



مقایسه دو نوع سیستم اندازه‌گیری پیوسته مقاومت مکانیکی افقی خاک

یوسف عباسپور گیلانده^۱، فاطمه رحیمی اجدادی^۲، عزت‌اله عسکری اصلی ارد^۱ و غلامحسین شاهقلی^۱

۱ و ۲- به ترتیب استادیار و دانشجوی کارشناسی ارشد گروه مهندسی مکانیک ماشین‌های کشاورزی، دانشگاه محقق اردبیلی، اردبیل، ایران.

u_abbaspour@yahoo.com

چکیده

هدف از این مطالعه مقایسه عملکرد دو نمونه سیستم اندازه‌گیری مقاومت مکانیکی افقی در حال حرکت می‌باشد. دو کاوشگر مورد مقایسه در این تحقیق عبارت بودند از ۱- تیغه عمودی مجهز به چهار نیروسنج میناتور به فواصل ۱۰ سانتی‌متری ۲- کاوشگر چهار تیغه‌ای مجهز به ابزار اندازه‌گیری و مبدل‌های هشت وجهی نیرو. داده‌های بدست آمده از این کاوشگرها طی آزمایشات مزرعه‌ای با داده‌های نفوذسنج مخروطی پشت‌تراکتوری مورد مقایسه قرار گرفت. همچنین شکل گسیختگی ایجادشده توسط دو کاوشگر و نیز میزان نوسانات داده‌برداری آنها مورد مقایسه قرار گرفت. نتایج نشان داد که کاوشگر مجهز به تیغه‌های چندگانه نسبت به کاوشگر تک تیغه‌ای دارای مزایای بیشتری نظیر ایجاد آسفتگی کم در خاک، ارائه الگوی گسیختگی یکسان با نفوذسنج مخروطی در تعداد عمق‌های بیشتر، همبستگی بیشتر با داده‌های شاخص مخروطی و نوسانات کمتر در داده‌های اندازه‌گیری شده می‌باشد و می‌توان از آن در مقیاس‌های بزرگ مزرعه‌ای برای تشخیص تغییرپذیری فشردگی خاک استفاده کرد.

کلید واژه: فشردگی خاک، مقاومت مکانیکی افقی خاک، کاوشگر تک تیغه‌ای، کاوشگر مجهز به تیغه‌های چندگانه، نفوذسنج مخروطی.

مقدمه

فشردگی یا مقاومت مکانیکی خاک، یکی از پارامترهای مهم و تاثیرگذار بر میزان عملکرد محصولات کشاورزی می‌باشد، بطوری که نگرانی‌های جدی را در بخش تولید محصول شامل می‌گردد. افزایش فشردگی خاک سبب کاهش در ماکروپورها، محدودیت در رشد و توسعه ریشه و نیز محدودیت در فعالیت بیولوژیکی ریشه گیاهان و ارگانسیم‌های خاک به سبب کاهش تهویه خاک می‌گردد (وورهیس و همکاران، ۱۹۷۵). تاثیر این عامل به ویژه زمانی که انجام مکرر عملیات شخم در عمق ثابت سبب ایجاد سخت‌لایه درست در زیر عمق مرسوم شخم، در خاک‌های کشاورزی می‌گردد، اهمیت زیادی خواهد یافت. شیوه مرسوم مقابله با این پدیده، استفاده از خاک‌ورزی نسبتاً عمیق در عمق ثابت می‌باشد. با توجه به این‌که عمق سخت‌لایه در خاک معلوم نیست و در برخی موارد حتی وجود یا عدم وجود این لایه در یک مزرعه مورد تردید است، در نتیجه با انجام عملیات در عمق ثابت، ممکن است

خاک‌ورزی یا در عمقی پایین‌تر از سخت‌لایه انجام گیرد که در این صورت با توجه به انرژی بسیار بالایی که به منظور از بین بردن سخت‌لایه خاک، مورد نیاز می‌باشد، اتلاف توان و انرژی را سبب گردیده و علاوه بر این در بسیاری از موارد زیان‌آور نیز می‌باشد چرا که در این صورت خاک نامرغوب سطوح پایینی به منطقه رشد ریشه منتقل شده و عملکرد محصول را پایین می‌آورد. یا این‌که ممکن است خاک‌ورزی در عمق بالای سخت‌لایه انجام گیرد، بدین ترتیب هدف مورد نظر برای از بین بردن سخت‌لایه تأمین نگردیده است. دلیل این قبیل تغییرپذیری‌های خاص را در فشردگی خاک‌های زراعی می‌توان در برهم‌کنش توپوگرافیک، فرآیندهای بیولوژیکی و فیزیکی خاک و مدیریت عملیات مکانیزه‌ای که سال‌ها حکم‌فرما بوده است، جستجو نمود. آگاهی از شرایط استحکام خاک و بهره‌گیری از خاک‌ورزی دقیق، می‌تواند منجر به امکان خاک‌ورزی براساس وجود سخت‌لایه در هر نقطه شود تا از این‌که خاک‌ورزی در عمقی بیشتر و یا کمتر از عمق مورد لزوم انجام نگردد، اطمینان حاصل شود (گروچو، ۲۰۰۱) که با در دست داشتن نقشه مقاومت مکانیکی خاک از سطح مزرعه تحقیق می‌یابد. بطور مرسوم برای شناسایی تغییرپذیری فشردگی در سطح مزرعه، یک نفوذسنج مخروطی برای ثبت تغییرات موقتی و ویژه در مقاومت نفوذ بکار می‌رود (چنسلر، ۱۹۷۷؛ حادث و همکاران، ۱۹۸۶؛ ترنر و ریپر، ۲۰۰۱). استفاده از این وسیله که روشی ایستگاهی برای اندازه‌گیری مقاومت خاک محسوب می‌شود، کاری دشوار، زمان‌بر و خسته‌کننده می‌باشد. از طرفی برای ایجاد نقشه مناسبی از مقاومت مکانیکی در سطح یک مزرعه، جهت دانستن تغییرات ویژه در خاک به گردآوری بسیار زیادی از داده‌ها نیاز است که ممکن است روشی مؤثر در مقیاس بزرگ نباشد (کلارک، ۱۹۹۹). نقشه‌برداری در حال حرکت از مقاومت مکانیکی خاک می‌تواند از طریق ثبت پیوسته اندازه‌گیری‌های یک سنسور که سطح مزرعه را می‌پیماید، مطابق با مشخصات جغرافیایی نقطه انجام گیرد (آدامچاک و همکاران، ۲۰۰۶).

استفاده از بازوهای (تیغه‌های باریک مجهز به ابزار اندازه‌گیری) که به منظور اندازه‌گیری نیروی افقی خاک در عمق‌های مختلف از آرایشی از استرین‌گیج‌ها یا لودسل‌ها استفاده می‌کنند، بوسیله چندین گروه تحقیقاتی مورد مطالعه قرار گرفته (علی همسیاه و هامفریز، ۱۹۹۱؛ لویی و همکاران، ۱۹۹۶؛ چوکوو و باورز، ۱۹۹۷ و ۲۰۰۵؛ مانور و کلارک، ۲۰۰۱؛ آدامچاک و همکاران، ۲۰۰۱؛ آندرید و همکاران، ۲۰۰۱؛ موذن و رامون، ۲۰۰۲؛ سرچاکویز و همکاران، ۲۰۰۲؛ چانگ و همکاران، ۲۰۰۳؛ هانکوت و همکاران، ۲۰۰۴ و سیفکین و همکاران، ۲۰۰۵) و عملکرد این دستگاه‌ها نیز ارزیابی شده است. از محدودیت‌های عمده سیستم‌های اندازه‌گیری پیوسته‌ای که تاکنون توسعه داده شده‌اند، می‌توان به عمق اندازه‌گیری واحد، بهم‌زدگی بیش از حد خاک، تاثیر اصطکاک بر مقادیر مقاومت مکانیکی خاک اندازه‌گیری شده و همچنین هزینه تولید بالا اشاره کرد. با توجه به اهداف خاک‌ورزی دقیق، وجود یک سیستم ساده، ارزان و قابل اطمینان برای تهیه نقشه مقاومت مکانیکی خاک در حین حرکت و در عمق‌های چندگانه مورد نیاز است.

آدامچاک و همکاران (۲۰۰۱) یک تیغه عمودی با چهار کرنش‌سنج نصب شده بر روی آن را برای نقشه‌برداری از تغییرات ویژه مقاومت مکانیکی خاک استفاده کردند. با استفاده از مجموعه کرنش‌سنج‌ها، این سیستم توزیع نیروی برشی را در عمق‌های کاری پیش‌بینی می‌کرد. اشکال این روش این بود که مجموعه کرنش‌سنج‌ها، به جای استحکام خاک، تغییرشکل‌ها یا ممان‌های خمشی ابزار را مشخص می‌کردند که باعث می‌شد در کالیبره کردن حسگر و اصلاح تأثیر هندسه ابزار مشکل ایجاد شود.

آندرید و همکاران (۲۰۰۱) یک حسگر پروفیل نیروی برشی خاک ساختند که داده‌های نیروی برشی را تا عمق ۶۳ سانتی‌متر با فواصل ۷/۵ سانتی‌متر اندازه‌گیری می‌کرد. این دستگاه شامل ۸ لبه برشی بود و بوسیله بارسنج‌های مستقلی تجهیز شده بود که نیرو را روی هر لبه برشی در حالی که سیستم در بین خاک کشیده می‌شد، اندازه‌گیری می‌کردند. نیروی برشی خاک بوسیله محتوای رطوبت، عمق عملیات تیغه و محل لبه برشی تحت تأثیر قرار می‌گرفت. تحقیق آنها با فشردگی، بافت و رطوبت از طریق یک شاخص بافت/ فشردگی برای ایجاد ارتباط با نیروی برشی مربوط می‌شد. ارزیابی‌های حسگر نشان داد که تأثیر سرعت عملیات بین ۰/۶۵ و ۱/۲۵ متر بر ثانیه روی داده‌های اندازه‌گیری شده معنی‌دار نبود. آنها مشاهده کردند که خروجی حسگر می‌توانست به عنوان تابعی از شاخص مخروطی خاک و عمق کاری، با ضریب تبیین چندگانه ۰/۹۸۵ بیان شود. مشکل بالقوه این حسگر امکان برهم‌کنش بین لبه‌های برش منفرد بود که نیروی حس شده توسط حسگر را کاهش می‌داد.

چانگ و همکاران (۲۰۰۳) یک حسگر پروفیل استحکام خاک در حال حرکت با مجموعه‌ای از بارسنج‌ها ساختند که دارای نوک‌های منشوری مستقر بر یک تیغه اصلی بود و به منظور کم کردن اثرات تیغه اصلی و منشورهای مجاور از لبه تیغه فاصله داشت. نوک‌های منشورها دارای زاویه رأس ۶۰ درجه و مساحت قاعده آنها مطابق با استاندارد ASAE بود. اثرات این فاصله و فاصله بین انتهای منشورها مورد ارزیابی قرار گرفت و از طریق آزمایشات کنترلی بهینه شد. مقادیر بهینه برای فاصله نوک منشورها از تیغه اصلی ۵/۱ سانتی‌متر و فاصله عمودی بین منشورهای مجاور ۱۰/۲ سانتی‌متر بدست آمد. نتایج نشان داد که اکثر تغییرات در حسگر پروفیل استحکام خاک را می‌توان با شاخص مخروطی توضیح داد و این دو پارامتر رابطه خطی دارند. نتایج رگرسیون نشان داد که این ارتباط خطی بین شاخص استحکام خاک و شاخص مخروطی در عمق ۱۰/۲ سانتی‌متر معنی‌دار نبود. اما در عمق ۳۰/۵ سانتی‌متر با شیب تقریبی ۰/۵ معنی‌دار بود. در مجموع عمق، سرعت کاری، چگالی ظاهری، مقدار رس و مقدار رطوبت خاک، اصلی‌ترین پارامترهای تأثیرگذار بر اندازه‌گیری استحکام خاک تشخیص داده شدند.

سیفکین و همکاران (۲۰۰۵) نقشه مقاومت مکانیکی خاک را با استفاده از سیستم تیغه چندتایی در سه عمق تهیه کردند. ارزیابی مزرعه‌ای نشان داد که عمق بطور معنی‌داری بر روی رابطه بین اندازه‌گیری‌های مقاومت مکانیکی توسط تیغه چندتایی و شاخص مخروطی خاک تأثیر دارد. مقایسه اندازه‌گیری‌های تصحیح شده برای عمق بدست‌آمده از تیغه چندتایی و شاخص مخروطی دارای همبستگی قابل قبول $R^2 = 0.76$ بود. اندازه‌گیری‌های بدست‌آمده با تیغه‌های چندتایی دارای واریانس کمتری نسبت به نفوذسنج مخروطی بود. تغییرات سرعت حرکت از ۰/۴۵ تا ۲/۲۴ متر بر ثانیه تأثیر معنی‌داری بر اندازه‌گیری‌های مقاومت مکانیکی خاک نداشت.

آدامچاک و همکاران (۲۰۰۶) دو روش تهیه نقشه مقاومت مکانیکی خاک در حال حرکت را مقایسه کردند. در حالی که یکی از حسگرها نقشه مقاومت مکانیکی خاک را با استفاده از پنج منشور افقی در عمق‌های مجزا از ۱۰ تا ۵۰ سانتی‌متری تهیه می‌کرد و پنج نوک منشوری به فاصله ۵/۱ سانتی‌متر در جلوی تیغه اصلی برای کاهش اثرات حرکت خاک بوسیله تیغه روی مقاومت حس شده توسط حسگر، امتداد می‌یافت. حسگر دیگر پارامترهای مورد نیاز ویژگی پروفیل مقاومت مکانیکی خاک را با فرض تغییر خطی با عمق، در عمق‌های بالای ۳۰ سانتی‌متر، تعیین می‌کرد. دو پل کرنش‌سنج در ارتفاع‌های به حد کافی متفاوت روی تیغه نصب می‌شدند، در حالی که نصب سومین کرنش‌سنج برای بالا بردن قابلیت اعتماد بیشتر سیستم بود. همچنین تیغه دوم از حسگرهای خازنی و نوری به ترتیب

برای نقشه‌برداری هم‌زمان از بازتاب سطح و شاخص‌های دی‌الکتریک خاک، بهره می‌گرفت. همبستگی بین داده‌های بدست‌آمده از هریک از حسگرها با داده‌های نفوذسنج مخروطی پایین بود ($R^2 = 0.32$ تا $R^2 = 0.46$ برای مقادیر متوسط مقاومت مکانیکی خاک)، در حالی که داده‌های دو حسگر نسبت به هم دارای همبستگی قوی‌تری بودند ($R^2 = 0.57$ برای مقادیر متوسط مقاومت مکانیکی خاک).

نیکبخت و همکاران (۱۳۸۵) مطالعه‌ای بر روی پارامترهای مؤثر بر مقاومت مکانیکی خاک با استفاده از حسگر افقی در انباره خاک، انجام دادند. انباره خاک رفت و برگشتی با امکانات و تجهیزات کنترل سرعت، فرآوری خاک و غلتک ایجاد فشردگی مصنوعی ساخته شده بود. آزمایش در دو نوع بافت خاک سبک و سنگین انجام شده و اثر چهار نوع کاوشگر منشوری و مخروطی مورد بررسی قرار گرفت. همچنین سه سطح سرعت پیشروی حسگر، در سه سطح رطوبتی خاک اعمال شد. داده‌های حاصل با مقادیر شاخص مخروطی خاک اندازه‌گیری شده در هر تیمار مورد مقایسه قرار گرفت. نتایج آزمایش‌ها نشان داد که در خاک با بافت سنگین‌تر، مقاومت خاک افزایش می‌یابد. افزایش سرعت پیشروی باعث افزایش مقاومت خاک شده، اما این افزایش تا سرعت 0.35 متر بر ثانیه معنی‌دار نمی‌باشد. اثر رطوبت بر مقاومت مکانیکی معنی‌دار بوده و افزایش آن موجب کاهش مقاومت مکانیکی گشته است. کاوشگر منشوری با زاویه رأس 30° درجه بهترین تخمین را از مقاومت خاک بدست می‌دهد. میزان نوسانات اندازه‌گیری در کاربرد منشور 30° درجه در مقایسه با بقیه موارد حداقل است.

همت و همکاران (۲۰۰۹) تحقیقی بر روی تأثیر گسیختگی ایجاد شده توسط یک نفوذسنج تک تیغه‌ای افقی برای اندازه‌گیری مقاومت خاک، انجام دادند. در این تحقیق از یک نفوذسنج تک تیغه‌ای که دارای نوک منشوری با قاعده 324 میلی‌متر مربع بود، استفاده شد. نوک منشوری بطور افقی روی یک بارسنج S- شکل که درون بازو قرار داشت نصب شده بود. آزمایشات در مزرعه‌ای با بافت سیلتی رسی لومی انجام شد. جهت مقایسه داده‌ها از شاخص مخروطی با گام‌های 1 سانتی‌متری در عمق و فواصل یک متری بطور افقی در هر راه استفاده شد. نتایج نشان داد که متوسط مقدار شاخص مخروطی در عمق‌های 20 و 25 سانتی‌متری به جهت گسیختگی ترد در هر دو مورد یکسان بود. در صورتی که هنگام کار تیغه در عمق زیر عمق بحرانی (30 سانتی‌متر) مقدار شاخص مقاومت افقی، سه برابر مقادیر مربوط به عمق‌های 22 و 25 سانتی‌متری بود. آنها نتیجه گرفتند که دلیل این امر تفاوت در شکل گسیختگی ترد که در عمق‌های بالای عمق بحرانی وجود داشت، نسبت به شکل فشاری که در زیر عمق بحرانی روی می‌داد، است. آنها اظهار داشتند، شکل گسیختگی در بالای عمق بحرانی از نوع گسیختگی ترد و در زیر آن از نوع گسیختگی تحمل‌پذیر (فشاری) می‌باشد. در حالی که شکل گسیختگی خاک در جلوی یک نفوذسنج مخروطی که بصورت عمودی کار می‌کند، همیشه از نوع تحمل‌پذیر می‌باشد که این امر با نتایج چانگ و همکاران (۲۰۰۶) مطابقت داشت. آنها نتیجه گرفتند که همبستگی معنی‌دار بین داده‌های نفوذسنج و داده‌های حسگر در عمق 30 سانتی‌متری بواسطه شکل گسیختگی مشابه در جلوی این دو نفوذسنج (افقی و عمودی) است.

عباسپور گیلانده (۲۰۰۹) یک دستگاه اندازه‌گیری مقاومت مکانیکی خاک در حال حرکت ساخت که متشکل از چهار بازو بود و داده‌های مقاومت مکانیکی خاک را به ترتیب در چهار عمق 10 و 20 و 30 و 40 سانتی‌متری برداشت می‌کرد. به منظور جلوگیری از بالا آمدگی خاک در هنگام گسیخته شدن توسط تیغه و مکانیزم اندازه‌گیری، زاویه گوه جلوی آنها 60° درجه در نظر گرفته شد. همچنین عرض تیغه با توجه به ابعاد مکانیزم ایمنی و ابعاد مبدل نیرو، معادل

۲۵ میلی‌متر در نظر گرفته شد. اساس کار اندازه‌گیری نیروی مقاومت خاک در برابر حرکت گوه‌ای در داخل خاک است که این نیرو از طریق یک مبدل هشت وجهی نیرو اندازه‌گیری می‌گردد. آزمایشات مزرعه‌ای اولیه نشانگر کاربرد موفقیت‌آمیز این سیستم در اندازه‌گیری مقاومت مکانیکی خاک بود.

هدف از این تحقیق مقایسه دو سیستم مختلف اندازه‌گیری در حال حرکت مقاومت مکانیکی خاک بود که در سیستم اندازه‌گیری اول، داده‌های مقاومت مکانیکی با استفاده از یک کاوشگر تک‌تیغه‌ای و در سیستم اندازه‌گیری دوم توسط یک کاوشگر مجهز به تیغه‌های چندگانه (عباسپور گیلانده، ۲۰۰۹) بدست آمدند. همچنین تأثیر محتوای رطوبتی و سرعت پیشروی بر عملکرد دستگاه‌ها بررسی شده و در نهایت شکل گسیختگی خاک در هر دو کاوشگر بررسی شده و همبستگی داده‌های اندازه‌گیری شده توسط هر دو سیستم اندازه‌گیری با داده‌های شاخص مخروطی بدست آمده از یک نفوذسنج تراکتوری مورد بررسی قرار گرفتند.

مواد و روش‌ها

الف - توصیفات عمومی سیستم‌های اندازه‌گیری مقاومت مکانیکی خاک مورد استفاده در تحقیق

دو سیستم اندازه‌گیری مورد مقایسه در این مطالعه شامل سیستم اندازه‌گیری مقاومت مکانیکی افقی پیوسته تک-تیغه‌ای (SMRMS1S)^۱ و سیستم اندازه‌گیری مقاومت مکانیکی افقی پیوسته مجهز به تیغه‌های چندگانه (SMRMS4S)^۲ می‌باشد.

SMRMS1S تیغه‌ای عمودی متشکل از چهار حسگر نیرو، مخروط‌های نفوذکننده و شافت‌های افقی است که در ساخت مخروط‌ها، از استاندارد انجمن مهندسين کشاورزی آمریکا (ASAE S313.3, 2005) استفاده گردیده است (شکل ۱). قسمت انتهایی شافت مخروط‌ها در داخل تیغه با بارسنج‌های مینیاتوری با ظرفیت بار ۲ کیلو نیوتن، در ارتباط است که در این سیستم اندازه‌گیری، نیروی وارد شده بر مخروط توسط مقاومت خاک به حسگر انتقال می‌یابد. از طریق یک پل و تستون ایجاد شده، بارسنج‌ها به یک دیتالاگر موجود در کابین راننده تراکتور متصل شده و داده‌های مقاومت مکانیکی خاک در یک کامپیوتر کیفی متصل به دیتالاگر ذخیره می‌گردد. به این ترتیب مقاومت مکانیکی خاک در چهار عمق مجزا به فواصل ۱۰ سانتی‌متری بطور پیوسته اندازه‌گیری می‌شود.

در SMRMS4S اندازه‌گیری چهار عمق مورد نظر بوسیله چهار بازوی مجزا انجام می‌گردد و حسگر نیرو در آن در واقع سطحی گوه مانند به طول ۱۰ سانتی‌متر بود. نیروی وارده توسط این حسگر به یک مبدل هشت‌وجهی نیرو انتقال می‌یافت (شکل ۲). در این مبدل به‌منظور اندازه‌گیری نیروها و ممان وارده بر روی مبدل از کرنش‌سنج‌های الکتریکی که بر روی سطح مبدل نصب شده و کرنش‌های سطحی ایجاد شده بر روی مبدل را با کمک یک مدار پل وتسون اندازه‌گیری می‌کردند، استفاده می‌شد (عباسپور گیلانده، ۲۰۰۹).

¹ - Soil Mechanical Resistance Measurement System with 1 Shank

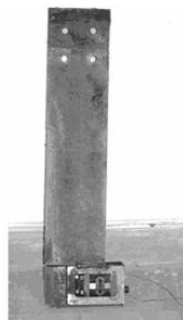
² - Soil Mechanical Resistance Measurement System with 4 Shanks

ب - آزمون‌های آزمایشگاهی و کالیبراسیون

کالیبراسیون لودسل‌های میناتوری استفاده شده در ساخت کاوشگر SMRMS1S قبلاً توسط شرکت سازنده صورت گرفته بود، با این وجود برای گستره‌های کاری مقاومت مکانیکی خاک مورد انتظار و اطمینان از رفتار خطی بارسنج-ها، کالیبراسیون مجدد با استفاده از دستگاه کشش- فشار مدل STM-20 ساخت شرکت مهندسی سنتام^۱ صورت گرفت. به این ترتیب که قسمت حساس لودسل رو به فک متحرک دستگاه قرار می‌گرفت و پس از بارگذاری دستگاه STM-20 نقطه خروج از صفر دیتالاگر تعیین شد. کالیبراسیون برای کاوشگر SMRMS4S نیز توسط همین دستگاه انجام شد. ضمن این‌که برای اعمال بار گسترده از قطعه‌ای گوه‌ای شکل که دقیقاً بر روی قسمت درگیر با خاک مربوط به هر بازو قرار می‌گرفت، جهت اعمال نیرو استفاده گردید. داده‌های مرجع مقاومت مکانیکی که برای مقایسه داده‌های دستگاه‌های ساخته شده استفاده شد، به وسیله نفوذسنج مخروطی تراکتوری ساخت آهنی و همکاران (۲۰۰۹) تأمین گردید.

		
(ج)	(ب)	(الف)

شکل ۱- (الف) نمای نزدیک تیغه مجهز به ابزار اندازه‌گیری، (ب) سیستم اندازه‌گیری مقاومت مکانیکی افقی پیوسته تک- تیغه‌ای متصل به سیستم اتصال سه‌نقطه تراکتور و (ج) تیغه بدون درپوش به همراه بارسنج‌ها و سیم‌های بارسنج‌ها



(ب)



(الف)

شکل ۲- (الف) سیستم اندازه‌گیری مقاومت مکانیکی افقی پیوسته چندتیغه‌ای متصل به سیستم اتصال سه‌نقطه تراکتور و (ب) تیغه بدون درپوش به همراه بارسنج‌ها و سیم‌های بارسنج‌ها در سیستم اندازه‌گیری

ج- آزمایشات مزرعه‌ای

آزمایشات مزرعه‌ای جهت مقایسه دو دستگاه در مزرعه آموزشی و تحقیقاتی دانشگاه محقق اردبیلی به ترتیب در بخش‌های زیر اجرا گردید:

بخش اول: آزمایشات مزرعه‌ای با هدف مقایسه داده‌های هر یک از دستگاه‌ها با نفوذسنج مخروطی تراکتوری در قالب یک طرح آزمایشی جهت آگاهی از وجود یا عدم وجود ارتباط معنی‌دار داده‌های آنها نسبت به نفوذسنج مخروطی تراکتوری. در این بخش از آزمایشات، اندازه‌گیری‌های شاخص مخروطی با استفاده از نفوذسنج مخروطی تراکتوری در کرت‌های آزمایشی صورت گرفت. تعداد ۵ داده شاخص مخروطی در هر کرت آزمایشی برداشت شد. در این آزمایش که از طرح بلوک‌های کامل تصادفی استفاده می‌شد، تیمارهای آزمایشی عبارت بودند از: نوع دستگاه (نفوذسنج و SMRMS1S در آنالیز اول و نفوذسنج و SMRMS4S در آنالیز دوم)، رطوبت (نسبتاً خشک و مرطوب) و عمق (۱۰، ۲۰، ۳۰، ۴۰ سانتی‌متر).

بخش دوم: آزمایشات مزرعه‌ای با هدف مقایسه دو دستگاه پیوسته در قالب یک طرح آزمایشی برای آگاهی از وجود یا عدم وجود ارتباط معنی‌دار داده‌های آنها نسبت به یکدیگر. طرح آزمایشی به کار رفته split-split-plot بر پایه طرح بلوک‌های کامل تصادفی بود که فاکتور اصلی در آن رطوبت (دو سطح نسبتاً خشک و مرطوب)، فاکتور فرعی سرعت پیشروی (سه سطح ۱/۷۸ و ۲/۶۸ و ۳/۵۷ کیلومتر بر ساعت) که تمامی سطوح آن زیر سرعت بحرانی بودند و فاکتور فرعی نوع دستگاه (SMRMS4S و SMRMS1S) بود. دلیل قرار دادن رطوبت به عنوان فاکتور اصلی، سهولت در انجام آزمایش بود. آزمایشات در سه تکرار انجام پذیرفت. برای هر یک از دو سطح رطوبتی ۶ مسیر عرضی در هر تکرار طی می‌شد. در ابتدا دو قطعه زمین به ابعاد ۴۰×۴۰ متر در نظر گرفته شد. سپس هر قطعه زمین به دو قسمت تقسیم شد، به طوری که یک قطعه از آن جهت تأمین سطح رطوبتی نسبتاً خشک و دیگری جهت سطح رطوبتی مرطوب در نظر گرفته شد. برای سطح رطوبتی مرطوب ابتدا زمین تا حالت کاملاً اشباع تا عمق ۴۰ سانتی-متری آبیاری شد و سپس به مدت ۴۸ ساعت به حال خود رها شد. سپس هر قطعه زمین به نوارهایی با طول ۲۰ متر و عرض ۲/۵ متر تقسیم گردید. به این ترتیب مجموعاً ۳۶ مسیر مجزا تشکیل شد که در آن فاصله بین هر دو مسیر مجاور ۲ متر بود بین دو قطعه زمین خشک و آبیاری شده، فاصله ۵ متری در نظر گرفته شد. سه سطح سرعتی مورد-نظر با قرار دادن گاز دستی در دور موتور ۱۵۰۰ rpm و به ترتیب استفاده از دنده ۱ سنگین، دنده ۲ سنگین و دنده ۳ سنگین، بدست آمدند. برای محاسبه سرعت پیشروی تراکتور در این سه حالت، تراکتور یک فاصله معین را در حالی که زمان توسط کروномتر اندازه‌گیری می‌شد، طی کرد. با تقسیم مسافت طی شده بر زمان، سرعت پیشروی در هر حالت به دست آمد. این مقادیر به ترتیب ۱/۷۸ و ۲/۶۸ و ۳/۵۷ کیلومتر بر ساعت بودند. تمامی آزمایشات در زمین شخم نخورده انجام شد که مدت دو سال دست نخورده باقی مانده بود و در آن بقایای کمی از یونجه وجود داشت. مشخصات بافت خاک مزرعه مورد آزمایش در جدول ۱ آورده شده است.

جهت مقایسه دو کاوشگر از لحاظ میزان نوسانات داده‌برداری و ارائه ثبات بیشتر در داده‌ها، داده‌های مقاومت مکانیکی حاصل از حسگرهای پیوسته در طول مسیر پیشروی در شرایط نسبتاً خشک خاک و در اولین سرعت پیشروی به صورت نمودار تهیه گردید. همچنین ضریب تغییرات مربوط به آنالیز واریانس نیز در این مقایسه مورد

استفاده قرار گرفت. در مرحله آخر به بررسی و مقایسه میزان بهم خوردگی خاک و شکل گسیختگی ایجاد شده در خاک توسط دستگاه پروفیل متر پرداخته شد.

جدول ۱- بافت خاک مزرعه‌ی آزمایشی

بافت	رس (%)	سیلت (%)	شن (%)	نوع زمین
سیلتی لومی	۶	۶۹	۲۵	شخم نخورده

نتایج و بحث

به‌طور خلاصه می‌توان گفت، در مقایسه دو نوع سیستم اندازه‌گیری بکار گرفته شده در این طرح، از معیارهای زیر استفاده شده است: ۱- بررسی وجود ارتباط معنی‌دار بین داده‌های مقاومت مکانیکی پیوسته هر یک از دستگاه‌ها با شاخص مخروطی طیّ یک تحلیل آماری ۲- بررسی میزان نوسانات داده‌برداری هر یک از دستگاه‌ها با استفاده از نمودارهای شاخص مقاومت هر یک از دستگاه‌ها در چهار عمق مجزا در مقابل زمان و نیز ضریب تغییرات بدست آمده از آنالیز تجزیه واریانس. ۳- میزان همبستگی بین داده‌های مقاومت مکانیکی پیوسته هر یک از دستگاه‌ها با شاخص مخروطی با استفاده از رگرسیون خطی با در نظر گرفتن شکل گسیختگی خاک در برابر هر یک از دستگاه‌ها.

۱- نتایج آزمون‌های آزمایشگاهی و کالیبراسیون

نمودارهای کالیبراسیون مربوط به هر دو کاوشگر با ضریب بالایی خطی بودند. در جداول ۲ و ۳ ضرایب تبیین نمودارهای کالیبراسیون بدست آمده، مربوط به عمق ۱۰-۰ سانتی‌متری به ترتیب برای لودسل‌های مینیاتوری SMRMS1S و سیستم اندازه‌گیری مربوط به SMRMS4S آورده شده است.

جدول ۲- نتایج رگرسیون خطی داده‌های حاصل از کالیبراسیون لودسل‌های SMRMS1S

لودسل اول	لودسل دوم	لودسل سوم	لودسل چهارم	R ²
۰/۹۹۴۵	۰/۹۹۳	۰/۹۹۴	۰/۹۹۷۵	

جدول ۳- نتایج رگرسیون خطی داده‌های حاصل از کالیبراسیون بازوهای SMRMS4S

بازوی اول	بازوی دوم	بازوی سوم	بازوی چهارم	R ²
۰/۹۹۸۵	۰/۹۹۸۵	۰/۹۹۸	۰/۹۹۸۸	

۲- مقایسه SMRMS1S و SMRMS4S با CI

هدف از این مقایسه تعیین وجود یا عدم وجود ارتباط معنی‌دار بین هر یک از سنسورهای پیوسته با شاخص مخروطی بود تا در صورت وجود ارتباط از طریق مقایسه میانگین اثر نوع دستگاه‌ها بتوان میزان نزدیکی داده‌های این دو سنسور را با شاخص مخروطی مقایسه نمود. نتایج حاکی از آن بود که فاکتور نوع دستگاه در مقایسه هر دو دستگاه با شاخص مخروطی معنی‌دار بوده است. این فاکتور در سطح احتمال ۱٪ برای SMRMS1S و نفوذسنج و برای SMRMS4S با نفوذسنج در سطح احتمال ۵٪ معنی‌دار شد. همان‌طور که انتظار می‌رفت، این دو سنسور پیوسته در اندازه‌گیری مقاومت مکانیکی خاک با نفوذسنج مخروطی از لحاظ کمیته دارای اختلافات زیادی می‌باشند که بخش زیادی از آن ناشی از هندسه ابزار و جهت نفوذ (افقی) متفاوت با نفوذسنج (عمودی) در خاک می‌باشد.

۳- مقایسه SMRMS1S با SMRMS4S

پس از نتایج قسمت قبل در این مرحله ارتباط بین CSRI1 و CSRI4 به ترتیبی که قبلاً توضیح داده شد، مورد بررسی قرار گرفت. برای مقایسه میانگین‌ها در گروه‌های مختلف از آنالیز واریانس و آزمون چند دامنه‌ای دانکن استفاده شد.

از جدول ۴ استنباط می‌شود، بین دو دستگاه از نظر تأثیر روی مقاومت مکانیکی نشان داده شده تفاوت معنی‌دار در سطح احتمال ۵٪ وجود دارد. داده‌های بدست آمده از آزمایش نشان می‌دهد که مقادیر اندازه‌گیری شده مقاومت مکانیکی خاک با SMRMS4S نسبت به SMRMS1S شامل اندازه‌های بزرگتری بوده است. افزایش در میانگین مقاومت مکانیکی مربوط به دستگاه مجهز به تیغه‌های چندگانه را می‌توان در حساسیت بیشتر آن به مقاومت مکانیکی خاک و سطح بیشتر تماس آن با خاک دانست. وجود حفرة‌ای کوچک در داخل خاک ممکن است زمانی که مخروط دستگاه تک تیغه‌ای از داخل آن عبور می‌کند، مقادیر مقاومت مکانیکی خاک را بسیار تنزل دهد. در صورتی که چنین شرایطی در سیستم اندازه‌گیری مجهز به تیغه‌های چندگانه حکم‌فرما نمی‌باشد. اثرات اصلی رطوبت و عمق معنی‌دار بودند در صورتی که اثر سه سطح سرعت پیشروی تأثیر معنی‌داری بر میانگین مقاومت مکانیکی خاک نداشت. با توجه به سطوح سرعت پیشروی در نظر گرفته شده، نتایج حاصله با تحقیقات مشابه که در اندازه‌گیری مقاومت افقی خاک صورت گرفته است، نظیر تحقیقات علی همسیاه و همکاران (۱۹۹۰) و چانگ و همکاران (۲۰۰۳) مطابقت دارد.

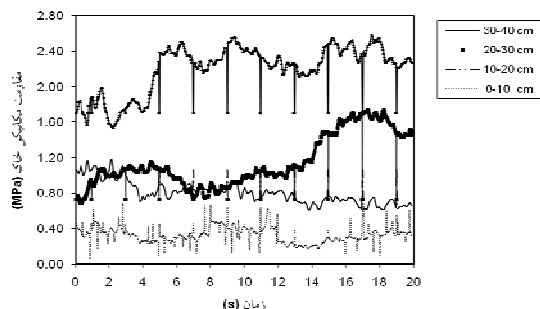
جدول ۴- نتایج مقایسه میانگین اثرات اصلی بر میانگین مقاومت مکانیکی خاک

عمق (cm)	سرعت پیشروی (km/h)	رطوبت (%)	نوع دستگاه
۰-۱۰	۱/۲۰۸ ^a	۱/۷۸	تیغه‌های چندگانه
۰/۳۱۳ ^d		۱/۷۳۵ ^a	تیغه‌های چندگانه
۱۰-۲۰	۱/۱۶۵ ^a	۲/۶۸	تک تیغه‌ای
۰/۵۲۷ ^c		۰/۶۳۴ ^b	تک تیغه‌ای
۲۰-۳۰	۱/۱۸ ^a	۳/۵۷	
۱/۳۸۹ ^b			
۳۰-۴۰	۲/۵۰۸ ^a		

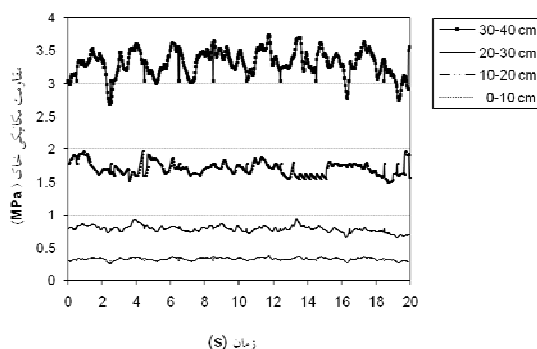
پس از این که آزمایشات مزرعه‌ای وجود هر گونه ارتباط معنی‌دار بین داده‌های حاصل از این سه دستگاه اندازه‌گیری را رد کرد، در مرحله بعد سعی شد توسط رابطه‌های رگرسیون خطی وجود ارتباط بین داده‌های این سه دستگاه مورد بررسی قرار گیرد.

۴- بررسی میزان نوسانات داده‌برداری

شکل‌های ۳ و ۴ نمودار حاصل از داده‌های مقاومت مکانیکی کاوشگرهای پیوسته را در طول مسیر پیشروی در شرایط نسبتاً خشک خاک و در اولین سرعت پیشروی نشان می‌دهد.



شکل ۳- نمودار مقادیر مقاومت مکانیکی افقی خاک نسبت به زمان برای سیستم اندازه‌گیری مجهز به تیغه‌های چندگانه



شکل ۴- نمودار مقادیر مقاومت مکانیکی افقی خاک نسبت به زمان برای سیستم اندازه‌گیری تک تیغه‌ای

همان‌طور که ملاحظه می‌شود دستگاه مجهز به تیغه‌های چندگانه دارای نوسانات کمتری نسبت به دستگاه تک تیغه‌ای می‌باشد. این نتیجه در هر چهار عمق صدق می‌کند. دلیل نوسانات کم این دستگاه به مکانیسم اندازه‌گیری آن مربوط می‌گردد. با توجه به این که نیروی خاک به جای یک نقطه (در شاخص مخروطی و دستگاه تک تیغه‌ای) به یک سطح به طول ۱۰ سانتی‌متر اثر می‌کند، در نتیجه وجود متغیرهای لحظه‌ای مانند حفره‌ها و سنگ‌های کوچک داخل خاک، نمی‌تواند اثر تعیین‌کننده بر مقاومت در یک عمق خاص داشته باشد. این نتیجه به‌طور آماری نیز از روی آنالیز واریانس تأیید شد. بطوری‌که ضریب تغییرات داده‌های CSRI4 حتی از تغییرات داده‌های شاخص مخروطی نیز کمتر بود و این نشان‌دهنده عملکرد بسیار خوب SMRMS4S در مقابل SMRMS1S است (جدول ۵).

جدول ۵- ضریب تغییرات داده‌های هر یک از سیستم‌های اندازه‌گیری مقاومت مکانیکی بدست آمده از آنالیز واریانس

	CSRI4	CSRI1	CI
CV	%7.21	%12.61	%8.61

۵- بررسی ارتباط بین داده‌های دو حسگر با شاخص مخروطی از طریق آنالیز رگرسیونی

با نتایج به دست آمده از قسمت‌های قبل، که داده‌های اندازه‌گیری شده هر دو دستگاه با نفوذسنج معنی‌دار شده است، در گام بعدی به یافتن رابطه همبستگی بین مقادیر دو حسگر با شاخص مخروطی پرداخته شده و در واقع به جای مقادیر کمی و خام به دست آمده از ضریب زاویه نمودار خطی داده‌های آنها برای مقایسه کاوشگرها استفاده گردید. لازم به ذکر است، برای هر دو حسگر پیوسته داده‌های مربوط به هر دو سطح رطوبتی ترکیب شدند. سپس با استفاده از رگرسیون خطی ارتباط بین داده‌های نهایی بدست آمده از هر یک از حسگرها با داده‌های نفوذسنج مشخص گردید. خلاصه نتایج بدست آمده در جداول ۶ و ۷ نشان داده شده است.

نتایج رگرسیون خطی بین داده‌های SMRMS4S و نفوذسنج مخروطی نشان می‌دهد، همبستگی بالایی بین داده‌های حاصل از این دو دستگاه وجود دارد (جدول ۶). همان‌طور که در جدول ۶ مشاهده می‌شود، در عمق ۱۰-۰ سانتی-متری، نسبت به عمق‌های دیگر مقایسات، ضریب تبیین متفاوتی را ارائه داده‌اند. در عمق ۱۰-۰ سانتی متر بر خلاف عمق‌های بالاتر ضریب تبیین مدل (R^2) کاهش یافته است. با توجه به نتایج هم‌ت و همکاران (۲۰۰۹) بر روی تأثیر الگوی گسیختگی بر اندازه‌گیری مقاومت مکانیکی با نفوذسنج افقی که آنها بیان کردند، "شکل گسیختگی خاک برای نفوذسنج‌های افقی به موقعیت نوک حسگر نسبت به عمق بحرانی بستگی دارد و هنگامی که نوک حسگر افقی در بالا یا پایین عمق بحرانی حرکت کند، به ترتیب الگوی گسیختگی خاک از نوع گسیختگی هلالی و گسیختگی جانبی می‌باشد، در حالی که الگوی گسیختگی در برابر نفوذسنج مخروطی همیشه از نوع گسیختگی جانبی است (چانگ و سودوث، ۲۰۰۶)،

جدول ۶- همبستگی بین مقادیر مقاومت مکانیکی افقی اندازه‌گیری شده توسط SMRMS4S و CI

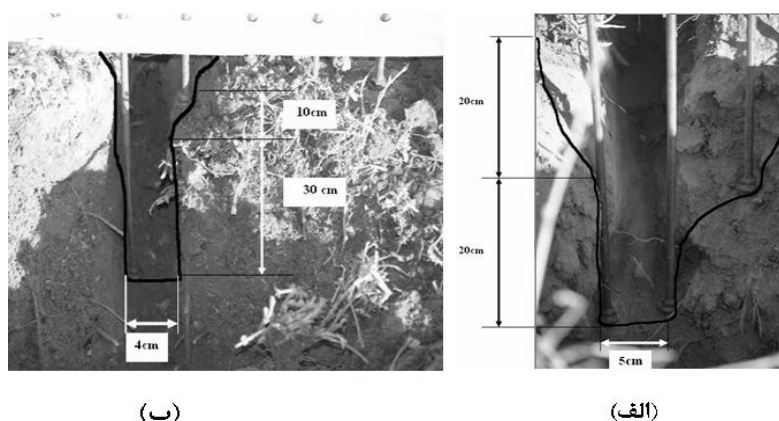
شاخص مخروطی خاک	ساقه ۰-۱۰ سانتی متر	ساقه ۱۰-۲۰ سانتی متر	ساقه ۲۰-۳۰ سانتی متر	ساقه ۳۰-۴۰ سانتی متر
۰-۱۰ سانتی متر	۰/۶۳	-	-	-
۱۰-۲۰ سانتی متر	-	۰/۸۴	-	-
۲۰-۳۰ سانتی متر	-	-	۰/۸۳	-
۳۰-۴۰ سانتی متر	-	-	-	۰/۸۰

جدول ۷- همبستگی بین مقادیر مقاومت مکانیکی افقی اندازه‌گیری شده توسط SMRMS1S و CI

شاخص مخروطی خاک	ساقه ۰-۱۰ سانتی متر	ساقه ۱۰-۲۰ سانتی متر	ساقه ۲۰-۳۰ سانتی متر	ساقه ۳۰-۴۰ سانتی متر
۰-۱۰ سانتی متر	۰/۲۳	-	-	-
۱۰-۲۰ سانتی متر	-	۰/۱۶	-	-
۲۰-۳۰ سانتی متر	-	-	۰/۵۱	-
۳۰-۴۰ سانتی متر	-	-	-	۰/۶۹

با توجه به این که شکل گسیختگی خاک در رابطه مستقیم با عمق بحرانی قرار دارد، به نظر می رسد محققانی چون آندرید و همکاران (۲۰۰۴) که نتیجه گرفتند عمق کار حسگر بر روی ارتباط داده‌های آن با داده‌های شاخص مخروطی تأثیرگذار می باشد، در واقع به طور غیرمستقیم به تأثیر شکل گسیختگی خاک و تفاوت آن در بالا و پایین عمق بحرانی اشاره کرده‌اند و به طور ضمنی نتیجه گرفته‌اند که علت تأثیر عمق به دلیل تفاوت در شکل گسیختگی در عمق‌های مختلف است. در نتیجه می توان کاهش ضریب تبیین را مربوط به آشفته‌گی ایجاد شده در عمق ۱۰-۰ سانتی متری خاک دانست. شکل ۵ وجود گسیختگی هلالی را در پروفیل خاک در ۱۰ سانتی متری سطح زمین بخوبی نشان می دهد.

پس از آن از عمق ۱۰ تا ۴۰ سانتی متری نوع گسیختگی از نوع جانبی (فشاری) می باشد، با توجه به این که الگوی گسیختگی نفوذسنج مخروطی نیز همیشه از نوع فشاری است، ملاحظه می شود که همبستگی خوبی بین داده‌ها در این عمق‌ها بدست آمده است. با دقت به شکل گسیختگی خاک در اثر عبور این حسگر (شکل ۵)، مشاهده می شود که عرض ناحیه فشرده شده، کمی بیشتر از عرض تیغه است که بخشی از آن می تواند به دلیل در یک امتداد نبودن بازو-ها و خط کشش تراکتور باشد.



شکل ۵- نمای (پشت از) پروفیل گسیختگی خاک در اثر عبور کاوشگرها. (الف) SMRMS1S (ب) SMRMS4S

از روی جدول ۷ مشاهده می شود که مقادیر ضریب تبیین پائینی در مقایسه ارتباط SMRMS1S نسبت به شاخص مخروطی در عمق‌های اول و دوم حاصل شده است و این بیانگر آشفته‌گی زیاد ایجاد شده است که این دستگاه در عمق‌های مذکور ارائه می دهد. اما در عمق‌های ۲۰-۳۰ و ۳۰-۴۰ سانتی متری همبستگی نسبتاً خوبی بین داده‌های بدست آمده از این دو دستگاه وجود داشته است. بخصوص در عمق ۳۰-۴۰ سانتی متری که میزان ارتباط خوبی بدست آمده است. می توان این گونه نتیجه گرفت که در این عمق‌ها آشفته‌گی کمی در خاک بواسطه حرکت دستگاه ایجاد شده است و نیز شکل گسیختگی ایجاد شده توسط هر دو دستگاه مشابه بوده است.

با توجه به موارد ذکر شده فوق، دلیل عمده وجود همبستگی‌های بیشتر دستگاه مجهز به تیغه‌های چندگانه با شاخص مخروطی نسبت به دستگاه تک تیغه‌ای در دو عمق اول (تفاوت زیاد)، در کمتر بودن آشفته‌گی خاکی است که دستگاه

مجهاز به تیغه‌های چندگانه در خاک ایجاد می‌کند و همچنین تفاوت در الگوی گسیختگی خاک در این دو عمق بین دستگاه تک تیغه‌ای و نفوذسنج مخروطی می‌باشد که همبستگی بین داده‌های آنها را پایین آورده است. بعضی دلایل وجود اختلاف بین اندازه‌گیری‌های دو حسگر در مقابل شاخص مخروطی را می‌توان در موارد زیر جستجو کرد:

۱- تغییرات ویژه در خواص خاک در فواصل بین شعاع‌های بکارگیری نفوذسنج مخروطی و مسیرهای حرکت حسگرها ۲- عدم اطمینان در قرار گرفتن عمق صحیح حسگرهای پیوسته به دلیل وجود باقیمانده محصول در مزرعه (بقایای یونجه) و نیز سطوح متفاوت عمقی در مزرعه (عدم هم‌ترازی در سطح مزرعه). ۳- اختلاف در هندسه حسگرها با هندسه نفوذسنج مخروطی به‌ویژه برای دستگاه مجهز به تیغه‌های چندگانه با نفوذسنج مخروطی ۴- تفاوت در جهت کاری حسگرهای پیوسته (نفوذ افقی) نسبت به نفوذسنج (نفوذ عمودی) و ۵- وجود ریشه، سنگ و حفره‌های موجود در خاک، از دیگر عواملی است که به تفاوت بین داده‌های حسگرها با نفوذسنج منجر می‌شود.

از دلایل وجود اختلاف در مقادیر اندازه‌گیری شده توسط دو کاوشگر پیوسته موارد زیر می‌باشند:

۱- عضو مواجه با نیرو در دستگاه تک‌تیغه‌ای یک مخروط می‌باشد که نیرو را بطور نقطه‌ای حس می‌کند و در دستگاه مجهز به تیغه‌های چندگانه این وظیفه بر عهده یک سطح گوه‌ای به طول ۱۰ سانتی‌متر است که در واقع بار گسترده را در فاصله ۱۰ سانتی‌متری اندازه می‌گیرد. ۲- وجود مکانیسم‌های متفاوت گسیختگی خاک به علت هندسه متفاوت ابزار و پارامترهای کاری مختلف که می‌تواند بر داده‌های بین دو حسگر تأثیر بگذارد.

نتیجه‌گیری

نتایج مقایسه دو کاوشگر اندازه‌گیری مقاومت مکانیکی در حال حرکت که از دو روش مختلف استفاده می‌کردند، نشان داد که داده‌های مقاومت مکانیکی حاصل از این دو حسگر هم نسبت به یکدیگر و هم نسبت به داده‌های شاخص مخروطی دارای اختلاف معنی‌داری هستند. داده‌های CSRI4 دارای مقادیر عددی بزرگتری نسبت به CSRI1 است که نتیجه می‌شود کاوشگر مجهز به تیغه‌های چندگانه در اندازه‌گیری مقاومت مکانیکی خاک به‌طور حساس‌تر عمل کرده است. نتایج نشان داد که کاوشگر مجهز به تیغه‌های چندگانه در عمق‌های ۱۰ تا ۴۰ سانتی‌متری خاک همبستگی خوبی را با داده‌های شاخص مخروطی به دلیل شکل یکسان گسیختگی و آشفته‌گی کم ایجاد شده در خاک داراست (با ضرایب همبستگی ۰/۸۴، ۰/۸۳ و ۰/۸۰ به ترتیب در عمق‌های بین ۱۰ تا ۲۰، ۲۰ تا ۳۰ و ۳۰ تا ۴۰ سانتی‌متری). در عمق ۱۰-۰ سانتی‌متری به دلیل ایجاد آشفته‌گی در خاک ضریب همبستگی بین نفوذسنج مخروطی و کاوشگر مجهز به تیغه‌های چندگانه کاهش یافته است. ارتباط بین CSRI1 و CI از سطح زمین تا عمق ۲۰ سانتی‌متری خاک ضعیف می‌باشد (۰/۲۳ و ۰/۱۶ به ترتیب برای عمق‌های ۱۰-۰ و ۲۰-۱۰ سانتی‌متری). در حالی که از عمق ۲۰ تا ۴۰ سانتی‌متری همبستگی آن‌ها به دلیل وجود شکل گسیختگی یکسان، به مقدار زیادی بهبود می‌یابد (۰/۵۱ و ۰/۶۹ به ترتیب برای عمق‌های ۳۰-۲۰ و ۴۰-۳۰ سانتی‌متری) این نتایج وجود عمق بحرانی در عمق ۲۰ سانتی‌متری خاک را تأیید می‌کند.

به عنوان نتیجه کلی می توان گفت که کاوشگر مجهز به تیغه های چندگانه نسبت به کاوشگر تک تیغه ای دارای مزایای بیشتری نظیر ایجاد آشفته گی کم در خاک، ارائه الگوی گسیختگی یکسان با نفوذسنج مخروطی در عمق های بیشتر، همبستگی بیشتر با شاخص مخروطی، نوسانات کمتر اندازه گیری و پراکندگی داده ها، حتی کمتر از شاخص مخروطی به دلیل خودکار بودن اندازه گیری های آن و حذف پارامتر خطای کاربر می باشد. و می توان از آن در مقیاس های بزرگ مزرعه ای برای تشخیص تغییر پذیری فشردگی خاک استفاده کرد. بکارگیری کاوشگر تک تیغه ای تنها در عمق های بیشتر از عمق بحرانی توصیه می شود.

منابع

1. Abbaspour-Gilandeh, Y. 2009. On-the-go soil mechanical strength measurement at different soil depth. International Journal of Food, Agriculture & Environment (JFAE), 7(3&4):696-699.
2. Adamchuk, V.I., Morgan, M.T., Sumali, H. 2001. Application of a strain gauge array to estimate soil mechanical impedance on-the-go. Transactions of ASAE. 44(6): 1377-1383.
3. Adamchuk, V.I., Sudduth, K.A., Ingram, T.J., Chung, S. 2006. Comparison of Two Alternative Methods to Map Soil Mechanical Resistance On-the-Go. ASABE Meeting Presentation No. 061057.
4. Ahani, M., Abbaspour-gilandeh, Y., Askari Asli-Ardeh, E., and Rasooli Sharabiani, V. 2009. Design and performance of a tractor-mounted soil cone penetrometer with multiple-adjustable-probe. International Agricultural Engineering Conference, Bangkok, Thailand, 7-10 December, 2009.
5. Alihamsiah, T., Humphries, E.G., Bowers, C.G. 1990. A technique for horizontal measurement of soil mechanical impedance. Transactions of the ASAE. 33(1): 73-77.
6. Alihamsiah, T., Humphries, E.G. 1991. On-the-go soil mechanical impedance measurements. In Proceedings of the 1991 Symposium: Automated Agriculture for the 21st century, 16-17 December, 300-306. Chicago, IL, St. Joseph, Mich.: ASAE.
7. Andrade, P., Rosa, U., Upadhyaya, S.K., Jenkins, B.M., Aguera, J., Josiah, M. 2001. Soil profile force measurements using an instrumented tine. ASAE Paper No. 01-1060. St. Joseph, Mich.: ASAE.
8. Andrade, P., Upadhyaya, S.K., Aguera-Vega, J., Jenkins, B. 2004. Evaluation of a capacitance-based soil moisture sensor for real-time applications. Transactions. of the ASAE. (in press).
9. ASAE Standards, 52th Edition. 2005. S313.2. Soil cone penetrometer. St. Joseph, Michigan: ASAE.
10. Chancellor, W.J. 1977. Compaction of soil by agricultural equipment. Bulletin 1881. Division of agricultural sciences. University of California.
11. Chukwu, E.C., Bowers, G. 1997. Instantaneous multiple depth soil mechanical impedance sensing from a moving vehicle. ASAE Paper No. 97-1077. St. Joseph, Mich.: ASAE.
12. Chukwu, C.G., Bowers, Jr. 2005. Instantaneous multiple-depth soil mechanical impedance sensing from a moving vehicle. ASAE Paper No. 971077.
13. Chung, S.O., Sudduth, K.A., Hummel, J.W. 2003a. On-the-go soil strength profile sensor using a load cell Array. ASAE meeting presentation No. 031071.
14. Chung, S.O., Sudduth, K.A. 2003b. Modeling soil failure caused by prismatic and conical tools. ASAE Paper No. 03-1028. St. Joseph, Mich.: ASAE.

15. Chung, S.O., Sudduth, K.A., Hummel, J.W. 2006. Design and validation of an on-the-go soil strength profile sensor. *American Society of Agricultural and Biological Engineering*. 49(1): 5-14.
16. Clark, R.L. 1999. Soil strength variability within fields. In: *Precision Agriculture '99: Papers Presented at the 2nd European Conference on Precision Agriculture*, edited by J. V. Stafford (Sheffield Academic Press, Sheffield, UK), pp. 201–210.
17. Gorucu, S., Khalilian, A., Han, Y.J., Dodd, R.B., Keskin, M. 2001. Variable depth tillage based on geo-referenced soil compaction data in coastal plain region of South Carolina. Presented at the 2001 ASAE Annual International Meeting, Paper No.01-1016, American Society of Agricultural Engineers. 2950 Niles Road, St. Joseph, MI 49085-9659, USA.
18. Hadas, A., Wolf, D., Rawitz, E. 1986. Prediction of draft requirement–Soil compaction relations in tilling moist soils. *Soil Till. Res.*, 8(1): 51-64.
19. Hanquet, B., Sirjacobs, D., Destain, M.F. 2004. Analysis of soil Variability measured with a soil strength sensor. *Precision Agriculture*. 5, 227-246.
20. Hemmat, A., Adamchuk, V.I., 2008. Sensor systems for measuring spatial variation in soil compaction: review and analysis. *Comput. Electron. Agric.* 63, 89–103.
21. Manor, G., Clark, R.L. 2001. Development of an instrumented subsoiler to map soil hardpans and real-time control for subsoil depth. ASAE Paper No. 011022. St. Joseph, Mich.: ASAE.
22. Mouazen, A.M., Ramon, H. 2002. A numerical-statistical hybrid modeling scheme for evaluation of draught requirements of a subsoiler cutting a sandy loam soil, as affected by moisture content, bulk density and depth. *Soil Till. Res.*, 63(4): 155-165.
23. Siefkin, R.J., Adamchuk, V.I., Eisenhauer, D.E., Bashford, L.L. 2005. Mapping soil mechanical resistance with a multiple blade system. ASAE Paper. Vol. 21(1): 15-23.
24. Sirjacobs, D., Hanquet, B., Lebeau, F., Destain, M.F. 2002. On-line soil mechanical resistance mapping and correlation with soil physical properties for precision agriculture. *Soil Till. Res.*, 64(3-4): 231-242.
25. Voorhees, W.B., Farrell, D.A., Larson, W.E. 1975. Soil strength and aeration effects on root elongation. *Proceedings Soil Science Society of America* 39: 948-953.

Abstract

The aim of this study was performance evaluation and comparison of two prototypes of horizontal on-the-go soil mechanical resistance measurement system. Two measurement systems compared in this study include: 1- A vertical blade equipped by four miniature loadcells with a 10cm intervals on the blade, 2- A multiple blade system with four shanks equipped by measuring instruments and octagonal ring transducer. The data obtained from the sensors were compared to a tractor-mounted penetrometer data. The failure mode produced by two sensors and data fluctuations of those was compared too. Results showed that multiple blade system had more advantage than single blade system as lower soil disturbance, similar failure mode and more correlations to cone penetrometer in the more depths and lower fluctuations of measurements resulting can be used in the large scale for assessment of variability of soil compaction.

Keyword: soil compaction, horizontally soil mechanical resistance measuring system, single-blade sensor, multiple-blade sensor, cone penetrometer.