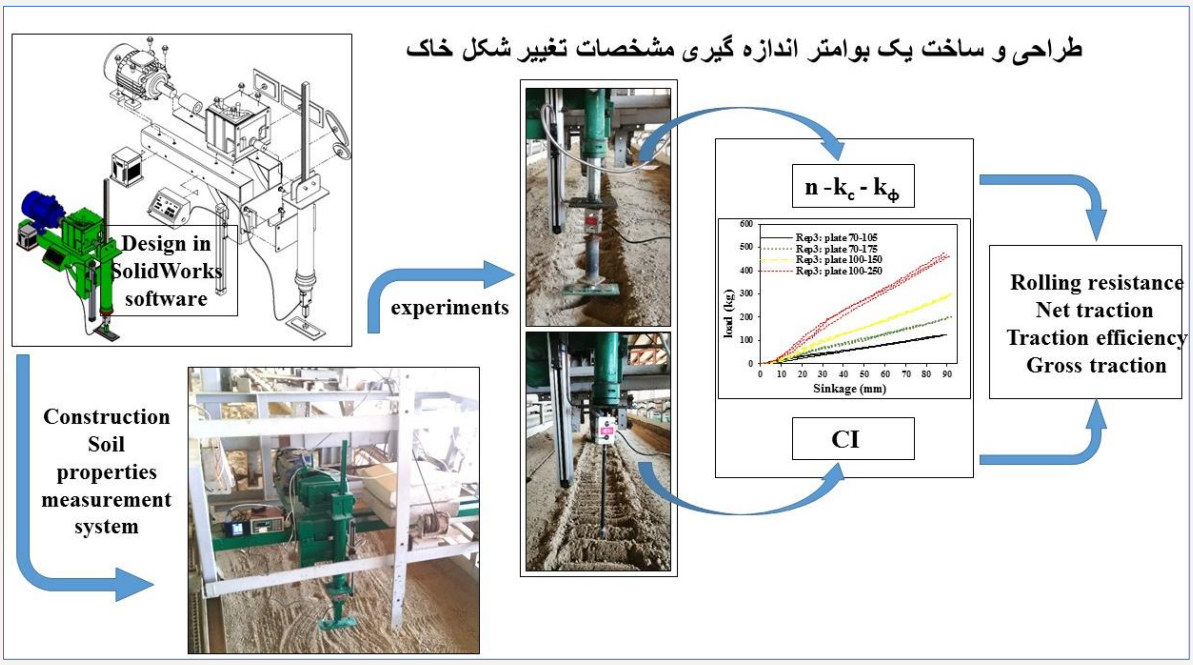
DOI:10.22059/ijbse.2021.318526.665385 مهندسی بیوسیستم ایران، دوره ۵۲، شماره ۳، پاییز ۱۴۰۰ (ص۴۹۸-۴۸۷)
(عـــــلـــــمی پـــــژوهـــــشی)

Design and Fabrication of a Bevameter for Measuring the Soil Deformation Details

Houshang Mahboub Yangeje[1], Aref Mardani Korani[1*]
1. Department of Mechanical Engineering of Biosystems, Faculty of Agriculture, Urmia University, Urmia, Iran.

(Received: March 13, 2021- Revised: June 7, 2021- Accepted: June 15, 2021)



ABSTRACT: The soil-tool interaction is still considered one of the most complicated phenomenons which are affected by the mechanical behavior of the soil. The basic problem in this field is the determination of the soil mechanical properties. Also, because the soil environment is heterogeneous and has inhomogeneous properties, theoretical analysis of soil parameters is difficult. One of the most popular methods for describing soil deformation is the Bekker model, and is now widely used. It is necessary that soil mechanical parameters (k_c ،k_φ and n) be measured to predict soil deformation behavior based on the Bekker model consideration. For this purpose, a setup was designed and constructed that apply the load required at different velocities vertically on the soil, and also can measure the amount of soil deformation simultaneously. The system was installed on a carrier in a soil bin comprising loamy clay soil and its operation was evaluated by pressure plates with three replications. The results of setup operation showed a satisfactory performance for the set up. The advantages of the system are the ability to replace various probes and the possibility of providing different rates of penetration velocities in the soil, so this setup provides various tests of tools and wheels.

Keywords: Bevameter, Pressure–sinkage equation, Soil parameters, Baker's equation, Soil bin.

[*]**Corresponding Author: a.mardani@urmia.ac.ir**

طراحی و ساخت یک بوامتر اندازه‌گیری مشخصات تغییر شکل خاک

هوشنگ محبوب ینگجه[1]، عارف مردانی کرانی*

۱. گروه مهندسی مکانیک بیوسیستم، دانشکده کشاورزی، دانشگاه ارومیه، ارومیه، ایران.

(تاریخ دریافت: ۱۳۹۹/۱۲/۲۳- تاریخ بازنگری: ۱۴۰۰/۳/۱۷- تاریخ تصویب: ۱۴۰۰/۳/۲۵)

چکیده: رابطه خاک-ابزار یک پدیده پیچیده است که متاثر از رفتار مکانیکی خاک است. معادله بکر یکی از شناخته‌شده‌ترین روش‌ها برای توصیف رفتار تغییر شکل خاک است که مقدار تغییر شکل خاک را بر حسب مقدار بار روی خاک و مشخصات هندسی سطح تماس بسته به شرایط خاک بیان می کند و از دیرباز تاکنون مورداستفاده قرار دارد. به‌منظور پیش‌بینی رفتار تغییر شکل خاک بر پایه ملاحظات بکر لازم است پارامترهای مکانیکی خاک (kc، kφ و n) اندازه‌گیری شود. با این هدف در این تحقیق، سامانه‌ای طراحی و ساخته شد که بار متناسب را در سرعت‌های مختلف نفوذ در خاک به‌صورت عمودی بر روی خاک اعمال می‌کند و همچنین قابلیت اندازه‌گیری مقدار تغییر شکل خاک در بعد عمودی را نیز به‌طور هم‌زمان دارا است. دستگاه ساخته‌شده بر روی حامل یک انباره خاک متصل گردید که دارای خاک از نوع لومی-رسی بود و آزمایش هایی برای ارزیابی عملکرد دستگاه با سه تکرار توسط صفحات فشار-نشست به انجام رسیده است. نتایج آزمایش‌های ارزیابی کار دستگاه حاکی از عملکرد قابل‌قبول آن برای آزمون های صفحات بکر بوده است. از مزایای سامانه طراحی‌شده می‌توان به قابلیت تعویض پروب‌های گوناگون و امکان تأمین سرعت‌های مختلف نفوذ در خاک جهت آزمون‌های مختلف ابزار و چرخ اشاره کرد.

واژه‌های کلیدی: بوامتر، معادله فشار-نشست، پارامترهای خاک، معادله بکر، انباره خاک.

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

مقدمه

تراکم خاک ممکن است ناشی از پدیده‌های طبیعی مانند اثرات بارندگی، مکش داخلی و جذب آب باشد. همچنین پدیده‌های غیرطبیعی تراکم خاک از طریق نیروهای اعمال‌شده توسط ماشین‌ها و ادوات کشاورزی در خاک ایجاد می‌شود که این نوع تراکم به لحاظ اثرات تخریبی، مهم‌تر است (McKyes, 1985). خواص مکانیکی خاک برای پیش‌بینی عملکرد کششی ماشین و همچنین تغییر شکل خاک (تراکم) که ناشی از حرکت و عبور وسیله نقلیه است، موردنیاز است از این‌رو زمینه مکانیک کشش و پژوهش‌های مربوط به آن، علاقه زیادی را برای توصیف مطالعات و توسعه ابزاری‌های بهتر برای تعیین پارامترهای خاک ایجاد کرده است. همچنین توسعه روش‌های مدل‌سازی و تحلیل داده با الگوریتم‌های امروزی، بستر مناسبی را برای تحقیقات مرتبط با برهم‌کنش خاک-ابزار فراهم کرده است (Howari, 2003).

اغلب مطالعات صورت گرفته در خصوص اندرکنش بین چرخ و سطح مرتبط با ماشین‌های درون‌جاده‌ای می‌باشند که نظر به شرایط خاص و متفاوت این نوع تقابل در مسیرهای برون‌جاده‌ای، حوزه‌ای در این خصوص به نام ترامکانیک با پیش‌تازی محققینی همانند بکر (Bekker, 1969) معرفی و تدوین گردید. 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 برای برنامه‌ریزی مسیر برای مریخ‌نوردها نیز کاربردی است (Ding *et al.*, 2011). پیش‌بینی حالت‌های فشار برای هر یک از ماشین‌های غیر جاده‌ای توسط نظریه‌های پایه‌ای مکانیک خاک، چندان آسان نیست، بنابراین برای مطالعه سیستم شامل ماشین غیر جاده‌ای، مقدار پارامترهای خاص مکانیک خاک ضروری است.

پارامترهای مقاومت برش خاک به‌عنوان اساس تحلیل مکانیکی خاک و برگرفته از معادله کولمب است (Taghavifar & Mardani, 2018). در یکی از نخستین تلاش‌ها برای مدل‌سازی رفتار نشست خاک، یک مدل نیمه تجربی به نام صفحات بارگذاری ارائه‌شده است که توسط رابطه فشار-نشست جهت آزمایش و ارزیابی تعامل چرخ و خاک ارائه‌شده و طی رابطه (۱) نشان داده‌شده است (Bernstein, 1913). گوریاتچکین مدل فشار-نشست برنشتاین را به شرح رابطه (۲) اصلاح کرد (Goriatchkin, 1936).

$$z=k\sqrt{p} \qquad \text{(رابطه ۱)}$$

$$p = k_1 \times z^{n} \qquad \text{(رابطه ۲)}$$

در رابطه‌های مورد اشاره، Z نشست صفحات بارگذاری، P فشار روی خاک، K مدول تغییر شکل خاک و k_1 سختی خاک است. همچنین بکر با تغییر مدل برنشتاین و گوریاتچکین، به توسعه روابط فشار-نشست برای خاک همگن پرداخت و آزمونگر بوامتر را برای تعیین پارامترهای خاک با استفاده از بارهای مکانیکی استاندارد جهت آزمون‌های بستر خاک توسعه داد (Bekker, 1969). در آزمایش صفحه بارگذاری، صفحات مستطیلی یا مدور و با اندازه‌های مختلف برای ارزیابی اثر متقابل ابزار و خاک در بعد عمودی، استفاده می‌شود و درواقع صفحه‌ها، مدلی از مقدار سطح تماس چرخ و خاک است (Mason *et al.*, 2017 ; Edwards *et al.*, 2020).

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

در رابطه (۳)، K_c ،$K_ø$ و n پارامترهای فشار-نشست هستند. P مقدار فشار برحسب کیلوگرم بر سانتی‌متر مربع، K_c مدول چسبندگی خاک تغییر شکل یافته برحسب $(kg/mm^{(n+1)})$، $K_ø$ مدول اصطکاکی خاک تغییر شکل یافته برحسب $(kg/mm^{(n+2)})$، n ضریب بدون بعد، Z مقدار نشست صفحه بارگذاری برحسب سانتیمتر و b کوچک‌ترین بعد صفحه برحسب سانتیمتر است.

طی پژوهشی مبتنی بر آزمون‌های فشار-نشست شبه استاتیک، که به‌منظور بررسی و مقایسه ویژگی‌های صفحات بارگذاری نوع چرخ مشبک سیمی یک مریخ‌نورد و همچنین چرخ صاف، قابلیت به‌کارگیری پارامترهای معادله بکر برای ارائه یک مدل دربرگیرنده پارامترهای کششی چرخ مورد تایید قرار گرفت Huang *et al.*, 2016). مطالعه دیگر جهت شبیه‌سازی در خاکی از نوع فیلیت (شبه دانه‌ای و سبک) برای برنامه‌های کاربردی حرکت کاوشگر سیاره‌ای با آزمونگر بوامتر انجام شد. در این پژوهش با بررسی رفتار فشار-نشست و رفتار برشی از طریق بوامتر طراحی‌شده، به‌منظور استفاده در محیط‌های پر لغزش که به‌طورمعمول در سطح مریخ یافت می‌شود، مطالعاتی صورت گرفت (Edwards et al., 2017). همچنین در تحقیقی دیگر، مدلی برای تعریف رفتار تغییر شکلی خاک از طریق معادله فشار-نشست در چرخ‌زنجیرها با استفاده از چهار نوع خاک در جنوب غربی چین انجام شد. طی این تحقیق، تأثیر پارامترهای مستقل رطوبت، سرعت نشست و تعداد عبور بر سه پارامتر ثابت مدل بکر موردبررسی قرار گرفت (Yang *et al.*, 2018).

در پژوهشی یک بوامتر متحرک ابداع گردید که علاوه بر انجام آزمایش نشست صفحه بارگذاری و آزمایش برش خاک، قابلیت نصب نفوذسنج مخروطی را نیز داشت و قادر بود میزان شاخص مخروطی را هم اندازه‌گیری کند. این بوامتر دارای دو جک هیدرولیک افقی و عمودی بود. جک هیدرولیک عمودی برای اعمال بار بر روی صفحه بارگذاری و جک هیدرولیک افقی برای تأمین حرکت افقی صفحه برشی به کار می‌رفت Yu, (2006).

مطالعاتی در زمینه ساخت دستگاه بوامتر در ایران نیز انجام‌شده است که می‌توان به دستگاه بوامتر پشت تراکتوری نیمه مکانیکی نیمه هیدرولیکی نورالهی شاره کرد(Massah & Noorolahi, 2010). رهنما و همکاران سامانه‌ای ارائه کردند که به‌صورت آزمایشگاهی، نمونه خاک را تحت نسبت‌های مختلف فشارهای جانبی به فشار قائم، مورد آزمایش قرار داده و تاثیر ناهمگن بودن فشار را مطالعه کردند (Rahnama *et al.*, 2002).

کاربرد بوامترها علاوه بر زمینه برهم‌کنش ابزار-خاک، در زمینه تقابل ابزار-برف نیز که شرایطی شبیه به خاک بر سیستم حاکم است، توسعه‌یافته است (Mähönen *et al.*, 2021). در سالیان بعد، انواع دیگری از وسایل اندازه‌گیری مقاومت خاک ساخته شد که به‌واسطه اتصال به وسایل نقلیه، قابل‌انتقال به شرایط صحرایی بودند. ازآنجا که شکل صفحات بارگذاری، روی مقادیر پارامترهای فشار-نشست تأثیر مهمی دارد نسبت طول به عرض صفحه‌های بارگذاری به‌صورت استاندارد در حدود ۱/۴ تا ۶ در نظر گرفته‌شده، که مشابه با الگوهای متداول فشار-نشست بکر است (Van *et al.*, 2008). بر همین اساس، یکی دیگر از پارامترهای مهم برای آزمایش، سرعت نفوذ صفحه بارگذاری در خاک است که باید بین ۲/۵ تا ۵ سانتی‌متر بر ثانیه باشد (Wong, 2001). همچنین ملاحظات مربوط به اندازه‌گیری روابط فشار-نشست، برای فشارهای بیشتر از ۱/۰۳ کیلوگرم بر سانتی‌متر مربع و نشست بیشینه ۴۰ سانتی‌متر در نظر گرفته‌شده‌اند زیرا بیشترین فشار وارد از طرف وسایل نقلیه غیر جاده‌ای بر سطح خاک در حدود ۱/۰۳ کیلوگرم بر سانتی‌متر مربع است و این فشار حداکثر تا عمق ۴۰ سانتی‌متر از سطح زمین منتشر می‌گردد (Mason *et al.*, 2020).

هدف کلی این پژوهش، طراحی و ساخت ابزاری است که اندازه‌گیری برخی پارامترهای مکانیکی خاک را برای مطالعات برهم‌کنش خاک- ابزار در شرایط انباره خاک فراهم نماید. علاوه بر کاربری‌های متداول یک بوامتر، قابلیت‌های دیگری نیز در این سامانه پیش‌بینی شده است که از آن جمله می‌توان به امکان تنظیم و تغییر سرعت نفوذ در خاک اشاره کرد. همچنین امکان تجهیز دستگاه به برخی ابزارهای دیگر مانند مخروط

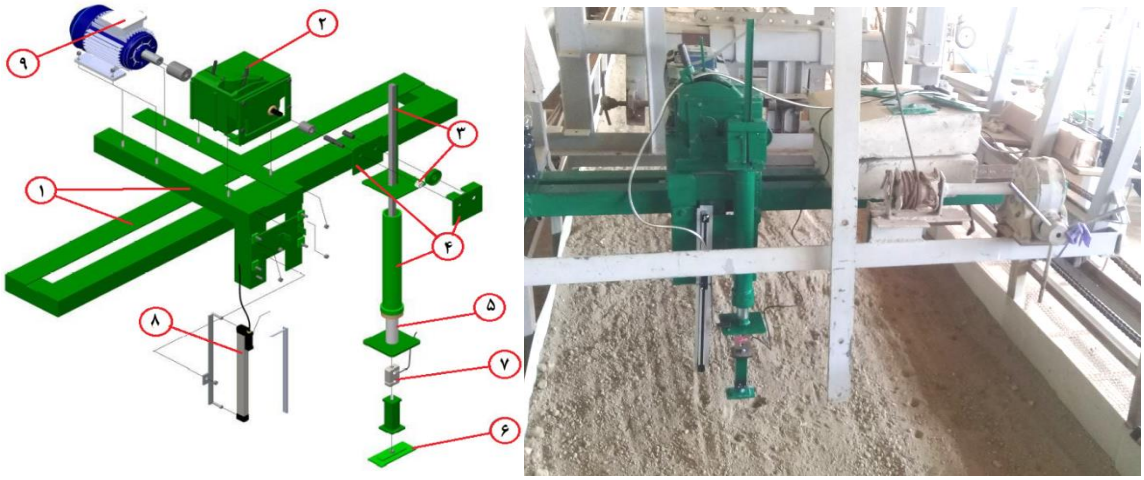
استاندارد و یا قطاع چرخ برای آزمون‌های نفوذ در خاک نیز پیش‌بینی شده است.

مواد و روش‌ها

دستگاه اندازه‌گیری پارامترهای مکانیکی خاک، از بخش‌های مکانیکی، الکتریکی، مبدل‌های اندازه‌گیری نیرو-جابجایی و واحد برداشت و ثبت داده تشکیل‌شده است. سامانه ساخته‌شده در این تحقیق، یک بوامتر مخصوص انباره خاک است و ابعاد آن به ترتیب طول، عرض و ارتفاع ۹۰×۱۳۰×۲۰۰ سانتی‌متر است. دستگاه طراحی‌شده دارای قابلیت برداشت داده‌های نیرو-جابجایی برای آزمون‌های ابزار-خاک بوده و متناسب با شرایط انباره خاک در گروه مکانیک بیوسیستم دانشگاه ارومیه ساخته و مورد ارزیابی قرار گرفت. پروب دستگاه برای نصب صفحات آزمون‌های بکر، مخروط پنترومتر، قطاع چرخ و هرگونه ابزار مشابهی قابل کاربرد است.

ساختار مکانیکی

شکل (۱) نقشه نمای انفجاری و همچنین تصویری از دستگاه نصب‌شده بر روی حامل انباره خاک را نمایش داده است.



شکل ۱- نمایی از دستگاه نصب‌شده بر بروی انباره خاک و نقشه انفجاری سامانه. ۱- شاسی، ۲- جعبه‌دنده، ۳- چرخ‌دنده شانه‌ای، ۴- پوسته و شفت جک برای هدایت چرخ‌دنده شانه‌ای، ۵- دسته متحرک جک، ۶- صفحه فشاری، ۷- نیروسنج ۸- خط‌کش دیجیتال ۹- الکتروموتور.

بخش مکانیکی سامانه متشکل از شاسی، جعبه‌دنده، چرخ‌دنده شانه‌ای، پوسته و شفت جک مکانیکی، قاب چرخ‌دنده شانه‌ای و همچنین پروب‌های آزمایش است.

شاسی برای اتصال سامانه به حامل انباره خاک و جایگیری دقیق سیستم انتقال قدرت و سایر ملحقات دستگاه طراحی‌شده است. پارامترهایی در نظر گرفته‌شده در طرح و ابعاد شاسی دستگاه عبارت‌اند از امکان جابجایی افقی دستگاه در عرض کانال خاک (باهدف استفاده از تمام عرض کانال)، قابلیت تحمل بارها و نیروهای وارده به شاسی و همچنین قابلیت اتصال پروب‌ها و ابزارهای گوناگون برای آزمون‌های متنوعی از نفوذ ابزار در خاک. طرح شاسی که در شکل (۱) با شماره ۱ مشخص‌شده، بعد از طراحی و تحلیل در نرم‌افزارهای SolidWorks و ANSYS از نبشی استاندارد شماره ۸ و فولاد St50 در ابعاد کلی ۷۸×۴۰×۲۰۰ سانتی‌متر ساخته‌شده است. شاسی از دو بخش تشکیل‌شده، بخش فوقانی برای جایگیری و نصب ملحقات سامانه، و بخش تحتانی به‌منظور اتصال به حامل انباره خاک. این دو قسمت از شاسی به یکدیگر اتصال پیچ و مهره‌ای داشته و قابلیت مونتاژ دارد.

بخش انتقال قدرت

سیستم انتقال توان متشکل از جعبه‌دنده و چرخ‌دنده شانه‌ای است. نحوه عملکرد دستگاه به گونه‌ای است که

مکانیسم چرخ‌دنده شانه‌ای، حرکت دورانی دریافتی از الکتروموتور و جعبه‌دنده مکانیکی را به حرکت خطی تبدیل می‌کند (بخش‌های ۳ و ۴ در شکل (۱)). حرکت خطی چرخ‌دنده شانه‌ای، جابجایی خطی ابزار متصل به دستگاه را به‌طرف بالا و پایین ایجاد می‌نماید. چرخ‌دنده شانه‌ای متشکل از یک چرخ‌دنده ساده و یک چرخ‌دنده شانه‌ای است و چرخ‌دنده به خروجی جعبه‌دنده کوپل شده و شانه نیز در راستای محور جابجایی جک به بخش متحرک جک جوش داده شده است. چرخ‌دنده شانه‌ای به‌کاررفته در دستگاه با مدول ۲، و تعداد دندانه چرخ‌دنده ۱۲عدد است که با هر دور گردش محور چرخ‌دنده، شانه به‌اندازه ۷/۵۳ سانتی‌متر جابجا می‌شود.

جعبه‌دنده به کار رفته در سامانه، با کاهش مکانیکی دور الکتروموتور، سطوح مختلف گشتاور و دور مورد نیاز دستگاه را فراهم می‌سازد. جعبه‌دنده به‌کاربرده شده از نوع کشویی و دارای سه نسبت کاهنده ۶، ۱۲و ۱۹ است تا سرعت خطی عامل آزمون را از ۰/۵ تا ۱۰ سانتی‌متر بر ثانیه در یک محدوده دور الکتروموتور فراهم سازد.

راه‌اندازی سیستم انتقال توان با استفاده از یک الکتروموتور با توان اسمی ۷/۵ اسب بخار و دور ۱۴۳۰ دور بر دقیقه صورت گرفت که به‌طور مستقیم به جعبه‌دنده کوپل شد.

مبدل‌های اندازه‌گیری نیرو-جابجایی

اندازه‌گیری پارامترهای نیرو و جابجایی به ترتیب با استفاده از یک نیروسنج (لودسل s شکل) و یک خط‌کش دیجیتال به انجام رسید.

نیروسنج، نیروی وارده بر پروب‌ها را حس می‌کند که می‌توان نیروسنج‌های با ظرفیت متفاوت را، بسته به نوع آزمایش بر روی دستگاه نصب کرد. نیروسنج از یک طرف به صفحه متصل به انتهای جک، و از سمت دیگر به رابط متصل به ابزار (مانند صفحات فشاری) وصل شده است.

برای تعیین میزان تغییر شکل خاک، از یک خط‌کش دیجیتال استفاده‌شده است (شماره ۸ در شکل (۱)). خط‌کش دیجیتال مدل MLC320 از نوع مغناطیسی و بیشینه طول جابجایی ۴۰ سانتی‌متر است. ورنیه خط‌کش، به بخش متحرک جک و بخش ثابت خط‌کش هم به پوسته ثابت جک متصل شده است تا با حرکت شفت جک به سمت پایین و بالا، قسمت لغزنده خط‌کش نیز جابجا شود.

واحد کنترل

کنترل عملکرد سیستم شامل کنترل مقدار سرعت عمودی پروب است که به‌صورت ترکیبی به واحد جعبه‌دنده و یک اینورتر تغذیه‌کننده الکتروموتور سپرده‌شده است (مدل LS ساخت شرکت LG کره جنوبی). به عبارتی، موقعیت تنظیم‌شده جعبه‌دنده (با سه سطح انتخابی) و همچنین فرکانس تغذیه الکتروموتور (با تعداد سطوح نامحدود) به‌منظور ایجاد سطوح دلخواه و مختلف سرعت نفوذ در خاک به کار گرفته شد.

واحد تحصیل داده

داده‌های برداشت شده توسط سیستم، شامل نیروی لودسل و مقدار جابجایی خط‌کش دیجیتال است. داده‌برداری با استفاده از یک دیتالاگر ۱۰ کاناله باقابلیت اتصال لودسل و خط‌کش دیجیتال صورت می‌پذیرد که داده‌های نیرو-جابجایی سنجیده شده از لودسل و خط‌کش دیجیتال را به‌طور هم‌زمان، دریافت و در دو ستون بر روی حافظه جانبی و یا مستقیماً به کامپیوتر منتقل و ثبت می‌نماید.

آماده‌سازی خاک و انجام آزمون‌های عملکرد دستگاه

ارزیابی عملکرد دستگاه در محیط انباره خاک به انجام رسید. مشخصات خاک کانال در جدول (۱) نشان داده‌شده است. انباره خاک دارای طولی معادل ۲۴ متر، عرض ۲ متر و عمق لایه خاک یک متر است که شرایط مناسب برای آزمایش‌های با حذف اثرات مرزی را فراهم

می‌آورد. همچنین امکان فرآوری و ایجاد شرایط مکانیکی اولیه دلخواه برای خاک مورد آزمایش، توسط دنباله بندهای ویژه شامل چنگه، غلتک و ماله (شکل (۲)) در آن پیش‌بینی‌شده است (Mardani *et al.*, 2010).

شکل۲- مراحل آماده‌سازی خاک جهت انجام آزمایش‌ها: الف- نرم کردن خاک با چنگه، ب- عملیات تسطح با ماله، ج- غلتک زنی، د-بستر آماده‌شده.

جدول ۱- خواص فیزیکی خاک بستر آزمایش.

پارامتر خاک	وزن مخصوص (g/cm^3)	زاویه اصطکاک داخلی (درجه)	رس (%)	سیلت (%)	شن (%)
مقدار	۲/۶۳	۳۲	۴۳	۲۲	۳۵

واسنجی نیروسنج و خط‌کش دیجیتالی

حسگرهای مورداستفاده در مجموعه، شامل نیروسنج و یک خط کش دیجیتال است که به‌منظور صحت سنجی داده ارسالی توسط هر یک، لازم است واسنجی حسگرها انجام گیرد. واسنجی نیروسنج با ظرفیت ۱۰ کیلونیوتن با استفاده از وزنه‌های آویخته شده به لودسل و در محدوده ظرفیت اسمی نیروسنج به انجام رسید و ضرایب نمودارهای خطی برای لودسل به‌دست‌آمده و در قالب تنظیمات دیتالاگر لحاظ گردید.

برای کالیبراسیون سیستم سنجش جابجایی (خط‌کش دیجیتالی)، از فیلرهای با دقت ۰/۰۱ میلی‌متر استفاده شد. به این منظور، از یک سطح صاف به‌عنوان مبدأ صفر استفاده شد.

شکل ۳- (الف)- واسنجی نیروسنج‌ها با بارهایی در محدوده‌ی ابتدا، انتها و میانی ظرفیت اندازه‌گیری آن‌ها، (ب)- واسنجی و بررسی دقت سیستم سنجش جابجایی خط‌کش دیجیتال.

روش انجام آزمون فشار-نشست

یکی از پروب‌های قابل تعویض که روی سامانه نصب می‌شود، صفحات بکر و یا صفحات بارگذاری هستند که برای ارزیابی کار دستگاه در نظر گرفته شد. صفحات مستطیل شکل و باضخامت ۵ میلی‌متر در دو دسته

ساخته شد. دسته اول با ابعاد ۷×۱۷/۵ و ۱۰×۲۵ سانتی‌متر که نسبت طول به عرض ۲/۵ داشت و دسته دوم با ابعاد ۷×۱۰/۵ و ۱۰×۱۵ سانتی‌متر با نسبت طول به عرض ۱/۵ (شکل (۴)). هندسه صفحات بر پایه ملاحظات بکر (Bekker, 1969) در نظر گرفته‌شده است (جدول (۲)). به‌منظور اتصال صفحات بارگذاری به لودسل، یک پروفیل رابط در نظر گرفته شد که در دو طرف خود، لودسل را به صفحه فشاری مرتبط می‌کند.

یکی از شرایط مهم آزمایش، سرعت نفوذ صفحه در خاک است که باید بین ۲/۵ تا ۵ سانتیمتر بر ثانیه باشد (Wong, 2001). برای کنترل سرعت نفوذ، از اینورتور و جعبه‌دنده استفاده می‌شود. در این تحقیق، سرعت نفوذ ۳ سانتی‌متر بر ثانیه برای آزمایش در نظر گرفته‌شده است.

بررسی استحکام مکانیکی دستگاه

به‌منظور حصول اطمینان از استحکام مکانیکی اجزای مختلف دستگاه طی مواجهه با بارهای مکانیکی ناشی از آزمون‌های نشست خاک، برای طراحی و تحلیل قطعات دستگاه و همچنین ارتباط آن‌ها باهم در طی عملیات مونتاژ، مدل‌سازی قطعات در محیط نرم‌افزار SolidWorks2016 انجام شد و سپس توسط نرم‌افزار ANSYS17 در محیط Workbench به روش المان محدود مورد تحلیل قرار گرفت. طراحی قطعات به نحوی انجام شد که ضمن هماهنگی لازم برای انجام کار پیش‌بینی‌شده، اطمینان و استحکام کافی را نیز در برداشته باشد.

جدول ۲- ابعاد چهار صفحه مستطیلی شکل مورد استفاده برای تعیین ثابت‌های سفتی خاک در مدل بکر.

تعداد صفحات	عرض (cm)	طول (cm)	مساحت (cm^2)	نسبت ابعاد (طول به عرض)
۱	۱۰	۲۵	۲۵۰	۲/۵
۲	۱۰	۱۵	۱۵۰	۱/۵
۳	۷	۱۷/۵	۱۲۲/۵	۲/۵
۴	۷	۱۰/۵	۷۳/۵	۱/۵

شکل ۴- چهار صفحه مستطیلی شکل مورداستفاده برای تعیین ثابت‌های خاک در مدل بکر.

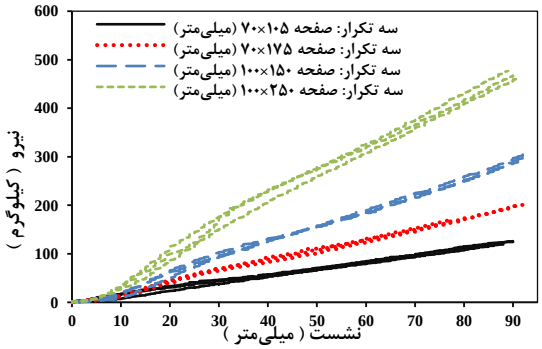
نتایج و بحث

ارزیابی عملکرد دستگاه

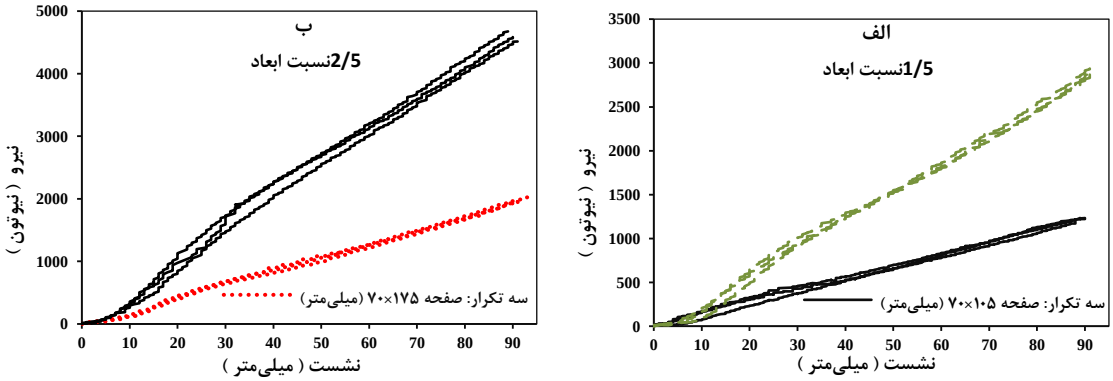
پس از ساخت، مونتاژ و کالیبراسیون حسگرهای مورد استفاده در سامانه و همچنین آماده‌سازی خاک، آزمایش‌هایی با استفاده از چهار صفحه مستطیلی شکل با دو نسبت توصیه‌شده طول به عرض انجام‌شده‌است. نفوذ صفحات تا عمق بیشینه ۱۰ سانتیمتر در نظر گرفته شد. هر آزمون، سه بار تکرار گردید و برای هرکدام از صفحه‌های بارگذاری، داده‌های خروجی از نیروسنج و خط‌کش دیجیتال توسط دیتالاگر بر روی حافظه جانبی ثبت و سپس به محیط اکسل منتقل شد. نتایج حاصل از آزمایش‌ها توسط سامانه با استفاده از پروب‌های بارگذاری به‌صورت نمودارهای نیرو-جابجایی ترسیم‌شده است و در شکل (۵) ارائه‌شده است. در این نمودارها، انطباق نتایج حاصل از تکرارها در داده‌برداری، دقت قابل قبولی را با توجه به شرایط یکسان خاک نمایش می‌دهد.

همان‌طور که در شکل (۶) مشاهده می‌گردد، منحنی‌های نمودارها در نسبت ابعاد یکسان صفحات دارای شیب‌های متفاوت است. علت اختلاف شیب دو دسته نمودار ناشی از متفاوت بودن مقدار مساحت و اثرات سخت شدن خاک در عمق بیشتر خاک است. با

توجه به این‌که مقدار n در خاک‌های زراعی در حدود ۱ گزارش‌شده است، تبعیت معادلات به‌دست‌آمده از شرایط تقریباً خطی برای تغییرات نشست در برابر بار، بر پایه معادله بکر قابل تفسیر و تایید است. همچنین داده‌های فشار-نشست حاصل از آزمایش‌ها، روند مشابهی با تحقیقات و گزارش‌های دیگر در این زمینه داشته است (Huang *et al.*, 2016 ; Brunskill *et al.*, 2011). بر همین اساس به نظر می‌رسد سامانه طراحی‌شده قابلیت اندازه‌گیری پارامترهای فشار-نشست با دقت بالا را فراهم کرده است. امکان ایجاد سطوح مختلف بار و سرعت نفوذ در خاک توسط جعبه‌دنده و اینورتور و همچنین قابلیت اتصال نیروسنج‌ها و پروب‌های مختلف بر روی دستگاه، از مزایا و تفاوت‌های این سامانه نسبت به بیشتر نمونه‌های مشابه است چراکه غالب این سامانه‌ها در سطح ثابتی از سرعت نفوذ، عمل نموده و بار قابل‌اعمال بر روی خاک نیز در آن‌ها معمولاً محدود است (Massah & Noorolahi, 2010).

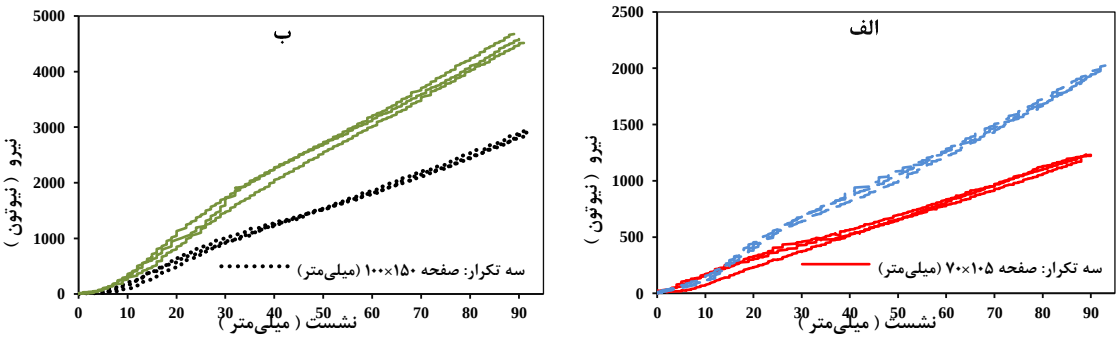


شکل ۵- نتایج داده‌های ثبت‌شده به‌صورت نمودار نیرو-جابجایی توسط سامانه در صفحات بارگذاری مختلف.

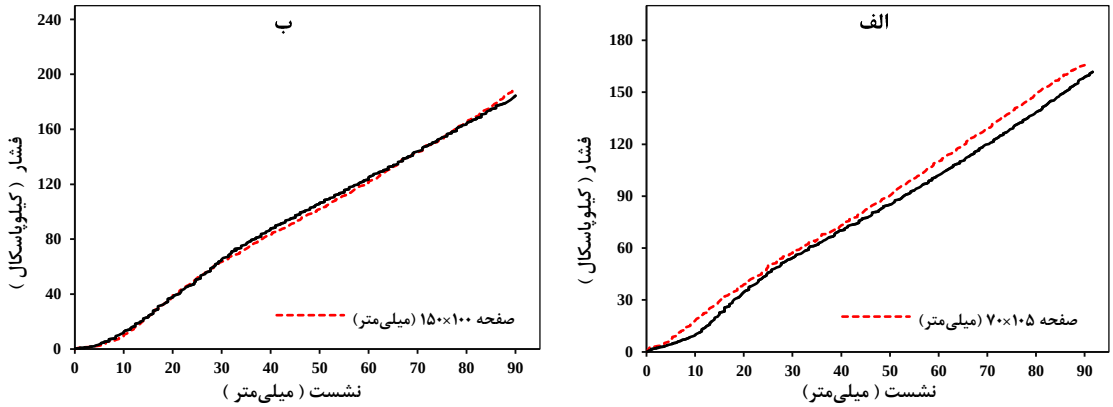


شکل ۶- نمودارهای نیرو-جابجایی برای چهار صفحه بارگذاری در نمونه خاک مورد آزمایش: الف- با نسبت ابعاد ۱/۵، ب- با نسبت ابعاد ۲/۵.

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) که در شکل (۷) نمودارهای مربوطه ترسیم‌شده است. سپس نمودارهای فشار-نشست، بر اساس اعمال مساحت صفحات، مطابق شکل (۸) ترسیم‌شده است. برای به دست آوردن مقادیر سه‌گانه پارامترهای خاک (k_c، k_φ، و n)، مبتنی بر معادله تغییر شکل بکر و لگاریتم گیری از طرفین این معادله عمل شده و برحسب عرض صفحات فشاری درنهایت مقادیر پارامترهای سه‌گانه بکر محاسبه شد. مقادیر مربوط به هر سه پارامتر خاک در معادله بکر به شرح جدول (۳) برحسب آزمون‌های تجربی به‌دست‌آمده است.



شکل ۷- نمودارهای نیرو-جابجایی چهار صفحه بارگذاری در نمونه خاک مورد آزمایش: الف- عرض ۷۰ میلی‌متر طول متغیر، ب- عرض ۱۰۰ میلی‌متر طول متغیر.



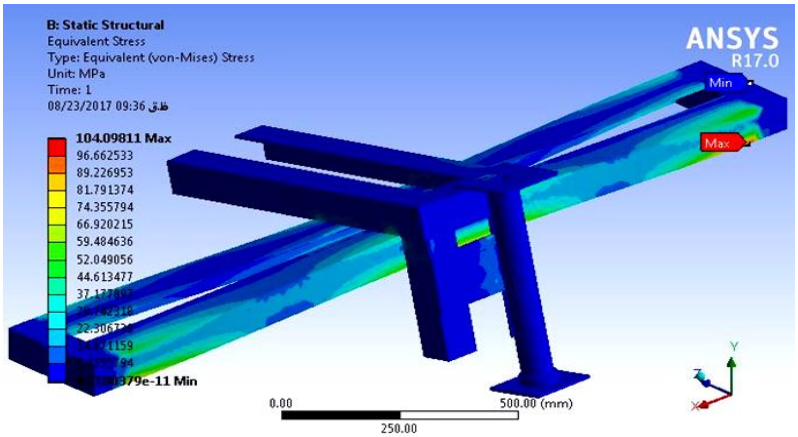
شکل ۸- نمودارهای فشار-نشست چهار صفحه بارگذاری در نمونه خاک مورد آزمایش: الف- عرض ۷۰ میلی‌متر طول متغیر، ب- عرض ۱۰۰ میلی‌متر طول متغیر.

جدول ۳- مشخصات سه‌گانه بکر به‌دست‌آمده از داده‌های نیرو-جابجای ثبت‌شده توسط دستگاه طراحی و ساخته‌شده برای نمونه خاک مورد آزمایش.

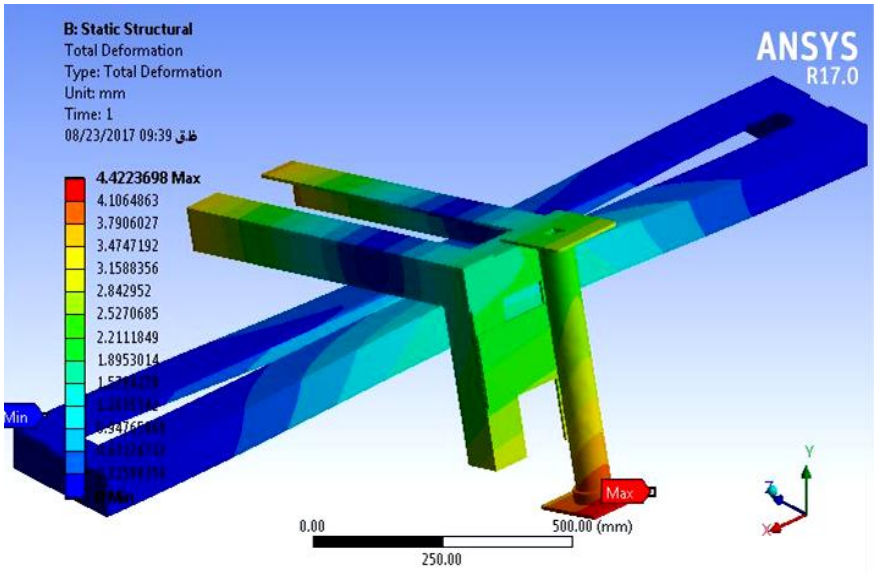
ابعاد صفحات (cm)	ضریب بدون بعد معدله بکر(n) (-)	مدول چسبندگی خاک (K_c) ($N.mm^{-(n+1)}$)	مدول چسبندگی خاک (K_ϕ) ($N.mm^{-(n+2)}$)
۷۰ * ۱۰۵	۱/۱	۱۷۴/۰۴	۵/۷۵
۷۰ * ۱۷۵			
۱۰۰ * ۱۵۰	۱/۳	-۱۱/۰۲	۶/۳۹
۱۰۰ * ۲۵۰			

تحلیل استحکام مکانیکی دستگاه

با توجه به این‌که سامانه طراحی‌شده طی بارگذاری بر روی خاک، با بارهای مکانیکی نسبتاً بالایی مواجه است بهتر است استحکام مکانیکی بخش‌های مختلف دستگاه محرز گردد. برای تحلیل مکانیکی شاسی دستگاه از نرم‌افزار ANSYS استفاده شد. نتایج مربوط به تنش‌های وان‌مسیز بر اساس تحلیل اجزای محدود، حاکی از روی دادن تنش بیشینه در نقاط اتصال شاسی دستگاه به حامل انباره خاک بوده است که بر پایه همین مشاهده، تعداد نقاط اتصال شاسی به حامل در طرح نهایی تا آستانه ایجاد شرایط ایمن، افزایش داده شد. نتایج و نمای گرافیکی از تحلیل در شکل (۹) نشان داده‌شده است. بر اساس مشاهدات، ضریب اطمینان به‌دست‌آمده بالاتر از ۲ است که با توجه به شرایط کاری در سخت ترین وضعیت بارگذاری، ضریب اطمینان قابل قبولی به نظر می‌رسد. همچنین تنش ماکزیمم با ضریب اطمینان ۲، در حدود ۱۰۰ مگاپاسکال و در کناره‌های شاسی مشاهده شد.



شکل ۹- نمای گرافیکی از تحلیل تنش شاسی دستگاه در نرم‌افزار ANSYS17 در محیط Workbench.



شکل ۱۰- نمای گرافیکی از تغییر شکل شاسی دستگاه در نرم‌افزار ANSYS17 در محیط Workbench.

علاوه بر این، کانتور تغییر شکل‌های به وجود آمده در بدنه دستگاه حاکی از آن بوده است که بیشترین تغییر شکل به وجود آمده در شاسی دستگاه در حدود ۴ میلی‌متر است که مقدار آن با توجه به عرض ۲ متری شاسی، ناچیز به نظر می‌رسد (شکل (۱۰)).

نتیجه‌گیری

این مطالعه شامل طراحی و ساخت یک سیستم اندازه‌گیری پارامترهای نیرو-جابجایی در خاک است که به‌طور خاص برای اندازه‌گیری پارامترهای فشار-نشست خاک و در رابطه با حرکت زمین نوردها در معادله بکر اجراشده است. نتایج کلی این تحقیق را می‌توان به شرح موارد زیر دسته‌بندی کرد:

۱- بوامتر ساخته‌شده طی این پژوهش، ضمن فراهم کردن شرایط برای اندازه‌گیری پارامترهای سه‌گانه معادله تغییر شکل خاک جهت مطالعات برهم‌کنش خاک- ابزار در انباره خاک، در مقایسه با بیشتر نمونه‌های مشابه خود، قابلیت تغییر برخی از پارامترها نظیر سرعت نفوذ در خاک را نیز فراهم کرده است که به نوبه خود برای مطالعات مربوط به دینامیک تغییر شکل خاک، حائز اهمیت است.

۲- پس از طراحی، ساخت و مونتاژ بخش‌های مختلف دستگاه، مکانیسم‌ها بر اساس هدف تحقیق به‌خوبی در کنار یکدیگر عمل نموده و نمودارها و نتایج مشاهده‌شده حاکی از قابلیت مجموعه برای آزمون‌های نشست خاک و تعیین پارامترهای مکانیکی خاک است.

۳- بوامتر ساخته‌شده امکان تجهیز به برخی ابزارهای دیگر مربوط به نشست خاک را نیز فراهم نموده است که از آن جمله می‌توان به مخروط استاندارد، قطاع چرخ و ابزارهای مشابه اشاره نمود.

۴- استحکام مکانیکی دستگاه بر اساس بیشینه بارهای مکانیکی محتمل، موردبررسی قرار گرفت و نتایج نشان داد تنش ماکزیمم در شاسی با ضریب اطمینان ۲، در حدود ۱۰۰ مگاپاسکال خواهد بود. همچنین حداکثر تغییر شکل به وجود آمده در شاسی در حدود ۴ میلی‌متر مشاهده گردید. تنش و تغییر شکل پیش‌بینی شده در مقایسه با مشخصات مکانیکی مصالح مورد استفاده در پیکره دستگاه، نشان از ایمنی قابل‌قبول دستگاه از دیدگاه استحکام مکانیکی داشته است.

با توجه به فراگیری کاربرد ملاحظات بکر برای پیش‌بینی رفتار خاک در برابر بارهای عمودی، سیستم-های مشابه این پژوهش را می‌توان برای رصد کردن شرایط خاک-ماشین و همچنین مدیریت پارامترهای

مرتبط با کشش و بازده کششی ماشین توسعه داد به گونه‌ای که پیش از درگیری ماشین با خاک، ارزیابی اولیه و برخطی از شرایط خاک به انجام رسیده و اطلاعات برداشت شده در قالب یک سیستم کنترل و نمایش وضعیت خاک و ماشین، منجر به بهبود و اصلاح احتمالی شرایط و پارامترهای ماشین گردد.

هیچگونه تعارض منافع بین نویسندگان وجود ندارد.

REFERENCES

Bekker, M. G. (1969). Introduction to terrain-vehicle systems. part i: The terrain. part ii: The vehicle. Michigan Univ Ann Arbor, Michigan. US.

Bernstein, R. (1913). Probleme zur experimentellen otorpflugmechanik. *Der Motorwagen*, *16*(9), 199-206.

Brunskill, C., Patel, N., Gouache, T. P., Scott, G. P., Saaj, C. M., Matthews, M., & Cui, L. (2011). Characterisation of martian soil simulants for the ExoMars rover testbed. *Journal of Terramechanics*, *48*(6), 419-438.

Ding, L., Gao, H., Deng, Z., Nagatani, K., & Yoshida, K. (2011). Experimental study and analysis on driving wheels' performance for planetary exploration rovers moving in deformable soil. *Journal of Terramechanics*, *48*(1), 27-45.

Edwards, M. B., Dewoolkar, M. M., Huston, D. R., & Creager, C. (2017). Bevameter testing on simulant Fillite for planetary rover mobility applications. *Journal of Terramechanics*, *70*, 13-26.

Goriatchkin, B. P. (1936). Theory and development of agriculture machinery, Moscow. Russia.

Howari, F. M. (2003). The use of remote sensing data to extract information from agricultural land with emphasis on soil salinity. *Soil Research*, *41*(7), 1243-1253.

Huang, H., Li, J., Chen, B., Wu, B., & Zou, M. (2016). Performance evaluation of a wire mesh wheel on deformable terrains. *Journal of Terramechanics*, *68*, 9-22.

Mardani, A., Shahidi, K., & Karim-Maslak, H. (2010). An indoor traction measurement system to facilitate research on agricultural tires. *Journal of Food, Agriculture and Environment*, *8*.

Mähönen, J., Lintzén, N., & Casselgren, J. (2021). Portable bevameter for measuring snow properties in field. *Cold Regions Science and Technology*, *182*, 103195.

Massah, J., & Noorolahi, S. (2010). Design, development and performance evaluation of a tractor-mounted bevameter. *Soil and Tillage Research*, *110*(1), 161-166.

Mason, G. L., Salmon, J. E., McLeod, S., Jayakumar, P., Cole, M. P., & Smith, W. (2020). An overview of methods to convert cone index to bevameter parameters. Journal of Terramechanics, 87, 1-9.

McKyes, E., & Fan, T. (1985). Multiplate penetration tests to determine soil stiffness moduli. *Journal of terramechanics*, *22*(3), 157-162.

Rahnama, A., Habib Aghi, Q., and Qahramani, A. (2002). Introducing a new simple cutting test machine for unsaturated soils. *Iranian Journal of Science and Technology-B*, *27* (B-1). (In Farsi)

Taghavifar, H., & Mardani, A. (2018). Off-road Vehicle Dynamics: Analysis, Modelling and Optimization. *Springer Publishing AG*, publishing. Gewerbestr. Swizerland.

Van, N. N., Matsuo, T., Koumoto, T., & Inaba, S. (2008). Experimental device for measuring sandy soil sinkage parameters. *Bulletin of the Faculty of Agriculture Saga University*, Japan, *93*(1), 91-99.

Yang, C., Yang, G., Liu, Z., Chen, H., & Zhao, Y. (2018). A method for deducing pressure–sinkage of tracked vehicle in rough terrain considering moisture and sinkage speed. *Journal of Terramechanics*, *79*, 99-113.

Yu, T. (2007). *The tractive performance of a Friction-Based Prototype track*. Doctoral dissertation. University of Pretoria, Pretoria. South Africa.