مجله تحقیقات مهندسی کشاورزی/جلد ۱۱/ شماره ۲/سال ۱۳۸۹/ص ۴۸-۲۹

طراحی، ساخت و واسنجی دینامومتر اتصال سه‌نقطه قابل تنظیم برای تراکتورهای کشاورزی رایج در ایران

یوسف عباسپور گیلانده*، سینا حقیقت شیشوان، ولی رسولی شربیانی و ضرغام فاضل نیاری**

* نگارنده مسئول، نشانی: اردبیل، دانشگاه محقق اردبیلی، ص. پ. ۱۷۹، تلفن: ۵۵۱۰۱۴۰(۰۴۵۱)، پیام‌نگار: u_abbaspour@yahoo.com

** به ترتیب استادیار؛ دانشجوی کارشناسی ارشد؛ مربی گروه مهندسی مکانیک ماشین‌های کشاورزی دانشکده کشاورزی دانشگاه محقق اردبیلی؛ و مربی پژوهشی بخش تحقیقات فنی و مهندسی مرکز تحقیقات کشاورزی و منابع طبیعی اردبیل

تاریخ دریافت: ۸۸/۵/۱۵؛ تاریخ پذیرش: ۸۸/۱۲/۱۵

چکیده

در این مقاله طراحی، ساخت، و واسنجی یک دینامومتر اتصال سه‌نقطه با قابلیت اتصال سریع به تراکتورها و ادوات کشاورزی بررسی شده است. در این تحقیق یک نوع دینامومتر با قابی به شکل U وارونه طراحی و ساخته شد که بین بازوهای سیستم اتصال سه‌نقطه تراکتور و ادوات کشاورزی سوار می‌شود. دینامومتر اتصال سه‌نقطه به گونه‌ای طراحی گردید که قابلیت تنظیم ارتفاع فیل گوش و تنظیم فاصلهٔ بین نقاط اتصال پایینی را داشته باشد و به راحتی بین تراکتورهای گروه‌های (I) و (II) و ادوات کشاورزی سوار شود، تا بتوان آن را برای اندازه‌گیری نیروهای افقی و قائم موجود در نقاط اتصال، سیستم اتصال سه‌نقطه تراکتورها، و ماشین‌های کشاورزی گروه‌های (I) و (II) به‌کار برد. واحد حس کننده نیرو شامل سه مبدل رینگی نیرو با ساختار هشت وجهی است که به عنوان عنصر ارتجاعی بین قاب U شکل وارونه و سیستم کوپل اتصال سریع دینامومتر قرار گرفته‌اند. کرنش‌سنج‌های مقاومت الکتریکی در نقاط گرهی کرنش روی مبدل رینگی نیرو نصب شده‌اند تا بتوانند به طور مستقل کرنش‌های مماسی روی سطح مبدل را که در اثر اعمال نیروهای افقی و عمودی به مرکز رینگ مبدل ایجاد می‌شود، اندازه‌گیری کنند. مبدل رینگی بر اساس حداکثر نیروهای افقی و عمودی به ترتیب ۲۵ و ۱۵ کیلونیوتن با در نظر گرفتن ضریب اطمینان ۲ طراحی شد. قاب دینامومتر نیز بر اساس نیروهای حداکثر افقی، عمودی، و جانبی محاسبه شده به ترتیب ۵۰، ۳۰، و ۲۰ کیلونیوتن طراحی شده است. سیستم جمع‌آوری داده از یک دیتالاگر قابل برنامه‌نویسی مدل DT800 و یک کامپیوتر قابل حمل تشکیل شده است. آزمایش‌های مزرعه‌ای به منظور جمع‌آوری داده‌های نیرویی دینامومتر با استفاده از یک زیرشکن اجرا شد. با استفاده از آزمون t، میانگین داده‌های به دست آمده از آزمون دینامومتر اتصال سه‌نقطه، برای اندازه‌گیری نیروهای افقی موجود در نقاط اتصال، در هنگام اجرای عملیات با زیرشکن در خاکی مشخص با بافت سیلتی لومی، با دو سطح رطوبت ۹/۲ و ۲۱/۲ درصد و در عمق‌های ۱۵ و ۲۵ سانتی‌متری، در ٤ تکرار با میانگین داده‌هایی مقایسه شد که با استفاده از روش استاندارد دو تراکتوری برای اندازه‌گیری نیروی افقی در حین اجرای عملیات در همان شرایط به دست آمده است. نتایج آزمون‌های مزرعه‌ای نشان داد که کارایی هر دو روش یکسان است اما با توجه به مزیت‌های دینامومتر اتصال سه‌نقطه و با توجه به قابلیت کارکرد مؤثر در مزرعه، استفاده از این دستگاه جهت سنجش نیروهایی توصیه می‌شود که از ادوات کشاورزی بر تراکتورهای رایج در ایران وارد می‌شود.

واژه‌های کلیدی

تراکتور، دینامومتر اتصال سه‌نقطه، قابلیت تنظیم، مبدل رینگی نیرو با ساختار هشت وجهی

مقدمه

امروزه با افزایش تصاعدی جمعیّت جهان و با توجه به محدودیت زمین‌های قابل کشت به منظور تأمین مواد غذایی موردنیاز جوامع بشری، باید از روش‌های نوین در کشاورزی بهره جست. در بخش کشاورزی، مکانیزاسیون می‌تواند پاسخ‌گوی افزایش حجم تولید محصولات

باشد. تراکتور یکی از مهم‌ترین عوامل در تأمین توان و کشش در کشاورزی مکانیزه است. بهینه کردن عملکرد تراکتور می‌تواند بسیاری از افت‌های انرژی را کاهش دهد.

توان مالبندی و عملکرد کششی از ویژگی‌های مهم عملکردی هر تراکتور است. این پارامترها نقش بسیار مهمی در مدیریت تراکتور و ماشین‌های کشاورزی دارند. در دسترس بودن داده‌های مربوط به کشش و توان کششی مورد نیاز ادوات خاک‌ورزی، به انتخاب صحیح وسیلهٔ خاک‌ورزی برای اجرای عملیات در زمینی با اندازهٔ مشخص کمک می‌کنند. مدیران زراعی، مشاوران، و مهندسان کشاورزی داده‌های مربوط به کشش و توان کششی را به منظور تعیین اندازه مناسب تراکتور در عملیات مختلف زراعی روی خاک مشخص به‌کار می‌گیرند. بخش مهمی از هزینهٔ کل تولید محصولات کشاورزی مربوط به ماشین‌های کشاورزی است. بنابراین، انتخاب صحیح و جفت‌کردن مناسب تراکتور و ماشین‌های کشاورزی در داخل مزرعه به منظور کاهش معنی‌دار هزینه‌ها، بسیار ضروری است. از طرف دیگر، بررسی پارامترهای مختلف مؤثر در کشش از این لحاظ با اهمیت خواهد بود که با شناسایی این پارامترها و تعیین مقدار بهینهٔ آن‌ها، می‌توان برای بافت‌ها و شرایط گوناگون خاک‌ها از حداکثر قدرت مالبندی تراکتور استفاده کرد (Al-Janobi, 2000).

دینامومتر اتصال سه‌نقطه ابزاری مهم در مطالعهٔ پارامترهای مختلف مؤثر در کشش و همواره مورد توجه مراکز تحقیقاتی بوده است. کمتر مرکز تحقیقاتی در خارج از کشور را می‌توان یافت که فاقد دینامومتر اتصال سه نقطه باشد. متاسفانه در اکثر مراکز تحقیقاتی کشورمان که محققان به عنوان پیشگامان توسعهٔ فنون مهندسی و علوم کاربردی فعالیت دارند، این ابزار (دینامومتر اتصال سه‌نقطه) در اختیار نیست. خرید این وسیله به صورت تجاری ممکن نیست ولی تهیهٔ آن با هزینهٔ گزاف به صورت سفارش خاص میسر خواهد بود. از این‌رو در این تحقیق نسبت به طراحی، ساخت و ارزیابی دینامومتر اتصال سه‌نقطه قابل تنظیم برای تراکتورهای کشاورزی گروه‌های (I) و (II) اقدام شد. در ایران چند نوع از دینامومترهای اتصال سه‌نقطه طراحی و ساخته شده است ولی هرکدام از آنها بنا به دلایلی معایبی دارد از جمله کاربرد برای تراکتورهای کوچک و اندازه‌گیری نیرو فقط در یک راستا هستند و به همین علت قادر به اندازه‌گیری دقیق و مؤثر نیروی کششی ایجاد شده بین تراکتور و ادوات سوار نخواهند بود، بنابراین، طراحی و ساخت دینامومترهای اتصال سه‌نقطه در داخل ایران به منظور اهداف تحقیقاتی و آموزشی کاملاً ضروری است.

دینامومترهای اتصال سه‌نقطه، به طور عمومی بر اساس ساختار و ترکیب طراحی، به دو گروه عمده شاسی‌دار و فاقد شاسی تقسیم می‌شوند. دینامومترهای اتصال سه‌نقطه فاقد شاسی، بین تراکتور و ادوات کشاورزی شاسی جداگانه‌ای ندارند، بلکه مبدل‌های حس‌کنندهٔ نیرو روی بازوهای سیستم اتصال سه‌نقطه نصب می‌شوند. این دینامومترها هیچ‌گونه تداخلی با محور توانده‌ی تراکتور ندارند و محور توانده‌ی تراکتور می‌تواند در اثنای کارکرد این دینامومترها بدون هیچ‌گونه مزاحمتی کار کند. با به‌کار بردن این دینامومترها هیچ‌گونه جابه‌جایی مختصات در هندسه سیستم اتصال سه‌نقطه تراکتور و ادوات کشاورزی رخ نمی‌دهد. دینامومترهای شاسی‌دار جداشدنی ممکن است شامل یک شاسی یا دو شاسی باشند. دینامومتر اولی مشتمل است بر یک شاسی سوارشدنی به همراه مبدل‌های حس‌کنندهٔ نیرو، پایه‌های اتصال‌دهنده مربوط به اتصال دینامومتر به بازوهای تراکتور و پایه‌های اتصال دهنده مربوط به اتصال دینامومتر به ادوات کشاورزی سوارشونده. نوع دوم دینامومتر شاسی‌دار از دو شاسی جداگانه تشکیل شده‌اند که توسط مبدل‌های حس کننده نیرو به یکدیگر متصل شده‌اند، یکی از شاسی‌ها به بازوهای سیستم اتصال

سه‌نقطه و تراکتور و شاسی دیگر به‌صورت یک کوپل اتصال سریع به سیستم اتصال سه‌نقطه ادوات کشاورزی متصل می‌شود (Kheiralla *et al.*, 2003).

لال (Lal, 1959) با قرار دادن کرنش‌سنج‌هایی روی محور عرضی گاوآهن برگردان‌دار توانست مؤلفه‌های افقی و عمودی نیروی اعمال شده را اندازه بگیرد. او از یک شاسی استفاده کرد که در تیر فوقانی آن با استفاده از کرنش‌سنج نیروی افقی اتصال بالا اندازه گرفته می‌شد. نیروی عمودی وارد بر اتصال بالایی از طریق بازوهای شاسی به محور عرضی منتقل می‌شد. این طرح دقت خوبی داشت و مشکل آن نیاز به تغییرات اساسی و دقیق در محور عرضی بود.

شولتز (Scholtz, 1964) یک شاسی طراحی کرد که مبدل‌های نیرو به شکل خاصی روی آن قرار داشتند. این دینامومتر بسیار حجیم و وزن آن حدود ۱۱۸ کیلوگرم بود و نیروهای افقی و عمودی را اندازه می‌گرفت؛ بالا بودن وزن و حجم، اتصال آن را به ادوات دچار مشکلاتی می‌کرد و به اصلاحاتی در سیستم اتصال ادوات نیاز داشت.

کلارنس و همکاران (Clarence *et al.*, 1979) دینامومتری طراحی کردند که می‌توانست نیروهای افقی، عمودی و گشتاور اعمال شده در صفحهٔ طولی قائم را به صورت مستقل از هم اندازه بگیرد. در طرح این محققان، مبدل شامل یک لولهٔ آلومینیومی بود که نیرو را از تراکتور به ادوات منتقل و تحت پیچش و خمش عمل می‌کرد. انتقال نیرو توسط فلنج‌های نصب شده روی لوله بود. سه عدد پل وتستون واقع روی لوله، نیروهای عمودی، افقی، و گشتاورهای اعمال شده را اندازه می‌گرفت. این سیستم به ثبات سه کانالـه نیاز داشت. جرم دینامومتر حدود ۲۳۰ کیلوگرم بود و نقاط اتصال ادوات را حدود ۳۱۰ میلی‌متر به‌سمت عقب جابه‌جا می‌کرد.

پالمر (Palmer, 1992) دینامومتری ساخت که قادر به تجزیه نیروها و گشتاورهای بین تراکتور و ادوات به سه مؤلفه بود و می‌توانست به تراکتورها و ادوات گروه‌های I و II نصب شود. طرف اتصال به ادوات به شکل کوپلر اتصال سریع مطابق استاندارد ASAE بود و شاسی از دو قسمت به‌شکل U معکوس تشکیل شده بود و نیروسنج‌ها در داخل آن جاسازی شده بودند. ظرفیت نیروسنج‌ها به ۵۰ کیلونیوتن می‌رسید. جرم دینامومتر حدود ۳۵۰ کیلوگرم بود که به علت سنگینی، استفاده از آن‌را در تراکتورهای کوچک و ادوات سبک ناممکن می‌کرد. این دینامومتر، نقطهٔ اتصال ادوات را ۱۷۳ میلی‌متر عقب‌تر می‌برد.

الجلیل و همکاران (Al-Jalil *et al.*, 2001) دینامومتری طراحی کردند و ساختند که از سه بازوی کشوی شکل T معکوس تشکیل شده بود. این آرایش اجازه تنظیم عرضی و عمودی جهت تناسب با محدوده‌ای گسترده از ابعاد اتصال سه‌نقطه را به دینامومتر می‌داد. این کار از طریق تیر کشوی عرضی (برای تغییر عرضی) و تیر کشوی عمودی (برای تغییر ارتفاع) به راحتی انجام می‌شد. بازوهای لغزشی همچنین اتصال ادوات به دینامومتر را بدون نیاز به کوپلر اتصال سریع، ممکن می‌ساخت. در انتهای هر بازو یک تیر طره‌دار به شکل U وارونه به عنوان عنصر ارتجاعی قرار داشت. این دینامومتر فقط قادر به اندازه‌گیری نیروی افقی بود. ابعاد ساختمان دینامومتر طوری انتخاب شده بود که متناسب با سیستم اتصال تراکتورهای گروه I و II با ظرفیت ۳۵ کیلونیوتن نیروی کشش افقی باشد.

فاضل نیاری (Fazel Niari, 2002) دینامومتری طراحی و ساخت که قادر به اندازه‌گیری و ثبت مؤلفه‌های نیروی کششی بود. این دینامومتر برای تراکتورهای گروه 0 و I طراحی و ساخته شد و مجموعهٔ شاسی به وزن ۴۹ کیلوگرم و به شکل U وارانه بود که امکان استفاده از محور تواندهی را نیز فراهم می‌ساخت. سیستم از سه قسمت شاسی، مبدل‌های حساس اندازه‌گیری نیرو، و واحد جمع‌آوری و ثبت داده تشکیل شده بود. پس از واسنجی

مبدل‌های نیرو و نصب آنها روی شاسی، مجموعهٔ سیستم در مزرعه با تراکتور و گاوآهن برگرداندار آزمایش شد. دینامومتر ساخته شده نیروهای افقی و عمودی را به خوبی اندازه‌گیری می‌کرد و نمودار آنها را نمایش می‌داد ولی این دینامومتر برای ابعاد اتصال سه‌نقطهٔ خاصی محدود است.

لطفی و همکاران (Lotfi *et al.*, 2007)، نوعی دینامومتر قابی طراحی و ارزیابی کردند. در این دینامومتر اندازه‌گیری نیروهای وارد شده به دینامومتر با استفاده از سه لودسل مجزا که روی قابی با قابلیت نصب روی اتصال سه‌نقطه تراکتور نصب شده است، امکان پذیر است. واسنجی‌ها نشان داد که یک رابطهٔ خطی با ضریب همبستگی بالایی بین نیروهای اعمال شده و ولتاژ خروجی پل‌ها وجود دارد. اثر هیسترزیس بین بارگذاری و باربرداری خیلی کم بود. این دینامومتر توانست فقط نیروی افقی را با دقت اندازه‌گیری کند. دلیل اصلی این امر، یکسان نبودن ابعاد مبدل‌های نیرو و حساسیت دو جانبهٔ بالا برای بارهای عمودی و حساسیت کم برای نیروهای جانبی بود.

محققان، انواع مختلفی از مبدل‌های حس‌کننده نیرو را برای دینامومترهای اتصال سه‌نقطه ساخته و به‌کار برده‌اند. در این میان، استفاده از مبدل‌های رینگی هشت وجهی نیرو[1] به علت نسبت بالای حساسیت به سختی، اندازهٔ مناسب و نصب آسان روز به روز گسترش یافته است. در مورد مبدل‌های رینگی نیرو با ساختار هشت وجهی، تاکنون تحقیقات زیادی شده است. مبدل‌های هشت وجهی به‌علت قابلیت اندازه‌گیری مستقل نیرو در دو بعد افقی و قائم و نیز اندازه‌گیری گشتاور برآیند ناشی از دو نیروی افقی و قائم در یک بعد به عنوان مناسب‌ترین مبدل برای کار روی دینامومترهای اتصال سه‌نقطه شناخته شده‌اند (Kheiralla *et al.*, 2003; Chen *et al.*, 2006).

کوک و رابینویچ (Cook & Rabinowicz, 1963) فرمول‌های عمومی کرنش و جابه‌جایی را برای مبدل‌های رینگی نیرو با ساختار هشت وجهی معرفی و با استفاده از روش فتوالاستیک نقاط گرهی کرنش به دست آمده از فرمول‌های عمومی را تأیید کردند.

دوگرتی (O'Dogherty, 1996)، تاکور و گادوین (Thakur & Godwin, 1988)، و گادوین و رینولدز (Godwin & Reynolds, 1993) فرمول‌های طراحی و معرفی شدهٔ کوک و رابینویچ (Cook & Rabinowicz, 1963) را برای ساخت مبدل‌های رینگی نیرو با ساختار هشت وجهی به‌کار بردند. هواگ و یورگر (Hoag & Yoerger, 1975)، در طراحی مبدل‌های فوق‌الذکر بر اساس روش انرژی کرنش تحلیلی کامل ارائه دادند. این محققان همچنین برای تعیین جابه‌جایی افقی، جابه‌جایی عمودی، میزان چرخش، گشتاورهای خمشی، برش‌ها، و نیروهای محوری فرمول‌هایی ارائه کردند. با استفاده از این فرمول‌ها کرنش‌ها، ابعاد، فرکانس طبیعی، و پاسخ دینامیکی برای مبدل‌های هشت وجهی به‌دست می‌آید.

مک‌لافلین (McLaughlin, 1996) بر اساس فرمول‌های ارائه شدهٔ محققان قبلی یک مبدل رینگی نیرو با ساختار هشت وجهی دوگانه را ساخت که قادر به اندازه‌گیری نیروی کششی مالبندی در سه بعد بود. این محقق نتیجه گرفت که مبدل رینگی نیرو با ساختار هشت وجهی، نیروی کششی افقی و نیروی قائم را به ترتیب با حساسیت ۱۰۹ و ۶۵/۵ درصد اندازه‌گیری می‌کند. وی معادلات اصلاح شده‌ای را برای مبدل‌های هشت وجهی رینگی ارائه و در فرمول‌های عمومی کرنش و جابه‌جایی تغییراتی پیشنهاد کرد.

در یک جمع‌بندی کلی می‌توان گفت که با توجه به نیاز مراکز تحقیقاتی داخل کشور به دینامومتر اتصال سه‌نقطه به عنوان یک ابزار مهم تحقیقاتی در مطالعات پارامترهای مختلف مؤثر در کشش، وجود این وسیله در مراکز تحقیقاتی داخل کشور لازم است. با توجه به هزینهٔ

1- Extended Octagonal Ring

بسیار زیادی که جهت خرید این وسیله از خارج از کشور مورد نیاز خواهد بود و اینکه دینامومترهای ساخته شده در کشور برای ابعاد اتصال سه‌نقطهٔ خاصی محدود است (Fazel Niari, 2002) یا فقط نیروهای افقی را اندازه‌گیری می‌کند (Lotfi *et al.*, 2007) و هیچ یک از آنها قابل تنظیم نیست این تحقیق به اجرا درآمد تا یک نمونه دینامومتر اتصال سه‌نقطهٔ قابل تنظیم با قابی به شکل U وارونه مجهز به مبدل‌های رینگی نیرو با ساختار هشت وجهی طراحی و ساخته شود که با نصب آن بین تراکتور و ادوات سوار قادر به اندازه‌گیری و تجزیهٔ بارهای وارده از طرف ادوات به دو مؤلفه افقی و قائم در سه نقطه اتصال باشد و بتواند به تراکتورهای گروه I و II وصل و در ارتباط با اتصال ادوات با استانداردهای ISO و ASAE مطابقت داشته باشد.

مواد و روش‌ها

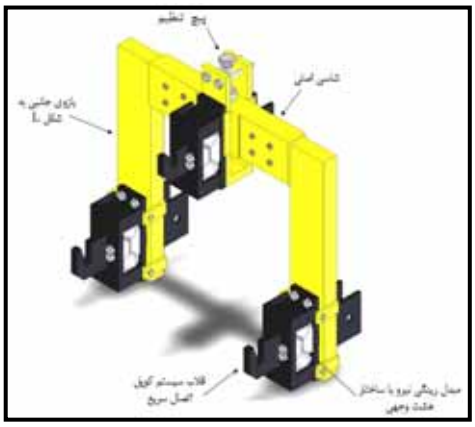
توصیفات عمومی

با توجه به اینکه دینامومترهای اتصال سه‌نقطه شاسی‌دار نسبت به انواع بدون شاسی انعطاف‌پذیر هستند و محدود به نوعی خاص از تراکتور نیستند، در این تحقیق به طراحی، ساخت و ارزیابی دینامومتری از نوع شاسی‌دار پرداخته شد. این دینامومتر اتصال سه‌نقطه با قابلیت اتصال سریع و قابل تنظیم به منظور اندازه‌گیری نیروهای افقی و عمودی ایجاد شده بین تراکتورها و ادوات کشاورزی سوار رایج در ایران به هنگام اجرای عملیات، طراحی و ساخته شد. در این طرح اجزای دینامومتر، مشتمل است بر شاسی و مبدل‌های اندازه‌گیری نیرو و سیستم جمع‌آوری داده‌ها که در آن مبدل‌ها از طریق سیم‌های رابط به سیستم جمع‌آوری داده مرتبط با کامپیوتر پرتابل وصل می‌شود. به‌طورکلی در طراحی دینامومتر اتصال سه‌نقطه باید حداکثر بارهای طراحی، طراحی شاسی اصلی، مبدل‌های نیرو، عضوهای رابط، سیستم جمع‌آوری داده‌ها و منبع تغذیه مورد توجه قرار گیرد. طراحی دینامومتر اتصال سه‌نقطه بر اساس یک قاب U شکل وارونه پایه‌ریزی شد که بین تراکتور و ادوات کشاورزی نصب می‌گردد. شاسی اصلی دینامومتر به‌گونه‌ای طراحی شد که فاصلهٔ بین نقاط اتصال پایینی دینامومتر، ارتفاع فیل گوش دینامومتر، و سیستم اتصال سریع دینامومتر مطابق با استانداردهای موجود ASAE (Anon, 2003; Anon, 2000b) برای سیستم اتصال سه‌نقطه تراکتورها و ماشین‌های کشاورزی گروه‌های (I) و (II) باشند. واحد حس‌کننده نیرو شامل سه مبدل رینگی نیرو با ساختار هشت وجهی است که بین قاب و سیستم کوپل اتصال سریع نصب شده است و هشت کرنش سنج ساخت شرکت TML مدل FLA-3-11-1L روی گره‌های کرنش ۳۹/۵۴ و ۹۰ درجه روی هر یک از مبدل‌های رینگی نصب شد، تا به طور مستقل کرنش مماسی روی سطح مبدل ناشی از نیروهای افقی و عمودی وارد به مرکز رینگ را نشان دهند. هر مبدل رینگی بر اساس حداکثر نیروهای افقی و عمودی به ترتیب ۲۵ و ۱۵ کیلونیوتن طراحی شد. دینامومتر اتصال سه‌نقطه ۱۳۴ کیلوگرم به‌وزن تراکتور اضافه می‌کند. این دینامومتر طوری طراحی شد که اجازه دهد شافت P.T.O تراکتور برای متصل شدن به ادوات دیگر یا مبدل اندازه‌گیری گشتاور رد شود. دینامومتر مذکور برای اندازه‌گیری مقادیر حداکثر نیروی کششی افقی و نیروی عمودی به ترتیب ۵۰ و ۳۰ کیلونیوتن طراحی شده است. شکل ۱ طرحواره و شکل واقعی دینامومتر اتصال سه‌نقطه طراحی و ساخته شده را در ارتباط با تراکتور نشان می‌دهد.

ساختمان دینامومتر

ایده طراحی دینامومتر اتصال سه‌نقطه بر اساس یک قاب U شکل وارونه پایه‌ریزی شد که بین تراکتور و ادوات کشاورزی نصب می‌شود و قابلیت تنظیم ارتفاع فیل‌گوش و تنظیم فاصلهٔ بین نقاط اتصال پایینی را دارد و به راحتی بین تراکتورها و ماشین‌های کشاورزی

گروه‌های (I) و(II) سوار می‌شود. به این منظور، شاسی دینامومتر به صورت چهار تکه طراحی شد که مشتمل است بر: الف) یک کشوی افقی به شکل پروفیل تو خالی به ابعاد سطح مقطع ۱۵۶ × ۸ × ۶۸ میلی‌متر و به طول ۵۹۰ میلی‌متر که دارای دو سری سوراخ‌کاری هر کدام شش عدد به قطر ۱۲ میلی‌متر و با فاصله‌های معین ۷/۵، ۱۲/۵ و ۱۷/۵ میلی‌متر از لبه‌های هر طرف کشوی افقی، ب) دو بازوی جانبی به شکل L وارونه به صورت پروفیل تو خالی به ابعاد سطح مقطع ۱۴۰ × ۸ ×۵۶ میلی‌متر، و یک بازوی میانی دارای پیچ تنظیم. در یک طرف شاسی قلاب‌های سیستم کوپل اتصال سریع با مشخصات استاندارد برای اتصال ادوات پیش‌بینی شد و در طرف دیگر پین‌هایی برای اتصال دینامومتر به بازوهای سیستم اتصال سه‌نقطه تراکتور تعبیه شدند (شکل ۱).



(الف)

(ب)

شکل ۱- الف) طرح‌واره، ب) شکل واقعی دینامومتر اتصال سه‌نقطه طراحی و ساخته شده

حداکثر بارهای طراحی

به منظور طراحی شاسی دینامومتر اتصال سه‌نقطه و مبدل‌های حس‌کننده نیرو و اتصالات مختلف دینامومتر، باید حداکثر نیروهای وارده شده از طرف تراکتور و ادوات کشاورزی سوار به دینامومتر محاسبه شود. طراحی قسمت‌های مختلف دینامومتر می‌تواند بر اساس حداکثر نیروهایی طراحی شود که تراکتور می‌تواند به دینامومتر وارد کند یا براساس بیشینه نیروهایی طراحی شود که از طرف ادوات سوار به دینامومتر اعمال می‌شود.

در این تحقیق حداکثر نیروهای اعمالی به دینامومتر بر اساس نیروهایی محاسبه شد که تراکتور می‌تواند به دینامومتر وارد کند. با توجه به اینکه این دینامومتر برای کار با تراکتورها و ماشین‌های کشاورزی گروه‌های (I) و (II) ساخته شده است، باید حداکثر نیروهایی محاسبه شود که تراکتور کشاورزی گروه (II) می‌تواند روی بازوهای سیستم اتصال سه‌نقطه خود تولید کند. برای به دست آوردن حداکثر نیروهای طراحی افقی، عمودی، و جانبی روی بازوهای تحتانی سیستم اتصال سه‌نقطه تراکتورهای کشاورزی، توان مالبندی تراکتور از رابطهٔ ۱ محاسبه شد.

$$DBP = \frac{(D \times S)}{3.6} \qquad (۱)$$

بنابراین، با توجه به حداکثر توان مالبندی که تراکتور کشاورزی گروه (II) می‌تواند روی مالبند خود ایجاد کند و حداقل سرعت تراکتور کشاورزی گروه (II) در سنگین‌ترین دنده و با استفاده از رابطهٔ ۱ بیشینه نیروی کششی مالبندی که تراکتور کشاورزی گروه (II) می‌تواند تولید

کند، برابر با ۵۰ کیلونیوتن به دست آمد. با توجه به اینکه برای بازوهای تحتانی سیستم اتصال سه‌نقطه تراکتورهای کشاورزی در هنگام اجرای عملیات زراعی در خاک‌هایی با بافت‌های مختلف، نسبت‌های حداکثر نیرویی، بین نیروی افقی و نیروی عمودی (F_y/F_x) برابر ۰/۶ و بین نیروی افقی و نیروی جانبی (F_s/F_x) برابر با ۰/۴ هستند، با مشخص بودن نیروی افقی در بازوهای تحتانی سیستم اتصال سه‌نقطه، می‌توان نیروی عمودی و نیروی جانبی را محاسبه کرد (Anon, 2000a). بنابراین حداکثر نیروهایی که از طریق بازوهای تحتانی سیستم اتصال سه‌نقطه تراکتورهای کشاورزی به دینامومتر اتصال سه‌نقطه وارد می‌شود، برای نیروهای افقی، عمودی، و جانبی به‌ترتیب برابر ۵۰، ۳۰، و ۲۰ کیلونیوتن است. نیرو در اتصال ساق وسط با توجه به تعادل نیرویی در امتداد افقی و عمودی و همچنین تعادل گشتاور در نقطهٔ اتصال بازوهای پایین وسیلهٔ کشاورزی سوار محاسبه شد. بنابراین، با توجه به اینکه انواعی از ادوات کشاورزی سوار وجود دارد و نیرو در ساق وسط تابعی از ابعاد، شکل وسیله، و حداکثر نیروهای وارده به آن است، به‌منظور انجام محاسبات مکانیکی، حداکثر بارهای طراحی در اتصال فوقانی برابر ۵۰ و ۳۰ کیلونیوتن به ترتیب برای نیروی افقی و قائم در نظر گرفته شد.

تحلیل مکانیکی شاسی دینامومتر

دینامومتر اتصال سه‌نقطه در حین اجرای عملیات بین تراکتور و ادوات کشاورزی گروه‌های (I) و (II) نصب می‌شود و تحت تأثیر نیروهای وارد شده از طرف تراکتور و وسیله قرار می‌گیرد، بنابراین برای تحلیل مکانیکی شاسی دینامومتر، ابتدا دیاگرام آزاد نیروهای حداکثر وارد بر دینامومتر در حین کار رسم شد و سپس تحلیل‌های مقاومت مکانیکی مربوطه انجام گرفت. با توجه به حداقل ابعادی که برای شاسی دینامومتر اتصال سه‌نقطه در نظر گرفته شده بود و اساس محاسبات انجام گرفته روی شاسی دینامومتر، حداقل ضریب اطمینان برای شاسی دینامومتر اتصال سه‌نقطه برابر با مقدار ۱/۸۵ به دست آمد.

طراحی مبدل‌های رینگی نیرو با ساختار هشت وجهی

مبدل‌های رینگی نیرو با ساختار هشت وجهی به علت نسبت بالای حساسیت به سختی، اندازهٔ مناسب، نصب آسان، و همچنین قابلیت تجزیه و نمایش همزمان نیروهای وارد بر رینگ به صورت مؤلفه‌های قائم و افقی و نیز نمایش گشتاورهای خمشی ایجاد شده در اثر نیروهای اعمال شده بر رینگ، به‌عنوان متداول‌ترین مبدل‌های اندازه‌گیری نیرو شناخته شده‌اند. اصول حاکم بر مبدل‌های رینگی بدین صورت است که زمانی‌که نیروهای افقی و قائم عمود برهم، روی مبدل اعمال می‌شود تعدادی ازگره‌های تنش روی مبدل ایجاد خواهند شد که مبنایی خواهند بود برای اندازه‌گیری مستقل مولفه‌های نیروی افقی و قائم روی مبدل. دو مؤلفهٔ نیروی وارد شده روی مبدل باید به‌گونه‌ای اندازه‌گیری شود که حداقل اثر متقابل در اندازه‌گیری این نیروها ایجاد شود. بنابراین، در این تحقیق اقدام به طراحی و ساخت مبدل‌های رینگی نیرو با ساختار هشت وجهی، جهت نصب بر روی دینامومتر اتصال سه‌نقطه، شد. اولین مرحله برای طراحی مبدل‌های رینگی تعیین جنس مناسب برای این‌گونه از مبدل‌هاست، زیرا در این مبدل به منظور اندازه‌گیری نیروها و گشتاور وارد شد. روی مبدل از کرنش‌سنج‌های الکتریکی استفاده می‌شود که روی سطح مبدل نصب می‌شوند و کرنش‌های سطحی ایجاد شده روی مبدل را اندازه‌گیری می‌کنند. بنابراین، جنس مبدل باید به‌گونه‌ای باشد که علاوه بر داشتن استحکام کافی در برابر نیروهای وارد شده از طرف تراکتور و ماشین‌های کشاورزی سوار، دارای مقادیر مناسبی از کرنش روی سطح مبدل در اثر نیروها و گشتاور وارد بر آن باشد تا کرنش‌سنج‌های الکتریکی قادر به اندازه‌گیری مؤثر آن باشند. بنابراین، به منظور طراحی و ساخت مبدل‌ها از فولاد St 37 استفاده شد که دارای خواص مکانیکی تنش

تسلیم $S_y = 235\ MPa$، تنش نهایی $S_u = 320\ MPa$، و مدول الاستسیته $E = 207GPa$ است.

متداول‌ترین و کارآمدترین روش‌ها برای طراحی مبدل‌های رینگی، را کوک و رابینویچ (Cook & Rabinowicz, 1963) ارائه داده‌اند که در آن مبدل با توجه به حداکثر گشتاور خارجی اعمال شده روی مبدل طی عملیات طراحی و ساخته می‌شود و اضافه بر آن ضریب سختی مبدل (K) برابر با ۱/۶ نیز در نظر گرفته می‌شود که باعث به وجود آمدن حساسیت گشتاوری (M_S) معادل ۰/۴ برای مبدل رینگی نیرو با ساختار هشت وجهی خواهد شد. روابطی که کوک و رابینویچ (Cook & Rabinowicz, 1963) برای طراحی مبدل‌های رینگی نیرو با ساختار هشت وجهی ارائه دادند عبارت‌اند از:

$$K = \frac{L}{r} = 1.6 \qquad (۲)$$

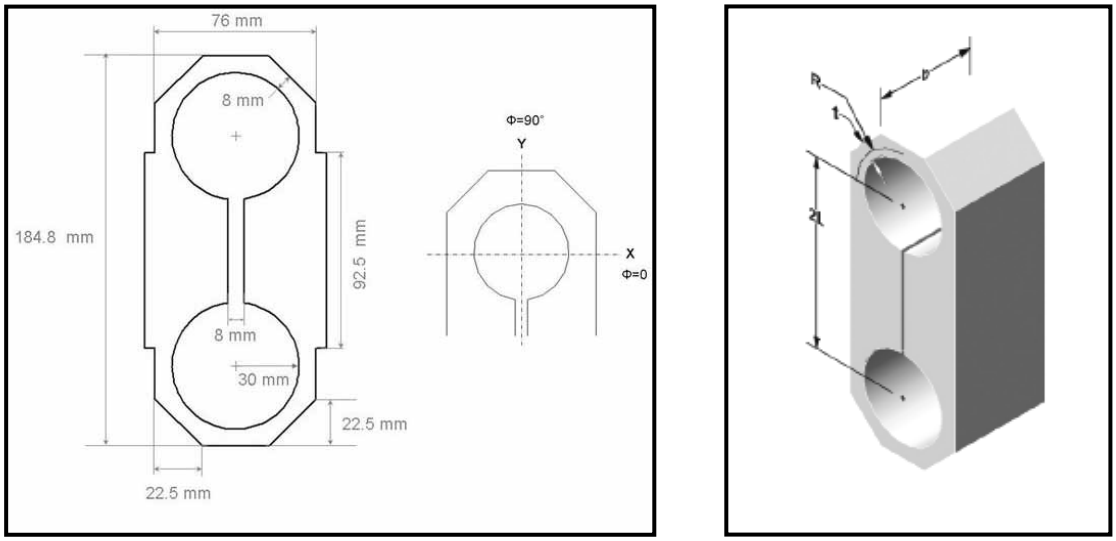
$$M_S = \frac{\varepsilon E b t^2}{M_o} = 0.4 \qquad (۳)$$

که در آن، K= ضریب سختی مبدل؛ L= نصف فاصلهٔ بین مراکز حلقه‌ها روی مبدل؛ r= شعاع متوسط هر حلقهٔ مبدل؛ M_S = حساسیت گشتاور مبدل؛ M_o = گشتاور خارجی اعمال شده روی مبدل؛ ε= کرنش ناشی از نیروهای اعمالی روی مبدل؛ E= مدول الاستسیتهٔ مبدل؛ b= پهنای مبدل و t= ضخامت رینگ مبدل است. برخی از این پارامترها در شکل ۲ نشان داده شده‌اند.

برای طراحی مبدل رینگی، در گام نخست باید حداکثر گشتاور خارجی اعمال شده روی مبدل در اثر نیروهای وارده بر مبدل M_o، مشخص شود. با توجه به اینکه در طراحی دینامومتر اتصال سه‌نقطه محل اعمال نیروها روی دینامومتر اتصال سه‌نقطه به‌گونه‌ای در نظر گرفته شد که گشتاور خارجی اعمال شده روی مبدل تنها در اثر نیروی F_Y ایجاد شود و نیروی F_x تأثیری در ایجاد آن نداشته باشد و فاصلهٔ بین محل اعمال نیروهای افقی و عمودی تا قسمت میانی مبدل برابر با ۱۴/۶ سانتی‌متر بود، حداکثر گشتاور خارجی اعمال شده M_o روی مبدل با اعمال ضریب اطمینان ۱/۵ برابر با ۳/۳۸ کیلونیوتن متر به دست آمد. رعایت کردن یک سری از فرضیات برای طراحی مبدل‌های رینگی نیرو با ساختار هشت وجهی ضروری است مانند پهنای مبدل (b) و قطر سوراخ‌کاری‌های موجود روی مبدل (D). در این تحقیق پهنایی معادل با ۹۰ میلی‌متر برای مبدل در نظر گرفته شد و به‌منظور افزایش حساسیت رینگ‌های مبدل، قطر سوراخ‌کاری‌های موجود روی مبدل، نیز ۶۰ میلی‌متر تعیین شد. با در نظر گرفتن اطلاعات فوق و آگاهی از مقدار تنش تسلیم فولادی که مبدل با استفاده از آن ساخته شد و با به‌کار بردن روابط معرفی شده توسط کوک و رابینویچ (Cook & Rabinowicz, 1963)، ابعاد مطلوب برای مبدل مطابق شکل ۲ محاسبه شد.

تعیین نقاط گرهی کرنش مبدل‌های رینگی نیرو با ساختار هشت وجهی

در دینامومتر اتصال سه‌نقطه طراحی و ساخته شده، به منظور جمع‌آوری داده‌های مربوط به نیروهای افقی و عمودی ایجاد شدهٔ بین تراکتور و ماشین کشاورزی سوار، از سه مبدل رینگی نیرو با ساختار هشت وجهی استفاده شده است. روی هر یک از مبدل‌ها هشت کرنش‌سنج به منظور اندازه‌گیری نیروهای افقی و قائم، نصب شد. موقعیت نصب کرنش‌سنج‌ها روی هر یک از مبدل‌ها در این طرح، مطابق با تئوری انرژی کرنش و با استفاده از روابط ۴، ۵ و ۶ تعیین شد که مک‌لافلین (McLaughlin, 1996) برای مبدل‌های رینگی نیرو با ساختار هشت وجهی ارائه داده است. همچنین به منظور مشخص کردن نقاط گرهی کرنش روی مبدل‌ها، یک برنامه کامپیوتری در نرم افزار MATLAB نوشته شد.



(ب) (الف)

شکل ۲- الف) برخی پارامترهای مهم در طراحی مبدل نیرو با ساختار هشت وجهی، ب) ابعاد نهایی مبدل نیرو با ساختار هشت وجهی طراحی و ساخته شده

$$M_{\varphi}=\frac{F_x R}{2}\left(\frac{2}{\pi}-\sin\varphi\right)+\frac{F_y R}{2}\cos\varphi-\frac{Mo\left\{(2+\frac{\pi R}{2l})-\left[(\frac{2R}{l}+\pi)\sin\varphi\right]\right\}}{\left(8+\frac{\pi R}{l}+\frac{2l\pi}{R}\right)} \qquad (۴)$$

$$for.....0<\varphi\le\pi$$

$$M_{\varphi}=\frac{FxR}{2}\left(\frac{2}{\pi}+\sin\varphi\right)-\frac{FyR}{2}\cos\varphi+\frac{Mo\left\{(2+\frac{\pi R}{2l})+\left[(\frac{2R}{l}+\pi)\sin\varphi\right]\right\}}{\left(8+\frac{\pi R}{l}+\frac{2l\pi}{R}\right)} \qquad (۵)$$

$$for.....\pi<\varphi\le 2\pi$$

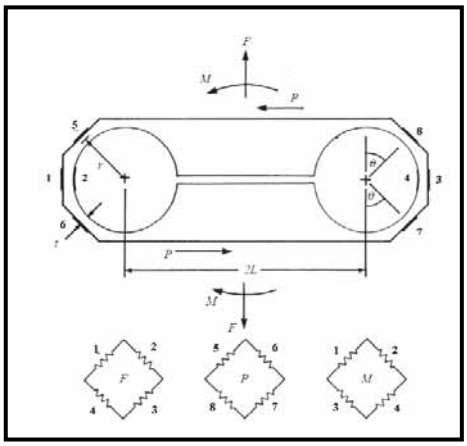
$$\varepsilon_{\varphi}=\frac{6M_{\varphi}}{Ebt^2} \qquad (۶)$$

فرمول‌های ارائه شدهٔ فوق نشان‌دهندهٔ مقادیر ممان خمشی M_{φ} در زوایای مختلف φ روی مبدل هستند، زمانی که دو نیروی عمود برهم F_x و F_y و گشتاور خارجی M_0 روی مبدل اعمال می‌شود. با توجه به این مطلب که در طراحی دینامومتر اتصال سه‌نقطه محل اعمال نیروها روی دینامومتر اتصال سه‌نقطه به گونه‌ای در نظر گرفته شده است که گشتاور خارجی اعمال شده روی مبدل تنها در اثر نیروی F_y ایجاد شود و نیروی F_x تأثیری در ایجاد آن نداشته باشد، گشتاور داخلی ایجاد شده روی مبدل تابعی از دو مقدار F_x و F_y خواهد بود. همچنین با

جای‌گذاری مقادیر M_φ به دست آمده در رابطهٔ ۶ می‌توان مقادیر کرنش مماسی روی مبدل را به دست آورد. با توجه به اینکه مقادیر ممان خمشی M_φ در زوایای مختلف φ روی مبدل تابعی از نیروهای F_x و F_y و ε_φ نیز تابعی از M_φ است. برنامه‌ای در نرم افزار MATLAB نوشته شد تا روی مبدل رینگی در تمامی زوایای φ مقادیر ممان خمشی M_φ وارد بر مبدل را به صورت دو قسمت جداگانه $M_\varphi(F_x)$ و $M_\varphi(F_y)$ محاسبه کند. بنابراین، با توجه به داده‌های به دست آمده از برنامهٔ MATLAB در مورد نقاط گرهی کرنش و مطابق با تئوری انرژی کرنش، محل نصب کرنش‌سنج‌های نیروهای عمودی و افقی روی مبدل به منظور اندازه‌گیری نیروهای افقی و قائم به ترتیب زوایای ۹۰ و ۳۹/۵۴ درجه در نظر گرفته شد.

طریقه نصب و آرایش کرنش‌سنج‌های الکتریکی بر روی مبدل‌های رینگی نیرو

موقعیت دقیق گره‌های کرنش و نصب صحیح کرنش‌سنج‌ها روی این نقاط به طور قطع باعث افزایش حساسیت و کاهش تأثیرات متقابل خواهد شد. هر مبدل رینگی نیرو با ساختار هشت وجهی هشت کرنش‌سنج دارد که در گره‌های زاویه‌ای ۳۹/۵۴ و ۹۰ درجه روی سطح مبدل نصب می‌شوند. کرنش‌سنج‌های انتخاب شده برای نصب روی مبدل‌ها از نوع FLA-3-11-1L (ساخت شرکت Kyowa ژاپن) با ضریب کرنش‌سنج ۲/۱ و مقدار مقاومت الکتریکی ۱۲۰ اهم بودند. برای هر یک از کرنش‌سنج‌های انتخاب شده، و برای اجتناب از لحیم‌کاری، سیم‌های مسی به طول یک متر تدارک دیده شده بود. کرنش‌سنج‌ها روی سطح مبدل‌ها بعد از تمیزکردن سطح مبدل با استفاده از سمباده ریز سیلیکون کاربید و الکل نصب شدند. کرنش‌سنج‌ها با استفاده از چسب مخصوص کرنش‌سنج به نقاط گرهی کرنش روی مبدل چسبانده شدند. برای محافظت از کرنش‌سنج‌ها در برابر عوامل جوی از پوشش محافظ SG-280 (ساخت شرکت Kyowa ژاپن) استفاده شد. پایه‌های نصب شده روی مبدل‌ها محافظت مکانیکی کرنش‌سنج‌های نصب شده روی مبدل‌ها را به‌طور اختصاصی تامین می‌کردند. محل نصب کرنش‌سنج‌های مقاومت الکتریکی و چگونگی آرایش کرنش‌سنج‌ها روی مدار پل وتستون به منظور اندازه‌گیری نیروهای افقی و عمودی وارد بر مبدل، در شکل ۳ نشان داده شده است.



شکل ۳- نحوهٔ آرایش کرنش‌سنج‌ها روی مدار پل وتستون در مبدل نیرو با ساختار هشت وجهی

سیستم جمع‌آوری داده‌ها

برای جمع‌آوری و ذخیره داده‌های مبدل‌های رینگی نیرو با ساختار هشت وجهی، از یک دیتالاگر مدل DT800 (ساخت شرکت DataTaker) استفاده شد که دارای قابلیت برنامه‌نویسی است. دیتالاگر مزبور، دارای ۱۲ کانال آنالوگ و ۱۶ کانال دیجیتال است و با جریان DC با ولتاژ ۱۲ تا ۲۴ ولت کار می‌کند.

خروجی پل‌های وتستون هر یک از سه مبدل نیرو با ساختار هشت وجهی به کانال‌های آنالوگ این دیتالاگر وصل می‌شود. نحوهٔ اتصال به این صورت است که با توجه به تعاریف انجام گرفته برای پل وتستون در نرم‌افزار دیتالاگر و نقشهٔ پل وتستون مبدل‌های نیرو با ساختار هشت وجهی هر سیم خروجی از این حس‌گرها (تغذیه و خروجی پل وتستون)، به کانال‌های مشخص روی دیتالاگر متصل می‌شود.

پل‌های وتستون تشکیل شده روی هر یک از مبدل‌ها، تغییرات ولتاژ ناشی از تغییر در بارهای افقی و عمودی وارد شد. روی مبدل را به کانال‌های ورودی دیتالاگر منتقل می‌کنند و داده‌های جمع‌آوری شده در دیتالاگر به یک کامپیوتر پرتابل برای تحلیل منتقل می‌شود. پس از اتصال نیروسنج‌ها به دیتالاگر، اعمال شرایط تنظیم صفر آنها به راحتی با کمک برنامهٔ دیتالاگر انجام گرفت. با برنامهٔ دیتالاگر سرعت عملیات داده‌برداری قابل تنظیم است. پس از اتمام داده‌برداری، داده‌ها با برنامه دیتالاگر به برنامهٔ Microsoft Office Excel روی کامپیوتر پرتابل منتقل و داده‌ها پردازش شد. با واسنجی می‌توان ضرایب و انحراف از صفر هر یک از مبدل‌ها را به دست آورد که در برنامهٔ دیتالاگر وارد می‌شود.

واسنجی

هر سه مبدل رینگی نیرو با ساختار هشت وجهی باید جهت مشخص شدن پارامترهای زیر واسنجی شوند:

- حساسیت کافی داشته باشند. یعنی نسبت خروجی به ورودی در آنها کافی باشد.
- میزان پسماند حداقل باشد یعنی نمودار حساسیت در بارگذاری و باربرداری روی هم باشد.
- نمودار واسنجی کاملاً خطی باشد، یعنی شاخص رگرسیون (R^2) نزدیک یک و انحرافات حداقل باشد.
- تکرارپذیری آنها خوب باشد، یعنی خروجی مبدل با تکرار بارگذاری برای بارهای یکسان، برابر باشد.

به منظور واسنجی مبدل‌های رینگی نیرو با ساختار هشت وجهی، دستگاه واسنجی که قادر به اعمال نیرویی معادل ۲۰ کیلونیوتن بر مبدل‌های رینگی نیرو با ساختار هشت وجهی باشد، در کارگاه ماشین‌های کشاورزی دانشگاه محقق اردبیلی ساخته شد. دستگاه واسنجی مذکور شامل یک شاسی است که روی آن پایه‌های ویژه‌ای جهت اتصال مبدل‌ها روی شاسی برای اعمال نیروهای افقی و عمودی تعبیه شد. روی دستگاه واسنجی، به منظور اعمال نیروهای افقی و عمودی بر مبدل‌ها یک پیچ اعمال قدرت دوطرفه و یک نیروسنج استاندارد نصب شد که به طور سری نسبت به مبدل قرار گرفته‌اند. شاسی دستگاه واسنجی با پیچ و مهره روی پی بتونی ثابت گردید.

آزمون‌های واسنجی استاتیکی به منظور به دست آوردن ضرایب واسنجی هر یک از مبدل‌ها اجرا شد. برای کالیبره‌کردن، مبدل‌ها از دینامومتر اتصال سه‌نقطه جدا شدند و هر مبدل رینگی نیرو با ساختار هشت وجهی تک تک کالیبره شد. هر یک از مبدل‌ها به همراه پایه‌های جلوی و عقبی خود با استفاده از پیچ و مهره به پایه‌های مخصوصی بسته شد که روی شاسی دستگاه واسنجی وجود دارند. مبدل‌های دینامومتر اتصال سه‌نقطه با اعمال نیروهای معین افقی و عمودی روی مبدل‌ها و ثبت‌کردن پاسخ‌های الکتریکی حاصل از پل‌های وتستون مربوط به اندازه‌گیری نیروهای افقی و عمودی واسنجی شدند. بار اعمالی روی مبدل‌های مربوط به بازوهای تحتانی به

صورت افقی و عمودی، به ترتیب از صفر تا حداکثر ۲۰ کیلونیوتن و صفر تا حداکثر ۱۰ کیلونیوتن ، با تغییرات افزاینده ۲ کیلونیوتن در هر بار افزایش در نظر گرفته شد. هم‌چنین بار اعمالی افقی و عمودی، روی مبدل مربوط به بازوی فوقانی به ترتیب از صفر تا حداکثر ۱۲ کیلونیوتن و صفر تا حداکثر ۱۰ کیلونیوتن، با تغییرات افزاینده ۲ کیلونیوتن در هر بار افزایش در نظر گرفته شد (اساس متفاوت بودن محدودهٔ بارهای اعمالی، نیروهای محاسبه شده در بازوهای تحتانی و بازوی وسط در منابع (Srivastava *et al*., 1993; Anon, 2000a) بوده است). هر مبدل برای هر یک از نیروهای افقی و عمودی در دو حالت بارگذاری و باربرداری کالیبره شد. هر اندازه‌گیری برای هر بار اعمالی و هر تست در حالت بارگذاری و باربرداری، چهار بار تکرار شد. تأثیرات متقابل مؤلفه‌های افقی و عمودی نیرو بر مبدل‌های رینگی نیرو با ساختار هشت وجهی در هنگام اندازه‌گیری هر یک از نیروهای افقی و عمودی، طی عملیات واسنجی بررسی شد. تأثیرات متقابل مؤلفه‌های افقی و عمودی نیرو بر مبدل‌ها با به‌کار بردن یک نیرو در یکی از راستاهای افقی یا قائم و اندازه‌گیری خروجی پل وتستون برای معین‌کردن نیرو در راستای عمود بر نیروی اعمال شده، به دست آمد. حساسیت محاسبه شدهٔ مبدل برحسب خروجی پل به صورت کرنش بر واحد نیروی اعمال شده بیان می‌شود. با دانستن مقدار خروجی کرنش در گره‌های تحت اثر بارهای طراحی، می‌توان حساسیت مبدل را به ترتیب برای نیروی افقی و عمودی به دست آورد.

شکل ٤- دستگاه واسنجی مبدل رینگی نیرو با ساختار هشت وجهی

آزمون‌های مزرعه‌ای

آزمون‌های مزرعه‌ای مربوط به ارزیابی دینامومتر اتصال سه‌نقطه در مزرعهٔ تحقیقاتی دانشگاه محقق اردبیلی اجرا شد که دارای بافت سیلتی لومی (رس ۵ درصد، سیلت ۷۱ درصد و شن ۲۴ درصد) است. به این منظور از یک تراکتور MF-285 مجهز به سیستم جمع‌آوری اطلاعات از نوع DT800 استفاده شد. آزمون‌های مزرعه‌ای به منظور جمع‌آوری داده‌های نیرویی دینامومتر با استفاده از یک زیرشکن یک شاخه و به شکل C اجرا شد.

برای اجرای آزمون‌های مزرعه‌ای دینامومتر اتصال سه‌نقطه، در ابتدا دینامومتر برای ارزیابی آماده شد و پس از نصب اجزای مکانیکی آن روی تراکتور سوار گردید. سیستم جمع‌آوری داده‌ها (دیتالاگر و کامپیوتر) نیز به آن متصل و از طریق نرم‌افزار دیتالاگر خروجی‌های مبدل‌ها صفر و کارکرد سیستم تست شد. دیتالاگر و کامپیوتر کیفی در جایگاهی درون کابین تراکتور قرار داشتند.

پس از اتصال دینامومتر به تراکتور، زیرشکن مورد آزمایش به سیستم اتصال سه‌نقطه دینامومتر اتصال سه‌نقطه وصل شد. چرخ‌های تراکتور روی یک سطح مسطح قرار داده شدند و تراز عرضی و طولی سیستم تنظیم گردید. زیرشکن با تراکتور مسی‌فرگوسن مدل MF-285، در عمق‌های ۱۵ و ۲۵ سانتی‌متر و با سرعت ۴/۵ کیلومتر بر ساعت در کرت‌هایی به طول ۲۰ متر در ۳ تکرار کشیده شد.

در حین اجرای آزمون‌های مزرعه‌ای، سیستم جمع‌آوری داده‌ها مجموع نیروهای افقی و مجموع نیروهای عمودی در سه‌نقطه اتصال دینامومتر اتصال سه‌نقطه را همزمان اندازه گرفت. روی نمودارها محور افقی زمان را بر حسب ثانیه و محور قائم نیرو را بر حسب کیلونیوتن نشان‌می‌دهد. علاوه بر نمودار مجموع نیروها در نقاط اتصال سه‌نقطه، نمودار نیرو - زمان برای نیروی‌های افقی در سه‌نقطه اتصال به‌صورت مجزا اندازه‌گیری شد تا وضعیت نیروی افقی در ساق وسط و بازوهای پایین مشخص شود.

تحلیل آماری

توجه به این مطلب ضروری است که کارکرد دینامومتر اتصال سه‌نقطهٔ ساخته شده، باید مورد تأیید قرار گیرد. برای تایید کارکرد مناسب دینامومتر، از آزمون مقایسهٔ میانگین‌ها (آزمون t) استفاده شد. بنابراین، میانگین داده‌های به دست آمده از آزمون دینامومتر اتصال سه‌نقطه، برای اندازه‌گیری نیروهای افقی موجود در نقاط اتصال، در هنگام اجرای عملیات توسط زیرشکن خاکی مشخص با بافت سیلتی لومی، با دو سطح رطوبت ۹/۲ و ۲۱/۲ درصد و در عمق‌های ۱۵ و ۲۵ سانتی‌متری، در ۴ تکرار، با میانگین داده‌هایی مقایسه شد که با استفاده از روش استاندارد دو تراکتوری برای اندازه‌گیری نیروی افقی در حین اجرای عملیات در همان شرایط به دست آمده بود. در آزمون‌های مزرعه‌ای طول هر کرت ۱۵ متر در نظر گرفته شد.

نتایج و بحث

نتایج واسنجی مبدل‌های رینگی نیرو با ساختار هشت وجهی

برای به دست آوردن ضرایب واسنجی، حساسیت، و میزان پسماند مبدل‌ها و همچنین برای بررسی تکرارپذیری واسنجی، بررسی خطی بودن منحنی‌های واسنجی، و بررسی تأثیرات متقابل نیروهای افقی و عمودی بر هم در هنگام اندازه‌گیری برای هر کدام از مبدل‌ها، آزمون واسنجی استاتیکی اجرا شد. واسنجی مبدل‌های رینگی نیرو با ساختار هشت وجهی با اعمال نیروهای معین افقی و عمودی روی مبدل‌ها و ثبت‌کردن پاسخ‌های الکتریکی حاصل از پل‌های وتستون مربوط به اندازه‌گیری نیروهای افقی و عمودی، واسنجی شدند. جدول ۱، پارامترهای واسنجی مبدل‌های رینگی نیرو با ساختار هشت وجهی را نشان می‌دهد.

نتایج آزمون‌های واسنجی مبدل‌های رینگی نیرو با ساختار هشت وجهی نشان‌دهندهٔ این مطلب است که ضرایب واسنجی برای مبدل‌های ۲ و ۳ به علت بارگذاری‌های مشابه برای واسنجی به یکدیگر نزدیک هستند، به‌طوری‌که ضرایب واسنجی برای نیروی افقی مبدل‌های ۲ و ۳ به ترتیب برابر با ۲۸/۱۹ و ۲۷/۳۵ نیوتن بر میکروولت و برای نیروی عمودی به ترتیب برابر با

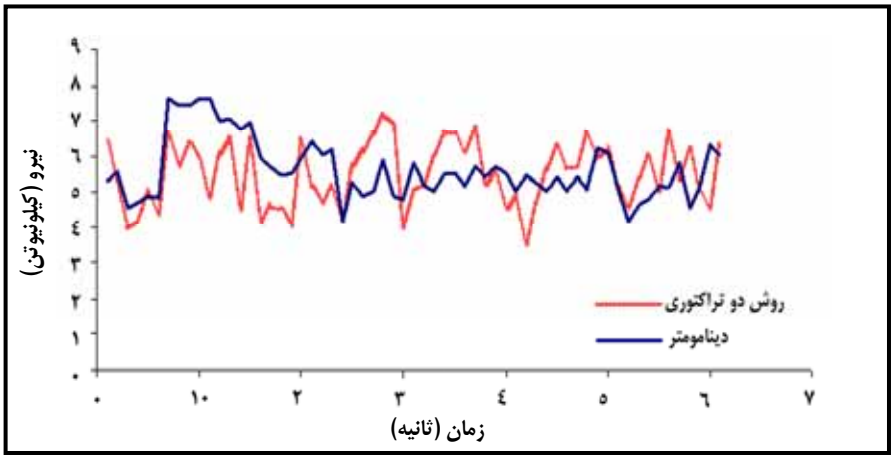
۳۴/۸۹ و ۳۳/۲۸ نیوتن بر میکروولت هستند. اما ضریب واسنجی برای مبدل شماره ۱ برای نیروهای افقی و عمودی به ترتیب برابر با ۳۳/۲۷ و ۳۹/۴۷ نیوتن بر میکروولت است که با دو مبدل دیگر اختلاف دارد، زیرا حداکثر بار اعمالی برای واسنجی این مبدل با دو مبدل دیگر متفاوت است. هر سه مبدل قابلیت تکرارپذیری برای واسنجی را دارند و با توجه به محاسبات انجام گرفته روی داده‌های واسنجی، هر سه مبدل حساسیت مناسب را برای اندازه‌گیری نیرو دارا هستند، به‌طوری‌که حساسیت برای نیروی افقی مبدل‌های ۲ و ۳ به ترتیب برابر با ۲۸/۲۳ و ۲۶/۹۵ نیوتن بر میکروولت و برای نیروی عمودی این مبدل‌ها به ترتیب برابر با ۳۳/۷۵ و ۳۲/۰۷ نیوتن بر میکروولت است؛ حساسیت برای نیروی افقی و عمودی مبدل ۱ به ترتیب برابر ۳۳/۱۸ و ۳۹/۴۶ نیوتن بر میکروولت به دست آمد. منحنی‌های واسنجی نیروهای افقی و عمودی برای تمامی مبدل‌ها شاخص رگرسیون بسیار بالایی (نزدیک ۱) دارند و بنابراین خطی بودن منحنی‌های واسنجی برای مبدل‌ها مورد تایید است. تأثیرات متقابل نیروهای افقی و عمودی برهم در هنگام اندازه‌گیری برای مبدل‌ها بسیار ناچیزند، به‌طوری‌که درصد اثر F_x بر اندازه‌گیری F_y و درصد اثر F_y بر اندازه‌گیری F_x، در مبدل شمارهٔ ۱ به ترتیب برابر با ۰/۹۹ و ۰/۹۲ درصد، در مبدل شمارهٔ ۲ به ترتیب برابر با ۰/۹۹ و ۰/۹۳ درصد و در مبدل شمارهٔ ۳ به ترتیب برابر با ۰/۹۷ و ۰/۹۶ درصد است. میزان انحراف از صفر برای مبدل‌ها مطابق جدول ۱، احتمالاً به این دلیل است که مقاومت‌های جزئی کرنش‌سنج‌ها یا خطا در محل نصب کرنش‌سنج‌ها یکسان نبوده است.

جدول ۱- پارامترهای واسنجی مبدل‌های رینگی نیرو با ساختار هشت وجهی

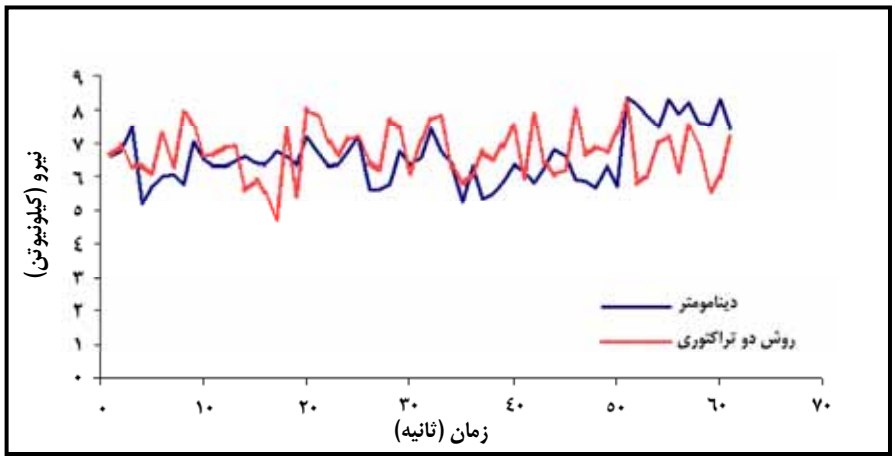
پارامتر / مبدل	ضریب واسنجی (نیوتن بر میکروولت)		میزان انحراف از صفر (نیوتن)		ضریب تبیین رگرسیون	
	F_x	F_y	F_x	F_y	F_x	F_y
مبدل (۱)	۳۳/۲۷	۳۹/۴۷	-۳۳/۰۱	-۲۶۵/۹۶	۰/۹۹۹۹	۱
مبدل (۲)	۲۸/۱۹	۳۴/۸۹	۳۷۱/۴۱	۳۵۰/۷۱	۰/۹۹۱۲	۰/۹۸۰۲
مبدل (۳)	۲۷/۳۵	۳۳/۲۸	۳۴۸/۶۵	-۱۰۳/۵۱	۰/۹۹۰۰	۰/۹۶۸۳

نیروهای افقی حاصل از دینامومتر طی اجرای عملیات با زیرشکن

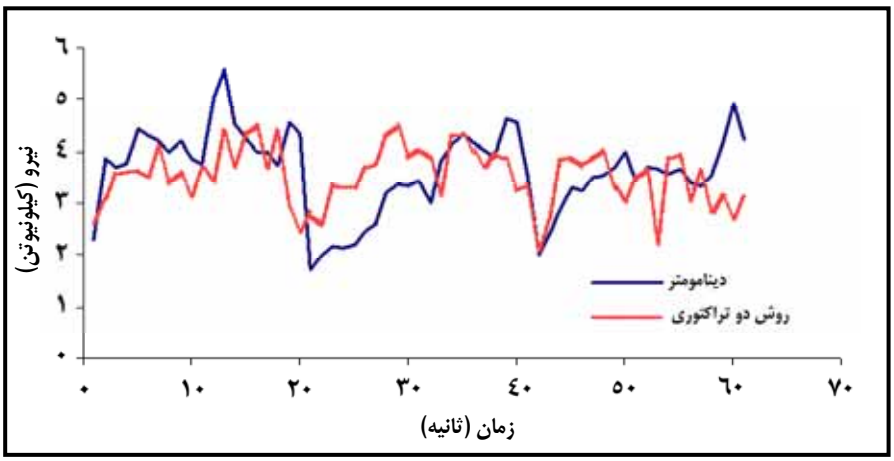
شکل‌های ۵، ۶، ۷، و ۸ نمودارهای نیرو- زمان مجموع نیروهای افقی را حین اجرای عملیات با زیرشکن در تیمارهای مختلف آزمون نمایش می‌دهند. در این آزمایش‌ها به کمک برنامهٔ دیتالاگر، سرعت داده‌برداری به ازای هر داده در هر ثانیه قابل تنظیم شد. هر یک از این نمودارها مقایسهٔ داده‌های واقعی به دست آمده را برای اندازه‌گیری نیروی کششی زیرشکن در عمق‌های مختلف و رطوبت‌های مختلف برای دو روش اندازه‌گیری یعنی اندازه‌گیری با استفاده از دینامومتر اتصال سه‌نقطه و روش دو تراکتوری (با استفاده از دینامومتر مالبندی) ارائه می‌دهد. مشاهده می‌شود که هر دو روش، تغییرات نیروی کششی در کرت‌های آزمایشی را به خوبی نمایش می‌دهند. افزایش یا کاهش آنی در برخی از نمودارها مربوط به تغییر در شرایط خاک داخل کرت آزمایشی است (برای مثال به دلیل وجود موانعی از قبیل سنگ یا حفره در داخل خاک).



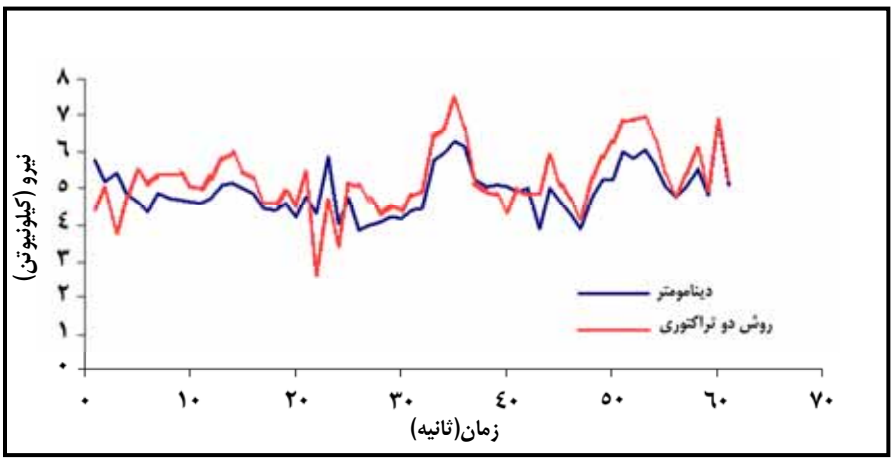
شکل ۵- نمودار نیرو- زمان برای نیروهای افقی حین آزمون زیرشکن در عمق ۱۵ سانتی‌متر در سطح رطوبت ۹/۲ درصد (بر مبنای وزن خشک)



شکل ٦- نمودار نیرو- زمان برای نیروهای افقی حین آزمون زیرشکن در عمق ۱۵ سانتی‌متر در سطح رطوبت ۲۱/۲ درصد (بر مبنای وزن خشک)



شکل ۷- نمودار نیرو- زمان برای نیروهای افقی حین آزمون زیرشکن در عمق ۱۵ سانتی‌متر در سطح رطوبت ۲۱/۲ درصد (بر مبنای وزن خشک)



شکل ۸- نمودار نیرو- زمان برای نیروهای افقی حین آزمون زیرشکن در عمق ۲۵ سانتی‌متر در سطح رطوبت ۲۱/۲ درصد (بر مبنای وزن خشک)

نتایج آزمون t در تیمارهای مختلف

پس از اجرای آزمون‌های مزرعه‌ای دینامومتر اتصال سه‌نقطه و داده‌برداری در تیمارهای مختلف آزمون، برای مقایسهٔ آماری نیروهای کششی اندازه‌گیری شده در روش‌های دو تراکتوری و دینامومتر اتصال سه‌نقطه، از آزمون t استفاده شد. بدین‌صورت که مقدار t حاصل از مقایسهٔ میانگین داده‌های نیروی کششی روش دو تراکتوری و روش دینامومتر اتصال سه‌نقطه و مقدار t جدول با درجهٔ آزادی ۱۲۰ در سطح احتمال ۱ درصد استخراج می‌شود. اگر t محاسبه شده از t جدول کوچک‌تر باشد، می‌توان نتیجه گرفت که در سطح احتمال ۱ درصد با ضریب اطمینان ۹۹ درصد بین نیروهای کششی به دست آمده از دو دستگاه اختلاف معنی‌داری وجود ندارد. بنابراین کارایی هر دو دستگاه یکسان تشخیص داده می‌شود و با توجه به مزیت‌های دینامومتر اتصال سه‌نقطه، استفاده از این دستگاه توصیه می‌شود. در این تحقیق داده‌های به دست آمده در ۶۱ ثانیه از هر کدام از تیمارها برای آزمون t انتخاب و بنابراین درجهٔ آزادی برابر با ۱۲۰ در نظر گرفته شد.

نتایج تحلیل داده‌های حاصل از آزمون‌های مزرعه‌ای دینامومتر اتصال سه‌نقطه به روش آزمون t نشان می‌دهد که در هر چهار تیمار مورد آزمون برای ارزیابی دینامومتر اختلاف معنی‌داری بین میانگین نیروهای کششی اندازه‌گیری شده با روش دو تراکتوری و دینامومتر اتصال سه‌نقطه وجود ندارد. به‌طوری‌که برای آزمون زیرشکن در عمق ۲۵ سانتی‌متری در سطح رطوبت ۹/۲ درصد مقدار t محاسبه شده از مقایسهٔ میانگین‌ها و t جدول به ترتیب برابر با ۱/۰۰۲ و ۲/۶۲ به دست آمد؛ برای آزمون زیرشکن در عمق ۱۵ سانتی‌متری در سطح رطوبت ۹/۲ درصد مقدار t محاسبه شده از مقایسه‌ی میانگین‌ها و t جدول به ترتیب برابر با مقدار ۰/۸۰۷ و ۲/۶۲ به دست آمد؛ برای آزمون زیرشکن در عمق ۲۵ سانتی‌متری در سطح رطوبت ۲۱/۲ درصد مقدار t محاسبه شده از مقایسهٔ میانگین‌ها و t جدول به ترتیب برابر با ۲/۰۶ و ۲/۶۲ به دست آمد؛ و برای آزمون زیرشکن در عمق ۱۵ سانتی‌متری در سطح رطوبت ۲۱/۲ درصد مقدار t محاسبه شده از مقایسهٔ میانگین‌ها و t جدول به ترتیب برابر با ۰/۷۹ و ۲/۶۲ به دست آمد. بنابراین، با توجه به اینکه t محاسبه شده در تمامی تیمارها از t جدول کوچک‌تر است،

می‌توان نتیجه گرفت که کارایی هر دو دستگاه یکسان است و با توجه به مزیت‌های دینامومتر اتصال سه‌نقطه از قبیل زمان لازم برای اتصال، کارایی سیستم از نظر عملکرد مزرعه‌ای و همچنین اقتصادی بودن و پایین بودن هزینه‌های لازم برای ساخت، استفاده از این دستگاه توصیه می‌شود.

نتیجه‌گیری

در این تحقیق، دینامومتر اتصال سه‌نقطهٔ قابل تنظیم برای تراکتورهای کشاورزی گروه‌های (I) و (II) طراحی، ساخته، و ارزیابی شد. در این طرح اجزای دینامومتر، مشتمل است بر شاسی و مبدل‌های اندازه‌گیری نیرو و سیستم جمع‌آوری داده‌ها که در آن مبدل‌ها با سیم‌های رابط به سیستم جمع‌آوری داده مرتبط با کامپیوتر پرتابل وصل می‌شود. طراحی دینامومتر اتصال سه‌نقطه بر اساس یک قاب U شکل وارونه پایه‌ریزی شد که بین تراکتور و ادوات کشاورزی نصب می‌گردد. واحد حس‌کنندهٔ نیرو شامل سه عدد مبدل رینگی نیرو با ساختار هشت وجهی است که بین قاب و سیستم کوپل اتصال سریع نصب شده است و هشت عدد کرنش سنج روی گره‌های کرنش ۳۹/۵۴ و ۹۰ درجه روی هریک از مبدل‌های رینگی نصب شد، تا به طور مستقل کرنش مماسی روی سطح مبدل را که ناشی از نیروهای افقی و عمودی وارد به مرکز رینگ است نشان دهند. دینامومتر اتصال سه‌نقطه، ۱۳۴ کیلوگرم به وزن تراکتور اضافه می‌کند. این دینامومتر طوری طراحی شد که اجازه عبور شافت P.T.O تراکتور را برای نصب شدن به ادوات دیگر یا مبدل اندازه‌گیری گشتاور بدهد. دینامومتر مذکور به ترتیب برای اندازه‌گیری مقادیر حداکثر نیروی کششی افقی و نیروی عمودی ۵۰ و ۳۰ کیلونیوتن طراحی شده است. نتایج آزمون‌های واسنجی مبدل‌های رینگی نیرو با ساختار هشت وجهی نشان می‌دهد که هر سه مبدل تکرارپذیری و حساسیت مناسب را برای اندازه‌گیری نیرو دارند. منحنی‌های واسنجی نیروهای افقی و عمودی برای تمامی مبدل‌ها با توجه به شاخص رگرسیون بسیار بالا (نزدیک ۱) دارای خاصیت خطی است و تأثیرات متقابل نیروهای افقی و عمودی برهم در هنگام اندازه‌گیری برای مبدل‌ها بسیار ناچیزند. نتایج تحلیل داده‌های حاصل از آزمون‌های مزرعه‌ای دینامومتر اتصال سه‌نقطه به روش آزمون t نشان می‌دهد که در هر چهار تیمار مورد آزمون برای ارزیابی دینامومتر اختلاف معنی‌داری بین میانگین نیروهای کششی اندازه‌گیری شده با روش دو تراکتوری و دینامومتر اتصال سه‌نقطه وجود ندارد. بنابراین با توجه به مزیت‌های دینامومترهای اتصال سه‌نقطه از قبیل: زمان لازم برای اتصال، کارایی سیستم از نظر عملکرد مزرعه‌ای، اقتصادی بودن، پایین بودن هزینه‌های لازم برای ساخت و مقایسه این مزیت‌ها با پایین‌ترین دقت، مشکل بودن طرز کار، و زمان‌بر بودن روش دو تراکتوری برای اندازه‌گیری نیروی کششی در مزرعه، استفاده از این دستگاه در مطالعات مختلف مربوط به اندازه‌گیری نیروی کششی تراکتورهای رایج در ایران و بررسی پارامترهای مختلف مؤثر در کشش توصیه می‌شود.

مراجع

Al-Jalil, H. F., Khdarir, A. and Mukahal, W. 2001. Design and performance of an adjustable three-point hitch dynamometer. Soil Till. Res. 62, 153-156.

Al-Janobi, A. 2000. A data-acquistion system to monitor performance of fully mounted implements. J. Agric. Eng. Res. 75, 167-175.

Anon, 2000a. Agricultural Machinery Management Data. ASAE. St. Joseph, MI 49085-9659, USA.

Anon, 2000b. Three-point free-link attachment for hitching implements to agricultural wheel tractors. ASAE. St. Joseph, MI 49085-9659, USA.

Anon, 2003. Agricultural Wheeled Tractors and Implements-Three Point Hitch Couplers – Part 1: U-Frame coupler. ASAE. St. Joseph, MI 49085-9659, USA.

Chen, Y., Mclaughlin, N. B. and Tessier, S. 2006. Double extended octagonal ring (DEOR) drawbar dynamometer. Soil Till. Res. 93, 462-471.

Clarence, A., Johnson, E. and Voorhees, W. B. 1979. A force dynamometer for three-point hithes. Trans. ASAE. 22(2): 226-232.

Cook, N. H. and Rabinowicz, E. 1963. Physical Measurement and Analysis. Addison-Wesley, New York.

Fazel Niari, Z. 2002. Developing design and construction of three-point hitch dynamometer. M. Sc. Thesis. Faculty of Agriculture. Tehran University. Karaj. Iran. (in Farsi)

Godwin, R. J. 1975. An extended octagonal ring transducer for use in tillage studies. J. Agric. Eng. Res. 20, 347-352.

Godwin, R. J. and Reynolds, A. J. 1993. A triaxial dynamometer for force and moment measurements on tillage implements. J. Agric. Eng. Res. 55, 189-205.

Hoag, D. L. and Yoerger, R. R. 1975. Analysis and design of load rings. Trans. ASAE. 19, 995-1000.

Kheiralla, A. F., Yahya, A., Zohadie, M. and Ishak, W. 2003. Design and development of three- point auto hitch dynamometer for an agricultural tractor. AJSTD. 20 (3&4): 271-288.

Lal, R. 1959. Measurement of force on mounted implements. Trans. ASAE. 2, 109-112.

Lotfi, D., Hemmat, A. and Akhavan Sarraf, M. R. 2007. Development and evaluation of a three-point hitch dynamometer and a fifth wheel for mounted implement draft and tractor speed measurements. J. Sci. Technol. Agric. Natural Resou. 11(1):147-162. (in Farsi)

McLaughlin, N. B. 1996. Correction of an error in equations for extended ring transducers. Trans. ASAE. 39, 443-444.

O'Dogherty, M. J. 1996. The design of octagonal ring dynamometers. J. Agric. Eng. Res. 63, 9-18.

Palmer, A. L. 1992. Development of a three-point linkage dynamometer for tillage research. J. Agric. Eng. Res. 52, 157-167.

Scholtz, D. C. 1964. A three-point linkage dynamometer for mounted implements. J. Agric. Eng. Res. 9, 252-258.

Srivastava, A. K., Goering, C. E. and Rohrbach, R. P. 1993. Engineering principles of agricultural machines (2nd Edition). ASAE Textbook No. 6. ISBN 0-929355-33-4.

Thakur, T. C. and Godwin, R. J. 1988. Design of extended octagonal ring dynamometer for rotary tillage studies. AMA. 19(3): 23-28.

Journal of Agricultural Engineering Research/Vol.11/No.2/2010/P: 29-48

Design, Construction and Calibration of an Adjustable Three-Point Hitch Dynamometer for Common Agricultural Tractors in Iran

Y. Abbaspour-Gilandeh*, S. Haghighat-Shishvan,
V. Rasooli-Sharabiani and Z. Fazel-Niari

* Corresponding Author: Assistant Professor, University of Mohaghegh Ardabili, P. O. Box: 179, Ardabil, Iran. Email: u_abbaspour@yahoo.com

This study describes the design, construction and calibration of an adjustable three-point hitch dynamometer. The dynamometer frame design was based on an inverted U-shaped frame that was mounted between the tractor links and implement. The dynamometer frame design allows for use in both category I and II three-point hitch systems because of its flexibility in a lower point hitch spread and mast height adjustment. The dynamometer was designed to measure the maximum resultant horizontal and vertical forces of 50 kN and 30 kN, respectively. The force sensing elements comprised three steel extended octagonal ring transducers located between the frame and implement. Electrical resistance strain gauges were installed on the extended octagonal ring transducers at strain angle nodes to monitor draft and vertical forces independently at the ring center. The data acquisition system consisted of a DT800 programmable data logger and a laptop computer. Field tests on the dynamometer and data acquisition system showed that they were able to function effectively. The field experiments to collect data for evaluation of the three-point hitch dynamometer were done using a subsoiler. Field tests were conducted at soil moisture levels of 21.2 and 9.2% at two operating tillage depths with four replications. A T-test was utilized for mean comparison of the three-point hitch dynamometer and drawbar dynamometer data. A drawbar dynamometer was installed between the two tractors which the front tractor used to pull the tractor with a three point hitch dynamometer and the subsoiler connected to the dynamometer. The advantages of the three-point hitch dynamometer make it advisable for horizontal and vertical force components measurement at production fields for common agricultural tractors in Iran.

Key words: Adjustability, Extended Octagonal Ring Transducer Tractor, Three-Point Hitch Dynamometer