



بررسی تغییرات در محتوای رطوبتی خاک با استفاده از اندازه‌گیری‌های هدایت الکتریکی

ظاهری به روش القای الکترومغناطیسی

محمد مهاجران^۱، محمودرضا گلزاریان^{۲*}، مهدی خجسته‌پور^۳، محمدحسین آق‌خانی^۴

۱- دانشجوی کارشناسی ارشد مکانیزاسیون، دانشگاه فردوسی مشهد

۲،۳،۴- عضو هیئت علمی گروه مهندسی بیوسیستم، دانشگاه فردوسی مشهد

* ایمیل نویسنده مسئول: m.golzarian@um.ac.ir

چکیده

با پر رنگ‌تر شدن مبحث کشاورزی دقیق و مدیریت ناحیه‌ای مزرعه، لزوم وجود حسگرهای اندازه‌گیری مشخصه‌های خاک از جمله رطوبت بطور پیوسته، و در محل از اهمیت بسزایی برخوردار می‌باشد. استفاده از این نوع حسگرها مزایای بسیاری از جمله: کاهش هزینه، افزایش بهره‌وری، و نتیجه‌گیری به موقع نسبت به روش‌های اندازه‌گیری مرسوم را دارا می‌باشد. در پژوهش حاضر از هدایت‌سنج القای الکترومغناطیسی توسعه یافته به منظور تخمین محتوای رطوبتی خاک با استفاده از اندازه‌گیری‌های هدایت الکتریکی ظاهری برای لایه‌ی بالایی خاک (۰/۳-۰ متر) مورد استفاده قرار گرفت. هدایت‌سنج توسعه یافته دارای منبع تغذیه جریان مستقیم ۲۷ ولت، فاصله‌ی بین سیم‌پیچی ۰/۷۳ متر، فرکانس عملیاتی ۱۳/۶۱ کیلوهرتز و محور سیم‌پیچ‌ها عمود بر سطح زمین می‌باشد. به منظور بررسی ارتباط بین هدایت الکتریکی ظاهری و محتوای رطوبتی خاک با استفاده از روش القای الکترومغناطیسی، هدایت الکتریکی ظاهری در ۱۶ نقطه برای خاکی دارای بافت لوم اندازه‌گیری شد. اندازه‌گیری‌های محتوای رطوبتی خاک با استفاده از روش آونی در محیط آزمایشگاه تعیین شد. ارتباط رگرسیونی درجه دوم بین هدایت الکتریکی ظاهری و محتوای رطوبتی خاک نشان داد که ۹۱ درصد از تغییرات در محتوای رطوبتی خاک با استفاده از تغییرات در هدایت الکتریکی ظاهری برای خاک غیرشور توضیح داده شد. برای خاک با شوری خیلی کم و کم پیوستگی بالایی بین دو پارامتر مذکور مشاهده نشد. نتایج حاصل از این پژوهش نشان می‌دهد که هدایت‌سنج القای الکترومغناطیسی تغییرات در محتوای رطوبتی خاک را برای لایه‌ی بالایی خاک (۰/۳-۰ متر) در خاکی غیرشور که دارای بافت لوم می‌باشد می‌تواند به خوبی توضیح دهد.

کلیدواژه‌ها: القای الکترومغناطیسی، محتوای رطوبتی خاک، هدایت الکتریکی ظاهری.

با توجه به افزایش جمعیت در سطح جهان و اهمیت تأمین غذای مورد نیاز، حفظ محیط‌زیست و نیز جلوگیری از آلودگی منابع آبی و خاکی، روش‌های نوین در کشاورزی مانند کشاورزی پایدار^۱ بایستی مورد استفاده قرار گیرد (کروین و لچ، ۲۰۰۵). از مهم‌ترین ابزارها در تحقق اهداف کشاورزی پایدار، کشاورزی دقیق^۲ و یا به عبارتی دقیقتر استفاده از تصمیم‌گیری‌های صحیح مدیریتی مبتنی بر مشاهده، اندازه‌گیری و پاسخ به تغییرات درون مزرعه‌ای در زمان و مکان صحیح می‌باشد (لئونارد، ۲۰۱۶). با پر رنگ‌تر شدن مبحث کشاورزی دقیق و مدیریت ناحیه‌ای مزرعه، لزوم وجود حسگرهای اندازه‌گیری مشخصه‌های خاک از جمله رطوبت بطور پیوسته، در محل و هم‌زمان با حرکت ابزار در خاک از اهمیت بسزایی برخوردار می‌باشد (نادری بلداجی و همکاران، ۱۳۸۹). استفاده از این نوع حسگرها مزایای بسیاری از جمله: کاهش هزینه، افزایش بهره‌وری، و نتیجه‌گیری به موقع نسبت به روش‌های اندازه‌گیری مرسوم را دارا می‌باشد. در حالیکه تنها ۱۵٪ از زمین‌های کشاورزی در دنیا آبیاری می‌شوند، تقریباً ۴۰-۳۵٪ از تولیدات غذایی از طریق کشاورزی آبی تأمین می‌شود. مناطق وسیعی از زمین‌های آبیاری شده در بخش کشاورزی به علت شوری، غرقاب‌شدن در نتیجه آبیاری بیش از حد و مدیریت ضعیف آب مورد تخریب واقع می‌شوند (رودز و همکاران، ۱۹۹۹). محتوای رطوبتی موجود در خاک یک پارامتر مهم فیزیکی در تعیین رشد گیاه و نیز کنترل فرآیندهای زیست‌بوم^۳ در نواحی خشک و نیمه خشک می‌باشد (شیتز و هندریکس، ۱۹۹۵). متأسفانه اندازه‌گیری محتوای رطوبتی خاک در نواحی با مساحت بالا امری دشوار می‌باشد. از اینرو پی بردن به محتوای رطوبتی خاک در مناطق با مساحت بالا به منظور بهبود بازدهی محصول امری ضروری می‌باشد (تاپ و همکاران، ۱۹۸۰). روش‌های اندازه‌گیری محتوای رطوبتی خاک به سه دسته‌ی اندازه‌گیری از طریق نمونه‌گیری، اندازه‌گیری در محل و اندازه‌گیری از راه دور تقسیم‌بندی می‌شود. روش نمونه‌گیری مبتنی بر اندازه‌گیری در محیط آزمایشگاه می‌باشد. در این روش نمونه‌های خاک از سطح مزرعه جمع‌آوری شده و در ظرف‌های عایق ذخیره می‌شوند تا جهت تعیین محتوای رطوبت به آزمایشگاه ارسال شوند. رایج‌ترین روش آزمایشگاهی تعیین وزنی محتوای رطوبتی خاک^۴ با استفاده از آون^۵ بوده که از دقت بالایی برخوردار است. روش‌های اندازه‌گیری در محل عموماً از نصب پروب‌هایی به صورت موقت مانند: لوله‌های پروب نوترونی و یا بلوک‌های رطوبت بهره می‌برد. در برخی روش‌ها مانند بازتاب‌سنجی حوزه‌ی زمانی و ظرفیت خازنی، پروب‌ها تنها برای دوره‌ی اندازه‌گیری در داخل خاک قرار داده می‌شوند. روش از راه دور^۶ به دو دسته غیرتماسی و از راه خیلی دور تقسیم‌بندی می‌شود. روش از راه خیلی دور عموماً برای موقعیت‌هایی بکار می‌رود که حسگر از چند متر تا کیلومترها دورتر از سطح زمین قرار می‌گیرد. عبارت غیرتماسی معمولاً برای موقعیت‌هایی بکاربرده می‌شود که حسگر بر روی وسیله‌ای سوار شده است تا پایش در سطح

^۱ Sustainable agriculture

^۲ Precision Agriculture

^۳ Ecosystem

^۴ Gravimetric

^۵ Oven drying

^۶ Remote Sensing



زمین به صورت پیوسته و متمرکز انجام شود. روش‌های از راه دور و غیرتماسی مبتنی بر بازتاب/جذب تابش الکترومغناطیسی (از فرکانس‌های مایکروویو تا نور مرئی) بوده و عموماً این اندازه‌گیری‌ها مربوط به رطوبت سطحی یا نزدیک به سطح زمین می‌باشند (استافورد، ۱۹۸۸). پژوهشگران زیادی به مطالعه در مورد ارتباط بین تغییرات در محتوای رطوبتی خاک و تأثیر آن بر هدایت الکتریکی ظاهری پرداخته‌اند. تأثیر تغییرات محتوای رطوبتی خاک بر هدایت الکتریکی ظاهری در یک بازه‌ی زمانی تحقیق شد (بریوبک و همکاران، ۲۰۰۶). در این پژوهش هدایت الکتریکی ظاهری توسط هدایت‌سنج EM38 در دو حالت عمودی و افقی برای پنج نقطه در فواصل زمانی هر یک تا دو هفته اندازه‌گیری شد. بطور همزمان نمونه‌برداری از خاک تا عمق ۰/۹ متری با فواصل عمقی ۱۵ سانتی‌متری به منظور تعیین رطوبت جرمی خاک با استفاده از روش آونی صورت گرفت. چگالی ظاهری خاک نیز به منظور بدست آوردن رطوبت حجمی اندازه‌گیری شد. تجزیه و تحلیل رگرسیونی بین هدایت الکتریکی ظاهری و رطوبت حجمی خاک در تمامی ایستگاه‌ها غیر از ایستگاه Canisteo رابطه‌ی خطی با ضریب تعیین ۰/۷ به بالا را نشان داد. ارتباط بین تغییرات مکانی هدایت الکتریکی ظاهری خاک، رطوبت حجمی و بافت خاک در زمینی با غلظت پایین نمک‌های محلول مورد بررسی قرار گرفت (کاچانوسکی و همکاران، ۱۹۸۸). هدایت الکتریکی ظاهری در ۵۲ نقطه با استفاده از هدایت‌سنج‌های EM38 و EM31 (توسعه یافته توسط شرکت جئونیکس کانادا) اندازه‌گیری شد. اندازه‌گیری‌های رطوبت در دو نقطه تا عمق ۰/۵ متری با استفاده از روش بازتاب‌سنجی حوزه‌ی زمانی و اندازه‌ی ذرات با استفاده از روش پیت^۱ انجام شد. تغییرات درصد رس و رطوبت حجمی به ترتیب از ۲/۵ تا ۴۴ درصد و از ۰/۰۶ تا ۰/۳۶ مترمکعب بر مترمکعب بدست آمد. بر اساس اندازه‌گیری هدایت الکتریکی عصاره‌ی اشباع، سطح شوری خاک در بازه‌ی غیرشور قرار گرفت. نمودار رگرسیونی بین دو پارامتر مذکور نشان دهنده‌ی ارتباط درجه دوم بین آن‌ها می‌باشد. ضریب تعیین برای این رابطه ۰/۹۶ بوده و خطای استاندارد تخمین ۰/۰۲ مترمکعب بر مترمکعب گزارش شد. لازم به ذکر است که رابطه‌ی تخمین رطوبت برای ۰/۵ متر اول خاک بدست آمد. برای اندازه‌گیری‌های هدایت الکتریکی ظاهری در فواصل عمقی بیشتر از ۰/۵ متر رابطه‌ی معنی‌داری با رطوبت حجمی در سطح ۰/۰۵ بدست نیامد. از روش القای الکترومغناطیسی به منظور اندازه‌گیری محتوای رطوبتی خاک استفاده شد (شرلوک و مک دونل، ۲۰۰۳). اندازه‌گیری‌های هدایت الکتریکی ظاهری و رطوبت جرمی به ترتیب با استفاده از هدایت‌سنج EM38 و روش آونی انجام شد. رگرسیون خطی به منظور بررسی ارتباط بین هدایت الکتریکی ظاهری و رطوبت جرمی اندازه‌گیری شده تا عمق بیست سانتی‌متری مورد استفاده قرار گرفت. هدایت‌سنج الکترومغناطیسی EM38 توانست بیش از ۷۰ و ۶۰ درصد رطوبت جرمی را به ترتیب در دو حالت افقی و عمودی توضیح دهد. با بررسی مطالعاتی که تاکنون انجام شده است می‌توان نتیجه گرفت که در اکثر موارد از هدایت‌سنج القای الکترومغناطیسی EM38 توسعه یافته توسط شرکت جئونیکس کانادا به منظور پایش محتوای رطوبتی خاک در مقیاس مزرعه‌ای مورد استفاده قرار گرفته است. در پژوهش حاضر از هدایت‌سنج القای الکترومغناطیسی توسعه یافته در گروه مهندسی بیوسیستم دانشکده کشاورزی دانشگاه فردوسی مشهد جهت تخمین محتوای رطوبتی خاک با استفاده از اندازه‌گیری‌های هدایت الکتریکی ظاهری برای لایه‌ی بالایی خاک (۰/۳-۰ متر) مورد استفاده قرار گرفته است.

^۱ Pipette

روش القای الکترومغناطیسی

در روش القای الکترومغناطیسی جریان الکتریکی از طریق فرآیند القا به داخل خاک تغذیه شده و بنابراین هیچ الکترونی مورد نیاز نمی‌باشد. خطای بوجود آمده به علت عدم تماس کامل بین خاک و الکترو در روش تماسی (روش مقاومتی با آرایش چهار وجهی و نر)، به عنوان یکی دیگر از روش‌های اندازه‌گیری هدایت الکتریکی، در این روش مشاهده نمی‌شود. مزایای استفاده از این روش شامل: (۱) اندازه‌گیری‌ها با سرعت بالا در سطح مزرعه (۲) حجم بالای اندازه‌گیری (منجر به کاهش تغییرپذیری شده و در نتیجه تعداد اندازه‌گیری کم در سطح مزرعه باعث تخمین با دقت بالایی از پارامتر اندازه‌گیری شده می‌شود) (۳) امکان پذیر بودن اندازه‌گیری‌ها در خاک‌های نسبتاً خشک و سنگی (عدم نیاز به تماس بین هدایت‌سنج و خاک) می‌باشند. علاوه بر این عدم استفاده از رادیواکتیو، غیرمخرب بودن، و سهولت در استفاده نیز از دیگر مزایای این روش می‌باشد. اندازه‌گیری‌ها توسط این روش و با استفاده از هدایت‌سنج توسعه یافته بصورت آنی و در محل می‌باشد. بنابراین برای اندازه‌گیری هدایت الکتریکی نیازی به تهیه نمونه خاک و ارسال به آزمایشگاه نمی‌باشد. همین امر باعث کاهش هزینه‌های مربوط به نمونه‌برداری خاک و تجزیه و تحلیل آزمایشگاهی می‌شود. از آنجاییکه اندازه‌گیری‌ها در سطح مزرعه و به صورت آنی صورت می‌گیرد بنابراین مدت زمان کمتری در مقایسه با روش نمونه‌برداری را شامل می‌شود. دو نوع روش القای الکترومغناطیسی به منظور استفاده در توسعه هدایت‌سنج الکترومغناطیسی وجود دارد. نوع اول القای الکترومغناطیسی حوزه‌ی زمانی بوده که از میدان مغناطیسی اولیه که به صورت پالس‌های متناوب به داخل خاک تغذیه می‌شود استفاده نموده و تغییرات در میدان مغناطیسی ثانویه را در زمان‌های مختلف بین پالس‌ها اندازه‌گیری می‌کند. نوع دوم القای الکترومغناطیسی حوزه‌ی فرکانسی بوده که از میدان مغناطیسی اولیه‌ی پیوسته استفاده نموده و اندازه و فاز میدان مغناطیسی ثانویه را اندازه‌گیری می‌کند. در دستگاه حاضر از نوع دوم روش القای الکترومغناطیسی به منظور توسعه هدایت‌سنج استفاده شده است. هدایت‌سنج القای الکترومغناطیسی دارای دو سیم‌پیچ فرستنده و گیرنده می‌باشد. سیم‌پیچ گیرنده به فاصله‌ی کمی^۲ نسبت به سیم‌پیچ اولیه (فرستنده)^۳ که از جریان متناوب با فرکانس خیلی پایین تغذیه می‌شود، بر روی سطح زمین قرار می‌گیرد. میدان مغناطیسی زمان-متغیر (میدان مغناطیسی اولیه) که در سیم‌پیچ اولیه بوجود می‌آید، جریان‌های کوچکی در داخل خاک القا می‌کند. این جریان‌ها که به عنوان جریان‌های گردابی^۴ شناخته می‌شوند یک میدان الکترومغناطیسی ثانویه ایجاد می‌کند که با اندازه‌ی جریان درون هر حلقه متناسب می‌باشد. اندازه‌ی حلقه‌های جریان القا شده با هدایت الکتریکی ظاهری خاک متناسب می‌باشد. کسری از این میدان ثانویه القا شده از هر حلقه بوسیله‌ی سیم‌پیچ ثانویه (سیم‌پیچ گیرنده)^۵ قطع می‌شود و مجموع این سیگنال‌ها به صورت ولتاژ خروجی که با هدایت الکتریکی خاک ارتباط دارد با استفاده از ولت‌متر اندازه‌گیری می‌شود (شکل ۱). اندازه و فاز میدان ثانویه با میدان اولیه اختلاف دارد که عوامل مؤثر بر آن شامل: مشخصه‌های خاک (از جمله: محتوای

^۱ Pulse

^۲ Inter-coil spacing

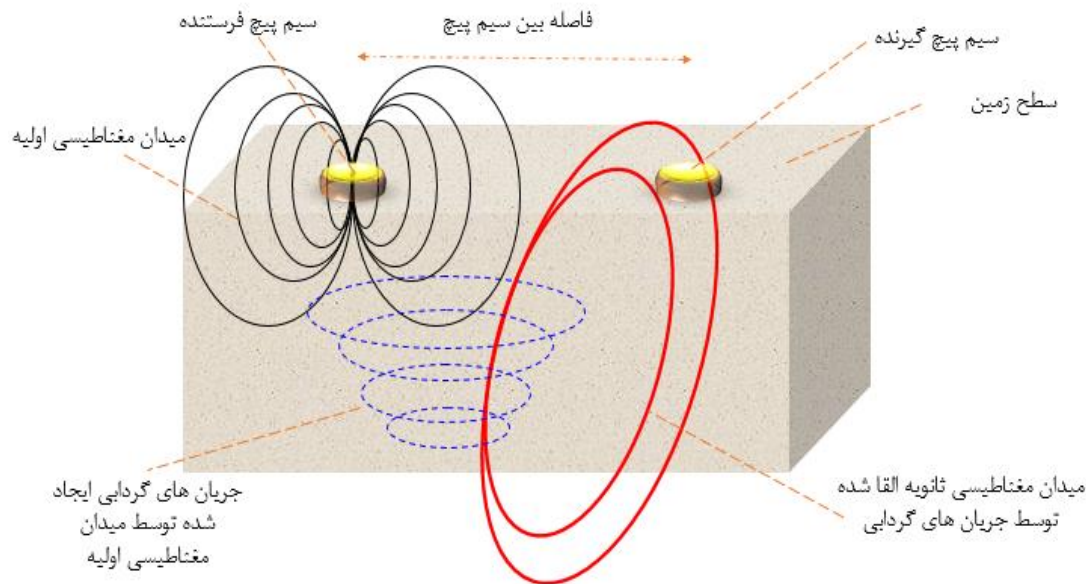
^۳ Transmitter coil

^۴ Eddy currents

^۵ Receiver coil



رطوبتی، شوری)، فاصله‌ی بین سیم‌پیچ‌ها و جهت آن‌ها، فرکانس عملیاتی، و فاصله از سطح خاک می‌باشد. روش القای الکترومغناطیسی هدایت الکتریکی را به صورت انباشتی از پاسخ مواد هادی در زیر سطح خاک در اعماق مختلف^۱ اندازه‌گیری می‌کند. این اندازه‌گیری هدایت الکتریکی ظاهری نامیده می‌شود.



شکل: ۱. طرحواره‌ای از نحوه‌ی قرارگیری سیم‌پیچ‌ها و اصول عملکرد روش القای الکترومغناطیسی.

رابطه‌ی شماره‌ی یک ارتباط بین هدایت الکتریکی ظاهری و پارامترهای مؤثر بر اندازه‌گیری آن شامل: فرکانس عملیاتی (f)، فاصله‌ی بین دو سیم‌پیچ (S) و نسبت میدان مغناطیسی ثانویه به اولیه را نشان می‌دهد.

$$EC_a = 0.22 \frac{4}{\omega \mu_0 s^2} \left(\frac{SMF}{PMF} \right) \quad \text{رابطه (۱) (مکنیل، ۱۹۸۰)}$$

در این رابطه $\omega = 2\pi f$ ، فرکانس بر حسب هرتز، S فاصله‌ی بین دو سیم پیچ بر حسب متر، EC_a^2 هدایت الکتریکی ظاهری محیط اندازه‌گیری بر حسب زیمنس بر متر (S/m)، $\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7}$ v.s/A.m، SMF میدان مغناطیسی ثانویه بر حسب تسلا، PMF میدان مغناطیسی اولیه بر حسب تسلا و عدد ۰/۲۲ مربوط به پاسخ هدایت‌سنج الکترومغناطیسی برای ۳۰ سانتی‌متر اول خاک می‌باشد.

هدایت‌سنج الکترومغناطیسی توسعه یافته

هدایت‌سنج القای الکترومغناطیسی در گروه بیوسیستم دانشکده‌ی کشاورزی دانشگاه فردوسی مشهد و با شماره گرنت ۳۲۷۳۱ توسعه یافت. در جدول ۱ پارامترهای طراحی همراه با مقادیر آن‌ها آورده شده است.

^۱ Depth-cumulative

^۲ Apparent electrical conductivity

جدول ۱. پارامترهای طراحی هدایت سنج الکترومغناطیسی.

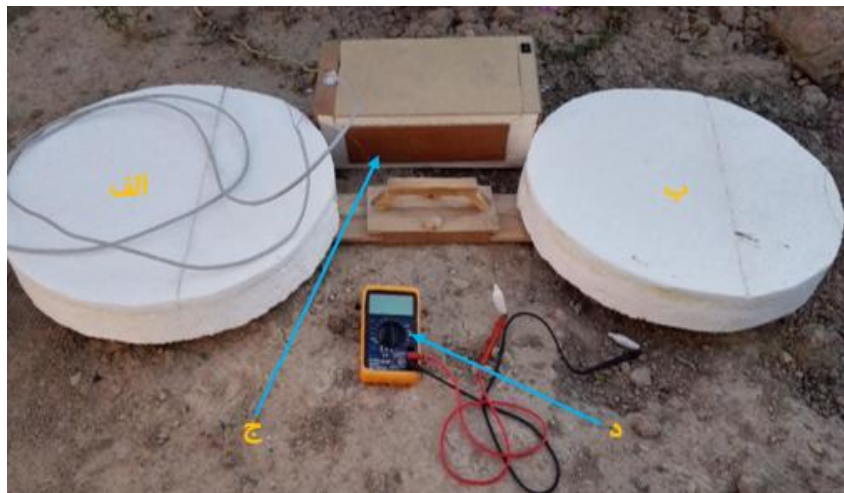
پارامترهای طراحی	فرکانس کاری دستگاه ^۱	فاصله بین سیم‌پیچ ^۲	جهت سیم‌پیچ ^۳	منبع تغذیه ^۴
اندازه	۱۳/۶۱	۰/۷۳	عمودی	۲۷ ولت

۱- بر حسب کیلوهرتز ۲- بر حسب متر ۳- محور سیم‌پیچ‌ها عمود بر سطح خاک ۴- جریان مستقیم.

این هدایت‌سنج از دو بخش مکانیکی و الکترونیکی تشکیل شده است. در ادامه هر کدام از بخش‌ها به تفصیل توضیح داده خواهند شد.

بخش مکانیکی

در زمین‌های کشاورزی هر گونه ماده‌ی رسانا غیر از خاک باعث ایجاد خطا در اندازه‌گیری هدایت الکتریکی ظاهری توسط هدایت‌سنج خواهد شد. از اینرو بایستی قاب مورد استفاده برای قرار دادن سیم‌پیچ‌ها و مدارات از موادی غیر رسانا تشکیل شده باشد. در پژوهش حاضر سیم‌پیچ‌ها بر روی قابی از جنس چوب قرار گرفته است تا بر میدان‌های ایجاد شده توسط زمین و سیم‌پیچ فرستنده اثرگذار نباشند. مدارات مورد استفاده نیز در داخل جعبه‌ای چوبی که به خوبی عایق شده است جهت جلوگیری از اثر دما قرار گرفتند. تغییرات دمای هوا یکی از عواملی است که بر اندازه‌گیری‌ها دستگاه تأثیر می‌گذارد لذا به منظور کاهش تأثیر دمای هوا، سیم‌پیچ‌ها با پوششی از پلی استیرن (یونولیت) به خوبی عایق شدند. شکل ۲ قاب چوبی، جعبه‌ی چوبی مدارات الکترونیکی و نحوه‌ی عایق شدن سیم‌پیچ‌ها را به خوبی نشان می‌دهد.



شکل ۲. هدایت‌سنج الکترومغناطیسی توسعه یافته. (الف) سیم‌پیچ فرستنده. (ب) سیم‌پیچ گیرنده. (ج) مدار فرستنده. (د) ولت متر.

بخش الکترونیکی

این بخش شامل: منبع تغذیه، مدار نوسان‌ساز، مدار تقویت توان، فیلتر، و ترانسفورماتور می‌باشد. هم‌چنین به منظور اندازه‌گیری ولتاژ القا شده ناشی از میدان مواد هادی زیر خاک در سیم‌پیچ ثانویه یک مولتی‌متر در سیم‌پیچ ثانویه تعبیه و مورد استفاده قرار گرفت.



منبع تغذیه مورد استفاده دارای ۳ باطری کتابی با ولتاژ مجموع ۲۷ ولت می‌باشد. از آنجاییکه ولتاژ ورودی به مدار نوسان‌ساز ۱۲ ولت برای دستگاه در نظر گرفته شده است، از مدار رگلاتوری استفاده نمودیم تا همواره ولتاژ ورودی به مدار نوسان‌ساز مقدار ثابت ۱۲ ولت داشته باشد. بنابراین کاهش ولتاژ منبع تغذیه تأثیری در مقدار ولتاژ ورودی به مدار نوسان‌ساز نخواهد داشت. مدار نوسان‌ساز وظیفه‌ی ایجاد فرکانس به منظور تغذیه‌ی سیم‌پیچ اولیه را بر عهده دارد. تولید فرکانس مورد نیاز با استفاده از یک مدار مجتمع IC555 انجام شد. فرکانس تولید شده توسط مدار نوسان‌ساز در محدوده‌ی فرکانس خیلی پایین^۱ (VLF) قرار می‌گیرد و بنابراین برای زمین‌های کشاورزی و محصولات خطری به دنبال نخواهد داشت. از مدار تقویت توان و ترانس افزایشده‌ی ولتاژ به منظور تقویت جریان و ولتاژ ورودی به سیم‌پیچ فرستنده مورد استفاده قرار گرفت. همچنین از فیلترهایی جهت کاهش نویز در مدار استفاده شد.

مواد و روش‌ها

مشخصات مناطق مورد آزمایش

پژوهش حاضر در شهرستان بجنورد استان خراسان شمالی در زمین زراعی در منطقه بازخانه انجام شد. موقعیت جغرافیایی و مشخصات خاک این منطقه به ترتیب در جداول ۲ و ۳ آورده شده است. به منظور تعیین بافت خاک و نیز سطح شوری، از نقاط مختلف در مزرعه نمونه‌برداری‌هایی جهت ارسال به آزمایشگاه خاکشناسی انجام شد. در آزمایشگاه خاکشناسی بافت خاک و سطح شوری به ترتیب با استفاده از روش‌های هیدرومتری و عصاره‌ی گل اشباع تعیین شدند. شکل ۳ ایستگاه مورد مطالعه در پژوهش حاضر را نشان می‌دهد.

جدول ۲. موقعیت جغرافیایی ایستگاه‌های مورد مطالعه.

استان	شهرستان	موقعیت جغرافیایی	ایستگاه	مساحت ^۱
خراسان شمالی	بجنورد	37°24' N 57°20' E	بازخانه	۴۱۰۷

۱- بر حسب مترمربع.

جدول ۳. مشخصه‌های فیزیکی خاک.

ایستگاه	بافت خاک	درصد سیلت	درصد شن	درصد رس	شوری خاک ^۱
بازخانه	لوم	۴۸	۲۸	۲۴	۲/۳۵

۱- شوری بر حسب میلی‌زیمنس بر سانتی‌متر.

^۱ Very Low Frequency



شکل ۳. ایستگاه مورد مطالعه در پژوهش حاضر.

به منظور بررسی ارتباط بین هدایت الکتریکی ظاهری و محتوای رطوبتی خاک با استفاده از روش الکترومغناطیسی، هدایت الکتریکی ظاهری در ۱۶ نقطه اندازه‌گیری شد. اندازه‌گیری‌ها بدین صورت انجام گرفت که هدایت‌سنج الکترومغناطیسی در نقطه‌ی مورد نظر بر روی سطح خاک قرار گرفته و ولتاژ اندازه‌گیری شده توسط ولت‌متر پس از گذشت ۵ ثانیه قرائت شد. سپس با استفاده از رابطه‌ی ۱ هدایت الکتریکی ظاهری محاسبه شد. پس از اتمام داده‌برداری‌ها اقدام به نمونه‌برداری خاک تا عمق ۳۰ سانتی‌متری از سطح خاک نمودیم. نمونه‌ها در پلاستیک‌های عایق به منظور جلوگیری از هدر رفت رطوبت خاک ناشی از تبخیر، ذخیره شدند. تمامی نمونه‌ها جهت تعیین محتوای رطوبتی خاک و هدایت الکتریکی به آزمایشگاه ارسال شدند. محتوای رطوبتی خاک با استفاده از روش آونی به مدت ۲۴ ساعت در دمای 105°C و هدایت الکتریکی با استفاده از روش عصاره‌ی گل اشباع با استفاده از هدایت‌سنج AZ-8306 با دقت ± 0.01 اندازه‌گیری شد. در حین داده‌برداری در سطح مزرعه با استفاده از هدایت‌سنج‌های توسعه یافته، دماسنج الکلی در درون زمین در نقاط مختلف برای سه عمق (۱۰-، ۲۰-، ۳۰-، ۱۰-، ۲۰- و ۳۰- سانتی‌متر) قرار داده شد و میانگین آن‌ها به عنوان دمای خاک مورد استفاده قرار گرفت. برای تمامی اندازه‌گیری‌ها توسط هدایت‌سنج توسعه یافته از این میانگین دما به عنوان ضریب تصحیح دمایی برای تبدیل هدایت الکتریکی به هدایت الکتریکی استاندارد با استفاده از روابط ۲ و ۳ استفاده شد. این امر باعث می‌شود تا اثر تغییرات دما بر هدایت الکتریکی از بین رفته و بصورت هدایتی استاندارد جهت مقایسه با یکدیگر مورد استفاده قرار گیرد.

$$EC_{25} = f_t * EC_t \quad (2) \quad (\text{کروین و لچ، ۲۰۰۵})$$

$$f_t = 0.4470 + 1.4034 e^{-t/26.815} \quad (3) \quad (\text{کروین و لچ، ۲۰۰۵})$$

در این روابط، t دمای اندازه‌گیری شده، f_t ضریب تصحیح دما، EC_{25} هدایت الکتریکی استاندارد در دمای ۲۵ درجه سانتی‌گراد، EC_t هدایت الکتریکی اندازه‌گیری شده در دمایی غیر از ۲۵ درجه سانتی‌گراد می‌باشد.

بر اساس National Soil Survey Handbook (2015) شوری خاک از دسته‌ی غیر شور (هدایت الکتریکی عصاره‌ی اشباع $0.2-0.4$ زیمنس بر متر) تا شوری کم (هدایت الکتریکی عصاره‌ی اشباع $0.8-0.4$ زیمنس بر متر) تغییر یافت. بر این اساس 37 درصد از نمونه‌های جمع‌آوری شده در دسته‌ی غیر شور و 63 درصد داده‌ها در دسته‌ی شوری خیلی کم و کم قرار گرفتند. بازه‌ی تغییرات محتوای رطوبتی خاک بین 0.107 تا 0.194 گرم بر گرم بدست آمد. در جدول ۴ پارامترهای آماری مربوط به هدایت الکتریکی ظاهری اندازه‌گیری شده توسط روش الکترومغناطیسی و نیز محتوای رطوبتی خاک برای دو سطح شوری نشان داده شده است. ارتباط بین هدایت الکتریکی ظاهری و محتوای رطوبتی خاک با استفاده از دو مدل رگرسیونی خطی و چندجمله‌ای درجه دوم بررسی شد. این مدل‌ها با استفاده از نرم‌افزار متلب (ورژن ۷) توسعه یافت. جدول ۵ ضرایب تعیین و ضرایب رگرسیونی برای دو مدل انتخاب شده به تفکیک سطوح شوری را نشان می‌دهد. همانطور که در این جدول مشاهده می‌شود مدل چندجمله‌ای درجه دوم دارای ضرایب تعیین بیشتری ($R^2=0.91$) برای خاک غیر شور در مقایسه با مدل خطی می‌باشد. البته پیوستگی بالایی نیز برای مدل خطی ($R^2=0.88$) بین دو پارامتر مذکور وجود دارد. همانطور که در جدول ۵ نیز مشاهده می‌شود مقادیر RMSE برای مدل خطی و چندجمله‌ای درجه دوم به ترتیب برابر 0.051 و 0.05 گرم بر گرم می‌باشد. دلایل وجود پیوستگی بالا بین هدایت الکتریکی ظاهری و محتوای رطوبتی خاک شامل: ۱) تهیه‌ی نمونه خاک به منظور تعیین محتوای رطوبتی خاک بلافاصله پس از اندازه‌گیری‌های هدایت الکتریکی ظاهری (۲) استفاده از هدایت سنج القای الکترومغناطیسی بر روی سطح خاک و ارتفاع نداشتن از سطح (۳) عمق یکسان اندازه‌گیری‌های هدایت الکتریکی ظاهری و محتوای رطوبتی خاک و (۴) اندازه‌گیری محتوای رطوبتی خاک و هدایت الکتریکی بدون فاصله، می‌باشد. رودز (۱۹۷۶) توانست رابطه‌ای بین هدایت الکتریکی ظاهری و پارامترهای مؤثر بر آن ایجاد کند. در این رابطه ارتباط بین هدایت الکتریکی ظاهری و محتوای رطوبتی خاک از نوع درجه دوم می‌باشد. در پژوهش حاضر نیز مدل چندجمله‌ای درجه دوم توانست تغییرات محتوای رطوبتی خاک را با اندازه‌گیری‌های هدایت الکتریکی بیشتر از مدل خطی توضیح بدهد. با مروری بر پژوهش‌های انجام شده نیز در می‌یابیم که بیشتر محققان به مدل‌های خطی (شیتز و هندریکس، ۱۹۹۵؛ خاکورال و همکاران، ۱۹۹۸؛ بریویک و همکاران، ۲۰۰۶) و چندجمله‌ای درجه دوم (کاچانوسکی و همکاران، ۱۹۸۸) به منظور بررسی رابطه‌ی بین هدایت الکتریکی ظاهری و محتوای رطوبتی خاک دست یافتند. برای خاک با شوری بسیار کم و کم پیوستگی بالایی بین هدایت الکتریکی ظاهری و محتوای رطوبتی خاک مشاهده نشد. با افزایش سطح شوری تأثیر محتوای رطوبتی بر هدایت الکتریکی ظاهری کاهش می‌یابد. این امر به وضوح در جدول ۵ با ضرایب تعیین پایین برای مدل خطی و چندجمله‌ای درجه دوم به ترتیب برابر 0.25 و 0.31 برای خاک با شوری $0.8-0.2$ زیمنس بر متر دیده می‌شود. در خاک با غلظت پایین الکترولیت‌های محلول، تغییرات مکانی محتوای رطوبتی خاک پیوستگی بالایی با تغییرات مکانی هدایت الکتریکی ظاهری اندازه‌گیری شده توسط هدایت‌سنج القای الکترومغناطیسی از خود نشان داد (کاچانوسکی و همکاران، ۱۹۸۸). در پژوهش حاضر نیز پیوستگی بالایی برای خاک غیر شور بین هدایت الکتریکی ظاهری و محتوای رطوبتی خاک مشاهده شد.

جدول ۴. پارامترهای آماری مربوط به هدایت الکتریکی ظاهری و محتوای رطوبتی خاک برای دو سطح شوری.

سطح شوری	متغیر	انحراف معیار	CV	کمینه	بیشینه	میانگین
غیرشور	E _{Ca}	۰/۰۳۴	۰/۲۴	۰/۱۰۲	۰/۱۸۱	۰/۱۴۳
(۰-۰/۲) زیمنس بر متر	SMC	۰/۰۲۸	۰/۰۷	۰/۱۵۵۶	۰/۱۹۴	۰/۱۷۶۲
شوری بسیار کم و کم (۰/۲-۰/۴) و	E _{Ca}	۰/۰۷۴	۰/۱۹	۰/۲۲۱	۰/۴۷۶	۰/۳۸۴
(۰/۴-۰/۸) زیمنس بر متر	SMC	۰/۰۲۴	۰/۱۷	۰/۱۰۴۱	۰/۱۸۰۳	۰/۱۴

E_{Ca} هدایت الکتریکی ظاهری بر حسب زیمنس بر متر، SMC (Soil Moisture Content) محتوای رطوبتی خاک بر حسب گرم بر گرم، CV (Coefficient of Variation) ضریب تغییرات.

جدول ۵. R² و ضرایب رگرسیونی مدل‌های تخمین محتوای رطوبت برای دو سطح شوری.

سطح شوری	مدل رگرسیونی	متغیر	ضریب رگرسیون	R ²	RMSE
	خطی (Y=P ₁ *X+P ₂)	P ₁	-۰/۳۶۸۳	۰/۸۸	۰/۰۰۵۱
		P ₂	۰/۲۲۹۱		
۰-۰/۲ زیمنس بر متر	چندجمله‌ای درجه دوم (Y=P ₁ *X ² +P ₂ *X+P ₃)	P ₁	-۳/۸۰۵	۰/۹۱	۰/۰۰۵
		P ₂	۰/۶۸۷۵		
		P ₃	۰/۱۵۹۷		
۰/۲-۰/۴ و ۰/۴-۰/۸ زیمنس	خطی (Y=P ₁ *X+P ₂)	P ₁	-۰/۱۶۶۶	۰/۲۵	۰/۰۲۲
		P ₂	۰/۲۰۴		
بر متر	چندجمله‌ای درجه دوم (Y=P ₁ *X ² +P ₂ *X+P ₃)	P ₁	۰/۹۴۷۲	۰/۳۱	۰/۰۲۲
		P ₂	-۰/۸۲۳۳		
		P ₃	۰/۳۱۱۸		

متغیر Y: محتوای رطوبتی خاک بر حسب گرم بر گرم، متغیر X: هدایت الکتریکی ظاهری بر حسب زیمنس بر متر (S/m)، R² ضریب تعیین، a, P₁, P₂, P₃ ضرایب ثابت.

نتیجه‌گیری

با توجه به اهمیت کشاورزی دقیق در مدیریت مزرعه لزوم وجود روش‌ها و ابزارهایی به منظور اندازه‌گیری و یا تخمین خصوصیات فیزیکی خاک از جمله رطوبت در داخل مزارع با مساحت بالا بسیار حائز اهمیت است. در پژوهش حاضر از هدایت‌سنج الکترومغناطیسی توسعه یافته به منظور بررسی تغییرات محتوای رطوبتی خاک بر اساس اندازه‌گیری‌های هدایت الکتریکی ظاهری استفاده شد. رگرسیون خطی و چندجمله‌ای درجه دوم به منظور ایجاد ارتباط بین دو پارامتر مذکور برای هر دو سطح شوری مورد استفاده قرار گرفت. برای مدل چندجمله‌ای درجه دوم در خاک غیرشور پیوستگی بالایی (R²=۰/۹۱) بین هدایت الکتریکی ظاهری و محتوای رطوبتی خاک مشاهده شد. با این وجود، برای خاک با شوری کم و بسیار کم اندازه‌گیری‌های هدایت الکتریکی ظاهری نتوانست به خوبی تغییرات در محتوای



رطوبتی خاک را توضیح دهد. نتایج حاصل از این پژوهش نشان می‌دهد که هدایت‌سنج القای الکترومغناطیسی تغییرات در محتوای رطوبتی خاک را برای لایه‌ی بالایی خاک (۰-۰/۳ متر) در خاکی با سطح پایین‌الکترولیت‌های محلول که دارای بافت لوم می‌باشد می‌تواند به خوبی توضیح دهد.

منابع

- نادری بلداجی، م. شریفی، ا. جمشیدی، ب. عباسی، ف. یونسی، م. مینایی، س. ۱۳۸۹. توسعه و ارزیابی یک حسگر افقی برای اندازه‌گیری در حال حرکت رطوبت و مقاومت مکانیکی خاک، ششمین کنگره ملی مهندسی ماشین‌های کشاورزی و مکانیزاسیون، ۲۴ و ۲۵ شهریور، کرج.
- Brevik, E.C., Fenton, T.E., Lazari, A., 2006. Soil electrical conductivity as a function of soil water content and implications for soil mapping, *Precision Agriculture*, 7:393-404.
- Corwin, D.L., and Lesch, S.M., 2005. Apparent soil electrical conductivity measurements in agriculture, *Computer and Electronics in Agriculture*, 46, 11-43.
- Kachanoski, R. G., Gregorich, E. G., Wesenbeeck, I. J., 1988, Estimating spatial variations of soil water content using non-contacting electromagnetic induction methods, *Can. J. Soil Sci.* 68: 715-722.
- Khakural, B.R., Robert, P.C., Hugins, D.R., 1998. Use of non-contacting electromagnetic inductive method for estimating soil moisture across a landscape. *Commun. Soil Sci. Plant Anal.* 29 (11-14), 2055-2065.
- Leonard, EC., 2016, *Precision Agriculture, Encyclopedia of Food Grains (second edition)*, volume 4, pp: 162-167.
- Mcneill, J., 1980. Electromagnetic terrain conductivity at low induction numbers in Technical Note TN-6, Geonics. Limited, Editor, Canada P. 1-13.
- National Soil Survey Handbook (NSSH), 2015, United States Department of Agriculture, Natural Resources Conservation Service, February.
- Rhoades, J.D., Chanduvi, F., Lesch, S., 1999, Soil salinity assessment (Methods and interpretation of electrical conductivity measurements), *FAO Irrigation and Drainage paper*, ISSN: 0254-5284.
- Sheets, K.R., Hendrickx, J.M.H., 1995. Noninvasive soil water content measurements using electromagnetic induction. *Water Resour. Res.* 31, 2401-2409.



Sherlock, M.D., McDonnell, J.J., 2003, A new tool for hillslope hydrologists: spatially distributed groundwater level and soilwater content measured using electromagnetic induction, *Hydrological Processes*, 17, 1965-1977.

Stafford, J.V., 1980, Remote, non-contact and in-situ measurement of soil moisture content: a review, *Journal of Agricultural Engineering Resources*, 41, pp: 151-172.

Topp, G.C., 1980, Electromagnetic determination of soil water content: measurements in Coaxial Transmission Lines, *Water Resources Research*, 16 (3), pp: 574-582.