اندازه‌گیری و ثبت پارامترهای مرتبط با سختی خاک در محیط انباره خاک

هوشنگ محبوب ینگجه[۱]، عارف مردانی کرانی[۲]

[۱]دانشجوی دکتری مهندسی مکانیک بیوسیستم، دانشگاه ارومیه؛ (h.mahboub@urmia.ac.ir)
[۲] دانشیار گروه مهندسی مکانیک بیوسیستم، دانشگاه (a.mardani@urmia.ac.ir)

چکیده

محققان زیادی تلاش کرده‌اند سامانه‌ها و روابط جامع در محیط‌های مختلف برای محاسبه پارامترهای مکانیکی ناشی از تعامل خاک و ابزار درگیر با خاک را ارائه دهند. نظر به این‌که مطالعات در محیط‌های صحرایی در این زمینه با هزینه‌های فراوان و همچنین عوارض زیست‌محیطی گوناگون همراه است، آزمایش‌های وسیع به‌صورت صحرایی محدودشده و عمدتاً به‌صورت آزمایشگاهی با شرایط نزدیک به شرایط صحرایی می‌شود. هدف این تحقیق، طراحی و ساخت سامانه اندازه‌گیری پارامترهای خاک بوده، به‌گونه‌ای که دارای ویژگی‌هایی کاربردی باشد مانند قابلیت اتصال پروب‌های گوناگون (انواع صفحات بکر، شاخص مخروطی، تایر سگمنت و آزمون نفوذپذیری چرخ در خاک) باشد، اساس کار این سامانه، از طریق روابط فشار- نشست خاک است که یکی از شناخته‌شده‌ترین روش‌ها برای تعیین پارامترهای خاک و سنجش قابلیت حرکتی وسیله نقلیه بوده و توسط بکر ارائه‌شده است. برای ارزیابی کار این سامانه از صفحات بکر جهت تعیین خصوصیات مکانیکی خاک ازجمله (K_c،K_ϕ وn) استفاده‌شده است. برای آزمون و ارزیابی عملکرد دستگاه، آزمایش‌هایی در محیط انباره خاک با خاکی از نوع لومی-رسی با سه تکرار برای صفحات مستطیلی استاندارد پیشنهادی بکر، طرح‌ریزی و انجام شد. نتایج آزمایش‌ها برای ارزیابی کار دستگاه حاکی از عملکرد قابل‌قبول آن بوده است.

کلمات کلیدی: بارگذاری خاک، پارامترهای خاک، معادله بکر، انباره خاک.

Measurement and recording of parameters related to soil hardness in soil storage

Houshang Mahboub Yangeje[1], Aref mardani Korani [2]

[1]PhD student of Mechanical Bio System Engineering, Urmia University, h.mahboub@urmia.ac.ir
[2]Aref mardani Korani, Department of Mechanical Bio System Engineering, Urmia University, a.mardani@urmia.ac.ir

ABSTRACT

Many researchers have tried to provide comprehensive systems and interconnections in different environments to calculate the mechanical parameters due to soil interaction and the tools involved with the soil. Due to the fact that studies in field conditions are associated with many costs and various environmental impacts, extensive experiments are limited to field experiments, mainly in a laboratory with near-field conditions. The purpose of this research was to design and construct a soil parameters measurement system in such a way that it has the features that are applicable such as the interconnection of various probes (different types of plate, cone index, segment tire and wheel permeability test in soil) Force Gauges to test different (load cells with different load capacity). The basis of this system is through Soil subsidence-pressure relationships, one of the most well-known methods for determining soil parameters and measuring vehicle mobility, and is provided by Becker. To evaluate the work of this system, the plates have been used to determine the mechanical properties of the soil (Kø, Kc and n). To test and evaluate the performance of the device, experiments were carried out in a soil storage environment with a loamy-Clay soil with three replications for Baker's standard rectangular plates. The results of the experiments to assess the work of the device showed a satisfactory performance.

Keywords: Loading soil, Soil parameters, Baker's equation, soil storage.

۱- h.mahboub@urmia.ac.ir

۱- مقدمه

پارامترهای خاک یکی از مهم‌ترین و بنیادی‌ترین مسئله‌ها در علم مکانیک خاک درزمینه کشاورزی دقیق و مدیریت عبور و مرور ادوات و ماشین‌ها بر روی خاک است. پیشرفت درزمینه کشاورزی دقیق به حدی رسیده است که به کشاورز اجازه می‌دهد تغییرات درون مزرعه که وجود آن از قبل شناخته‌شده ولی قابل اداره نبود را سنجش، تحلیل و مدیریت نماید. از این طریق ویژگی‌های خاک مزرعه، یکی از ملزومات کشاورزی دقیق در مزرعه است. توانایی در اداره تغییرات حاصلخیزی و ویژگی‌های خاک درون مزرعه و بیشینه نمودن محصول همواره مدنظر کشاورزان، به‌ویژه در کشاورزی با منابع ارضی محدود بوده است. ابداع و توسعه ریزپردازنده‌ها و دیگر فناوری‌های الکترونیک در سال‌های اخیر، ابزاری جدید را فراهم ساخته است تا کشاورزان را در رسیدن به این هدف یاری رساند. پیش‌بینی عملکرد برهمکنش چرخ- خاک بخشی از دانش ترامکانیک است، که برای طراحی مکانیکی، ارزیابی، بهینه‌سازی، شبیه‌سازی دینامیک، شناسایی پارامترهای خاک، کنترل حمل‌ونقل و مسیر حرکت و حتی به برنامه‌ریزی مسیر برای مریخ‌نوردها دارای اهمیت زیادی است (Ding et al., 2011). پارامترهای مقاومت برش خاک به‌عنوان اساس توسعه مکانیک خاک برگرفته از معادله کلمب است (Coulomb et al., 1773). ماشین‌های غیر جاده‌ای باعث ایجاد تنش دینامیکی در خاک‌های سست و فشرده می‌شوند و این تنش‌ها معمولاً در نرخ بالایی صورت می‌گیرد (Reece et al., 1977).

پیش‌بینی حالت‌های فشار برای هر یک از ماشین‌های غیر جاده‌ای توسط نظریه‌های سنتی مکانیکی خاک به‌اندازه کافی قابل پیش‌بینی نیست، بنابراین برای مطالعه هر سیستم ماشین غیر جاده‌ای، در دست داشتن مقدار پارامترهای مکانیک خاک ضروری است. مقاومت به نفوذ خاک و تنش برشی در بین پارامترهای خاک پارامتری هستند که از طرفی با محدود کردن پتانسیل مزرعه‌ای بر رشد گیاه و از طرف دیگر با محدود کردن پتانسیل کششی بر قابلیت حرکت وسیله نقلیه اثر می‌گذارند(Bowen et al., 1988). طی نخستین تلاش‌ها، برنشتاین یک مدل تجربی به نام صفحات بارگذاری ارائه کرده است که مبتنی بر رابطه فشار-نشست جهت آزمایش و ارزیابی رفتار خاک بنانهاده شده است. وی معادله (۱) را در این زمینه ارائه کرد (Bernstein et al., 1913). گوریچن مدل فشار-نشست برنشتاین را به شرح معادله (۲) اصلاح کرد (Goriatchkin et al., 1936). بکر با تغییر مدل برنشتاین و گوریچن، جهت توسعه روابط فشار-صفحات بارگذاری برای خاک همگن به بهره‌گیری از دستگاه بوامتر پرداخت و معادله (۳) را ارائه داد (Bekker et al., 1956).

$$z = k\sqrt{p} \qquad (۱)$$

$$\mathbf{p = k_1 . z^n} \qquad (۲)$$

$$P = \left(\frac{Kc}{b} + K\varphi\right) z^n \qquad (۳)$$

در روابط بالا: z نشست صفحات بارگذاری و بر حسب (cm)، p فشار اعمال‌شده و بر حسب (kg/cm^2)، k ضریب تغییر شکل خاک، k_1 سختی خاک K_c ، K_φ و n پارامترهای فشار نشست هستند. K_c مدول چسبندگی خاک تغییر شکل یافته برحسب ($Kg/cm^{(n+1)}$) و K_φ مدول اصطکاکی خاک تغییر شکل یافته برحسب ($Kg/cm^{(n+2)}$)، n ضریب بدون بعد، z مقدار نشست صفحه بارگذاری(cm) و b کوچک‌ترین بعد صفحه برحسب (cm) ست.

هدف این تحقیق طراحی و ساخت سامانه و ارزیابی و تعیین پارامترهای خاک است. اساس کار با این سامانه بر این است که از طریق روابط فشار-نشست که یکی از شناخته‌شده‌ترین روش‌ها برای تعیین پارامترهای خاک و سنجش قابلیت حرکتی وسیله نقلیه است و توسط بکر ارائه‌شده است، پارامترهای مکانیکی خاک k_c، k_φ و n به کمک دستگاه سامانه اندازه‌گیری می‌شوند. همچنین دستگاه قابلیت اندازه‌گیری شاخص مخروطی CI را دارا است که با نصب هد مخصوص به سیستم، شاخص مخروطی را نیز اندازه‌گیری می‌کند. سامانه طراحی و ساخته پیش‌بینی‌شده دو کار را انجام می‌دهد، ۱-اندازه‌گیری تغییرات نیروی عمودی نسبت به زمان، ۲-اندازه‌گیری تغییرات جابه‌جایی نسبت به زمان. درواقع این سامانه برای رصد کردن اتفاقات عمودی ابزارهای درگیر با خاک مورداستفاده قرار می‌گیرد. سامانه اندازه‌گیری خواص مکانیکی شامل شاسی اصلی، صفحات بارگذاری و هد مخروطی، الکتروموتور و سیستم الکتریکی و الکترونیکی، سیستم اندازه‌گیری نیرو (لودسل)، سیستم اندازه‌گیری جابجایی با دقت بالا و سیستم تفسیر داده‌برداری است. همچنین برای ارزیابی کار دستگاه صفحات بارگذاری مورداستفاده قرار گرفت. برای انتخاب شکل و طرح صفحات بارگذاری از استانداردها و آزمایش‌های عملی در این زمینه استفاده می‌شود تا مقدار درستی و صحت اندازه‌گیری آن برسی شود.

۲- مواد و روش‌ها

سامانه طراحی و ساخته‌شده در این تحقیق یک بوامتر است، ازجمله وسایل اندازه‌گیری مقاومت و تعیین پارامترهای خاک بوامتر است که اولین بار توسط بکر ابداع شد. ابعاد سامانه طراحی‌شده به ترتیب طول، عرض و ارتفاع ۹۰×۱۳۰×۲۰۰ سانتی‌متر را دارا بوده است.

دستگاه اندازه‌گیری پارامترهای مکانیکی خاک از دو قسمت بخش‌های مکانیکی، بخش‌های الکتریکی و الکترونیکی تشکیل‌شده است، که هر

یک از این بخش‌ها در ارتباط با یکدیگر هستند.

بخش‌های مکانیکی: متشکل از شاسی، گیربکس، چرخ‌دنده شانه‌ای، پوسته، شفت، جک یک‌طرفه، قاب چرخ‌دنده شانه‌ای و پروب‌های آزمایش است. نحوه عملکرد بخش مکانیکی دستگاه به این صورت است، که توسط مکانیسم چرخ‌دنده شانه‌ای، حرکت دورانی از گیربکس به حرکت خطی تبدیل می‌گردد. که حرکت عمودی برای اعمال بار بر روی پروب‌های آزمایشی استفاده می‌شود.

شاسی برای تحمل بارهای مکانیکی و جایگیری دقیق قطعات و مکانیسم‌ها و نگهداری سیستم انتقال قدرت، پروب‌های آزمایشی و خط‌کش دیجیتال طراحی‌شده است. ازجمله پارامترهایی که در ابعاد شاسی دخیل هستند عبارت‌اند از، حرکت افقی دستگاه و تحمل حداکثر نیروی وارده از پروبی که حداکثر نیرو را وارد می‌کند، زیرا در این سامانه بارهای مختلف جهت اعمال به پروب‌ها پیش‌بینی‌شده است به‌طوری‌که قابلیت اتصال پروب‌های مختلف بر روی دستگاه برای نصب و آزمون ابزارهای گوناگون مهیا باشد. شاسی متشکل از دو بخش است، و از نبشی با شماره استاندارد ۸ و از جنس فولاد St50 ساخته‌شده است و ابعاد کلی شاسی ۷۸×۴۰×۲۰۰ سانتی‌متر است. مجموعه قطعات روی شاسی به یکدیگر متصل شده است و این مجموعه جهت تأمین امکان پوشش کل سطح خاک در جهت عرض کانال دارای قابلیت جابجایی روی شاسی زیرین است. شاسی زیرین هم به کریر سویل‌بین جوش‌خورده و این دو قسمت از شاسی (شاسی بالایی و شاسی زیرین) توسط گیره و پیچ و مهره به هم متصل شده‌اند و قابل جدا شدن هستند.

سیستم انتقال توان متشکل از گیربکس و چرخ‌دنده شانه‌ای است که در شکل (۱) نشان داده‌شده است. گیربکس باکم و زیاد کردن نسبت دور توسط مکانیسم داخل گیربکس، گشتاور و دور موردنیاز دستگاه را فراهم می‌سازد. در اینجا گیربکس موردنظر جهت تأمین دورهای مختلف برای سرعت چرخ‌دنده شانه‌ای که محرک عامل آزمون است استفاده می‌شود و دارای سه دنده با نسبت کاهنده ۶، ۱۲و ۱۹ است، تا سرعت خطی عامل آزمون را دریک محدوده دور الکتروموتور فراهم سازد. همچنین یکی دیگر از مکانیسم‌هایی که در این دستگاه استفاده‌شده، چرخ‌دنده شانه‌ای است و متشکل از یک چرخ‌دنده ساده و یک چرخ‌دنده شانه‌ای است. بخش‌های دیگر دستگاه است که از این قسمت برای درگیری دقیق چرخ‌دنده و چرخ‌دنده شانه‌ای با رعایت لقی و تلورانس مناسب و همچنین کمک به حرکت خطی شانه‌ای استفاده می‌شود. علت استفاده از شفت و پوسته جک یک‌طرفه در این مکانیسم برای این است که یک راهنما برای حرکت خطی چرخ‌دنده شانه‌ای باشد، چون در طراحی حرکت شفت در داخل سیلندر لازم است جابجایی خطی با دقت زیاد مهیا شده باشد.

Figure 1. Real View of Power Transmission System (R), Power Transmission Designed at Salidworks(Left).
شکل ۱ - نمای واقعی از سیستم انتقال توان (راست)، سیستم انتقال توان طراحی‌شده در سالیدورکس (چپ).

پروب‌های آزمایش مختلفی را می‌توان بر روی دستگاه نصب کرد. ازجمله این پروب‌ها می‌توان صفحات بکر، شاخص مخروطی، ابزار آزمون نفوذپذیری چرخ در خاک و تایر سگمنت را نام برد. برای ارزیابی کار دستگاه در این تحقیق صفحات بارگذاری بکر در نظر گرفته شد. ازآنجاکه شکل صفحات بارگذاری روی مقادیر پارامترهای فشار-نشست تأثیر دارد نسبت طول به عرض صفحه‌های بارگذاری به‌صورت استاندارد در محدوده ۱/۴-۶ در نظر گرفته‌شده، که مشابه با الگوهای اصطلاحی فشار-نشست بکر است (Van et al., 2008). صفحات مستطیل شکل و باضخامت ۱/۲ سانتی‌متر در دودسته، دسته اول ۱۷/۵×۷ و ۲۵×۱۰ سانتی‌متر که نسبت طول به عرض ۲/۵ و دسته دوم ۱۰/۵×۷ و ۱۵×۱۰سانتی‌متر و نسبت طول به عرض ۱/۵ طراحی‌شده‌اند که در شکل (۲) نمایش داده‌شده است. همچنین ازآنجایی‌که فشار وارد از طرف وسایل نقلیه غیر جاده‌ای بر سطح خاک معمولاً از ۱/۰۳ کیلوگرم بر سانتیمتر مربع بیشتر نمی‌شود، و این فشار حداکثر تا عمق ۵۰ سانتیمتر از سطح زمین تأثیرگذار است، وسایل اندازه‌گیری روابط فشار- نشست برای فشار ۱/۰۳ کیلوگرم بر سانتیمتر مربع و نشست ۵۰ سانتیمتر در نظر گرفته می‌شوند. از شرایط مهم دیگر آزمایش، سرعت نفوذ صفحه بارگذاری به خاک است که باید بین ۲/۵ تا ۵ سانتیمتر بر ثانیه باشد(Wong et al., 2001).

Figure 2. View of the Bekker pages installed on the device probe.
شکل ۲ - نمایی از صفحات بکر نصب شده بر روی پروب دستگاه

بخش الکتریکی و الکترونیکی: دستگاه بوامتر شامل الکتروموتور، اینورتور، لودسل، خط‌کش دیجیتال و دیتالاگر است. وظیفه مجموعه الکتریکی و الکترونیکی کنترل سیستم اعمال نیرو به خاک و سنجش داده‌ها، پردازش و ثبت داده‌های اندازه‌گیری است.

برای راه‌اندازی سامانه و تأمین نیروی محرکه لازم، توان توسط یک الکتروموتور فراهم می‌شود که روی شاسی با چهار پیچ و مهره M10 نصب و با گیربکس از طریق کوپل رابط، متصل شده است. توان اسمی الکتروموتور ۷/۵ اسب بخار(۵/۵ کیلووات) و دور در شفت خروجی ۱۴۳۰دور بر دقیقه است در شکل (۱) نشان داده‌شده است. برای کنترل سرعت دورانی خروجی الکتروموتور از اینورتور ۵.۵ کیلووات بانام تجاری LS ساخت شرکت LG محصول کشور کره جنوبی استفاده‌شده، که امکاناتی همچون سهولت در کاربری رادار است. این نوع اینورتور کنترل موتور را به‌صورت برداری بدون سنسور، کنترل ولتاژ و فرکانس انجام می‌دهد. در این درایو قابلیت شناسایی پارامترهای موتور به‌صورت خودکار تعبیه‌شده است. گشتاور پرقدرت در همه سرعت‌ها از دیگر امکانات این سری است. دامنه فرکانس خروجی درایو بین ۰/۱Hz تا ۴۰۰Hz قابل‌تغییر است و فرکانس حامل ۱ تا ۱۵کیلوهرتز رادار است. این درایو دارای امکاناتی همچون نمایش ۵ خطای آخر، درجه حفاظتی IP20، قابلیت تنظیمات گشتاور به‌صورت دستی و خودکار، دارای ورودی آنالوگ، دارای PID کنترلی است. بخش اندازه‌گیری نیروی وارده بر پروب یک لودسلS شکل با ظرفیت کاری ۲۰۰ و ۱۰۰ کیلوگرم و دقت ۰/۲ کیلوگرم بوده است که جهت انواع آزمایش‌ها تهیه‌شده است. لودسل از یک سمت، به شفت جک متصل شده، و از سمت دیگر به پروفیل رابط متصل می‌شود. با توجه به این‌که بیشترین نیروی وارد بر صفحه بارگذاری در محدوده ۵۰ تا ۳۵۰ کیلوگرم پیش‌بینی‌شده است، لودسل باید قادر به سنجش این مقدار نیرو با کمترین خطا باشد، بنابراین استفاده از لودسل‌های با ظرفیت ۲۰۰ و ۱۰۰ کیلوگرم که قابل تعویض هستند روی دستگاه برای آزمایش‌های مختلف پیش‌بینی‌شده است.

از یک خط‌کش دیجیتال برای تعیین میزان تغییر شکل خاک استفاده‌شده است. سیستم سنجش جابجایی خط‌کش دیجیتال مدل MLC320 و ساخت ترکیه از نوع مغناطیسی و طول اندازه‌گیری ۴۰ سانتیمتر است که حداکثر سرعت حرکت آن ۳۰۰cm/s بوده و دقت تکرارپذیری آن ±۱ پالس است. برای اتصال خط‌کش بر روی دستگاه و اندازه‌گیری فاصله، قسمت متحرک خط‌کش به صفحه سر متحرک دستگاه متصل شده تا با حرکت شفت جک به سمت پایین قسمت لغزنده خط‌کش نیز جابجا شود. در شکل (۳) خط‌کش دیجیتال مورداستفاده در دستگاه نشان داده‌شده است که جهت اندازه‌گیری میزان جابجایی صفحه بارگذاری مورداستفاده قرارگرفته است. داده‌برداری با استفاده از یک دیتالاگر ۱۰ کاناله باقابلیت اتصال لودسل و خط کش دیجیتال به انجام می‌رسد. داده‌ها را بر روی حافظه جانبی و یا مستقیماً به کامپیوتر منتقل و ثبت می‌نماید.

Figure 3. Digital ruler, data logger and load cell used on the device.
شکل ۳ - خط‌کش دیجیتال، دیتالاگر و لودسل استفاده‌شده در دستگاه.

خاک مورداستفاده در این تحقیق از خاک کانال سویل‌بین و از نوع رسی لومی بوده، که با توجه به بافت‌های موجود در این منطقه جغرافیایی انتخاب‌شده است. مشخصات خاک کانال در جدول (۱) نشان داده‌شده است.

جدول ۱- مشخصات فیزیکی خاک سویل بین.

Table 1 - Physical Properties of Soil Soilbin.

Properties	Unit	Value
Sand	(--)	%43
Silt	(--)	%22
Clay	(--)	%35
Young's Modulus	(MPa)	0.04
Poisson Ratio	(--)	.32
Density	(kg/m3)	1900

Figure 4. Overview of the device designed and manufactured on soil storage.

شکل۴- نمای کلی از دستگاه طراحی و ساخته‌شده بر روی انباره

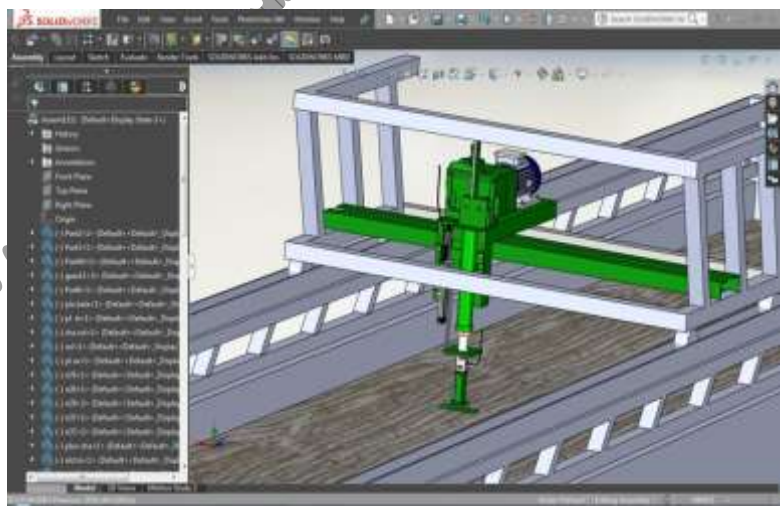

Figure 5. Overview of the device designed in solidworks software.

شکل۵- نمای کلی از دستگاه طراحی و ساخته‌شده در نرم افزار سالیدورک

۳- نتایج و بحث

در این تحقیق پس از مراحل ساخت دستگاه و آماده کردن بستر خاک به مرحله آزمایش‌ها جهت داده‌برداری و ارزیابی کار سامانه پرداخته شد. پروب‌های مورداستفاده در آزمایش از چهار صفحه مستطیلی شکل تشکیل‌شده است. میزان سرعت نفوذ مطابق با تحقیقات محققین در نظر گرفته‌شده در این تحقیق از سرعت سه سانتی‌متر بر ثانیه برای آزمایش در نظر گرفته‌شده است.

آزمایش‌ها با استفاده از دو صفحه مختلف با دو نسبت توصیه‌شده طول به عرض انجام‌شده است. نفوذ صفحات تا عمق بیشینه ۱۰ سانتیمتر انجام شد، و هر آزمون سه بار تکرار گردید. سپس داده‌ها به محیط اکسل منتقل‌شده و میانگین مقادیر به‌دست‌آمده از نیرو-جابجایی سه تکرار برای هر صفحه در ماتریس داده‌ها جایگزین شد. همچنین برای تبدیل نمودارهای نیرو-جابجایی به نمودارهای فشار-نشست، فرایند اعمال مقدار سطح هر صفحه در اکسل پیگیری شد.

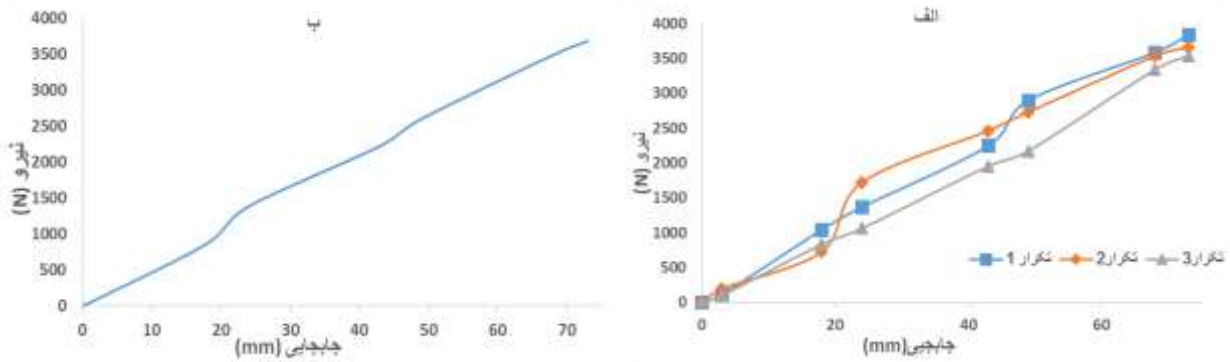

Figure 6. The displacement diagram for a plate (100 × 150 mm) with a ratio of 1.5, a) three repetitions, b) an average of three repetitions.

شکل ۶ - نمودار نیرو-جابجایی برای صفحه (mm) ۱۰۰×۱۵۰ با نسبت ابعاد ۱/۵، الف) سه تکرار، ب) میانگین سه تکرار

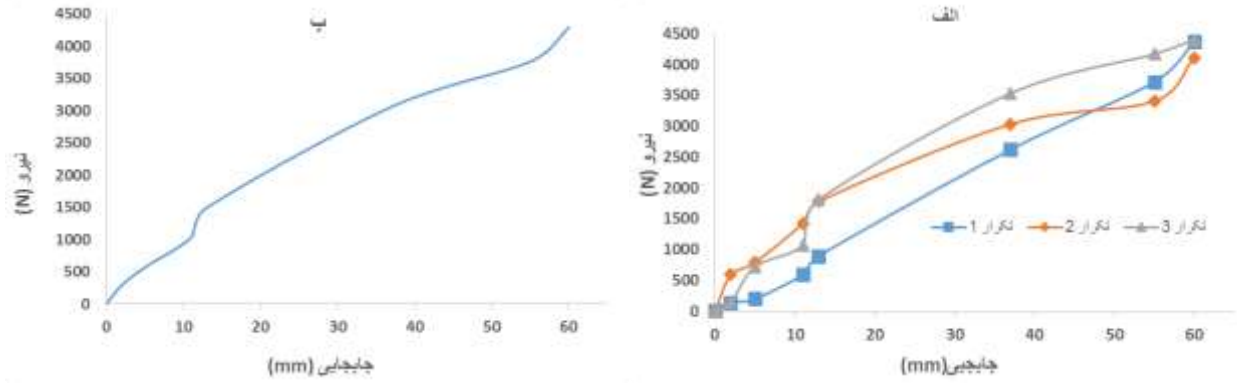

Figure 7. The displacement diagram for the plate (250 × 100 mm) with a 2.5-aspect ratio, (a) three repetitions, (b) an average of three replicates.

شکل ۷ - نمودار نیرو-جابجایی برای صفحه (mm) ۱۰۰×۲۵۰ با نسبت ابعاد ۲/۵، الف) سه تکرار، ب) میانگین سه تکرار.

مطابق روش متداول برای تحلیل داده‌های فشار-نشست صفحات بکر درنهایت داده‌های برداشت‌شده برای به دست آوردن مقادیر k_φ ،k_c و n مورداستفاده 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 به‌دست‌آمده به‌عنوان مقدار پارامتر n خاک تعیین می‌گردد. همچنین مقدار عرض از مبدأ نمودار خطی مربوط به هر صفحه به‌عنوان مقدار k استخراج می‌گردد. مقدار k مطابق رابطه (۴) در ارتباط با عرض صفحات و پارامترهای k_c، k_φ است.

$$k = \frac{k_c}{b} + k_\varphi \qquad (۴)$$

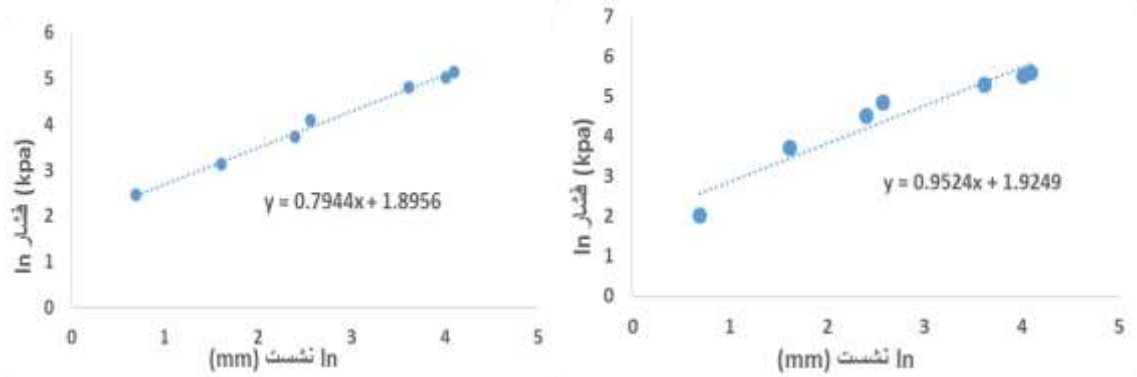

Figure 8. Pressure-logarithmic graphs for page (mm) 250 × 100 (right) for page (mm) 150 × 100 (left).

شکل ۸ - نمودارهای لگاریتمی فشار- نشست، برای صفحه (mm)۲۵۰×۱۰۰ (راست)برای صفحه (mm)۱۵۰×۱۰۰ (چپ)

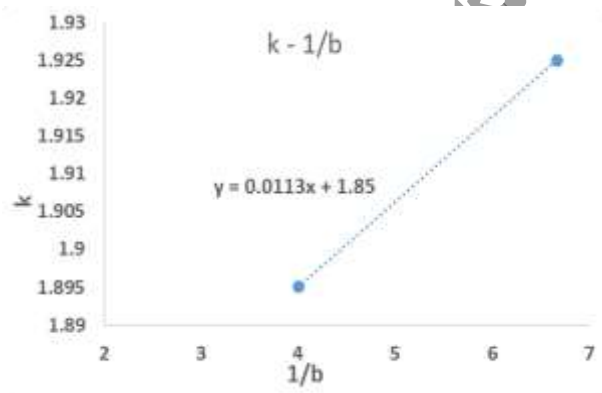

Figure 9. The value of k in relation to the width of the pages and the parameters kc, kφ for the page (mm), 250 × 100, (mm), 150 × 100.

شکل ۹ - مقدار k در ارتباط با عرض صفحات و پارامترهای kc، kφ برای صفحه (mm)۲۵۰×۱۰۰)، (mm)۱۵۰×۱۰۰

۴- نتیجه‌گیری

در این پژوهش با انجام تحقیقاتی در مورد سامانه‌های متداول جهت تعیین برخی خواص مکانیکی خاک، پیاده‌سازی ایده‌ای برای ساخت یک سامانه تعیین رفتار نیرو-جابجایی باقابلیت کاربرد موردی برای تعیین مشخصه‌های معادله بکر در پیش‌گرفته شد و سپس به طراحی، ساخت، ارزیابی عملکرد، شبیه‌سازی مدل و تحلیل دستگاه و مدل پرداخته شد. نتایج آزمایش‌های آزمایشگاهی نشان داد که دستگاه طراحی و ساخته‌شده مناسب برای اندازه‌گیری پارامترهای فشار-نشست با دقت بالا و متناسب با آزمایش‌های مربوط با حرکت زمین نوردها (وسایل نقلیه غیر جاده‌ای) در معادله بکر است. همچنین سامانه قابلیت اتصال هدهای مختلف را دارد تا آنکه بتواند با تجهیز ابزارهای مختلف، انجام چندین آزمایش مرتبط با آزمون‌های نیرو-جابجایی را در قالب صرفاً یک دستگاه امکان‌پذیر نماید (انواع صفحات بکر، شاخص مخروط، آزمون نفوذپذیری چرخ در خاک، تایر سگمنت و مانند آن).

۵- مراجع

1- Ding, L., Gao, H.B., Deng, Z.Q., et al, 2011. Experimental study and analysis on driving wheels' performance for planetary exploration rovers moving in deformable soil. J. Terrramech. 48 (1), 27–45.
2- Coulomb, C. A. (1773). Essai sur une application des règles de maximis et minimis à quelques problèmes de statique relatifs à l'architecture. Mem. Div. Sav. Acad., 7.
3- Reece, A. R. (1977). SOIL MECHANICS OF AGRICULTURAL SOILS. Soil Science, 123(5), 332-337.
4- Bowen, H. D., ARKIN, G., & Taylor, H. M. (1981). Modifying the root environment to reduce crop stress. American Society of Agricultural Engineers Monograph, 4, 21.
5- Bernstein, R. (1913). Probleme zur experimentellen Motorpflugmechanik. Der Motorwagen, 16(9), 199-206.
6- Goriatchkin, B. P. (1936). Theory and Development of Agriculture Machinery. Moscow.
7- Bekker, M. G.: Theory of land locomotion. Ann Arbor, Michigan: The University of Michigan Press, 1956.
8- Van, N. N., Matsuo, T., Koumoto, T., & Inaba, S. (2008). Experimental device for measuring sandy soil sinkage parameters. Saga Bulletin of the Faculty of Agriculture, Saga University, 93, 91-99.
9- Wong, J. Y. (2001). Theory of Ground Vehicles, New York, John Willey & Sons.

یازدهمین کنگره ملی مهندسی مکانیک بیوسیستم (ماشین‌های کشاورزی) و مکانیزاسیون ایران