مروری بر روش‌های اندازه‌گیری توسعه داده شده به‌منظور اندازه‌گیری مزرعه‌ای مقاومت مکانیکی خاک

فاطمه رحیمی اجدادی[۱]، یوسف عباسپور گیلانده[۲] و عزت‌اله عسکری اصلی اردهٔ[۲]

۱ و ۲- به ترتیب **دانشجوی کارشناسی‌ارشد و استادیار گروه مهندسی ماشینهای کشاورزی، دانشگاه محقق اردبیلی، اردبیل، ایران.**

rahimi _a61@yahoo.com

چکیده

یکی از خصوصیات مهمّ خاک که در رابطه بین خاک و گیاه و همچنین در مطالعه اثر متقابل خاک- ماشین مطرح می‌باشد، استحکام خاک یا به عبارتی مقاومت مکانیکی خاک می‌باشد. روش معمول اندازه‌گیری مزرعه‌ای مقاومت مکانیکی که در دهه‌های اخیرمقبولیت بیشتری بین محققان داشته است، بکارگیری نفوذسنج مخروطی می‌باشد و اندازه‌گیری‌های آن بصورت ایستگاهی است که نیازمند صرف وقت و نیروی اپراتوری بالایی می‌باشد. بخصوص در تهیه نقشه‌های مقاومت مکانیکی که در کشاورزی دقیق بکار می‌رود روش کاربردی نخواهد بود. انگیزه غلبه بر محدودیت‌های استفاده از نفوذسنج-های مخروطی دستی از یک‌طرف و توسعه سنسورهای الکترونیکی در سال‌های اخیر از طرف دیگر، باعث گردید رویکردهای اخیر در این زمینه بیشتر به سمت روش‌های در حال حرکت و پیوسته اندازه‌گیری مقاومت مکانیکی خاک منعطف گردد. در این مقاله سعی گردیده است، روند و چگونگی تکامل این فرآیند تا حال حاضر مورد بررسی قرار گیرد.

کلیدواژه: مروری بر روش‌ها، مقاومت مکانیکی خاک، نفوذسنج دستی، نفوذسنج تراکتوری، سنسورهای الکترونیکی

مقدمه

یکی از خصوصیات مهمّ خاک که در بحث رابطه بین خاک و گیاه و همچنین در مطالعه اثر متقابل خاک- ماشین مطرح می-باشد، استحکام خاک[۱] یا به عبارت دیگر مقاومت مکانیکی خاک می‌باشد. مقاومت مکانیکی خاک به‌صورت مقاومت در برابر تغییر شکل خاک توصیف می‌گردد. مقاومت مکانیکی خاک نقش مهمی را در رشد و توسعه ریشه گیاه ایفا می‌کند. زیرا اگر مقاومت خاک[۲] خیلی کم باشد گیاه نمی‌تواند ایستادگی خود را حفظ کند، چون ساختار ضعیف خاک قادر به مهار گیاه نمی‌باشد. از طرف دیگر زمانی‌که مقاومت خاک خیلی زیاد باشد، ریشه گیاه نمی‌تواند در داخل خاک نفوذ کند. عوامل بسیار زیادی مقاومت مکانیکی خاک را تحت تأثیر قرار می‌دهند که از جمله آن‌ها می‌توان به پدیده خشک شدن و فشردگی خاک‌های زراعی اشاره کرد.

1- Soil strength
2- Soil strength impedance

فشردگی خاک از مسائل و مشکلات جدّی بسیاری از خاک‌ها در نقاط مختلف دنیا می‌باشد. در بسیاری از این مناطق که عامل اصلی در جلوگیری از رشد مؤثر ریشه محصول فشردگی خاک تشخیص داده شده است، خاک دارای سخت‌لایه یا لایه فشرده شده‌ای می‌باشد، که این لایه دارای خصوصیات فیزیکی و شیمیایی متفاوتی از لایه بالایی و پایینی خود است. تشخیص و از بین بردن این لایه که معمولاً دارای مقاومت مکانیکی بالایی می‌باشد، تحقیقات زیادی را به خود اختصاص داده است. همچنین تحقیقات بسیار زیادی وجود دارد که روی یافتن مقادیر مقاومتی خاک که از رشد ریشه گیاه و نفوذ آن در داخل خاک جلوگیری می‌کنند، متمرکز شده است (Abbaspour-Gilandeh, 2009).

بر اساس یک طبقه‌بندی کلی روش‌های اندازه‌گیری مقاومت مکانیکی به دو بخش آزمایشگاهی و مزرعه‌ای تقسیم‌بندی می‌گردد. معمولاً روش مزرعه‌ای با وجود محدودیت در تعداد پارامترهای قابل اندازه‌گیری، به‌دلیل حذف احتمال بهم‌خوردگی خاک هنگام نمونه‌برداری و انتقال به آزمایشگاه ترجیح داده‌می‌شود.

روش‌های آزمایشگاهی تعیین استحکام خاک شامل آزمایش برش مستقیم[3] و آزمایش سه محوری[4] می‌باشد. آزمایش برش مستقیم علیرغم اینکه، نقایصی مانند عدم یکنواختی توزیع تنش برشی در سطح برش نمونه را داراست، برای خاک‌های خشک و اشباع، ساده‌ترین روش محسوب می‌شود. آزمایش سه محوری خاک بهترین تقریب برای حالت تنش‌های سه بعدی وارد بر نمونه خاک می‌باشد، زیرا از یک‌طرف اگر خاک یک محیط ایزوتروپ فرض شود، در هنگام اعمال نیروی قائم وارد بر سطح خاک، یک تنش همه جانبه از اطراف به المان کوچک فرضی درآن وارد می‌گردد، که مشابه شرایط آزمون سه محوری است و از طرف دیگر می‌توان در حین آزمایش کنترل مناسبی روی مقدار تنش‌ها و نیز آب درون نمونه داشت. از محدودیت‌های این روش مشکل جمع‌آوری استوانه‌های هم‌شکل در ارتفاعی مساوی با ضخامت لایه‌های شخم خورده است (Guerif,1994).

آزمایش‌های مزرعه‌ای سریع‌تر و ارزان‌تر بوده و انتقال و جابجایی نمونه‌ها به آزمایشگاه نیاز نمی‌باشد. در آزمایش‌های مزرعه‌ای امکان کنترل روی نمونه خاک کم‌تر می‌باشد و مانند تست سه محوری خاک نمی‌توان خروج آب و تنش‌های جانبی را در حین آزمایش کنترل کرد.

شش روش مزرعه‌ای در تعیین استحکام خاک وجود دارد که عبارتند از:

۱- صفحه برش حلقوی ۲- صفحه برش مستطیلی ۳- رسام برش ٤- پره برش ٥- نفوذسنج مخروطی ٦- نفوذسنج جیبی

در بین روش‌های مزرعه‌ای، استفاده از نفوذسنج مخروطی دارای مقبولیت زیادی در بین محققان در سراسر دنیا قرار گرفته و به عنوان یک روش پایه و استاندارد در اندازه‌گیری‌های فشردگی خاک مورد پذیرش واقع گردیده است. از آنجا که ثابت نگه داشتن سرعت نفوذ در نفوذسنج‌های دستی کار بسیار مشکلی بود، بنابراین برای رفع این مشکل، کاهش نیروی انسانی و همچنین ثبت دقیق داده‌ها نفوذسنج‌های ثبات تراکتوری با مکانیزم‌های مخصوص توسعه داده شدند. مطالعه (Wilford *et al.*, 1972) را می‌توان شروع طراحی و ساخت این نسل از نفوذسنج‌ها دانست. با این وجود چون این قبیل اندازه‌گیری‌ها بصورت ایستگاهی و از طریق انجام اندازه‌گیری‌های متعدد در سطح یک مزرعه انجام می‌گرفت، وقت‌گیری و

[3] - Direct cutting test
[4]- Three axial test

خسته کننده بودن این روش از یک سو و گسترش انواع حسگرهای الکترونیکی از سوی دیگر، بتدریج انگیزه توسعه سیستم‌های در حال حرکت را که از حسگرهای نیرو برای اندازه‌گیری‌های مقاومت مکانیکی خاک بهره می‌برند، شکل داد.
هدف از این مطالعه مروری بر روش‌های بکار گرفته شده به‌منظور اندازه‌گیری مزرعه‌ای استحکام خاک و یا به عبارت دیگر مقاومت مکانیکی خاک و همچنین پیشرفت‌های انجام شده در این حوزه تا به حال می‌باشد.

۲- معیارها و روشهای تشخیص و اندازه‌گیری فشردگی خاک

با رجوع به تعاریفی که در مورد فشردگی بکار می‌رود مشخص است که بسیاری از آنها، به چگالی ظاهری می‌پردازند. بر این اساس محققان بسیاری در اندازه‌گیری فشردگی خاک از اندازه‌گیری چگالی ظاهری استفاده کرده‌اند (Kamgar and Minaei, 2001; Chorom and Sadeghzade, 2005; Javadi and Spoor, 2006)، امّا اندازه‌گیری چگالی ظاهری همیشه بهترین توجیه برای تغییرات فشردگی نیست. دکستر (Dexter, 1997) پیشنهاد کرد سیستمی که در آن از اندازه‌گیری فضا-های خالی برای مدل کردن رفتار خاک در رابطه با تراکم استفاده می‌شود، دارای مبنای محکم‌تری نسبت به اندازه‌گیری‌های مستقیم چگالی است. نظر او با (Hakansson and Lipiec,2000) مطابقت داشت که درتحقیقشان به محدودیّت استفاده از مقادیر مطلق چگالی ظاهری اشاره کرده بودند و پیشنهاد سیستم چگالی نسبی را دادند که درجه فشردگی با کمیّت جدیدی که برابر با درصد چگالی ظاهری واقعی به چگالی ظاهری مرجع که برای خاک مشابه با آزمایشات تک‌محوری استاندارد در تنش ۲۰۰ kPa بدست می‌آید، تعریف می‌شد. دکستر (Dexter, 2004) شاخص‌های کیفی فیزیکی خاک را تحلیل کرد و از کمیتی برابر با شیب منحنی نگهداری آب خاک، در نقطه انحنای آن استفاده کرد. او نشان داد این کمیت که به عنوان پارامتر S معرفی شده است، با ریز ساختار خاک در ارتباط است و بهتر از چگالی ظاهری به عنوان شاخص ساختاری عمل می‌کند. اکثر تحقیقات تجربی در زمینه فشردگی خاک بر مبنای اندازه‌گیری مواد، حالت و خواص رفتاری است که با هدف یافتن رابطه بین ورودی‌های مکانیکی و پاسخ خاک صورت می‌گیرند.
معیارها و روش‌های مختلفی به‌منظور مشخص نمودن فشردگی خاک در داخل یک خاک زراعی وجود دارد و محقّقان مختلف، شاخص‌ها و روش‌های متفاوتی را برای این‌کار ارائه کرده‌اند که از آن جمله می‌توان به شاخص رنگ خاک(تشخیص فشردگی از طریق مشاهده)، اندازه‌گیری جرم مخصوص ظاهری، رادارهای نفوذ کننده در داخل زمین و اندازه‌گیری شاخص مخروطی خاک اشاره کرد (Raper et al.,1990؛ Upadhyaya et al.,1994). با این وجود اکثر تحقیقاتی که در این زمینه انجام گرفته است، بر روی روش ثبت و ذخیره داده‌ها متمرکز شده‌اند و می‌توان آنها را در دو محور زیر مورد بررسی قرار داد:
۱- استفاده از روش‌های ایستایی(نفوذسنج دستی و نفوذسنج تراکتوری).
۲- استفاده از روش‌های در حال حرکت.
در ادامه به تحقیقاتی که در این زمینه انجام گرفته است، به اختصار اشاره می‌گردد.

۳- روشهای اندازه‌گیری مقاومت مکانیکی خاک

۳-۱- روش ایستگاهی به منظور اندازه‌گیری مقاومت مکانیکی خاک

ایده استفاده از میله فرو رونده در خاک جهت اندازه‌گیری مقاومت به نفوذ خاک مدت‌ها در بین محققان مطرح بوده است اسناد و مدارک دقیقی از تاریخچه بکارگیری چنین روش‌هایی در دست نیست اما طبق گزارشات استفاده از این وسیله در جهان به سال ۱۸٤٦ مربوط می‌گردد (Perumpral, 1987). اولین بار Kalin در سال (۱۸٤٦)، یک نفوذسنج سوزنی به قطر ۱ میلی‌متر و وزن یک کیلوگرم را به منظور اندازه‌گیری استحکام خاک به کار برد. (Terzaghi,1929) به‌گونه‌ای پیوسته تغییرات مقاومت استاتیکی ماسه را در برابر نفوذ عمودی یک مخروط اندازه‌گیری کرد (Boise man,1929). در هلند نفوذ استاتیکی یک مخروط درون یک لایه‌ی ماسه‌ای را بدون استفاده از حفاری تحت فشار آب، مورد بررسی قرار گرفت (طباطبایی، ۱۳۷۲). در سال ۱۹۳۱، نفوذسنج جیبی با نوک مخروطی به قطر ۱۵ میلی‌متر و زاویه‌ی راس ٦۰ درجه، در راه-آهن دانمارک مورد استفاده قرار گرفت. این نفوذسنج، به‌منظور ارزیابی چسبندگی خاک و فشار تحمل مجاز خاک، توسعه یافته بود (Perumpral, 1987). در ایستگاه تحقیقاتی (Waterwayes, 1948) انجمن مهندسین آمریکا، یک نفوذسنج مخروطی دستی برای ارزیابی پارامترهای موثر بر ترددپذیری خاک‌ها طراحی شد که حداکثر عمق نفوذ آن ۱۵ سانتی‌متر بود. (Carter, 1967) از یک سیم منقبض شده برای نشان دادن عمق استفاده کرد. همچنین او در سال ۱۹٦۹ نفوذسنج کاملی را برای به‌دست آوردن متوسط استحکام خاک معرفی کرد. این دستگاه مجهز به مبدل نیرو، آمپلی فایر عملیاتی و یک مولد سیگنال جهت ثبت دایمی داده‌ها بود. در سال ۱۹۷۰، مرکز آزمون خاک آمریکا یک نفوذ سنج به طول ۱۵ سانتی متر و مخروط با قطر ۱/۹ سانتی متر به‌منظور تعیین استحکام خاک طراحی کرد. (Prather *et al.*,1970) نفوذسنج سبکی را ارایه کردند که توسط یک نفر به‌کار گرفته می‌شد و قابلیت ثبت پیوسته داده‌های مقاومت نفوذ را در مقابل عمق فراهم می‌کرد. پرومپال و فیلیپس نفوذسنج‌های معمولی را اصلاح کردند (Perumpral and Philips,1983).

نفوذسنج به شکلی که امروزه متداول است از سال ۱۹۳٤ مورد استفاده قرار گرفت. طبق استاندارد ASAE، شاخص استحکام خاک بر مبنای داده‌های نفوذسنج مخروطی که همان شاخص مخروطی (CI) است، به عنوان نیروی موردنیاز برای هل دادن یک مخروط در داخل خاک تقسیم بر مساحت قاعده مخروط در گام‌های کوچک معین در خاک، تعریف و بر حسب کیلوپاسکال یا مگاپاسکال بیان می‌گردد (ASAE Standard, 2000 a & b).

ثابت نگه داشتن سرعت نفوذ در نفوذسنج‌های دستی کار بسیار مشکلی بود. بنابراین برای ثابت نگه‌داشتن سرعت نفوذ و کاهش نیروی انسانی و همچنین ثبت دقیق داده‌ها، نفوذسنج‌های ثبات تراکتوری با مکانیزم‌های مخصوص توسعه داده شدند (Wilford *et al.*,1972). نفوذسنج تراکتوری را که در آن برای فشار میله نفوذ از سیلندر هیدرولیکی استفاده می‌شد، برای آزمایش‌های نفوذ ارایه کردند. در این دستگاه از یک مبدل نوع تیری برای اندازه‌گیری فشار نفوذ و از یک پتانسیومتر برای اندازه‌گیری عمق نفوذ استفاده می‌شد و مقادیر نیرو در عمق توسط یک x-y recorder به‌صورت نمودار ترسیم می‌گردید. نفوذسنج مشابهی توسط (Smith and Dumas,1978) برای ارزیابی استحکام خاک طراحی گردید. ویلکرسون *et al.*, (Wilkerson 1982) یک دستگاه نفوذسنج تراکتوری طراحی کردند که از یک واحد میکرو کامپیوتری برای فعال کردن تمام مکانیزم‌های حرکتی و ثبت خودکار داده‌ها بر روی نوار مغناطیسی استفاده می‌کرد. سیستم هیدرولیکی برای فشار میله نفوذ به داخل خاک به‌کار می‌رفت، مبدل نیرو از نوع تیری بود و از پتانسیومتر برای اندازه‌گیری عمق نفوذ استفاده می‌شد. نفوذسنج های تراکتوری مشابهی توسط (Hooks and Jansen,1986) رونقی (۱۳۷٤) و (Raper *et al.*,1999) طراحی و ساخته شد. طباطبایی کلور و علیمردانی(۲۰۰۸) در تحقیقی به مقایسه و ارزیابی شاخص مخروطی- عمق برای نفوذسنج-های مخروطی دستی و تراکتوری پرداختند. در هر دو سیستم از یک مبدل میله‌ای و یک حسگر فوتوسل که به ترتیب برای

اندازه‌گیری مقاومت مکانیکی و عمق بکار می‌رفت، استفاده شد. بر اساس نتایج آزمون t اختلاف معنی‌داری بین شاخص مخروطی دو سیستم در سطح احتمال ۵٪ وجود نداشت. به این ترتیب با توجه به مزایای روش تراکتوری پیشنهاد گردید که در تحقیقات از نفوذسنج‌های مخروطی پشت تراکتوری استفاده شود. آهنی و همکاران (۱۳۸۷) اقدام به طراحی و ساخت یک دستگاه نفوذسنج تراکتوری نمودند. دستگاه نفوذسنج مجهز به میله‌های چندگانه از سه بخشِ مکانیکی، هیدرولیکی و الکترونیکی تشکیل شده و قادر بود پارامتر استحکامی خاک را تا عمق ٤٥ سانتی‌متر اندازه‌گیری نماید. به‌منظور حرکت میله‌های نفوذ به درون خاک از سیستم محرک هیدرولیکی استفاده شد. توسط یک دیتالاگر، اطلاعات به‌دست آمده از حسگرهای عمق نفوذ و نیرو، جمع‌آوری شده و با انتقال داده‌ها به کامپیوتر متصل به آن، نمودار شاخص مخروطی نسبت به عمق به‌دست می آمد. شکل ۱ نفوذسنج پشت تراکتوری طراحی و ساخته شده توسط آهنی و همکاران را که مجهز به میله‌های نفوذ قابل تنظیم می‌باشد، نشان می‌دهد (Ahani *et al.*, 2009).

شکل ۱- دستگاه نفوذسنج پشت تراکتوری مجهز به میله‌های چندگانه قابل تنظیم

۳-۲- روش پیوسته اندازه‌گیری مقاومت مکانیکی خاک

طیّ سالیان متمادی استفاده از نفوذسنج‌های مخروطی یکی از معمول‌ترین روش‌های اندازه‌گیری مقاومت مکانیکی خاک بود. استفاده از این وسیله که روشی ایستگاهی برای اندازه‌گیری مقاومت خاک محسوب می‌شود، کاری دشوار، زمان‌بر و خسته‌کننده می‌باشد. با توجه به سختی نقشه‌برداری مقاومت مکانیکی خاک با استفاده از یک نفوذسنج مخروطی استاندارد (ASAE Standard, 2005) و سختی کاربری آن، برای سازندگان حسگر، انگیزه‌ای برای بررسی بیشتر تکنولوژی‌های در حال حرکت، ایجاد شد. 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 مؤثّر در مقیاس بزرگ نباشد (Clark,1999). نقشه‌برداری در حال حرکت از مقاومت مکانیکی خاک می‌تواند از طریق ثبت پیوسته داده-های مکانی[5] یک حسگر که سطح مزرعه را می‌پیماید، انجام پذیرد (Adamchuk *et al.*, 2006). این اندازه‌گیری‌ها

[5] - Georeference data

بطور خاص هر نیرویی را که درجلوی پیشانی وسیله قرار می‌گیرد، نشان می‌دهند و مستلزم این است که جزء درگیر با خاک در سرتاسر خاک بطور متوسط در یک عمق خاص حرکت کند (Andrade *et al.*, 2004; Siefkin *et al.*, 2005; Chung *et al.*, 2006). اندازه‌گیری پیوسته مقاومت مکانیکی خاک در واقع از آنالیز نیروهای عکس‌العمل خاک که بر یک ابزار خاک‌ورز وارد می‌شوند، امکان‌پذیر می‌گردد. بر این اساس مطالعاتی برای توسعه چنین روش‌هایی توسعه داده شد.

(Mayauskas, 1958) یکی از محققان بسیار پیشرو در این زمینه است. وی یک خیش گاوآهن با ۱۲ مبدل فشاری برای مطالعه توزیع تنش‌ها روی سطح آن ساخت. او از طریق اندازه‌گیری‌های مخزن خاک نشان داد که تنش‌ها در نوک تیغه متمرکز شده‌اند. همچنین توزیع فشار روی تیغه در ۱۳ قسمت مختلف از یک نقطه به نقطه دیگر بسیار متفاوت بود. فشارها در عمق‌های بالاتر، بیشتر بودند و با نزدیک شدن به انتهای تیغه بیشتر می‌شدند. در دستگاه‌های ساخته شده دیگر مجموعه-ای از مبدل‌های نیرو وجود داشتند که مستقیماً به اجزای برشی متصل به بازو اتصال داشتند.

یک دستگاه چیزل با لبه‌های برش گوه‌ای و با استفاده از مجموعه‌ای از کرنش‌سنج‌های متصل به تیغه بوسیله (Glancey et al,1989 & 1996) ساخته شد. سیستم اندازه‌گیری استفاده‌شده بوسیله (Stafford and Hendrich, 1988) از تیغه‌های باریکی برای قرارگیری در عمق سخت‌لایه استفاده می‌کرد و اساس کار آن بر ثبت عکس‌العمل‌های افقی و عمودی نیروی برشی خاک و تغییرات پیوسته عمق عملیات بود.

دستگاه (Sirjacobs *et al.*, 2002) شامل تیغه نازکی بود که در عمق و سرعت ثابت درون خاک کشیده می‌شد و بوسیله میله‌ای نیروهای خاک- تیغه را به مبدلی که روی دستگاه ثابت شده‌بود، انتقال می‌داد. مبدل بکار گرفته شده، یک رینگ هشت وجهی مجهز به کرنش‌سنج برای اندازه‌گیری نیروی کششی(Fx)، نیروی عمودی(Fz) و گشتاور(My) می‌باشد. طرح این رینگ کرنش‌سنج بر مبنای کار (Godwin , 1975) قرار داشت. مطالعه مشابهی توسط (Hanquet *et al*, 2004) انجام گرفت.

آدامچاک و همکاران (Alihamsiah *et al.*, 1990) و علی همسیاه و هامفریز (Alihamsiah and Humphries, 1991) یک نفوذسنج افقی در حال حرکت ساختند وآن را از نظر هندسه ابزار مورد بررسی قرار دادند. آنها نتیجه گرفتند استفاده از نوک منشوری افقی نسبت به نوک مخروطی افقی داده‌های مناسب‌تر و نزدیک‌تری را با نفوذسنج مخروطی استاندارد عمودی ارائه می‌کند. قابل قبول بودن داده‌های نفوذسنج منشوری بر این استدلال استوار بود که نوک نفوذسنج مقاومت مکانیکی خاک را فقط در جهات جانبی اندازه‌گیری می‌کند، در حالی‌که نفوذسنج مخروطی بطور شعاعی در تمام جهات بارگذاری می‌شود. (Chukwu and Bowers, 1997 &2005) نفوذسنج افقی را که توسط (Alihamsiah *et al.*, 1990) ساخته شده بود، اصلاح کردند. به‌طوری که می‌توانست مقاومت مکانیکی خاک را در سه عمق بطور هم‌زمان اندازه بگیرد.

(Adamchuk *et al.*, 2001) یک تیغه عمودی با چهار کرنش‌سنج نصب شده بر روی آن را برای نقشه‌برداری از تغییرات ویژه مقاومت مکانیکی خاک استفاده کردند. 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. سیستم دیگری توسط (Andrade *et al.*, 2001) توسعه داده شد که ایراد آن کم بودن نیروی حس شده توسط حسگر به دلیل برهم کنش بین لبه های برش مجزا بود. حسگر پروفیل استحکام خاک در حال حرکت ساخته شده توسط (Chung *et al*, 2003) دارای نوک‌های منشوری مستقر بر یک تیغه اصلی بود و به‌منظور کم کردن اثرات تیغه اصلی و منشورهای مجاور از لبه تیغه فاصله داشت.

(Siefkin *et al.*, 2005) نقشه مقاومت مکانیکی خاک را با استفاده از سیستم تیغه چندتایی در سه عمق تهیه کردند. انـدازه-گیری‌های بدست آمده با تیغه‌های چندتایی دارای واریانس کمتری نسبت به نفوذسنج مخروطی بود.

بکارگیری بازوهایی که به‌منظور اندازه‌گیری نیروی افقی خاک در یک عمق یا عمق‌های مختلف از آرایشی از کرنش‌سنج‌هـا روی بازوها استفاده می‌کنند، بوسیله چندین گروه تحقیقاتی دیگر نیز مـورد مطالعـه قـرار گرفتـه اسـت (Lui *et al*, 1996؛ Manor and Clark, 2001؛ Mouazen and Ramon, 2002؛ Sirjacobs *et al*, 2002 ; نیکبخت و همکـاران ۱۳۸۵; معمـار دستجردی، ۱۳۸۳).

خادمی و همکاران (۲۰۰۱)، برنامه‌ای برای تهیه نقشه فشردگی خاک که در کشاورزی دقیق بکار گرفته می‌شد نوشـتند. ایـن برنامه که با استفاده از زبان برنامه‌نویسی C^{++} در ۲۰۰۰ خط نوشته شده بود با روش شبیه‌سازی مورد ارزیـابی قـرار گرفـت. برای آزمون این برنامه از یک مبدل هیدروالکترونیکی استفاده شد. با تحریک مبدل سیگنال‌های خروجی آن به برنامه‌ای کـه روی یک PC پنتیوم بود، فرستاده می‌شد. نقشه فشردگی بصورت on-line در طول کار مبدل قابل مشاهده بود. با توجـه بـه امکانات این نرم‌افزار به‌نظر می‌رسید بتوان از آن به عنوان یک سیستم اطلاعات جغرافیایی استفاده نمود.

خلیلیان و همکاران (۲۰۰۲) از یک تیغه مجهز به حسگر نیرو در لایه ٤٥ سانتی‌متری سطح خاک برای اندازه‌گیری مقاومـت مکانیکی خاک استفاده کردند. همچنین آنها سیستم کنترل عمق مجهز به سیستم موقعیت‌سنج جهـانی تفاضـلی را بـه‌منظـور کنترل عمق خاک‌ورزی در این تحقیق مورد استفاده قرار دادند.

همت و همکاران (۲۰۰۹) تحقیقی بر روی تأثیر گسیختگی ایجاد شده توسط یک نفوذسنج تک تیغه‌ای افقـی بـرای انـدازه-گیری مقاومت خاک، انجام دادند . در این تحقیق از یک نفوذسنج تک‌تیغه‌ای که دارای نوک منشوری با قاعده ۳۲٤ میلی‌متر مربع بود، استفاده شد. نوک منشوری بطور افقی روی یک بارسنج S شکل که درون بازو قرار داشت نصب شده بـود. نتـایج نشان داد که متوسط مقدار شاخص مخروطی در عمق‌های ۲۰ و ۲۵ سانتی‌متری به جهت گسـیختگی تـرد در هـر دو مـورد یکسان بود. در صورتی‌که هنگام کار تیغه در عمق زیر عمق بحرانی(۳۰ سانتی‌متر) مقدار HRI (شاخص مقاومت افقی) سـه برابر مقادیر مربوط به عمق‌های ۲۲ و ۲۵ 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 وجود خیزهای موجود در سیگنال را به تحت تأثیر قرار گرفتن نوک تیغه بوسـیله کلوخـه‌هـا مربـوط دانسـتند و اظهـار داشتند، شکل گسیختگی در بالای عمق بحرانی ازنوع گسیختگی ترد و در زیر آن از نوع گسـیختگی تحمـل‌پـذیر(فشـاری) می‌باشد. در حالی‌که شکل گسیختگی خاک در جلوی یک نفوذسنج مخروطی که بصورت عمودی کار مـی‌کنـد، همیشـه از نوع تحمل‌پذیر می‌باشد که این امر با نتایج (Chung *et al.*, 2006) مطابقت داشت.

عباسپور گیلانده (۲۰۰۹) یک دستگاه اندازه‌گیری مقاومت مکانیکی خاک در حال حرکت ساخت که متشکل از چهـار بـازو بود و داده‌های مقاومت مکانیکی خاک را به ترتیب در چهار عمق ۱۰ تا ٤۰ سـانتی‌متـری برداشـت مـی کـرد. اسـاس کـار اندازه‌گیری نیروی مقاومت خاک در برابر حرکت گوه‌ای در داخل خاک بود که این نیرو از طریق یک مبدل هشـت وجهـی نیرو اندازه‌گیری می‌شد (شکل ۲). آزمایشات مزرعه‌ای اولیه نشانگر کاربرد موفقیت‌آمیز این سیستم در اندازه‌گیری مقاومـت مکانیکی خاک بود.

در تحقیقی رحیمی اجدادی و همکاران (۱۳۸۷) به طراحی و ساخت یک دستگاه اندازه‌گیری پیوسته مقاومت مکانیکی خاک پرداختند که با استفاده از چهار لودسل مینیاتوری بر روی یک تیغه، که در فواصل ۱۰ سانتی‌متری از هم قرار داشـتند، قـادر

به برداشت داده‌های مقاومت مکانیکی خاک در چهار عمق از ۰ تا ٤٠ سانتی‌متری بود (شکل ۳). ارزیابی داده‌های به‌دست آمده از این حسگر با داده‌های حاصل از نفوذسنج مخروطی استانداردنشان‌دهنده همبستگی خوبی بین مقادیر مقاومت مکانیکی اندازه‌گیری شده توسط این حسگر و شاخص مخروطی بود (رحیمی اجدادی و همکاران،۱۳۸۹). دستگاه مزبور ضمن تحقیقی با دستگاه ساخته شده توسط عباسپور گیلانده (۲۰۰۹) که در آن برای اندازه‌گیری مقاومت مکانیکی در هر عمق از تیغه‌ای مجزا مجهز به کرنش‌سنج و رینگ هشت وجهی استفاده می‌گردید مقایسه شد. نتایج حاکی از آن بود که کاوشگر مجهز به تیغه‌های چندگانه نسبت به کاوشگر تک تیغه‌ای دارای مزایای بیشتری نظیر ایجاد آشفتگی کم در خاک، ارائه الگوی گسیختگی یکسان با نفوذسنج مخروطی در عمق‌های بیشتر، همبستگی بیشتر با شاخص مخروطی، نوسانات کمتر اندازه‌گیری و پراکندگی داده‌ها، حتی کمتر از شاخص مخروطی به دلیل خودکار بودن اندازه‌گیری‌های آن و حذف پارامتر خطای کاربر می‌باشد.

شکل ۲- نمای جانبی از سیستم اندازه‌گیری مجهز به تیغه‌های چندگانه

شکل ۳- دستگاه مقاومت مکانیکی پیوسته تک تیغه‌ای به همراه چرخ تثبیت عمق در حالت حمل و نقل

نتیجه‌گیری وبحث

در میان روش‌های اندازه‌گیری مقاومت مکانیکی توسعه داده شده نفوذسنج‌های مخروطی دارای سطح پذیرش بالاتری نسبت به سایر روش‌ها بوده‌اند. در نتیجه تلاش‌های بعدی در جهت ارتقاء این نفوذسنج‌ها و کاهش یا رفع محدودیت‌های آن‌ها صورت پذیرفته است. بطور کلی می‌توان روش‌های توسعه داده شده براساس نفوذ مخروطی در داخل خاک را در سه گروه دسته‌بندی کرد: ۱- نفوذسنج‌های مخروطی دستی که از سال ۱۹۳٤ به شکل امروزی گسترش یافتند، ۲- نفوذسنج های مخروطی تراکتوری که شروع تحقیقات آن را می‌توان از سال ۱۹۷۲ با مطالعات ویلفرد و همکاران دانست (Wilford *et al.*, 1972). ۳- نفوذسنج‌های مخروطی افقی در حال حرکت که تمرکز فعالیت‌ها در این زمینه را می‌توان از دهه ۱۹۹۰ میلادی به بعد دانست که با توسعه تکنولوژی‌های ساخت سنسور پیشرفت‌های روزافزونی را به خود اختصاص داده است، دانست. به‌نظر می‌رسد برای نیل به هدف نظریه کشاورزی دقیق، برای تهیه نقشه مقاومت مکانیکی مزارع استفاده از روش‌های نفوذسنج مخروطی و نفوذسنج‌های پشت تراکتوری تا حدی نتواند پاسخگوی این مهم باشد و ولی مطالعات بعدی به طور خاص باید بر روی توسعه روش‌های در حال حرکت و بهینه کردن سیستم‌های موجود گسترش یابد. استفاده از روش‌های ایستایی محدود به مطالعات در حد مقیاس کوچک و نمونه‌برداری‌های تحقیقاتی که در آن‌ها اندازه‌گیری مقاومت مکانیکی بطور ضمنی مدنظر است، می‌باشد. شاید بتوان چشم‌انداز آینده توسعه این سیستم‌ها را در گرو پیشرفت‌های به‌وجود آمده در زمینه تکنولوژی‌های جدید الکترونیکی، فراصوتی و پردازش تصویر جستجو کرد.

منابع و مآخذ

۱- آهنی، م. ۱۳۸۷. طراحی، ساخت و ارزیابی نفوذسنج مخروطی پشت تراکتوری مجهز به میله‌های نفوذ چندگانه. پایان نامه کارشناسی ارشد، دانشکده کشاورزی محقق اردبیلی.

۲- رحیمی اجدادی، ف. عباسپور گیلانده، ی. عسکری ارده، ع. شاهقلی، غ. ۱۳۸۷. طراحی سیستم اندازه‌گیری تهیه نقشه پیوسته مقاومت مکانیکی خاک به‌منظور استفاده در خاک‌ورزی دقیق. اولین همایش ملی فناوریهای نوین در کشاورزی و منابع طبیعی، رشت، ایران. صفحه ۱۹۸۴-۱۹۹۱.

۳- رحیمی اجدادی، ف. عباسپور گیلانده، ی. عسکری ارده، ع. شاهقلی، غ. احمدی آرا، ع. ۱۳۸۹. ارزیابی یک حسگر مقاومت مکانیکی پیوسته پروفیل خاک تحت شرایط مزرعه‌ای. چهارمین همایش منطقه ای یافته های پژوهشی کشاورزی غرب کشور، کردستان، ایران. صفحه ۱۶۲۰-۱۶۲۲.

٤- رونقی، م. ۱۳۷٤. طراحی و ساخت دستگاه اندازه گیری فشردگی خاک. پایان‌نامه کارشناسی ارشد، دانشکده کشاورزی تهران.

۵- معمار دستجردی، ر. ۱۳۸۳. طراحی، ساخت و آزمایش حسگر اندازه‌گیری پیوسته مقاومت مکانیکی خاک. پایان نامه کارشناسی ارشد، دانشکده کشاورزی تربیت مدرس.

٦- نیکبخت، ع. مینایی، س. قبادیان، ب. دیزجی، ح. ۱۳۸۵. مطالعه پارامترهای مؤثر بر مقاومت مکانیکی خاک با استفاده از حسگر افقی در انباره خاک. چهارمین کنگره مکانیک ماشینهای کشاورزی، تبریز.

7- 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.

8- 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.
9- 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.
10- Ahani, M. Abbaspour-gilandeh, Y. Askari Asli-Ardeh, E. & 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.
11- 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.
12- 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.
13- Anderson, G. Pidgeon, J.D. Spencer, H.B. & Parks, R. 1980. A new hand - held recording penetrometer for soil studies. J.Soil Sci, 31, 279 pp.
14- 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.
15- Andrade, P. Upadhaya, 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).
16- ASAE Standards 47th Ed. 2000. S313.3 Soil cone penetrometer. St. Joseph, Mich.: ASAE.
17- ASAE Standards, 52th Edition. 2005. S313.2. Soil cone penetrometer. St. Joseph, Michigan: ASAE.
18- Carter, L.M. 1967. Portable recording penetrometer measures soil strength profiles. Journal of Agricultural Engineering, 46(6): 348-349.
19- Chorom, M. & Sadegh zade, F. 2005. The effect of soil compaction on movement, phosphorus and potassium in soil columns. The Scientific Journal Of Agriculture (SJA); 27(2):139-153.
20- 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.
21- Chukwu, C.G. & Bowers, Jr. 2005. Instantaneous multiple-depth soil mechanical impedance sensing from a moving vehicle. ASAE Paper No. 97-1077
22- 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.
23- 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.
24- 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.
25- 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.
26- Dexter, A.R. 1997. Physical properties of tilled soils. Soil Till. Res., 43(1): 41-63.
27- Dexter, A.R. 2004. Soil physical quality: Part I. Theory, effects of soil texture, density and organic matter and effects on root growth. Geoderma, 120(3): 201-214.
28- Dexter, A.R. 2004. Soil physical quality: Part II. Friability, tillage, tilth and hard setting. Geoderma, 120(3): 215-225.
29- Glancey, J.L. Upadhyaya, S.K. Chancellor, W.J. & Rumsey, J.W. 1989. An instrumented chisel for the study of soil-tillage dynamics. Soil and Tillage. Res., 14: 1-24.
30- Glancey, J.L. Upadhyaya, S.K. Chancellor, W.J. & Rumsey, J.W. 1996. Prediction of agricultural implement draft using an instrumented analog tillage tool. Soil and Tillage. Res., 37: 47-65.

31- Godwin, R.J. 1975. An extended octagonal ring transducer for use in tillage studies. J. Agric. Eng. Res. 20, 347–352.
32- Guerif, J. 1994. Effects of compaction on soil strength parameters. In Soil Compaction in Crop Production, eds. B. D. Soane and C. Van Ouwerkerk, ch. 9, 191-214. Amsterdam, Netherlands: Elsevier.
33- Hakansson, I. & Lipiec, J. 2000. A review of the usefulness of relative bulk density values in studies of soil structure and compaction. Soil Till. Res., 53(2): 71-85.
34- Hanquet, B. Sirjacobs, D. & Destain, M.F. 2004. Analysis of soil Variability measured with a soil strength sensor. Precision Agriculture. 5, 227-246.
35- Hemmat, A. KHorsandy, A. Masoumi, A.A. & Adamchuk, V.I. 2009. Influence of failure mode induced by a horizontally operated single-tip penetrometer on measured soil resistance. Soil & Tillage Research. Still-2672.
36- Hooks, C.L. & Jansen, I.J. 1986. Recording cone penetrometer developed in reclamiation research. Soil Science Society American Journal, 50, 10 pp
37- Javadi, A. & Spoor, G. 2006. The effect of spacing in dual wheel arrangements on surface load support and soil compaction. Journal Of Agricultural Science And Technology (JAST; 8(2):119-131.
38- Kamgar, S. Minaei, S. 2001. Evaluation of the influence of a few effective parameters on soil compaction caused by disk and moaldboard plows. Agricultural Sciences., 6(4):5-19.
39- Khademi, M.R. Loghavi, M. Golbahar Haghighi, SH. & Borgheei, A.M. 2001. A software of soil compaction map with application in precision farming. Agricultural Sciences., 7(2):91-105.
40- Khalilian, A. Han, Y.J. Dodd, R.B. Sullivan, J. Gorucu, S. & Keskin, M. 2002. A Control System for Variable Depth Tillage. ASAE Paper No. 021209. St. Joseph, Mich.: ASAE.
41- Lui, W. Upadhyaya, S.K. Kataoka, T. & Shibusawa, S. 1996. Development of a texture/soil compaction sensor. In: Proceedings of the Third International Conference on Precision Agriculture. Edited by P. C. Robert, R. H. Rust and W. E. Larsen (ASA-CSSA-SSSA, Madison, WI, USA) pp. 617–630.
42- Manor, G. & Clark, R.L. 2001. Development of an instrumented subsoiler to map soil hard-pans and real-time control for subsoil depth. ASAE Paper No. 011022. St. Joseph, Mich.: ASAE.
43- Mayauskas, I.S. 1958. Investigation of the pressure distribution on the surface of a plough share in work(Tranlated by E. Harris). Traktori I Selkhozmashiny. 11(23): 186-190.
44- 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.
Perumpral, J.V. 1987. Cone penetrometer applications: A review. Trans. ASAE 30(4): 939-944. 45-
46- Philips, J. & perumpral, J.V., 1983. Designing a microcomputer data logger for soil cone penetrometer. Journal of Agricultural Engineering. 64(6): 13-14
47- Prather, O.C. Henrick, J.C. & Sehsfer, R.L. 1970. An electronic hand oprated recording penetrometer. Transactions of the ASAE. 13(1): 385-386.
48- Raper, R.L. Asmussen, L.E. & Powell, J.B. 1990. Sensing hard pan depth with ground-penetrating radar. Trans. Of the ASAE.33(1): 41-46.
49- Raper, R.L. 1999. Site-specific tillage for site-specific compaction: is there a need? Proceedings of the International Conference of Dryland Conservation/Zone Tillage, Beijing, China, 1999.
50- 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.
51- 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.
52- Smith, L.A. & Dumas, W.T. 1978. A recording soil penetrometer. Transactions of the ASAE. 21(1): 12-14.

53- Stafford, J.V. & Hendrick, J.G. 1988. Dynamic sensing of soil pans. Transactions of the ASAE. 31(1): 9-13.
54- Tabatabaei Kalour, R. & Alimardani, R. 2008. Comparison and evaluation of cone index depth variations for tractor mounted and hand-push cone penetrometer. Agricultural Sciences And Natural Resources.,15(6):226-232.
55- Upadhyaya, S.K. Chancellor, W.J. Perumpral, J.V. Schafer, R.L. Gill, W.R. & Vandenberg, G.E. 1994. Advances in Soil Dynamics (Vol.1). American Society of Agricultural Engineers.
56- Wilford, J.R. Wooten, D.B. & Fulgham, F.E. 1972. Tractor mounted field penetrometer. Transactions of the ASAE. 15(2): 226-227.
57- Wilkerson, J.B. Tompkins, F.D. & Wilhelm, L.R. 1982. Microprocessor based, tractor mounted soil cone penetrometer. ASAE paper No. 82-5511. St. Joseph, Mich.: ASAE.

Abstract

Soil strength or soil mechanical resistance is an important characteristic of soil which is considered in the relationship between soil and plant and also in study of the interaction between soil and machine. The conventional approach of field measurement of soil mechanical resistance which is more acceptance in recent decade, is using of standard cone penetrometer whose measurements are in-situ method resulting time and labor consuming so that for providing the map of mechanical resistance isn't practical approach. The motive for overcoming the limitation of manual cone penetrometer, and also developing electronic sensors in recent years caused to more attempts attends to on-the-go approaches. This paper had centralized over how and trend of evolution of this process until now.

Keyword: Soil mechanical resistance, manual penetrometer, tractor-mounted penetrometer, sensor.