



طراحی، ساخت و ارزیابی یک سیستم فنربندی شاسی نیمه‌فعال^۱ برای تراکتورها

شهریار صرامی^۱، H. J. Meyer^۲

۱ و ۲ - به ترتیب دانش‌آموخته دوره دکتری و استاد دانشگاه فنی برلین، گروه

FG Konstruktion von Maschinensystemen, Germany

shahriar_sarami@yahoo.com

چکیده

در این پژوهش فرضیهٔ بکارگیری سیستم‌های فنربندی هوشمند برای تراکتورها مطرح گردیده است تا بدین وسیله بر محدودیت‌های موجود در کارایی سیستم‌های فنربندی معمولی در تراکتورها غلبه شود. با این ایده یک فنربندی نیمه‌فعال با روش کنترلی دو مرحله‌ای skyhook برای فنربندی شاسی تراکتورها طراحی گردید. ارزیابی کارایی سیستم فنربندی جدید با دو شیوهٔ آزمون‌های عملی و شبیه‌سازی انجام شد. یک نمونهٔ اولیه واقعی از سیستم ساخته و بر روی فنربندی محور عقب یک تراکتور آزمایشی نصب گردید. همچنین جهت شبیه‌سازی آن، یک مدل رایانه‌ای از کل سیستم ساخته شد. برای اجرای آزمایشات، از ورودی‌های جاده‌ای نوع ضربه‌ای^۲ جهت تحریک مستقیم فنربندی استفاده گردید. در آزمایشات عملی جهت اعمال این ورودی‌ها، یک سکوی مخصوص آزمون فنربندی بکار گرفته شد. کارایی سیستم فنربندی از دو عامل راحتی سفر^۳ و قابلیت هدایت و پایداری حرکت تراکتور^۴ مورد سنجش قرار گرفت. برای اینکار شتاب‌های بدنه و نیروی دینامیکی تایرها مورد سنجش قرار گرفتند. سیستم فنربندی جدید، از طریق مقایسه کارایی آن با سیستم غیرفعال^۵ قبلی مورد ارزیابی قرار گرفت و مشخص شد که سیستم جدید بطور معنی‌داری شتاب‌های بدنه و نیروی دینامیکی تماس تایرهای تراکتور را کاهش داد و بدین ترتیب، موجب افزایش راحتی، ایمنی و پایداری حرکت تراکتور گردید.

واژه‌های کلیدی: تراکتور، فنربندی نیمه‌فعال، مدل، شبیه‌سازی رایانه‌ای، آزمون عملی

۱- مقدمه

سیستم‌های فنربندی وسایل نقلیه برای راننده و مسافرن آن راحتی، پایداری و ایمنی بیشتر سفر را به ارمغان می‌آورد. حال آنکه تراکتورهای کشاورزی متداول معمولاً فاقد این سیستم‌ها می‌باشند. اهمیت به بکارگیری فنربندی برای تراکتورها از آن جهت است که کاربران تراکتورهای کشاورزی بطور معمول در معرض سطح بالایی از ارتعاشات قرار دارند. این امر بخصوص در کارهای طولانی موجب خستگی مفرط در آنها و پایین آمدن بازده کاری می‌گردد (Scarlett, 2007). همچنین نیازهای امروزی کشاورزی در تولید بیشتر با هزینهٔ کمتر منجر به پدید آمدن

¹ semi-active suspension

² impulse

³ ride comfort

⁴ handling

⁵ passive suspension

تقاضای عملیات کشاورزی و حمل و نقل سریع تر گردیده است.

امروزه با پی بردن به مزایای بکارگیری سیستم‌های فنربندی در حل مشکلات و رفع نیازهای موجود، استفاده از آنها به تدریج مرسوم می‌گردد. بطوریکه تقریباً همه تراکتورهای مدرن امروزی مجهز به انواعی از سیستم‌های فنربندی می‌باشند. انواع مختلف سیستم‌های فنربندی موجود در تراکتورها عبارتند از فنربندی صندلی راننده، کابین، فنربندی اتصال سه نقطه و فنربندی شاسی تراکتور که هر کدام به نوعی در بهبود راحتی سفر و رفتار دینامیکی تراکتورها نقش ایفا می‌کنند. در این میان این سیستم‌ها، فنربندی شاسی قادر است بطور موثرتری برای یک تراکتور راحتی سفر و پایداری حرکت را تامین کند (Rill, 1992). بکارگیری فنربندی کامل شاسی برای تراکتورها بسادگی اجراپذیر نمی‌باشد زیرا تراکتورهای معمول دارای بدنه با ساختار بلوکی می‌باشند که تجهیز کردن آنها به فنربندی محور عقب بسادگی امکان‌پذیر نمی‌باشد. امروزه بتدریج از ساختار شاسی‌دار برای تراکتورها بعلت مزایای آنها بیشتر استفاده می‌گردد و به این ترتیب امکان تجهیز این تراکتورها به فنربندی کامل شاسی فراهم می‌شود. این تراکتورهای تمام فنربندی شده قادر به ارائه بهترین سطح راحتی سفر و قابلیت هدایت و پایداری حرکت در میان انواع دیگر تراکتورها هستند بطوریکه در بعضی موارد قادر به پیشروی با سرعت بالا تا حد ۸۰ کیلومتر در ساعت می‌باشند (Hoppe, 2004).

اما تراکتورهای تمام فنربندی شده نیز در عمل با محدودیت‌هایی مواجه می‌باشند. یکسری پژوهش در مورد رفتارهای دینامیکی تراکتورهای تمام فنربندی در دانشگاه صنعتی برلین از جمله (Hoppe, 2006) نشان دادند که در این تراکتورها ارتعاشات بدنه در محدوده فرکانس‌های تشدید آن (۱-۳ هرتز) قابل توجه بود، بطوریکه بر راحتی سفر و قابلیت هدایت و پایداری حرکت این تراکتورها تاثیر منفی می‌گذاشت. تلاش برای بالاتر بردن کارایی سیستم فنربندی این تراکتورها از طریق انتخاب مقادیر بهینه برای سختی فنر و سفتی دمپر نیز تاثیر محدودی به همراه داشت. به اینصورت که با انتخاب فنرها و دمپرهای نرم‌تر، راحتی سفر بیشتری ایجاد گردید اما قابلیت هدایت و پایداری حرکت تراکتور کاهش یافت. برعکس، با انتخاب فنرها و دمپرهای سخت‌تر، قابلیت هدایت و پایداری حرکت بهتری فراهم شد ولی به بهای قربانی کردن راحتی سفر.

البته این محدودیت در طراحی فنربندی غیرفعال، برای متخصصین طراحی فنربندی وسایل نقلیه یک امر شناخته شده می‌باشد. برای غلبه بر این مشکل، امروزه ایده استفاده از فنربندی فعال مطرح گردیده است. در این سیستم‌ها که مجهز به تجهیزات کنترل الکترونیکی هستند، پارامترهای فنربندی ثابت نمی‌باشند بلکه متناسب با شرایط فعالیت فنربندی تنظیم می‌گردند. در این پژوهش نیز برای بالا بردن کارایی سیستم فنربندی شاسی تراکتورها، ایده فنربندی فعال بکار گرفته شد. به این ترتیب که یک سیستم فنربندی فعال مناسب طراحی شد و بر فنربندی محور عقب یک تراکتور آزمایشی نصب گردید. سپس عملکرد سیستم جدید از دو روش آزمون‌های عملی و شبیه‌سازی مورد ارزیابی قرار گرفت.

۲- مواد و روش‌ها

۲-۱- تراکتور آزمایشی

تراکتور مورد استفاده جهت اجرای آزمون عملی یک تراکتور آزمایشی در دانشگاه صنعتی برلین با نام TUB-Trac بود که قبلاً نیز جهت انجام تحقیقات دیگر مربوط به سیستم‌های فنربندی تراکتورها مورد استفاده قرار

گرفته بود (شکل ۱). این تراکتور در تحقیقات قبلی به یک سیستم فنربندی هیدرونیوماتیک^۶ در محور عقب تجهیز شده بود که همراه با فنربندی اولیه محور جلو آن، به یک تراکتور تمام فنربندی تبدیل شده بود. در این پژوهش سیستم فنربندی جدید به فنربندی محور عقب این تراکتور اعمال گردید. تجهیزات سیستم هیدرونیوماتیک فنربندی محور عقب شامل انباره‌ها، شیرهای الکتریکی، گلوبی‌ها در عقب تراکتور نصب شده بودند و از طریق شیلنگ هیدرولیک به سیلندرهای هیدرولیک فنربندی متصل می‌گردیدند (شکل‌های ۹).

۲-۲- سیستم عملگر هیدرولیک

روش کنترلی سیستم فنربندی نیمه‌فعال از نوع میرایی دو مرحله‌ای بود. به این جهت، یک مکانیزم مخصوص به فنربندی هیدرونیوماتیک محور عقب اضافه گردید تا از طریق آن بتوان فرمان کنترلگر مبنی بر تغییر میرایی فنربندی در دو سطح پایین و بالا اجرا شود. شکل ۲ مدار هیدرولیک یک واحد فنربندی هیدرونیوماتیک را نشان می‌دهد که مکانیزم ویژه عملگر دو مرحله‌ای به آن اضافه گردیده است. این مکانیزم در هر طرف سیلندر عبارتست از یک گلوبی^۷ موازی با یک شیر برقی هیدرولیک که میان انباره و درگاه سیلندر نصب گردیده است. در شکل ۳. نحوه کار این سیستم را نمایش داده شده است؛ در حالت اول شیر هیدرولیک برقی خاموش می‌باشد (شکل ۳-الف). در این وضعیت مسیر عبور روغن از سیلندر به انباره (و بالعکس) از دو گلوبی می‌گذرد. در این حالت، نیروی میرایی ایجاد شده در سیلندر از اثر جمع افت فشار ایجاد شده در دو گلوبی پدید می‌آید و حالت میرایی سطح بالا ایجاد می‌شود. در حالت دوم، شیر هیدرولیک برقی روشن است (شکل ۳-ب). در این وضعیت یک مسیر موازی برای عبور روغن میان سیلندر و انباره ایجاد می‌گردد که عملاً اثر گلوبی اول را حذف می‌کند. بدین ترتیب، نیروی میرایی فقط از اثر افت فشار ایجاد شده در گلوبی دوم پدید می‌آید و حالت میرایی سطح پایین ایجاد می‌گردد.

۲-۳- روش کنترلی

برای انتخاب سیستم فنربندی فعال مناسب برای فنربندی شاسی تراکتورها، قابلیت‌ها و محدودیت‌های انواع سیستم‌های موجود مورد مطالعه قرار گرفت که در نهایت تمرکز کار بر روی دو سیستم فنربندی تمام‌فعال^۸ و نیمه‌فعال اعمال گردید. زیرا این دو سیستم بطور کلی با ارائه یک کنترل پسنخوردی سرعت بالا، کارایی بیشتری را ارائه می‌کنند. برخلاف فنربندی فعال که از طریق تزریق انرژی اضافی به سیستم فنربندی کار می‌کند، در فنربندی نیمه‌فعال تحلیل انرژی فنربندی تحت کنترل قرار می‌گیرد. به این ترتیب که یک بجای یک دمپر معمولی در سیستم، از یک دمپر قابل تنظیم استفاده می‌شود و ضریب میرایی آن توسط یک کنترلگر الکترونیکی بطور لحظه‌ای تعیین می‌گردد. این سیستم در حین برخورداری از کارایی قابل قبول در حد فنربندی تمام‌فعال، به توان مصرفی بالا احتیاجی ندارد (Boonchanta, 1982). همچنین از آنجایی که در این سیستم تنها ضریب میرایی فنربندی کنترل می‌شود، پیچیدگی زیادی را به آن تحمیل نمی‌کند و حالت‌های خطای آن مخاطره‌انگیز نبوده و موجب اختلالات عمده در سیستم فنربندی نمی‌گردد. بنابراین این سیستم فنربندی هوشمند برای فنربندی وسایل نقلیه سنگین همچون

⁶ hydro-pneumatic suspension

⁷ throttle

⁸ fully active suspension

یک تراکتورها مناسب تشخیص داده شد و از آن در این پژوهش استفاده گردید.

روش کنترلی مورد استفاده برای فزبنندی نیمه‌فعال در این پژوهش، skyhook بوده است. این روش که اولین بار توسط کارنوپ (Karnopp, D. 1974) معرفی گردید، امروزه بعنوان متدی کاملاً شناخته شده در فزبنندی فعال مطرح می‌باشد. همانطور که از نام آن نیز مشخص می‌شود، در این روش ارتعاش جرم فزبنندی‌شده از طریق نیروی یک میراکننده متصل به یک نقطه ثابت فرضی در فضا کنترل می‌گردد (شکل ۴-الف). این شکل ساده skyhook در واقع از حل یک مسئله کنترل بهینه با هدف کمینه کردن RMS^9 شتاب جرم فزبنندی‌شده بدست آمده است.

در کاربردهای عملی جهت شبیه‌سازی نیروی میراکننده skyhook، از یک میراکننده قابل تغییر بین دو جرم فزبنندی شده استفاده می‌گردد (شکل ۴-ب). نیروی یک میراکننده تنها در خلاف جهت حرکت نسبی آن تولید می‌شود. بنابراین در حالتی که میراکننده نیروی در خلاف جهت مورد نظر روش کنترلی تولید کند، با بکارگیری یک مکانیزم کلیدزنی خاموش می‌گردد. حال اگر برای هر کدام از این دو حالت خاموش و روشن میراکننده، دو ضریب میرایی صفر و حداکثر در نظر گرفته شود، روش کنترلی ساده‌تری ایجاد می‌شود که skyhook دو حالت نام دارد. البته نقطه ضعف این روش در ایجاد تغییرات ناگهانی نیرو در سیستم فزبنندی می‌باشد که در عمل می‌توان با محدود کردن حد بالا و پایین ضریب میرایی میراکننده بر این مشکل غلبه نمود. فرمول‌بندی این روش کنترلی عبارتست از:

$$c_2 = \begin{cases} c_{high\ state} & z'_2(z'_2 - z'_1) \geq 0 \\ c_{low\ state} & z'_2(z'_2 - z'_1) < 0 \end{cases} \quad (1)$$

این فرمول‌بندی جدید موجب ایجاد ساده‌سازی عمده در کاربرد عملی روش کنترلی skyhook می‌گردد، بطوریکه اثر آن در تمام اجزای سیستم شامل عملگر، حسگرها، و کنترلگر ظاهر می‌گردد. این امتیاز موجب پایداری عملکرد سیستم در شرایط مختلف می‌شود که بخصوص برای کاربرد در تراکتورها که در شرایط سخت کاری قرار می‌گیرند، مفید می‌باشد.

۴-۲- ساخت سیستم کنترل

ساختار سیستم کنترل فزبنندی نیمه‌فعال و ارتباط آن با تراکتور آزمایشی در شکل ۵ نشان داده شده است. این ساختار دارای سه جزء اصلی کنترلگر، عملگر و حسگرها بود. رفتار دینامیکی تراکتور از طریق پس‌خورد تامین شده بوسیله حسگرها به کنترلگر ارسال می‌گردد. کنترلگر با دریافت این اطلاعات بر اساس روش کنترلی تعیین شده فرمان مناسب را جهت بهینه کردن رفتار دینامیکی از طریق عملگر به فزبنندی تراکتور اعمال می‌کرد و این روال طی یک حلقه کنترلی بسته ادامه پیدا می‌کرد.

مرکز ساختار سخت‌افزاری سیستم کنترل یک رایانه شخصی بود که همراه با نرم افزار نصب شده روی آن، روش کنترلی دو مرحله‌ای skyhook را اجرا می‌کرد. این رایانه از طریق کارت رابط با ورودی و خروجی‌های سیستم ارتباط داشت. بر اساس روش کنترلی (رابطه ۱)، ورودی‌های کنترلگر سرعت نسبی فزبنندی و سرعت مطلق جرم فزبنندی شده (بدنه تراکتور) بودند که با بکارگیری حسگرهای سرعت اندازه‌گیری شدند. خروجی کنترلگر نیز

⁹ root-mean-square

پالس‌های فرمان ارسالی به شیرهای برقی هیدرولیکی عملگر بودند که از طریق یک واحد رله‌ای تقویت کننده سیگنال فرمان به آنها اعمال می‌گردیدند.

۲-۵- مدلسازی

اجزاء سیستم فزیندی نیمه‌فعال و ارتباط آنها با یکدیگر در شکل ۵ نشان داده شد. برای اجرای شبیه‌سازی کل سیستم، ابتدا مدل آن با چهار جزء عملگر، تراکتور آزمایشی، کنترلگر و حسگرها ساخته شد. برای مدلسازی هر یک از این اجزاء، ابتدا مدل فیزیکی و ریاضی آنها استخراج شدند. سپس با استفاده از نرم افزار MATLAB-Simulink مدل‌های رایانه‌ای آنها ایجاد گردیدند. با اتصال تمامی این مدل‌ها به یکدیگر و اضافه کردن بلوک‌های مربوط به شبیه‌سازی ورودی جاده و جمع‌آوری پارامترهای خروجی، مدل کامل رایانه‌ای برای انجام آزمایشات شبیه‌سازی ایجاد گردید.

۲-۶- آزمایشات ارزیابی

اجرای هر آزمایش شامل تحریک سیستم فزیندی با ورودی مناسب و اندازه‌گیری واکنش آن بود. نحوه انجام اینکار برای آزمایشات عملی و شبیه‌سازی بطور یکسان انجام گرفت تا امکان مقایسه نتایج هر دو سری آزمایشات با یکدیگر نیز وجود داشته باشد.

۲-۶-۱- خروجی و ورودی آزمایشات

سیستم فزیندی جدید بر اساس دو معیار راحتی سفر و قابلیت هدایت و پایداری حرکت عملکرد مورد ارزیابی قرار گرفت. راحتی سفر که دلالت بر راحتی و آسایش راننده در هنگام سواری و کار با تراکتور دارد، دارای رابطه مستقیمی با شدت شتاب‌های بدنه می‌باشد. بنابراین برای اندازه‌گیری کمی این پارامتر، شتاب‌های عمودی و شتاب‌های دورانی بدنه اندازه‌گیری شدند. از طرف دیگر، قابلیت هدایت و پایداری حرکت تراکتور نسبت مستقیمی با نحوه تماس تایرها با سطح جاده دارد. بنابراین برای اندازه‌گیری کمی این پارامتر، تغییرات نیروی عمودی تماس تایر با سطح جاده اندازه‌گیری گردید. برای تحریک سیستم فزیندی در آزمایشات از سه حالت ورودی ضربه‌ای غلت‌زنی، حرکت عمودی و کله‌زنی استفاده گردید (جدول ۱). این نوع ورودی برخلاف ورودی معمولی جاده‌ای، موجب تحریک مستقیم سیستم در رابطه با ارتعاشات بدنه تراکتور می‌گردد بطوریکه امکان بررسی دقیق‌تر اثر فزیندی جدید بر آنها را فراهم می‌شد. هر ضربه ورودی بصورت یک موج مثلثی جابجایی با دامنه ۴cm و فرکانس ۱۰ هرتز بود که امکان بررسی پاسخ فرکانسی سیستم در محدوده کاری آن را نیز فراهم کرد.

۲-۶-۲- اجرای آزمایشات

آزمایشات بطور مشابه در دو گروه با فزیندی نیمه‌فعال و فزیندی غیرفعال اجرا گردیدند تا به این طریق امکان ارزیابی مقایسه‌ای فزیندی جدید فراهم گردد. در هر گروه، سه سری آزمایشات بر اساس نوع ورودی اجرا گردیدند. برای اجرای آزمایشات شبیه‌سازی از مدل نهایی رایانه‌ای سیستم به‌مراه دو بلوک ورودی و خروجی استفاده گردید. بوسیله بلوک ورودی، محرک جاده‌ای که از قبل تعیین شده (جدول ۱) بود، تولید و به مدل تراکتور اعمال می‌شد. پارامترهای ارزیابی سیستم نیز توسط بلوک خروجی بصورت منحنی زمانی جمع‌آوری می‌شدند. برای مدیریت اجرای آزمایشات، از یک برنامه ایجاد شده در نرم‌افزار MATLAB استفاده گردید. به این ترتیب که در

ابتدای هر آزمایش خاص، پارامترهای شبیه‌سازی مربوط به آن آزمایش توسط این برنامه به مدل اعمال می‌شد، سپس شبیه‌سازی اجرا می‌گردید. در ادامه، داده‌های خام خروجی حاصل از شبیه‌سازی مورد تجزیه و تحلیل قرار گرفته و در نهایت نتایج نهایی آزمایش ارائه می‌شدند.

برای اعمال ورودی‌های آزمایشات در آزمون عملی، از یک سکوی آزمون فربندی موجود در دانشگاه صنعتی برلین استفاده گردید. این سکو از چهار لرزاننده هیدرولیک برای چهار چرخ وسیله نقلیه تشکیل می‌گردید. امکان شبیه‌سازی انواع شکل موج ورودی تا سقف فرکانس ۱۰ هرتز در هر کدام از این واحدها بطور مجزا وجود داشت. بدین ترتیب امکان اجرای ورودی‌های تعیین شده (جدول ۱) فراهم گردید. شکل ۶ نحوه قرارگیری تراکتور آزمایشی بر روی این سکوی آزمون را نشان می‌دهند. برای اندازه‌گیری و ضبط پارامترهای خروجی آزمایشات یک سیستم جمع‌آوری داده‌ها^{۱۰} طراحی و مورد استفاده قرار گرفت. از آنجاییکه اندازه‌گیری مستقیم شتاب‌های بدنه در مرکز ثقل امکان‌پذیر نبود، از روش اندازه‌گیری غیر مستقیم استفاده گردید. بدین ترتیب که در هنگام انجام آزمایشات، شتاب‌های عمودی چهارگوشه بدنه و شتاب‌های عمودی چهار چرخ با استفاده از حسگرهای شتاب مطلق اندازه‌گیری شدند. سپس با استفاده از روابط ریاضی مربوطه، شتاب‌های مرکز ثقل بدنه و نیروی دینامیکی تایرها از این داده‌ها محاسبه گردیدند.

۳- یافته‌ها و بحث

داده‌های بدست آمده از آزمایشات، از نوع منحنی‌های زمانی بودند که مورد تجزیه و تحلیل دامنه‌ای و فرکانسی قرار گرفتند. تحلیل دامنه‌ای، با روش مرسوم ریشه متوسط مکعب‌ها با اختصار RMS انجام گردید. این پارامتر کمی معرف مقدار متوسط دامنه و یا مقدار انرژی ارتعاشات می‌باشد. البته این کمیت به تنهایی برای ارزیابی سیستم کافی نبود و به یک تحلیل فرکانسی برای پی بردن به رفتار سیستم در فرکانس‌های مختلف نیز نیاز شد که برای اینکار از روش گرافیکی طیف‌سنجی از نوع PSD^{۱۱} استفاده گردید.

۳-۱- معبرسازی مدل

از آنجاییکه آزمایشات عملی و شبیه‌سازی بصورت مشابه انجام گرفتند. این امکان فراهم بود تا قبل از استناد به نتایج شبیه‌سازی، با مرجع قرار دادن نتایج آزمایشات عملی، معبرسازی مدل سیستم اجرا شود. برای اینکار نتایج تحلیل دامنه‌ای (RMS) و فرکانسی (PSD) هر دو سری آزمایشات مورد مقایسه قرار گرفت. در موارد وجود اختلاف عمده در این نتایج، اصلاحاتی شامل انتخاب دقیق‌تر پارامترهای شبیه‌سازی و تصحیح منطق مدلسازی انجام گردیدند.

۳-۲- ارزیابی راحتی سفر

برای ارزیابی عملکرد فربندی جدید در مورد راحتی سفر، داده‌های مربوط به شتاب‌های عمودی و دورانی بدنه تراکتور مورد بررسی قرار گرفتند. بدین ترتیب که نتایج RMS بدست آمده از فربندی نیمه‌فعال با نتایج فربندی غیرفعال در هر دو سری آزمایشات عملی و شبیه‌سازی مورد تحلیل مقایسه‌ای قرار گرفتند. مقدار تاثیر فربندی جدید در شتاب‌های بدنه نسبت به فربندی غیرفعال با استفاده از رابطه زیر محاسبه گردید. در این فرمول مقادیر

^{۱۰} data Acquisition System

^{۱۱} power Spectral Density

مثبت درصد بدست آمده، بهبودی ایجاد شده در عملکرد فزبنندی را نشان می‌دهند. جدول ۲ مقادیر RMS شتاب‌های حرکات عمودی، غلت زنی و کله زنی بدنه و همچنین درصد تغییرات آنها را ارائه می‌کند.

$$(۲) \quad (\%) \text{ تغییر} = \frac{(RMS) \text{ فزبنندی غیرفعال} - (RMS) \text{ فزبنندی نیمه فعال}}{(RMS) \text{ فزبنندی غیرفعال}} \times 100$$

۳-۳- ارزیابی قابلیت هدایت و پایداری حرکت تراکتور

برای ارزیابی قابلیت هدایت و پایداری حرکت تراکتور، اثر فزبنندی جدید بر تغییرات نیروی عمودی تماس تایرهای محور عقب تراکتور مورد بررسی قرار گرفت. بدین ترتیب که نتایج RMS بدست آمده از فزبنندی نیمه فعال با نتایج فزبنندی غیرفعال در هر دو سری آزمایشات مورد تحلیل مقایسه‌ای قرار گرفت. جدول ۳ مقادیر RMS نیروی دینامیکی تایرها و همچنین درصد تغییرات آنها را ارائه می‌کند.

۳-۴- تحلیل پاسخ فرکانسی

برای پی بردن به چگونگی عملکرد کلی سیستم فزبنندی در محدوده‌های فرکانسی مختلف، نمودارهای PSD آزمایشات مورد بررسی قرار گرفتند. در اینجا تحلیل یک نمونه عمومی از این نمودارها ارائه می‌شود. نمودار مربوط به شتاب عمودی بدنه تراکتور در دو حالت فزبنندی غیرفعال و نیمه فعال بدست آمده در شکل ۷ نشان داده شده است.

همانطوریکه مشاهده می‌شود چهار محدوده فرکانسی مجزا در این نمودار قابل تشخیص می‌باشد. که از آنها، ناحیه ۱ و ۳ از اهمیت ویژه‌ای برخوردار هستند. محدوده اول ناحیه فرکانسی از ۰/۵ هرتز تا ۲ هرتز است که در برگیرنده فرکانس‌های طبیعی حرکات بدنه تراکتور می‌باشد. از جمله فرکانس طبیعی حرکت عمودی بدنه که در این شکل نشان داده شده است. محدوده سوم ناحیه فرکانسی از ۴ هرتز تا ۶/۵ هرتز می‌باشد که در برگیرنده فرکانس طبیعی حرکت عمودی چرخ (جرم فزبنندی نشده) می‌باشد. بهترین عملکرد سیستم فزبنندی نیمه فعال در کاهش دامنه شتاب در ناحیه اول مشاهده می‌شود. حال آنکه عملکرد سیستم فزبنندی نیمه فعال در ناحیه سوم مثبت بوده و برعکس موجب افزایش نسبی دامنه شتاب گردیده است.

برای درک بهتری از این پدیده، پاسخ فرکانسی حرکت عمودی چرخ بررسی شد و مشخص گردید که عملکرد کلی فزبنندی نیمه فعال در کاهش شتاب عمودی چرخ‌ها منفی می‌باشد بطوریکه شتاب آنها افزایش یافته است. این پدیده در واقع به روش کنترلی skyhook بر می‌گردد که تمرکز آن بر کنترل ارتعاشات جرم فزبنندی شده (بدنه تراکتور) و نه جرم فزبنندی نشده (چرخ‌ها) می‌باشد. علارغم این عملکرد منفی در افزایش شتاب عمودی چرخ‌ها، مطابق نتایج RMS، عملکرد کلی فزبنندی نیمه فعال در کاهش نیروی دینامیکی چرخ مثبت بود. این تناقض ظاهری به اینصورت توضیح داده می‌شود که مطابق روابط مربوطه، نیروی دینامیکی یک تاینر علاوه بر وابستگی به شتاب چرخ به شتاب‌های بدنه نیز بستگی دارد که اتفاقاً این وابستگی دوم بدلیل جرم بمراتب بالاتر بدنه از تاثیر بیشتری نیز برخوردار می‌باشد. به این دلیل است که عملکرد کلی فزبنندی نیمه فعال در کاهش نیروی دینامیکی چرخ مثبت بوده است.

۴- نتیجه گیری

در این پژوهش فرضیه بکارگیری فنربندی هوشمند برای بهبود کارایی فنربندی شاسی تراکتور و رفتار دینامیکی آن مطرح گردید. بدین منظور، سیستم فنربندی نیمه فعال با روش کنترلی دو مرحله‌ای skyhook مناسب تشخیص داده شد. برای ارزیابی سیستم جدید، یک نمونه آزمایشی از فنربندی جدید ساخته و بر روی محور عقب یک تراکتور آزمایشی نصب گردید. همچنین یک مدل رایانه‌ای کامل از سیستم ساخته و معتبرسازی گردید. آزمایشات مناسب جهت ارزیابی عملکرد سیستم فنربندی جدید طراحی و بصورت عملی و شبیه‌سازی اجرا شدند. نتایج نهایی این ارزیابی نشان داد که با سیستم فنربندی نیمه فعال جدید دست‌آوردهای زیر بدست آمد.

- ۱- راحتی سفر تراکتور بطور معنی‌دار افزایش یافت. به اینصورت که شتاب‌های بدنه تراکتور تا ۱۳ درصد در شبیه‌سازی سیستم و تا ۱۰ درصد در آزمایشات عملی کاهش یافتند.
 - ۲- قابلیت هدایت و پایداری حرکت تراکتور بطور معنی‌دار افزایش یافت. به این صورت که نیروی دینامیک تایرها تا ۶/۵ درصد در شبیه‌سازی سیستم و تا ۴/۵ درصد در آزمایشات عملی کاهش یافت.
- بدین ترتیب فنربندی جدید عملکرد فنربندی شاسی تراکتور و بدنبال آن رفتار دینامیکی آن را بهبود بخشید.

جدول ۱. سه حالت ورودی ضربه‌ای و پالس‌های متناظر اعمالی به چرخ‌های تراکتور

حالت ورودی	ورودی اعمالی به چرخ			
	جلو-چپ	جلو-	عقب-	عقب-
 غلت زنی	∩	∪	∩	∪
 عمودی	∩	∩	∩	∩
 کله زنی	∪	∪	∩	∩

جدول ۲. نتایج شتاب‌های حرکات بدنه تراکتور در حالت فنربندی نیمه فعال و غیرفعال

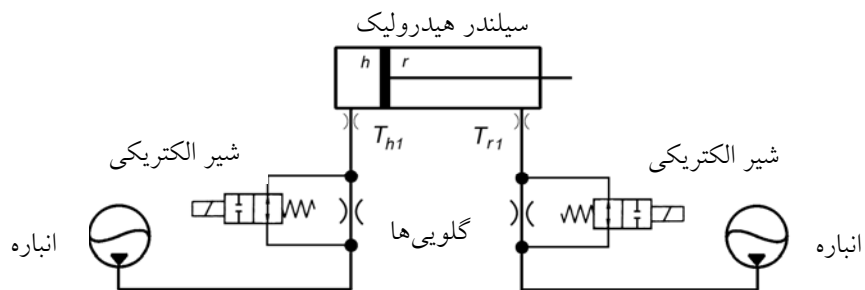
آزمون	حرکت بدنه	واحد	غیرفعال	نیمه فعال	بهبودی [%]
			(RMS) شتاب	(RMS) شتاب	
شبیه‌سازی	عمودی	$[m/s^2]$	۰/۵۷۷	۰/۵۲۳	۹/۴
	کله زنی	$[rad/s^2]$	۰/۴۷۸	۰/۴۲۷	۱۰/۷
	غلت زنی	$[rad/s^2]$	۰/۲۹۶	۰/۲۵۷	۱۳/۳
عملی	عمودی	$[m/s^2]$	۰/۶۹۸	۰/۶۵۳	۶/۴
	کله زنی	$[rad/s^2]$	۰/۵۶۵	۰/۵۱۹	۸/۲
	غلت زنی	$[rad/s^2]$	۰/۳۷۱	۰/۳۳۵	۹/۷

جدول ۳. نتایج نیروی دینامیکی تایر از آزمایشات شبیه‌سازی و عملی

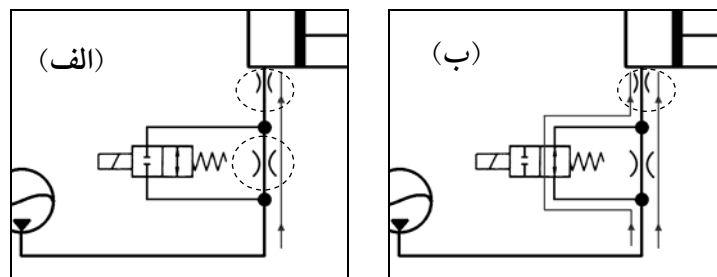
آزمون	نیروی دینامیکی تایر RMS [N]		بهبودی [%]
	فتربندی غیرفعال	فتربندی نیمه‌فعال	
شبیه‌سازی	۱۲۶۷/۶	۱۱۸۶/۳	۶/۴
عملی	۱۴۴۴/۷	۱۳۸۱/۸	۴/۳



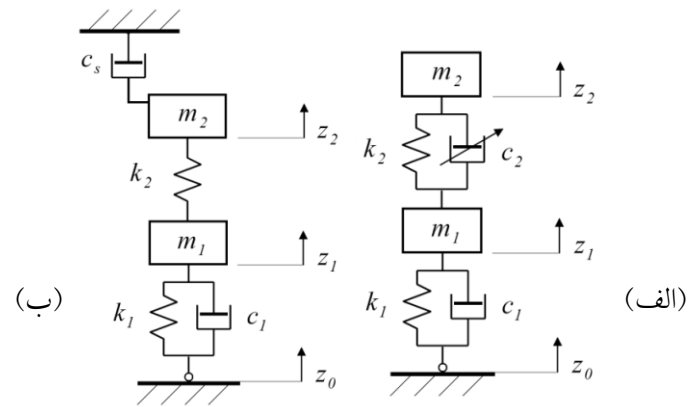
شکل ۱. تراکتور آزمایشی مجهز به فتربندی متداول در محور جلو و فتربندی هیدرونیوماتیک در محور عقب



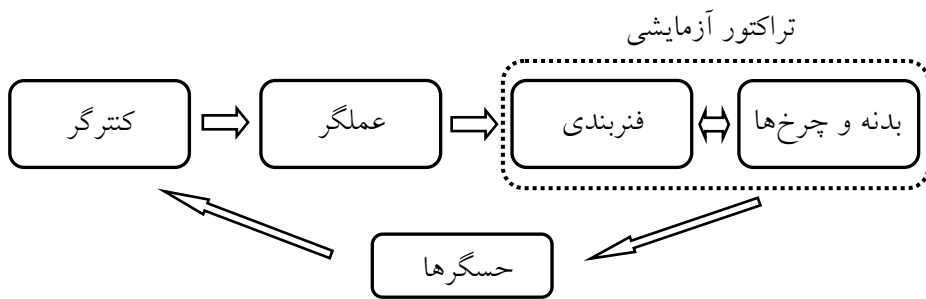
شکل ۲. یک واحد فتربندی هیدرونیوماتیک مجهز به سیستم میرایی دو مرحله‌ای



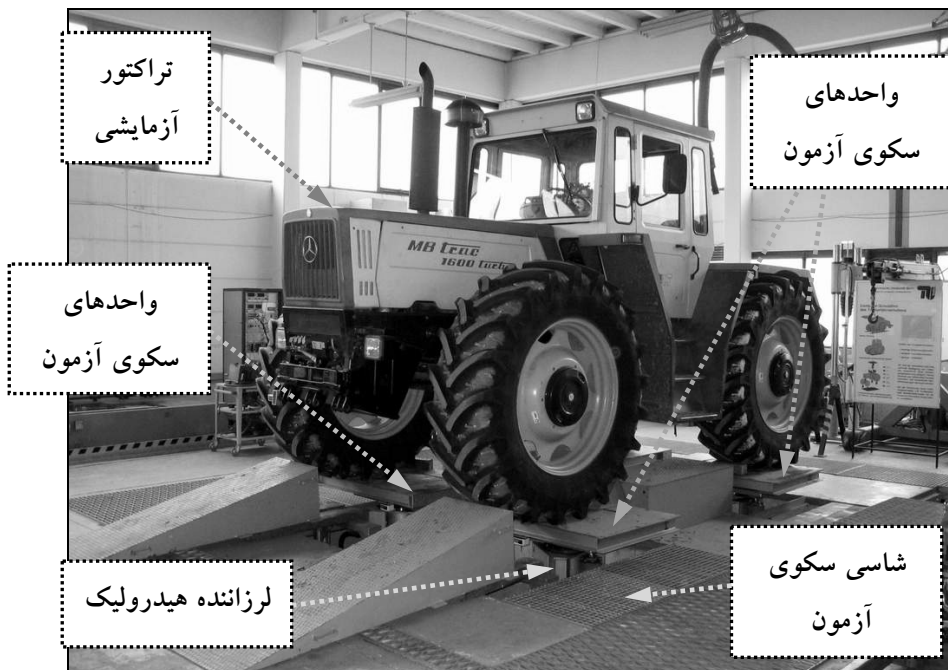
شکل ۳. چگونگی کارکرد سیستم میرایی دو مرحله‌ای (الف) میرایی سطح بالا (ب) میرایی سطح پایین.



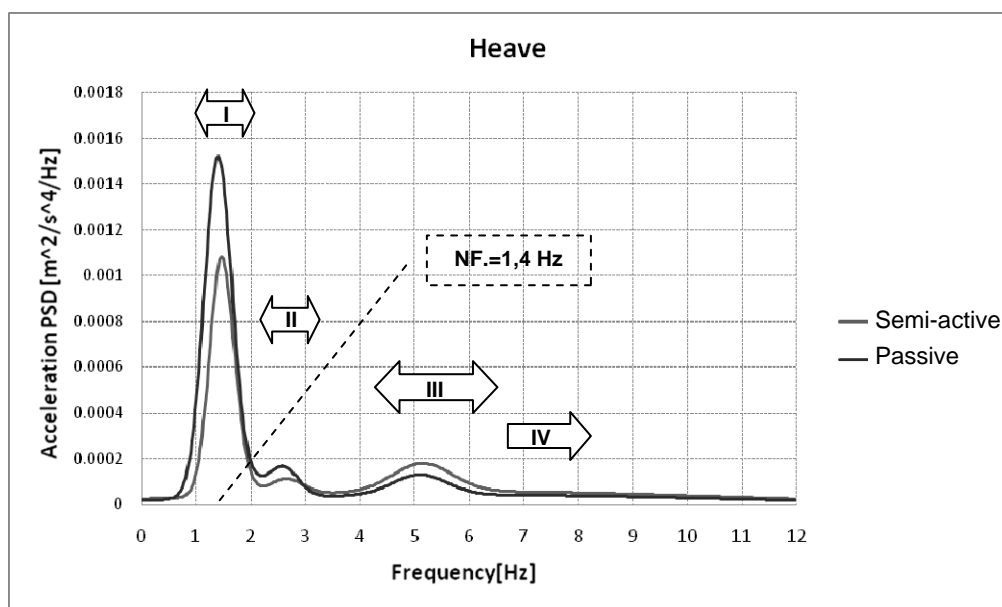
شکل ۴. الف) روش کنترللی skyhook ب) آرایش عملی این روش



شکل ۵. ساختار سیستم فنربندی فعال و حلقه کنترل آن



شکل ۶. قرار گیری تراکتور آزمایشی بر روی سکوی آزمون فنربندی جهت اجرای آزمایشات عملی



شکل ۷. مقایسه پاسخ فرکانسی شتاب عمودی بدنه تراکتور در دو حالت فنربندی غیرفعال و نیمه‌فعال.

منابع و مأخذ

1. Boonchanta, P. 1982. Comparisons of Active, Passive, and Semi active Suspensions for Ground Vehicles. Ph. D. Dissertation, University of California, Davis, CA, USA.
2. Hoppe, U. 2004. Stand der Technik und aktuelle Entwicklungen bei der Traktorfederung. Neue Landwirtschaft, Vol 5, 43-46.
3. Hoppe, U. 2006. Einfluss der Hinterachsfederung auf die Fahrdynamik von Traktoren. Ph.D. Dissertation, TU-Berlin, Germany.
4. Karnopp, D., Crosby, M. J., & Harwood, R. A. 1974. Vibration Control Using Semi-Active Force Generators. *ASME Journal of Engineering for Industry*, Vol 96 (2), 619-626.
5. Rill, G., Slag, D., & Wilks, E. 1992. Improvement of Dynamic Wheel Loads and Ride Quality of Heavy Agricultural Tractors by Suspending Front Axls. *Heavy Vehicle and Roads-Technology, Safety and Policy*, Telford, London, 116-121.
6. Scarlett, A. J., Price, J. S., & Stayner, R. M. (2007). Whole-Body Vibration: Evaluation of Emission and Exposure Levels Arising from Agricultural Tractors. *Journal of terramechanics*, 44 (1), 65-73.

Development and Evaluation of a Semi-active Suspension System for Agricultural Tractors

Abstract

Usage of suspension systems in agricultural tractors improves the ride comfort and dynamic behavior. However, the efficiency of passive suspensions is limited. In this investigation, utilization of active suspensions was considered with the aim of improving the performance of tractors' suspensions. As the first step, a semi-active suspension with on-off skyhook control strategy was considered as a proper system for agricultural tractors. In order to evaluate this new system, a full suspension test-tractor with hydro-pneumatic rear suspension was determined and during the research work, the rear axle suspension was equipped with the semi-active control system. In order to evaluate the new suspension system, two approaches of the computer simulation testing and experimental testing were used. For the first approach, the computer models of the tractor and suspension system were built. Three sets of impulse inputs were considered to excite the suspension system in the tests. In the experimental tests, a suspension test rig was used to apply the test inputs to the tractor. The outputs of the tests were considered the body accelerations and dynamic tire forces to evaluate the ride comfort and handling ability of the tractor. The comparative results of the passive and semi-active test modes were used in order to evaluate the performance of the new suspension system which showed significant improvement in the ride comfort and handling of the tractor. As conclusion, the overall performance of the tractor's suspension was increased by using the new suspension system.

Keywords: agricultural tractor, semi-active suspension, model, simulation, experimental tests.