

طراحی، ساخت و ارزیابی نفوذسنج مخروطی پشت تراکتوری

مجهز به میله‌های نفوذ چندگانه

یوسف عباسپور گیلانده*، مهدی آهنی، عزت‌اله عسکری اصلی ارده،

ولی رسولی شریانی و امید سفالین**

* نگارنده مسئول، نشانی: اردبیل، دانشگاه محقق اردبیلی، ص. پ. ۱۷۹، تلفن: ۰۴۵۱(۵۵۱۰۱۴۰)، پیام‌نگار: u_abbaspour@yahoo.com

** به ترتیب استادیار؛ دانشجوی کارشناسی ارشد؛ استادیار؛ مربی پژوهشی گروه مهندسی مکانیک ماشین‌های کشاورزی دانشکده کشاورزی دانشگاه محقق اردبیلی؛ و استادیار گروه مهندسی زراعت و اصلاح نباتات دانشکده کشاورزی دانشگاه محقق اردبیلی تاریخ دریافت: ۸۷/۱۱/۵؛ تاریخ پذیرش: ۸۸/۹/۲۸

چکیده

فشردگی خاک یکی از مسایل جدی بسیاری از خاک‌ها در نقاط مختلف دنیاست. به علت تغییر شرایط رطوبتی خاک با زمان، تعیین نقشه‌های فشردگی خاک نیازمند به کارگیری سیستم‌های نمونه‌برداری سریع است. در این خصوص، نفوذسنج مخروطی پشت تراکتوری مجهز به میله‌های نفوذ چندگانه با قابلیت اندازه‌گیری مقادیر شاخص مخروطی خاک در ردیف‌های کشت محصول با فاصله متغیر طراحی و ساخته شد. دستگاه نفوذسنج مجهز به میله‌های چندگانه از سه بخش مکانیکی، هیدرولیکی، و الکترونیکی تشکیل شده و قادر است مقاومت مکانیکی خاک را تا عمق ۴۵ سانتی‌متر اندازه‌گیری کند. بخش مکانیکی شامل یک شاسی است که ضمایم دستگاه روی آن قرار دارد و با اتصال سه نقطه بر روی تراکتور سوار می‌شود. به منظور حرکت میله‌های نفوذ به درون خاک، از سیستم محرک هیدرولیکی استفاده شد. اطلاعات به دست آمده از حسگرهای عمق نفوذ و نیرو، به کمک دیتالاگر جمع‌آوری شد و با انتقال داده‌ها به کامپیوتر متصل به آن، نمودار شاخص مخروطی نسبت به عمق را به دست آمد. به منظور ارزیابی عملکرد دستگاه نفوذسنج، اندازه‌گیری شاخص مخروطی خاک در شرایط مختلف خاک مزرع‌ای (شخم خورده و کلشی) و در دو سطح رطوبتی (قبل و بعد از آبیاری) انجام و داده‌های به دست آمده با داده‌های نفوذسنج دستی در همان شرایط آزمایش در پانزده عمق مقایسه شد. نتایج نشان داد که همبستگی قابل توجهی بین داده‌های شاخص مخروطی نفوذسنج دستی و تراکتوری وجود دارد به طوری که مقادیر ضریب همبستگی به ترتیب برابر با $R^2=0/98$ (قبل از آبیاری) و $R^2=0/96$ و $R^2=0/97$ (پس از آبیاری) به دست آمد. مقایسه میانگین‌ها با استفاده از آزمون t نشان داد که بین داده‌های شاخص مخروطی دستگاه نفوذسنج تراکتوری و دستی در زمین کلشی و در زمین شخم خورده، در سطح احتمال ۵ درصد اختلاف معنی‌داری وجود ندارد. بنابراین نفوذسنج تراکتوری برای اندازه‌گیری مقاومت مکانیکی خاک توصیه می‌شود.

واژه‌های کلیدی

شاخص مخروطی، فشردگی خاک، مقاومت خاک، نفوذسنج مخروطی پشت تراکتوری

مقدمه

مخروطی خاک اشاره کرد (Raper et al., 1990;

Upadhyaya et al., 1994; Anon, 2004). در بین این روش‌ها، نفوذسنج‌های مخروطی پذیرفته‌تر هستند زیرا داده‌های نسبتاً دقیقی بر اساس فشردگی خاک ارائه می‌دهند و همچنین کار کردن با آنها نیز راحت است. این روش می‌تواند تغییرات مقاومت مکانیکی خاک را در

برای مشخص کردن فشردگی خاک در مزرعه، معیارها و روش‌های مختلفی وجود دارد، که از آن جمله می‌توان به شاخص رنگ خاک (تشخیص فشردگی از طریق مشاهده)، اندازه‌گیری جرم مخصوص ظاهری، رادارهای نفوذکننده^۱ در داخل زمین، و اندازه‌گیری شاخص

مخروطی بر اساس تغییرات ولتاژ خروجی از این دو حسگر به‌طور پیوسته و غیر پیوسته توسط ثبات X-Y امکان‌پذیر بود (Carter, 1967; Prather *et al.*, 1970). در نفوذسنج‌های نوع دستی به خاطر روند دشوار فشار دادن مخروط به داخل خاک، تغییرات سرعت نفوذ را در داخل خاک خواهیم داشت که این امر باعث خواهد شد تا اطلاعات مربوط به شاخص مخروطی تا حدودی با داده‌های شاخص مخروطی استاندارد تفاوت داشته باشد. از این‌رو امروزه نفوذسنج‌های نوع تراکتوری بر انواع دستی آن ترجیح داده می‌شوند (Alimardani, 2005). نفوذسنج‌های تراکتوری با به‌کارگیری توان الکتریکی و هیدرولیکی تراکتور از نظر میزان عمق نفوذ در خاک‌های سخت در مقایسه با نفوذسنج‌های نوع دستی، قابلیت‌های بیشتری دارند (Wilford *et al.*, 1972; Smith & Dumas, 1997). با پیشرفت علم الکترونیک، وسایل تحصیل داده و ثبت اطلاعات تنوع چشم‌گیری پیدا کرده‌اند و سهولت تجزیه و تحلیل اطلاعات در نفوذسنج‌های نوع دستی و تراکتوری امروزی، امکان‌پذیر شده است (Anderson *et al.*, 1980; Wilkerson *et al.*, 1982; Philips & Perumpral, 1983; Hooks & Jansen, 1986; Naderi-Boldaji *et al.*, 2008) با این همه، برخی مزیت‌ها موجب افزایش کاربرد سیستم‌های الکترونیکی اندازه‌گیری، در مقایسه با سیستم‌های مکانیکی، شده است، که از آن جمله‌اند: امکان پردازش دلخواه روی داده‌ها، سرعت بالای جمع‌آوری داده‌ها، انتقال آسان داده‌ها، صرف انرژی کمتر، و حجم کوچک سیستم‌ها.

در ایران نیز در ارتباط با طراحی، ساخت، و ارزیابی دستگاه‌های نفوذسنج دیجیتال دستی و پشت تراکتوری تحقیقات متفاوتی شده است که در زمینه نفوذسنج‌های دستی می‌توان به طراحی و ساخت دستگاه نفوذسنج دیجیتال دستی مجهز به سیستم تحصیل داده بر پایه میکرو کنترلر اشاره کرد. در این مطالعه توسط نادری بلداجی و همکاران (Naderi-Boldaji *et al.*, 2009) از این

ارتباط با عمق، بهتر از روش‌های دیگر در اختیار بگذارند (Mulqueen, 1977; Clark, 1999). نفوذسنج‌های مخروطی کاربردهای گوناگون دارند. از این نفوذسنج‌ها به‌طور گسترده‌ای در تخمین فشردگی خاک، ترددپذیری، و تعیین موقعیت لایه‌های فشرده شده خاک‌ها و سخت‌لایه‌های ناشی از اعمال روش‌های مختلف خاک‌ورزی، که مانع از رشد ریشه می‌شوند، استفاده می‌شود (Upadhyaya *et al.*, 1994). با توجه به تأثیر مقاومت خاک بر جوانه‌زنی بذر، استقرار و رشد ریشه، رشد گیاه، و از همه مهمتر عملکرد محصول، اندازه‌گیری آن در مزرعه اجتناب‌ناپذیر خواهد بود.

نفوذسنج ابزاری است که با آن می‌توان مقاومت مکانیکی خاک را در مقابل فرو کردن میله‌ای با مقطع معین نوک آن ارزیابی کرد. نحوه اندازه‌گیری بر مبنای سنجش نیروی لازم جهت راندن یک قطعه مخروط استاندارد در عمق خاک استوار است و بر حسب مقاومت به نفوذ یا شاخص مخروطی بیان می‌شود. نفوذسنج می‌تواند پارامتر شاخص مخروط را در عمق‌های مختلف اندازه‌گیری کند. امروزه دستگاه نفوذسنج مخروطی از نظر نحوه کاربرد به دو نوع دستی و تراکتوری تقسیم می‌شود. نفوذسنج دستی اولیه فاقد وسایلی بود که بتواند هنگام نفوذ در خاک، عمق نفوذ و شاخص مخروطی را همزمان اندازه‌گیری و ثبت کند. بنابراین، دقت کم و همزمان نبودن اندازه‌گیری عمق و شاخص مخروطی همواره وجود داشته و مضافاً زمان بیشتری برای یادداشت‌برداری لازم بوده است (Perumpral, 1987). با ساخته شدن نفوذسنج‌های مجهز به ثبت‌کننده مکانیکی، این مشکل تا حدی مرتفع شد؛ بدین‌صورت که با استفاده از حرکت عمودی میله و انحراف فنر تحت فشار به صورت مکانیکی، شاخص مخروطی در مقابل عمق همزمان روی نمودار X-Y ثبت می‌شود. در نوع دیگر، با استفاده از حس‌کننده‌های مربوط به جابه‌جایی و نیرو، اندازه‌گیری عمق و شاخص

طراحی، ساخت و ارزیابی نفوذسنج مخروطی پشت تراکتوری...

(Raper et al., 1999). در این باره نیاز به یک نفوذسنج مخروطی با میله‌های نفوذ چندگانه به سادگی قابل توجیه است که بتواند چندین قرائت را با یک بار عبور از ردیف انجام دهد. هدف از این تحقیق، طراحی، ساخت و ارزیابی نفوذسنج مخروطی پشت تراکتوری است که به میله‌های نفوذ چندگانه مجهز و قابلیت اندازه‌گیری شاخص مخروطی خاک را در ردیف‌های محصول با فاصله متغیر را داشته باشد.

مواد و روش‌ها

طراحی و ساخت دستگاه

هدف از این تحقیق اندازه‌گیری مقادیر مقاومت مکانیکی خاک (داده‌های شاخص مخروطی)، در اعماق مختلف خاک و در نقاط چندگانه است. برای نیل به این هدف، یک سیستم مجهز به میله‌های نفوذ چندگانه با فواصل متغیر طراحی و ساخته شد که بتواند مقادیر شاخص مخروطی خاک را در نقاط و اعماق مختلف اندازه‌گیری کند. به‌طور کلی برای ساخت این دستگاه اهداف زیر دنبال شدند:

۱- طراحی و ساخت یک شاسی مستحکم با قابلیت اتصال به سه نقطه تراکتورهای گروه II و متناسب با ابزاری که روی آن سوار می‌شود.

۲- طراحی و ساخت سیستم حامل میله‌های نفوذ با قابلیت جابه‌جایی میله‌های نفوذ روی آن در فواصل متغیر.

۳- طراحی و ساخت سیستم هیدرولیک مناسب به منظور جابه‌جایی عمودی حامل میله‌های نفوذ و به‌دنبال آن نفوذ میله‌ها به‌درون خاک.

۴- ساخت میله‌های نفوذ و مخروطی‌ها، با توجه به استاندارد ASAE (Anon, 2004).

۵- انتخاب سیستم‌های اندازه‌گیری مناسب برای سنجش پارامترهای نیرو و عمق نفوذ.

ابزار قابل حمل برای اندازه‌گیری شاخص مخروطی در مطالعات خاک‌ورزی مورد استفاده کرده‌اند. این دستگاه از سه بخش اصلی تشکیل شده است. مبدل نیرو از نوع تیر یک سرگیردار برای اندازه‌گیری نیروی نفوذ، مکانیزم اندازه‌گیری عمق با حسگر نوری، و سیستم تحصیل داده. علیمردانی (Alimardani, 2005) یک نفوذسنج پشت تراکتوری را طراحی کرد و ساخت. در سیستم اندازه‌گیری این نفوذسنج از یک مبدل نیرو از نوع تیری با ظرفیت تحمل ۲۳۰ کیلوگرم و یک فتودیود برای اندازه‌گیری عمق نفوذ استفاده شد. در این نفوذسنج، از سیستم هیدرولیک به عنوان سیستم محرک و نیز از دو ساق وسط برای جلوگیری از حرکت شاسی در هنگام نفوذ استفاده شده است. حداکثر عمق نفوذ این دستگاه ۶۰ سانتی‌متر گزارش شده است. این دستگاه می‌تواند شاخص مخروطی را در مقابل عمق اندازه‌گیری و روی ثبات رسم کند. نادری بلداجی و همکاران (Naderi-Boldaji et al., 2008). با ارزیابی نفوذسنج پشت تراکتوری مجهز به سیستم تحصیل داده بر پایه میکروکنترلر را ارزیابی کردند و نتیجه گرفتند که تفاوت معنی‌داری بین داده‌های نفوذسنج‌های دستی و پشت تراکتوری در سطح احتمال ۵ درصد وجود ندارد. گوهری و همت (Gohari & Hemmat, 2005) یک دستگاه نفوذسنج پشت تراکتوری را به منظور به‌کارگیری در خاک‌ورزی در عمق متغیر ساختند که در آن از یک واحد GPS برای تعیین موقعیت جغرافیایی بهره گرفته شد.

تجزیه و تحلیل داده‌های به دست آمده از نفوذسنج مخروطی در اکثر مواقع به واسطه تغییرپذیری زیاد در داده‌ها مشکل است. یک روش مؤثر برای مقابله با این مشکل، برداشت داده‌های زیاد برای آنالیز است. محدودیت‌های زمانی و تغییر شرایط خاک ایجاب می‌کند که داده‌برداری با نفوذسنج سریع باشد. با این همه، برای آزمایش‌های جامع و کامل، به دست آوردن اطلاعات لازم طی حداقل بازه زمانی کاری دشوار است

دستگاه نفوذسنج مجهز به میله‌های چندگانه از سه بخش مکانیکی، هیدرولیکی و الکترونیکی تشکیل شده است. این بخش‌ها با یکدیگر ارتباط دارند و این هدف کلی را دنبال می‌کنند: از توسعه یک نفوذسنج پشت تراکتوری در جهت بیان سریع و آسان خصوصیات استحکامی خاک نسبت به عمق.

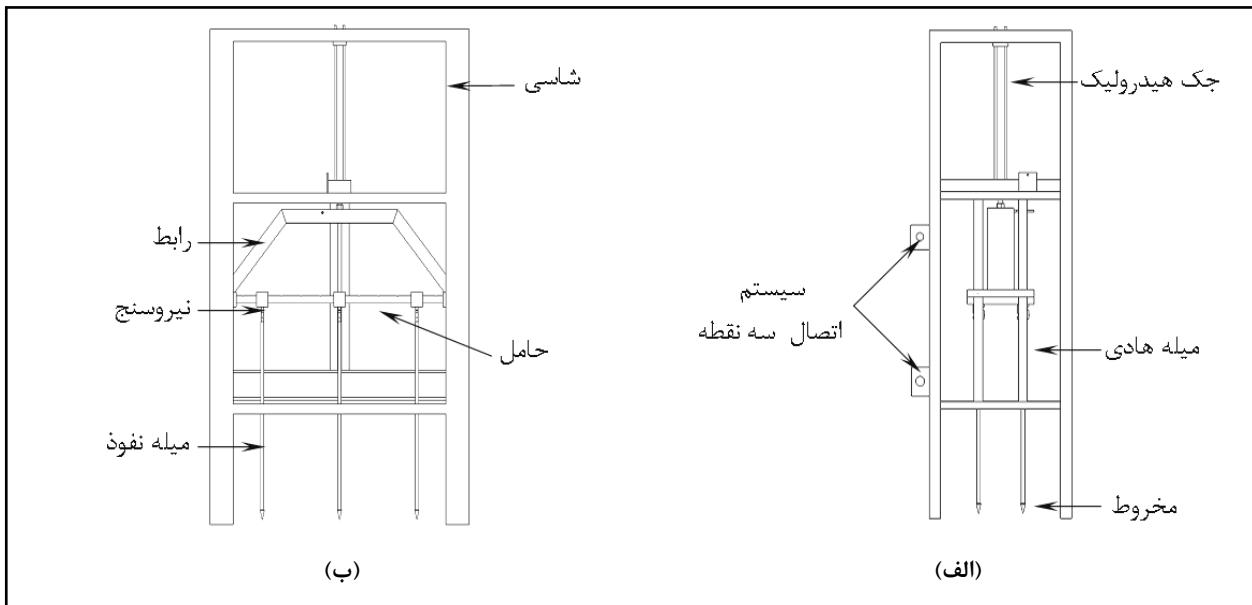
بخش مکانیکی

بخش مکانیکی مجموعه‌ای متشکل از یک شاسی همراه با میله‌های هادی، حامل میله‌های نفوذ، میله‌های نفوذ، و مخروطی‌هاست. حامل از یک طرف به میله‌های نفوذ و از طرف دیگر به یک سیلندر هیدرولیکی دو طرفه متصل است. به منظور حمل و نقل و به‌کارگیری نفوذسنج، شاسی دستگاه توسط اتصال سه نقطه به تراکتور وصل می‌شود (شکل ۱).

شاسی

در هنگام کار دستگاه، بارهای وارده در اثر نیروی مقاومت خاک و نیروهای وارده در حین حمل و نقل دستگاه، از طریق قطعات موجود به شاسی انتقال می‌یابد.

شاسی باید دارای استحکام کافی باشد تا در برابر نیروهای وارده، تغییر شکل‌هایی نظیر ترک و شکست در آن به‌وجود نیاید. از طرف دیگر، شاسی باید دارای وزن کافی نیز باشد تا در هنگام نفوذ میله‌ها به خاک، بی‌حرکت شاسی بماند. به منظور سوار کردن کلیه اجزا و همچنین امکان اتصال آن به تراکتور از شاسی نوع سوار استفاده شد. جهت طراحی مکانیکی شاسی، مختصات و مشخصات اتصال سه نقطه‌ی تراکتورهای گروه II مطابق با استاندارد ASAE تعیین شد (Anon, 2001) و ابعاد مناسب برای شاسی نیز بر اساس طول میله‌های نفوذ، میله‌های هادی، ابعاد حامل، و سایر ضمایمی انتخاب شد که روی شاسی قرار می‌گیرند. برای ساخت شاسی از قطعات ناودانی با شماره استاندارد ۱۲۰ استفاده شد و طراحی به گونه‌ای بود که نیروی لازم برای تمام میله‌ها تامین شود و امکان ایستاده قرار گرفتن دستگاه، وقتی به تراکتور متصل نیست، فراهم باشد. با توجه به اندازه قطعاتی که روی شاسی سوار می‌شوند، شاسی دستگاه دارای ابعاد کلی ۱۹۰×۱۳۰×۷۰ سانتی‌متر است. پس از اتصال شاسی به تراکتور و حمل توسط آن، امکان تراز کردن شاسی، و به عبارتی دستگاه نفوذسنج، به کمک اتصال سه نقطه تراکتور فراهم می‌شود (شکل ۱).



شکل ۱- الف) نمای دید از جانب و ب) دید از روبه‌روی دستگاه نفوذسنج مخروطی پشت تراکتوری

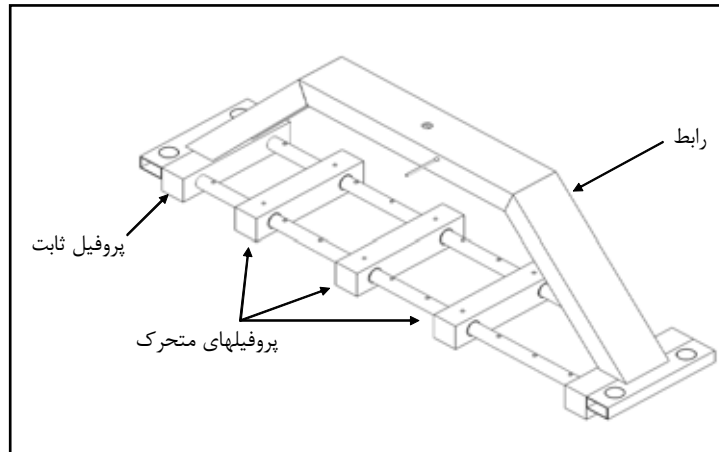
سه پروفیل میانی قابلیت حرکت روی میله‌ها را دارند و می‌توانند در محدوده فضای ۱۰۰ سانتی‌متر در فواصل ۱۰ سانتی‌متری تنظیم شوند.

میل‌های نفوذ و مخروطی‌ها

سیستم اندازه‌گیری شاخص مخروطی خاک قابلیت وصل انواع میله‌های نفوذ را جهت استفاده در خاک‌های سخت و نرم دارد. مشخصات میله‌های نفوذ و مخروطی‌ها بر طبق استاندارد ASAE (Anon, 2004)، عبارت است از: برای خاک‌های نرم: محور با قطر ۱۵/۸۸ میلی‌متر و قطر اصلی مخروط ۲۰/۲۷ میلی‌متر؛ برای خاک‌های سخت: محور با قطر ۹/۵۳ میلی‌متر و قطر اصلی مخروط ۱۲/۸۳ میلی‌متر. حداکثر عمق نفوذ تابع هر دو پارامتر طول میله‌های نفوذ و کورس سیلندر هیدرولیکی است. با توجه به عمق مورد نظر که برابر با ۴۵ سانتی‌متر است، طول میله‌های نفوذ ۷۶ سانتی‌متر در نظر گرفته شد. فاصله بین میله‌های نفوذ با توجه به فاصله ردیف‌های کشت محصولات ردیفی مختلف تغییر می‌کند.

حامل

حامل میله‌های نفوذ به‌گونه‌ای طراحی شد که میله‌ها قابلیت حرکت و قرارگیری در فواصل معین را داشته باشند. جهت انتقال حرکت از جک هیدرولیکی واقع در مرکز شاسی به حامل، حامل میله‌های نفوذ از طریق یک رابط به جک هیدرولیکی دو طرفه وصل می‌شود و در ارتباط با میله‌های هادی، قابلیت حرکت رو به پایین را دارد (شکل ۲). میله‌های هادی (چهار عدد) هر یک به طول ۸۰ سانتی‌متر در دو طرف شاسی قرار گرفته‌اند که حامل میله‌های نفوذ روی آنها حرکت رفت و برگشت دارد. این میله‌ها به منظور حرکت عمودی حامل و جلوگیری از حرکات جانبی آن در نظر گرفته شد. برای ساخت حامل، پس از تجزیه و تحلیل نیروهای وارد به آن، از ۲ عدد میله موازی از جنس CK45 (AISI 1045) به قطر ۳۰ میلی‌متر و به طول ۱۱۰ سانتی‌متر و ۵ عدد پروفیل توپر از جنس ST37 (AISI 1025)، به ابعاد ۶۰×۶۰×۳۰۰ میلی‌متر استفاده شد. پروفیل‌های انتهایی ثابت‌اند و از طریق پروفیل‌های توخالی با میله‌های هادی در ارتباط هستند.



شکل ۲- حامل میله‌های نفوذ همراه با رابط

حداکثر شاخص مخروطی در اغلب شرایط سخت لایه خاک برابر با ۷ مگا پاسکال است (Abbaspour-Gilandeh *et al.*, 2006). از این رو میزان نیروی وارد به میله نفوذ، با توجه به حداکثر میزان فشار وارد به مخروط در خاک سخت (σ_s)، طبق رابطه زیر محاسبه می‌شود:

$$\sigma_{Probe} = \frac{905.1}{\pi \times \left(\frac{9.53^2}{4} \right)} \quad (4)$$

و مقدار $\sigma_{Probe} = 12.68$ مگاپاسکال خواهد بود. برای محاسبه میزان نیروی بحرانی کمانش در میله‌های نفوذ از جنس CK45 (AISI 1045)، با مدول الاستیسیته ۲۰۵ گیگاپاسکال، و تنش تسلیم ۳۴۳ مگاپاسکال، با توجه به روابط زیر:

$$P_{cr} = \frac{\pi^2 EI}{(0.7 \times l)^2} \quad (5)$$

$$I = \frac{\pi d^4}{64} \quad (6)$$

که در آن‌ها، I = ممان اینرسی؛ E = مدول الاستیسیته؛ l = طول میله نفوذ؛ و d = قطر میله نفوذ (برای خاک سخت) است داریم:

$$\sigma_s = \frac{P}{A} \quad (1)$$

که در آن، A = مساحت سطح پایه مخروط در خاک سخت (میلی‌متر مربع) و P = نیروی وارد از طرف خاک به میله (۹۰۵/۱ نیوتن) است. در نتیجه خواهیم داشت:

$$\sigma_s = \frac{P}{\pi \times \left(\frac{12.83^2}{4} \right)} \quad (2)$$

با توجه به این مقدار نیروی، می‌توان ظرفیت مبدل‌های نیرو را مشخص کرد.

برای محاسبه تنش در میله‌های نفوذ، با توجه به رابطه زیر:

$$\sigma_{Probe} = \frac{P}{A} \quad (3)$$

طراحی، ساخت و ارزیابی نفوذسنج مخروطی پشت تراکتوری...

برای ایجاد این نیرو توسط جک هیدرولیک، با توجه به رابطه:

$$P = \frac{F}{A} \quad (10)$$

که در آن،

P = فشار جک هیدرولیک؛ F = نیروی وارد از شافت جک هیدرولیک به حامل؛ و A = سطح مقطع سیلندر هیدرولیک است داریم:

$$P = \frac{5430.6}{25 \times 25 \times \pi} \quad (11)$$

$$P = 2.77 \text{ Mpa}$$

در نتیجه برای ایجاد حداکثر نیرو در میله‌های نفوذ در خاک سخت، میزان فشار لازم در سیستم هیدرولیکی باید برابر با مقدار فوق باشد.

سوپاپ‌های کنترل مقدار جریان، حجم روغنی که از مجرا عبور می‌کند تغییر می‌دهند. در اکثر سیستم‌های هیدرولیک، سرعت حرکت سیلندر هیدرولیک یا موتور هیدرولیکی باید به طور دقیق تنظیم شود. وقتی سیستم با پمپ با دبی ثابت کار می‌کند، این تنظیم معمولاً از طریق سوپاپ کنترل مقدار جریان انجام می‌گیرد. از آنجایی که سرعت ثابت استاندارد ۳۰ میلی‌متر در ثانیه برای این حرکت لازم است، با بهره‌گیری از یک شیر کنترل جریان (مدل F-N-4K-20-JA، ساخت شرکت Tokyo keiki Co., LTD) میزان دبی ورودی به جک هیدرولیکی قابل کنترل است.

برای محاسبه میزان دبی لازم در جک هیدرولیک برای ایجاد سرعت استاندارد، با توجه به رابطه زیر:

$$Q = A \times V \quad (12)$$

$$I = \frac{\pi \times 9.53^4}{64} \quad (7)$$

$$I = 404.894 \text{ mm}^4$$

حال میزان نیروی بحرانی کمانش میله نفوذ برابر است با:

$$P_{cr} = \frac{\pi^2 \times 205 \times 10^3 \times 404.894}{(0.7 \times 760)^2} \quad (8)$$

$$P_{cr} = 2894.49$$

با توجه به محاسبات انجام گرفته، جنس میله‌های نفوذ انتخاب شده، برای شرایط موجود مناسب است و قابلیت به کارگیری در انواع خاک‌ها را دارد.

بخش هیدرولیکی

پس از طراحی شاسی و حامل میله‌های نفوذ، یک سیستم هیدرولیکی مناسب برای دستگاه در نظر گرفته شد. نیروی لازم، جهت وارد کردن میله‌های نفوذ به خاک، از توان هیدرولیکی تراکتور مسی فرگوسن مدل MF-285 و با استفاده از جک هیدرولیکی دو طرفه با کورس ۵۰ سانتی‌متر واقع در مرکز شاسی فراهم شد. کنترل حداکثر فشار سیستم هیدرولیکی توسط یک شیر کنترل فشار مدل 3714 Frutigen Schwieiz، ساخت شرکت Tokyo keiki Co., LTD صورت گرفت. اساس این انتخاب مشخصات هیدرولیکی تراکتور بود و توسط شیر کنترل فشار حداکثر میزان نیروی نفوذ قابل تنظیم است. این شیر کنترل فشار دارای حداکثر ظرفیت (۲۵۰) بار را دارد و حداکثر جریان عبوری از آن ۲۰ لیتر در دقیقه است. با توجه به حداکثر میزان نیروی وارد به میله‌های نفوذ و حامل، حداکثر نیروی وارد به جک هیدرولیکی، برابر است با:

$$F_{total} = 905.1 \times 6 \Rightarrow F_{total} = 54430.6 \quad (9)$$

$$Q = 25 \times 25 \times \pi \times 30 = 3.53$$

که در آن،

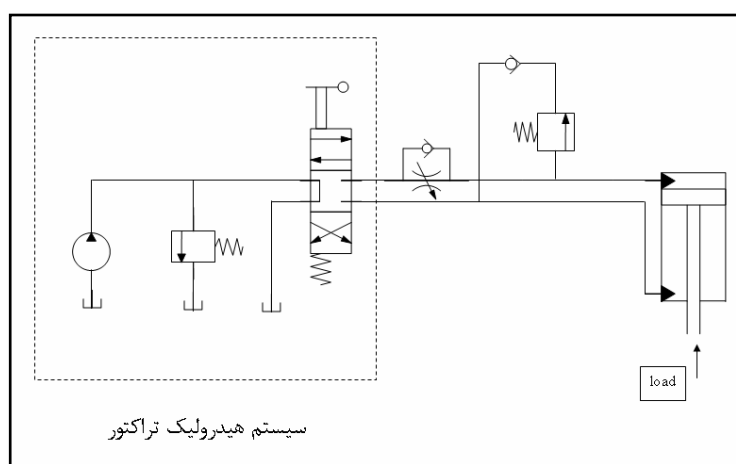
Q = دبی (لیتر بر دقیقه)؛ A = سطح مقطع جریان؛ و V =

سرعت جریان (برابر با ۳ سانتی متر بر ثانیه) است.

و با توجه به اینکه که قطر داخلی سیلندر هیدرولیکی

۵ سانتی متر است، خواهیم داشت:

بنابراین، برای ایجاد سرعت استاندارد باید به کمک شیر کنترل جریان، دبی ۳/۵۳ لیتر در دقیقه را در مدار ایجاد کرد. شکل ۳ مدار هیدرولیک نفوذسنج مخروطی پشت تراکتوری را نشان می‌دهد.

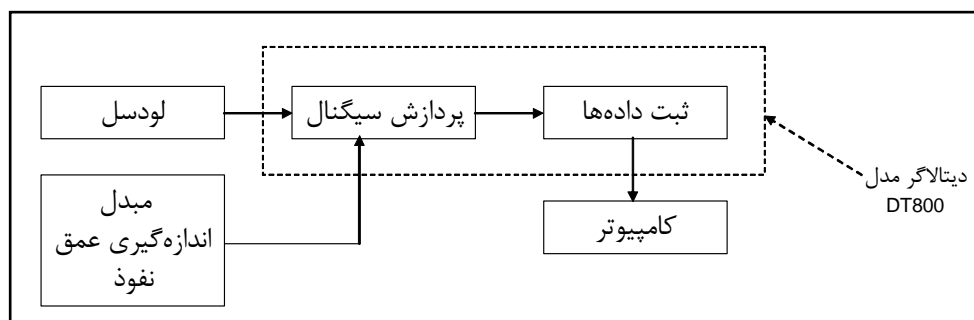


شکل ۳- مدار هیدرولیک نفوذسنج مخروطی پشت تراکتوری

بخش الکترونیکی

سیستم اندازه‌گیری عمق نفوذ، و سامانه داده‌برداری شامل پردازش سیگنال و ذخیره داده‌ها روی کامپیوتر است. شکل ۴، طرحواره‌ای از سیستم اندازه‌گیری را نشان می‌دهد.

بخش الکترونیکی دستگاه نفوذسنج مخروطی متشکل از مبدل‌های نیروی وصل شده به میله‌های نفوذ چندگانه،



شکل ۴- طرحواره‌ای از سیستم الکترونیکی

طراحی، ساخت و ارزیابی نفوذسنج مخروطی پشت تراکتوری...

به میله نفوذ اعمال می‌شود. هر یک از این مبدل‌های نیرو به صورت انفرادی دارای حداکثر ظرفیت یک کیلو نیوتن است و می‌تواند شاخص مخروطی را تا ۷ مگاپاسکال (1015 Psi) و قبل از اینکه به حداکثر ظرفیت برسد، اندازه‌گیری کند؛ این مقدار ظرفیت به طور معمول در بیشتر مواقع و حتی در اغلب شرایط سخت لایه خاک کافی است (Abbaspour-Gilandeh *et al.*, 2006). شکل ۵، نفوذسنج مخروطی پشت تراکتوری مجهز به میله‌های نفوذ چندگانه را نشان می‌دهد.

به منظور اندازه‌گیری شاخص مخروطی، که نیروی وارد بر سطح مخروط به ازای افزایش جزئی از عمق نفوذ است، از مبدل‌های نیروی S شکل مدل DBBP-100 ساخت شرکت Tokyo Ssokki-Kenkujo Co., LTD، با حساسیت ۳ میلی‌ولت بر ولت استفاده شد. این نیروسنج‌ها از یک طرف به حامل متصل‌اند و از طرف دیگر در ارتباط با انتهای میله‌های نفوذ هستند. در هنگام کار نفوذسنج‌ها، نیروی محور جک توسط رابط به حامل میله‌های نفوذ انتقال می‌یابد و از طریق نیروسنج



شکل ۵- نفوذسنج مخروطی پشت تراکتوری مجهز به میله‌های نفوذ چندگانه

قطعه را می‌توان به وسیله تغییرات مقاومت اندازه‌گیری کرد. این حسگر با اتصالی روی شاسی ثابت می‌شود و حلقه انتهایی آن در قسمت حامل میله‌های نفوذ، به کمک یک نگهدارنده حفظ می‌شود. زمانی که جک هیدرولیکی شروع به حرکت می‌کند، حامل میله‌های نفوذ را به سمت پایین حرکت می‌دهد و در این حین با حرکت حامل، حسگر اندازه‌گیری عمق شروع به کار می‌کند.

برای اندازه‌گیری عمق نفوذ از حسگر جابه‌جایی (مدل DP-500D) ساخت شرکت Tokyo Sokki-Kenkyujo، با حساسیت 20×10^{-6} کرنش بر میلی‌متر، استفاده شد که می‌تواند عمق تا ۵۰ سانتی‌متر را به صورت پیوسته اندازه‌گیری کند. این حسگر الکترومکانیکی به صورت یک پتانسیومتر یا مقاومت متغیر عمل می‌کند. اگر اتصال متحرک این پتانسیومتر به قطعه‌ای بسته شود، حرکات

فشار تیمار شاهد نسبت به فشار تیمار نفوذسنج پشت تراکتوری، ضریب همبستگی به دست آمد و تجزیه و تحلیل شد.

کارایی و عملکرد دستگاه نفوذسنج مخروطی تا حد زیادی تحت تاثیر شرایط زمین قرار می‌گیرد. برای اظهار نظر دقیق راجع به کیفیت کار دستگاه، این شرایط باید کاملاً بررسی شوند. به این منظور میزان رطوبت زمین و نیز نوع بافت خاک تعیین شد. برای تعیین درصد رطوبت خاک در مزرعه آزمایشی، از عمق‌های مختلف نمونه‌برداری شد. میانگین رطوبت برای زمین کلسی قبل از آبیاری ۹/۲ درصد، برای زمین شخم خورده قبل از آبیاری ۸/۴۵ درصد، برای زمین کلسی پس از آبیاری ۲۱/۲ درصد، و برای زمین شخم خورده و آبیاری شده ۱۸/۴۱ درصد به دست آمد. برای تعیین بافت خاک، از در چند نقطه مزرعه آزمایشی نمونه‌برداری شد. برای تعیین بافت نمونه‌ها در آزمایشگاه از روش هیدرومتری استفاده شد. نتایج آزمایش نشان داد که بافت خاک مزرعه آزمایشی سیلتی لومی است.

بعد از آماده کردن هر دو نفوذسنج دستی و تراکتوری، ده منطقه از هر کرت به صورت تصادفی انتخاب شد که در هر منطقه یک عمل نفوذ با نفوذسنج تراکتوری و در نزدیکی آن با نفوذسنج دستی انجام گرفت. داده‌های نفوذسنج تراکتوری روی دیتالاگر و کامپیوتر متصل به آن ذخیره و پس از انتقال داده‌ها به برنامه Excel، نمودار شاخص مخروطی نسبت به عمق رسم شد که حاصل میانگین داده‌های به دست آمده از ۶ میله نفوذ است. همچنین داده‌های نفوذسنج دستی که در حافظه آن ذخیره شده بود به کامپیوتر منتقل شد و آنالیز این داده‌ها نیز برنامه Excel، به منظور رسم نمودار شاخص مخروطی نسبت به عمق، انجام پذیرفت.

برای جمع‌آوری و ذخیره داده‌های به دست آمده از مبدل‌های نیرو و حسگر عمق، از یک دیتالاگر چند منظوره (دارای قابلیت ثبت انواع داده‌های خروجی) مدل DT800، ساخت شرکت DataTaker با قابلیت برنامه نویسی استفاده شد که با جریان DC با ولتاژ ۱۲ تا ۲۴ ولت کار می‌کند و از باتری تراکتور تغذیه می‌شود. خروجی هر شش عدد نیروسنج به همراه خروجی حسگر عمق، به کانال‌های مشخص روی دیتالاگر وصل و داده‌ها در حافظه آن ذخیره می‌شود که داده‌ها پس از اتمام کار داده‌برداری و انتقال به کامپیوتر پردازش می‌شوند. پس از اتصال مبدل‌های نیرو و حسگر عمق به دیتالاگر، اعمال شرایط صفر نیرو و عمق به راحتی توسط برنامه دیتالاگر، قابل اجراست. به کمک نرم‌افزار دیتالاگر، ضرایب لازم برای تغییر کمیت‌ها و مقادیر خروجی از مبدل‌های نیرو و حسگر عمق، قابل تعریف است. برای مبدل‌های نیرو کمیت خروجی بر اساس مقدار شاخص مخروطی (CI)، و برای حسگر عمق، اندازه‌گیری عمق بر حسب میلی‌متر از ۰ تا ۵۰۰ میلی‌متر تنظیم شد.

ارزیابی نفوذسنج مخروطی پشت تراکتوری

به منظور ارزیابی عملکرد دستگاه نفوذسنج پشت تراکتوری، شاخص مخروطی خاک در دو نوع زمین شخم خورده و کلسی و در دو شرایط رطوبتی (قبل و بعد از آبیاری) اندازه‌گیری شد. داده‌های به دست آمده با داده‌های یک نفوذسنج دستی مدل CP40 II ساخت شرکت ریمیک^۱، در همان شرایط آزمایش و در پانزده عمق مقایسه شد. مقایسه داده‌های نفوذسنج تراکتوری با نفوذسنج دستی با آزمون t بررسی شد. در این آزمون، پارامتر عمق برای هر دو دستگاه برابر است و فشار نفوذسنج دستی به عنوان شاهد و فشار نفوذسنج پشت تراکتوری به عنوان تیمار در نظر گرفته شد. با رسم نمودار

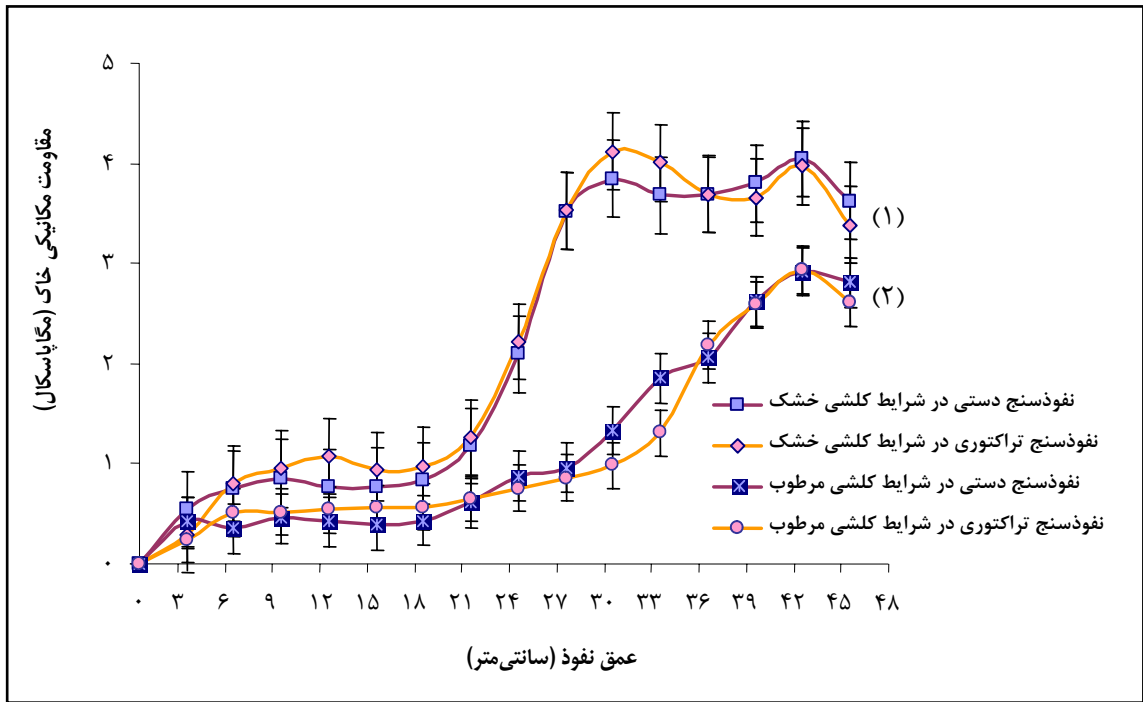
نتایج و بحث

دست آمده کاملاً باهم مطابقت داشته باشند. از این‌رو در مقایسه کلی اختلاف جزئی مشاهده می‌شود. چنانچه نمودار داده‌های مقادیر شاخص مخروطی نفوذسنج تراکتوری در مقابل نفوذسنج دستی رسم شود و با استفاده از معادلات رگرسیون، ضریب همبستگی به دست آید، مشاهده می‌شود که خط مستقیمی به دست آمده و ضریب همبستگی آنها برای زمین کلشی خشک (شکل ۸) و شخم خورده خشک به ترتیب برابر با $R^2 = 0/98$ و $R^2 = 0/98$ و برای زمین کلشی مرطوب و شخم خورده مرطوب برابر با $R^2 = 0/96$ و $R^2 = 0/97$ به دست می‌آید.

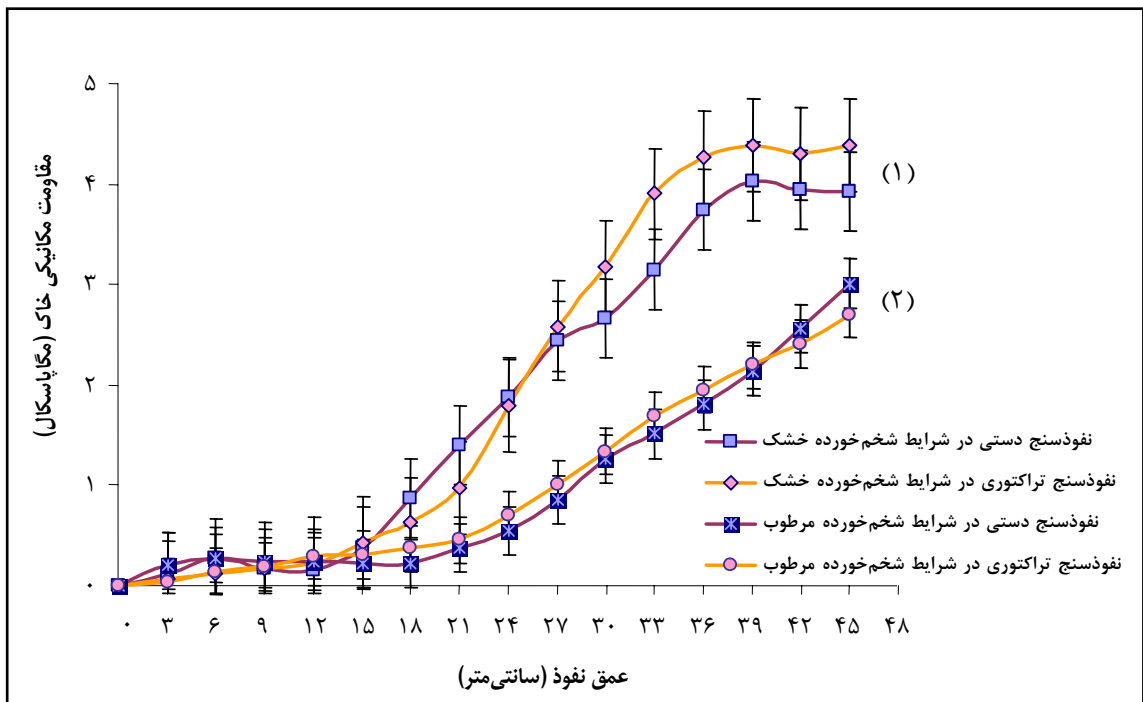
آنالیز داده‌های به دست آمده و نتایج حاصل از ارزیابی دستگاه به منظور بررسی ارتباط بین شاخص‌های مخروطی نفوذسنج پشت تراکتوری و دستی، نشان‌دهنده همبستگی بالا بین داده‌های دستگاه نفوذسنج پشت تراکتوری با نوع دستی تجاری است. با استفاده از آزمون t ، مقایسه میانگین دو نمونه، مشخص شد که بین شاخص‌های نفوذ دستگاه نفوذسنج تراکتوری و دستی در زمین کلشی و در زمین شخم خورده، در سطح احتمال ۵ درصد اختلاف معنی‌داری وجود ندارد.

در نفوذسنج تراکتوری در هر بار نفوذسنجی ۶ میله نفوذ داده‌برداری می‌کنند، نمودار به دست آمده از میانگین داده‌های نفوذ در یک مرتبه کار دستگاه حاصل می‌شود. در نتیجه نمودار به دست آمده برای شاخص مخروطی نسبت به عمق برای هر کرت که در آن ۱۰ بار عملیات نفوذ انجام می‌گیرد، میانگینی از داده‌های ۶۰ نفوذ خواهد بود. این داده‌ها با انتقال به برنامه Excel، پردازش می‌شوند و نمودار مربوط به شاخص مخروطی نسبت به عمق به دست می‌آید. در نوع دستی نیز برای به دست آوردن نمودار شاخص مخروطی نسبت به عمق برای مقایسه کلی با نفوذسنج تراکتوری، از میانگین داده‌های حاصل از ۱۰ نفوذ، به کمک برنامه Excel استفاده می‌شود. شکل‌های ۶ و ۷ مقایسه نتایج به دست آمده از نفوذسنج‌های دستی و پشت تراکتوری را در حالت‌های مختلف ذکر شده نشان می‌دهد.

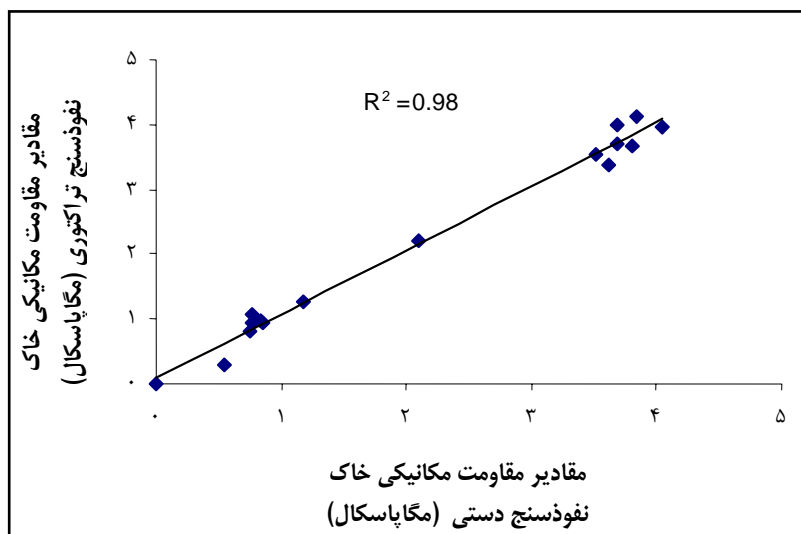
با توجه به اینکه میزان شاخص مخروطی نسبت به عمق با دو دستگاه مختلف ارزیابی می‌شود و شرایط و نحوه کار دستگاه‌ها تا حدی متفاوت است و نیز با در نظر گرفتن اینکه بین نقاط نفوذ برای نفوذسنج دستی و تراکتوری مقداری فاصله وجود دارد، در نتیجه انتظار نمی‌رود که مقادیر شاخص مخروطی و نمودارهای به



شکل ۶- نمودار شاخص مخروطی- عمق دو نوع نفوذسنج در زمین کلهی خشک و (۲) زمین کلهی مرطوب



شکل ۷- نمودار شاخص مخروطی- عمق دو نوع نفوذسنج در (۱) زمین شخم خورده خشک و (۲) زمین شخم خورده مرطوب



شکل ۸- نمودار همبستگی مقادیر مقاومت مکانیکی خاک به دست آمده از دو نوع نفوذسنج دستی و پشت تراکتوری در زمین کلتی خشک

با توجه به مزایای نفوذسنج پشت تراکتوری نسبت به انواع دستی، نفوذسنج ساخته شده را می‌توان با ضریب اطمینان بالا جهت اندازه‌گیری مقاومت نفوذ خاک به‌کار گرفت. این وسیله، کاربرد موفقیت‌آمیزی در مطالعات گسترده دارد و می‌تواند اطلاعات مربوط به مقاومت و استحکام خاک را در سرتاسر زمینی یکپارچه و دست نخورده در دوره‌های زمانی کوتاه به‌دست آورد.

نتیجه‌گیری

در این تحقیق، یک نفوذسنج مخروطی پشت تراکتوری مجهز به میله‌های نفوذ چندگانه طراحی و ساخته شد که می‌تواند شاخص مخروطی خاک را در ردیف‌های محصول با فاصله متغیر اندازه‌گیری می‌کند. ارزیابی این دستگاه حاکی از موفقیت‌آمیز بودن کار آن دارد و عملکرد دستگاه در رسیدن به اهداف مدنظر، نشان دهنده کارایی دستگاه در شرایط مزرعه‌ای است.

مراجع

- Abbaspour-Gilandeh, Y., Khalilian, A., Alimardani, R., Keyhani, A. R. and Sadati, S. H. 2006. Comparison of energy requirements of uniform-depth and variable-depth tillage as affected by travel speed and soil moisture. *Iranian Agric. Sci J.* 35, 473-483. (in Farsi)
- Alimardani, R. 2005. Design and construction of a tractor mounted penetrometer. *J. Agric. Social Sci.* 1(4): 297-300.

- Anderson, G., Pidgeon, J. D., Spencer, H. B. and Parks, R. 1980. A new hand-held recording penetrometer for soil studies. *J. Soil Sci.* 31, 279-296.
- Anon. 2001. Three-Point Free-Link Attachment for Hitching Implements to Agricultural Wheel Tractors. ASAE Standars. S217.12. St. Joseph. MI, USA.
- Anon. 2004. Soil Cone Penetrometer. ASAE Standard. S313.3. St. Joseph, Mich.
- Carter, L. M. 1967. Portable recording penetrometer measures soil strength profiles. *J. Agric Eng.* 46(6): 348-349.
- Clark, R. L. 1999. Evaluation of potential to develop soil strenght maps using a cone penetrometer. ASAE Paper 99-3109. St. Joseph, MI, USA.
- Gohari, M and Hemmat, A. 2005. A tractor-mounted soil cone penetrometer for mapping spatial variability of soil strength. International Agricultural Engineering Conference. Bangkok. Thailand.
- Hooks, C. L. and Jansen, I. J. 1986. Recording cone penetrometer developed in reclamation research. *Soil Sci. Soc Am. J.* 50, 10-12.
- Mulqueen, J., Stafford, J. V. and Tanner, D. W. 1977. Evaluation of penetrometers for measuring soil strength. *J. Terramech.* 14(3): 137-151.
- Naderi-Boldaji, M., Alimardani, R., Sharifi, A. and Tabatabaeefar, A. 2008. Design of a microcontroller-based data acquisition system for evaluation of a tractor-mounted penetrometer. 5th National Congress on Agricultural Machinery Engineering and Mechanization of Iran. Mashhad. Iran. (in Farsi)
- Naderi-Boldaji, M., Alimardani, R., Sharifi, A. and Tabatabaeefar, A. 2009. Economical hand-pushed digital cone penetrometer. *Inter. Agrophysics.* 23, 55-60.
- Perumpral, J. V. 1987. Cone Penetrometer Applications-A Review. *Trans. ASAE.* 23, 939-944.
- Philips, J. and Perumpral, J. V. 1983. Designing a microcomputer data logger for soil cone penetrometer. *J. Agric. Eng.* 64(6): 13-14
- Prather, O. C., Henrick, J. C. and Sehsfer, R. L. 1970. An electronic hand operated recording penetrometer. *Trans. ASAE.* 13(1): 385-386.
- Raper, R. L., Asmussen, L. E. and Powell, J. B. 1990. Sensing hard pan depth with ground-penetrating radar. *Trans. ASAE.* 33(1): 41-46.
- Smith, L. A. and Dumas W. T. 1978. A recording soil penetrometer. *Trans. ASAE.* 21(1): 12-14.
- Upadhyaya, S. K., Chancellor, W. J., Perumpral, J. V., Schafer, R. L., Gill, W. R. and Vandenberg, G. E. 1994. Advances in soil dynamics. *Am. Soc. Agric. Eng.* (1)

طراحی، ساخت و ارزیابی نفوذسنج مخروطی پشت تراکتوری...

Wilford, J. R., Wooten, D. B. and Fulgham, F. E. 1972. Tractor mounted field penetrometer. Trans. ASAE. 15(2): 226-227.

Wilkerson, J. B., Tompkins, F. D. and Wilhelm, L. R. 1982. Microprocessor based, tractor mounted soil cone penetrometer. ASAE Paper No. 82-5511. St. Joseph, MI, USA.



Design, Fabrication and Evaluation of a Tractor-Mounted Soil Cone Penetrometer with Multiple Probes

Y. Abbaspour-Gilandeh*, M. Ahani, E. Askari Asli-Ardeh,

V. Rasooli-Sharabiani and O. Sofalian

* Corresponding Author: Assistant Professor, University of Mohaghegh Ardebili, P. O. Box: 179, Ardabil, Iran. Email: u_abbaspour@yahoo.com

Soil compaction is a major problem in many parts of the world. The determination of soil compaction profiles requires fast sampling systems to keep pace with the change in soil moisture condition over time. Soil cone penetrometers are commonly used for this purpose. A tractor-mounted soil cone penetrometer was designed and fabricated with multiple probes and the ability to determine cone index values in crop rows. The multiple probe penetrometer, composed of mechanical, hydraulic and electrical components, can evaluate soil strength conditions to a depth of 45 cm. The mechanical section comprised a frame to support the other sections of the unit and was mounted to a tractor using three-point hitches. Hydraulic power was used to force the probes into the soil. Using a data logger, data was collected from the load cells and depth sensors and sent to a computer to develop the cone index curve. To evaluate the penetrometer, the soil cone index was measured under two soil conditions (stubble and plowed) and two soil moisture levels (before irrigation and after irrigation). The penetrometer was then tested and evaluated in comparison with a hand-pushed penetrometer under the same test conditions at 15 depths. The coefficient of correlation between the hand-pushed and tractor-mounted penetrometers for stubble and plowed soil was determined as $R^2 = 0.98$ and $R^2 = 0.98$ (before irrigation) and $R^2 = 0.96$ and $R^2 = 0.97$ (after irrigation), respectively. The t-test revealed that the cone index was not significant for the tractor-mounted and hand-pushed penetrometers at 5% confidence levels. Thus, the tractor-mounted penetrometer can be used for soil strength measurement with high confidence.

Key Words: Cone Index, Soil Compaction, Soil Strength, Tractor Mounted Penetrometer