

ارزیابی مدل‌های بکر و ویسمر - لوث در تخمین مقاومت غلتشی چرخ در مقایسه با آزمون‌های تجربی

فاطمه قشلاقی^۱، عارف مردانی^{۱*} و سید محمد حسن کماریزاده^۱

تاریخ دریافت: ۹۲/۴/۲۲

تاریخ پذیرش: ۹۳/۱۲/۳

۱- گروه مهندسی بیوسیستم دانشکده کشاورزی دانشگاه ارومیه

*مسئول مکاتبه E-mail: a.mardani@urmia.ac.ir

چکیده

روش‌های متفاوتی برای مدل‌سازی برهم‌کنش چرخ و خاک وجود دارد که مدل‌های مبتنی بر معادله بکر و مدل‌های ویسمر دو دسته از این مدل‌ها می‌باشند که در این مطالعه به منظور پیش‌بینی مقاومت غلتشی چرخ انتخاب و با آزمون‌های تجربی مقایسه شدند. استفاده از یک مدل مناسب که پیش‌بینی‌های درستی از مقاومت غلتشی داشته باشد می‌تواند برای مدیریت انرژی مصرفی مفید واقع شود. در این تحقیق ضرایب و توان نشست مربوط به مدل بکر با آزمون سه صفحه مستطیلی شکل با عرض‌های متفاوت و طول‌های یکسان به دست آمد و شاخص مخروطی خاک نیز با استفاده از یک نفوذسنج مخروطی در چندین تکرار ثبت شد. تا مقاومت غلتشی مربوط به هر دو مدل محاسبه شود و با داده‌های تجربی مقاومت غلتشی مقایسه شوند. آزمایش‌ها با استفاده از آزمونگر تک چرخ در محیط کنترل شده‌ای در سه سطح فشار باد تایر و سه سطح بار عمودی صورت گرفت که البته سطوح بار عمودی در طول حرکت تایر متغیر بوده و سرعت حرکت حمل‌کننده تایر در $2/3 \text{ km.h}^{-1}$ ثابت نگه داشته شده است تا بتوان به بررسی اثر دو پارامتر بار عمودی و فشار باد تایر بر مقاومت غلتشی پرداخت. نتایج نشان دادند که مدل ویسمر با داشتن ضریب همبستگی $\pm 80\%$ درصد مقاومت غلتشی بهتری را نسبت به مدل بکر با ضریب همبستگی کمتر از 80% درصد تخمین زده است. مدل بکر در فشارهای بالاتر باد تایر، از آنجایی که چرخ تقریباً به یک چرخ صلب تبدیل شده است تخمین بهتری از مقاومت غلتشی ارائه داد.

واژه‌های کلیدی: آزمون گر تک چرخ، بکر، شاخص مخروطی، مقاومت غلتشی، ویسمر-لوث.

آزمایشگاهی و در انباره‌های خاک و با استفاده از چرخ‌های سخت انجام دادند. اگرچه این روش در خاک‌های همگن نظیر شن خالص و رس خالص در شرایط آزمایشگاهی روش‌های مناسبی می‌باشند، اما در شرایط مزرعه‌ای به دلیل غیر یکنواختی خاک در عمق‌های مختلف مشکلاتی در پی دارد که در این خصوص تحقیقاتی با در نظرگیری چرخ‌های سخت صورت گرفته است. (جی کلاف، ۱۹۷۶).

در مدل‌های تجربی که توسط فریتاژ آغاز شد، از تجزیه و تحلیل ابعادی استفاده شد که مقادیر قرائت شده از نفوذسنج مخروطی را شامل می‌شد و به پیش‌بینی عدد بدون بعد چرخ و عملکرد کششی آن می‌پرداخت (فریتاژ، ۱۹۶۵). مطالعات اولیه در خاک‌های ایده آل صورت گرفت و مقادیر عدد بدون بعد چرخ در خاک‌های شنی و رسی به دست آمد. این کار توسط تورناژ (۱۹۷۲) گسترش یافت که با اضافه نمودن نسبت عرض به قطر چرخ در محاسباتش، روابطی را ارائه نمود و بعد از آن توسط دویر و همکاران (۱۹۷۵) و ویسمر-لوث (۱۹۷۴) ادامه یافت. تحقیقاتی نیز با در نظرگیری اندازه‌های مختلف چرخ اعم از نوع کششی و محرک در این زمینه صورت گرفت. اساس مدل بکر، معادلات تغییر شکل خاک می‌باشد که با تعمیم و تخصیص این مدل به شرایط چرخ و خاک، روابطی برای پیش‌بینی

۱- مقدمه

مقاومت غلتشی چرخ یکی از عوامل مهم موثر بر انرژی مصرفی در مزرعه می‌باشد و مدل کردن آن در رابطه با سایر پارامترهای خاک و ماشین از دیرباز مدنظر محققین بوده است. شناخت رفتار این مولفه می‌تواند در زمینه کنترل و تنظیم پارامترهای ماشین‌کشنده در تقابل با خاک و مدیریت انرژی مصرفی موثر واقع گردد، بنابراین توانایی پیش‌بینی مقاومت غلتشی چرخ می‌تواند بازده انرژی را بهبود بخشد و نیاز به آزمایش‌های مزرعه‌ای پرهزینه را حذف کرده و زمان مورد نیاز آزمایش را کاهش دهد.

روش‌های متفاوتی برای مدل‌سازی برهم‌کنش چرخ و خاک و در نهایت، بررسی عملکرد چرخ وجود دارد که مدل‌های تحلیلی-تجربی و مدل‌های تجربی دو دسته از این مدل‌ها می‌باشند. در مدل‌های نیمه تجربی می‌توان به کارهای بکر اشاره نمود (بکر، ۱۹۵۶) که روابطی بین نتایج آزمون نشست صفحه و مقاومت غلتشی به دست آورد و کار ایشان توسط افراد دیگری نظیر ویلیس و همکاران (۱۹۶۵)، وانگ و ریس (۱۹۶۷)، اوناکو و ریس (۱۹۶۷) و جی کلاف (۱۹۷۶) گسترش یافت. تمامی این افراد تحقیقات خود را در شرایط

در مدل‌های تجربی موسوم به WES که بر اساس پارامتر عدد بدون بعد چرخ تعریف شده‌اند مقاومت نفوذی خاک اندازه‌گیری شده و با استفاده از روابط تجربی، مدل‌هایی ریاضی برای پیش‌بینی پارامترهای چرخ و خاک ارائه می‌شود. مدل ویسمر-لوث یکی از متداول‌ترین مدل‌های WES است که در آن عدد چرخ و مقاومت غلتشی به ترتیب با استفاده از روابط ۴ و ۵ محاسبه می‌شوند (ویسمر و لوث، ۱۹۷۴).

$$C_N = \frac{CI \cdot b \cdot d}{W} \quad (۴)$$

$$R = 0.04W + \frac{1.2}{CI \cdot b \cdot d} W^2 \quad (۵)$$

در این روابط C_N عدد چرخ، CI شاخص مخروط خاک بر حسب کیلو پاسکال و b پهناي چرخ می‌باشد.

از جمله تحقیقاتی که در این زمینه می‌توان به آن اشاره کرد مطالعات کشاور و تیواری است که در کشور هند برای توسعه مدل‌های تجربی برای محاسبه مقاومت غلتشی آزمایشاتی بر روی چرخ‌ها در خاک‌های شنی انجام دادند و مقاومت غلتشی را با ترانسیدو سر حلقوی اندازه‌گیری کردند (کشاور و تیواری، ۲۰۰۶). آن‌ها داده‌های تجربی را با مقاومت غلتشی مدل‌های بکر و ویسمر-لوث مقایسه نمودند. نتایج کار آن‌ها حاکی از کارایی نه‌چندان مطلوب مدل بکر در پیش‌بینی مقاومت غلتشی چرخ بوده است و نشان دادند که مدل ویسمر در تخمین مقاومت غلتشی قابلیت مناسب‌تری از مدل بکر دارد

ترنر (۱۹۹۳) طی تحقیقات خود پیرامون رابطه چرخ و خاک که بر روی تراکتور و در شرایط مزرعه ای انجام داد، درست بودن مدل‌های کلاسیک مربوط به چرخ را مورد تایید قرار داد.

در پژوهش‌های کشاور و تیواری (۲۰۰۶) هم تایید شد که مدل بکر توانایی خوبی را در مدل کردن مقاومت غلتشی چرخ در اثر بار متغیر نداشته است.

حجازی و ساندو (۲۰۱۳) در تحقیقی مبتنی بر ارائه یک مدل اصلاح شده بر اساس تعریف جدیدی از عدد حرکت پذیری چرخ به توانایی بالاتر مدل‌های مبتنی بر عدد چرخ نسبت به تخمین مبتنی بر مدل بکر اشاره کرده‌اند.

طاهری و همکاران (۲۰۱۵) در مقاله ای مروری به بررسی مدل‌های مرسوم برهم کنش چرخ و خاک پرداخته‌اند و در یک نگاه کلی مدل‌های مبتنی بر معادله بکر را به لحاظ دارا بودن ساختار تحلیلی و قابلیت تعمیم و دنبال نمودن رفتار چرخ-خاک از نظر معادلات ریاضی، دارای برجستگی و مزیت گزارش کرده‌اند. این محققین در عین حال به نقطه ضعف مدل‌های با پایه بکر در زمینه پیش‌بینی رفتار چرخ‌های محرک نیز اشاره داشته‌اند.

مقاومت غلتشی چرخ حاصل می‌گردد (ساریلاتی، ۲۰۰۱). در آزمون صفحات بکر، سه صفحه با طول یکسان و عرض‌های متفاوت b_1 ، b_2 و b_3 به درون خاک فرو برده شده و در همان حال، نیروی موردنیاز و نشست خاک متناظر اندازه‌گیری می‌شوند و با توجه به رابطه ۱ که برای فشار روی صفحه پیشنهاد شده است پارامترهای خاک محاسبه خواهند شد (بکر، ۱۹۶۵).

$$P = \left(\frac{K_c}{b} + K_\phi \right) Z^n \quad (۱)$$

در این معادله، P فشار لازم بر حسب کیلوپاسکال برای فرو بردن صفحه‌ای با ابعاد b و l بر حسب متر در خاک می‌باشد. Z نشست صفحه در خاک بر حسب متر، n نمای نشست خاک (بدون بعد) و K_c و K_ϕ ضرایب نشست مربوط به خاک می‌باشند که به ترتیب دارای واحدهای $\text{kPa} \cdot \text{m}^{-n}$ و $\text{kPa} \cdot \text{m}^{-n}$ می‌باشند. با داشتن پارامترهای خاک مقاومت غلتشی مدل بکر در صورتی که چرخ، صلب و یا شکل پذیر باشد ارائه شده است.

در حالت چرخ نرم روی سطح نرم انرژی لازم برای تغییر فرم خاک به عنوان تولیدکننده مقاومت غلتشی چرخ در نظر گرفته شده است (بکر، ۱۹۶۰). به عبارتی دیگر کار انجام شده در یک‌کش کردن چنین چرخ‌ی در مسافت l و در مقابل مقاومت غلتشی R ، معادل با کاری است که در ایجاد اثر چرخ با استفاده از صفحه ای به طول l و به عرض b که به درون خاک فرو برده شده است، انجام می‌شود. بنابراین با توجه به این که فشار روی زمین $P = \frac{W}{bl}$ می‌باشد، می‌توان رابطه ۲ را برای مقاومت غلتشی نوشت:

$$R = \frac{b}{(n+1) \left(\frac{K_c}{b} + K_\phi \right)} (P)^{\frac{n+1}{n}} \quad (۲)$$

بررسی حالت مربوط به چرخ صلب روی سطح نرم به دلیل یکنواخت نبودن فشار در سطح تماس، نسبت به حالت قبل که با فرض نشست یکنواخت تحلیل شده بود پیچیده‌تر می‌باشد که در این حالت مقاومت غلتشی بر حسب کیلونیوتن مطابق رابطه ۳ پیشنهاد شده است (بکر، ۱۹۶۵).

$$R = \frac{\left[\frac{3W}{(3-n)\sqrt{d}} \right]^{\frac{2n+2}{2n+1}}}{(n+1)(K_c + bK_\phi)^{\frac{1}{2n+1}}} \quad (۳)$$

W بار عمودی روی چرخ بر حسب کیلونیوتن و d قطر تایر بر حسب متر می‌باشد. در روش‌های نیمه تجربی، بکر (۱۹۶۰) و وانگ (۱۹۸۹) طی مطالعاتی که به منظور پیش‌بینی مقاومت غلتشی انجام دادند فرض کردند زمانی که فشار داخلی خیلی بالاست و زمین نسبتاً نرم است تغییر شکل تایر در مقایسه با زمین بی‌اهمیت است و در این حالت تایر همانند یک چرخ صلب فرض می‌شود.

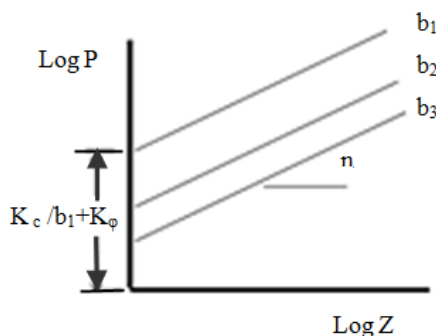


شکل (۱): مجموعه به کار برده شده برای انجام آزمایش‌های صفحات بکر

در مجموعه بکاربرده شده یک حسگر وزن S شکل به انتهای یک جک متصل شده است که میزان نیروی اعمالی بر هر صفحه از طریق نمایشگر متصل به حسگر وزنی در سه مقدار متفاوت خوانده شده و در همان لحظه میزان نشست خاک متناظر از طریق کولیس دیجیتالی که بر روی مجموعه و در حد فاصل دو فک جک مکانیکی نصب شده است قرائت و یادداشت می‌گردد. از معادله (۱) می‌توان نوشت:

$$\log P = \log \left(\frac{K_c}{b} + K_\phi \right) + n \log Z \quad (۶)$$

با رسم $\log P$ در مقابل $\log Z$ ، تعدادی خطوط مستقیم با شیب n و عرض از مبدا $(K_c/b + K_\phi)$ روی محور $\log P$ مطابق با شکل ۲ به دست می‌آیند. با رسم عرض از مبدا در مقابل $1/b$ ، شیب خط، K_c و عرض از مبدا، K_ϕ به دست می‌آید و مقاومت غلتشی مدل بکر متناسب با تغییرات بار عمودی در هر آزمایش محاسبه می‌شود.



شکل (۲): رسم $\log P$ در مقابل $\log Z$ در آزمون نشست صفحات (بکر، ۱۹۶۹)

از آنجایی که مدل ویسمر- لوث یکی از مدل‌های مبتنی بر عدد چرخ و شاخص مخروطی خاک می‌باشد لذا برای اندازه‌گیری این پارامتر از یک نفوذسنج مخروطی دیجیتال (مدل RimikCP20) استفاده شد که در هر مسیر قبل از حرکت چرخ در ۵ تکرار، تا عمق

با توجه به نتایج مطالعات قبلی و به طور خاص مطالعات کشاو و پاندی (۲۰۰۶) که بر روی خاک شنی به اعتبارسنجی مدل بکر پرداخته‌اند، در این تحقیق مطالعات مشابهی در خاک لومی‌شنی صورت گرفته است. بررسی هم‌زمان اثر پارامترهایی مانند فشار باد تایلر، بار عمودی روی چرخ و پارامترهای سختی مربوط به اصطکاک داخلی و چسبندگی خاک بر روی مقاومت غلتشی از دیگر موارد انجام شده در این تحقیق بوده است که آن را متمایز از سایر تحقیقات نموده است. به طور کلی اهداف اصلی این مطالعه عبارتند از:

- مقایسه مقادیر مقاومت غلتشی اندازه‌گیری شده و پیش‌بینی‌شده با استفاده از مدل‌های بکر و ویسمر-لوث تحت بار عمودی متغیر روی چرخ
- ارزیابی مدل‌های بکر و ویسمر-لوث برای پیش‌بینی مقاومت غلتشی چرخ در فشارهای مختلف باد تایلر.

۲- مواد و روش‌ها

آزمایش‌ها با استفاده از یک آزمون‌گر تک چرخ در محیط انباره خاک و در آزمایشگاه گروه مکانیک ماشین‌های کشاورزی دانشگاه ارومیه صورت گرفتند. هدف از انجام آزمایش‌ها پیش‌بینی مقاومت غلتشی چرخ مطابق مدل‌های بکر و ویسمر-لوث در شرایط متغیر پارامترهای حرکتی چرخ و خصوصیات خاک و ارزیابی مقادیر پیش‌بینی شده با استفاده از مقادیر تجربی مقاومت غلتشی بود. بدین منظور از یک انباره با خاک لومی شنی، عرض مفید ۲ متر، طول ۲۴ متر و یک موتور محرک با توان ۳۰ اسب بخار استفاده شد.

برای محاسبه مقاومت غلتشی در مدل‌های بکر و ویسمر-لوث، در ابتدا باید پارامترهای مکانیکی خاک محاسبه شوند و از آن جایی که می‌توان کار انجام شده برای متراکم ساختن خاک را به عنوان یک مبنا برای پیش‌بینی مقاومت غلتشی مدل بکر در نظر گرفت لذا نیروی لازم برای فرو بردن صفحات در خاک و اندازه‌گیری نشست متناظر خاک، روش مناسبی برای تعیین پارامترهای خاک مربوط به مدل بکر می‌باشد. بدین منظور آزمون صفحات مدل بکر با سه صفحه مستطیلی شکل با طول‌های یکسان ۳۰ سانتی‌متر و عرض‌های متفاوت ۱۵، ۲۰ و ۲۵ سانتی‌متر و با استفاده از مکانیزم طراحی شده خاصی مطابق شکل ۱ انجام گرفت.



شکل (۴): سامانه جمع آوری و ثبت داده

۲- نتایج و بحث

با در نظر گرفتن سه سطح فشار باد تایر و سه سطح بار عمودی، مجموعاً ۹ ترکیب تیماری در قالب سه تکرار رخ خواهد داد که نمودارهای مرتبط با نحوه تغییرات مقاومت غلتشی مدل‌های بکر، ویسمر-لوث و مقاومت غلتشی واقعی با تغییرات بار عمودی روی چرخ نسبت به زمان در هر آزمایش در شکل ۵ رسم شده است به طوری که نمودارها در راستای افقی تغییرات فشار باد تایر و در راستای عمودی تغییرات بار عمودی روی چرخ را نشان می‌دهند. در نمودارها برای وضوح بهتر نحوه تغییرات بار عمودی و مقاومت غلتشی در طی مسیر پیشروی چرخ، مقادیر مربوط به بار عمودی در راستای عمود انتقال داده شده است تا به مقادیر مقاومت غلتشی برای مقایسه نزدیک‌تر شود. از تمامی نمودارها پیداست فراز و فرودهای هر سه نمودار مرتبط با مقاومت غلتشی با یکدیگر هماهنگی خاصی دارند و تمامی این فراز و فرودها هماهنگ با تغییرات بار عمودی بر روی چرخ بوده است به طوری که با افزایش بار عمودی مقاومت‌های غلتشی مدل‌های ویسمر-لوث و بکر و مقاومت غلتشی واقعی افزایش و با کاهش بار عمودی، کاهش یافته‌اند. اما میزان فراز و نشیب‌های مربوط به مقاومت‌های غلتشی با یکدیگر برابر نبوده و در تمامی آزمایش‌ها میزان فراز و فرودهای مقاومت غلتشی مدل بکر بیش‌تر از مقاومت غلتشی واقعی و مدل ویسمر بوده است که به بیانی اشاره به عدم توانایی مدل بکر در مدل کردن مقاومت غلتشی در اثر بار متغیر دارد. نکته قابل ذکر دیگر با توجه به نزدیک‌تر بودن نمودارهای مقاومت غلتشی مدل ویسمر در مقایسه با مقاومت غلتشی مدل بکر به نمودارهای مربوط به مقادیر مقاومت غلتشی واقعی، قابلیت مناسب‌تر مدل ویسمر در تخمین مقاومت غلتشی نسبت به مدل بکر می‌باشد.

در شکل ۶ برای ارزیابی مدل‌های بکر و ویسمر در تخمین مقاومت غلتشی، داده‌های مربوط به مقاومت غلتشی مدل بکر و

۲۰ سانتی‌متر به داخل خاک فرو برده شده و مطابق با تنظیماتی که صورت گرفت در هر تکرار هشت داده با فاصله ۲/۵ سانتی‌متری ثبت شده و میانگین داده‌ها به عنوان پارامتر شاخص مخروطی مسیر مورد آزمایش به کار برده شد (چارمن، ۲۰۰۲). این پارامتر می‌تواند به عنوان ورودی مدل ویسمر-لوث برای تخمین مقاومت غلتشی چرخ استفاده شود.

برای اعتبارسنجی مدل‌های مزبور آزمون‌های تجربی در محیط انباره خاک و با استفاده از آزمونگر تک‌چرخ انجام شد. این آزمونگر شامل چهار بازوی موازی افقی و یک بازوی عمودی برای اعمال بار عمودی می‌باشد که مطابق شکل ۳ در بازوهای افقی، حسگرهای وزنی S شکل با ظرفیت ۲۰۰ کیلوگرم و در بازوی عمودی یک حسگر وزنی با ظرفیت ۵۰۰ کیلوگرم تعبیه شد که هر یک از حسگرهای وزنی به نمایشگر جداگانه‌ای متصل شدند. برای ثبت لحظه‌ای داده‌ها و مشاهده تغییرات محسوس بار عمودی و اثر آن بر مقاومت غلتشی چرخ مطابق با شکل ۴ از یک سامانه جداگانه‌ای استفاده شد که شامل یک رابط می‌باشد تا داده‌های هر پنج حسگر وزن را با فرکانس ۳۰ هرتز به طور هم‌زمان به کامپیوتر منتقل کند. تا در نهایت مقاومت غلتشی چرخ در هر لحظه از مجموع نیروهایی که به طور لحظه‌ای از حسگرهای وزن افقی ثبت شده است حاصل گردد. تایر مورد استفاده در این تحقیق، یک تایر پنوماتیکی متحرک گودیر بوده است (9.5L-14, 6 ply, Goodyear) که سرعت پیشروی این تایر به واسطه مبدل سرعت حامل انباره خاک در $2/3 \text{ km.h}^{-1}$ ثابت نگه داشته شد و فشار باد تایر نیز قبل از انجام هر آزمایش توسط یک کمپرسور و یک فشارسنج در سه مقدار ۱۰۰، ۲۰۰ و ۳۰۰ کیلوپاسکال تنظیم شد. بار عمودی روی چرخ نیز از طریق یک پیچ قدرت که از بالا به شاسی حامل و از قسمت پایین به شاسی دربرگیرنده چرخ به صورت مفصلی مرتبط شده است در سه مقدار ۱، ۲ و ۳ کیلونیوتن تنظیم شد.



شکل (۳): انباره خاک و آزمونگر تک چرخ

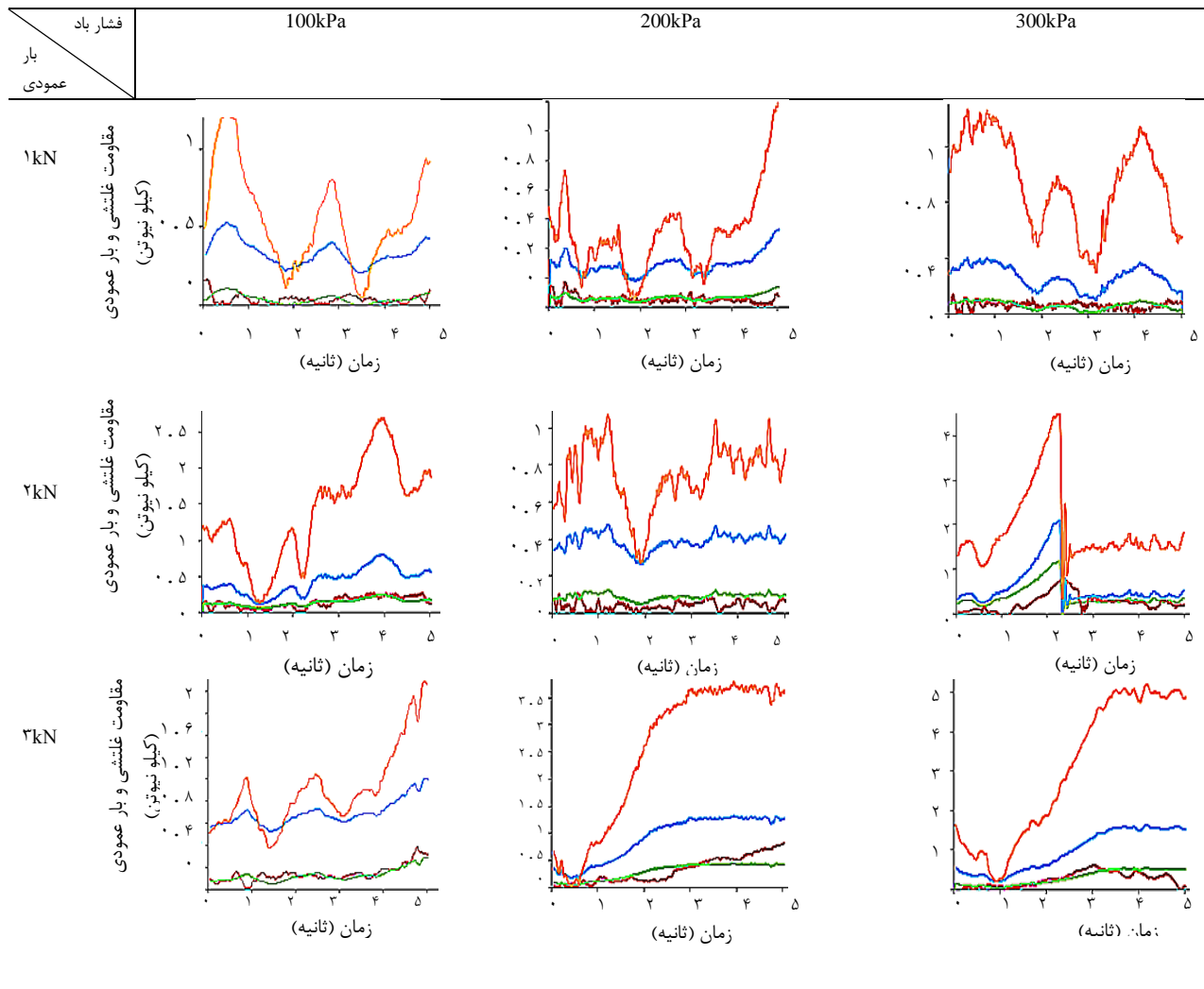
مقاومت غلتشی بوده است. نرم‌تر بودن تغییرات در منحنی تغییرات مقاومت غلتشی نسبت به تغییرات بار روی چرخ را می‌توان در میرایی سیستم چرخ و جذب بخشی از تغییرات بار عمودی دانست که به تغییرات ملایم‌تری در مقاومت غلتشی ناشی از بار عمودی در هر لحظه منجر می‌گردد. مدل بکر نتوانست تقریب خوبی برای مقاومت غلتشی چرخ غیرمحرک در اثر بار دینامیکی داشته باشد اما مدل ویسمر - لوث توانایی خود را برای مدل کردن بهتر این رابطه نشان داده است. مدل بکر نتوانست در فشارهای باد بالای تایر، مقاومت غلتشی واقعی‌تری را تخمین بزند. به نظر می‌رسد در این شرایط با نزدیک‌تر بودن شرایط چرخ به یک چرخ صلب، خطای مدل بکر در رابطه با چشم پوشی از تغییر شکل تایر و سهم آن در مقاومت غلتشی کل، کاهش یافته و تخمین دقیق‌تری از مقاومت غلتشی ارائه می‌دهد.

ویسمر در مقابل مقادیر مقاومت غلتشی واقعی برای هر آزمایش رسم شده است به گونه‌ای که محور افقی در نمودارها بیان‌کننده مقاومت غلتشی اندازه‌گیری شده و محور عمودی بیان‌کننده مقاومت غلتشی پیش‌بینی شده توسط مدل‌های بکر و ویسمر-لوث می‌باشد. خطوط ۱، ۲، ۳، ۴ و ۵ به ترتیب خطوط با ضرایب همبستگی ۸۰٪، ۹۰٪، ۱۰۰٪، ۹۰٪ و ۸۰٪ می‌باشند. در این نمودارها حالت ایده‌آل زمانی است که رابطه مقادیر بدست آمده از این دو روش تقریباً بصورت خط ۳ (خطی با زاویه ۴۵ درجه) باشد (کشاو و تیواری، ۲۰۰۶). بر اساس نمودارهای به دست آمده، در فشارهای پایین‌تر باد تایر، توانایی مدل بکر برای تخمین مقاومت غلتشی تایر ناامیدکننده‌تر نمود پیدا کرده است و این قابلیت با افزایش فشار باد تایر علیرغم فاصله زیادی که با مقادیر واقعی مقاومت غلتشی دارد اما تخمین نزدیک‌تری را نشان داده است. این موضوع در قالب ضعف عمومی مدل بکر برای تقریب مقاومت غلتشی و همچنین تطابق بیش‌تر این مدل با چرخ‌های بزرگ و نزدیک به صلب در مطالعات مشابه دیگر نیز گزارش شده است (کشاو و تیواری، ۲۰۰۶، مریون و اسپنکو، ۲۰۱۱).

به طوری که از نمودارها قابل مشاهده است پراکندگی داده‌های مقاومت غلتشی مدل ویسمر تقریباً در محدوده خطوط با ضریب همبستگی $\pm 80\%$ درصد بوده است و مدل ویسمر قابلیت نسبی بهتری در راستای تخمین صحیح‌تر مقاومت غلتشی چرخ از خود نشان داده است. بر اساس ارزیابی عملکرد مدل ویسمر هر چند هنوز تخمین کاملاً ایده‌آلی از مقاومت غلتشی دیده نمی‌شود لیکن با در نظر گرفتن پیچیدگی فرایند درگیری چرخ و خاک و همچنین برتری نسبی این مدل در پیش‌بینی مقاومت غلتشی چرخ در مقایسه با نتایج مربوط به مدل بکر، این مدل تواناتر و قابل پیشنهاد نمود پیدا کرده است. از طرفی، در سطوح فشار باد پایین و از جمله ۱۰۰ کیلوپاسکال به نظر می‌رسد که بخش مربوط به انرژی هدررفته برای تغییر شکل بیشتر بدنه تایر نسبت به فشار باد بالا به عنوان نیمه نخست تعیین‌کننده مقاومت غلتشی کل بر نیمه دیگر که در ارتباط با تغییر شکل خاک است تعیین‌کننده‌تر است و به دلیل این‌که در مدل مزبور، پیش‌بینی معینی برای در نظر گرفتن آن لحاظ نشده است نهایتاً منجر به ایجا خطا و انحراف بیش‌تر خروجی مدل نسبت به واقعیت گردیده است.

۳- نتیجه‌گیری کلی

بار دینامیکی متغیر روی چرخ، باعث ایجاد مقاومت غلتشی متغیری می‌شود که در فراز و فرودها با یکدیگر هماهنگی دارند اما میزان این فراز و فرودها در بار عمودی روی چرخ بیشتر از مقادیر



شکل ۵- تغییرات بار عمودی و مقاومت غلتشی

- Carman, K. 2002. **Compaction characteristics of towed wheels on clay loam in a soil bin**, Soil & tillage research 65: 37-43.
- Dwyer, M. J., D.R. Comely and D.W. Evernden. 1975. **Development of the NIAE handbook of agricultural tyre performance**, Proc. 5th Int. Conf. Int. Soc. Terrain- Vehicle Systems, Detroit.
- Freitag, D. 1965. **A dimensional analysis of the performance of pneumatic tyres on soft soils**, Tech. Rep. 3-688, U.S. Army Corps of Engineers Waterways Experimental Station.
- Gee-Clough, D. 1976. **The Bekker theory of rolling resistance amended to take account of skid and deep sinkage**, J. Terramech., 13 (2) 87- 105.
- Hegazy, S. and C. Sandu. 2013. **Experimental investigation of vehicle mobility using a novel wheel mobility number**. Journal of Terramechanics, 50(5-6) : 303-310.
- Keshaw, P. and G. Tiwari. 2006. **Rolling resistance of automobile discarded tires for use in camel carts in sand**, ASAE Paper No. 061097, ASAE, St. Joseph, MI.
- Meirion-Griffith, G. and M. Spenko. 2011. **A modified pressure–sinkage model for small, rigid wheels on deformable terrains**, Journal of Terramechanics, 48: 149-155.
- Onafeko, O. and A.R. Reece. 1967. **Soil stresses and deformations beneath rigid wheels**, J. Terramech., 4(1) 59- 80.
- Saarilahti, M. 2001. **Evaluation of the WES-method in assessing the trafficability of forest terrain and the mobility of forestry vehicles**. Part 2, WES mobility models, ECOWOOD. University of Helsinki, Department of Forest Resource Management. Internal Report. 29 p.
- Taheri, Sh., C. Sandu, S. Taheri, E. Pinto and D. Gorsich. 2015. **A technical survey on Terramechanics models for tire–terrain interaction used in modeling and simulation of wheeled vehicles**. Journal of Terramechanics, 57(1): 1-22.
- Turnage, G.W. 1972. **Tyre selection and performance prediction for off-road wheeled-vehicle operations**, Proc. 4th Int. Conf. Int. Soc. Terrain- Vehicle Systems, Stockholm.
- Turner, R.J. 1993. **A simple system for determining tractive performance in the field**, ASAE Paper No. 93-1574. ASAE. St Joseph, MI 49085.
- Wang, Z and Domier K.W. 1989. **Prediction of drawbar performance for a tractor with dual tires**, Transaction of the ASAE, 32(5): 1529-1533.
- Willis, B., F. Barret and G. Shawa. 1965. **An investigation into rolling resistance theories for towed rigid wheels**, J. Terramech., 2 (1) 24-53.
- Wisner, R.D and H.J. Luth. 1974. **Off-road traction prediction for wheeled vehicles**, Transactions of the ASAE 17(1): 8-10, 14. ASAE. St Joseph, MI 49085.
- Wong, J. and A.R. Reece. 1967. **Prediction of rigid wheel performance based on the analysis of soil-wheel stresses**, Journal of Terramechanics., 4 (2) 7-25.

Bekker and Wismer-Luth Models Assessment in Estimation of Tire Rolling Resistance in Comparison to Experimental Tests

F. Gheslghi¹, A. Mardani^{1*} and M.H. Komarizade¹

¹Department of Biosystems Engineering, Faculty of Agriculture, Urmia University, Urmia, Iran.

*Corresponding Author: E-mail: a.mardani@urmia.ac.ir

Abstract

There are different methods in order to model soil-wheel interaction which Bekker equation and Wismer models are two of them. These models have been selected in this study for tire rolling resistance prediction and comparison with experimental tests. Using an appropriate model for accurate prediction of rolling resistance, is useful for energy management. In this study, soil power-sinkage modules related to Bekker model were obtained. In this way, a series of plates with different widths was pushed into the soil while the force and corresponding sinkage were being measured. The soil cone index was recorded using a penetrometer in several replications to compare the rolling resistance calculated by both models and from experimental data. The experiments were performed with a single-wheel tester in controlled conditions at three levels of tire pressure and vertical load. The vertical load on the wheel was varied during the test, but its travel speed was kept constant at 2.3 km.h⁻¹. The results showed that Wismer model in all experiments had better ability to estimate rolling resistance than Bekker model. Bekker model with higher tire pressure provided better estimate for rolling resistance, since the wheel had been turned almost into a rigid wheel.

Keyword: Bekker, Cone Index, Rolling Resistance, Single-Wheel Tester, Wismer-Luth.