طراحی، ساخت و ارزیابی دستگاه بوامتر پشت تراکتوری (۵۶۸)

سارا نورالهی[۱]، جعفر مساح[۲]

چکیده

در قرن حاضر تحقیقات گسترده و کاربردی در زمینه مکانیک خاک صورت گرفته که شمار زیادی از آن‌ها در زمینه تاثیر عبور و مرور وسایل نقلیه بر روی خاک بوده است. مشکل اصلی در انجام این تحقیقات تعیین پارامترهای مهم و بنیادی خاک است. تعیین این پارامترها به منظور شناخت و آگاهی از ویژگی‌های خاک در کشاورزی دقیق، برای تعیین عکس العمل خاک در برابر رفت و آمدهای مکرر وسایل نقلیه و هم چنین تعیین مقاومت غلتشی خاک ضروری است. معادله بیکر یکی از معادله های کاربردی در تعیین پارامترهای خاک است. در معادله بیکر k_c، k_φ و n پارامترهای فشار، نشست هستند که به کمک دستگاه بوامتر اندازه‌گیری می‌شوند. در این تحقیق به منظور تعیین پارامترهای خاک دستگاه بوامتر پشت تراکتوری طراحی و ساخته شد که شامل شاسی اصلی، صفحات بارگذاری، شاسی حامل و سیستم الکتروهیدرولیکی می‌باشد. صفحات بارگذاری به شکل مستطیل در دو اندازه مختلف با نسبت طول به عرض یکسان در نظر گرفته شدند. دستگاه بر روی خاک لومی با سه تکرار برای هر صفحه مورد آزمایش قرار گرفت. با انجام آزمایش‌های لازم برای ارزیابی کار دستگاه، مشخص شد که دستگاه بوامتر پشت تراکتوری ساخته شده دارای سیستم سنجش نیرو با دقت ۰/۰۲ کیلوگرم و سیستم سنجش جابجایی با دقت ۰/۰۱ میلی‌متر است. بنابراین این دستگاه توانایی ترسیم نمودارهای فشار- نشست را با دقت بالا دارا می‌باشد.

۱- دانشجوی کارشناسی ارشد مکانیک ماشین های کشاورزی، پردیس ابوریحان دانشگاه تهران، پست الکترونیک:saranoorolahi@gmail.com
۲- استادیار گروه مکانیک ماشین های کشاورزی، پردیس ابوریحان دانشگاه تهران

مقدمه

توصیف ویژگی‌های خاک برای مدیریت صحیح و آگاهی از رشد محصولات در کشاورزی دقیق، نشان دادن کارایی وسایل نقلیه غیر جاده‌ای[1]، تغییر شکل خاک (فشردگی و پیدایش اثر چرخ بر روی خاک) که ناشی از رفت آمد وسایل نقلیه است و تعیین قابلیت خاک برای حرکت وسایل نقلیه[2] ضروری می‌باشد [۴]. مقاومت نفوذی خاک و تنش برشی در بین پارامترهای خاک دو پارامتری هستند که، از طرفی با محدود کردن پتانسیل مزرعه‌ای، بر رشد محصول و از طرف دیگر با محدود کردن پتانسیل کششی بر قابلیت حرکت وسیله نقلیه اثر می‌گذارند [۲]. یکی از شناخته شده‌ترین روش‌ها برای تعیین پارامترهای خاک و سنجش قابلیت حرکتی وسایل نقلیه توسط بیکر[3] ارایه شده است [۵]. معادله ارایه شده توسط بیکر به شرح زیر است:

$$p = (\frac{k_c}{b} + k_\varphi) z^n \quad (۱)$$

که در معادله بالا p مقدار فشار بر حسب کیلوگرم بر سانتی‌مترمربع؛ z مقدار نشست صفحه بارگذاری بر حسب سانتی‌متر؛ b کوچک‌ترین بعد صفحه بارگذاری بر حسب سانتی‌متر؛ k_c، k_φ و n پارامترهای فشار– نشست هستند که k_c مدول چسبندگی خاک تغییر شکل یافته برحسب $(kg/cm^{(n+1)})$؛ k_φ مدول اصطکاکی خاک تغییر شکل یافته بر حسب $(kg/cm^{(n+2)})$ و n ضریب بدون بعد است [۵]. برای محاسبه ضرایب معادله بیکر از روش ارایه شده توسط بیکر استفاده می‌شود. بر اساس این روش برای حل معادله (۱) باید از دو صفحه بارگذاری با عرض‌های متفاوت استفاده کرد. روش کار به این ترتیب است که ابتدا معادله بیکر برای دو صفحه با عرض‌های متفاوت نوشته می شود (معادله ۲)، سپس از طرفین دو معادله لگاریتم گرفته شده (معادله ۳) و نمودار لگاریتم z در برابر لگاریتم p برای هر دو صفحه رسم می‌شود. شیب نمودار بیانگر مقدار n است. این دو نمودار در خاک همگن موازی بوده ولی در خاک غیر همگن ممکن است با هم موازی نباشند. در این حالت مقدار میانگین n به دست آمده از دو نمودار در نظر گرفته می‌شود.

$$p_1 = (\frac{k_c}{b_1} + k_\varphi) z_1^n$$
$$p_2 = (\frac{k_c}{b_2} + k_\varphi) z_2^n \quad (۲)$$

$$\log p_1 = \log(\frac{k_c}{b_1} + k_\varphi) + n \log z_1$$
$$\log p_2 = \log(\frac{k_c}{b_2} + k_\varphi) + n \log z_2 \quad (۳)$$

با توجه به معلوم بودن مقادیر n، b_1 و b_2 و هم چنین با توجه به مقادیر اندازه‌گیری شده برای p و z به کمک بوامتر، می‌توان مقادیر مجهول k_c و k_φ را محاسبه کرد[۵]. از آن جایی که فشار وارد از طرف وسایل نقلیه غیر جاده‌ای بر سطح خاک از ۱/۰۳ کیلوگرم بر سانتی‌متر مربع بیش‌تر نمی شود، و این فشار حداکثر تا عمق ۵۰ سانتی‌متر از سطح زمین تاثیرگذار است، وسایل از زه گیری روابط فشار– نشست برای فشار ۱/۰۳ کیلوگرم بر سانتی‌متر مربع و نشست ۵۰ سانتی‌متر در نظر گرفته می شوند. بیکر نشان داد که در خاک های همگن اگر نسبت طول به عرض صفحه‌های بارگذاری بزرگ‌تر از ۵ تا ۷ باشد، مقدار عرض صفحه بر روی مقادیر k_c و k_φ تاثیر گذار نیست. ولی با توجه به امکان وجود نواحی غیر همگن در خاک، توصیه کرد که عرض صفحه‌های

1.Off road
2. Trafficability
3. Bekker

بارگذاری نباید از ۵ سانتی متر کم‌تر باشد و حتی بهتر است که از ۱۰ سانتی‌متر نیز کم‌تر نباشد. از شرایط مهم دیگر آزمایش سرعت نفوذ صفحه بارگذاری به خاک است که باید بین ۲/۵ تا ۵ سانتی‌متر بر ثانیه باشد [۵]. از جمله وسایل اندازه‌گیری مقاومت و تعیین پارامترهای خاک بوامتر[1] است که اولین بار توسط بیکر ابداع شد [۵]. این بوامتر از نوع ثابت بود. در سالیان بعد انواع دیگری از وسایل اندازه گیری مقاومت خاک ساخته شد که به واسطه اتصال به وسایل نقلیه، قابل انتقال به مزرعه بودند (بوامترهای متحرک). از جمله این بوامترها، دستگاهی است که واسترلند[2] برای تعیین مقاومت خاک‌های جنگلی ابداع کرد. در این دست اه میزان انحنای صفحه بارگذاری و حرکت آن بر روی زمین به شکل چرخ طراحی شده بود. این دستگاه دارای دو جک هیدرولیک افقی و عمودی بود که به طور هم زمان وارد عمل می‌شدند و حرکت صفحه انحنادار را تامین می‌کردند [۴]. جان و هومبرگ[3] بوامتری را ابداع کردند که قادر بود اطلاعات دریافت شده از چندین نفوذسنج مخروطی را به طور هم زمان ثبت کند. این بوامتر مجهز به جک هیدرولیک در مرکز دستگاه بود که بار لازم برای نفوذ صفحه بارگذاری در خاک را تامین می‌کرد. صفحه بارگذاری به کار گرفته شده توسط آن‌ها دایره‌ای شکل و به قطر ۲۰/۳ سانتی‌متر بود [۳]. یو[4] نیز بوامتر متحرکی را ابداع کرد که علاوه بر انجام آزمایش نشست صفحه بارگذاری و آزمایش برش خاک، قابلیت نصب نفوذ سنج مخروطی را نیز داشت و قادر بود میزان شاخص مخروطی را اندازه گیری 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 تامین حرکت افقی صفحه برشی به کار می‌رفت [۶].

به این ترتیب، بر اساس بررسی‌های انجام شده و با توجه به این که در صورت استفاده از بوامتر متحرک نیاز به جابجایی خاک از مزرعه به آزمایشگاه نیست و ساختار خاک دست نخورده باقی می‌ماند و پارامترهای خاک دقیق‌تر محاسبه می شوند، بوامتر متحرک پشت تراکتوری طراحی و ساخته شد.

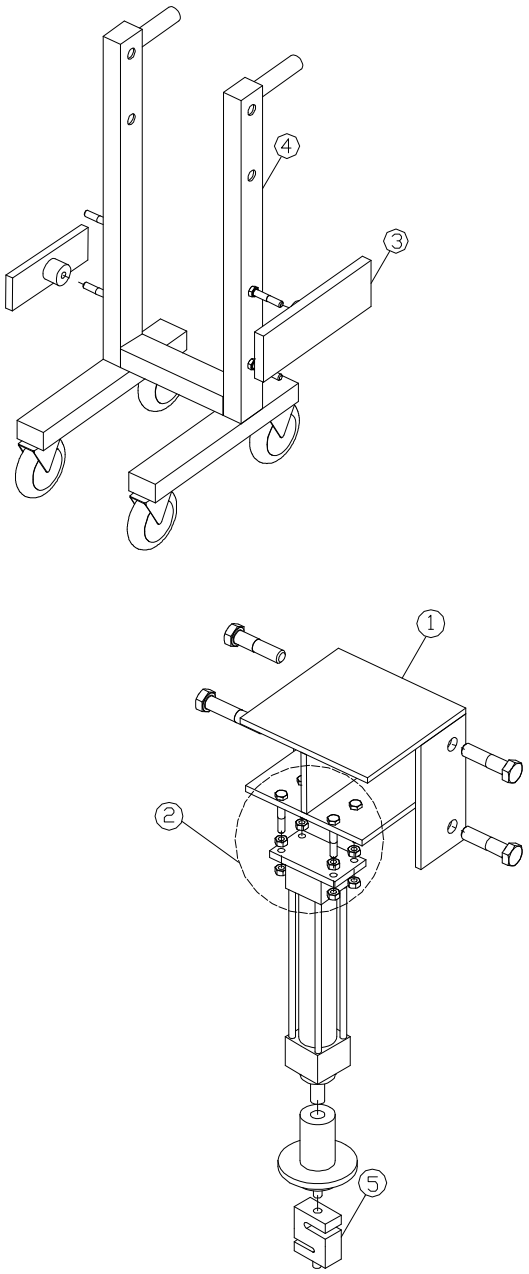
مواد و روش ها

دستگاه ساخته شده در این تحقیق یک بوامتر متحرک پشت تراکتوری است که طول، عرض و ارتفاع آن به ترتیب ۳۷، ۳۰، ۱۱۵ سانتی متر است. شکل ۱ اجزای دستگاه بوامتر پشت تراکتوری و شکل ۲ ساختار کامل دستگاه که بر روی تراکتور سوار شده است را نشان می دهد. دستگاه بوامتر پشت تراکتوری از اجزای اصلی زیر تشکیل شده است:

شاسی اصلی که در شکل ۱ با شماره ۱ مشخص شده، برای اتصال به شاسی پشت تراکتور و نگه‌داری جک هیدرولیک و خط‌کش دیجیتال در قسمت پایین و تابلوی الکتریکی در قسمت بالای خود طراحی شده است. شاسی اصلی از چهار صفحه مستطیل شکل از جنس فولاد St 37 ساخته شده و توسط چهار پیچ M20×2.5 به شاسی عقب تراکتور متصل می‌شود. بر روی شاسی اصلی برای حصول اطمینان از وارد آمدن بار به صورت عمودی بر روی خاک، از سیستم تراز طولی و عرضی استفاده شده است. این سیستم که در شکل ۱ با شماره ۲ مشخص شده، شامل یک صفحه نگه دارنده و چهار عدد پیچ ثابت است. مهره‌هایی که در دو طرف صفحه آن را به پیچ‌های ثابت متصل می‌کنند این قابلیت را به صفحه می‌دهند که در دو جهت طولی و عرضی تراز شود.

صفحات بارگذاری که در شکل ۱ با شماره ۳ مشخص شده نیز از جنس فولاد St 37 به شکل مستطیل و به ضخامت ۲ سانتی-متر در دو سایز ۳۰×۱۰ سانتی‌متر و ۲۱×۷ سانتی‌متر و نسبت طول به عرض ۳ طراحی شده‌اند. به منظور اتصال صفحات بارگذاری به انتهای لودسل یک بوشن با رزوه داخلی M12 به مرکز صفحات جوش داده شد و برای رفع چروکیدگی کف صفحات در اثر عملیات جوش کاری، سطح تماس آن‌ها با خاک، مجددا ماشین‌کاری شدند.

1. Bevameter
2. Wasterland
3. Jahn an Humburg
4. Yu



شکل ۱. نقشه انفجاری بوامتر پشت تراکتوری.

شکل۲. دستگاه بوامتر پشت تراکتوری نصب شده بر روی تراکتور.

شاسی حامل که در شکل ۱ با شماره ۴ مشخص شده به منظور سهولت حمل و نقل دستگاه از آزمایشگاه تا محل نگه‌داری تراکتور، امکان نگه‌داری مناسب دستگاه و ضمایم آن در مواقع غیر کاری طراحی و ساخته شده است.

سیستم الکتروهیدرولیکی: سیستم الکتروهیدرولیکی وظیفه کنترل و اتوماسیون سیستم اعمال نیرو به خاک را به عهده دارد. اجزای این سیستم شامل: لودسل، خطکش دیجیتال، اینترفیس، سیستم کنترل از راه دور، مدار کنترل الکتریکی و مدار قدرت هیدرولیکی است.

لودسل[1] که در شکل ۱ با شماره ۵ مشخص شده، S شکل با ظرفیت کاری۵۰۰ کیلوگرم و دقت ۰/۲ کیلوگرم است که ز یک سمت به پیستون جک هیدرولیک و از سمت دیگر به صفحات بارگذاری متصل می‌شود. با توجه به این که بیش‌ترین نیروی وارد بر صفحه بارگذاری ۳۰۹ کیلوگرم است، لودسل باید قادر به سنجش این مقدار نیرو باشد، بنابراین لودسل با ظرفیت ۵۰۰ کیلوگرم انتخاب شد. برای اندازه‌گیری دقیق، بار وارد شده از طرف جک هیدرولیک به لودسل و به دنبال آن به خاک باید کاملا عمودی باشد. برای حصول اطمینان از اعمال بار به صورت عمودی و افزیش دقت اندازه‌گیری لودسل، از دو عدد آب نما در دو امتداد عمود بر هم استفاده شده که کاربر بتواند به راحتی تراز صفحات بارگذاری را در دو جهت طولی و عرضی کنترل نماید (شکل ۳).

شکل ۳. آب نماهای نصب شده بر روی صفحه تراز.

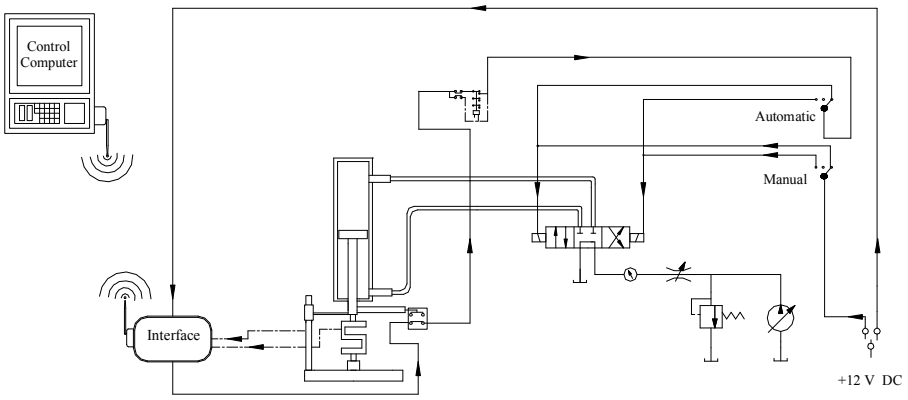
خطکش دیجیتال[2] از نوع اهمی با مقاومت الکتریکی۴ کیلو اهم و طول کورس۳۸/۴ سانتی‌متر، برای اندازه‌گیری میزان جابجایی عمودی صفحه بارگذاری مورد استفاده قرار گرفته است. محور لغزنده خطکش به صورت مکانیکی به انتهای پیستون جک متصل شده که با حرکت جک به سمت پایین محور لغزنده خطکش نیز جابجا شود.

1. (Korea, 2003, Bongshin)
2. Position transducer, KTC Series

اینترفیس[1] شامل دو صفحه نمایشگر برای نشان دادن اطلاعات مربوط به بار اعمالی و مقدار جابجایی می‌باشد. اینترفیس دارای حساسیت توزین با دقت ۱/۱۰۰۰۰ مقدار لودسل و هم چنین دارای دو فیلتر کنترل و یک فیلتر جهت نمایش است. اینترفیس توانایی نصب خروجی RS232 همراه با برنامه نرم‌افزاری رسم گراف در محیط ویندوز را دارا می‌باشد.

با توجه به این که مدار الکتریکی و هیدرولیکی این دستگاه در ارتباط با یکدیگر کار می‌کنند و جابجای و نیرو توسط این دو مدار اعمال و سنجیده می‌شود، این دو مدار در یک نقشه شرح داده می‌شود (شکل ۴).

مدار هیدرولیک دستگاه شامل: جک هیدرولیک، شیرهای کنترل فشار، جهت و جریان[2]، فشارسنج ۱۶۰ کیلوگرم بر سانتی‌متر مربعی، شیلنگ ها و اتصالات هیدرولیکی می‌باشد. جک هیدرولیک[3] از نوع دو طرفه با قطر پیستون ۴ سانتی‌متر، طول کورس ۲۴ سانتی‌متر و حداکثر فشار کاری ۱۴۰ کیلوگرم بر سانتی‌متر مربع برای اعمال بار بر روی صفحات بارگذاری می‌باشد. برای اعمال فشار ۱/۰۳ کیلوگرم بر سانتی‌متر مربع به خاک، میزان فشار اعمال شده بر روی پیستون جک می‌بایست حداکثر ۷۰ کیلوگرم بر سانتی‌متر مربع باشد. بدین منظور با استفاده از سیستم کنترل فشار، فشار روغن ورودی به شیرهای کنترل بر روی ۷۵ کیلوگرم بر سانتی‌متر مربع تنظیم شده است.



شکل ٤. مدار الکتروهیدرولیک.

معادله ۴ بیانگر فشار اعمال شده توسط صفحات بارگذاری به زمین است.

$$p_2 = \frac{P_1 A_1}{A_2} \qquad (۴)$$

که در معادله بالاp_2 فشار صفحات بارگذاری به زمین؛ p_1 فشار اعمال شده به جک از طرف روغن برابر با ۷۵ کیلوگرم بر سانتی‌متر مربع؛ A_1 سطح پیستون برابر با ۱۲/۵۶ سانتی‌متر مربع و A_2 سطح صفحات بارگذاری است. مقدار p_2 با توجه به مقدار A_2 متغیر است.

تراکتور مورد استفاده در این تحقیق مدل U۶۵۱M با وزن ۲۲۱۰ کیلوگرم و قدرت ۶۵ اسب بخار بود. دبی سیستم هیدرولیک تراکتور در فشار موثر ۱۲۰ بار کیلوگرم بر سانتی‌متر مربع ۴۰ لیتر در دقیقه و فشار سیستم هیدرولیک تراکتور ۱۵۰ کیلوگرم بر سانتی‌متر مربع در دور اسمی ۱۸۰۰ دور در دقیقه بود. پمپ هیدرولیک تراکتور نیز از نوع چرخ دنده‌ای دوار و مدل PH8 و حداکثر فشار ۱۵۰ کیلوگرم بر سانتی‌متر مربع بود.

1. Interface
2. (Taiwan, 2002, Hystar)
3. (Japan, 1990, Taiyo)

در مدار هیدرولیک شیر کنترل جریان برای تنظیم سرعت نفوذ صفحات بارگذاری در خاک استفاده شده است. برای کنترل سرعت نفوذ، دبی روغن ورودی به سیستم باید کنترل شود. روش تعیین دبی (Q) مورد نیاز با معادله ۵ بیان می‌شود [۱].

$$Q = VA'$$

(۵)

که در معادله بالا A' سطح مقطع پیستون برابر۱۲/۵۶ سانتی‌متر مربع و V سرعت حرکت پیستون که باید در محدوده ۲/۵ تا ۵ سانتی متر بر ثانیه باشد. بنابراین دبی مورد نیاز سیستم در محدوده ۱/۹ تا ۳/۸ لیتر در دقیقه می‌باشد.

برای کنترل فشار روغن ورودی از پمپ هیدرولیک تراکتور به سیستم هیدرولیک دستگاه، شیر کنترل فشار همراه با فشارسنج ۱۶۰ کیلوگرم بر سانتی‌متر مربعی به کار برده شده است. فرمان هیدرولیکی به جک توسط یک شیر کنترل جهت جریان با تحریک برقی چهار راهه سه وضعیتی از نوع مرکز باز، انجام می شود. این شیر دارای تحریک سولونوئیدی از هر دو طرف می باشد. شیلنگ های دستگاه توسط اتصال فشاری- مکانیکی نوع پرچی[1] به سیستم هیدرولیک تراکتور متصل می‌شوند. روغن مورد نیاز سیستم هیدرولیک از پمپ هیدرولیک تراکتور تامین شده است. مدار الکتریکی نیزشامل: کلیدهای استپ- استارت، کلید انتخاب وضعیت، کنتاکتور و میکروسوییچ است. قبل از شروع به کار توسط کلید انتخاب وضعیت، دستگاه را در یکی از دو حالت اتوماتیک یا دستی قرار می دهیم. با زدن کلید استارت و برقراری جریان برق در دستگاه کلید سه وضعیتی مربوط به حالت اتوماتیک را در موقعیتی قرار می‌دهیم که امکان پایین آمدن جک فراهم شود. در این حالت روغن از پمپ هیدرولیک تراکتور از طریق خروجی‌های هیدرولیک و شیلنگ‌های متصل به آن از شیرهای کنترل فشار، جریان و جهت عبور می‌کند. در این مسیر به ترتیب فشار، سرعت و جهت حرکت روغن هیدرولیک ارسالی به جک هیدرولیک کنترل می‌شود و جک به همراه صفحه بارگذاری متصل به آن به سمت پایین حرکت می کند و خاک زیر صفحه بارگذاری در اثر فشار جک فشرده می‌شود. میزان نشست صفحه به خاک تا زمانی ادامه می یابد که مقدار نیروی وارده از طرف جک به حد تعریف شده در اینترفیس برسد. در این لحظه اینترفیس توسط رله خود فرمان قطع جریان را به شیر کنترل جهت هیدرولیک می‌دهد در نتیجه حرکت رو به پایین جک متوقف می‌شود. با پایین آمدن جک، محور لغزنده خطکش دیجیتال متصل به آن نیز پایین آمده و مقدار نشست خاک را اندازه گیری می‌کند. اطلاعات ارسال شده از خطکش دیجیتال و لودسل وارد اینترفیس شده و از آن جا توسط سیستم فرستنده-گیرنده (کنترل از راه دور) وارد لپ تاپ[2] شده و در آن جا نمودار نیرو-جابجایی توسط نرم افزار ترسیم می‌شود. هم چنین اطلاعات جمع آوری شده در یک فایل نرم‌افزار اکسل[3] ذخیره می-شود که بتوان آن‌ها را تجزیه وتحلیل کرد. علاوه بر سیستم کنترل از راه دور می‌توان دستگاه را به طور مستقیم به لپ تاپ متصل کرد. برای ارسال فرمان جهت بالا آمدن مجموعه، کلید سه وضعیتی را در موقعیت دستی قرار می‌دهیم که امکان بالا آمدن صفحه بارگذاری فراهم شود.

ارزیابی دقت سیستم سنجش جابجایی و نیرو

دقت کاری دستگاه قبل از انجام آزمایش در دو وضعیت بررسی شد: جهت بررسی دقت سیستم سنجش نیرو، بعد از کالیبره کردن لودسل با توجه به این نکته که بار وارد بر لودسل فشاری است، وزنه استاندارد ۰/۰۱± ۱۰ کیلوگرمی بر روی لودسل قرار داده شد. اینترفیس عدد اندازه‌گیری شده توسط لودسل را با دقت ۰/۲ کیلوگرم نشان داد. به منظور بررسی دقت سیستم سنجش جابجایی، از فیلر استفاده شد. روش کار به این ترتیب بود که از یک سطح صاف به عنوان مبدا صفر استفاده شد. میزان جابجایی خطکش بر روی این سطح بر روی صفر تنظیم شد، سپس فیلر ۰/۰۵ میلی‌متر بر روی سطح در محل قرارگیری انتهای خطکش قرار داده شد. با قرائت عدد نشان داده شده در صفحه نمایش اینترفیس مشخص شد که دقت سیستم سنجش جابجایی ۰/۰۱± میلی‌متر است.

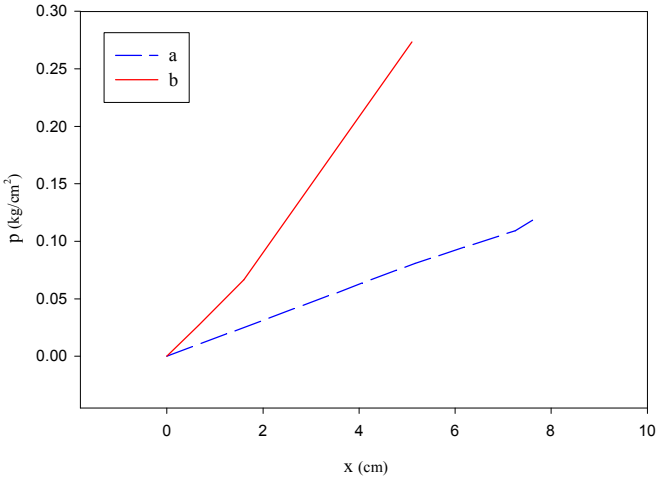
1. Flare Fitting
2. Laptop
3. Excel

ارزیابی دستگاه در یک نوع خاک زراعی

برای انجام آزمایش، خاک زراعی در مزرعه تحقیقاتی پردیس ابوریحان، دانشگاه تهران به ابعاد ۳ در ۱۲ متر ابتدا توسط گاو آهن برگردان‌دار سه خیش با عرض کار ۱۲۵ سانتی‌متر و عمق شخم ۳۰ سانتی‌متر شخم زده شد. در مرحله بعد خاک توسط دیسک تاندوم ۲۸ پره‌ای با عرض کار ۲۵۰ سانتی‌متر، قطر دیسک ۵۱ سانتی‌متر و فاصله بین دو دیسک ۸ سانتی‌متر در دو مرحله دیسک زده شد. سپس سطح خاک توسط ماله[1] مسطح شد. خاک مزرعه لومی و شامل ۲۴/۶ درصد رس، ۴۰/۸ درصد سیلت و ۳۴/۶ درصد شن و وزن مخصوص حقیقی ۲/۶۳ گرم بر سانتی‌متر مکعب بود. پس از آماده سازی زمین، دستگاه به شاسی عقب تراکتور متصل شده و به محل انجام آزمایش انتقال داده شد. آزمایش‌ها برای صفحات بارگذاری با سه تکرار انجام شد. بعد از انجام هر آ مایش ، تراکتور به سمت جلو حرکت داده می‌شد که خاک تحت بارگذاری و تغییر شکل پیدا کرده در آزمایش بعدی مورد استفاده قرار نگیرد. سرعت نفوذ صفحات در خاک ۳ سانتی‌متر بر ثانیه در نظر گرفته شد.

نتایج آزمایش دستگاه در مزرعه

بعد از انجام آزمایش در مزرعه، داده‌های ثبت شده توسط نرم افزار بررسی شدند و نمودارهای فشار- نشست برای هر کدام از دو صفحه بارگذاری ترسیم شد. با استفاده از معادلات (۳و۲) ضرایب معادله بیکر (معادله ۱) محاسبه شدند. در شکل ۵ یک نمونه از نمودارهای به دست آمده برای صفحه‌های بارگذاری نشان داده شده است.



شکل ۵. نمودارهای فشار- نشست برای صفحات بارگذاری. a. صفحه مستطیلی ۲۱×۷ سانتی‌متری b. صفحه مستطیلی ۳۰×۱۰ سانتی‌متری

نتیجه‌گیری

سیستم سنجش جابجایی اهمی خط‌کش دیجیتال با سرعت جابجایی ۵ سانتی‌متر بر ثانیه قابلیت اندازه‌گیری جابجایی با دقت ۰/۰۱ میلی‌متر را دارا بود. پایداری سیستم در حد مطلوبی بود به طوری که بعد از تنظیم سرعت به میزان ۳ سانتی‌متر بر ثانیه با ۱۰ بار حرکت جک مقدار سرعت تغییر پیدا نکرد و در همین تعداد حرکت جک سیستم کنترل فشار دارای خطایی به اندازه ۰/۲ کیلوگرم بر سانتی‌متر مربع بود. با توجه به مطالب ذکر شده دستگاه قابلیت کافی برای انجام آزمایش بر روی خاک و محاسبه پارامترهای خاک را دارا می‌باشد.

1. Leveller

فهرست منابع:

۱- ج پینچز، مایکل و گ اشبی، جان، ۱۳۸۱، اصول طراحی هیدرولیک، بهروزی لار، منصور و محتسبی، سید سعید، چاپ اول، مرکز انتشارات علمی دانشگاه آزاد اسلامی.

2. Boon, N.E., A. Yahya, A.F. Kheiralla, B.S. Wee and S.K. Gew. 2005. A Tractor-mounted, Automated Soil Penetrometer–shearometer Unit for Mapping Soil Mechanical Properties. Biosystems Engineering,: 90 (4): 381–396.
3. Jahn, B.R. and D.S. Humburg. 2002. A Tractor-Mounted Device for Measurement of In-Situ Soil Strength Properties. ASAE PaperNo: MBSK 02-308. An ASAE/CSAE Meeting Presentation.
4. Shoop, S.A. 1993. Terrain Characterization for Trafficability. US Army Corps of Engineers. CRREL Report 93-6.
5. Wong, J.Y. 2001. Theory of Ground Vehicles. 3rd Edition. New York, John Wiley.
6. Yu, T. 2006. The Tractive Performance of a Friction-based Prototype Track. A Thesis for the Philosophiae Doctor in the Faculty of Engineering, Built Environment and Information Technology University of Pretoria.