



بررسی اثر سرعت پیشروی و فشار باد تأیر بر مقاومت ناشی از عبور چرخ از موانع با ارتفاع‌های مختلف

مسعود قریب خانی^۱، پویا محمدی^۱، حبیب محمدرزاده^۱، قربان پیری‌زاده^۱ و عارف مردانی^۲

۱ و ۲- دانشجویان و استاد رشته مهندسی ماشین‌های کشاورزی دانشگاه ارومیه

چکیده

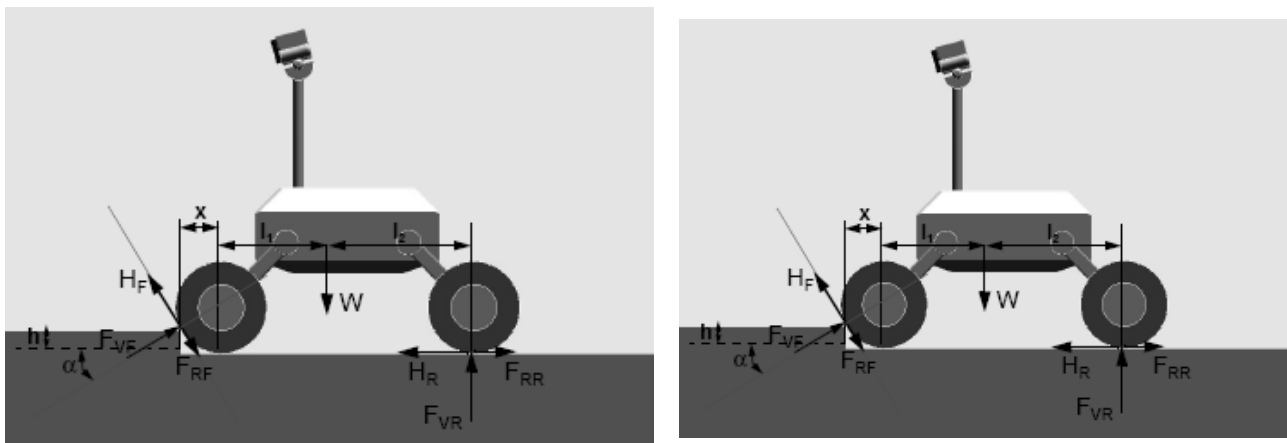
در این تحقیق، به بررسی تأثیر سرعت حرکت و فشار باد تأیر بر روی نیروی وارده بر آن در اثر حرکت از روی موانع سخت با ارتفاع‌های مختلف پرداخته شده است. آزمایش‌ها در محیط یک سویل بین و بواسطه ی ایجاد سرعت‌های مختلف حرکت برای یک آزمونگر تک چرخ به انجام رسیده است. سرعت پیشروی اثر معنی داری را بر روی نیروی مقاومت به وجود آمده در جلوی چرخ داشته است تأثیر ارتفاع مانع هم اثر مشابهی را نشان داده است. حداکثر نیروی وارده بر چرخ در فشارهای باد پایین تر تأیر کاهش یافته است.

واژه های کلیدی: چرخ، عبور چرخ از موانع، سویل بین، آزمونگر چرخ.

مقدمه

نیروی وارده بر یک چرخ در حال حرکت را می‌توان در دو دسته ی نیروهای مفید و نیروهای مزاحم دسته بندی کرد. نیروهای مفید، نیروهای هم سوی حرکت هستند که در چرخ‌های محرک و در جهت حرکت چرخ تولید می‌شوند. دسته دوم، نیروهایی هستند که در حین حرکت چرخ به صورت ناخواسته تولید می‌شوند. عمده‌ترین نیروی غیر مفید وارده بر چرخ، مقاومت غلتشی چرخ است. مقاومت غلتشی در اثر تغییر فرم خاک و چرخ به وجود می‌آید و وابسته به شرایط خاک، چرخ و بارگذاری چرخ می‌باشد. دسته دیگری از نیروهای مزاحم، نیروهایی هستند که ممکن است بر اثر انباشته شدن خاک در جلو چرخ و در قالب کنار زدن توده ی خاک از مقابل حرکت رخداد نمایند. یکی دیگر از مقاومت هایی که ممکن است در برابر حرکت چرخ اتفاق افتد، ضربه ناشی از موانع احتمالی جلو چرخ است. فرآیند حرکت چرخ از روی یک مانع بسیار پیچیده بوده و تابع پارامترهای عدیده‌ای است که از آن جمله می‌توان به مشخصات ارتجاعی چرخ در قالب یک سیستم دینامیکی فنر-دمپر، بارگذاری چرخ، شکل و ارتفاع مانع، سرعت حرکت از روی مانع و هندسه چرخ اشاره کرد.

وقتی که یک ماشین از یک مانع بالا می‌رود، یک مؤلفه ی اضافی مقاومت حرکتی در سطح تماس تایر و مانع به سبب تغییر در نیروی تماسی عمودی (نیروی عمودی تکیه گاه) به وجود می‌آید. در حقیقت، از آن جایی که وضعیت ربات به دلیل بالا رفتن از مانع، تغییر می‌کند بنابراین توزیع وزن روی چرخ‌ها دچار تغییر خواهد شد. این مشابه حالتی است که یک ماشین از یک سطح شیب دار بالا می‌رود، با این تفاوت در این مورد اندازه مانع، به وسیله زاویه بین نیروی وارده از طرف مانع نسبت به افق تعیین می‌شود. مدلسازی نیروی مقاومت به سبب بالا رفتن از مانع در خاک نرم و مانع های برآمده، یک فرآیند بسیار پیچیده است که فراتر از حوزه حالت حرکت رباتیک می‌باشد. به هر حال به عنوان یک معادله حالت قابل مدیریت برای مقاومت مانع، می‌توان از معادله تعادل استاتیکی یک ربات در حال بالا رفتن از یک مانع مجزا روی سطح سخت یا خاک فشرده استفاده کرد. به این منظور به بررسی یک مثال در مورد ماشین چهار چرخ محرک با تعلیق صلب، در حال بالا رفتن از یک مانع مربعی پرداخته شده است.



شکل ۱: دیاگرام نیروهای وارده بر چرخهای یک ماشین عبور از مانع

مقاومت کل به سبب بالا رفتن از مانع به صورت معادله ۱ است.

$$R_o = F_{VF} \cos \alpha + F_{RF} \sin \alpha \quad (1)$$

محاسبه F_{VF} با استفاده از معادلات تعادل استاتیکی به قرار روابط ۲ تا ۴ امکان پذیر است.

$$\sum F_X = 0 \Rightarrow H_R - F_{RR} + H_F \sin \alpha - F_{VF} \cos \alpha - F_{RF} \sin \alpha = 0 \quad (2)$$

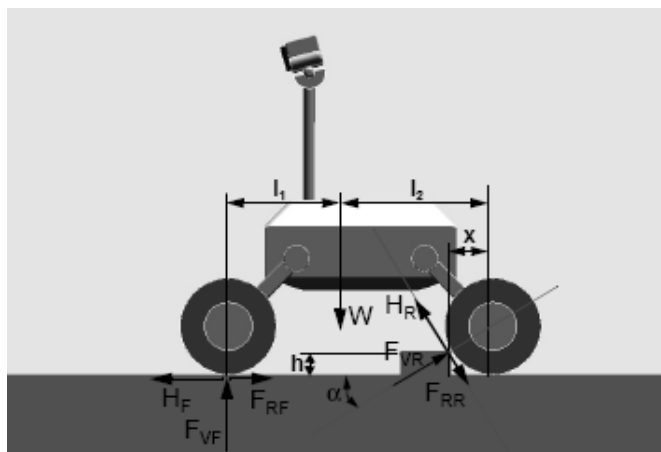
$$\sum F_Z = 0 \Rightarrow F_{VR} + H_F \cos \alpha + F_{VF} \sin \alpha - F_{RF} \sin \alpha - W = 0 \quad (3)$$

$$\sum M_C = 0 \Rightarrow W(l_1 + x) + H_R h - F_{RR} h - F(l_1 + l_2 + x) = 0$$

(۴)

معادله ۵ را می توان برای مقاومت مانع وقتی چرخ جلو در حال بالا رفتن از یک مانع مربعی است تعیین کرد.

$$R_{oF} = \frac{W(l_1 + x)(\mu_\alpha - f_r)(f_r \sin \alpha + \cos \alpha)}{(\cos \alpha + f_r \sin \alpha - \mu_\alpha \sin \alpha)(h(-\mu_\alpha + f_r) + l_1 + l_2 + x)} \quad (۵)$$



شکل ۲: تحلیل نیروهای وارده بر چرخ عقب هنگام بالا رفتن از مانع مجزا

به دلیل این که فرض شده است موانع دارای سطح سخت می باشند، نیروی کشش به طور تقریبی از حاصل ضرب ضریب چسبندگی (μ_α) و بار چرخ حاصل می شود.

به طور مشابه، مقاومت مانع وقتی چرخ عقب در حال بالا رفتن از مانع است به صورت معادله ۶ خواهد بود.

$$R_{oR} = \frac{W(l_2 - x)(\mu_\alpha - f_r)(f_r \sin \alpha + \cos \alpha)}{(\cos \alpha + f_r \sin \alpha - \mu_\alpha \sin \alpha)(h(\mu_\alpha - f_r) + l_1 + l_2 - x)} \quad (۶)$$

از آنجایی که معادلات حالت برای R_o ، دارای پارامترهای بحرانی چندگانه مربوط به وضعیت و عکس العمل محیط تایر می باشند، معادلات معنی داری خواهند بود. با فرض اینکه وزن ماشین، هندسه شاسی و چرخ ها، و خصوصیات چرخ و

زمین معین باشند، R_o می‌تواند به عنوان تابعی از ارتفاع مانع محاسبه گردد. پارامترهای F_{VR} و F_{VF} در حالی که معادلات تعادل استاتیکی را ارضا می‌کنند، راه حل برای مسئله تعیین بیشینه ارتفاع مانع (h_{max}) برای یک حالت حرکت خاص (l_1) و l_2 و d_w و عکس العمل تایر-زمین (f_r و μ_a) می‌باشند. در نهایت، بیشینه ارتفاع قابل بالا رفتن برای مانع، کوچکتر از مقادیر تعیین شده برای تحلیل R_{OF} و R_{OR} می‌باشد.

سرانجام اگر مانع یک پله کوچک باشد، معادله تعادل استاتیکی وقتی چرخ عقب در حال بالا رفتن است، کمی متفاوت است. در نتیجه مقاومت مانع به قرار رابطه ۷ خواهد بود.

$$R_{O \leftrightarrow R} = \frac{W(l_2 \cos \theta - x)(\mu_a - f_r)(f_r \sin \alpha + \cos \alpha)}{(\cos \alpha + f_r \sin \alpha - \mu_a \sin \alpha)((l_1 + l_2) \cos \theta - x)} \quad (7)$$

پارامترهای حالت l_1 ، l_2 و d_w می‌توانند به طور تحلیلی با حداقل کردن مقاومت مانع در حالی که ارتفاع مانع بیشینه است، تخمین زده شوند. در فرمول‌های یاد شده، محدودیت‌های گشتاور پیچشی و توان نیرو محرکه سیستم محرک ماشین، منظور نشده است.

مواد و روش‌ها

آزمایش‌های مربوطه به این پژوهش با استفاده از سویل بین و آزمونگر تک چرخ گروه مکانیک ماشینهای کشاورزی دانشگاه ارومیه به انجام رسیده است. به همین منظور سه ارتفاع مختلف برای موانع مورد آزمایش در نظر گرفته شده است که از قرار $2/4$ ، $4/8$ و $7/2$ سانتی متر بوده است.

سرعت حرکت چرخ در قالب تنظیم سرعت حرکت حامل سویل بین و آزمونگر تک چرخ تنظیم شده است. این تنظیم با استفاده از یک اینورتر و با کنترل دور الکتروموتور محرک سویل بین صورت گرفته است. شکل ۳ تصویری از سویل بین و مجموعه داده برداری مورد استفاده در این آزمایشات را نمایش داده است.



شکل ۳: مجموعه سویل بین و آزمونگر چرخ مورد استفاده

فشار باد تایر توسط یک کمپرسور و در سطوح سه گانه ۰، ۵ و ۳۵ کیلوپاسکال تأمین شده است. موانع ساخته شده در قالب سه لایه هم ضخامت بوده است که با قرارگیری یک، دو و یا سه لایه بر روی هم، مانعی به ضخامت دلخواه تشکیل شده است. مانع ساخته شده از دو طرف توسط دو میله ۴۰ سانتی متری که در خاک داخل کانال سویل بین کوبیده شده اند تثبیت شده و از جابجا شدن آن در اثر حرکت چرخ جلوگیری شده است.

آزمونگر تک چرخ مورد استفاده از نوع چهار بازویی موازی است که در هر یک از بازوهای افقی مزبور از یک لودسل S شکل با ظرفیت ۲۰۰ کیلوگرم استفاده شده است. با توجه به اینکه مقاومت به وجود آمده در برابر چرخ در قالب مجموع نیروها در هر چهار لودسل ظاهر می شود، از این رو بایستی در هر لحظه بتوان علاوه بر برداشت و ثبت داده در هر بازو، مجموع هر چهار بازو را هم بدست آورد. به همین منظور از یک سامانه جمع آوری و ثبت داده ها استفاده شده است که عبارت است از یک مجموعه ی نمایشگرهای نیرو و یک اینترفیس که داده های خروجی لودسل ها را به یک کامپیوتر لپ تاپ منتقل می کند. در نهایت داده های خروجی لودسل ها با فرکانس حدود ۳۰-۴۰ داده در ثانیه در کامپیوتر ثبت می شوند. به منظور حذف اثر بار روی چرخ، مکانیزم بار عمودی روی چرخ غیر فعال شده و بار روی چرخ در حدود ۷۰ کیلو گرم ثابت اعمال شده است، که صرفاً شامل وزن چرخ و ملحقات آن است.

آزمایش ها با در نظر گرفتن سه سطح ارتفاع مانع، سه فشار باد تایر و چهار سرعت پیشروی طرح ریزی شده است و داده برداری در فاصله حدود یک متری مانع شروع و تا چند ثانیه بعد از عبور از مانع ادامه یافته است. شکل ۴ حرکت چرخ از روی مانع را در یکی از آزمایشات نشان می دهد.

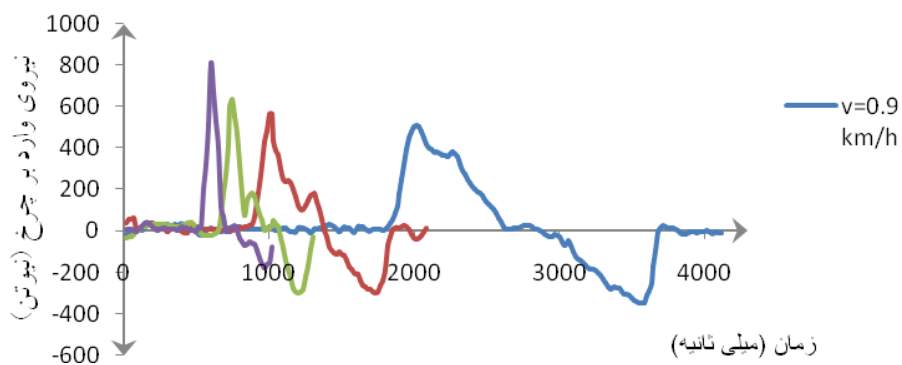


شکل ۴: حرکت چرخ از روی مانع طی آزمایشات انجام شده در سویل بین

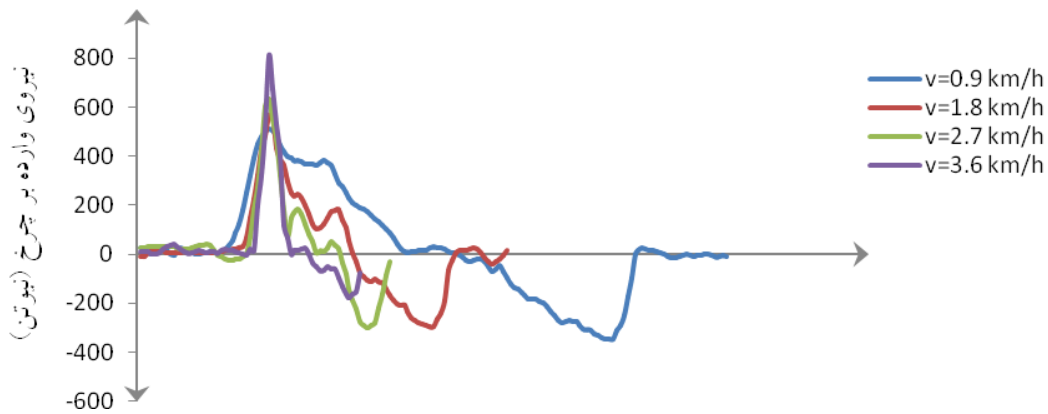
نتایج و بحث

در حین داده برداری مسافت مشخصی تعیین و نقاط ابتدا و انتهای آن مشخص شد. بنابراین با توجه به تفاوت سرعت-های پیشروی آزمونگر، بازه زمانی داده برداری برای سرعت های مختلف، متفاوت بدست آمد که به صورت شکل ۵ می باشد.

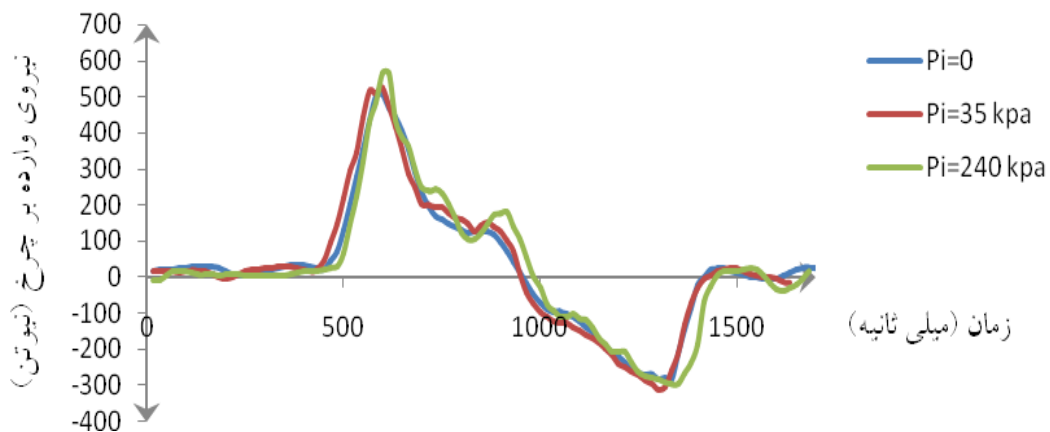
برای تحلیل بهتر و ملموس تر داده ها نقاط پیک منحنی ها بر روی هم منطبق گردیده است (شکل ۶). نتایج حاصل از تحلیل منحنی ها حاکی از ارتباط مستقیم میان سرعت پیشروی آزمونگر و نیروی وارده بر چرخ می باشد به طوری که با افزایش سرعت پیشروی میزان نیروی وارده بر چرخ نیز افزایش می یابد. به اینصورت که بیشترین نیروی مربوط به سرعت $3/6$ کیلومتر بر ساعت و کمترین آن مربوط به سرعت $0/9$ کیلومتر بر ساعت می باشد.



شکل ۵: منحنی تغییرات نیرو-زمان در فشار باد ۲۴۰ کیلوپاسکال

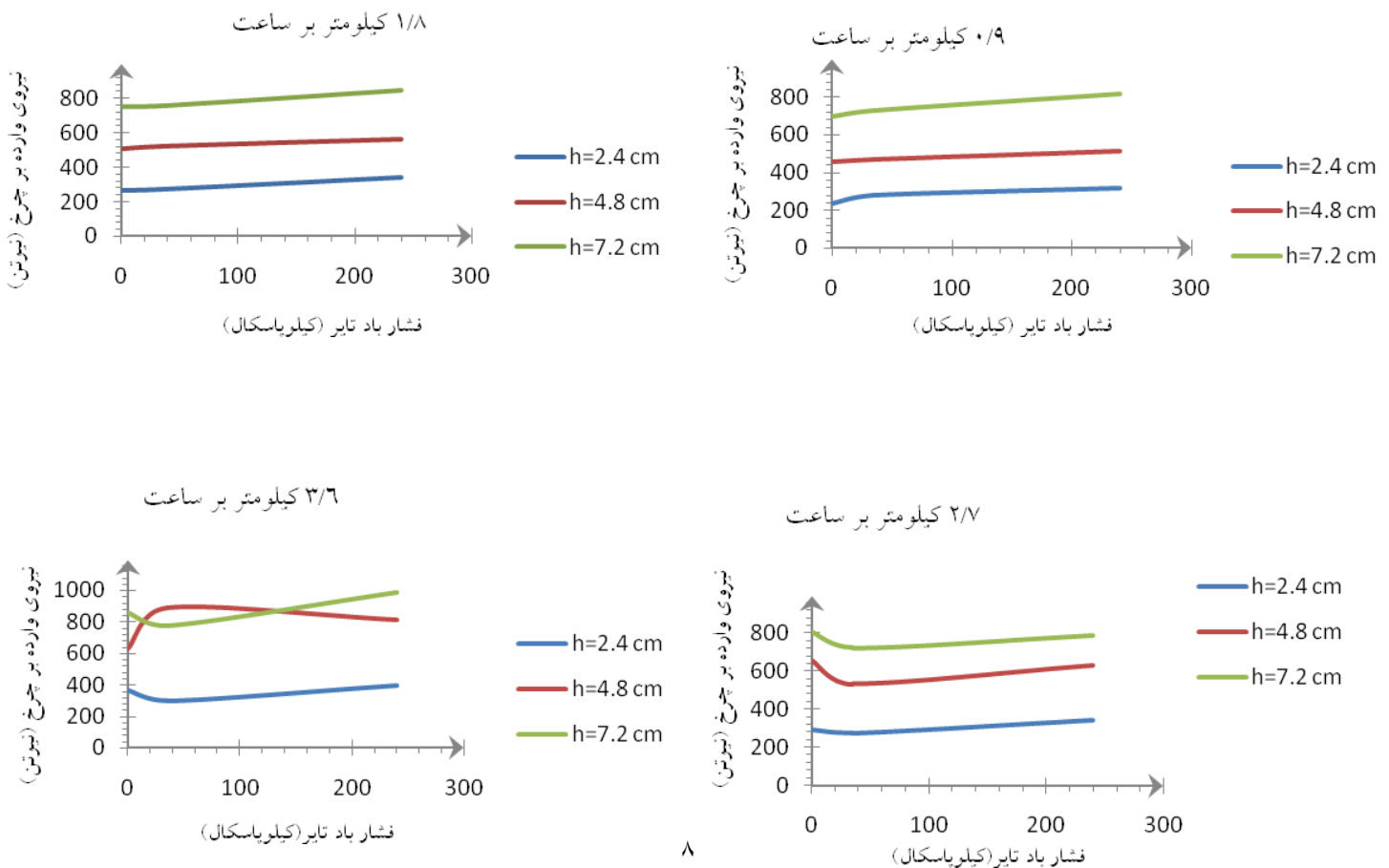


شکل ۶: منحنی منطبق شده تغییرات نیرو-زمان در فشار باد ۲۴۰ کیلوپاسکال



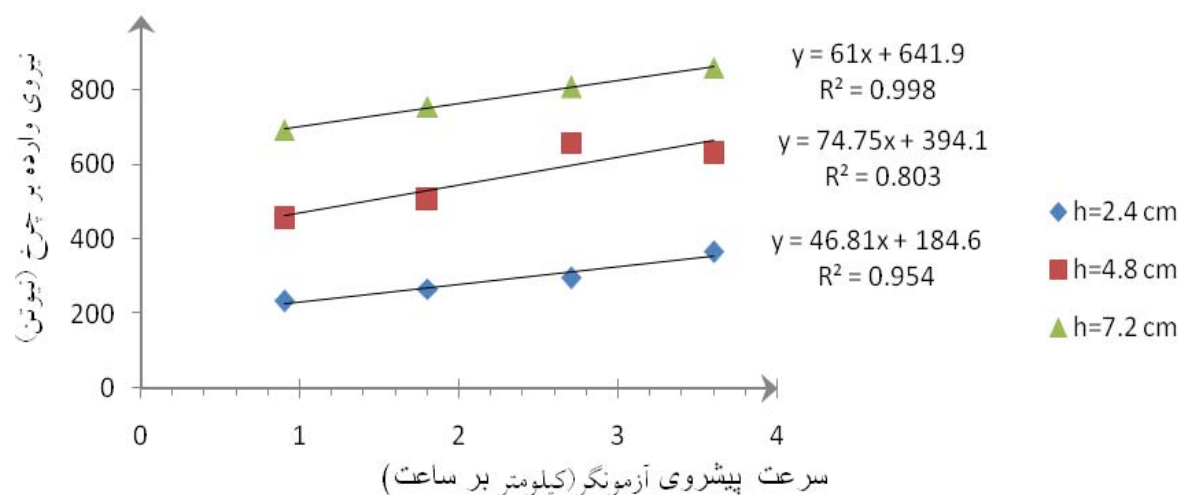
شکل ۷: منحنی تغییرات نیرو در فشار های مختلف باد تایر در سرعت ۱/۸ کیلومتر بر ساعت

با بررسی نمودارهای نیرو-زمان در سرعت های مختلف مشخص شد که تأثیر فشار بر روی نیروی بیشینه وارده بر چرخ دارای روندی مشابهی می باشد، که در سرعت های ۰/۹ و ۱/۸ کیلومتر بر ساعت رابطه میان فشار باد تایر و نیروی بیشینه وارده بر چرخ یک رابطه مستقیم می باشد، ولی در سرعت های بالاتر (۲/۷ و ۳/۶ کیلومتر بر ساعت) ارتباط معنی داری میان فشار باد تایر و نیروی بیشینه وارده بر چرخ مشاهده نشد. نمودارهای ۶ و ۷ مربوط به یک مانع خاص (ارتفاع ۴/۸ سانتیمتر) می باشند و روند مشابهی برای سایر موانع نیز مشاهده شد. با رسم نمودارهای نیروی بیشینه-فشار (شکل ۸) برای موانع با ارتفاع های مختلف، مشخص شد که در سرعت های پیشروی پایین (۰/۹ و ۱/۸ کیلومتر بر ساعت) بین فشار باد تایر و نیروی بیشینه وارده بر چرخ در ارتفاعات مختلف مانع رابطه مستقیمی وجود دارد ولی در سرعت های بالاتر (۲/۷ و ۳/۶ کیلومتر بر ساعت) رابطه معنی داری مشاهده نشد.

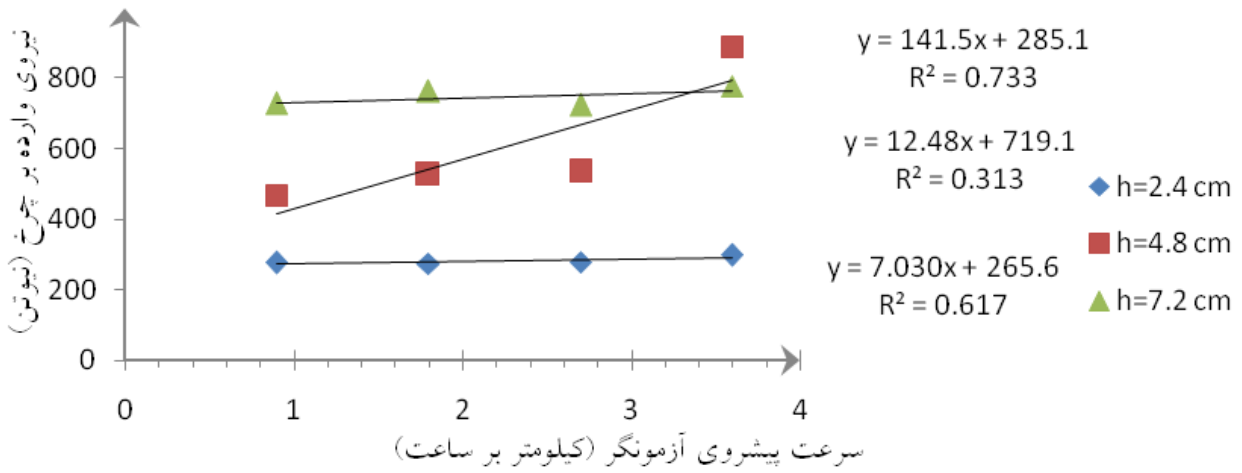


شکل ۸: منحنی های مربوط به تغییرات نیروی بیشینه وارده از طرف مانع برحسب فشار باد تایر در سرعت های مختلف

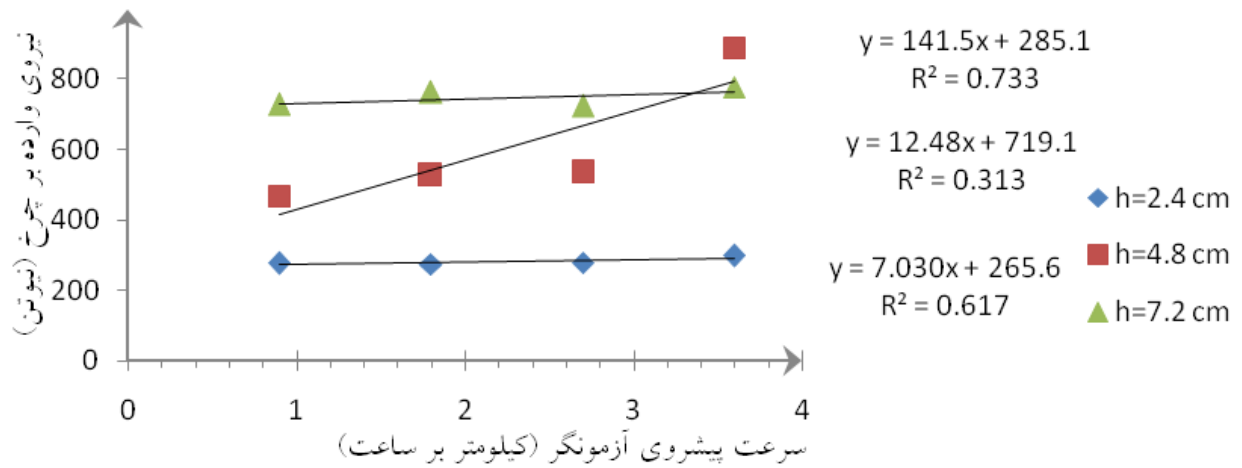
نمودارهای ۹، ۱۰، و ۱۱ نشان دهنده نحوه تاثیر سرعت پیشروی آزمونگر و ارتفاع مانع بر اندازه نیروی وارده بر چرخ در فشارهای باد ۱۰۰، ۱۵۰ و ۲۴۰ کیلوپاسکال می باشد. همانطور که نمودارها نشان می دهند با افزایش سرعت پیشروی آزمونگر در تمامی فشارهای باد تاثیر اندازه نیروی وارده به چرخ روند صعودی دارد.



شکل ۹: منحنی تغییرات نیروی بیشینه وارد بر چرخ در سرعت های مختلف پیشروی-فشار ۱۰۰ کیلوپاسکال



شکل ۱۰: منحنی تغییرات نیروی بیشینه وارد بر چرخ در سرعت های مختلف پیشروی-فشار ۱۵۰ کیلوپاسکال



شکل ۱۱: منحنی تغییرات نیروی بیشینه وارد بر چرخ در سرعت های مختلف پیشروی-فشار ۲۴۰ کیلوپاسکال

نتیجه گیری و پیشنهادات

نیروی به وجود آمده در اثر عبور چرخ از روی یک مانع تابع عوامل متعددی از قبیل ارتفاع مانع، بار عمودی روی چرخ، جنس و مدول الاستیک تایر و مانع، نحوه تغییر شکل تایر و مانع و سرعت پیشروی چرخ می باشد. سه عامل ارتفاع مانع، فشار باد تایر و سرعت پیشروی چرخ به عنوان سه فاکتور تاثیرگذار بر این نیرو می باشند که در این تحقیق مورد ارزیابی قرار گرفته اند. بر اساس نتایج به دست آمده، رابطه میان نیروی وارده به چرخ و ارتفاع مانع یک رابطه مستقیم و با تقریب خوبی خطی می باشد. رابطه میان نیروی وارده به تایر و فشار باد تایر در سرعت های پیشروی کم یک رابطه مستقیم بوده اما میان نیروی وارده به چرخ و فشار باد تایر در سرعت های بالا ارتباط معنی داری مشاهده نشده است. تاثیر فشار باد تایر و سرعت پیشروی چرخ بر نیروی وارده به چرخ در سرعت های پیشروی کم و فشارهای باد بالا کاملاً ملموس بوده به طوری که با افزایش سرعت پیشروی اندازه نیروی وارده بر تایر تحت اثر افزایش ارتفاع مانع افزایش می یابد، اما در سرعت های پیشروی بالا تاثیر فشار باد تایر متغیر می باشد. در نهایت پیشنهاد می شود در تحقیقات آینده با اعمال نیروهای عمودی متفاوت بر تایر اثر این پارامتر را که خود عاملی تعیین کننده و بسیار موثر بر میزان نیروی وارده به تایر می باشد نیز مورد بررسی قرار گیرد.

منابع

- 1-Apostolopoulos, D. "Systematic Configuration of Robotic Locomotion." Technical Report CMU-RI-TR-96-30, The Robotics Institute, Carnegie Mellon University, Pittsburgh, PA, July 1996.
- 2- Bekker, M. G. *Off-The-Road Locomotion*. University of Michigan Press, Ann Arbor, MI, 1960.
- 3- Gee-Clough, D. "The Effect of Wheel Width on the Rolling Resistance of Rigid Wheels in Sand." *Journal of Terramechanics*, Vol. 15, No. 4, pp. 161-184, 1979.
- 4- Pandey, K. P., and Ojha, T. P. "Effect of Design Parameters on the Performance of Rigid Traction Wheels on Saturated Soils. *Journal of Terramechanics*, Vol. 15, No. 3, pp. 145-156, 1978.
- 5- Wismer, R. D., Luth, H. J. "Off-Road Traction Prediction for Wheeled Vehicles." *Journal of Terramechanics*, Vol. 10, No. 2, pp. 49-61, 173.
- 6- Holm, I. C. "Articulated, Wheeled Off-the-road Vehicles." *Journal of Terramechanics*, Vol. 7, No. 1, pp. 19-54, 1970.
- 7- Garman, K. & Aydin C. 2002. Load and velocity effects on tire. In Proc. International conference on Agriculture Engineering, 29-30.
- 8- Komandi, G. 1999. An evaluation of the concept of rolling resistance. *Journal of Terramechanics* 36(1999)159-166.