

بررسی تأثیر فشار باد و سرعت پیشروی چرخ بر نیروهای افقی حاصل از موانع مستطیلی شکل

حبیب محمدزاده^{*۱} - عارف مردانی^۲ - اسعد مدرس مطلق^۳

تاریخ دریافت: ۹۰/۸/۲۳

تاریخ پذیرش: ۹۱/۱۱/۲۵

چکیده

مدل‌های مربوط به مکانیک چرخ، عمدتاً برای شرایط حرکت بر روی سطح صاف جاده و یا خاک تدوین شده است و اعتبار لازم برای توصیف حرکت چرخ بر روی سطوح ناهموار را دارا نیست. علی‌رغم پیچیدگی دینامیک حاکم بر این پدیده و با در نظر گرفتن اهمیت موضوع مخصوصاً برای شرایط مزرعه‌ای چرخ‌های حامل ادوات، تحقیق حاضر به بررسی تأثیر برخی از پارامترهای حاکم بر فرآیند گذراندن موانع مقابل تایرهای پنوماتیکی با استفاده از یک آزمونگر تک چرخ در شرایط انباره خاک پرداخته است. نتایج حاکی از مشاهده رابطه نسبتاً خطی نیروی افقی وارده بر تایر با سرعت پیشروی چرخ و همچنین ارتفاع مانع مستطیلی شکل بود. در محدوده‌ی سطوح بیشتر از حداقل فشار لازم برای شکل‌گیری بدنه تایر، اثر فشار باد بر نیروی افقی وارده بر تایر، معکوس بود و در فشارهای باد کمتر با جذب بیشتر نیروی توسط تایر، نیروی افقی کمتری به مرکز تایر وارد شد. برای سرعت‌های مختلف و موانع با ارتفاع‌های گوناگون فشارهای متوسط در حدود ۱۵۰ تا ۲۰۰ کیلوپاسکال در برگزیده نیروی افقی کمتر وارده بر چرخ بود. نیروی کششی لازم برای گذراندن مانع به صورت خطی، با افزایش سرعت پیشروی و ارتفاع مانع افزوده شد.

واژه‌های کلیدی: آزمونگر تک چرخ، انباره خاک، تقابل چرخ با مانع، چرخ

مقدمه

سرعت‌های مختلف چرخ، جنس و هندسه مختلف مانع و یا چرخ قابل بررسی است.

در گذشته تحقیقاتی بر روی اثر مانع بر ماشین‌های کشنده انجام شده است. بکر (۱۹۵۶) به صورت تئوری توانایی عبور یک خودروی دو محور از روی مانع را بررسی کرد و در این بررسی تایر و شاسی خودرو را به صورت صلب در نظر گرفت. متغیرهای این تحقیق، ارتفاع مانع، قطر چرخ و ضریب دگرچسبی خاک بودند. بکر با فرض عدم ایجاد محدودیت برای گشتاور چرخ به این نتیجه رسید که خودروی در نظر گرفته شده می‌تواند از روی بزرگترین مانع نیز عبور کند. جیندرا (۱۹۶۶) مطالعه بکر را برای یک خودروی چهار چرخ محرک گسترش داد که در این تحقیق، چرخ به صورت جسم صلب در نظر گرفته شد. در ادامه کار بکر، جانوسی و ایلر (۱۹۶۸) فقط به بررسی هندسه چرخ و مانع پرداخته‌اند. به دلیل پیچیدگی فرآیند، هیچ کدام از پژوهش‌های به انجام رسیده نتوانسته‌اند مدل منحصر و معتبری را برای آن ارائه کنند. با وجود این که تایرهایی با فشار باد کم در ماشین‌های غیرجاده‌ای به صورت گسترده استفاده می‌شود و مخصوصاً در هنگام عبور از روی موانع دارای مزیت می‌باشند، اما تحقیقات صورت گرفته نتوانستند اثر فشارهای پایین باد تایر را با در نظر گرفتن چرخ انعطاف پذیر بررسی کنند. بنابراین گسترش مطالعات ذکر شده در

یکی از مهم‌ترین بحث‌های موجود در زمینه ماشین‌های غیرجاده‌ای، بررسی نیروهایی است، که به چرخ وارد می‌شود. برای داشتن یک طرح خوب و کارآمد، یک طراح باید قبل از هر امری نیروهای وارد بر چرخ را پیش‌بینی نماید. طراحان ماشین و چرخ تمایل دارند تا حد امکان مقاومت غلتشی چرخ را جهت کاهش تلفات انرژی و همچنین مصرف سوخت به حداقل مقدار ممکن برسانند. تحلیل بار دینامیکی یک خودروی در حال حرکت اهمیت خاصی در بحث و بررسی اثر متقابل چرخ و خاک دارد. برای دستیابی به کارایی بهینه یک ماشین غیرجاده‌ای، اطلاع از نحوه تقابل خاک و چرخ و همچنین اثر متقابل آنها بر روی هم امری ضروری است. حرکت چرخ از روی موانع سر راه خود نسبت به حرکت بر سطوح هموار کاملاً متمایز است و از این رو باید به صورت جداگانه مورد بررسی قرار گیرد. واکنش چرخ با مانع و همچنین محاسبه مقاومت وارد شده از طرف مانع، از نظر فشارهای مختلف باد تایر، بارهای عمودی و

۱، ۲ و ۳- به ترتیب کارشناسی ارشد و استادیاران گروه مهندسی مکانیک ماشین‌های کشاورزی دانشگاه ارومیه
* - نویسنده مسئول: (Email: en.mohammadzadeh@gmail.com)

علی رغم اینکه پشت سر نهادن ناهمواری‌ها در سطوح خاکی توسط ماشین‌های غیرجاده‌ای رایج و اجتناب ناپذیر است لیکن به دلیل پیچیدگی دینامیک حاکم بر این فرآیند، چندان به آن پرداخته نشده است و انجام پژوهش‌های بیشتری را مطالبه می‌کند. این مطالعه در قالب بررسی عبور یک چرخ پنوماتیک از روی موانع با هندسه مستطیلی شکل به انجام رسیده است و اهداف مورد نظر در آن را می‌توان در چند مورد خلاصه کرد.

- ۱- بررسی نیروی افقی وارده بر چرخ پنوماتیک در اثر عبور از روی ناهمواری‌ها در مقایسه با حرکت بر روی سطوح مسطح
- ۲- مطالعه تأثیر سرعت پیشروی و ارتفاع مانع بر نیروی افقی وارده بر چرخ به عنوان مهم‌ترین پارامترهای تعیین کننده نیروی وارده بر چرخ پنوماتیک در حین عبور از مانع
- ۳- تعیین روند تغییرات نیروی افقی وارده بر تیر نسبت به فشار باد تیر طی فرآیند عبور چرخ از مانع

مواد و روش‌ها

آزمایش‌ها با آزمونگر تک چرخ در محیط انباره خاک در محل آزمایشگاه‌های گروه مهندسی مکانیک ماشین‌های کشاورزی دانشگاه ارومیه انجام شد. برای انجام آزمایشات و به منظور تأمین شرایط کنترل شده‌تر، از یک انباره خاک با طول مفید ۲۳ متر و عرض دو متر و توان موتور محرک ۳۰ اسب بخار با امکان تأمین سرعت‌های مختلف جهت حرکت حامل انباره خاک استفاده شد. انباره خاک با یک آزمونگر تک چرخ چهار بازویی موازی که در هر کدام از آنها یک لودسل S شکل با ظرفیت ۲۰۰ کیلوگرم تعبیه شده، مجهز است. به دلیل اینکه کل نیروی افقی وارده بر چرخ عبارت است از مجموع نیروهای واکنشی ناشی چهار بازوی آزمونگر، بنابراین در هر لحظه باید داده مربوط به هر بازو ثبت گردد. از این رو برای داده برداری، از یک سامانه اینترفیس و دیتالاگر که داده‌های گردآوری شده را به یک رایانه قابل حمل منتقل می‌کند، استفاده شده است. در نهایت داده‌های مربوط به هر لودسل با فرکانس ۴۰-۳۰ هرتز ثبت گردید. به منظور حذف اثر بار عمودی وارده بر چرخ، سامانه اعمال بار عمودی غیر فعال شده و بار عمودی در حدود ۷۰ کیلوگرم ثابت نگه داشته شد (این مقدار، وزن چرخ و متعلقات مربوط به آن می‌باشد).

تایر مورد استفاده در این تحقیق، یک تایر متحرک کشاورزی مورد استفاده در یک خطی کار جاندر می‌باشد (9.5L-14, 6 ply, Good year). بر اساس بیان مک‌میلان (۲۰۰۲) برای یک چرخ متحرک، نیروی افقی کلی وارده بر چرخ مهم‌ترین پارامتر تعیین کننده در حرکت آن می‌باشد. به همین منظور در این مطالعه سعی شد تا این پارامتر برای این نوع چرخ مورد بررسی قرار گیرد. آزمایشات با سه سطح برای فشار باد تایر (۱۰۰، ۱۳۵ و ۳۴۰ کیلوپاسکال)، سه سطح ارتفاع مانع (۲/۴، ۴/۸ و ۷/۲ سانتی‌متر) و چهار سطح سرعت پیشروی

مورد تایرهایی با فشار باد پایین امری ضروری می‌نماید. مدل سازی و بررسی عملکرد مانع بر روی یک ماشینی که با کابل بوکسر شده است، توسط ژاو و همکاران (۱۹۹۲) بررسی شد. در این بررسی نیروی مورد نیاز جهت کشیدن یک ماشین از روی یک مانع، مورد مطالعه قرار گرفت. همچنین یک مدل رایانه که مقیاس شده از حالت واقعی بود، جهت بررسی بیشینه نیروی وارده بر محور یک ماشین تک محور در حین گذراندن مانع ارائه شد. در این تحقیق، چرخ در دو حالت صلب و همچنین پنوماتیکی در نظر گرفته شد. نتایج این تحقیق حاکی از این است که یک ماشین با چرخ صلب در یک شیب ۵۰ درصدی می‌تواند از روی یک مانع با ارتفاع کمتر از ۰/۱ قطر چرخ، عبور کند. مدل رایانه‌ای نیز نشان داد که در یک فشار پایین چرخ ($W \text{ pBD}^{-1} = 0.3$) شاخص انحنا تیر، که W بار عمودی روی تیر، p فشار باد تیر، B عرض چرخ و D قطر چرخ می‌باشند. با یک شیب ۵۰ درصدی و با نسبت H/D (ارتفاع مانع به قطر چرخ) بیشینه تا ۰/۲، تایرهای پنوماتیکی برای یک ماشین متحرک دارای مزایای زیادی نسبت به تایرهای صلب می‌باشند.

مک آلیستار (۱۹۸۳) کاهش نیروی افقی در تایرهای استفاده شده در دنباله بندهای مزرعه‌ای را مورد مطالعه قرار داد. در این مطالعه ضریب مقاومت غلتشی برای چرخ ادوات و تریلی اندازه گیری شد. نتایج این تحقیق نشان داد که کاهش فشار باد تیر، کاهش بار، افزایش سایز چرخ و استفاده از تایرهای رادیال سبب کاهش ضریب مقاومت غلتشی می‌شود.

هارث و همکاران (۲۰۰۴) مدلی برای بیان واکنش متقابل چرخ و مانع ارائه دادند. در این روش یک مدل شبیه سازی شده بر اساس بهینه سازی حجم هوای داخل تایر ارائه شد. مدلسازی با چندین تایر و مانع انجام شده و همبستگی بالایی با نتایج به دست آمده از آزمایشات را نشان داد. رفتار این مدل بیشتر از نظر دینامیکی مورد بررسی قرار گرفته است.

عبور چرخ از روی یک مانع علاوه بر پارامترهای مربوط به مانع و چرخ به فشار به وجود آمده در زیر چرخ هم وابسته است. اثر فشار باد تایر بر روی فشار تماسی خاک و مقاومت غلتشی برای تراکتورهای کشاورزی توسط وان و همکاران (۲۰۰۸) مورد بررسی قرار گرفت. فشار تماسی خاک در خط مرکزی چرخ جلو و گوشه‌های چرخ عقب برای یک تراکتور دو چرخ محرک و بر روی خاک سنی و با چهار ترکیب بار چرخ و فشار تماسی اندازه گیری شد. همچنین به طور همزمان مقاومت غلتشی چرخ نیز اندازه گیری شد. نتایج به دست آمده نشان می‌دهد که وقتی مقاومت غلتشی ۲۵ درصد کاهش می‌یابد، با کاهش فشار باد تیر، فشار تماسی بین تایر و خاک به ترتیب ۱۹ و ۱۷ درصد برای چرخ جلو و عقب کاهش می‌یابد. کارهای مشابهی توسط اسپونینگ و همکاران (۲۰۰۸)، محسنی منش و وارد (۲۰۱۰) و وان و همکاران (۲۰۰۸) انجام شده است.

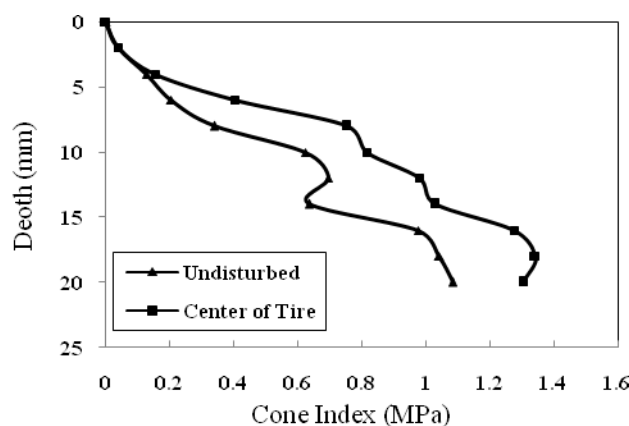
مطالعه شرایط خاک به عنوان یک تیمار در نظر گرفته نشده است و همه آزمایشات در شرایط یکسان خاک، (قبل و بعد از مانع) به انجام رسیده است. خصوصیات خاک انباره خاک در آزمایشگاه مکانیک خاک شهرستان ارومیه بر اساس استاندارد ASTM-C131 تحلیل شده است. نتایج این تحلیل نشان داد که زاویه اصطکاک داخلی خاک ۳۱ درجه، ضریب هم چسبی خاک ۳۰ کیلوگرم بر متر مربع و چگالی وزنی آن ۱۳/۱۳۴۵ کیلوگرم بر متر مکعب می‌باشد. در هر آزمایش، داده برداری حدوداً یک متر قبل از رسیدن چرخ به مانع شروع و کمی بعد از عبور از روی آن متوقف شد. شکل ۱ عبور چرخ از روی مانع را در حین یک آزمایش نشان می‌دهد. آزمایشات در قالب طرح کاملاً تصادفی و با چهار تکرار طرح ریزی شده است و برای تحلیل آنها از روش GLM (مدل خطی) نرم افزار SAS استفاده شد. میانگین و انحراف از معیار شاخص مخروط خاک به ترتیب ۰/۵۲ و ۰/۴ مگا پاسکال بود (شکل ۲).

(۰/۹، ۱/۸، ۲/۷ و ۳/۶ کیلومتر بر ساعت) طرح ریزی شد. سطوح فشار فوق به منظور بررسی رفتار تایر در سه حالت در نظر گرفته شده است. بر این اساس، فشارهای پایین به منظور مشاهده اثر بدنه تایر بر روی مقاومت غلتشی، فشارهای میانی جهت پی بردن به واکنش تایر در سطوح فشار معمول و بالاخره فشارهای بالا که چرخ حالتی شبیه به صلب بودن پیدا می‌کند، مورد بررسی قرار گرفتند. موانع به کار رفته با ضخامت‌های یکسان ساخته شده و با قرار دادن آنها بر روی یکدیگر سطوح دلخواه مانع ایجاد شده است. موانع با استفاده از دو میخ ۴۰ سانتی‌متری در داخل کانال انباره خاک تثبیت شده است. قبل از هر آزمایش، وضعیت آزمونگر تک چرخ و سرعت مورد نظر تنظیم شده است. این تنظیمات با اینورتور و تنظیم دور چرخ اعمال شده است. خاک مورد استفاده در این تحقیق قبل از هر آزمایش با استفاده از دنباله بندهای خاص انباره خاک فرآوری و آماده سازی شده است تا شرایط یکسانی برای کلیه آزمایشات ایجاد شود. در این



شکل ۱- عبور چرخ از روی مانع مستطیلی شکل

Fig.1. The wheel passing over obstacle



شکل ۲- مقدار شاخص مخروطی نسبت به عمق خاک قبل و بعد از عبور چرخ

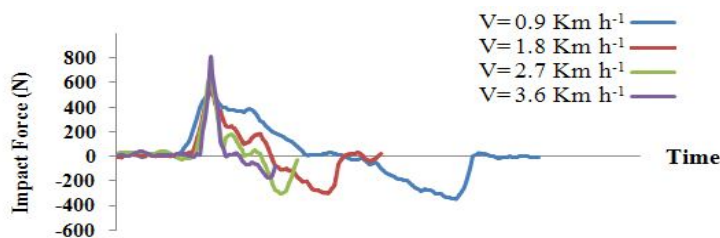
Fig.2. Value of cone index in undisturbed soil and center of tire on soil

نتایج و بحث

زیادی بوده است. این نوسانات در سطوح بالای سرعت، با شدت بیشتری مشاهده شده است.

فشار باد تایلر یکی از پارامترهای مهم در توصیف انعطاف پذیری بدنه تایلر می‌باشد. تغییر فشار باد تایلر باعث تغییر میرایی آن شده و در ارتباط با میزان جذب نیروی وارده از طرف مانع می‌باشد. بر اساس نتایج به دست آمده در این تحقیق، کاهش فشار باد تایلر از سطوح پر باد به سطوح متوسط، سبب افزایش میرایی نیروهای وارد بر چرخ می‌شود. شکل ۴ تغییرات نیروی افقی وارد بر چرخ در مقابل فشار باد تایلر در سطوح مختلف سرعت پیشروی را نشان می‌دهد. تغییرات ضربه افقی نسبت به فشار باد تایلر با افزایش فشار و پس از شکل گیری بدنه تایلر در تمامی سطوح سرعت پیشروی و همچنین ارتفاع‌های مانع افزایش نشان داد. البته این روند در فشارهای باد خیلی پایین صادق نبوده است و در این شرایط به نظر می‌رسد که انعطاف پذیری بدنه تایلر نقش مهمتری را در تعیین میزان نیروی به وجود آمده ایفا می‌کند. نتایج مشابهی در تحقیقات قبلی مشاهده شده است (Janosi and Eilers, 1968; McAllister, 1983) که این محققین هم نیروی افقی وارده بر تایلرهای پنوماتیک را در رابطه خطی با فشار باد تایلر گزارش کرده‌اند. جدول ۱ نتایج تجزیه واریانس مربوط به تأثیر پارامترهای مورد بررسی در این مطالعه بر نیروی وارده بر تایلر را نشان داده است. تحلیل‌های آماری تفاوت معنی‌داری برای سطوح بالای فشار باد تایلر نشان می‌دهد. در حالی که این تحلیل‌ها برای سطوح پایین فشار اثر معنی‌داری را نشان نداده است. به نظر می‌رسد رفتار متفاوت تایلر در سطوح مختلف فشار باد تایلر، بیشتر به بدنه تایلر مربوط می‌شود. در این مورد و در فشارهای پایین باد تایلر، خاصیت الاستیسیته بدنه تایلر، میزان نیروی وارد بر چرخ را تعیین می‌کند. با افزایش سطح فشار تقریباً بدنه تایلر رفته رفته شکل می‌گیرد و بعد از این حالت، فشار باد تایلر تعیین کننده مقدار نیروی وارده بر چرخ می‌باشد.

داده‌های به دست آمده برای نیروی افقی وارده بر چرخ در نگاه نخست از منطبق قابل قبولی برخوردار بوده است. این منطبق برگرفته از طبیعت اثر پارامترهای نظیر ارتفاع مانع و سرعت پیشروی چرخ است، که با افزایش خود منجر به افزایش بدیهی نیروی وارده بر چرخ می‌گردند. لیکن چگونگی افزایش مزبور در نتایج این تحقیق مورد جستجو بوده است. در همه‌ی آزمایشات بیشترین نیروی افقی وارده در لحظه برخورد چرخ با مانع مشاهده شده است. شکل ۳ به عنوان نمونه تغییرات نیروی افقی وارده بر چرخ در ارتفاع مانع ۴/۸ سانتی‌متری مانع و فشار باد ۱۳۵ کیلوپاسکال برای چهار سطح سرعت پیشروی نسبت به یکدیگر را نشان داده است. بعد از عبور از روی مانع، نیروی افقی به تدریج کاهش می‌یابد و مشابه حالت حرکت بر روی سطح صاف عمل می‌کند. جهت نیروی وارد بر چرخ بعد از پایین آمدن از روی مانع تغییر می‌یابد. با افزایش سرعت آزمونگر تک چرخ، مقدار نیرویی که در برابر چرخ ایجاد می‌شود در حین پایین آمدن از روی مانع کاهش اساسی را نشان داده است. این مطلب در نتایج مطالعه گیپسر (۲۰۰۵) نیز مشاهده شده و در قالب اثر انرژی پتانسیل آزاد شده طی پایین آمدن چرخ از روی مانع توجیه شده است. کاهش نیروی افقی وارده بر چرخ در طول آزمایشات و پس از سقوط چرخ از روی مانع تا سرحد تغییر جهت نیز کاهش نشان داده است، که در این رابطه می‌توان آن را متأثر از نیروهای اینرسی ناشی از جرم مجموعه چرخ و شتاب متغیر آن در نظر گرفت. اگرچه تغییرات نیروی افقی وارد بر چرخ نسبت به زمان و در سطوح مختلف سرعت پیشروی و فشار باد تایلر ظاهراً متفاوت دیده شده است، اما با انطباق نقطه اوج نمودارها، این تغییرات از نظر چند و چون فراز و فرود خود تغییرات مشابهی را نشان داده‌اند. تفاوت مابین نمودارهای مربوط به سطوح مختلف سرعت پیشروی نشان داده است که با افزایش سرعت پیشروی نیروی افقی هم در نقطه اوج و هم در سایر نقاط متناظر افزایش یافته است. در همه سطوح سرعت پیشروی، تغییرات نیروی وارده بر تایلر دارای نوسانات



شکل ۳- تغییرات منطبق شده نقاط اوج نیروی افقی نسبت به زمان در ارتفاع مانع ۴/۸ cm و فشار باد تایلر ۱۳۵ kPa در چهار سطح سرعت پیشروی

Fig.3. Adaptation of the peak of impact force versus time (Obstacle height 4.8 cm, Tire inflation pressure 135 kPa and in four levels of forward speed)

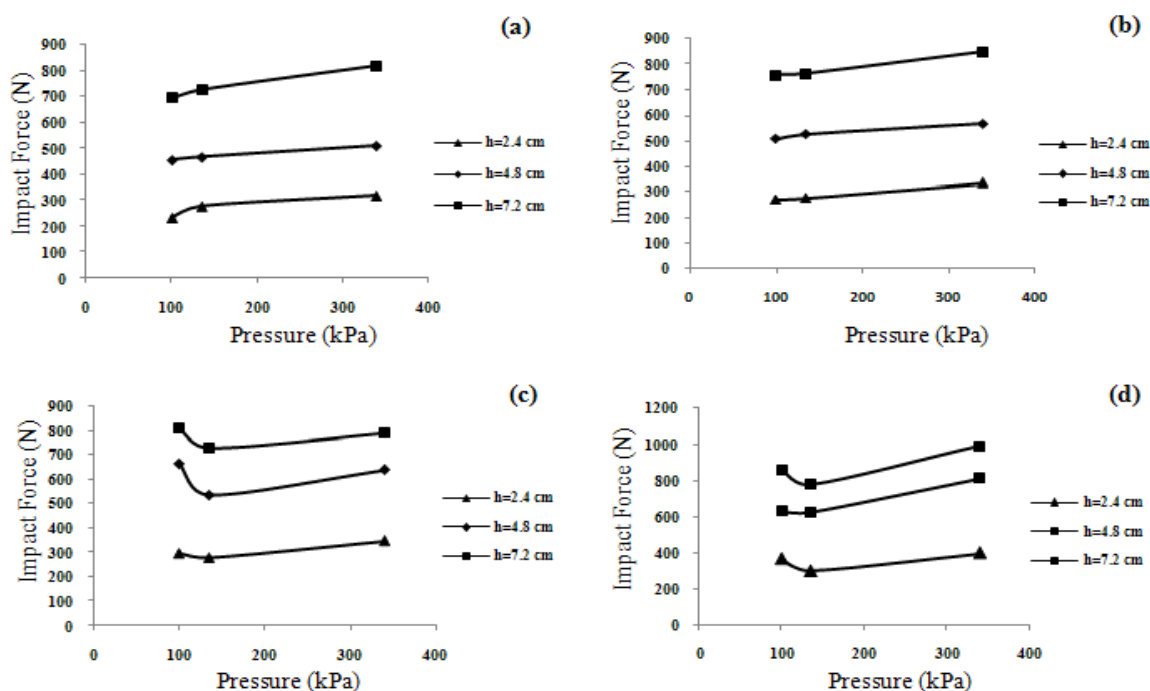
مشاهده شده است.

شکل ۶ نمودارهای مربوط به ارتفاع مانع بر روی نیروی افقی وارده بر چرخ در سطوح مختلف فشار باد تایر و سرعت پیشروی را نشان داده است. بر طبق این نمودارها در تمامی تیمارها افزایش ارتفاع مانع، سبب افزایش نیروی وارده شده است. بر اساس نتایج ساریلاهی (۲۰۰۲)، نیروی افقی ناشی از عبور چرخ از روی مانع در ارتباط مستقیم با ارتفاع مانع می‌باشد. تحلیل‌های آماری نشان دهنده اثر معنی‌دار ارتفاع مانع می‌باشد. از طرف دیگر بر طبق تحلیل‌های آماری اثر متقابل ارتفاع مانع- فشار باد تایر بر روی نیروی وارده بر تایر معنی‌دار نبوده است.

همچنین بر اساس این تحلیل‌ها، اثر متقابل ترکیب پارامترهای سرعت پیشروی- ارتفاع مانع و سرعت پیشروی- فشار باد تایر اثر معنی‌داری بر نیروی افقی وارده بر چرخ نداشته است. آزمون‌های انجام شده نشان می‌دهد که افزایش فشار باد تایر سبب افزایش نیروی افقی وارده بر تایر در حین تقابل با مانع شده است. البته این رفتار فقط در سطوح بالای فشار باد تایر دیده شده است.

با در نظر گرفتن نمودارهای مربوط به شکل ۴، در سطوح بالای سرعت، در ابتدا با افزایش اولیه در فشار باد تایر نیروی افقی کاهش می‌یابد، اما در ادامه با افزایش فشار باد تایر، نیروی افقی وارده نیز افزایش یافته است. به عبارت دیگر با افزایش سرعت پیشروی چرخ، شیب نمودار نیرو- فشار باد تایر افزوده شده است.

شکل ۵ نمودارهای مربوط به تغییرات بیشینه نیروی وارده بر چرخ نسبت به سرعت پیشروی در سطوح مختلف ارتفاع مانع را نشان می‌دهد. این نمودارها بر این دلالت دارند که با افزایش سرعت پیشروی چرخ، نیروی افقی وارده افزایش می‌یابد. البته با افزایش ارتفاع مانع، شیب این تغییرات افزایش یافته است. که در این رابطه، نتایج گزارش شده توسط آکانده و همکاران (۲۰۱۱) نیز این امر را تأیید می‌کند. تحلیل‌های آماری اثر معنی‌دار ارتفاع مانع بر روی نیروی افقی وارده بر چرخ را نشان داده است. در سطوح پایین ارتفاع مانع، تغییرات بیشینه نیروی وارده در مقابل سرعت پیشروی تقریباً به صورت خطی بوده است ($R^2=0/9$). این در حالی است که با افزایش همزمان ارتفاع مانع و فشار باد تایر، این تغییرات به صورت غیر خطی



شکل ۴- نسبت بیشینه میانگین نیروی افقی به فشار باد تایر در چهار سطح سرعت پیشروی، (a) $0/9 \text{ km h}^{-1}$ ، (b) $1/8 \text{ km h}^{-1}$ ،

(c) $2/7 \text{ km h}^{-1}$ و (d) $3/6 \text{ km h}^{-1}$

Fig.4. Impact force versus inflation pressure in four levels of forward speeds, (a) 0.9 km h^{-1} , (b) 1.8 km h^{-1} , (c) 2.7 km h^{-1} and (d) 3.6 km h^{-1}

جدول ۱- اثر تیمارهای ارتفاع مانع، فشار باد تایر و سرعت پیشروی بر روی نیروی افقی

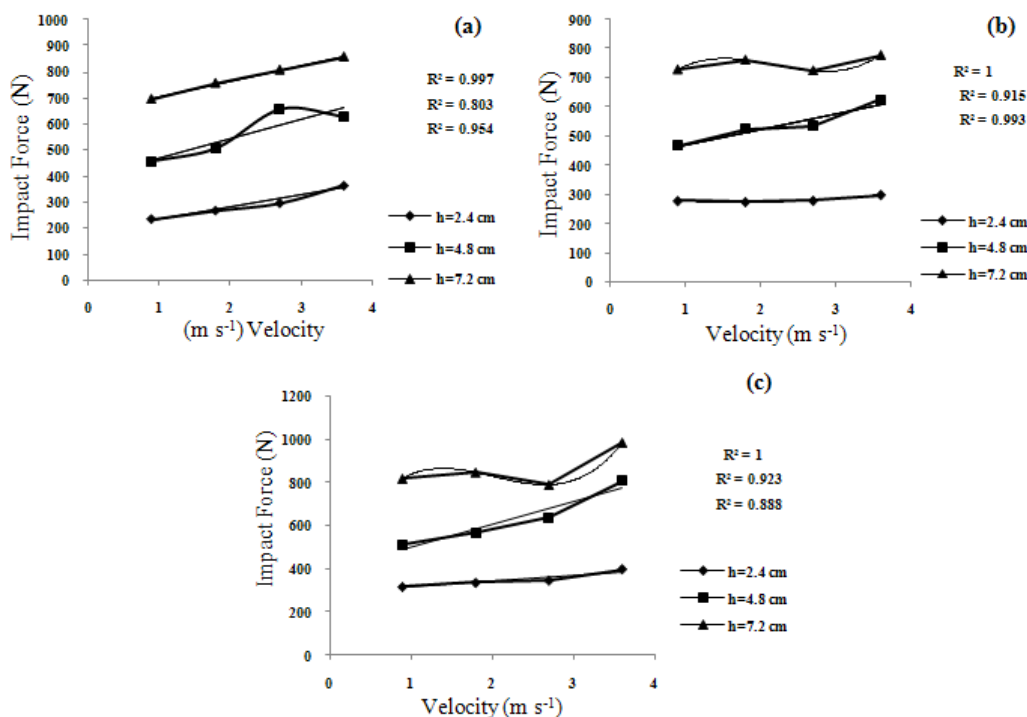
Table 1- Effects of obstacle height, tire inflation pressure and forward speed treatments on rolling resistance

P Value	نیروی افقی (N) Impact Force	سطح تیمار Treatment's Level	تیمار Treatment
0.01	306.79 ^c	2.4	ارتفاع مانع (سانتی‌متر)
	598.85 ^b	4.8	Obstacle's height (cm)
	795.23 ^a	7.2	
0.01	543.6 ^b	100	فشار باد تایر (کیلو پاسکال)
	544.13 ^b	135	Pressure (kPa)
	613.17 ^a	340	
0.01	500.09 ^b	0.9	سرعت پیشروی (متر بر ثانیه)
	537.47 ^b	1.8	Velocity (m s ⁻¹)
	563.06 ^b	2.7	
	667.20 ^a	3.6	
0.97 ^{ns}			ارتفاع*فشار Height * Pressure
0.11 ^{ns}			ارتفاع*سرعت Height * Velocity
0.99 ^{ns}			فشار*سرعت Pressure * Velocity

حروف a, b و c در هر ستون نشان دهنده اختلاف معنی دار بین سطوح تیمارهای آزمایشی می باشد.

ns نشان دهنده عدم اختلاف معنی دار است.

Letters a, b and c in each column indicate significant differences between levels of treatments. ns, Not indicate any significant difference.

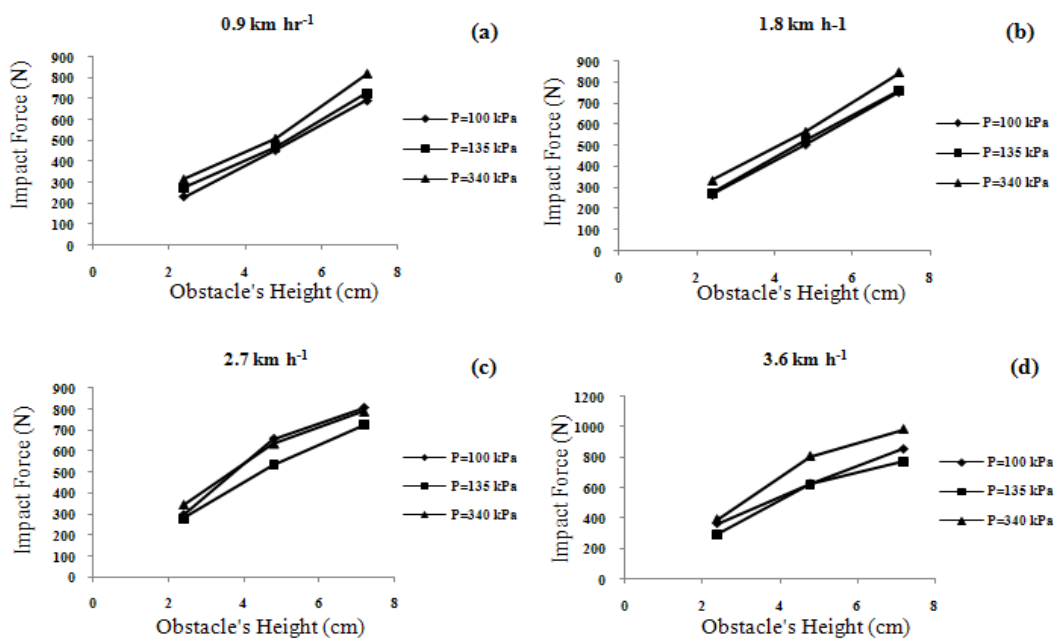


شکل ۵- نسبت بیشینه میانگین نیروی افقی به سرعت پیشروی چرخ در سه سطح فشار باد تایر، (a) ۱۰۰ kPa، (b) ۱۳۵ kPa و (c) ۳۴۰ kPa

Fig.5. Maximum Impact force versus forward speed in three levels of tire inflation pressure, (a) 100 kPa, (b) 135 kPa and (c) 340 kPa

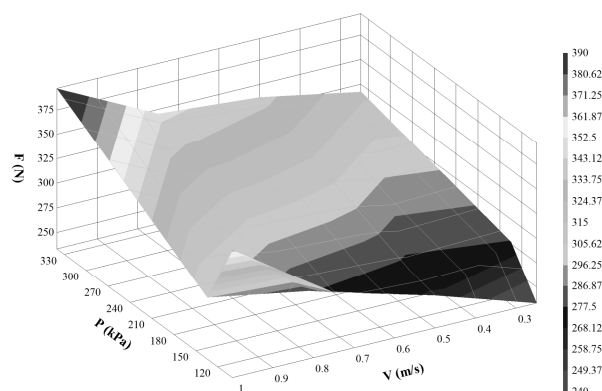
داده‌های به دست آمده دیده می‌شود که در سطوح متفاوت سرعت پیشروی با افزایش ارتفاع مانع نیروی افقی نیز افزایش یافته است (شکل ۸). البته این افزایش در سطوح بالای سرعت دارای شیب بیشتری بوده است. اگرچه افزایش ارتفاع مانع سبب افزایش نیروی افقی وارد بر چرخ شده است، اما این افزایش در سطوح پایین فشار باد تایر با شیب کمتری رشد کرده است. این موضوع را می‌توان در ارتباط با افزایش میرایی بدنه تایر در فشارهای باد پایین توجیه نمود.

به عبارت دیگر در این حالت، الاستیسیته بدنه تایر، نقش مهمی در واکنش بین چرخ و مانع دارد. علاوه بر این، در سطوح بالای سرعت پیشروی اثر الاستیسیته بدنه تایر مشاهده شده است. بیشترین قسمت بی‌نظمی در تغییرات نیروی وارد بر چرخ مطابق شکل ۷ در ارتباط با بیشینه سرعت پیشروی و کمینه سطوح فشار باد تایر می‌باشد. در تمامی سطوح ارتفاع مانع، با افزایش سرعت پیشروی، نیروی وارد بر تایر افزایش یافته است. این رفتار با شیب بالایی در فشارهای بالاتر مشاهده شده است (شکل ۷). علاوه بر این، بر اساس



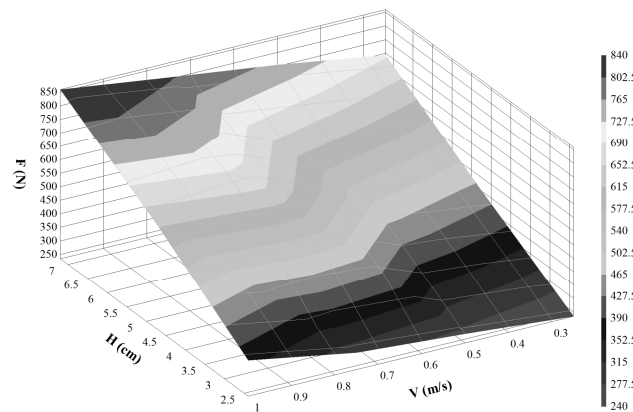
شکل ۶- نسبت بیشینه میانگین نیروی افقی به ارتفاع مانع در چهار سطح سرعت پیشروی، (a) 0.9 km h^{-1} ، (b) 1.8 km h^{-1} ، (c) 2.7 km h^{-1} و (d) 3.6 km h^{-1}

Fig.6. Impact force versus obstacle height in four levels of forward speeds, (a) 0.9 km h^{-1} , (b) 1.8 km h^{-1} , (c) 2.7 km h^{-1} and (d) 3.6 km h^{-1}



شکل ۷- رویه سه بعدی نسبت سرعت پیشروی به فشار باد تایر و نیروی افقی

Fig.7. Forward speed vs. tire inflation pressure vs. Impact force



شکل ۸- رویه سه بعدی نسبت سرعت پیشروی به ارتفاع مانع و نیروی افقی
 Fig.8. Forward speed vs. obstacle height vs. Impact force

است. البته تأثیر فشار باد تایلر در فشارهای خیلی پایین، کمتر دیده شده و در این شرایط نیروهای وارد بر چرخ بیشتر متأثر از وضعیت ارتجاعی بدنه تایلر به نظر می‌رسند.
 بر اساس نتایج تحقیق حاضر، نیروی افقی لازم برای گذر از مانع به صورت خطی با ارتفاع مانع در ارتباط است. با توجه به اینکه توان مصرفی برای حرکت یک چرخ نسبت مستقیم با نیروهای مانع حرکت دارد، در نتیجه توان مصرفی برای عبور از مانع با ارتفاع آن رابطه خطی دارد. از طرفی نتایج، حاکی از رابطه تقریباً خطی بین سرعت عبور از روی مانع و نیروی ناشی از آن بوده است و به دلیل اینکه تغییرات این نیرو، میزان توان مصرفی جهت گذراندن مانع را تعیین می‌کند، لذا افزایش سرعت پیشروی علاوه بر داشتن اثر مستقیم بر روی توان مصرفی، به دلیل افزایش نیروی وارد بر چرخ از زاویه دیگری نیز توان مصرفی کل جهت عبور چرخ از روی مانع را افزایش می‌دهد. بدیهی است که در نهایت افزایش توان مصرفی منجر به افزایش مصرف سوخت خواهد شد.

نتیجه گیری و پیشنهادات

نیروی وارد بر چرخ حین عبور از روی مانع در مقایسه با حرکت بر روی سطح صاف، به طور کاملاً محسوسی تغییر کرده است. بنابراین برای مطالعه رفتار چرخ، نمی‌توان از ملاحظات رایج که برای شرایط معمولی حرکت چرخ بر روی زمین مسطح تدوین شده است؛ استفاده کرد.
 نیروی وارد بر چرخ با افزایش سرعت پیشروی و ارتفاع مانع افزایش می‌یابد که در محدوده پارامترهای در نظر گرفته شده در این مطالعه در هر دو مورد تقریباً خطی مشاهده شده است. علی‌رغم اینکه سرعت پیشروی رابطه‌ای تقریباً خطی با نیروی به وجود آمده در حین عبور از روی مانع داشته است، اما با افزایش سطوح سرعت، انحراف اندکی نسبت به حالت خطی داشته است. در همین رابطه، انجام تحقیقات تکمیلی با در نظر گرفتن سطوح بالاتر سرعت حرکت چرخ قابل پیشنهاد است.
 افزایش باد تایلر، افزایش اندکی در نیروی وارد بر چرخ داشته

منابع

1. Akande F. B., D. Ahmad, and A. B. Fashina. 2011. Modelling the motion resistance of a pneumatic bicycle wheel in tillage. Agricultural productivity and environmental sustainability conference.
2. Bekker, M. G. 1956. Theory of land locomotion university of michigan press, Ann Arbor: p. 522.
3. C131, A., Standard test method for resistance to degradation of small size coarse aggregate by abrasion and impact in the Los Angeles Machine, USA.
4. Gao, Ch., B. Hartsough, John A. Miles, Andrew A. Frank. 1992. Modeling the obstacle performance of cable-towed vehicles. Forest Engineering 3(2): 21-28.
5. Gipser, M. 2005. ADAMS/FTire-A Tire model for ride & durability simulations.
6. Harth, V., M. Fayet, and L. Maiffredy. 2004. A modelling approach to tire-obstacle interaction. Multibody System Dynamics 11: 23-39.
7. Janosi, Z. J., and J. A. Eilers. 1968. Analysis of the basic curve of obstacle negotiation. Terramechanics 5(3): 29-42.
8. Jindra, F. 1966. Obstacle performance of articulated wheeled vehicles. Terramechanics 3(2): 39-56.

9. Lockett, C. W. 1985. A review of force prediction methods for off-road wheels. *Agricultural Engineering Research* 31: 1-29.
10. Macmillan, R. H. 2002. *The Mechanics of tractor-implement performance (Theory and Worked Examples)*. Printed by University of Melbourne.
11. Mcallister, M. 1983. Reduction in the rolling resistance of tyres for trailed agricultural machinery. *Agricultural Engineering Research* 28: 127-137.
12. Mohsenimanesh, A., and Sh. M. Ward. 2010. Estimation of a three-dimensional tyre footprint using dynamic soil-tyre contact pressures. *Terramechanics* 47: 415-421.
13. Saarilaht, M. 2002. Modelling of the wheel and tyre. Project deliverable, Appendix report no 7.
14. SAS. *SAS User's Guide: Statistics, Version 5 Edition*. 1985. SAS Inst., Inc., Cary, NC.
15. Schjønninga, P., M. Lamande, Frede A. Tøgersenb, J. Arvidssonc, and Th. Keller. 2008. Modelling effects of tyre inflation pressure on the stress distribution near the soil-tyre interface. *Biosystems Engineering* 99: 119-133.
16. Van, N. N., T. Matsuo, S. Inaba, and T. Koumoto. 2008. Experimental analysis of vertical soil reaction and soil stress distribution under off-road tires. *Terramechanics* 45: 25-44.
17. Van, N. N., T. Matsuo, T. Koumoto, and SH. Inaba. 2008. Effects of tire inflation pressure on soil contact pressure and rolling resistance of farm tractors. *Bull. Fac. Agr., Saga Univ*, (93): 101-108.