

## اثرات اشکال گوناگون موانع صلب بر نیروی دینامیکی وارد بر یک چرخ محرک برون جاده ای تراکتور در دو حالت محرک و غیر محرک

عارف مردانی کرانی<sup>۱\*</sup>، صاحبه جعفری<sup>۲</sup>، اسعد مدرس مطلق<sup>۳</sup>

۱. دانشیار، گروه مکانیک بیوسیستم دانشگاه ارومیه، ارومیه

۲. دانشجوی دکتری، گروه مکانیک بیوسیستم دانشگاه ارومیه، ارومیه

۳. دانشیار، گروه مکانیک بیوسیستم دانشگاه ارومیه، ارومیه

(تاریخ دریافت: ۱۳۹۵/۴/۱۶ - تاریخ تصویب: ۱۳۹۵/۱۲/۱۵)

### چکیده

در این مطالعه، برهم کنش یک چرخ محرک با ناهمواری‌های صلب با در نظر گرفتن پارامترهای سرعت پیشروی، بار روی چرخ، لغزش چرخ، و شکل هندسی مانع و ارتفاع آن بررسی گردید. نیروی وارده بر چرخ در قالب دو مولفه افقی و عمودی با استفاده از یک آزمونگر تک چرخ و در محیط انباره خاک در گروه مکانیک بیوسیستم دانشگاه ارومیه اندازه‌گیری و ثبت شده است. نتایج حاکی از آن بود که موانع با هندسه مختلف و با عرض و ارتفاع یکسان، از نظر ایجاد نیروی وارده بر چرخ با یکدیگر متفاوت بوده و به ترتیب موانع مثلثی با میانگین نیروی ۵/۳ کیلونیوتن، قوسی با میانگین نیروی ۵/۵ کیلونیوتن و دوزنقه‌ای با میانگین نیروی ۵/۶ کیلونیوتن کمترین تا بیشترین نیرو را دریافت نموده‌اند. آزمونها در قالب یک آزمایش فاکتوریل نشان داد اثر سرعت پیشروی تنها بر مولفه عمودی نیروی وارده بر چرخ معنی دار بوده است اما افزایش ارتفاع مانع و همچنین افزایش بار عمودی به صورت معنی‌داری منجر به افزایش مولفه‌های افقی و عمودی نیرو گردیده است. مقایسه دو حالت با وجود لغزش و بدون آن نشان داد که چرخ محرک دارای لغزش مثبت، نیروی افقی و عمودی بیشتری را نسبت به چرخ فاقد لغزش با شرایط مشابه دریافت می‌کند.

واژه‌های کلیدی: آزمونگر تک‌چرخ، برهم‌کنش چرخ و مانع، چرخ، مانع.

### مقدمه

ماشین‌های کشاورزی که عمدتاً بر روی زمین‌های ناهموار کار می‌کنند و سیستم تعلیق پیشرفته‌ای ندارند، پیش‌بینی بارهای دینامیکی واقعی که بر روی یک چرخ در هنگام مواجهه با موانع پیش رو ایجاد می‌گردد، می‌تواند به عنوان یک معیار مهم در طراحی عملی ماشین جهت بررسی دینامیک تراکتور و پایداری آن مورد استفاده قرار بگیرد. طراحی مکانیکی این نوع از ماشین‌ها مستلزم در نظر گرفتن شرایط واقعی آنها در مواجهه با پدیده متداول ناهمواری‌های سطوح است. مطالعه در رابطه با این موضوع، در بر گیرنده ملاحظات مربوط به سینماتیک و سینتیک یک ماشین آفرود و در نهایت طراحی و اعتماد بخشی به موارد مربوط به طراحی مهندسی ماشین همچون استحکام، تعادل و عملکرد کششی ماشین است. هم‌چنین، اطلاع از میزان افت کشش و انرژی ناشی از وجود ناهمواری‌ها در مسیر حرکت ماشین‌های آفرود (و از جمله ماشین‌های کشاورزی)، می‌تواند به عنوان یک نکته کلیدی برای طراحی و مدیریت دقیق ماشین و آماده‌سازی سطوح قبل از عبور ماشین راهگشا باشد. در طراحی و توسعه ماشین‌ها و تراکتورها، دیدگاه مبتنی بر دینامیک نقش مهمی ایفا می‌کند و برای فهم دینامیک ماشین، اطلاع از نیروها

از آنجایی که توسعه ماشین‌های کشاورزی از رویکرد عملیاتی صرف به یک وسیله انسان‌گرا<sup>۱</sup> تر تغییر نموده است، الزامات ایمنی و راحتی به طور فزاینده‌ای در حال پیشرفت هستند. با توجه به این حقیقت که تراکتورها غالباً (بیش از ۵۰٪ اوقات) به منظور حمل و نقل مورد استفاده قرار می‌گیرند و شرایط جاده-ها در مناطق کشاورزی بهبود یافته است، ماکزیمم سرعت تراکتورها نیز در حد چشمگیری افزایش یافته است (Kising and Gohlich, 1989). این افزایش سرعت منجر به مشکلات جدیدی در دینامیک سواری تراکتورها شده است که به دلیل فقدان سیستم تعلیق منجر به مشکلات ثانویه می‌گردد. برای حل این مشکلات، پیشرفت‌های جدیدی در زمینه تعلیق اکسل، کاهش حرکت کله‌زنی<sup>۲</sup> و خصوصیات تایر در حال دنبال است. بنابراین با توجه به شرایط کاری انواع ماشین‌های آفرود مانند

\* نویسنده مسئول : a.mardani@urmia.ac.ir

1. human-orientated  
2. pitch movement

امروزه تحقیقات زیادی در حوزه دینامیک چرخ و تقابل آن با سطح جاده در دسترس است. در مطالعه دینامیک صفحه-ای تایرها، سه جنبه از دینامیک صفحه‌ای تایر را می‌توان بررسی نمود که عبارتند از تماس غلتشی بین تایر و سطح جاده، انتقال نیرو و حرکت از ناحیه تماس تا محور چرخ در نتیجه تحریک ناهمواری‌های جاده و همچنین ارتعاش نوار آج تایر ( Gong, 1993). در پژوهشی دیگر پاسخ دینامیکی تایرها به تغییرات گشتاور ترمزی و ناهمواری‌های جاده بررسی گردید ( Zegelaar, 1998). در پژوهشی دیگر، آنالیز تقابل تایر برون جاده ای با خاک از طریق روش‌های تحلیلی و اجزای محدود انجام شده است (Hao, 2013). طی این تحقیق، توسط روش تحلیلی، اثر میرایی خاک که تا قبل از این مورد توجه قرار نگرفته بود، در مدل‌سازی معرفی شد و امان‌های غیر خطی فدر-میرا کننده برای توصیف تنش نرمال و تنش برشی به کار برده شدند تا تنش مماسی بر روی سطح تقابل خاک- تایر را شبیه‌سازی نمایند.

در تحقیقی دیگر، یک مدل اجزای محدود تایر به طور خاص برای حرکت بر روی موانع یا ناهمواری‌های جاده در محیط Abaqus توسعه یافت (Wei and Olatunbosun, 2014). سپس، آزمون‌های تجربی در عبور از موانع با اندازه‌های مختلف، به صورت عملی انجام گردید و مدل اجزای محدود تایر، اعتبارسنجی شد و نتایج رضایت بخشی در رابطه با پاسخ‌های گذرا در مقایسه با آزمون‌های تجربی برای عبور تایر از موانع با ارتفاع‌های مختلف به دست آمد.

تاکنون تحقیقات چندی بر روی اثر موانع بر عملکرد ماشین‌های برون جاده‌ای انجام شده است. به عنوان مثال نظریه توانایی عبور یک خودروی دو اکسل از روی مانع با در نظر گرفتن تایر و سیستم تعلیق به صورت صلب بررسی گردیده است (Bekker, 1956). متغیرهای این تحقیق، ارتفاع مانع، قطر چرخ و ضریب دگرچسبی خاک بوده است. در این مطالعه با فرض عدم ایجاد محدودیت برای گشتاور چرخ، نتیجه‌گیری شد که خودروی مورد نظر می‌تواند از روی بزرگترین مانع نیز عبور کند. در ادامه این تحقیق، محققان دیگر فقط به بررسی هندسه چرخ و مانع پرداخته‌اند (Janosi and Eilers, 1968).

در تحقیق دیگری، عملکرد مانع بر ماشین بررسی و مدل‌سازی شده است (Gao et al., 1992). در این تحقیق، نیروی مورد نیاز جهت کشیدن یک ماشین از روی مانع مورد مطالعه قرار گرفته است و بر اساس شرایط واقعی، مدل‌سازی کامپیوتری جهت بررسی بیشینه نیروی وارده بر اکسل یک ماشین تک محوره حین عبور از مانع ارائه شده است. نتایج این

و گشتاورهای اعمال شده بر خودرو ضروری است. از طرفی، تمامی نیروهای کنترلی اصلی و مزاحم که بر یک خودرو اعمال می‌شوند، به جز نیروهای آیرودینامیکی، در محل تماس تایر-جاده (یا خاک) ایجاد می‌گردند. بنابراین، در مورد خودروهای برون جاده‌ای که نیروهای آیرودینامیکی به دلیل سرعت پیشروی نه چندان زیاد، قابل چشمپوشی است، تمامی نیروهای وارد شده در محل تماس چرخ با زمین ایجاد می‌گردد (Stallmann et al., 2014). بر این اساس در رابطه با حرکت یک وسیله نقلیه‌ی چهارچرخ بر روی سطح صلب می‌توان گفت کلیه‌ی نیروهایی که تعیین کننده‌ی چگونگی حرکت، ترمزگیری و شتاب‌دهی یک خودرو هستند، در چهار نقطه تماسی ایجاد می‌شوند (Gillespie, 2000). به همین دلیل، حجم قابل ملاحظه‌ای از پژوهش‌های حوزه‌ی دینامیک ماشین، در ارتباط با دینامیک چرخ است.

در مورد ماشین‌های برون جاده‌ای مانند تراکتورها، یکی از مهم‌ترین بحث‌های موجود، بررسی نیروهایی است که به چرخ، به عنوان مهم‌ترین عضو سیستم تعلیق، وارد می‌شود. واکنش چرخ در برابر موانع و نیروی وارد شده از طرف مانع، از چندین جنبه از قبیل فشار باد تایر، بار عمودی وارد بر چرخ، سرعت پیشروی چرخ و جنس و هندسه چرخ، شکل و ابعاد و انعطاف‌پذیری مانع قابل بررسی است. برخورد چرخ با مانع می‌تواند در مطالعات مربوط به ارگونومی، پایداری، مانوردهی و تعلیق مورد توجه قرار بگیرد (Taghavifar et al., 2015a). عملکرد یک خودروی برون جاده‌ای به توانایی آن برای غلبه بر مقاومت حرکت، ایجاد نیروی کششی، پشت سر گذاشتن شیب‌ها، یا شتاب‌گیری در حرکت مستقیم اشاره دارد. مقاومت غلتشی محرکه خودرو یک بخش بسیار مهم در تمامی این معیارهاست. در عملیات برون جاده‌ای، مقاومت غلتشی ممکن است شامل مقاومت مانع، مقاومت داخلی قسمت محرک و یا مقاومت ایجاد شده ناشی از عکس‌العمل قسمت محرک خودرو (چرخ یا شنی) با زمین باشد. مقاومت مانع در هنگامی که قسمت محرک خودرو با کنده‌های درخت، صخره‌ها، و موارد شبیه به آن مواجه می‌شود، ایجاد می‌گردد. بزرگی آن به ارتفاع، اندازه، شکل و سایر خصوصیات مانع بستگی دارد و به صورت تجربی تعیین می‌گردد (Wong, 2010).

توانایی پشت سر گذاشتن موانع دست‌ساز و طبیعی، یکی از انتظارات اولیه استفاده‌کنندگان ماشین‌های برون جاده‌ای است بنابراین طراحان باید در مراحل اولیه طراحی، شرایط مناسبی را برای کارایی ماشین از لحاظ حرکت بر روی ناهمواری‌ها فراهم آورند (Janosi and Eilers, 1968).

خودروهای سواری و درون‌جاده‌ای متمرکز شده‌اند. هم‌چنین به دلیل پیچیدگی دینامیک حاکم بر چرخ‌های آجدار برون‌جاده‌ای، هیچ‌کدام از پژوهش‌های به انجام رسیده نتوانسته‌اند تعبیر منحصر و معتبری برای تقابل چرخ برون‌جاده‌ای با مانع ارائه کنند و از این لحاظ، انجام پژوهش‌های بیشتری را مطالبه می‌کند. این مطالعه در قالب بررسی عبور یک چرخ نیوماتیک برون‌جاده‌ای از روی موانع با هندسه‌های مختلف تعریف شده است و اهداف مورد نظر در آن را می‌توان در قالب مطالعه تاثیر بار عمودی، سرعت پیشروی، شکل مانع و ابعاد آن بعنوان مهم‌ترین پارامترهای تعیین کننده نیروی وارده بر چرخ نیوماتیک در حین عبور از مانع و هم‌چنین مقایسه دو وضعیت محرک و غیر محرک چرخ از نظر تقابل با مانع خلاصه نمود.

### مواد و روش‌ها

در این تحقیق، از انباره خاکی و آزمونگر تک‌چرخ گروه مکانیک بیوسیستم دانشگاه ارومیه برای انجام آزمایش‌ها استفاده گردید (شکل ۱-الف). انباره خاک شامل یک کانال، آزمونگر تک چرخ و حامل آن است. آزمونگر به حامل متصل گردیده تا امکان حرکت در داخل انباره خاک وجود داشته باشد (شکل ۱-ب). حامل سویل بین با یک الکتروموتور ۲۲ کیلووات راه‌اندازی می‌شود که برای فرآیند حرکت-توقف و کنترل سرعت به یک اینورتر (مدل LS شرکت LG) مجهز شده است. انتقال قدرت موتور الکتریکی توسط سیستم چرخ زنجیر انجام می‌گیرد. آزمونگر از طریق یک شاسی L-شکل و نیز چهار بازوی افقی که هر کدام شامل یک لودسل S-شکل با ظرفیت ۵۰۰ کیلوگرم (همگی از مارک Bongshin ساخت کره) هستند، به حامل متصل شده است. (شکل ۲-الف).

تحقیق حاکی از این است که یک ماشین با چرخ صلب در شیب ۵۰ درصدی می‌تواند از روی مانعی با ارتفاع کمتر از ۰/۱ قطر چرخ، عبور کند. نتایج مدل‌سازی نیز نشان داد که یک چرخ با فشار باد پایین می‌تواند در شیب ۵۰ درصدی با نسبت ارتفاع مانع به قطر چرخ تا ۰/۲ کار کند، بنابراین تایرهای نیوماتیکی در ماشین‌ها، دارای مزایای زیادی نسبت به تایرهای صلب هستند.

برای بیان واکنش متقابل چرخ و مانع مدل‌هایی نیز ارائه شده است (Harth *et al.*, 2004). در این تحقیق با توجه به این حقیقت که رفتار عمودی تایر تا حد زیادی به شرایط هوایی که در تایر محبوس شده است بستگی دارد، یک مدل شبیه‌سازی شده بر اساس بهینه‌سازی حجم هوای داخل تایر ارائه شده است. مدل‌سازی با چندین تایر و مانع انجام شده و همبستگی بالایی با نتایج بدست آمده از آزمایشات را نشان داده است. 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. در یک مطالعه، اثرات فشار باد تایر و سرعت پیشروی آن بر نیروی بالا رفتن از موانع، ارزیابی شده است (Gharibkhani *et al.*, 2011). تقابل یک چرخ فاقد آج با موانع مستطیلی شکل نیز در انباره خاکی بررسی شده است. این مطالعه صرفاً در شرایط چرخ غیر محرک و با یک پروفیل ثابت مانع به انجام رسیده است (Mohammadzadeh *et al.*, 2013). در تحقیق دیگری، تقابل چرخ و مانع از دیدگاه انرژی هدر رفته برای پشت سر گذاشتن مانع در هندسه‌های مختلف مانع مورد بررسی قرار گرفته است (Taghavifar *et al.*, 2015b). علیرغم اینکه پشت سر نهادن ناهمواری‌های جاده توسط ماشین‌های برون‌جاده‌ای اجتناب ناپذیر است، اما تحقیقات انجام شده اکثراً بر چرخ‌های



شکل ۱. مجموعه انباره خاک و آزمونگر چرخ به همراه ترانسیدویوسرها و سامانه جمع آوری و ثبت داده

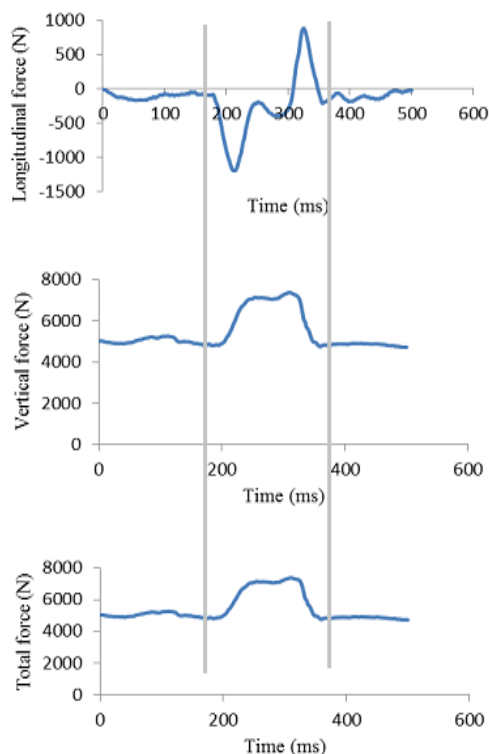


شکل ۲. لودسل ها و مجموعه داده برداری و نحوه عبور چرخ از روی مانع و اجزای آزمونگر تک چرخ

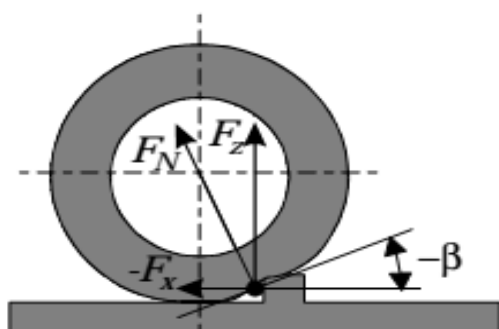
مشخص و ثابت بوده و مدت زمان داده برداری تابعی از سرعت پیشروی خواهد بود. انباره خاک و آزمونگر تک چرخ در شکل ۱ نشان داده شده است. برای تمامی آزمایشها، فشار باد تاثیر در سطح ۱۳۰ کیلوپاسکال مطابق توصیه کاتالوگ تایر ثابت نگاه داشته شد سه شکل مانع مثلثی، منحنی و دوزنقه‌ای با سه ارتفاع ۲، ۳ و ۴ سانتی‌متر و طول موج برابر و دو سطح بار چرخ ۱۰۰ و ۲۰۰ کیلوگرم (که بار عمودی ۱۸۵ کیلوگرم مربوط به جرم چرخ و متعلقات آن نیز به این مقادیر اضافه می‌گردد) در این تحقیق مورد استفاده قرار گرفته است. علاوه بر این، دو سطح لغزش صفر (چرخ متحرک) و ۳٪ (چرخ محرک) و سه سطح سرعت پیشروی حامل ۱/۸، ۱/۸ و ۲/۵۲ متر بر ثانیه در نظر گرفته شد. یک صفحه چوبی با عرض ۲ متر و طول ۳ متر به عنوان بستر نصب موانع بر روی سطح کانال خاک مورد استفاده قرار گرفته است. از یک قاب فلزی و چند میله‌ی آهنی برای تثبیت موقعیت قرارگیری مانع در هنگام نصب استفاده شد. چگونگی تقابل چرخ-مانع در شکل ۲-ب برای یکی از موانع نشان داده شده است. قبل از هر آزمایش، آزمونگر تک چرخ و سرعت مورد نظر تنظیم شدند. این تنظیمات شامل تنظیم سرعت پیشروی از طریق اینورتر اصلی حامل سویل‌بین و تنظیم سرعت زاویه‌ای چرخ (تنظیم لغزش) از طریق کنترل دور الکتروموتور آزمونگر تک چرخ بوده است. همچنین، تثبیت بار عمودی از طریق استفاده از پیچ قدرت موجود در بالای چرخ انجام شده است. در هر آزمایش، داده برداری از حدود یک متر قبل از رسیدن چرخ به مانع شروع شده و تا یک متر بعد از عبور از روی آن ادامه یافت. آزمایشات در قالب آزمایش فاکتوریل و طرح بلوک‌های کامل تصادفی و با سه تکرار طرح ریزی و برای

لودسل‌های افقی برای اندازه‌گیری نیروهای افقی اعمالی بر چرخ به کار برده می‌شوند. یک قاب U-شکل برای نگهداری تایر و یک الکتروموتور سه فاز ۵ کیلووات برای راه‌اندازی چرخ محرک مورد استفاده قرار گرفته است. یک اینورتر اختصاصی نیز برای کنترل سرعت دورانی تحویل داده شده به محور چرخ استفاده شده است و بنابراین سرعت خطی قابل تنظیم می‌باشد. شایان ذکر است که تفاوت سرعت خطی بین حامل و آزمونگر تک چرخ، ایجاد سطوح مختلف و قابل تنظیم لغزش را میسر کرده است. علاوه بر این، آزمونگر تک چرخ توسط یک پیچ قدرت که به یک لودسل S-شکل عمودی متصل شده است، با قاب L-شکل مرتبط گردیده است تا بار اعمالی بر چرخ را تنظیم کند. لودسل‌های عمودی، وظیفه‌ی اندازه‌گیری تغییرات بار عمودی تایر در هنگام عبور از موانع و ناهمواری‌ها را بر عهده دارند. نمایشگرهای دیجیتالی که به این وودسل‌ها متصل شده‌اند، توسط سیگنال‌های خروجی RS232 در تماس با یک رابط کاربری و دیتالاگر هستند. در نهایت، اطلاعات جهت ذخیره‌سازی و پردازش با فرکانس نامی ۵۰ هرتز به یک کامپیوتر لپ‌تاپ ارسال می‌شود. به منظور دستیابی به دقت بالا در لحظه شروع داده برداری و شرایط مشابه برای همه آزمایشات و حذف عامل انسانی و هرگونه خطای احتمالی از یک مدار اتوماتیک استفاده می‌شود. این مدار در لحظه تعیین شده، با ارسال یک سیگنال فرمان به دیتالاگر حین عبور از مقابل یک نشانگر مغناطیسی، داده برداری را شروع می‌نماید و پس از عبور چرخ از محدوده داده برداری و از مقابل نشانگر مغناطیسی دوم، سیگنال توقف داده برداری را به دیتالاگر ارسال نموده و داده برداری را متوقف می‌نماید. بدین ترتیب طول مسیر داده برداری همواره

که در آن،  $F_N$  نیروی نیروی دینامیکی کل؛  $F_X$  نیروی نیروی افقی و  $F_Z$  نیروی عمودی وارد بر چرخ است. بر اساس نتایج به دست آمده مقدار نیروی افقی در مقایسه با نیروی عمودی وارد بر چرخ خیلی کمتر است، لذا مقدار نیروی دینامیکی کل وارده بطور عمده تابع نیروی عمودی خواهد بود و در نتیجه شکل نمودارهای مربوط به نیروی دینامیکی وارده، بیشتر متأثر از نیروی عمودی است.



شکل ۳. نمودار تغییرات نیروی افقی؛ نیروی عمودی و نیروی دینامیکی کل وارده بر چرخ در مسیر حرکت روی مانع مثلثی (ارتفاع مانع: ۲ سانتی‌متر، سرعت ۱/۰۸ متر بر ثانیه، بار عمودی ۲۰۰ کیلوگرم و لغزش ۳٪)



شکل ۴. نیروی افقی، عمودی و کل وارد بر چرخ در هنگام عبور از مانع

نتایج به دست آمده در این تحقیق از نظر چگونگی تغییرات کلی نیروهای افقی و عمودی وارده بر تایلر با نتایج تحقیقی که توسط مدلسازی با نرم‌افزار ADAMS به دست آمده است، مشابهت دارد و جهت نیروی افقی وارده بر چرخ طی بالا

تحلیل آنها از نرم افزار SAS استفاده شد است. تایلر مورد استفاده در این تحقیق، یک تایلر استاندارد با مشخصات Barez 8.25-16 P.R HLF (8) است که در آن مطابق کاتالوگ ارائه شده، عرض مقطع تایلر ۲۲۰ mm (نسبت بین ارتفاع مقطع و عرض مقطع بر حسب درصد) معادل ۸۰، ساختار تایلر بایاس و قطر رینگ ۴۰ cm است.

## نتایج و بحث

نیروی افقی وارد بر چرخ و یا به عبارت دیگر مقاومت غلتشی اندازه‌گیری شده در این تحقیق، حاصل مجموع نیروهای به دست آمده از چهار لودسل افقی آزمونگر تک‌چرخ است. در کلیه نمودارهای به دست آمده، نیروی افقی تا قبل از رسیدن چرخ به مانع، دارای مقدار جزئی تقریباً ثابتی است که عبارت از مقاومت غلتشی چرخ بر روی سطح صاف قبل از مانع است؛ اما با رسیدن چرخ به مانع و در حین بالا رفتن از آن، سیر افزایشی نیروی افقی با یک شیب تند رخ داده و هنگام پایین آمدن از روی مانع، عکس این حالت اتفاق افتاده است (شکل ۳). کاهش نیروی افقی وارده بر چرخ، پس از سقوط چرخ از روی مانع تا سرحد تغییر جهت، کاهش نشان داده است که می‌توان آن را متأثر از نیروهای اینرسی ناشی از جرم مجموعه چرخ، و شتاب متغیر آن دانست. پس از پشت سر گذاشتن مانع، نیروی افقی مجدداً به مقدار اولیه نزدیک گردیده است. اگرچه تغییرات نیروی افقی وارد بر چرخ نسبت به زمان و در سطوح مختلف سرعت پیشروی و لغزش ظاهراً متفاوت دیده شده است، اما با انطباق نقطه اوج نمودارها، این تغییرات از نظر نحوه فراز و فرود خود، تغییرات مشابهی را نشان داده است. تفاوت نمودارهای مربوط به سطوح مختلف سرعت پیشروی نشان می‌دهد 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 زیادی بوده است. این نوسانات در سطوح بالای سرعت، با شدت بیشتری مشاهده شده است. در مورد مانع دوزنقه‌ای، پس از بالا رفتن چرخ از مانع، در مدت زمان کوتاهی که مربوط به حرکت چرخ از روی قسمت مسطح مانع است، مقدار نیروی افقی ثابت باقی می‌ماند. بدیهی است که طول این بخش، بستگی به شکل مانع دوزنقه‌ای و اندازه قاعده‌ی بالایی آن دارد.

نیروی دینامیکی کل در هنگام عبور از مانع، حاصل برآیند دو نیروی افقی و عمودی است (شکل ۴) و بنابراین از رابطه زیر به دست می‌آید:

$$F_N = \sqrt{F_X^2 + F_Z^2} \quad (\text{رابطه ۱})$$

منحنی نیرو- زمان ثابت بوده و با کاهش زمان فرایند درگیری چرخ با مانع، مقدار نیروی نیروی وارده بر چرخ افزایش خواهد یافت. موانع قوسی شکل در میانه این توجیه برای دو مانع دوزنقه‌ای و مثلثی قرار می‌گیرند (شکل‌های ۵ و ۶).

پارامتر سرعت پیشروی بر نیروی عمودی وارده بر چرخ تاثیر معنی‌داری را نشان داده است و حال آنکه فاقد اثر معنی‌دار بر نیروی افقی وارده بر چرخ ظاهر شده است. با افزایش سرعت پیشروی، مدت زمان رسیدن چرخ به بالاترین نقطه از نیم سیکل پروفیل مانع کاهش یافته و به عبارتی، تغییر اندازه حرکت مجموعه چرخ در راستای عمودی، چشمگیر خواهد بود و از این نگاه می‌توان تاثیرپذیری نیروی عمودی وارده بر چرخ را با مرور دوباره رابطه ۲ طی تغییرات سرعت پیشروی توجیه نمود. در همین رابطه، با توجه به عدم تغییر چندان در مولفه افقی سرعت پیشروی چرخ، تغییرات اندازه حرکت در بعد افقی و در نتیجه میزان نیروی افقی وارده بر چرخ ناچیز خواهد بود که عدم معنی‌داری اثر سرعت پیشروی در بعد افقی نیروی وارده را تفسیر می‌نماید. این نتایج در سطوح نسبتاً پایین سرعت پیشروی به دست آمده است. در پژوهشی که سطوح سرعت ۴۰، ۸۰ و ۱۲۰ کیلومتر بر ساعت انتخاب گردیده است، اثر سرعت پیشروی بر نیروی دینامیکی کل، معنی‌دار گزارش شد (Gipser, 2004). هم‌چنین در تحقیق مشابهی تاثیر سرعت پیشروی بر نیروهای عکس‌العمل عمودی و افقی معنی‌دار گزارش گردید (Wei, 2014).

نتایج پژوهش قریب خانی و همکاران نیز نشان داده است که بین سرعت تیر و نیروی نیروی افقی رابطه مستقیمی وجود دارد. در ارتفاع ثابت مانع، هنگامی که سرعت پیشروی افزایش می‌یابد، نیروی نیروی تیر افزایش می‌یابد. نیروی ماکزیمم در ماکزیمم سرعت ۳/۶ کیلومتر بر ساعت آشکار می‌شود و کمترین سرعت پیشروی (۰/۹ کیلومتر بر ساعت) دارای کمترین نیروی نیرو است (Garibkhani et al., 2011).

در آزمایشات اجرا شده، ارتفاع موانع صرف نظر از شکل موانع، بر نیروی دینامیکی ایجاد شده تاثیر معنی‌داری را نشان داده است (جدول ۱). علی‌رغم اینکه ارتفاع موانع به نسبت ابعاد چرخ تفاوت چشمگیری با یکدیگر ندارند (۲، ۳ و ۴ سانتیمتر)، بر نیروی دینامیکی ایجاد شده در هر دو بعد افقی و عمودی، تفاوت معنی‌داری را نشان داده‌اند (جدول ۲ و ۳). افزایش ارتفاع مانع باعث افزایش مولفه عمودی سرعت چرخ گردیده و در

رفتن و پایین رفتن چرخ از روی مانع بر خلاف یکدیگر بوده است (Gipser, 2000). در تحقیق دیگری، نیروی عمودی و افقی با اندازه‌گیری توسط آزمونگر استوانه‌ای و نیز توسط مدلسازی با مدل تماس یک نقطه‌ای بر حسب مسافت پیموده شده برای یک چرخ با سرعت ۸ کیلومتر بر ساعت بر روی مانع مستطیلی به دست آمد و سهم عمده نیروی کل وارده بر چرخ به مولفه عمودی نسبت داده شده است که با نتایج این تحقیق، همخوانی دارد (Wei et al., Frey, 2009). نیز نتایج مشابهی را با انجام آزمایشات تجربی مانع بر روی درام و نیز شبیه‌سازی با مدل اجزاء محدود برای سرعت‌های ۱۰، ۲۰ و ۳۰ کیلومتر بر ساعت به دست آوردند (Wei et al., 2014).

جداول ۱ تا ۳ نتایج تجزیه واریانس مربوط به تاثیر پارامترهای مورد بررسی در این مطالعه بر نیروی دینامیکی عمودی، افقی و نیروی کل وارده بر تیر را نشان داده است. تحلیل‌های آماری، تفاوت معنی‌داری را برای موانع با شکل و اندازه‌های مختلف، سطوح لغزش و بار عمودی نشان می‌دهد. معنی دار بودن اثر شکل موانع را می‌توان در چگونگی آغاز درگیری چرخ و مانع در حین عبور چرخ دخیل دانست. از نقطه نظر مکانیک حاکم بر پدیده برخورد چرخ با مانع می‌توان گفت نیروی دینامیکی مبادله شده بین چرخ و مانع، معادل تغییر اندازه حرکت چرخ خواهد بود که با صرف نظر از نیروها و تغییر مکان‌های احتمالی جانبی چرخ، منحصر به تغییرات افقی و عمودی اندازه حرکت است (رابطه ۲).

$$\int_0^t \sum f_{x,y}(t) dt = \Delta G_{x,y} \quad (\text{رابطه ۲})$$

که در این رابطه با فرض رخداد برهم‌کنش چرخ و مانع در طول  $t$  ثانیه،  $f_{x,y}(t)$  نیروهای افقی و عمودی وارده بر چرخ (و مانع) و  $\Delta G_{x,y}$  تغییر اندازه حرکت چرخ در دو راستای افقی و عمودی است. در رابطه با نوع مانع، موانع دوزنقه‌ای بیشترین نیروی وارده بر چرخ را در همه ترکیبات آزمایشی داشته‌اند. از سویی، موانع مثلثی، کمترین میزان نیرو را به خود اختصاص داده و موانع قوسی شکل از نظر نیروی وارده بر چرخ، در میانه دو مانع قبلی ظاهر شده‌اند. این تفاوت را می‌توان در رابطه با مدت زمان جابجایی چرخ در حین عبور از مانع مخصوصاً در بعد عمودی جستجو نمود. در رابطه با موانع دوزنقه‌ای، بالا رفتن چرخ از نیم سیکل پروفیل مانع به صورت ناگهانی و در بازه زمانی اندکی صورت می‌پذیرد حال آنکه در موانع مثلثی شکل، بالا روی چرخ از روی نیم سیکل پروفیل مانع به آرامی و به مانند بالا رفتن از یک سطح شیب‌دار روی می‌دهد. از اینرو طبق رابطه ۲ با تثبیت مقدار اندازه حرکت مجموعه چرخ، سطح زیر

اثر معنی دار دیده شده است (اثرات دوگانه سرعت- ارتفاع مانع و سرعت- بار عمودی). همچنین پارامترهای بار عمودی و ارتفاع مانع نیز بر نیروی افقی روی چرخ اثر متقابلی نداشته و دیده شد که به صورت مستقل از یکدیگر بر این پارامتر تاثیرگذارند. اثرات متقابل در رابطه با نیروی دینامیکی کل وارده بر چرخ بیشتر متأثر از نیروی عمودی بوده است و در غالب ترکیب‌های دوگانه، معنی دار مشاهده شده است.

جدول ۱. مقایسه میانگین اثرات اصلی پارامترها آزمایش بر نیروی دینامیکی

نیروی دینامیکی (کیلو نیوتن)	سطوح تیمار	تیمار
<sup>a</sup> ۵/۳۱۲	مثلی	هندسه مانع
<sup>b</sup> ۵/۵۱۴	قوسی	
<sup>c</sup> ۵/۵۴۳	مسطحی	
<sup>b</sup> ۵/۵۱۷	چرخ محرک (لغزش ۰.۳٪)	
<sup>a</sup> ۵/۳۹۵	چرخ غیر محرک (لغزش صفر)	لغزش (٪)
<sup>a</sup> ۵/۰۳۸	۲	ارتفاع مانع (سانتی‌متر)
<sup>b</sup> ۵/۵۰۶	۳	
<sup>c</sup> ۵/۸۲۴	۴	
<sup>a</sup> ۵/۲۶۰	۲/۸۱	
<sup>b</sup> ۵/۶۵۲	۳/۷۹	بار عمودی (کیلو نیوتن)
<sup>a</sup> ۵/۴۴۴	۱/۰۸	سرعت پیشروی (کیلومتر بر ساعت)
<sup>a</sup> ۵/۴۶۱	۱/۸	
<sup>a</sup> ۵/۴۶۳	۲/۵۲	

\* در هر تیمار، حروف غیر یکسان نشان دهنده اختلاف معنی دار است.

جدول ۲. جدول تجزیه واریانس اثر پارامترهای مختلف بر نیروی عمودی

منابع	مجموع مربعات	درجات آزادی	میانگین مربعات	F
مانع	۲/۸۵	۲	۱/۴۳	۱۰۸۱/۰۴**
لغزش	۰/۷۶	۱	۰/۷۶	۵۷۵/۸۲**
ارتفاع مانع	۱۸/۳۳	۲	۹/۱۹	۶۹۴۴/۳۹**
بار عمودی	۹/۹۷	۱	۹/۹۷	۷۵۵۲/۹۹**
سرعت	۰/۱۵	۲	۰/۰۸	۵۸/۶۳**
مانع*لغزش	۰/۲۳	۲	۰/۱۲	۸۸/۵۶**
مانع*ارتفاع	۰/۶۱	۴	۰/۱۵	۱۱۵/۱۷**
مانع*بار عمودی	۰/۱۸	۲	۰/۰۹	۶۷/۷۴**
مانع*سرعت	۰/۱۳	۴	۰/۰۳	۲۴/۸۲**
لغزش*ارتفاع	۰/۳۶	۲	۰/۱۸	۱۳۸/۱۲**
لغزش*بار عمودی	۰/۱۴	۱	۰/۱۴	۱۰۷/۵**
لغزش*سرعت	۰/۵۴	۲	۰/۲۷	۲۰۳/۴۳**
ارتفاع*بار عمودی	۱/۸۲	۲	۰/۹۱	۶۹۰/۱۷**
ارتفاع*سرعت	۰/۴۴	۴	۰/۱۱	۴۹/۸۳**
بار عمودی*سرعت	۰/۱۲	۲	۰/۰۶	۴۳/۸۸**

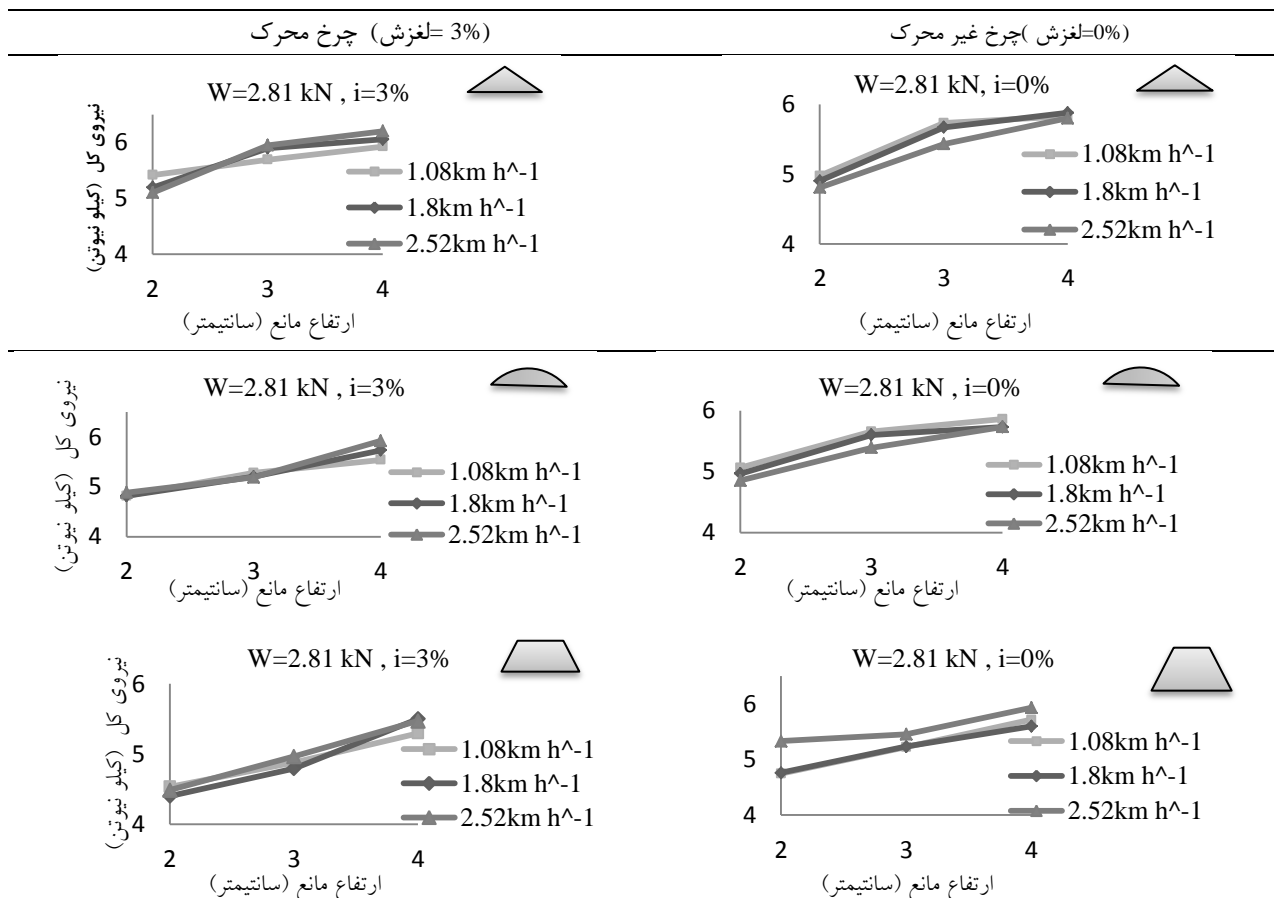
\*\* معنی دار در سطح احتمال ۱٪

نهایت با افزایش تغییرات اندازه حرکت چرخ، افزایش نیروی عمودی را در پی خواهد داشت. این نکته، به خصوص در مورد چرخ‌هایی که بر روی زمین‌های ناهموار کار می‌کنند، نشان دهنده اهمیت ابعاد ناهمواری‌ها حتی با تفاوت اندک نسبت به ابعاد چرخ در ارتفاع آنها است به طوری که با افزایش یک سانتیمتری ارتفاع مانع، نیروی وارده بر چرخ به صورت معنی-داری افزایش خواهد یافت.

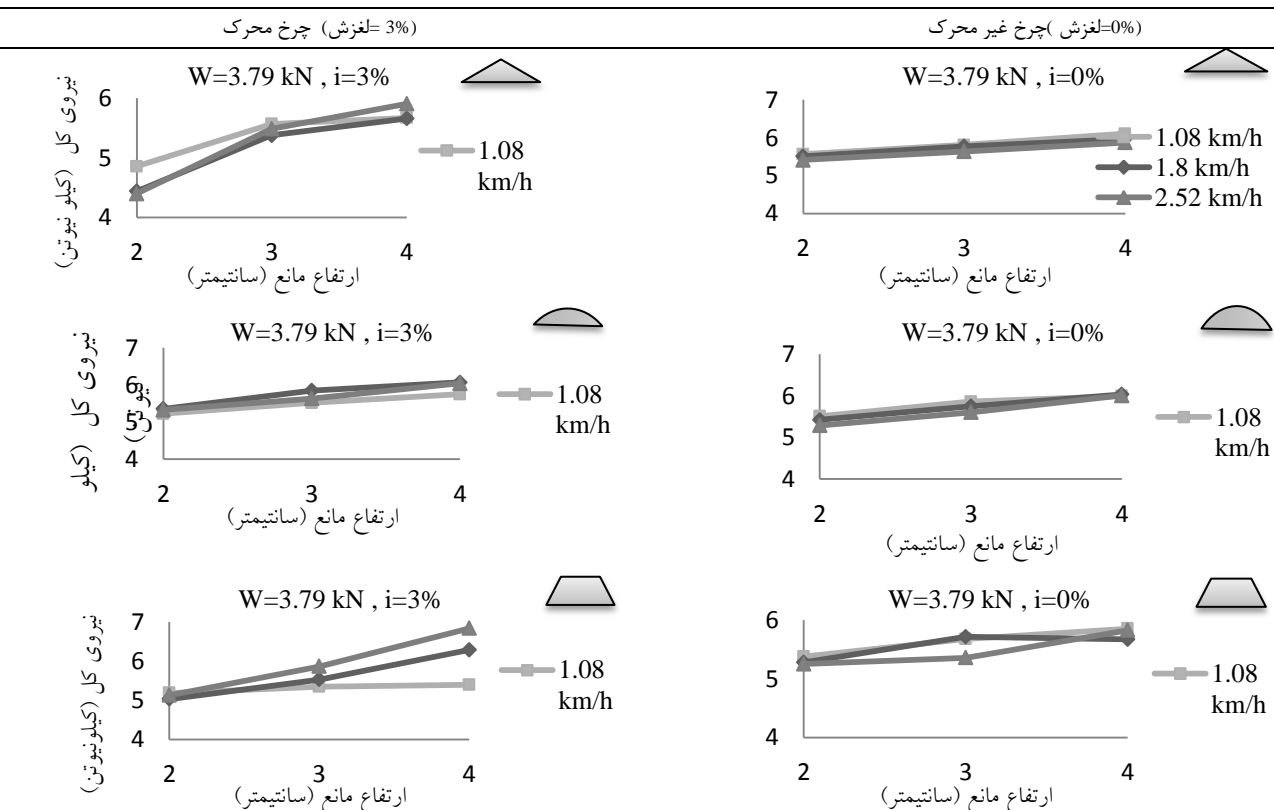
بررسی نیروی عمودی ایجاد شده در لغزش برابر، نشان دهنده این است که با افزایش بار عمودی روی چرخ، میزان نیروی عمودی ایجاد شده افزایش یافته است. به عبارت دیگر، هرچه قدر بار موجود بر روی چرخ بیشتر باشد، نیروی عمودی ایجاد شده در اثر برخورد با مانع بیشتر خواهد بود. این افزایش را می‌توان در قالب وابستگی نیروهای اینرسی عمودی به جرم ناشی از بار مرده تعبیر نمود.

تغییر لغزش چرخ و یا به عبارتی وضعیت محرک یا غیر محرک بودن چرخ (با توجه به دو سطح انتخابی لغزش) اثر معنی‌داری را بر نیروی دینامیکی داشته است که این تاثیر در هر دو مولفه افقی و عمودی دیده می‌شود. از طرفی مشاهده می‌گردد که با افزایش لغزش، نیروی وارده بر چرخ افزایش می‌یابد و به عبارتی با توجه به دو سطح انتخابی صفر و لغزش مثبت، یک چرخ محرک در شرایط مشابه، نسبت به یک چرخ غیر محرک، نیروی بیشتری را طی عبور از موانع دریافت می‌کند. افزایش نیروی عمودی چرخ در حالت محرک را می‌توان برگرفته از نیروی پیشرانه تولیدی توسط چرخ دانست به گونه‌ای که چون این نیرو در حین بالاروی چرخ از مانع به طرف بالای مانع است بنابراین مولفه عمودی آن به طرف بالا بوده و تعادل عمودی چرخ، نیروی عمودی بزرگتری را ایجاد می‌کند که این نیرو در قالب نیروی عمودی، به بار روی چرخ اضافه شده است.

از طرفی آنالیزهای آماری، بیشتر اثرات متقابل دوگانه پارامترهای مورد بررسی بر نیروی دینامیکی را معنی‌دار نشان داده است که این موضوع، گواهی بر پیچیدگی پدیده درگیری چرخ و مانع است. البته معنی‌داری اثرات متقابل در رابطه با نیروی عمودی روی چرخ بیشتر دیده می‌شود به گونه‌ای که تاثیر هیچ‌یک از پارامترهای سرعت، بار عمودی، ارتفاع مانع و لغزش بر نیروی عمودی را نمی‌توان مستقل از تغییرات پارامترهای دیگر در نظر گرفت. در رابطه با نیروی افقی وارده بر چرخ، سرعت پیشروی و برخی ترکیبات شامل سرعت پیشروی فاقد



شکل ۵. تغییرات ضربه دینامیکی نسبت به اثرات متقابل چهارگانه ارتفاع مانع، سرعت پیشروی، بار عمودی و لغزش



شکل ۶. تغییرات نیروی دینامیکی نسبت به اثرات متقابل چهارگانه ارتفاع مانع، سرعت پیشروی، بار عمودی و لغزش



سختی تایر، فشار باد تایر، سرعت پیشروی، بار عمودی و پارامترهای مانع است. این تحقیق پیرامون بررسی تاثیر پنج پارامتر هندسه مانع، ارتفاع مانع، لغزش، بار عمودی چرخ و سرعت پیشروی بوده است. نتایج آماری نشان دادند که تاثیر کلیه پارامترهای هندسه مانع، ارتفاع مانع، لغزش و بار عمودی چرخ بر روی نیروی دینامیکی معنی دار است اما برای سطوح سرعت پیشروی، ارتباط معنی داری مشاهده نشد. آزمون‌های تجربی در این تحقیق نشان داد موانع صلب حتی با دارا بودن ارتفاع بسیار کوچک نسبت به ابعاد چرخ باعث اعمال نیروهای بزرگی بر چرخ می‌گردند. از طرفی مشاهدات حاکی از افزایش نیروی وارده بر چرخ در حالت محرک نسبت به چرخ غیر محرک بود. نیروی کلی وارده بر چرخ طی عبور از موانع بیشتر متاثر از مولفه عمودی بوده است و به نظر می‌رسد بیشترین نقش در نیروی دینامیکی تحمیل شده توسط مانع را باید به تغییرات شتاب عمودی چرخ نسبت داد. بر همین اساس شکل پروفیل موانع تاثیر معنی داری بر نیروی دینامیکی داشت و کمترین نیرو در مانع مثلثی و پس از آن به ترتیب در موانع قوسی و دوزنقه‌ای دیده شد. افزایش ارتفاع مانع در شکل‌های مختلف موانع منجر به افزایش نیروی دینامیکی با روند تقریباً خطی گردید. برای تحقیقات بعدی، ارزیابی سایر پارامترهای تایر، مانع و حرکت جهت دستیابی به یک مدل کامل‌تر ارزیابی برهم‌کنش چرخ و مانع پیشنهاد می‌شود. اطلاع از میزان افت کشش و انرژی ناشی از وجود ناهمواری‌ها در مسیر حرکت ماشین‌های آفرود (و از جمله ماشین‌های کشاورزی)، می‌تواند به عنوان یک نکته کلیدی برای طراحی و مدیریت دقیق ماشین و آماده‌سازی سطوح قبل از عبور ماشین راهگشا باشد.

## REFERENCES

- Bekker, M. G. (1956). *Theory of land locomotion: The mechanics of vehicle mobility*. Michigan: University of Michigan Press.
- Frey, N. (2009). Development of a rigid ring tire model and comparison among various tire models for ride comfort simulations. United States : Clemson University.
- Gao, C., B. Hartsough, J. A. Miles and A. A. Frank. (1992). Modeling the obstacle performance of cable-owed vehicles. *Forest Engineering Journal*, (3), 21-28.
- Gharibkhani, M., H. Mohammadzadeh, A. Mardani, M. Feizolahzadeh and H. Jafari. (2011). Evaluating of the effect of tire inflation pressure and tire velocity on the force of obstacle climbing. in: *Proceedings of 1st National Agriculture Congress*. Ankara, Turkey.

جدول ۳. جدول تجزیه واریانس اثر پارامترهای مختلف بر نیروی افقی

منابع	مجموع مربعات	درجات آزادی	میانگین مربعات	F
مانع	۴۹۲	۲	۱/۲۵	**۱۴/۸۲
لغزش	۱/۱۷	۱	۱/۱۷	**۱۳/۹۷
ارتفاع مانع	۴۰/۳	۲	۲۰/۱۵	**۲۳۹/۶۷
بار عمودی	۲/۵۵	۱	۲/۵۵	**۳۰/۳۶
سرعت	۰/۴۶	۲	۰/۲۳	۲/۷۳
مانع*لغزش	۱/۳۴	۲	۰/۶۷	**۷/۹۷
مانع*ارتفاع	۱/۹۴	۴	۰/۴۸	**۵/۷۶
مانع*بار عمودی	۰/۰۸	۲	۰/۰۴	۰/۴۶
مانع*سرعت	۰/۱	۴	۰/۲۷	*۳/۲۷
لغزش*ارتفاع	۰/۵۷	۲	۰/۲۹	*۳/۴۱
لغزش*بار عمودی	۱/۴۷	۱	۱/۴۷	**۱۷/۵۴
لغزش*سرعت	۰/۵۱	۲	۰/۲۶	*۳/۰۶
ارتفاع*بار عمودی	۱/۰۲	۲	۰/۵۱	**۶/۰۸
ارتفاع*سرعت	۰/۳۶	۴	۰/۰۹	۱/۰۸
بار عمودی*سرعت	۰/۳۷	۲	۰/۱۹	۲/۲۲

\*\* معنی دار در سطح احتمال ۱٪؛ \* معنی دار در سطح احتمال ۵٪

## نتیجه‌گیری

با توجه به شرایط کاری انواع ماشین‌های آفرود مانند ماشین‌های کشاورزی که عمدتاً بر روی زمین‌های ناهموار کار می‌کنند و سیستم تعلیق پیشرفته‌ای ندارند، پیش‌بینی بارهای دینامیکی واقعی که بر روی یک چرخ در هنگام مواجهه با موانع پیش رو ایجاد می‌گردد، می‌تواند به عنوان یک معیار مهم در طراحی عملی ماشین جهت بررسی دینامیک تراکتور و پایداری آن مورد استفاده قرار بگیرد. نیروی ضربه یک مانع طی فرایند عبور چرخ از آن، تابعی پیچیده از چندین پارامتر از قبیل هندسه تایر،

- Gillespie, T. D. (1992). *Fundamentals of Vehicle Dynamics*. Society of Automotive Engineers. SAE.
- Gipser, M. 2000. ADAMS/FTire-A Tire Model for Ride & Durability Simulations. in: *ADAMS User's Guide*, Tokyo, Japan.
- Gong, S. (1993). *A Study of In-Plane Dynamics of Tires*. Delft University of Technology, Netherland.
- Hao, L. (2013). Analysis of Off-Road Tire-Soil Interaction through Analytical and Finite Element Methods. Technische Universität Kaiserslautern, Germany.
- Harth, V. and M. Fayet and L. Maiffredy. (2004). *A Modelling Approach to Tire-Obstacle Interaction*. (pp. 23–39). *Multibody System Dynamics*.

- Kising, A. and H. Gghlichj. (1989). Dynamic Characteristics of Large Tyres. *Journal of Agricultural Engineering Research*, (43), 11-2.
- Janosi, Z. J. and J. A. Eilers. (1968). Analysis of the basic curve of obstacle negotiation. *Journal of Terramechanics*, (5), 29-42.
- Mohammadzadeh, H., A. Mardani and A. Modarres Motlagh. (2013). A study on effect of inflation pressure and travel velocity of a tire traversing rectangular obstacles on horizontal forces. *Journal of Agricultural Machinery*, (3), 114-122. (In Farsi).
- Stallmann, M. J., P. S. Els and C. M. Bekker. (2014). Parameterization and modelling of large off-road tyres for ride analyses: Part 1 – Obtaining parameterization data. *Journal of Terramechanics*, (55), 73-84.
- Taghavifar, H., A. Mardani and H. Karim Maslak. (2015a). A comparative study between artificial neural networks and support vector regression for modeling of the dissipated energy through tire-obstacle collision dynamics. *Energy*, (89), 358-364.
- Taghavifar, H., A. Mardani and A. H. Hosseinloo. (2015b). Experimental analysis of the dissipated energy through tire-obstacle collision dynamics. *Energy*, (91), 573-578.
- Wei, C. and O. A. Olatunbosun. (2014). Transient dynamic behaviour of finite element tire traversing obstacles with different heights. *Journal of Terramechanics*, (56), 1-16.
- Wong, J. Y. (2010). Chapter 6 - *Performance of Off-Road Vehicles*. (pp. 129-153) *Terramechanics and Off-Road Vehicle Engineering* (Second Edition). Oxford: Butterworth-Heinemann.
- Zegelaar, P. W. A. (1998). *The Dynamic Response of Tires to Brake Torque Variations and Road Unevenness*. Delft University of Technology, Netherland.