک پایین‌تر با سروصدای خفیف‌تر و بهبود شاخص‌های خاکورزی از جمله نتایج برقی نمودن ارتعاش بود (Goudarzi et al., 2021).



شکل ۱- الف) کشتکار ارتعاشی تک ساق آزمایشگاهی و ب) زیرشکن ارتعاش دورانی برقی سوار بر تراکتور

از آنجایی که در ارتعاش دورانی افزون بر بسامد ارتعاش، جهت دوران نیز مهم است، لذا صرفاً امکان کنترل، تغییر دور و تعویض جهت با حضور موتور برقی مقدور بوده و همچنین شرایط اعمال خاک‌ورزی دقیق با توجه به

راه‌اندازی ارتعاش زیرشکن موجب شده است که اطمینان برای کاربرد آن در سایر ادوات با توان مورد نیاز پایین‌تر، تضمین گردد.

حداکثر توان برای چرخش سامانه جرم نابرابر دورانی زیرشکن مورد آزمایش با ۱۴۵۰ دور بر دقیقه، ۱۱۰۰ وات است. این توان با یک موتور برقی جریان متناوب مجهز به رله تغییر جهت دوران، ارتعاش مورد نیاز زیر شکن با بسامد ۴۰ هرتز تا مین گردید.

برای داده‌برداری ولتاژ و شدت جریان از مولتی‌متر به صورت موازی و آمپر متر به صورت سری در کابل ورودی مثبت موتور برقی استفاده شد. برای انتقال توان الکتریکی از کابل مسی با مقطع ۱۶ میلی‌متر استفاده شد. در آزمایش‌های کارگاهی با نصب یک موتور برقی سه فاز و برق ۲۲۰ ولت برای تأمین ارتعاش زیرشکن با استفاده دستگاه اندازه‌گیری آنالایزر توان، حداکثر توان لازم ۱/۱ کیلووات ثبت شد. لذا مدار طراحی شده (شکل ۴) می‌بایست با توان مذکور قابلیت کنترل دور، جهت تأمین بسامدهای مورد نیاز را داشته باشد. در این مدار از پایه گیت ترانزیستور از نوع ماسفت کانال N، با اسم تجاری IRFP064N استفاده شده است. طبق مشخصات فنی این ترانزیستورها حداکثر جریان درین-سورس ۱۱۰ آمپر (با ولتاژ گیت-سورس ۱۰ ولت)، حداکثر توان ۲۰۰۰ وات (در دمای ۲۵ درجه سلسیوس) و حداکثر ولتاژ قابل تحمل درین-سورس ۵۵ ولت است. با توجه به بالا بودن جریان کاری موتورها، ترانزیستورهای ماسفت به گرماخوارهای (هیت سینک) بزرگ وصل شده و یک دمنده نیز با توجه به گرمای محیطی خوزستان، به کار گرفته شد. تغذیه این مدار توسط باتری کتابی ۹ ولت صورت گرفت (شکل ۴).

برای انجام ارزیابی عملکرد زیرشکن نیز، یک طرح فاکتوریل در قالب بلوک‌های کامل تصادفی، سه تکرار و پنج سطح ارتعاش انجام شد. تیمارهای طرح عبارت بودند از زیرشکنی بی ارتعاش (بسامد صفر: F1) و زیرشکنی ارتعاشی (بسامد ۱۸+ :F2، ۱۸- :F3، ۳۶+ :F4 و ۳۶- :F5) که در سه تکرار با کرت‌های آزمایشی به عرض ۴ و طول ۳۰ متر انجام شدند. منظور از علامت مثبت در بسامدها، جهت چرخش موافق و علامت منفی جهت چرخش مخالف سامانه جرم نابرابر، نسبت به جهت چرخش رو به جلوی چرخ تراکتور است. در هر دو بسامد

زیرشکن ارتعاش دوران برقی بکارگرفته شده در این تحقیق را با ویژگی‌های مورد نیاز یعنی تغییر دور، جهت جریان و فرکانس، داشته باشد.

مشخصات زیرشکن به کار رفته عبارت از زیرشکن ارتعاشی اتصال سه نقطه سوارشونده تک ساق با حداکثر عمق ۹۰ سانتی‌متر، با یک ساق کوتاه به عنوان پیش‌بر در جلو است (شکل ۱، ب). هم‌چنین تجهیزات برقی مورد استفاده عبارتند از: باتری، دینام تراکتور، یک سوکنده الکتریکی، موتور برقی متناوب، کابل و ابزار اندازه‌گیری هم‌چون مولتی‌متر (HIOKI 3280-10)؛ آمپر متر (Ziegler EQ-90)؛ دورسنج (degree-200A)، آنالایزر توان مدل DT-3353، دورسنج (BENETECH-8905)، دیتالاگر و کشش‌سنج S شکل (zemic-5 tone) جهت راه‌اندازی سازوکار جرم نابرابر برای تولید ارتعاش است (شکل ۳).

برای انتخاب موتور برقی مناسب به طور کلی دو گزینه اصلی موتور برقی متناوب و موتور برقی جریان مستقیم وجود داشت. موتور برقی جریان مستقیم از این نظر که قیمت پایین‌تری دارد دارای مزیت بوده اما نظر به اینکه کنترل دور و جهت دوران در کار ضرورت دارد، می‌بایست از نوع سه فاز بوده که به نوبه خود نیازمند راه‌انداز مخصوص است تا برق ۱۲ ولت متناوب تراکتور با دو مبدل ماهیتی و ولتاژی را تأمین کند. همچنین نظر به افت بازدهی که در اثر دو مرحله‌ای شدن تبدیل نوع جریان الکتریکی رخ خواهد داد؛ کمیاب و گرانی این مبدل در داخل کشور و نیز اندیشه‌ی بومی‌سازی، گزینه‌ی موتور برقی جریان متناوب برتری پیدا دارد.



شکل ۳- نمای موتور برقی ۱۲ ولتی و سازوکار جرم نابرابر

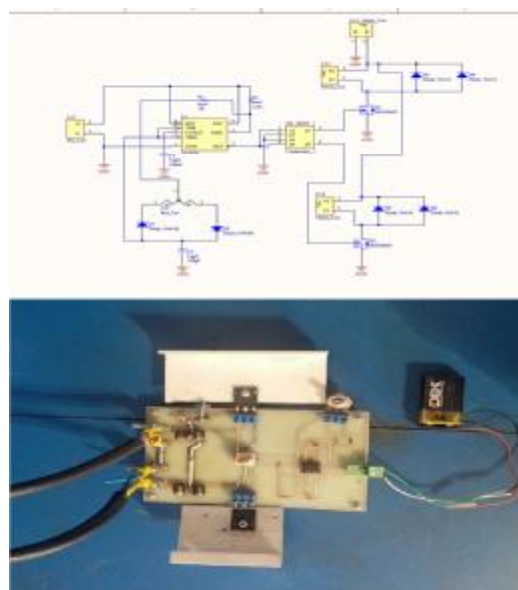
از آنجایی که در بین ادوات دنباله‌بند تراکتوری انواع سمپاش‌ها و کارنده‌ها که شرایط نصب سامانه نرخ متغییر را دارند به نسبت زیرشکن ارتعاش برقی توان کمتری نیاز دارند بنابراین آزمایشات طراحی مدار برای تأمین توان و

دور محور تواندهی و به تبع وابسته مستقیم به دور موتور هستند و برای تثبیت ولتاژ می‌بایست دور موتور را ثابت انتخاب نمود. این امر سرعت پیشروی را تحت تأثیر خود قرار داده و نظر به تنوع شرایط کاری دنباله‌بندها موجب محدودیت در مدیریت اجرای عملیات در مزرعه شده و عملاً موضوع کشاورزی دقیق با مشکل مواجه خواهد شد. Rahimi et al. (2012) در تحقیق خود نیز نشان دادند که سرعت پیشروی تراکتور که متأثر از دور موتور است تأثیر معنی‌داری بر عوامل عملکردی همچون توان، مصرف سوخت و لغزش دارد. (ب) شکل، اندازه، و طرح انواع ادوات کشاورزی از یک طرف و همچنین نوع تراکتور نیز یک عامل بزرگ و محدودکننده در امکان و محل نصب تولیدکننده خواهد بود.

در حالت دوم (ژنراتور مستقل) اگرچه تنظیم ولتاژ کاملاً مستقل از دور موتور تراکتور کشنده است، اما مواردی همچون نصب و سوار کردن این ژنراتور، سنگین‌تر شدن دنباله‌بند، آلودگی صوتی، کنترل (سوخت، تعمیر و نگهداری) هم زمان با تراکتور و بالا رفتن هزینه‌ها از معایب عمده آن است. لذا حالت‌های اول و دوم هرچند که از نظر فنی و فضا برای برخی ادوات بطور خاص قابل نصب است، اما به هیچ وجه به عنوان حالتی که قابل استفاده عمومی برای همه‌ی دنباله‌بندهای پشت تراکتوری باشد، نیست.

حالت سوم یعنی سامانه یا مدار طراحی شده (شکل ۴) با استفاده از باتری ۱۲ ولت و دینام تراکتور، هیچ کدام از محدودیت‌های قبلی‌ها را نداشته و مستقل از دور موتور تراکتور عمل خواهد کرد و برای انواع ماشین‌های کشاورزی که بخشی از قطعات عامل آن‌ها به صورت برقی طراحی شده به راحتی به کار گرفته می‌شود. در این مدار برای کنترل دور الکتروموتور از مولد تولید پالس مربعی که قابلیت مدولاسیون عرض پالس^۱ را داشته و با تنظیم پتانسیومتر کنترل، سطح پالس نیز تغییر نماید، استفاده شد بنابراین سرعت الکتروموتور متناسب با بسامد مورد نیاز کنترل گردید. از آنجایی که پالس کنترلی به پایه گیت ترانزیستور ماسفت با تحمل شدت جریانی حدود ۱۰۰ آمپر مانند یک کلید عمل کرده و بر حسب پالس وارده از طرف واحد تولید پالس باعث حرکت موتور مورد نظر می‌شود، بر حسب اینکه عرض پالس PWM تولید شده توسط واحد تولید پالس چقدر باشد ترانزیستور

۱۸ و ۳۶ هرتز از پولی متحرک با قطر ۹ سانتی‌متر و دو وزنه‌ی ۲/۷ کیلوگرمی خارج از مرکز به شعاع میانگین سه سانتی‌متر بر روی سامانه‌ی جرم نابرابر استفاده شد که در شکل ۱ نمای کلی زیرشکن ارتعاش دورانی مجهز به تأمین توان الکتریکی در حالت نصب شده به تراکتور نیو هلند (T-155) با اتصال سه نقطه، مشاهده می‌شود. در این طرح آزمایشی شاخص‌های عملکرد خاکورزی همچون میانگین قطر کلوخه، مقاومت کششی و ... اندازه‌گیری شد اما در تحقیق حاضر تمرکز بر تأمین انرژی الکتریکی مورد نیاز در تیمارهای مرتبط با سطوح بسامد ارتعاش است (Goudarzi et al., 2021).



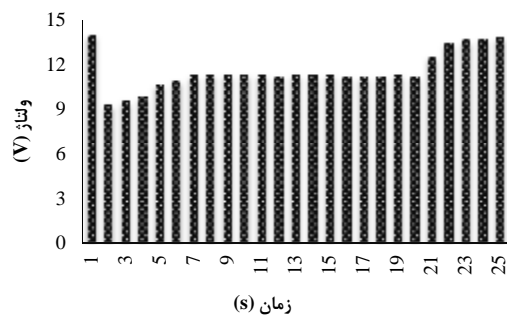
شکل ۴- الف) نقشه مدار الکترونیک تنظیم دور موتورهای برقی ۱۲ ولت، ب) نمای سخت‌افزاری مدار

نتایج و بحث

روش یا حالت‌های نصب و تأمین توان برقی

حالت اول، نصب یک ژنراتور روی تراکتور است که توان چرخشی آن از طریق اتصال به محور PTO تأمین می‌شود. این حالت به دو شیوه امکان پذیر است: یک روش نصب ژنراتور روی تراکتور و اتصال آن با تسمه و پولی به محور توان‌دهی است (شکل ۱) و روش دوم نصب ژنراتور بر روی دستگاه دنباله‌بند و اتصال به محور توان‌دهی به صورت مکانیکی (شفت و چارشاخه‌گاردان). بررسی تحقیقات قبلی نشان داد این حالت به دو دلیل مناسب نیست: الف) هردو شیوه در حالت اول وابسته به

آزمایشی که نتایج آن در شکل ۵ آمده است، مشاهده می‌شود که به محض روشن نمودن سامانه‌ی ارتعاشی در ثانیه دوم افت مقطعی در حدود چهار ولت در سطح ولتاژ (۱۳/۹ به ۹/۴) به وجود آمد و پس از رسیدن به دور نهایی الکتروموتور، با افزایش ۱/۵ ولت در حدود ۱۱/۲ تا ۱۱/۳ رسیده و ثابت می‌ماند. این مقدار افت با توجه به افزایش تجهیزات امروزی (رفاهی، ایمنی و عملکردی در تراکتورها و خودروها از قبیل کولر، لامپ‌ها و حسگرها) عادی است و مشکلی برای سامانه الکتریکی تراکتور ایجاد نخواهد کرد. پس از خاموش نمودن سامانه ارتعاش (ثانیه ۲۰م)، با گذشت سه تا چهار ثانیه، افت ولتاژ ایجاد شده جبران و به سطح اولیه بازمی‌گردد. این موضوع نیز نشان می‌دهد که توان الکتریکی مورد نیاز از دینام گرفته شده و باتری نقش تثبیت لحظه‌ای را دارد. بنابراین سامانه الکتریکی تراکتور به درستی از عهده راه‌اندازی سامانه ارتعاش برآمده است.



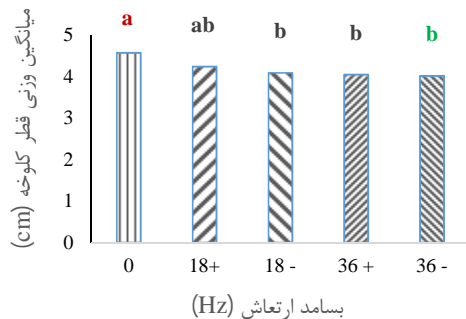
شکل ۵- ولتاژ خروجی از تراکتور به هنگام روشن و خاموش کردن سامانه ارتعاش

پرواضح است طراحی خاص این مدار، ضمن داشتن نوآوری در کنترل دور الکتروموتورهایی با این سطح آمپراژ، از سادگی و هزینه‌ای کم برخوردار است. لذا در صورت نیاز می‌توان نسبت به افزایش ظرفیت، دقت و قابلیت‌های این مدار اقدام نمود.

نتایج مثبت فوق‌الذکر نشان داد، می‌توان بدون ایجاد مشکل با اینورتر طراحی شده از سامانه‌ی الکتریکی تراکتور، در حدود یک کیلووات توان گرفت. به دلیل تنوع و اینکه در آینده ادوات کشاورزی که متناسب با کشاورزی دقیق و هوشمندسازی عملیات طراحی خواهند شد، قطعاً کاربرد این مدار خاص و کاربرد برق به طور عام، غیر از این زیرشکن خاص، در ادواتی همچون همزن‌ها و

ماسفت قطع و وصل می‌شود و تنها زمان اتصال ترانزیستور موتور مورد نظر توان الکتریکی را دریافت می‌کند. لذا با قطعات و طراحی الکترونیکی و شیوه عملکرد می‌توان مدار مذکور را نوعی اینورتر DC دانست که شدت جریانی حدود ۱۰۰ آمپر را به منظور کنترل دور موتورهای جریان مستقیم، هدایت و کنترل می‌کند. نتایج دور و شدت جریان در دو وضعیت بی‌باری و تحت بار با استفاده از دورسنج لیزری (BENETECH-8905) و دو نوع آمپر متر نشان داد که متوسط میزان شدت جریان در حالت بی‌باری ۴۲ و تحت بار ۹۲ آمپر است. سرعت دورانی یا دور موتور برقی در بی‌باری ۳۴۰۰ و تحت بار ۲۴۰۰ دور بر دقیقه ثبت شد. همچنین توان گرفته شده از سامانه‌ی برق تراکتور در نهایت برابر ۱/۱ کیلووات یا حدوداً ۱/۵ اسب بخار اندازه‌گیری شد. نتایج سنجش شدت جریان و روند خالی شدن شارژ باتری در دو حالت با موتور تراکتور روشن و خاموش نیز نشان داد که در حین کارکرد موتور برقی در زیربار، ولتاژ سامانه‌ی الکتریکی تراکتور مسی فرگوسن ۳۹۹، حدوداً ۲/۵ ولت افت دارد که عادی است و پس از قطع جریان و روشن ماندن موتور تراکتور، در طی حدوداً سه ثانیه جبران می‌شود (شکل ۵). همچنین مشخص شد، توان مورد نیاز به طور کامل از دینام دریافت شده و باتری نقش تثبیت کننده عمومی ولتاژ را دارد. لذا چنانچه در عمل از یک باتری با ظرفیت بالاتر و یا یک باتری ذخیره در حالت موازی استفاده شود، در هنگام شروع موتور برقی و یا مواقعی که شدت جریان بیشتری به صورت مقطعی نیاز است، موجب تثبیت بهتر ولتاژ خواهد شد و یا به عبارتی دیگر ضریب ایمنی و قابلیت اطمینان کاری افزایش می‌یابد. در همین راستا در شرایط نیاز به پایداری بیشتر و تثبیت بهتر ولتاژ تولیدی؛ دینام و باتری با ظرفیت بالاتر قابل استفاده است، هرچند که انتخاب نهایی ظرفیت بستگی به نوع دنباله‌بند و عملیات مربوط به کشاورزی دقیق خواهد بود.

عملیات زیرشکنی معمولاً در عرض زمین‌های زراعی انجام می‌شود و در انتهای هر خط، فضایی برای دور زدن تراکتور لحاظ می‌شود. طبیعی است در این فاصله زیرشکن از خاک خارج و الکتروموتور ارتعاش نیز خاموش است لذا افت احتمالی ولتاژ در باطری در انتهای هر خط از زیرشکنی به صورت تناوبی جبران خواهد شد. با انجام



شکل ۶- نمودار اثر لرزش بسامد بر میانگین وزنی قطر کلوخه

در بررسی نیروی مقاومت کششی نیز، نتایج استفاده از توان الکتریکی برای تولید ارتعاش دورانی، هم به لحاظ بسامد ارتعاش و هم به لحاظ جهت دوران، معنی‌دار شده‌اند. نمودار شکل ۷ اثر بسامد لرزش بر نیروی مقاومت کششی را نشان می‌دهد. مطابق با این نمودار بیش‌ترین مقاومت کششی در سطح بسامد صفر با مقدار ۳۱/۱۴ کیلونیوتن و کم‌ترین مقاومت کششی با مقدار ۲۷/۳۹ کیلونیوتن مربوط به سطح بسامد ۳۶+ هرتز است. به این ترتیب رتبه‌ی (A) تا (C) معنی‌داری کاهش ۱۲ درصدی را به دنبال داشته است. با توجه به دیگر سطوح بسامد که در رتبه‌ی (B) معنی‌داری قرار دارند، حضور بسامد ۳۶- هرتز در کنار بسامدهای ۱۸ هرتز قابل توجه است. کاهش نیروی مقاومت کششی، مهم‌ترین عامل برای کاربرد نوسان و ارتعاش در خاک‌ورزی و به ویژه زیرشکنی است. دلیل کاهش مقاومت کششی در اثر کاربرد نوسان و ارتعاش از جهات مختلف قابل توجه است. اول اینکه در اثر ضربات ممتد اعضای مرتعش زیرشکن، اجزای خاک با تنش بیش‌تری مواجه شده و اصطلاحاً به جای گسیخته شدن، ترک می‌خورند. چون سرعت ترک خوردن از گسیختگی بیش‌تر است، پس اصطکاک کم‌تر می‌شود. دوم اینکه به دلیل ضربات ناشی از لرزش اجزای خاک خرد شده و کم‌تر جابه‌جا می‌شوند. کاهش جابه‌جایی و به ویژه کم‌تر بالا رفتن اجزای خاک، مقاومت کششی را کاهش می‌دهد و اصطکاک داخلی اجزای خاک با خاک هم کاهش می‌یابد. سوم این که واضح است که گسیخت خاک برای حرکت زیرشکن لازم است، اما گسیخت عمودی بسیار راحت‌تر از گسیخت طولی- حرکتی انجام می‌شود. اجزای نوسانی در خاک‌ورزی معمولاً دارای زاویه‌ای حمله هستند که بخشی از برآیند نیروی آن‌ها

پمپ‌های سم‌پاش‌ها، دمنده پرفشار کارنده‌ها، موزع کودپاش‌ها و ... افزایش خواهد یافت. استفاده از برق سامانه موجود بر تراکتور و راه‌اندازی یک الکتروموتور که بخشی از ادوات مزرعه‌ای است، می‌تواند با اجرای مانور کنترل دقیق دور و جهت دوران به دو صورت دستی و خودکار، گامی مهم در راستای اجرای شیوه‌ها و راهکارهای کشاورزی دقیق باشد. اگرچه توان الکتریکی موجود بر تراکتورهای معمولی تقریباً به برطرف نمودن نیازهای اصلی تراکتور مانند استارت زدن، روشنایی و امکانات رفاهی کابین محدود می‌شود، اما با انتخاب درست تجهیزات، نصب ابزارهای ایمنی و طراحی مناسب مدار می‌توان در حد قابل قبولی با هزینه‌ای معقول از توان الکتریکی موجود استفاده نمود.

تأثیر زیرشکن با سامانه ارتعاش برقی

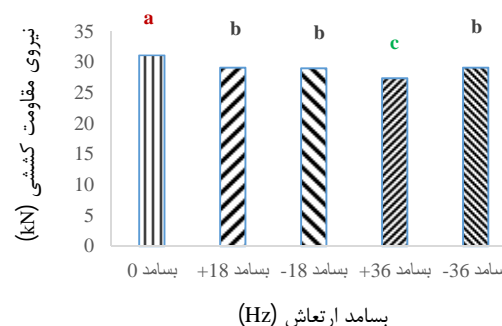
نتایج شاخص‌های خاک‌ورزی ناشی از تغییر شیوه ایجاد ارتعاش در زیرشکن‌های ارتعاشی از حالت رفت و برگشتی به دورانی با موتور برقی نیز قابل توجه بود. به عنوان نمونه، در شکل ۶، نتایج به دست آمده از تغییرات بسامد و جهت دوران (موافق + مخالف -) نشان می‌دهد که کاهش میانگین وزنی قطر کلوخه در سطح ۵٪ معنی‌دار شده و بیش‌ترین قطر کلوخه در سطح بسامد «صفر» (۴/۵۷ سانتی‌متر) و کم‌ترین قطر کلوخه در سطح بسامد «۳۶- هرتز» (۴/۰۲ سانتی‌متر) رخ داده است. هم‌چنین ضریب تغییرات ۸ درصدی نیز بر دقت و اطمینان این نتیجه دلالت دارد. کاهش میانگین وزنی قطر کلوخه به دلیل ضربات متوالی در دو وجه (طولی-عمقی) رخ داده است و نتایج این پژوهش با نتایج Hemmat *et al.* (2000) و Goudarzi *et al.* (2015) هم‌خوانی دارد. در پژوهش‌های پیشین، با نوع تجهیزات بکار رفته حداکثر سطح بسامد تا ۲۰ هرتز بوده و در یک جهت است اما در سامانه ارتعاش دورانی برقی علاوه بر افزایش بسامد تا ۳۶ هرتز امکان تغییر دور در دو جهت موافق و مخالف امکان‌پذیر شده و به همین دلیل میزان خردکنندگی بیشتر خاک در عملیات خاک‌ورزی افزایش یافته و در صورت وجود نقشه‌های بافت، رطوبت و سایر ویژگی‌های فیزیکی خاک شرایط توسعه خاک‌ورز برای اعمال ارتعاش متغییر فراهم شده است.

میسر خواهد شد. مروری مختصر بر شیوه‌های تأمین توان انرژی برق نشان داد گزینه‌ی طراحی یک مدار با تأمین برق از طریق دینام و باتری تراکتور نسبت به نصب موتور-تولیدکننده و یا اتصال ژنراتور به محور تواندهی تراکتور ساده‌تر و کم‌هزینه‌تر است. طراحی این مدار که در واقع یک نوعی اینورتر DC است توانست با تحمل شدت جریانی حدود ۱۰۰ آمپر و استفاده از مولد تولید پالس مربعی با قابلیت مدولاسیون عرض پالس و ثبات در سطح ولتاژ، دور موتورهای جریان مستقیم سامانه ارتعاش زیرشکن ارتعاشی با توان در محدوده یک کیلووات را تأمین و کنترل کند. هم‌چنین نتایج آزمایش عملی این مدار در راه‌اندازی سامانه ارتعاش الکتریکی یک زیرشکن ارتعاشی با موفقیت بود و نتایج خاکورزی نشان داد که کنترل بسامد ارتعاش الکتریکی روی شاخص‌هایی همچون نیروی مقاومت کششی و میانگین قطر کلوخه اثر معنی‌داری دارد. نتیجه مهم دیگر اینکه راه‌اندازی توان بالای مورد نیاز در یک زیرشکن، به کارگیری آن برای سایر سامانه‌ها یا قطعاتی در دیگر ادوات همچون سمپاش‌ها، کارنده‌ها و ... را تضمین می‌کند. نتیجه بسیار مهم و کاربردی، اینکه برخلاف توان مکانیکی محور تواندهی تراکتور و خروجی‌های توان هیدرولیکی تراکتور که وابستگی مستقیم و کامل به دور موتور تراکتور دارند، استفاد از سامانه‌ی الکتریکی تراکتور مستقل از دور موتور بوده که عاملی بسیار کارآمد برای تنظیم بسامد در زیرشکنی دقیق است، لذا با رفع محدودیت در انتخاب بهینه‌ی سرعت پیش‌روی، بسامد مورد نیاز هم، اعمال می‌شود.

نظر به نتایج این تحقیق، موارد و پیشنهادات کلی ذیل قابل توجه خواهد بود:

- 1) طراحی تراکتور و ماشین‌های کشاورزی می‌بایست همان مسیر توسعه بکارگیری برق در صنعت خودرو را دنبال کنند.
- 2) دامنه گسترده‌ای از تجزیه و تحلیل‌های دقیق برای کشف عملیات بالقوه‌ی بازیابی انرژی در بین ماشین‌های کشاورزی، وجود دارد.
- 3) فوریت انجام تحقیقات درباره هزینه‌های تملک، بهره‌برداری و تعمیرات ماشین‌های کشاورزی الکتریکی برای مقایسه با ماشین‌آلات معمولی وجود دارد.

شامل مؤلفه‌ی بالاسو می‌شود. در ارتعاش دورانی به دلیل لرزش در صفحه، نیمی از برآیند نیرو کاملاً در جهت بالاسو قرار دارد. چهارم اینکه در نوسان و لرزش اصطکاک فلز (ساق و تیغه) با خاک به دلیل مقاومت لغزشی کم‌تر، کاهش می‌یابد. کاهش نیروی مقاومت کششی در این پژوهش با نتایج (2017) Santos و Masienko *et al.* (2020) هم‌خوانی دارد. شایان ذکر است که تأثیر قابل توجه در سطح بسامد +۳۶ هرتز، هم از نظر مقدار بالای بسامد و هم از نظر تنوع در جهت دوران (موافق با جهت پیش‌روی) به دلیل استفاده از ارتعاش دورانی ناشی از توان الکتریکی تحقق یافته است.



شکل ۷- نمودار اثر بسامد ارتعاش بر نیروی مقاومت کششی

نتیجه مثبت دیگر به کارگیری توان الکتریکی و ارتعاش دورانی نسبت به ارتعاش رفت و برگشتی یا ضربه‌ای با توان مکانیکی یا حتی هیدرولیکی این است که تعویض جهت دوران و تغییر بسامد بصورت لحظه‌ای و خودکارسازی برای داشتن ارتعاشی تحت کنترل و حتی برنامه ریزی شده برای بسامد بهینه، فقط با سامانه ارتعاش برقی و اینورتر طراحی شده بطور کامل قابل انجام است.

نتیجه‌گیری

از دیدگاه مکانیزاسیون، پیشرفت‌هایی که در زمینه طراحی و ساخت ماشین‌های کشاورزی در دنیا در حال رشد است در واقع با هدف اجرای دقیق عملیات یا همان کشاورزی دقیق است. از طرفی تسلط کشاورز یا اپراتور ماشین‌های کشاورزی برای انجام عملیات هوشمندانه، شرایط کنترل و اعمال نرخ متغییر عملیات به اندازه لازم و متناسب با نیاز خاک یا گیاه است که با طراحی و توسعه سامانه یا زیرسامانه‌ی الکتریکی در ماشین‌های کشاورزی

- Dipak S. Khatawaker, P. Shaji James and D. Dhalin (2019). Modern trends in farm machinery_electric drives: A review, *Int.J.Curr.MicrobiolApp.Sci.*, 8(1): 83-93
- Ebbesen, S., Elbert, P., & Guzzella, L. (2013). Engine downsizing and electric hybridization under consideration of cost and drivability. *Oil & Gas Science and Technology-Revue d'IFP Energies nouvelles*, 68(1): 109-116.
- Gallmeier, M. (2009). Comparative assessment of hydraulic and electric module drives for applicability in agricultural working machines. Ph. D. Dissertation, *Technische Universität München*.
- Gharabaghi, P & Abbasfalipour, M. (2015). A Study of the Performance of Hydraulic Pumps of Ferguson Tractors (MS) and Comparison of Their Efficiency, *First Scientific Research Congress on Development and Promotion of Agricultural Sciences, Natural Resources and Environment of Iran*, Tehran, Association for Development and Promotion of Sciences and Basic Techniques, https://www.civilica.com/Paper-PDCONF01-PDCONF01_371.html. (In Persian)
- Götz, M. Grad, K. & Weinmann, O. (2012). Electrification of agricultural machinery. *ATZ off-highway*; 2: 11-20.
- Goudarzi, B. Asoodar, A. & Kazemi, N. (2015). Blade vibration impact on the performance of silty clay loam soil cover tillage. *Agriculture machinery*, 5(2): 357-367. (In Persian)
- Goudarzi, B., Kazemi, N., & Asoodar, A. (2021). Study of rotary vibration by electric power and forward speed effects, on tillage performance and energy efficiency of subsoiler. Ph.D. Thesis. Agricultural Sciences and Natural Resources University of Khuzestan. 207 p. (In Persian)
- Hemmat, A., H. R. Sadegh-Nejad. And Alimardani, R. 2000. Draft of vibrating-share subsoiler in vibrating and non-vibrating modes and its effect on soil physical properties. *Iranian Journal of Agricultural and science*. 31(1): 127-146. (In Persian)
- Karner, J., Baldinger, M., Schober, P., Reichl, B., & Prankl, H. (2013). Hybrid systems for agricultural engineering. *Landtechnik*, 68(1): 22-25.
- Karner, J., Prankl, H., & Kogler, F. (2012). Electric drives in agricultural machinery. In *energy, biomass and biological residues. International Conference of Agricultural Engineering-CIGR-AgEng 2012: Agriculture and Engineering for a Healthier*
- 4) کاربرد الکتروسیسته در ماشین‌آلات کشاورزی، نویدبخش کاهش چشمگیر انتشار گازهای گلخانه‌ای و محدود شدن ایجاد آلودگی بیش‌تر در محیط زیست، به علاوه‌ی بهره‌وری و مزایای اقتصادی بیش‌تر است.
- 5) سامانه‌ی الکتریکی موجود در تراکتورهای با توان ۱۰۰ اسب‌بخار به بالا توانایی راه‌اندازی الکتروموتورهای یک کیلوواتی، برای استفاده الکتریکی خاص در ادوات کشاورزی که به تجهیزات الکتریکی مجهز شده باشند را دارد.
- 6) با استفاده از سامانه‌ی الکتریکی می‌توان کنترل، تنظیم دلخواه و آسان مقدار بسامد تا ۵۰ هرتز و تغییر جهت دوران را به طور پیوسته با اینورترهای جریان مستقیم و یا درایوهای جریان متناوب برای اعمال زیرشکنی ارتعاشی دقیق در راستای عملیات کشاورزی دقیق، انجام داد.
- 7) نظر به اینکه انتقال توان در سامانه‌های مکانیکی و حتی هیدرولیکی با رابط صلب یا نسبتاً صلب انجام می‌گردد، انجام تحقیقاتی با موضوع مقایسه با سامانه ارتعاش برقی با رویکرد؛ فنی، ارگونومی و اقتصادی پیشنهاد می‌گردد.

منابع

- Amazone. (2009). UX eSpray trailed sprayer. Available at: <http://info.amazone.de/DisplayInfo.aspx?id=14005>.
- Bagherzadeh, A., & Rafati, B. (2018). Investigation of energy consumption in agriculture. Report of the Institute of Planning Researchs, Agricultural Economics and Rural Development, Ministry of Jihad-e-Agriculture.
- Bernhard, B. & Schreiber, V. (2005). Experimental comparison of ground drive for combine harvester. *Landtechnik*; 60(2): 82
- Bernhard, B. & Schreiber, V. (2005). Experimental comparison of ground drives for combine harvesters. *Landtechnik*; 60(2): 82-3.
- Biziorek, S. (2012). Round baler with electrically driven roller. *EP-2 382 858 B1*.
- Dorrell, D. (2012). Are wound-rotor synchronous motors suitable for use in high efficiency torque-dense automotive drives? Proc. IEEE IECON, 38th Annu. Conference. p. 4880-4885.

- Rauch, N. (2010). Experiences and visions of an implement manufacturer. Key note report, In: 21stannu. Meeting of the Club of Bologna, Bologna.
- Santos, C. M. (2017). Experimental apparatus to determine the power applied in vibrating vertical tillage. *Agricultural Engineering International: CIGR Journal*, 19(2): 68-75.
- Somà, A. Bruzzese, F. & Viglietti, E. (2015). Hybridization factor and performances of hybrid electric telescopic heavy vehicles. In: 10th Int. conference on ecol. vehicles renewable energies (EVER). Monte Carlo, Monaco, 9 p.
- Stoss, K. Sobotzik, J. Shi, B. & Kreis, E. (2013). Tractor Power for Implement Operation Mechanical, Hydraulic, and Electrical: an Overview, In: *Agricultural Equipment Technology Conference ASABE*
- Yahya, A., Kheiralla, A. F., Sui, W. B. and Kiat, G. S. 2003. Automated Soil Penetrometer-Shearometer Unit for Measuring Soil Penetration Resistance and Shear Stress. Conference Paper. May 2003.
- Life, Valencia, Spain, 8-12 July 2012. CIGR-EurAgEng.*
- Kazemi, N. Goudarzi. B. & Bugari, E. (2018). Constraction and development of automatic machine of resistance test and soil sampler. *Annual Conference on Sugarcane and Technologies*. University of Chamran. (In Persian)
- Khatawkar, D. S., Shaji James, P., and Dhalin, D. 2019. Modern Trends in Farm Machinery Electric Drives: A Review. *International Journal of Current Microbiology and Applied Sciences*. 8(1): 83-98.
- Kumar Kumawat, A. & Kumar Thakur, A. (2017). A Comprehensive Study of Automotive 48-Volt Technology. *SSRG International Journal of Mechanical Engineering (SSRG - IJME) – Volume 4 Issue 5*.
- Küpfer, E. & Leu, A. (2013). Electric servo-drives prove themselves in outdoor use. *CAN Newsletter*; 4: 38–9.
- Masienko, I., Vasilenko, A., & Eranova, L. (2020). Theoretical study of the forced oscillation effect on subsoil tillage. In *E3S Web of Conferences* (Vol. 193, p. 01028). EDP Sciences.
- Michael, R. (2012). Tractors Final Emissions, Techs & Specs - *The Western Producer Publications*, pp. 1-13.
- Pakdel, M. (2017). <https://www.zoomit.ir/2017/1/28/151672/how-48-volt-vehicle-system-works> (In Persian).
- Parameters by disc harrow in tillage *The 8th National Congress on Agr. Machinery Eng. (Biosystem) & Mechanization of Iran*. (In Persian)
- Pohlandt, C. & Geimer, M. (2015). Variable DC-link voltage powertrain for electrified mobile work machines. In: *International conference on electr. Syst. for aircraft, railway, ship propulsion and road vehicles (ESARS), Aachen*; pp. 1–5.
- Ponomarev, P. Minav, T. Aman, R. & Luostarinen, L. (2015). Integrated electro-hydraulic machine with self-cooling possibilities for non-road mobile machinery. *Journal of Mechanical Engineering*, 61(3): 207–213.
- Rahe, F. Wessels, T. Weinmann, O. & Götz, M. (2013). Field trials with EDX eSeed and ZF Terra+. In: 4th Colloquium on Elektrische Antriebe in der landtechnik. Wieselburg, Austria.
- Rahimi1.Ali, A.M. Borghei, S. Minaei and H. Bakhoda. (2012). Effect of forward speed of ITM399-4WD tractor on Tractor performance

