اندازه گیری پیوسته پارامترهای خاک در کشاورزی دقیق(۶۳۱)

سعید مینایی[۱]، رسول معمار دستجردی[۲]، فرزاد افشاری[۳]

چکیده

اهداف اصلی از انجام کشاورزی دقیق و انجام مدیریت موضعی در کشاورزی، افزایش سودآوری، بهبود کیفیت محصولات و محافظت از محیط زیست می‌باشد. برای تصمیم‌گیری در مورد انجام مراحل مختلف عملیات کشاورزی داشتن اطلاعاتی راجع به خصوصیات مختلف خاک در مزرعه امری ضروری است. یکی از بزرگترین چالش ها در کشاورزی دقیق، عدم توانایی در بدست آوردن ارزان و سریع خصوصیات خاک است. محققان و سازندگان زیادی روی ساخت حسگرهای پیوسته به منظور اندازه‌گیری خصوصیات فیزیکی، مکانیکی و شیمیایی خاک کارکرده‌اند. این حسگرها به صورت الکتریکی و الکترومغناطیسی، نوری و رادیومتریک، مکانیکی، صوتی، پنوماتیک و الکتروشیمیایی ساخته می‌شوند. با وجود آنکه استفاده از روش های الکتریکی و الکترومغناطیسی گسترده‌تر است، در این مقاله سعی شده سایر روش ها و تکنیک‌ها و همچنین کارهای انجام شده در ایران توضیح داده شوند.

کلیدواژه: کشاورزی دقیق، پارامترهای خاک، حسگر، اندازه‌گیری در حال حرکت

۱- دانشیار گروه مهندسی مکانیک ماشین های کشاورزی، دانشگاه تربیت مدرس، پست الکترونیک: minaee7@hotmail.com
۲- دانشجوی دکتری مهندسی مکانیک ماشین های کشاورزی، دانشگاه تربیت مدرس
۳- دانشجوی کارشناسی ارشد مکانیزاسیون کشاورزی، واحد علوم و تحقیقات، دانشگاه آزاد اسلامی

مقدمه

نتایج حاصل از آزمایشهای مختلف خاک نقش مهمی در کاربرد صحیح کود، آهک و سایر اصلاح‌کننده‌ها دارد. زمانی که این نتایج با اطلاعات مربوط به میزان مواد غذایی مورد نیاز برای محصولات مختلف، ترکیب شود، می‌توان برنامه‌ای قابل اطمینان برای حاصلخیزی خاک ایجاد کرد. آزمایشاتی که به طور استاندارد روی خاک انجام می‌گیرد، معمولاً برای تعیین میزان فسفر (P) ، پتانسیم قابل تبادل (k)، کلسیم (Ca) ، منیزیم (Mg) ، همچنین درصد اشباع آنها، ظرفیت تبادل کاتیونی(CEC)، PH و میزان آهک می‌باشد. بعضی آزمایشگاه‌ها نیز آزمایشاتی برای تعیین میزان مواد آلی (OM[1])، میزان نمک، مواد غذایی، سولفات، ریز مغذی‌ها و فلزات سنگین انجام می‌دهند. علاوه بر این مواد، رشد گیاه تابع فاکتورهای دیگری نظیر بافت خاک (میزان شن، رس و لای)، میزان فشردگی آن و میزان رطوبت نیز می‌باشد.

یکی از مهمترین مواردی که در این آزمایشات باید به آن دقت کرد، بدست آوردن نمونه‌های واقعی از خاک است (یعنی جمع آوری نمونه‌های کافی از موقعیت‌های مختلف در عمق و زمان مناسب). مکان جمع‌آوری و تعداد نمونه‌هایی که از خاک جمع‌آو ی می‌شود به روش مورد استفاده برای مدیریت حاصلخیزی خاک بستگی دارد[۱۷]. اخیراً اغلب از روشهای نمونه‌برداری تصادفی، انتخابی و نمونه‌برداری شبکه‌ای استفاده می‌شود. در نمونه‌برداری تصادفی، نمونه‌های خاک به طور تصادفی از سطح مزرعه جمع‌آوری می‌شوند. در نمونه‌برداری انتخابی، محل‌های انتخاب شده به اطلاعات قبلی بستگی دارند و در نمونه‌برداری شبکه‌ای نمونه‌ها از نقاطی که از قبل تعیین شده‌اند، جمع‌آوری می‌گردند. هیچ کدام از روشهای نمونه‌برداری موجود به عنوان مؤثرترین روش تشخیص داده نشده است[۳۱]. محققان زیادی برای ساخت حسگرهای اندازه‌گیری پیوسته خصوصیات خاک تلاش کرده‌اند. هدف از ساخت این حسگرها افزایش کارایی سیستم‌های کشاورزی دقیق می‌باشد [۲۲]. حسگرهای پیوسته توانایی جمع آوری حجم زیادی از داده‌ها را با هزینه کم دارند. اگر چه فقط تعداد محدودی از حسگرها به صورت تجاری در بازار موجود می‌باشند، اما تلاش برای ایجاد نمونه‌های جدید همچنان ادامه دارد. هدف کلی از این گردآوری، گزارش و جمع‌آوری نظریات مربوط به اندازه‌گیری پیوسته خصوصیات فیزیکی، مکانیکی و شیمیایی خاک و بحث پیرامون کاربردی بودن این نظریات می‌باشد.

۲- مواد و روشها

گیرنده سیستم موقعیت‌یاب جهانی (GPS[2]) معمولی‌ترین حسگری است که در کشاورزی دقیق به کار برده می‌شود، و از آن به منظور تعیین موقعیت و هدایت (ناوبری) تجهیزات کشاورزی استفاده می‌گردد. زمانی که از یک گیرنده GPS با یک دستگاه داده‌برداری برای ثبت موقعیت نمونه‌های خاک استفاده می‌شود، می‌توان نقشه‌ای ایجاد کرد و با استفاده از آن اطلاعات مختلف لایه‌های خاک را تجزیه و تحلیل نمود.

هر چند نظریات متعددی در رابطه با حسگرهای پیوسته وجود دارد ولی در این گردآوری بیشتر به بحث پیرامون حسگرهای الکتریکی و الکترومغناطیسی، حسگرهای نوری و رادیومتریک، حسگرهای مکانیکی، حسگرهای صوتی، حسگرهای بادی یا پنوماتیک و حسگرهای الکترو شیمیایی پرداخته می‌شود.

حسگرهایی که در این گردآوری آورده شده، سیگنالهای خروجی‌شان توسط یکی از خصوصیات زراعی خاک تحت تأثیر ق ار می‌گیرد. جدول ۱ لیست خصوصیاتی را که در روشهای ذکر شده مورد اندازه‌گیری قرار می‌گیرند، نشان می‌دهد. در بسیاری از موارد، همبستگی قابل قبولی بین خروجی حسگر و یک خصوصیت زراعی خاص از یک نوع خاک خاص یافت می‌شود.

تحقیقات انجام شده نتایج مختلفی از عملکرد یک حسگر خاص را نشان می‌دهند. دقت و صحت اصلی‌ترین فاکتورهایی هستند که برای ارزیابی حسگر به کار گرفته می‌شوند [۲۹]. دقت به توانایی حسگر در تکرار اندازه‌گیری‌ها در موقعیت و زمان یکسان اشاره می‌کند در حالیکه صحت به همبستگی بین داده‌های حاصل از حسگر با داده‌های حاصل از روش‌های اندازه‌گیری مرسوم اشاره دارد. صحت و دقت تعیین می‌کند که تا چه حد می‌توان با استفاده از خروجی حسگر، خصوصیات خاک را پیش‌بینی نمود. با این همه، در اکثر تحقیقات انجام شده، همبستگی بین خروجی حسگر و روشهای مرسوم با ضریب همبستگی پیرسون (r)

1- Organic Matter
2- Global Positioning System

یا ضریب تعیین (r^2) بیان می‌شود. باید به خاطر سپرد که هر دو این مقادیر به محدودهٔ خصوصیات خاک استفاده شده طی ارزیابی بستگی دارند و ممکن است در مزارع مختلف تغییر کند.

حسگرها	خصوصیات زراعی خاک									
	بافت خاک (میزان رس، سیلت و شن)	میزان مواد آلی خاک یا کل کربن آن	میزان رطوبت خاک	شوری خاک یا میزان سدیم	فشردگی خاک یا جرم مخصوص ظاهری آن	تغییرات عمق(تعیین عمق خاک سطح الارض یا سخت لایه)	pHخاک	میزان ازت در خاک	سایر ریزمغذی-ها(برای مثال میزان بناسیم)	ظرفیت تبادل یونی (CEC)
الکتریکی و الکترومغناطیسی	●	●	●	●		●		●		●
نوری و رادیو متریک	●	●	●				●	●		●
مکانیکی					●	●				
صوتی و پنوماتیک	●				●	●				
الکتروشیمیایی				●			●	●	●	

جدول۱: اندازه‌گیری خصوصیات خاک با استفاده از حسگرهای پیوسته

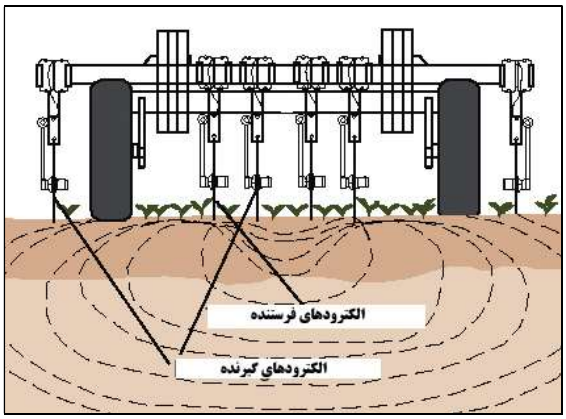
۲-۱ حسگرهای الکتریکی و الکترومغناطیسی

سیستم‌های اندازه‌گیری مختلفی براساس مدارهای الکتریکی ساخته شده‌اند. در این سیستمها از یک وسیله خاص برای هدایت یا انبار کردن بار الکتریکی استفاده می‌شود. چنانچه خاک به عنوان یک وسیله در نظر گرفته شود، خصوصیات فیزیکی و شیمیایی آن بر رفتار مدار الکتریکی تأثیر می‌گذارند و بنابراین، می‌توان آنها را به عنوان پارامترهای الکتریکی اندازه‌گیری کرد. پاسخ سریع، هزینه کم و دوام زیاد، حسگرهای الکتریکی و اکترو مغناطیسی را به عنوان موفق‌ترین تجهیزات تهیه نقشه‌های پیوسته خاک مطرح کرده است.

نقشه‌های بدست آمده به بافت، میزان نمک، میزان مواد آلی، میزان رطوبت و سایر خصوصیات خاک مربوط می‌شوند. توانایی خاک در هدایت الکتریکی معمولاً با مقاومت الکتریکی (ER[1]) یا رسانایی الکتریکی (EC[2]) بیان می‌شود. هر دو این مقادیر برای ترکیب مشخصی از الکترودهای گیرنده و فرستنده به نسبت جریان الکتریکی و ولتاژ بستگی دارند. برای اندازه‌گیری مستقیم EC و ER، الکترودها را می‌توان روی پیش‌برها مدور غلتان روی سطح مزرعه، نصب کرد. فاصله بین الکترودها به عنوان عمق مؤثر اندازه‌گیری تعریف می‌شود. بنابراین، با استفاده از بیش از دو الکترود می‌توان چندین عمق را به طور همزمان مورد بررسی قرار داد (شکل ۱).

از طرفی برای اندازه‌گیری غیر تماسی EC می‌توان از یک جفت القاگر[3] استفاده کرد. زمانی که کوئل فرستنده[4] با جریان متناوب در مجاورت خاک قرار می‌گیرد، میدان الکتریکی موجود، جریانی از بار الکتریکی را درون خاک القاء می کند. این جریان توسط کوئل گیرنده[5] که آنهم در مجاورت خاک قرار دارد، حس می‌شود. فاصله بین این دو کوئل و جهت آنها، معرف عمق مؤثر اندازه‌گیری است.

1- Electrical Resistivity
2- Electrical Conductivity
1- Inductor
2- Transmitting coil
3- Receving coil



شکل۱) دازه‌گیری خصوصیات الکتریکی خاک

مقادیر EC و ER اندازه‌گیری شده در سطح، نمایشگر خصوصیات فیزیکی، ظاهری یک محیط همگن با ذرات یکسان و یکنواخت است. اما پروفیل خاک به ندرت یکنواخت و همگن است. در نتیجه، مقادیر ER و EC اندازه‌گیری شده، نشان دهنده خصوصیات خاک غیر یکنواخت یک مزرعه کشاورزی می‌باشد و تحت تأثیر عواملی نظیر، بافت خاک، میزان نمک آن، مواد آلی، میزان رطوبت و عمق سخت لایه می‌باشد [۲۱]. در برخی از تحقیقات نیز همبستگی دیگری بین این خصوصیات و میزان مواد غذایی خاک و PH نیز یافت شد. از آنجا که اندازه‌گیری یک پارامتر از لحاظ تئوری برای پیش‌بینی چندین خصوصیت خاک کافی نیست، منطقی است که به طور همزمان چندین پارامتر اندازه‌گیری گردد.

این حقیقت که ثابت دی الکتریک آب از لحاظ مقدار بزرگتر از ثابت دی الکتریک خاک است، استفاده از این خاصیت را برای تعیین میزان آب خاک، به روشی جذاب تبدیل کرده است [۲۵]. اگرچه فاکتورهایی نظیر میزان نمک خاک، دما و شاید بافت خاک نیز روی رطوبت اندازه‌گیری شده مؤثر هستند. هر دو خصوصیت رسانایی و خازنی خاک که آنها را می‌توان به صورت پیو ته اندازه‌گیری کرد، تحت تأثیر چندین خصوصیت زراعی خاک است. مشاهده می‌شود که نوع خاک (مخصوصاً بافت آن) تأثیر معنی‌داری بر خروجی بسیاری از حسگرهایی که EC و ER را اندازه‌گیری می‌کنند، دارد. تغییرات میزان نمک خاک در سطح مزرعه، میزان رطوبت و سایر خصوصیات نیز در این رابطه مؤثرند. حسگرهای نوع خازنی در ترکیب با حسگرهای مکانیکی که بعداً گفته می‌شود برای تعیین میزان رطوبت خاک مفید و کاربردی هستند.

۲-۲- حسگرهای رادیومتریک و نوری

استفاده از خصوصیات انتقال، جذب و انعکاس، روشی سریع و غیر مخرب برای اندازه‌گیری خصوصیات خاک ایجاد کرده است. تعیین میزان انرژی منعکس شده از سطح خاک در یک محدودهٔ طیفی خاص یکی از روشهای بسیار متداول در کشاورزی دقیق است. همانند حسگرهای الکترومغناطیسی و الکتریکی، حسگرهای نوری و رادیومتریک نیز تحت تأثیر خصوصیات مختلف خاک قرار دارند، با این همه، پاسخ آنها به گونه‌ای است که امکان جدا سازی چندین خصوصیت خاک با یک حسگر وجود دارد. براساس تحقیقات انجام شده توسط بوم گاردنر[۹] ، رطوبت، مواد آلی، اندازه ذرات خاک، اکسیدهای آهن، ترکیبات معدنی، نمکهای حل شدنی و خصوصیات دیگر همگی روی میزان انعکاس خاک تأثیر گذارند.

از لحاظ تاریخی، رنگ خاک یکی از مشهودترین پارامترهایی بوده که برای مشخص کردن ناهمگن بودن خاک در مزارع کشاورزی استفاده می‌شده است. استفاده از تصاویر هوایی و ماهواره‌ای نیز یکی از روشهای عالی برای آنالیز تغییرات قابلیت انعکاس خاک است[۱۵]. این روش معمولاً با نام « **تصاویر خاک بدون پوشش**[1]» شناخته می‌شود. اما، وجود بقایای گیاهی در سطح مزارع کشاورزی، یکی از محدودیت‌های کاربرد این روش است. حسگرهای پیوسته ای که در زیر سطح خاک کار می‌کنند تحت تأثیر شرایط سطح مزرعه و شرایط آب و هوایی نیستند. اولین تحقیقاتی که در این زمینه انجام شد نشان داد که همبستگی خوبی

1- bare soil images

بین میزان مواد آلی خاک(OM) و میزان انعکاس امواج مادون قرمز مرئی و نزدیک (NIR[1]) وجود دارد[۱۹،۲۶]. شانک و همکاران [۲۴] حسگری را بر روی یک ساقه نصب کردند که این حسگر قابلیت انعکاس خاک را در ۶۶۰nm اندازه‌گیری می‌کرد. نتایج آزمایشات نشان داد که بین داده‌های اندازه‌گیری شده و میزان مواد آلی خاک برای یک خاک مرطوب همبستگی r^2 = ۰/۷۱ وجود دارد. از این «**حسگر مواد آلی**» برای کنترل میزان کاربرد آفت کشها بر اساس تغییرات OM در مزرعه استفاده شد. تحقیقات بعدی نشان داد که از قابلیت انعکاس NIR خاک می‌توان برای تخمین OM، میزان رطوبت و CEC چه در سطح خاک و چه در زیر آن استفاده کرد [۱۸،۵۹]. مطالعه دیگری نیز توسط ویسکا راسل و مک‌براتنی [۳۰] انجام شد و مشخص شد که از قابلیت انعکاس NIR می‌توان برای پیش‌بینی میزان رس و رطوبت خاک بکار برد اما میزان OM را نمی توان به این روش پیش بینی کرد. ریوس و همکاران[۲۳] با استفاده از طیف نمایی امواج مادون قرمز با طول موج متوسط و نزدیک توانستند میزان کربن آلی خاک را تعیین کنند. همچنین فسیترو [۱۶] در کار مشابهی با طیف‌نمایی NIR و امواج مرئی توانست میزان کربن آلی (r^2 = ۰/۶۵) و کل ازت (r^2 =۰/۸۷) را پیش‌بینی کند. لی و همکاران [۲۰] نشان دادند که با تجزیه و تحلیل پاسخ طیف‌ها می‌توان میزان کلسیم و منیزیم خاک را نیز پیش‌بینی کرد.

بر پایه تحقیقاتی که آپداهیایا و همکاران[۲۸] در سال ۱۹۹۳ انجام داده بودند، احسانی و همکاران[۱۴] نیز مطالعاتی را برای تعیین سریع میزان ازت خاک با استفاده از طیف سنجی امواج مادون قرمز نزدیک، انجام دادند. آزمایشات آنها به صورت آزمایشگاهی و مزرعه‌ای در دو نوع خاک انجام گرفت و مناسب بودن NIR برای تعیین میزان ازت مورد بررسی قرار داده شد. نتایج نشان داد که امکان استفاده از NIR در محدوده ۱۸۰۰-۲۳۰۰nm برای تعیین میزان ازت خاک وجود دارد، اما برای بررسی تغییرات ازت در یک سطح وسیع نیاز به کالیبراسیون موضعی[2] بود. برای حل مشکل غیر همسان بودن منحنی‌های کالیراسیون، احسانی و همکاران [۱۳] از امواج مادون قرمز متوسط (MIR) برای آشکار سازی یونهای نیتراتی که با NIR مشخص شده بودند، استفاده کردند. مطالعات اولیه آنها به وضوح مشخص کرد که حداکثر میزان ازت در طول موج ۷۱۹۴nm تشخیص داده می‌شود. با این وجود، چندین خصوصیت فیزیکی خاک به طور معنی‌داری بر طیف MIR تأثیر می‌گذاشتند. براساس این تحقیقات آزمایشگاهی که از دو نوع خاک و دو نوع نیترات معدنی اضافه شده به آن به عنوان کود تشکیل شده بود، آنها به این نتیجه رسیدند که طیف MIR روشی سریع و قابل مشاهده برای تعیین میزان ازت معدنی خاک است.

علاوه بر حسگرهای نوری، حسگرهای دیگری با نام حسگرهای رادیومتریک نیز ساخته و طراحی شدند. رادار نافذ زمین (GPR[3]) نیز حسگر دیگری است که اصول کار آن شبیه به اصول زلزله نگارها می‌باشد. GPR معمولاً از دو آنتن تشکیل شده، یک آنتن فرستنده که امواج الکترومغناطیس با فرکانس بالا را می‌فرستد و دیگری آنتن گیرنده که امواج الکترومغناطیس منعکس شده را به صورت تابعی از زمان دریافت می‌کند [۱۲]. با GPR امکان تهیه نقشه‌هایی از خصوصیات خاک نظیر بافت آن، میزان مواد آلی، ضخامت و عمق افق‌های آن، سطح آبهای زیرزمینی و عمق لایه‌های فشرده ناشی از تردد ادوات خاک‌ورزی وجود دارد.

۲-۳- حسگرهای مکانیکی

حسگرهای الکتریکی، الکترومغناطیسی، نوری و رادیومتریک توانایی ارزیابی خصوصیات مختلف خاک را در حال حرکت در سطح مزرعه دارند. با این وجود، می‌توان از خصوصیات مکانیکی خاک مانند مقاومت مکانیکی اطلاعات مفید بیشتری راجع به وضعیت خاک بدست آورد (برای مثال وضعیت فشردگی آن). فروسنج مخروطی عمودی استاندارد پرکاربردترین ابزار برای اندازه‌گیری مقاومت به نفوذ خاک است و از آن برای نمایش میزان فشردگی خاک استفاده می‌شود[۸]. حتی زمانی که از فروسنج‌های اتوماتیک استفاده شود، باز هم این کار زمان‌بر بوده و نتایج آن بسیار متغیر است. برای حل این مشکل، تجهیزاتی ساخته شدند که مقاومت مکانیکی خاک را به طور پیوسته اندازه‌گیری می‌کنند.

استفاده از کرنش‌سنج‌ها و لودسلها متداولترین راه برای اندازه‌گیری نیروهای وارده به ادوات خاک‌ورزی است. آنها نسبتاً ارزان و مقاوم بوده و به آسانی به سیستم جمع‌آوری داده‌ها متصل می‌شوند. از لودسلها برای اندازه‌گیری کشش، بار عمودی، نیروی جانبی و مومنتوم (گشتاور) وارده بر تجهیزات خاک‌ورزی استفاده می‌شود. علیهمسیاه و همکاران[۷] برای اندازه‌گیری مقاومت مکانیکی

2- Visible and near infrared
3- Site-Specific calibration
4- Ground Penetrating Radar

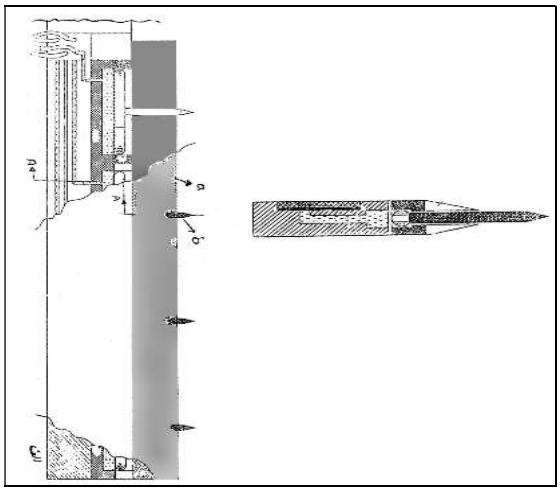
خاک به صورت پیوسته در یک عمق خاص از یک فروسنج افقی با نوک‌های مخروطی و منشوری استفاده کردند. ضریب همبستگی بین اندازه‌گیری‌های حاصل از فروسنج افقی و فروسنج مخروطی عمودی استاندارد بین ۰/۷۴ تا ۰/۹۹ بود.

در سیستم دیگری که توسط آدامچاک و همکاران[۵] ساخته شد، کرنش سنج‌ها در پشت یک تیغه صاف عمودی نصب شدند. این سیستم قابلیت تخمین مقاومت مکانیکی خاک را بطور همزمان در سه عمق حرکتی داشت (شکل۲).

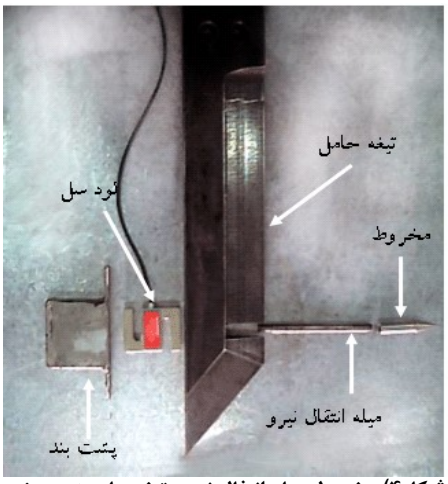
شکل۲) دستگاه ساخته شده توسط آدامچاک وهمکاران

در ایران برای اولین بار لغوی و همکاران[۱] برای تعیین خواص و شرایط مکانیکی خاک از تیغه‌ای استفاده کردند که خصوصیات خاک را به طور پیوسته اندازه‌گ ری می‌کرد. نمایی برشی از این تیغه در شکل ۳ نشان داده شده است. قطعه a بصورت یک تیغه برنده بر روی پیشانی بدنه اصلی تیغه نصب گردیده تا با لبه برنده تیز خود نیروی لازم برای پیشروی کاوشگر در خاک را به حداقل برساند. نوکهای b که اقتباسی از نوکهای مخروطی فروسنجها می‌باشند به تعداد ۴ عدد به فاصلهٔ ۱۰ سانتیمتری از یکدیگر قرار گرفته و پس از عبور از قطعه کاردی شکل به میله‌های واقع بر روی حوضچه‌های روغن پیچ شده‌اند. تیغهٔ کاوشگر تا عمق ۴۰ سانتیمتر در خاک فرو برده شده و سپس با حفظ این عمق کار، به صورت افقی در خاک حرکت داده می‌شود. نوکهای مخروطی با نفوذ در خاک، فشاری متناسب با مقاومت برشی خاک بر روی حوضچه‌های روغن که در پشت مخروط نصب شده‌اند، وارد می‌سازند. این فشارها، از طریق لوله‌های فولادی و شیلنگ فشار قوی به ۴ عدد سیلندر و پیستون تقویت کننده، منتقل می‌گردد. فشار روغن به لودسل انتقال می‌یابد. لودسل نوعی تیر طره‌ای مجهز به کرنش سنج می‌باشد که متناسب با اعمال نیرو به آن، یک ولتاژ معادل تولید می‌نماید. سیگنالهای تولیدی از نیروسنج از طریق کابلهای ارتباطی به قویت‌کننده و فیلترهای الکترونیکی منتقل می‌گردد. به گفتهٔ محققان، نتایج حاصل از تست دستگاه در آزمایشگاه نشان داد که کاوشگر قادر به سنجش و آشکار سازی لایه‌های فشرده خاک می‌باشد و در برخورد با لایه‌های سختی که به طور مصنوعی در انباره خاک تعبیه شده بودند از خود واکنش نشان داده است. در تحقیقی دیگر معمار و همکاران[۲] دستگاهی را ساختند که مقاومت مکانیکی خاک را به طور افقی و پیوسته اندازه‌گیری می‌کرد. این وسیله شامل یک تیغهٔ حامل، بارسنج، مخروط افقی برای اندازه‌گیری مقاومت مکانیکی خاک، مکانیزم ایمنی، میله انتقال نیرو و سامانه داده برداری بود (شکل۴). محققین شاخصی با عنوان شاخص مقاومت مکانیکی خاک (SRI[1]) تعریف کردند و این شاخص را با شاخص مخروط (CI[2]) مقایسه کردند. محقیقن ابزار ساخته شده را در سرعتها، عمقها و رطوبتهای مختلف مورد آزمایش قرار دادند. نتایج حاصل از آزمایشات آنها نشان داد که ارتباط معنی‌داری بین SRI و CI وجود دارد.

1- Soil Resistance Index
2- Cone Index



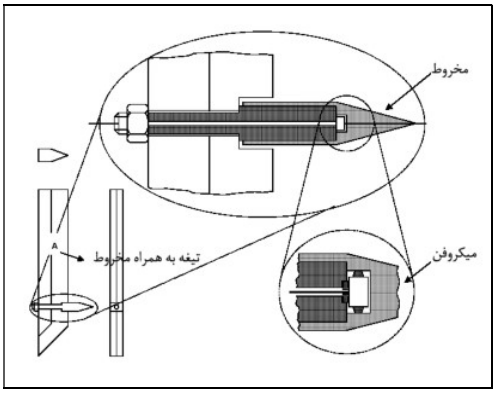
شکل۳: نمای طرحوار از کاوشگر کاردی



شکل۴) مخروط، میله انتقال نیرو، تیغه، بارسنج و پشت بند

۲-۴- حسگرهای پنوماتیک و صوتی

علاوه بر حسگرهای مکانیکی، رادیومتریک، الکترومغناطیس و الکتریکی، تحقیقات دیگری نیز برای جداسازی خصوصیات فیزیکی و مکانیکی خاک از یکدیگر انجام گرفته است. در سیستم ساخته شده توسط تکسته و همکاران[۲۷]، از صدای ایجاد شده توسط خاک برای تعیین لایه‌های متراکم خاک استفاده کردند. این حسگر شامل یک تیغه، یک میکروفن خازنی و یک مخروط افقی بود (شکل۵). میکروفن داخل مخروط افقی جاسازی شده بود و داخل خاک کشیده می‌شد. دامنهٔ صدای تولید شده در محدوده فرکانسهای انتخابی با شاخص مخروط بدست آمده در عمق‌های مختلف خاک مقایسه می‌شد. نتایج حاصل نشان داد که از ابزارمورد نظر به طور موفقیت آمیزی می‌توان در تعیین لایه فشرده خاک استفاده کرد.



شکل۵) تیغه به همراه مخروط و میکروفن خازنی

تحقیقات دیگری نیز برای تخمین لایه فشرده با استفاده از اندازه‌گیری فشار مورد نیاز برای وارد کردن جریان هوا به داخل خاک انجام گرفت[۱۱]. در این حسگر یک انژکتور هوا به طور مستقیم در تماس با خاک و در زیر سطح آن قرار داده شد (شکل ۶). فشار هوا و دبی آن ثبت شده و با میزان نفوذ پذیری هوا مقایسه شد. این حسگر قادر به تشخیص تغییرات بافت خاک و لایه متراکم، میزان رطوبت و نوع خاک بود. طی آزمایشات مقدماتی که در مزرعه انجام گرفت، سیستم توانست تفاوت بین چندین تیمار مختلف خاک‌ورزی را تشخیص دهد.

شکل ۶) استفاده از حسگر پنوماتیک برای تشخیص سخت لایه خاک

از هر دو نوع حسگر صوتی و پنوماتیک می‌توان به عنوان جایگزین‌هایی برای حسگرهای مکانیکی استفاده کرد. اما فهم ارتباط بین خروجی حسگر و وضعیت فیزیکی خاک ضعیف است و به مطالعات بیشتری نیاز دارد.

۵-۲- حسگرهای الکترو شیمیایی

بسیاری از حسگرهایی که تا اینجا توضیح داده شد به طور مستقیم یا غیر مستقیم تغییرات مختلف خصوصیات فیزیکی و مکانیکی خاک را اندازه‌گیری می‌کنند. اما اندازه‌گیری پیوسته و مستقیم خصوصیات شیمیایی خاک، نظیر PH یا میزان مواد غذایی، هدف اصلی تحقیقات زیادی بوده است که در نتیجه این تحقیقات حسگرهای الکتروشیمیایی ساخته شدند.

این حسگرها معمولاً از یک الکترود انتخاب کننده یون[۱](شیشه‌ای یا غشاء پلیمری)، یا یک ترانزیستورحساس به یونهای مزرعه‌ای (ISFET[2])، ساخته می‌شوند. از الکترودهای انتخاب کننده یونی در گذشته برای اندازه‌گیری PH استفاده می‌شد. ترانزیستورها نسبت به الکترودهای انتخاب کننده یون چندین مزیت دارند، مانند ابعاد کوچکتر، مقاومت ظاهری خروجی کمتر، نسبت سیگنال به صدای کوچکتر، پاسخ سریعتر و توانایی سوار کردن چندین حسگر در یک تراشه الکتریکی کوچک. در مطالعات آزمایشگاهی، بیرل و هامل[۱۰] یک تراشه چند گانه ISFET را برای اندازه‌گیری نیترات خاک به کار بردند. آنها از نرخ پاشش کم، زمان پاشش کوتاه و شستشوی سریع استفاده کردند. سیستم چندگانه ISFET به طور موفقیت آمیزی (r^2=۰/۹۰) میزان نیترات خاک را در عصاره خاک تحت شرایط کنترل شده اندازه‌گیری کرد.

اندازه‌گیری همزمان میزان مواد غذایی با استفاده از تکنولوژی ISFET به دقت و سرعت نمونه‌های خاک و واکنش آنها به حسگر بستگی دارد. بیرل و هامل [۱۷] یک نمونه اولیه از سیستم عصاره‌گیری مکانیکی را مورد آزمایش قرار دادند. با این وجود، این سیستم عصاره‌گیری از خاک نمی‌توانست به طور دائم عصاره مورد نیاز برای آنالیز با ISFET را تأمین کند و نیاز به بهینه‌سازی قابل ملاحظه‌ای داشت. ییلدیریم و همکاران [۳۲] یک روش الکترو- پنوماتیک خودکار برای نمونه‌برداری از خاک ایجاد کردند که قادر بود نمونه خاک مورد نیاز برای آنالیز خاک را به طور پیوسته تأمین کند. تست‌های آزمایشگاهی نشان داد که با استفاده از این روش نمونه‌برداری می‌توان نمونه‌های خاک را به سرعت برش و انتقال داد در حالیکه جرم آنها ثابت نگهداشته می‌شود.

آدست و همکاران[۶] نمونه‌ای اولیه از سیستم نمایشگر نیترات خاک را ساختند. این سیستم از یک نمونه‌گیر خاک، یک واحد اندازه‌گیری و انتقال، یک واحد اندازه‌گیری و عصاره‌گیری و یک واحد کنترل تشکیل شده بود. در طی آنالیز حنی‌های پاسخ برای خاک‌های مختلف، روشی برای پیش‌بینی ازت خاک با استفاده از الکترود انتخاب کننده یون No_3 در کمتر از ۱۰ ثانیه ارائه شد. اگر چه نتایج قابل قبولی در طی آزمایشات آزمایشگاهی بدست آمد، اما آزمایشات مزرعه نشان داد که قسمت‌های مختلف سیستم و واحد نمونه‌گیری آن نیاز به بهینه‌سازی دارند.

۱- ion-selective electrode
۲- ion-selective field effect transistor

آدامچاک و همکاران [۴] به منظور تهیه نقشه‌های پیوسته از PH خاک سیستمی را ساختند و در شرایط مزرعه ای مورد آزمایش قرار دادند (شکل۷). در این سیستم نمونه خاک توسط مکانیسمی که روی یک ساقه متصل به قاب افزار، سوار بود از عمق تقریبی ۱۰ سانتی‌متر برداشته می‌شد و در تماس با غشاهای حساسی که از دو سطح صاف از الکترودهای انتخاب کننده یون تشکیل شده بودند، قرار می‌گرفت. بعد از ثابت شدن خروجی غشاءها (معمولاً ۱۵-۵ ثانیه)، نمونهٔ جدیدی از خاک گرفته می‌شد، البته به طور همزمان سطح غشاها شسته می‌شدند. این روش براساس پیشنهاد محققین، روش اندازه‌گیری مستقیم از خاک (DSM[1]) نامیده شد. در تمام اندازه‌گیری‌ها از یک گیرنده GPS استفاده شد. ارزیابی مقدماتی الکترودهای انتخابی یون نیترات و پتانسیم در شرایط آزمایشگاهی نشان داد که امکان استفاده از الکترودهای انتخاب کننده یون برای تعیین میزان پتاسیم و نیترات قابل حل در نمونه‌های خاک مرطوب با سطح خطای یکسان (کمتر از۰/۳ $\log(k^+)$ یا $\log(No^-_3)$) وجود دارد[۳]. با این همه، زمانی که این خطا با تغییرات کل مزرعه مقایسه شد، مشخص شد که اندازه‌گیری نیترات و پتانسیم نسبت به PH دقت کمتری دارد. بنابراین در روش DSM امکان استفاده از الکترودهای انتخاب یون به صورت نزوی می‌باشد (یعنی $PH > K^+ > No^-_3$). تحقیقات بیشتری در زمینه ارزیابی کاربرد روش DSM برای تهیه نقشه‌های PH , k^+ , No^-_3 باید صورت بگیرد.

شکل۷) دستگاه اندازه‌گیری PH خاک به طور پیوسته و قسمتهای مختلف آن

۳ - بحث و نتیجه‌گیری

اگر چه انواع مختلفی از حسگرهای اندازه پیوسته خصوصیات خاک در حال ساخت و آزمایش هستند اما فقط حسگرهای الکتریکی و الکترو مغناطیسی به طور گسترده‌ای در کشاورزی دقیق استفاده می‌شوند. تولید کنندگان حسگرهایی را ترجیح می‌دهند که ورودی‌ها را به طور مستقیم برای الگوریتم‌های موجود تأمین کنند. حسگرهای تجاری موجود توانایی اندازه‌گیری خصوصیاتی نظیر رسانایی / مقاومت الکتریکی را دارند و می‌توان از آنها به طور مستقیم برای اندازه‌گیری برخی از خصوصیات فیزیکی و شیمیایی خاک نظیر بافت، میزان مواد آلی، میزان نمک، میزان رطوبت و غیره استفاده کرد. البته این حسگرها اطلاعات ارزشمندی در رابطه با تفاوت‌ها و شباهت‌های قسمت‌های مختلف مزرعه در اختیار کاربر قرار می‌دهند که از این اطلاعات در سیستم کشاورزی موضعی می‌توان برای قسمت‌های کوچکتر و همگن‌تر استفاده کرد.

۱- Direct Soil Measurement

در حقیقت نقشه‌های ER/EC نسبت به نقشه‌های پیمایش خاک، مرزهای انواع خاک‌ها را مشخص می‌کند. به طور کلی نقشه‌های ER/EC، نواحی که نیاز به تحقیقات بیشتر برای یافتن علل تفاوت در عملکرد محصول دارند را مشخص می‌کنند. بنابراین استفاده از نقشه‌های پیوسته خصوصیات خاک که با حسگرهای الکتریکی و الکترومغناطیسی تهیه می‌شوند برای یافتن ناهمگنی خاک یک مزرعه منطقی به نظر می سد.

ترکیب نظریات مختلف اندازه‌گیری در یک واحد نقشه‌برداری یکی از موضوعات جدید تحقیق است. چنانچه داده‌ها و اطلاعات مختلف خاک با هم ترکیب شوند، پیش‌بینی بهری می‌توان از خصوصیات خاکهای زراعی انجام داد و در نتیجه آن می‌توان مدیریت موضعی محصولات را بهتر انجام داد. نمونه‌ای از این حسگرها، استفاده از یک حسگر رسانایی الکتریکی با یک حسگر نوری است که با استفاده از آن میزان مواد آلی، بافت خاک و میزان رطوبت در شرایط مختلف رشد تعیین میشود. نمونه دیگری از این حسگرها استفاده از یک حسگر رسایی الکتریکی در کنار حسگر اندازه‌گری PH است که با استفاده از آن می‌توان نرخ تغییرات کاربرد آهک در مزرعه را مشخص کرد.

فایدهٔ دیگر حسگرهای پیوسته، ارزش اقتصادی نقشه‌های بدست آمده از خاک است. برای مثال، اطلاعات حاصل از حسگرهای رسانایی الکتریکی با سایر خصوصیات خاک مرتبط می‌شوند. با این وجود، تحقیقات بیشتر ممکن است نشان دهد که استفاده از اطلاعات EC خاک به تنهایی برای تصمیم گیری کافی است.

با توجه به تحقیقات اندکی که در زمینه حسگرهای پیوسته در ایران انجام شده، امید بر آن است که با استفاده از اطلاعات جمع‌آوری شده در این گردآوری گامی هرچند کوچک در آشنایی محققین با مقوله باز شده باشد.

منابع:

۱- لغوی، م، گلبهار حقیقی، ش و خادم، م (۱۳۷۷). سنجش و آشکارسازی خواص فیزیکی خاک و کاربرد آن در توسعه مدیریت خاکهای زراعی. پروژه ملی شماره ۵۱۱. بخش ماشینهای کشاورزی دانشکده کشاورزی دانشگاه شیراز.

۲-معمار، ر، مینایی، س و مستوفی، م (۱۳۸۲). طراحی، ساخت و آزمایش دستگاه پیوسته اندازه‌گیری مقاومت مکانیکی خاک. پایان نامه کارشناسی ارشد. دانشکده کشاورزی دانشگاه تربیت مدرس تهران

3- Adamchuk, V.I., Lund, E., Dobermann, A., Morgan, M.T., 2003a. On-the-go mapping of soil properties using ion-selective electrodes . In: Stafford, J., Werner, A. (Eds.), Precision Agriculture. Wageningen Academic Publishers, Wageningen, The Netherlands, pp. 27–33.

4- Adamchuk, V.I., Morgan, M.T., Ess, D.R., 1999. An automated sampling system for measuring soil pH. Transactions of the ASAE 42 (4), 885–891.

5- Adamchuk, V.I., Morgan, M.T., Sumali, H., 2001a. Application of a strain gauge array to estimate soil mechanical impedance on-the-go . Transactions of the ASAE 44 (6), 1377–1383.

6- Adsett, J.F., Thottan, J.A., Sibley, K.J., 1999. Development of an automated on-the-go soil nitrate monitoring system. Applied Engineering in Agriculture 15 (4), 351–356.

7- Alihamsyah, T., Humphries, E.G., Bowers Jr., C.G., 1990. A technique for horizontal measurement of soil mechanical impedance. Transactions of the ASAE 33 (1), 73–77.

8-ASAE Standards,49th ed.,2002.S313.2.Soil Cone Penetrometer.ASAE,St. Joseph, Michigan.

9-Baumgardner, M.F., Silva, L.F., Beihl, L.L., Stoner, E.R., 1985. Reflectance properties of soils. Advances in Agronomy 38, 1–44.

10- Birrell, S.J., Hummel, J.W., 1997. Multi-sensor ISFET system for soil analysis**.** In: Stafford, J.V. (Ed.), Proceedings of the First European Conference on Precision Agriculture. BIOS Scientific Publishers Ltd., Oxford, UK, pp. 459–468.

11- Clement, B.R., Stombaugh, T.S., 2000. Continuously-measuring soil compaction sensor development. Paper No. 00-1041, ASAE, St. Joseph, Michigan.
12- Davis, J.L., Annan, A.P., 2002. Ground penetrating radar to measure soil water content. In: Dane, J.H., Topp G.C. (Eds.), Methods of Soil Analysis, Part 4, Physical Methods. SSSA, Madison, Wisconsin, pp. 446–463.
13- Ehsani, M.R., Upadhyaya, S.K., Slaughter, D., Protsailo, L.V., Fawcett,W.R., 2000. Quantitative measurement of soil nitrate content using mid-infrared diffuse reflectance spectroscopy. Paper No. 00-1046, ASAE, St. Joseph, Michigan.
14- Ehsani, M.R., Upadhyaya, S.K., Slaughter, D., Shafii, S., Pelletier, M., 1999. A NIR technique for rapid determination of soil mineral nitrogen. Precision Agriculture 1 (2), 217–234.
15- Frazier, B.E., Walters, C.S., Perry, E.M., Pierce, F.J., Sadler, E.J., 1997. Role of remote sensing in site-specific management. In: Pierce, F.T., Sadler, E.J. (Eds.), The State of Site-Specific Management for Agriculture. ASA-CSSA-SSSA, Madison, Wisconsin, pp. 149–160.
16- Fystro, G., 2002. The prediction of C and N content and their potential mineralization in heterogeneous soil samples using Vis-NIR spectroscopy and comparative methods. Plant and Soil 246, 139–149.
17- Havlin, J.L., Beaton, J.D., Tisdale, S.L., Nelson, W.L., 1999. Soil Fertility and Fertilizers. An Introduction to Nutrient Management. Sixth ed., Prentice Hall, Upper Saddle River, New Jersey.
18- Hummel, J.W., Sudduth, K.A., Hollinger, S.E., 2001. Soil moisture and organic matter prediction of surface and subsurface soils using an NIR soil sensor. Computers and Electronics in Agriculture 32 (2), 149–165.
19- Krishnan, P., Alexander, J.D., Butler, B.J., Hummel, J.W., 1980. Reflectance technique for predicting soil organic matter. Soil Sci. Soc. Am. J. 44, 1282–1285.
20- Lee,W.S., Mylavarapu, R.S., Choe, J.S., Whitney, J.D., 2001. Study on soil properties and spectral characteristics in Florida. Paper No. 01-1179, ASAE, St. Joseph, Michigan.
21- Mueller, T.G., Hartsock, N.J., Stombaugh, T.S., Shearer, S.A., Cornelius, P.L., Barnhisel, R.I., 2003. Soil electrical conductivity map variability in limestone soils overlain by loess. Agronomy Journal 96, 496–507. Odhiambo, L.O., Freeland, R.S., Yoder, R.E., Hines, J.W., 2002. Application of fuzzy-neural network in classification of soils using ground-penetrating radar imagery. Paper No. 02-3097, ASAE, St. Joseph, Michigan.
22- Pierce, F.J., Nowak, P., 1999. Aspects of precision agriculture. Adv. Agronomy 67, 1–85.
23- Reeves III, J.B., McCarty, G.W., Mimmo, T., 2002. The potential of diffuse reflectance spectroscopy for the determination of carbon inventories in soils. Environment Pollution 116, S277–S284.
24- Shonk, J.L., Gaultney, L.D., Schulze, D.G., Van Scoyoc, G.E., 1991. Spectroscopic sensing of soil organic matter content. Transactions of the ASAE 34 (5), 1978–1984.
25- Starr, J.L., Paltineanu, I.C., 2002. Capacitance Devices. In: Dane, J.H.,Topp, G.C. (Eds.), Methods of Soil Analysis, Part 4, Physical Methods. SSSA, Madison, Wisconsin, pp. 463–474.
26- Stoner, E.R., Baumgardner, F., 1981. Characteristic variations in reflectance of surface soils. Journal of Soil Science Society of America 45, 1161–1165.
27- Tekeste, M.Z., Grift, T.E., Raper, R.L., 2002. Acoustic Compaction Layer Detection. Paper No. 02-1089, ASAE, St. Joseph, Michigan.
28- Upadhyaya, S.K., Shafii, S., Chancellor,W.C., 1993. Determination of Soil Nitrogen Content In Situ: A Literature Review. Report submitted to the Fertilizer Research and Education Program (FREP), California Department of Food and Agriculture, Sacramento, California.
29-Vaughan, B.,1999. How to determine an accurate soil testing laboratory. In: Clay et al. (Ed.) Site Specific Management Guidelines SSMG 4.Potash and Phosphate Institute, Norcross,Georgia
30-Viscarra Rossel, R.A., McBratney,A.B.,1998. Laboratory evaluation of a proximal sensing technique for simultaneous measurement of clay and water content. Geoderma 85,19-39.
31- Wollenhaupt, N.C., Mulla, D.J., Gotway Crawford, C.A., 1997. Soil sampling and interpolation techniques for mapping spatial variability of soil properties. In: Pierce, F.T.,

Sadler, E.J. (Eds.), The State of Site-Specific Management for Agriculture, ASA-CSSA-SSSA, Madison, Wisconsin, Chapter 2, pp. 19–53.

32- Yildirim, S., Birrell, S.J., Hummel, J.W., 2003. Laboratory evaluation of an electro-pneumatic sampling method for real-time soil sensing. Transactions of the ASAE , in press.