

ارزیابی اثر سرعت پیشروی و بار عمودی چرخ بر پارامترهای معادله تغییر شکل خاک و انرژی تغییر شکل در انباره خاک

هادی اسداللهی^۱، بهزاد محمدی الستی^{۱*}، عارف مردانی^۲، مهدی عباسقلی پور^۱

تاریخ دریافت: ۱۴۰۱/۷/۲۷ تاریخ پذیرش: ۱۴۰۱/۱۰/۴

۱- گروه مهندسی مکانیک بیوسیستم، واحد بناب، دانشگاه آزاد اسلامی، بناب، ایران

۲- گروه مهندسی مکانیک بیوسیستم، دانشگاه ارومیه، ارومیه، ایران

* مسئول مکاتبه Behzad.alasti@gmail.com

چکیده

پارامترهای مکانیکی خاک طی چند دیدگاه مختلف برای توصیف رفتار مکانیکی خاک در برابر بارهای دینامیکی تدوین شده است و معادله بکر یکی از متداول‌ترین این روش‌ها است. در این مطالعه تاثیر سرعت تغییر شکل خاک و همچنین بار روی چرخ بر پارامترهای سه‌گانه معادله تغییر شکل خاک و همچنین انرژی هدررفته برای تغییر شکل خاک بررسی شده است. آزمایش‌ها در محیط انباره خاک و با استفاده از آزمونگر تک‌چرخ و یک بومتر انجام شد. سرعت‌های پیشروی ۰/۵، ۱ و ۱/۵ کیلومتر بر ساعت و همچنین سه سطح بار عمودی ۲، ۲/۵ و ۳ کیلونیوتن بر روی چرخ برای دو اندازه مختلف از صفحات نفوذ مستطیلی شکل، انتخاب و هر آزمون سه بار تکرار شد. رفتار نمایی یکتایی برای تغییرات نشست- فشار در تمامی ترکیب‌های بار و سرعت پیشروی دیده شد که تقریباً به موازات یکدیگر پیش می‌روند. مبتنی بر مشاهدات تحقیق، از بین سه پارامتر n ، K_c و K_ϕ هم سرعت پیشروی و هم بار روی چرخ، اثر معنی‌داری در سطح ۱٪ بر دو پارامتر K_c و K_ϕ دارد در حالی که تغییرات پارامتر n مستقل از سطوح مختلف بار و سرعت پیشروی دیده شد و از سویی اثر متقابل بار-سرعت پیشروی معنی‌دار نیست. با افزایش بار عمودی و به تبع آن سخت‌تر شدن خاک، روند افزایشی در مصرف انرژی برای نفوذ صفحات به داخل خاک مشاهده شد و سرعت نفوذ صفحات با میزان انرژی مصرفی رابطه مستقیم نشان داد. سرعت در سطح ۵٪ تاثیر قابل توجهی بر مصرف انرژی دارد. واژه‌های کلیدی: تراکم خاک، معادله بکر، انرژی تغییر شکل خاک، چرخ، انباره خاک

Evaluation of the Effect of Forward Velocity and Vertical Wheel Load on the Parameters of Soil Deformation Equation and Deformation Energy in Soil Bin

Hadi Asadollahi¹, Behzad Mohammadi Alasti^{1*}, Aref Mardani², Mahdi Abbasgholipour¹

Received: 19 Oct 2022 Accepted: 25 Dec 2022

1- Department of Mechanical Engineering of Biosystems, Bonab branch, Islamic Azad University, Bonab, Iran

2- Department of Mechanical Engineering of Biosystems, Urmia University, Urmia, Iran

*Corresponding author: Behzad.alasti@gmail.com

Abstract

The mechanical parameters of soil have been used in several different perspectives to describe the mechanical behaviors of the soil-dynamic loads interaction, and Becker's equation is one of the most common methods. In this study, the effect of the speed of soil deformation and the load on wheel on the three parameters of the soil deformation equation as well as the deformation energy for soil deformation have been investigated. The tests were performed in the soil bin environment using a single-wheel tester and a Bevameter. Forward speeds of 0.5, 1, and 1.5 km/h as well as three vertical load levels of 2, 2.5, and 3 kN on the wheel for two different sizes of rectangular pressure plates, were selected. Each test was repeated three times. A same exponential behavior was observed for pressure-sinkage changes in all combinations of load and speed, which progress almost parallel to each other. Based on the research observations, among the three parameters n , K_c and K_ϕ , both the forward velocity and the load on the wheel have a significant effect at 1% level on the two parameters K_c and K_ϕ . While, the changes of the n parameter are independent of different levels of load and forward velocity. On the other hand, the load-velocity interaction effect was not significant. With the increase of vertical load, resulted in soil compaction, an increasing trend was observed for the energy of penetration of plates into the soil. The speed of penetration of plates showed a direct relationship with the amount of deformation energy. Velocity at 5% level has a significant impact on the soil deformation energy.

Keywords: Bekker's equation, Soil compaction, Soil deformation energy, Soil bin, Wheel

How to cite:

Asadollahi, H., Mohammadi Alasti, B., Mardani, A., and Abbasgholipour, M. 2023. Evaluation of the Effect of Forward Velocity and Vertical Wheel Load on the Parameters of Soil Deformation Equation and Deformation Energy in Soil Bin. *Journal of Agricultural Mechanization* 7 (3): 27-34.

۱- مقدمه

مکانیک خاک به‌عنوان یک رشته علمی بیش از یک قرن است که توسعه یافته است و با وجود گذشت سال‌ها، هنوز هیچ روش فراگیر و یکتایی برای تعریف و تعیین مدلی برای رفتار خاک وجود ندارد (Damian & Dudzinski, 2021). برهم‌کنش چرخ-خاک مباحثی شامل مکانیک درگیری تایلر-خاک، کشش مالبندی، مقاومت غلتشی و فشردگی خاک زراعی را در بر می‌گیرد. از جمله موضوعاتی که مطالعات گسترده‌ای در زمینه بهبود دینامیک تایلر-خاک را در پی داشته است، هندسه رد اثر چرخ و به‌دنبال آن، فشردگی خاک زراعی می‌باشد که به‌عنوان فاکتوری مهم در تعیین عملکرد ماشین و مصرف انرژی محسوب می‌شود (Battiato & Diserens, 2017). برای تدوین یک نظریه جامع از رفتار تراکم خاک و مقاومت غلتشی طی دیدگاه بکر، آزمایش فرورفتگی صفحه (PST)^۱ برای ارزیابی رفتار فرورفتگی خاک پیشنهاد شده است. در این روش صفحات مستطیلی، دایره‌ای یا بیضی شکل به عمق معینی به داخل خاک رانده می‌شوند و تنش حاصل از آن در مقابل مقدار نشست تجزیه و تحلیل می‌گردد. این روش برای پیش بینی مقاومت غلتشی و همچنین به‌عنوان یک آزمایش میدانی برای ارزیابی در جای خصوصیات تراکم خاک مانند استحکام خاک از نظر تنش پیش فشاری مورد استفاده قرار می‌گیرد (Ding et al., 2014). معادله (۱) یکی از رایج‌ترین راهکارها برای توصیف نشست خاک طی بار عمودی و فشار وارده بر خاک است که توسط بکر پیشنهاد شده است (Bekker, 1960).

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

که در آن، P مقدار فشار برحسب کیلوگرم بر سانتی‌متر مربع، K_c مدول چسبندگی خاک تغییر شکل یافته برحسب $(\text{Kg}/\text{mm}^{(n+1)})$ ، K_ϕ مدول اصطکاکی خاک تغییر شکل یافته برحسب $(\text{Kg}/\text{mm}^{(n+2)})$ ، n ضریب بدون بعد، Z مقدار نشست صفحه بارگذاری برحسب سانتی‌متر و b کوچک‌ترین بعد صفحه مستطیلی و یا قطر صفحه دایره‌ای برحسب سانتی‌متر است. از این رو، کار لازم برای نفوذ صفحه در خاک به‌صورت معادله (۲) است:

$$W_o = l \frac{(k_c + bk_\phi)}{n+1} \left[\frac{N}{l(k_c + bk_\phi)} \right]^{\frac{n+1}{n}} \quad (2)$$

که در این رابطه، علاوه بر پارامترهای پیشین، N و l هم به‌ترتیب بار عمودی و طول صفحه است. این دیدگاه علاوه بر خاک، برای محیط‌هایی مانند برف هم توسعه یافته است (Mähönen et al., 2021). پارامترهای معادله بکر طی مطالعاتی برای پیش‌بینی کشش عوامل خاک‌ورز نیز مورد استفاده قرار گرفته است (Bilanski & Esperance, 1990).

پارامترهای سه‌گانه K_c ، K_ϕ و n از یک دیدگاه، وضعیت مکانیکی خاک را توصیف می‌نمایند و از دیدگاه دیگر بر حسب مقدار چسبندگی خاک و یا شاخص مخروطی، شرایط مکانیکی خاک را نشان می‌دهند. پژوهشگران طی تحقیقی تلاش کردند پارامترهای سه‌گانه معادله بکر را در قالب مدلی با شاخص مخروط خاک مرتبط سازند (Mason et al., 2020; Edwards et al., 2017). Taghavifar & Mardani (2016) با استفاده از شرایط کنترل شده انباره خاک و آزمونگر تک چرخ، تأثیر پارامترهای تایلر بر مدیریت مصرف انرژی در ترامکانیک را ارزیابی کردند. آنها اثر سرعت، بار و فشار وارده بر انرژی و مقاومت غلتشی را در نظر گرفتند. در یک مطالعه تجربی، تأثیر پارامترهای تایلر بر مقاومت غلتشی و میزان انرژی مصرف شده برای تغییر شکل خاک مربوط به منطقه تماس تایلر با خاک مورد مطالعه قرار گرفت و به‌صورت خاص، مقاومت غلتشی چرخ در سرعت‌های پایین مستقل از سرعت پیشروی گزارش شد. هرچند طی همین تحقیق، به نتایج متفاوت دیگری از سایر پژوهش‌ها هم اشاره شده است (Taghavifar & Mardani, 2013). گزارش‌های اندکی برای گنجاندن تأثیر سرعت نفوذ در معادله بکر وجود دارد و اطلاعات اندکی در مورد تأثیر آن بر رابطه فشار-نشست در دسترس است. طی پژوهشی، تأثیر پارامترهای مستقل رطوبت، سرعت نشست و تعداد عبور بر سه پارامتر ثابت مدل بکر مورد بررسی قرار گرفت (Yang et al., 2018). محققین در تحقیق دیگری نشان دادند که رابطه معینی بین فشار روی خاک و نشست، برای سرعت‌های مختلف نفوذ و ابعاد مختلف صفحات نفوذ وجود دارد. همچنین، آنها ابراز داشتند که کار آنها می‌تواند به یافتن آزمایش مناسب برای اعتبارسنجی مدل تماس با خاک برای یک چرخ در شرایط کارکرد مشخص کمک کند. بکر بیشتر مقاومت غلتشی چرخ را از نظر مکانیکی به نشست و تغییر شکل خاک منسوب کرد (Mason et al., 2020; Edwards et al., 2017). با توجه به مرور پژوهش‌های پیشین، در این تحقیق از قابلیت تغییر سرعت نفوذ در خاک یک بوامتر در انباره خاک برای بررسی تأثیر سرعت نفوذ استفاده شده است و آزمایش‌ها در سرعت‌های نفوذ مختلف بر روی خاک انجام گردیده است.

۲- مواد و روش‌ها

با توجه به نیاز به دستیابی به داده‌های دقیق‌تر و شرایط کنترل شده تر، از انباره خاک به‌جای آزمایش‌های صحرائی استفاده شد. داده‌برداری‌ها با استفاده از یک سامانه اندازه‌گیری پارامترهای مکانیکی خاک به‌عنوان تجهیزاتی از انباره خاک و آزمونگر تک‌چرخ گروه مکانیک بیوسیستم دانشگاه ارومیه در کانال خاک با ابعاد ۲۴، ۲ و ۱ متر به‌ترتیب در ابعاد طول، عرض و ارتفاع کانال (شکل‌های ۱ و ۲) به انجام رسید (Mahboob & Mardani, 2021). این مجموعه، امکان نصب صفحات بکر برای آزمون‌های نفوذ در خاک را

¹ Pressure Sinkage Tests

دارای دقت ۰/۱ کیلوگرم و ۰/۱ میلی‌متر هستند. صفحات به شکل مستطیلی و در دو اندازه مختلف ساخته شده‌اند. ابعاد صفحات، ۷۰ × ۱۰۵ میلی‌متر و ۷۰ × ۱۷۵ میلی‌متر بود (شکل ۴). انباره خاک شامل خاکی با مشخصات جدول (۱) بود. به منظور داشتن شرایط خاک همگن، پیش از انجام آزمون‌های فشار، از ابزارهای خاصی از جمله چنگه، ماله و غلتک برای آماده‌سازی و فراوری بستر خاک در انباره خاک استفاده شد.



شکل ۳- سامانه بوامتر مورد استفاده در تحقیق
Fig 3. The used Bevameter in the research



شکل ۴- آزمایش نفوذ صفحات برای تعیین ثابت‌های مدل بکر
Fig 4. Pressure plates test for Bekker's equation

جدول ۱- مشخصات خاک مورد آزمایش در انباره خاک

مقدار	مشخصه
۳۵	شن
۲۲	سیلت
۴۳	رس
۴۳۵	شاخص مخروطی (kPa)
۳۲	زاویه اصطکاک داخلی (درجه)

آزمایش‌ها در سه سطح سرعت پیشروی ۰/۵، ۱ و ۱/۵ کیلومتر بر ساعت، سه سطح بار روی چرخ ۲، ۲/۵ و ۳ کیلو نیوتن و با استفاده از دو اندازه مختلف صفحات فشاری به ابعاد ۷۰ × ۱۰۵ و ۷۰ × ۱۷۵ میلی‌متر انجام شد. به عبارتی، آزمون صفحات پس از عبور چرخ و بر روی خط مرکزی مسیر چرخ انجام گرفته است. بررسی‌های

دارد. از یک الکتروموتور سه فاز ۳۰ اسب بخار برای تأمین حرکت حامل توسط سیستم کشش زنجیری انباره خاک استفاده شد. در مکانیزم بوامتر از یک نیروسنج S شکل با ظرفیت ۲۰۰ کیلوگرم استفاده گردید که پس از واسنجی، برای اندازه‌گیری پارامترهای خاک در بین صفحات فشاری و محور متصل به شانه قرار گرفت. نیروسنج به سیستم تحویل داده‌ها متصل شده است که از یک دیتالاگر، خط‌کش دیجیتال و یک لپ‌تاپ تشکیل شده بود. داده‌ها با فرکانس حدود ۸۰ هرتز به لپ‌تاپ منتقل شدند.



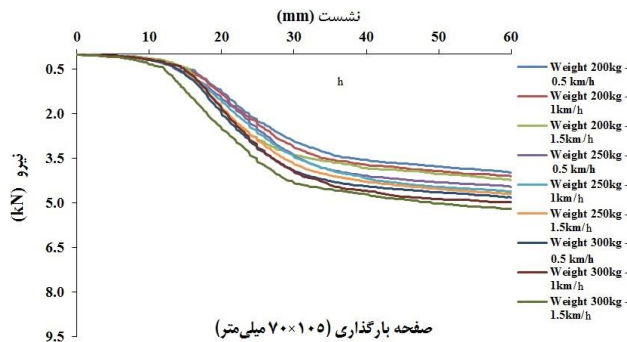
شکل ۱- مجموعه انباره خاک مورد استفاده در تحقیق
Fig 1. The collection of soil bin used in the research



شکل ۲- آزمونگر تک چرخ مورد استفاده در تحقیق
Fig 2. The used single wheel tester in the research

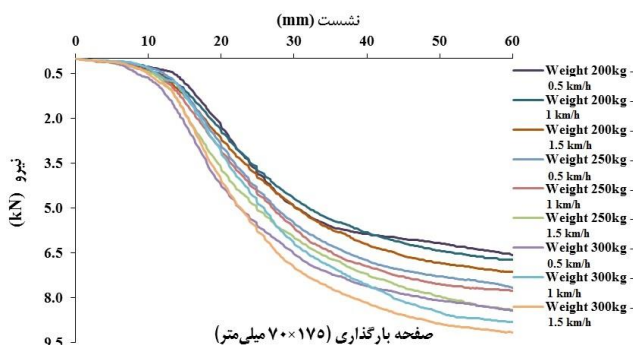
ساختار بوامتر مورد استفاده در اتصال به حامل انباره خاک در شکل (۳) نشان داده شده است. گشتاور الکتروموتور توسط یک سیستم اینورتر با سطح سرعت تنظیم شده به جعبه‌دنده منتقل می‌شود. توان خروجی جعبه دنده به یک چرخ‌دنده شانه‌ای منتقل می‌گردد که به یک محور عمودی متصل است. حرکت محور باعث ایجاد حرکت عمودی صفحات فشاری و نفوذ به داخل خاک می‌شود. نیروسنج، مقدار نیرو و خط کش دیجیتالی هم مقدار جابجایی را اندازه‌گیری و به سیستم جمع‌آوری داده ارسال می‌کنند که به ترتیب

در شرایط مختلف بار و سرعت پیشروی به دست آمده است. در تحقیق مشابهی، تغییر شکل خاک با دیدگاه تفکیک نمودارهای نیرو-تغییر شکل به دو ناحیه با شیب مختلف، مورد بررسی قرار گرفته است. در این تحقیق، تغییر در شیب نمودارها در قالب تغییر فاز تراکم شدن خاک در زیر صفحات به منطقه شکست خاک توصیف شده است به گونه‌ای که نشست خاک از حالت مستطیلی، به شکل مخروط درآمده و فشرده‌سازی جانبی و جریان جانبی خاک آغاز می‌شود (Earl & Alexandrou, 2001).



شکل ۵- نمودار نیرو-جابجایی تحت اثر تردد چرخ در سرعت‌ها و بارهای مختلف در صفحه ۷۰×۱۰۵ میلی‌متر

Fig 5. Force-displacement diagram at different velocities and loads for 70x105 mm plate



شکل ۶- نمودار نیرو-جابجایی تحت اثر تردد چرخ در سرعت‌ها و بارهای مختلف در صفحه ۷۰×۱۷۵ میلی‌متر

Fig 6. Force-displacement diagram at different velocities and loads for 70x175 mm plate

برای محاسبه مقادیر سه‌گانه پارامترهای خاک (K_c ، K_ϕ ، و n)، مبتنی بر معادله تغییر شکل بکر و لگاریتم گیری از طرفین معادله فشار- نشست عمل شده و برحسب عرض صفحات فشاری، در نهایت مقادیر پارامترهای سه‌گانه بکر محاسبه شد (Huang et al., 2016). مطابق روش متداول، داده‌های فشار-نشست صفحات بکر برای به دست آوردن مقادیر K_c ، K_ϕ ، و n مورد استفاده قرار گرفت. ستون‌های جدید داده‌ها برحسب لگاریتم طبیعی مربوط به ستون داده‌های فشار و نشست محاسبه و تشکیل گردید. در این مرحله، شیب معادلات خطی به دست آمده به عنوان مقدار پارامتر n خاک تعیین می‌گردد (شکل ۷). همچنین مقدار عرض از مبدأ نمودار خطی مربوط

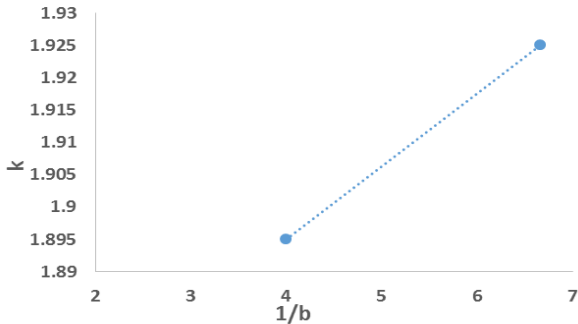
آماری در قالب یک طرح بلوک کاملاً تصادفی با سه تکرار برای هر ترکیب تیماری انجام شد. داده‌های تجربی با استفاده از نرم‌افزار SAS، مورد تحلیل قرار گرفت. تایر مورد استفاده در این تحقیق، یک تایر استاندارد با مشخصات (8) P.R HLF Barez 8.25-16 است که در آن مطابق کاتالوگ ارائه شده، عرض مقطع تایر ۲۲۰ میلی‌متر، نسبت شکل معادل ۸۰ (نسبت ارتفاع مقطع به عرض مقطع بر حسب درصد)، ساختار تایر بایاس و قطر رینگ ۱۶ اینچ است.

۳- نتایج و بحث

پس از تنظیم سطح سرعت حرکت پروب‌های دستگاه در هر آزمون، نفوذ تا عمق ۶۰ میلی‌متر انجام شد و به صورت همزمان، مقدار نیرو و عمق ثبت گردید. هر آزمایش در برگزیده یکی از سطوح سه‌گانه سرعت پیشروی و یکی از سه سطح بار عمودی بوده که برای هر یک از صفحات به صورت جداگانه تکرار شد. داده‌های نیرو بر حسب مساحت صفحه مورد استفاده در هر آزمایش به داده فشار تبدیل شده و در مقابل عمق نفوذ ترسیم شد. با استفاده از روش‌های شناسایی پارامتر خاک می‌توان وضعیت مکانیکی خاک‌های مورد بررسی را با استفاده از رابطه فشار-نشست توصیف کرد. بر اساس این رویکرد، ثابت‌هایی برای توصیف تغییر شکل خاک در اثر فشار ناشی از برهم‌کنش چرخ- خاک، تعیین شده و این توصیف، مبنایی برای پیش‌بینی پارامترهای کششی ماشین مانند مقاومت غلتشی می‌گردد. در همین راستا برای تعیین مقدار تغییر شکل و فشردگی خاک طی تردد چرخ، ساختار معادله تغییر شکل خاک مبتنی بر ملاحظات بکر به صورت نمودارهای نیرو-جابجایی توسط سامانه اندازه‌گیری مشخصات تغییر شکل خاک، اندازه‌گیری و ثبت شد. بر اساس راهکار بکر، برای محاسبه ضرایب معادله تغییر شکل خاک باید دست‌کم از دو صفحه بارگذاری با عرض یکسان و طول متفاوت استفاده کرد (Bekker, 1969). داده‌های ثبت شده توسط سامانه در شکل‌های (۵) و (۶) قالب نمودارهای نیرو-نشست ترسیم شد. داده‌های فشار-نشست حاصل از آزمایش‌ها و نمودارهای به دست آمده در یک بررسی اولیه، شامل مشخصات متداول و مورد انتظار بوده است به گونه‌ای که تغییرات نمایی نشست خاک طی افزایش بار را دنبال کرده و تطابق کلی با تحقیقات در این زمینه را نشان داد (Brunskill et al., 2011).

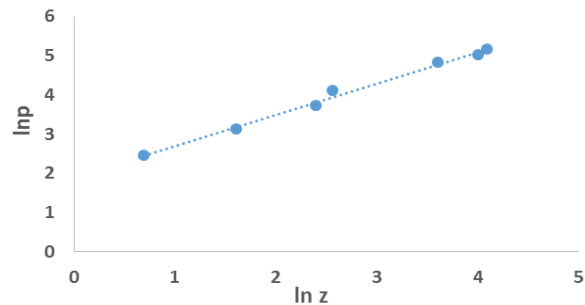
بر اساس نمودارهای ترسیم شده، در مرحله نخست نفوذ صفحات بارگذاری، یک ناحیه با شیب تند، تحت اثر تراکم خالص خاک ایجاد شده است. تراکم خالص در نمودارهای مربوط به چرخ در بازه عمق صفر تا ۳۰ میلی‌متر می‌باشد. پس از این ناحیه و با افزایش عمق نفوذ صفحات بارگذاری با توجه به منحنی‌ها، افزایش نشست خاک با شیب آرام‌تری ادامه یافته است. به عبارتی، انتشار تنش و تراکم خاک زیر چرخ در عمق‌های بیشتری روی داده است که صرف نظر از قابل پیش‌بینی بودن این موضوع از نظر کیفی، روند کمی این تغییرات هم

شکل ۸). مقادیر مربوط به هر سه پارامتر خاک در معادله بکر بر حسب آزمون‌های تجربی بعد از تردد هرکدام از چرخ‌ها به شرح جدول ۲ به دست آمده است.



شکل ۸- تعیین پارامترهای K_c ، K_ϕ بر حسب K و عرض صفحات
Fig 8. Determination of k_c and K_ϕ using K and $1/b$

به هر صفحه به عنوان مقدار K استخراج می‌گردد. در مرحله بعد با ترسیم نمودار K بر حسب مقادیر $1/b$ ، مقدار پارامترهای K_c ، K_ϕ به ترتیب در قالب شیب و عرض از مبدا این نمودار تعیین می‌گردد



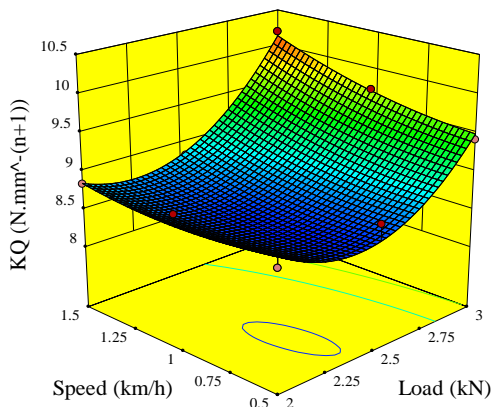
شکل ۷- تعیین مقدار n و K بر اساس داده‌های تجربی
Fig 7. Determination of n and K based on the experimental data

جدول ۲- مشخصات سه گانه به دست آمده از داده‌های فشار-نشست توسط دستگاه
Table 2. Triple Bekker's parameters obtained from pressure-sinkage tests

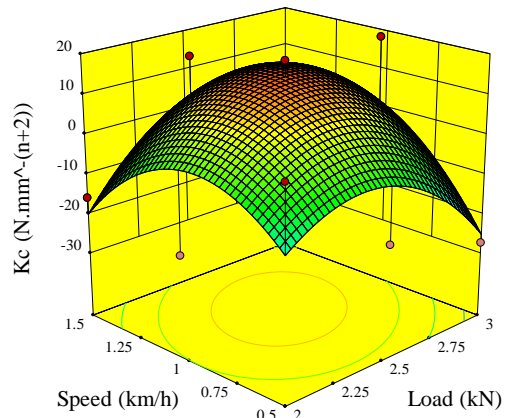
(-) n	K_c (N.mm ⁻⁽ⁿ⁺¹⁾)	K_ϕ (N.mm ⁻⁽ⁿ⁺²⁾)	سرعت (km/h)	بار (kN)
۱/۷۱	-۲۲/۶۲	۶/۶۲	۰/۵	
۱/۷۰	-۱۰۹/۱۳	۷/۵۳	۱	۲
۱/۶۹	-۱۱۶/۵	۷/۶۴	۱/۵	
۱/۷۲	-۱۸/۶۲	۶/۱۵	۰/۵	
۱/۷۱	-۹۴/۵	۷/۵۱	۱	۲/۵
۱/۷۳	-۱۰۴/۳۷	۸/۰۱	۱/۵	
۱/۷۵	-۱۴۷/۱۲	۸/۶۱	۰/۵	
۱/۷۴	-۲۸/۸۷	۷/۱۵	۱	۳
۱/۷۳	۴۶/۶۲	۶/۵۲	۱/۵	

نشان داده شده است. با توجه به این که مقدار n در خاک‌های زراعی در حدود ۱ تا ۱/۵ گزارش شده است، تبعیت معادلات به دست آمده از شرایط تقریباً خطی برای تغییرات نشست در برابر بار و سرعت، بر پایه معادله بکر قابل تفسیر و تأیید است (Bahrami et al., 2020).

به منظور درک بهتر تأثیر دو فاکتور متغیر بار و سرعت بر روی پارامترهای سه گانه به دست آمده پس از تردد چرخ‌ها بر روی خاک، نمودارهای سه بعدی مربوط به اثر فاکتورهای مورد بررسی در آزمون‌ها، بر ضرایب بکر (K_c ، K_ϕ و n) در شکل‌های ۹، ۱۰ و ۱۱

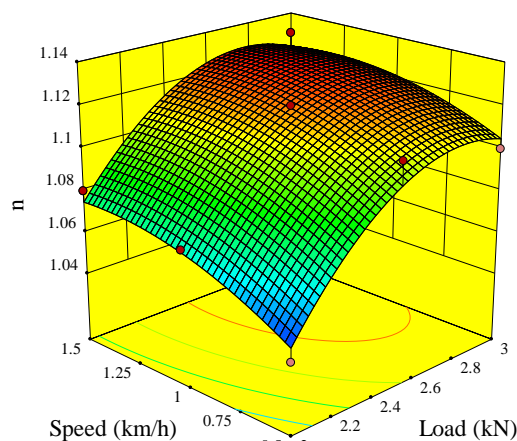


شکل ۱۰- اثر متقابل بار و سرعت چرخ بر ضریب K_ϕ بکر
Fig 10. The interaction effect of load and wheel speed on Becker's K_ϕ coefficient



شکل ۹- اثر متقابل بار و سرعت چرخ بر ضریب K_c بکر
Fig 9. The interaction effect of load and wheel speed on Becker's k_c coefficient

جدول ۳ تجزیه واریانس پارامترهای خاک تحت اثر دو پارامتر مستقل بار و سرعت را نشان می‌دهد. در جدول ۳، نتایج حاصله حاکی از آن است که هر دو پارامتر متغیر، اثر معنی‌داری در سطح ۱٪ بر دو پارامتر K_c و K_ϕ دارد. این در حالی است که پارامتر n رفتار متفاوتی نسبت به پارامترهای متغیر نشان داده است به صورتی که اثر بار در سطح ۱٪ معنی‌دار است و از سویی اثر سرعت و اثرات متقابل بار \times سرعت معنی‌دار نیست. این نتایج، تایید آماری روندی است که در نمودارهای رسم شده دیده می‌شود به طوری که نتایج نشان از تاثیر کم‌رنگ سرعت پیشروی بر مقدار n دارد که این روند در اثرات متقابل نیز غیر معنی‌دار مشاهده شده است. بار عمودی مطابق انتظار، تاثیر معنی‌داری بر تغییرات هر سه ثابت خاک داشته است. تأثیر بار بر پارامترهای مکانیکی خاک را می‌توان در قالب تغییر وزن مخصوص ظاهری خاک در نظر گرفت.



شکل ۱۱- اثر متقابل بار و سرعت چرخ بر ضریب n بکر

Fig 11. The interaction effect of load and wheel speed on Becker's n coefficient

جدول ۳- تجزیه واریانس مقایسه پارامترهای سه‌گانه بکر بین بر مبنای طرح کاملاً تصادفی

Table 3. ANOVA for Becker's three parameters based on a completely random design

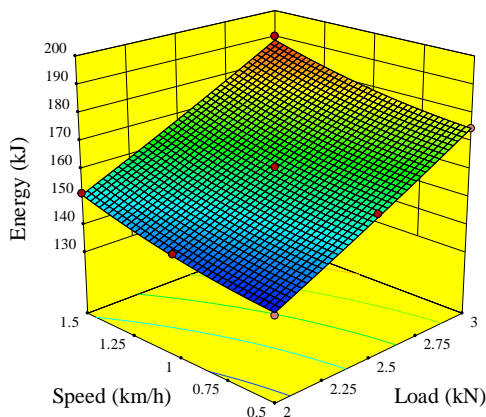
منابع تغییرات	درجه آزادی	میانگین مربعات	K_ϕ (N.mm ⁻⁽ⁿ⁺²⁾)	K_c (N.mm ⁻⁽ⁿ⁺¹⁾)	n
بار	۲	۰/۰۱۱۲**	۵۶۶/۳۹**	۳۴۶۰/۵۸**	
سرعت	۲	ns/۰/۰۰۳	۵۲۰/۶۹**	۴۲۸/۷۵**	
بار \times سرعت	۴	ns/۰/۰۰۰۴	۴۶۷/۱۴**	۱۴۷۹۰/۸۲**	
ضریب تغییرات (CV)		۰/۷۰۹	۰/۸۲	-۱/۰۹	

** معنی‌داری در سطح احتمال یک درصد می‌باشد. * معنی‌داری در سطح احتمال پنج درصد می‌باشد.

تردد چرخ در بار ۲ کیلونیوتن و سرعت ۰/۵ کیلومتر بر ساعت، کمترین انرژی مصرفی و در بار ۳ کیلونیوتن و سرعت ۱/۵ کیلومتر بر ساعت، بیشترین انرژی مصرفی لازم برای نشست صفحات، اندازه‌گیری شده است. در واقع انرژی مصرفی برای نشست صفحات بارگذاری، با تردد چرخ که یک عامل غیرطبیعی در تراکم خاک است، افزایش یافته است. افزایش بار عمودی در سطوح پایین‌تر سرعت پیشروی، تاثیر بیشتری بر افزایش انرژی تغییر شکل خاک داشته است (شکل ۱۳). با عبور چرخ در سطوح مختلف بار عمودی، سطوحی مختلف از تراکم خاک پدیدار می‌گردد که از نظر انرژی لازم برای تغییر شکل یکسان، با یکدیگر متفاوت هستند. تاثیر سرعت نفوذ بر انرژی تغییر شکل خاک در خاک سخت‌تر (با بار عمودی بیشتر) مشهودتر است. البته این روند بیشتر در بررسی عمق‌های بالاتر صادق است به طوری که برای عمق‌های تا ۳۰ میلی‌متر، سرعت تغییر شکل خاک، تاثیر چندانی بر انرژی تغییر شکل خاک نداشته است و این روند در پژوهش دیگری نیز تأیید شده است (Huang *et al.*, 2016).

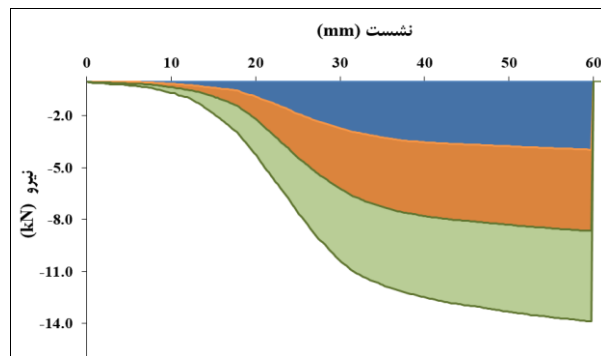
در ادامه بررسی‌ها، اثر پارامترهای مستقل بار و سرعت پیشروی بر پارامتر انرژی تغییر شکل خاک در نظر گرفته شد و بر اساس داده‌های تجربی نیرو-جابجایی ثبت شده توسط سامانه اندازه‌گیری مشخصات تغییر شکل خاک، به بررسی اثر عبور چرخ‌ها از دیدگاه انرژی مصرفی پرداخته شد. با پیگیری داده‌ها در محیط نرم‌افزار اکسل و محاسبه سطح زیر نمودارهای نیرو-جابجایی، انرژی مصرفی هر کدام از صفحات به صورت تجمعی در بازه‌های صفر تا ۶۰ میلی‌متر استخراج گردید (شکل ۱۲). این انرژی در واقع شاخصی از وضعیت مکانیکی خاک پس از عبور هر یک از چرخ‌ها است و مقدار انرژی مورد نیاز برای ایجاد تغییر شکل یکسان در خاک را نشان می‌دهد. مقادیر اندازه‌گیری شده انرژی مصرفی برای نشست صفحات پس از عبور چرخ بادی در جدول ۴ گزارش شد.

انرژی لازم برای تغییر شکل خاک در بیشتر دیدگاه‌های مربوط به برهم کنش چرخ و خاک به عنوان سرچشمه اصلی مقاومت غلتشی تعبیر شده است (Taghavifar & Mardani, 2014). نتایج حاصله نشان می‌دهد با افزایش بار و سرعت، انرژی لازم برای نشست صفحات تا عمق ۶۰ میلی‌متری روند افزایشی دارد به طوری که برای نفوذ صفحات بکر تا عمق ۶۰ میلی‌متری، پس از



شکل ۱۳- اثر متقابل بار و سرعت چرخ بر مقدار انرژی لازم برای تغییر شکل خاک

Fig 13. The interaction effect of load and speed on the deformation energy



شکل ۱۲- شماتیکی از نحوه محاسبه انرژی مصرفی لازم برای نشست صفحات در قالب سطح زیر نمودار نیرو-نشست

Fig 12. Schematic of how to calculate the required energy consumption for the sinkage of the plates in the form of the surface under the force-sinkage diagrams

جدول ۴- مقدار انرژی لازم برای نشست صفحات در هر آزمون چرخها برحسب (kJ)

Table 4. The amount of energy required for the plates in each wheel test (kJ)

مقدار انرژی لازم برای نشست صفحات در هر آزمون (kJ)	سرعت (km/h)	بار (kN)
۱۳۶/۴۳	۰/۵	
۱۴۲/۷۵	۱	۲
۱۵۱/۵۵	۱/۵	
۱۵۶/۶۹	۰/۵	
۱۶۱/۰۶	۱	۲/۵
۱۶۷/۴۱	۱/۵	
۱۷۴/۸۵	۰/۵	
۱۷۸/۳۸	۱	۳
۱۹۰/۱۸	۱/۵	

۴- نتیجه گیری نهایی

وابسته به سرعت پیشروی چرخ بود. از طرفی بررسی انرژی تغییر شکل خاک به عنوان شاخص اصلی تعیین کننده مقاومت غلتشی خاک، حاکی از رابطه ای تقریباً خطی در برابر تغییرات سرعت پیشروی بوده است. تعدد متغیرهای حاکم بر سیستم خاک-چرخ، چالش اصلی بررسی ثابت های معادله بکر است که علاوه بر سرعت پیشروی و بار روی چرخ، شامل برخی عوامل دیگر مانند رطوبت خاک، بافت و ساختمان خاک نیز بوده و علاوه بر این، همه عوامل مورد اشاره ممکن است در یک تأثیر متقابل پیچیده با یکدیگر نیز ظاهر شده و از این رو مطالعات بیشتری را می طلبد.

تمهید معادله بکر یکی از رایج ترین راهکارها برای مدل کردن رفتار خاک در برابر بارهای دینامیک است اما این معادله در ساختار و ملاحظات مربوط به کاربرد خود، شامل پارامترهای دینامیک تغییر شکل مانند سرعت نشست خاک نیست. از این رو طی این پژوهش، تأثیر سرعت حرکت و بار عمودی روی یک چرخ بر تغییرات پارامترهای سه گانه معادله بکر در محیط انباره خاک بررسی شده است. بر اساس نتایج به دست آمده مقدار نمای معادله تغییر شکل خاک (n) مستقل از سرعت پیشروی و یا به عبارتی سرعت تغییر شکل خاک مشاهده شد در حالی که دو ثابت دیگر (K_c و K_ϕ)

منابع

- Bahrami M., Naderi-Boldaji M., Ghanbarian D., Ucgul M. and Thomas Keller, (2020). *Simulation of plate sinkage in soil using discrete element modelling: Calibration of model parameters and experimental validation*. Soil and Tillage Research. 203(2020):104700.
- Battiato, A. and Diserens, E. (2017). *Tractor traction performance simulation on differently textured soils and validation: A basic study to make traction and energy requirements accessible to the practice*. Soil and Tillage Research. 166 (3): 18–32.
- Bekker, M.G. (1960). *Off road locomotion*. Research and development in terramechanics. Ann Arbor, Michigan, USA: The University of Michigan Press.
- Bekker, M.G. (1969). *Introduction to terrain-vehicle systems*. Ann Arbor (MI, USA): University of Michigan Press.
- Bilanski, W.K. and Esperance, A.L.L. (1990). *An investigation of the bevameter soil physical measurements in the prediction of soil tool draft*. Journal of Terramechanics. 27(1): 41–50.
- Brunskill, C., Patel, N., Gouache, T.P., Scott, G.P., Saaj, C.M., Matthews, M. and Cui, L. (2011). *Characterization of Martian soil simulants for the ExoMars rover testbed*. Journal of Terramechanics. 48(6): 419–438.
- Damian S., Dudziński, P. A. (2021). *Soil shear strength determination methods – State of the art*. Soil and Tillage Research. 208(2021): 104881.
- Ding, L., Gao, H., Deng, Z., Li, Y. and Liu, G. (2014). *New perspective on characterizing pressure-sinkage relationship of terrains for estimating interaction mechanics*. Journal of Terramechanics. 52(5): 57–76.
- Earl, R. and Alexandrou, A. (2001). *Deformation processes below a plate sinkage test on sandy loam: experimental approach*. Journal of Terramechanics. 38(3):153–162.
- Edwards, M. B., Dewoolkar, M. M., Huston, D. R., and Creager, C. (2017). *Beviameter testing on simulant Fillite for planetary rover mobility applications*. Journal of Terramechanics. 70: 13–26.
- Huang, H., Li, J., Chen, B., Wu, B., and Zou, M. (2016). *Performance evaluation of a wire mesh wheel on deformable terrains*. Journal of Terramechanics, 68: 9–22.
- Mahboob Yengejeh H. and Mardani A. (2021). *Design and Fabrication of a Beviameter for Measuring the Soil Deformation Details*. Iranian Journal of Biosystem Engineering. 52(3): 487–498 (In Persian).
- Mahonen J., Lintzen N. and Casselgren J. (2021). *Portable beviameter for measuring snow properties in field*. Cold Regions Science and Technology. 182(2021): 103195.
- Mason, G. L., Salmon, J. E., McLeod, S., Jayakumar, P., Cole, M. P., and Smith, W. (2020). *An overview of methods to convert cone index to beviameter parameters*. Journal of Terramechanics. 87: 1–9.
- Taghavifar H, Mardani, A. (2013). *Investigating the effect of velocity, wheel load and inflation pressure on rolling resistance of radial ply tire*. Journal of Terramechanics. 50(3): 99–106.
- Taghavifar, H. and Mardani, A. (2014). *Analyses of energy dissipation of run-off-road wheeled vehicles utilizing controlled soil bin facility environment*. Energy. 66(3): 973–980 .
- Taghavifar H, Mardani A. (2016) *Off-road Vehicle Dynamics: Analysis, Modelling and Optimization*. Springer: Mechanical Engineering, Switzerland.
- Yang, C., Yang, G., Liu, Z., Chen, H. and Zhao, Y. (2018). *A method for deducing pressure-sinkage of tracked vehicle in rough terrain considering moisture and sinkage speed*. Journal of Terramechanics. 79(3): 99–113.



This is an open access article under the CC BY NC license (<https://creativecommons.org/licenses/by-nc/2.0/>)