

آنالیز حساسیت روش القای الکترومغناطیسی برای تعیین شوری خاک در مقیاس وسیع

یوسف هاشمی نژاد^۱ - مهدی همایی^{۲*} - علی اکبر نوروزی^۳

تاریخ دریافت: ۱۳۹۴/۰۸/۱۶

تاریخ پذیرش: ۱۳۹۴/۱۱/۱۹

چکیده

پایش و مدیریت خاک‌های شور مستلزم اندازه‌گیری دقیق و روزآمد هدایت الکتریکی خاک است. روش مستقیم اندازه‌گیری در مقیاس وسیع نه تنها مستلزم صرف هزینه زیاد بلکه زمان‌بر نیز می‌باشد. لذا استفاده از حسگرهای نزدیک سطح زمین که شوری خاک را با دقتی قابل قبول تعیین کنند، از جهت صرفه‌جویی در وقت و هزینه حایز اهمیت فراوان می‌باشند. یکی از این شیوه‌های نسبتاً نوین روش القای الکترومغناطیس می‌باشد. هدایت الکتریکی ظاهری توده خاک اندازه‌گیری شده به روش القای الکترومغناطیس علاوه بر شوری خاک تحت تاثیر چند ویژگی کلیدی دیگر از جمله رطوبت و مقدار رس خاک می‌باشد. برای ارزیابی حساسیت القای الکترومغناطیس، رطوبت، مقدار رس خاک، هدایت الکتریکی عصاره اشباع خاک و هدایت الکتریکی ظاهری خاک مربوط به ۲ سال در منطقه سبزوار اندازه‌گیری شد. داده‌های نخست که از آن‌ها برای برازش مدل استفاده شد، شامل ۸۲ نقطه اندازه‌گیری هدایت الکتریکی ظاهری و نمونه‌برداری خاک بود که در نمونه‌های اخذ شده هدایت الکتریکی عصاره اشباع، بافت و رطوبت خاک نیز اندازه‌گیری شد. نمونه‌های سال دوم که از آن‌ها برای آزمون مدل استفاده شد، شامل ۲۵ نقطه نمونه‌برداری و ۹ نقطه قرائت هدایت الکتریکی ظاهری در اطراف هر نمونه بود. در نمونه‌های سال دوم تنها هدایت الکتریکی عصاره اشباع خاک اندازه‌گیری شد. نتایج سال اول نشان داد که بین قرائت دستگاه و هدایت الکتریکی عصاره اشباع خاک همبستگی معنی‌داری با ضریب تعیین ۷۸ درصد برقرار است. هر چند رگرسیون چندگانه خطی با در نظر گرفتن رطوبت و مقدار رس خاک موجب ارتقای ضریب تعیین به حدود ۸۰ درصد شد لیکن تاثیر مقدار رس در این مدل چندگانه معنی‌دار نبود. آنالیز حساسیت نیز نشان دهنده حساسیت بیشتر مدل نسبت به رطوبت خاک در مقایسه با مقدار رس خاک بود. از آن‌جا که خطا در برآورد رطوبت خاک منجر به خطای قابل ملاحظه‌ای در برآورد شوری خاک با استفاده از مدل رگرسیون چندگانه می‌شد، در نتیجه در سال دوم تحقیق مدل رگرسیون خطی ساده آزمون گردید. نتایج نشان داد که استفاده از میانگین قرائت ۹ نقطه به جای یک نقطه می‌تواند همبستگی بین هدایت الکتریکی ظاهری و هدایت الکتریکی عصاره اشباع خاک را تا ۹۸ درصد افزایش دهد. در نتیجه با توجه به حساسیت روش به رطوبت خاک دو روش برای افزایش دقت واسنجی پیشنهاد شد: - اندازه‌گیری و واسنجی در شرایط رطوبتی یکسان؛ - تخمین صحرائی رطوبت خاک و تقسیم بندی خاک‌ها به دو دسته مرطوب و خشک و اشتقاق دو دسته روابط واسنجی متفاوت.

واژه‌های کلیدی: رطوبت خاک، رگرسیون چندگانه، شوری خاک، هدایت الکتریکی ظاهری خاک

مقدمه

عنوان هجدهمین کشور بزرگ دنیا تولید کننده ۲۰ درصد تولید ناخالص ملی است در حالی که چالش‌های بزرگی فراوری آن قرار دارد. علاوه بر خشکی که ۹۰ درصد مساحت کشور را در بر گرفته است از خشکسالی، شوری و فرسایش خاک به عنوان مهمترین معضلات کشاورزی ایران یاد می‌شود (۲۳). هر چند که شوری مفهومی وابسته به گیاه است ولی مقدار آن در زمان، مکان و عمق خاک در منطقه ریشه بسیار متغیر است (۸). نقشه‌های مقیاس منطقه‌ای موجود عموماً یا کیفی هستند و یا غیرقابل اتکا (۱۵) و در نتیجه اطلاعات مفید اندکی را در اختیار تولیدکنندگان، مدیران، مروجان، سیاست‌گذاران و تصمیم‌سازان قرار می‌دهد.

احتمالاً به همین دلیل آمارهای متفاوتی از مساحت خاک‌های

خاک شور به خاکی گفته می‌شود که املاح محلول موجود در آن در حدی باشد که موجب سطوح مختلفی از کاهش عملکرد گیاه شود. املاح محلول یا از طریق افزایش مکش اسمزی خاک، یا از طریق سمیت ویژه یون‌ها و یا از طریق اختلال در فرآیندهای متابولیکی گیاه باعث کاهش عملکرد گیاه می‌شوند (۹). بخش کشاورزی ایران به

۱ و ۲- دانش آموخته دکتری فیزیک و حفاظت خاک و استاد گروه خاکشناسی، دانشگاه تربیت مدرس، تهران

*- نویسنده مسئول: (Email: mhomaee@modares.ac.ir)

۳- استادیار، پژوهشگر حفاظت خاک و آب‌خیزداری، تهران

خاک به کار نمی‌روند بلکه کاربردهایی گسترده‌تر از جمله نقشه‌برداری تیپ خاک‌ها، تشخیص محتوای آب خاک و الگوی جریان، ارزیابی تغییرات بافت خاک، فشردگی، ماده آلی، pH، افق‌بندی و چینه‌بندی مواد مادری پیدا کرده است (۵).

روش القای الکترومغناطیس در مقیاس وسیع برای ارزیابی شوری خاک در مزارع غیرهمگن نیز به کار گرفته شده است. کوروین و لش (۳) از این روش در مقیاس چند هزار هکتار تا چند صد هزار هکتار برای ارزیابی وضعیت شوری خاک در ایالت کالیفرنیا استفاده کردند. نتایج آنان نشان داد که با استفاده از متغیر کمکی و آنالیز کوواریانس می‌توان دقت همبستگی‌ها را افزایش داد. سپس با استفاده از همین روش و تصاویر ماهواره‌ای اسکودیرو^۴ و همکاران (۲۹) استراتژی ارزیابی منطقه‌ای شوری خاک را ارائه نمودند.

آنالیز حساسیت درک ما را از پاسخ مدل به تغییرات پارامترهای مجزا افزایش می‌دهد. این گونه اطلاعات هم برای ارزیابی خطاهای بالقوه همراه با عدم قطعیت پارامترها لازم است و هم برای تعیین پارامترهایی که باید با دقت بیشتری اندازه‌گیری شوند (۳۰). رودز و همکاران (۲۵) از آنالیز حساسیت استفاده کردند تا نشان دهند که ارزیابی شوری تا چه حدی وابسته به عدم دقت تخمین‌ها است. آن‌ها از هدایت الکتریکی ظاهری (EC_a) و هدایت الکتریکی گِل اشباع (EC_p) خاک برای تخمین هدایت الکتریکی عصاره اشباع خاک (EC_e) استفاده شد. نتایج نشان داد که مقادیر برخی پارامترهایی که به سادگی نمی‌توان مقدار آن را در مزرعه تعیین کرد مانند جرم مخصوص ظاهری، جرم مخصوص حقیقی، مقدار رس و رطوبت کل و محبوس شده را می‌توان با دقت نسبتاً مناسبی در کاربردهای عملی ارزیابی شوری خاک تخمین زد.

رحیمیان و هاشمی‌نژاد (۲۴) پس از واسنجی دستگاه القاگر الکترومغناطیس نشان دادند که رطوبت خاک عامل تاثیرگذاری بر دقت روابط واسنجی است به نحوی که با افزایش رطوبت خاک، ضریب تعیین روابط رگرسیونی افزایش می‌یابد. به طور مشابه مشکوه و همکاران (۱۷) نیز بر اهمیت رطوبت خاک در اندازه‌گیری شوری به وسیله دستگاه القاگر الکترومغناطیس تاکید کردند و اشاره نمودند که در رطوبت‌های کم ضرایب همبستگی معنی‌داری بین شوری خاک و EC_a پیدا نشده است. با توجه به بررسی فوق حساسیت روابط همبستگی به عوامل ایجادکننده آن در مقیاس وسیع تعیین نشده است. این مقاله به بررسی حساسیت روابط واسنجی به رطوبت و درصد رس خاک پرداخته است. هر چند برخی خصوصیات دیگر خاک مانند درصد ماده آلی نیز بر القای الکترومغناطیس موثرند ولی با توجه به این که در محدوده مورد مطالعه هم مقدار و تغییرپذیری ماده آلی بسیار کم و هم این که اندازه‌گیری آن به عنوان یک پارامتر کمکی

شور و سدیمی کشور ارایه می‌شود که از ۳۰ تا ۵۰ درصد اراضی کشور را شامل می‌شود (۷، ۱۲، ۲۰ و ۲۱). در نتیجه ضرورت دارد تا با استفاده از روش‌های پایش سریع اطلاعات شوری خاک کشور که مربوط به ۲۰ سال قبل است به روزرسانی شود. به این ترتیب اهمیت استفاده از حسگرهای غیرتماسی نزدیک سطح زمین مانند روش القای الکترومغناطیس در این راستا مشخص می‌شود.

اصول اندازه‌گیری هدایت الکتریکی ظاهری خاک به وسیله القای الکترومغناطیس به وسیله رودز و همکاران (۲۷) تشریح شده است. روش القای الکترومغناطیس^۱ از طریق القا کردن یک جریان الکتریکی به داخل خاک به منظور اندازه‌گیری متوسط وزنی شوری خاک (یا هدایت الکتریکی ظاهری خاک^۲) تا عمقی مشخص کاربرد دارد (۱۶). این جریان الکتریکی، میدان الکترومغناطیسی ثانویه‌ای ایجاد می‌کند (۳۱) که می‌تواند به ولتاژ خروجی تبدیل شود که این ولتاژ خروجی رابطه خطی با میانگین وزنی هدایت الکتریکی ظاهری خاک در عمق دارد (۲۶). هدایت الکتریکی ظاهری خاک (EC_a) که به این ترتیب اندازه‌گیری می‌شود تحت تاثیر چندین ویژگی مهم خاک شامل شوری، مقدار و کانی شناسی رس و رطوبت و دما قرار دارد (۶، ۲، ۱۹ و ۳). اندازه‌گیری هدایت الکتریکی ظاهری خاک تبدیل به یک فناوری ارزشمند برای تشخیص الگوی تغییر ویژگی‌های فیزیکی شیمیایی خاک شده که بر الگوی عملکرد گیاه موثر هستند (۴). اطلاعات مربوط به شوری خاک را می‌توان با واسنجی محلی دستگاه القاگر الکترومغناطیس به دست آورد. لش و همکاران (۱۴) و کوروین و لش (۳) از روش واسنجی مستقیم برای ارزیابی شوری در مزارع همگنی که خصوصیات کمابیش مشابهی داشتند استفاده کردند و ضرایب همبستگی بالایی برای هر مزرعه به طور جداگانه به دست آوردند.

در بررسی اثر رطوبت خاک در دقت روابط واسنجی EC_a برویک^۳ و همکاران (۱) دریافتند که رطوبت خاک مهمترین عامل تاثیرگذار بر دقت روابط همبستگی است به نحوی که با خشک شدن خاک شیب و ضریب تعیین روابط رگرسیون تغییر می‌کند.

از آنجا که EC_a هم‌زمان تحت تاثیر ویژگی‌های مختلف خاک است، یافتن تاثیر یک ویژگی واحد خاک بر روی آن دشوار است (۱۹ و ۲۲). در عین حال در دو مطالعه جداگانه کاپانوسکی و همکاران (۱۰ و ۱۱) دریافتند که الگوی مکانی آب دخیله شده در ۵۰ تا ۱۷۰ سانتی‌متر بالایی خاک همبستگی زیادی با الگوی مکانی تغییرات EC_a اندازه‌گیری شده با القای الکترومغناطیس دارد. به همین دلیل، در حال حاضر روش‌های القای الکترومغناطیس تنها برای ارزیابی شوری

1- Electromagnetic Induction Technique

2- Apparent Soil Electrical Conductivity (EC_a)

3- Brevik

مشکل تر از اندازه‌گیری شوری خاک بود، در نتیجه این‌گونه پارامترها وارد مدل نشدند.

مواد و روش‌ها

محدوده مورد مطالعه بخشی از دشت سبزوار- داورزن به وسعت تقریبی ۵۰ هزار هکتار در جنوب غربی شهرستان سبزوار و حاشیه رودخانه فصلی و شور کالشور است. شکل ۱ محدوده مورد مطالعه را در شمال شرقی کشور نشان می‌دهد. برای تعیین موقعیت نقاط نمونه‌برداری خاک از روش فرامکعب لاتین (۱۸) استفاده شد. در این روش، از توزیع احتمال تجمعی عوامل کمکی برای تعیین مناسب‌ترین نقاط نمونه‌برداری استفاده می‌شود. عوامل کمکی برای تعیین نقاط نمونه‌برداری در این مطالعه شامل باندهای تصویر لندست و مدل رقومی ارتفاع (DEM) بودند. بر این اساس موقعیت ۱۰۰ نقطه نمونه‌برداری برای سال اول تحقیق تعیین شد. موقعیت نقاط بر روی سیستم موقعیت‌یاب جهانی (GPS) منتقل و سپس موقعیت نقاط در منطقه دقیقاً مشخص و اندازه‌گیری‌های مربوطه انجام شد.

اندازه‌گیری القای الکترومغناطیس با استفاده از دستگاه EM38 انجام شد. دستگاه EM38 دارای مدارهایی است که واکنش دستگاه نسبت به حساسیت‌های مغناطیسی خاک را به حداقل و واکنش آن نسبت به هدایت الکتریکی را به حداکثر برساند. در این دستگاه فاصله بین سیم‌پیچ‌ها یک متر می‌باشد و توسط جریان با فرکانس $13/2$ کیلوهرتز و ولتاژ ۹ ولت کار می‌کند. قرائت‌های این دستگاه مستقیماً به صورت ECa انجام می‌شود. نحوه قرارگیری سیم پیچ‌ها، فرکانس و فاصله بین دو سیم پیچ بر این اساس انتخاب شده است که بتوان مقادیر ECa در اعماق موثر ۱ و ۲ متری از سطح زمین هنگامی که دستگاه در وضعیت‌های افقی و عمودی بر روی زمین قرار گرفته است را قرائت نمود. مدل‌های دیگری از دستگاه EM قادرند که اندازه‌گیری‌ها را در اعماق بیشتری نیز انجام دهند (۲۷).

از ۱۰۰ نقطه سال اول در ۸۲ نقطه در سه عمق (۲۴۶ نمونه) آن هم نمونه‌برداری و هم قرائت دستگاه EM38 (ECa) انجام شد، ۱۵ نقطه به دلیل خشکی زیاد خاک قابل نمونه‌برداری نبودند و برای آن‌ها فقط قرائت دستگاه EM38 انجام شد. این ۹۷ نقطه برای تعیین الگوی پراکنش مکانی شوری و مدل‌سازی مکانی مورد استفاده قرار گرفتند. همچنین سه نقطه قابل دسترسی نبودند. برای قرائت دستگاه EM38 پس از واسنجی مزرعه‌ای دستگاه در محل، دستگاه در وضعیت افقی^۲ روی سطح خاک قرار داده شد و اندازه‌گیری انجام گرفت. نمونه‌های خاک در فواصل ۳۰ سانتی‌متری تا عمق ۹۰ سانتی‌متری برداشت شدند. نمونه‌ها به آزمایشگاه منتقل و پس از

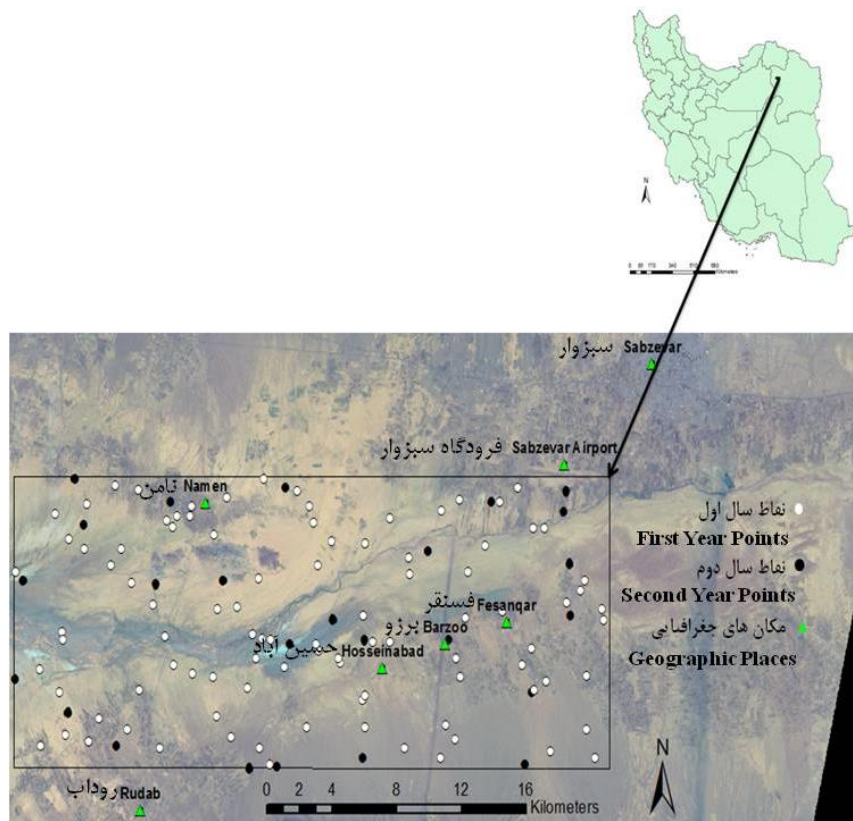
خشک و الک کردن هدایت الکتریکی، درصد شن، سیلت، رس و رطوبت خاک اندازه‌گیری شد. هدایت الکتریکی در عصاره اشباع (ECe) از طریق تهیه گل اشباع و استخراج عصاره پس از ۲۴ ساعت به وسیله پمپ مکش (۲۸) اندازه‌گیری شد. درصد ذرات شن، سیلت و رس به روش هیدرومتری (قرائت ۴۰ ثانیه و ۶ ساعت) و رطوبت خاک از طریق خشک کردن در دمای ۱۰۵ درجه سانتی‌گراد به مدت ۲۴ ساعت اندازه‌گیری شد (۱۳).

رابطه موجود بین شوری عصاره اشباع خاک و قرائت دستگاه EM38 با استفاده از رگرسیون خطی ساده به دست آمد. روابط حاصله با استفاده از رگرسیون چند متغیره به کمک متوسط درصد رس و رطوبت خاک اصلاح شده و ارتقا یافتند. آنالیز حساسیت مدل توسعه یافته انجام تا مشخص شود که مدل نسبت به کدامیک از پارامترهای ورودی حساس تر است. سپس برای ارزیابی صحت روابط اشتقاق یافته نمونه‌برداری سال دوم با تراکم ۲۵ نقطه انجام شد. به طریق مشابه نقاط نمونه‌برداری با استفاده از تکنیک فرامکعب تعیین و با استفاده از GPS موقعیت نقاط پیدا شدند. در هر موقعیت نمونه‌برداری در سال دوم افزون بر موقعیت مرکز نقطه که هم قرائت دستگاه EM38 و هم نمونه‌برداری خاک انجام می‌شد، در هشت نقطه در اطراف مرکز نیز فقط قرائت دستگاه EM38 انجام می‌شد. این هشت نقطه در امتداد چهار جهت جغرافیایی اصلی و در فواصل ۳۰ و ۶۰ متری نسبت به نقطه مرکز قرار داشتند. در مجموع در سال دوم تعداد ۲۲۱ نقطه قرائت وجود داشت (برخی نقاط قرائت EM38 در سال دوم دارای شرایطی متفاوت از نقطه مرکزی بودند که از آن‌ها صرف‌نظر شد) که از ۲۵ نقطه در سه عمق با فواصل ۳۰ سانتی‌متری تا عمق ۹۰ سانتی‌متری (۷۵ نمونه خاک) نمونه‌های خاک اخذ شدند. با استفاده از روابط استخراج شده از سال اول شوری خاک در نقاط فاقد نمونه خاک پیش‌بینی شده و سپس رابطه بین مقادیر شوری و مقادیر قرائت دستگاه EM38 تعیین شد.

نتایج و بحث

جدول ۱ خلاصه آمار توصیفی خصوصیات مورد اندازه‌گیری در دو سال را نشان می‌دهد. همان‌گونه که مشاهده می‌شود علی‌رغم تفاوت تعداد نمونه‌های اخذ شده و محل‌های نمونه‌برداری در دو سال، میانگین و انحراف معیار هدایت الکتریکی عصاره اشباع و نیز هدایت الکتریکی ظاهری خاک در دو سال کمابیش مشابه هم است.

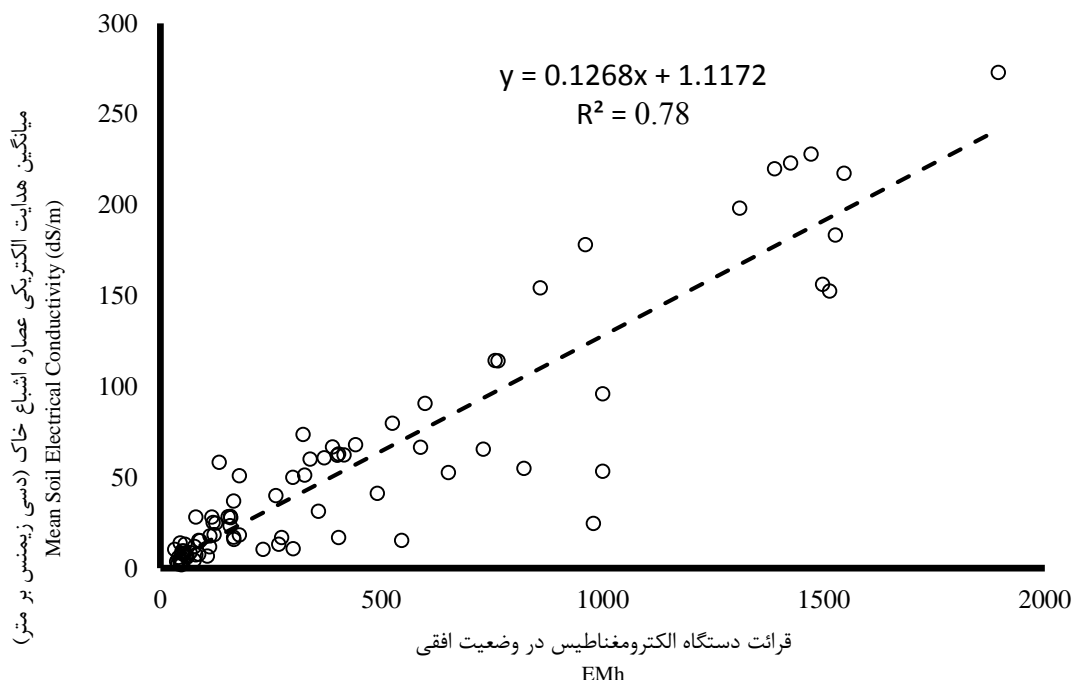
شکل ۲ همبستگی بین قرائت دستگاه EM-38 در وضعیت افقی (EMh) و میانگین هدایت الکتریکی عصاره اشباع خاک تا عمق ۹۰ سانتی‌متری را برای داده‌های سال اول نشان می‌دهد. ضریب تعیین ۷۸ درصد و شیب خط رگرسیون $0/13$ است.



شکل ۱- موقعیت محدوده مورد مطالعه واقع در دشت سبزوار- داورزن، خراسان رضوی بر روی ترکیب رنگ کاذب تصویر لندست ۸
 Figure 1- Location of study area on Sabzevar- Davarzan plain, Khorasan Razavi on Landsat 8 False Color Composite (FCC) Image

جدول ۱- خلاصه آمار توصیفی خصوصیات مورد اندازه گیری در دو سال
 Table 1- Summary of descriptive statistics for measured characteristics in two years

سال Year	متغیر Variable	تعداد Number	میانگین Mean	انحراف معیار Std. Dev.	حداقل Min	حداکثر Max	چولگی Skewness	کشیدگی Kurtosis
اول First	هدایت الکتریکی عصاره اشباع (دسی زیمنس بر متر) Electrical conductivity of saturated extract (dS/m)	246	59.90	67.84	1.93	271.04	1.45	1.05
	هدایت الکتریکی ظاهری (دسی زیمنس بر متر) Bulk electrical conductivity (dS/m)	97	407	463.6	31	1864	1.45	1.03
	مقدار رس (%) Clay Content (%)	246	26.15	10.79	7.44	48.86	0.33	-0.48
	درصد رطوبت Moisture Percent	246	12.73	10.07	1.42	37.68	1.26	0.7
دوم Second	هدایت الکتریکی عصاره اشباع (دسی زیمنس بر متر) Electrical conductivity of saturated extract (dS/m)	75	58.9	66.5	5.2	256.8	1.49	1.9
	هدایت الکتریکی ظاهری (دسی زیمنس بر متر) Bulk electrical conductivity (dS/m)	221	421.2	412.7	37	1672	1.34	0.93



شکل ۲- رابطه همبستگی بین قرائت دستگاه الکترومغناطیس در وضعیت افقی (EMh) و میانگین هدایت الکتریکی عصاره اشباع خاک تا عمق ۹۰ سانتی متری

Figure 2- Correlation between electromagnetic device at horizontal orientation (EMh) and mean soil electrical conductivity down to 90 cm depth

ظاهری خاک (ECa) از این متغیرها به همراه قرائت EMh در رگرسیون چندمتغیره استفاده شد. بدیهی است برای رگرسیون هدایت الکتریکی عصاره اشباع در مقابل هدایت الکتریکی ظاهری خاک باید از مقادیر شوری، درصد رطوبت و درصد رس سه نمونه خاک میانگین گرفته می‌شد تا در مقابل یک قرائت دستگاه در همان محل قرار گیرد. در نتیجه تعداد کل نقاط ۸۲ نقطه و درجه آزادی آن ۸۱ است. درجه آزادی رگرسیون برابر ۳ است. جدول ۲ نتایج تجزیه واریانس رگرسیون چندگانه را نشان می‌دهد.

رحیمیان و هاشمی‌نژاد، (۲۴) مقدار ضریب تعیین بین قرائت دستگاه و متوسط شوری خاک تا عمق ۹۰ سانتی متری را ۶۴ درصد برای خاک‌های با رطوبت وزنی متوسط ۲۵ درصد و ۸۳ درصد برای خاک‌های با رطوبت وزنی متوسط ۳۵ درصد گزارش کردند. همچنین شیب خط رگرسیون برای قرائت وضعیت افقی دستگاه در هر دو حالت ۰/۱۴ بود که بسیار به نتایج این تحقیق نزدیک است. به منظور بهبود روابط همبستگی با در نظر گرفتن رطوبت خاک و مقدار رس به عنوان موثرترین عوامل موثر بر هدایت الکتریکی

جدول ۲- نتایج تجزیه واریانس رگرسیون چندگانه خطی

Table 2- Analysis of variance of multiple linear regression

منبع تغییرات	درجه آزادی	مجموع مربعات	میانگین مربعات	آماره فیشر F
Source of Variation	Degree of Freedom	Sum of Squares	Mean Squares	Fisher Statistics F
رگرسیون	3	297724	297724	103.0865**
باقیمانده	78	75090.62	75090.62	
کل	81	372814.7	372814.7	

مقادیر ضرایب مدل رگرسیون چندگانه، خطای استاندارد و سطح معنی‌داری این متغیرها در جدول ۳ ارائه شده است. بر این اساس تاثیر عرض از مبدا در رگرسیون چندگانه خطی و تاثیر درصد رس (C) در سطح ۹۵ درصد معنی‌دار نبوده لیکن تاثیر قرائت دستگاه در وضعیت

بر این اساس رابطه رگرسیون چندگانه در سطح ۹۹ درصد معنی‌دار است. ضریب همبستگی (r) رگرسیون چندگانه به ۸۹ درصد و ضریب تعیین (R²) رگرسیون به ۸۰ درصد تغییر یافت، که نسبت به ضریب تعیین ۷۸ درصد برای رگرسیون خطی ساده بهبود یافته است.

رس خاک تنها در صورتی اتفاق می افتد که در حضور رطوبت کافی نقاط تماس بین ذرات خاک و سطح مقطع جریان الکترومغناطیس افزایش یابد. در نتیجه تاثیر رس بر هدایت الکتریکی ظاهری خاک وابسته به رطوبت خاک و همچنین نوع کانی رسی است.

افقی (EMh) در سطح ۹۹ درصد و مقدار رطوبت خاک (θ) در سطح ۹۵ درصد معنی دار بوده است. افزایش رطوبت خاک به طور مستقیم هدایت الکتریکی ظاهری خاک را افزایش می دهد، حال آن که افزایش هدایت الکتریکی ظاهری خاک در اثر افزایش به علت افزایش مقدار

جدول ۳- ضرایب مدل رگرسیون چندگانه خطی، خطای استاندارد و سطوح معنی داری آن‌ها
Table 3- Coefficients of Multiple Linear Regression Model, Standard Error and significant levels

متغیر Variable	ضرایب Coefficients	خطای استاندارد Std. Error	سطح احتمال معنی داری Significant Level
Constant عرض از مبدا	3.78	10.20	0.71
EMh	0.14**	0.01	9.4×10^{-16}
مقدار رس C Clay Percent	0.46	0.43	0.29
درصد رطوبت θ Moisture Percent	-1.36*	0.58	0.02

تغییر رطوبت خاک بسیار بیشتر از تغییر درصد رس خاک است. با افزایش رطوبت خاک و کاهش درصد رس در مقادیر کم EMh مقدار شوری خاک با عدد منفی ظاهر می شود که صحیح نمی باشد. به نحوی که در شرایط این تحقیق در رطوبت‌های ۴۰، ۳۵، ۲۵ و ۱۵ درصد مقدار قرائت EMh نمی تواند به ترتیب کمتر از ۲۷۰، ۲۱۰، ۱۲۰ و ۳۰ باشد. این نکته نشان می دهد که در هر کدام از این مقادیر رطوبت، مقداری از هدایت الکتریکی ظاهری توده خاک (ECa) مربوط به رطوبت خاک است که با افزایش درصد رطوبت این سهم از کل ECa افزایش می یابد. رابطه همبستگی بین این مقادیر با ضریب تعیین $99/7$ درصد به صورت زیر به دست آمد:

$$EM_h = 9.45\theta - 114.41 \quad (2)$$

معادله ۲ محور افقی (درصد رطوبت) را در نقطه ۱۲ درصد قطع می کند. یعنی اگر رطوبت خاک زیر ۱۲ درصد باشد، مقدار EMh باید بالای ۱۱۴٫۴۱ باشد تا میزان شوری خاک منفی برآورد نشود. در نتیجه صرف نظر از عدد قرائت EMh استفاده از معادله ۱ (در شرایط متوسط درصد رس حدود ۲۶ درصد) زیر رطوبت ۱۲ درصد قابل توصیه نیست. همچنین به طریق مشابه در صورتی که درصد رس خاک حداقل ۱۳ درصد باشد مقدار قرائت EMh حداقل باید ۴۰ باشد تا میزان شوری خاک منفی برآورد نشود.

جدول ۴ ریشه مربعات خطا^۱ (RMSE) و خطای اریبی میانگین^۲ (MBE) را برای شرایطی که رطوبت خاک و درصد رس خاک با خطای مثبت و منفی ۲۰ درصد برآورد شوند نشان می دهد. هر چند بر پایه جدول ۲ تاثیر درصد رس در ارتقای ضریب تعیین رگرسیون چندگانه خطی معنی دار نیست.

هر چند در مدل رگرسیون چندگانه فوق مقدار عرض از مبدا اختلاف آماری معنی داری با مقدار صفر ندارد ولی در مدل ظاهر شده و باعث می شود داده های پیش بینی به مقادیر واقعی نزدیک تر شوند. به همین ترتیب در مورد شیب پارامتر مقدار رس نیز هر چند مقدار $0/46$ اختلاف آماری معنی داری با صفر ندارد ولی حضور آن در مدل موجب ارتقای ضریب تعیین و نیز سطح معنی داری مدل می شود. لذا تحلیل حساسیت نیز بر روی هر دو پارامتر مقدار رس و درصد رطوبت انجام گرفت.

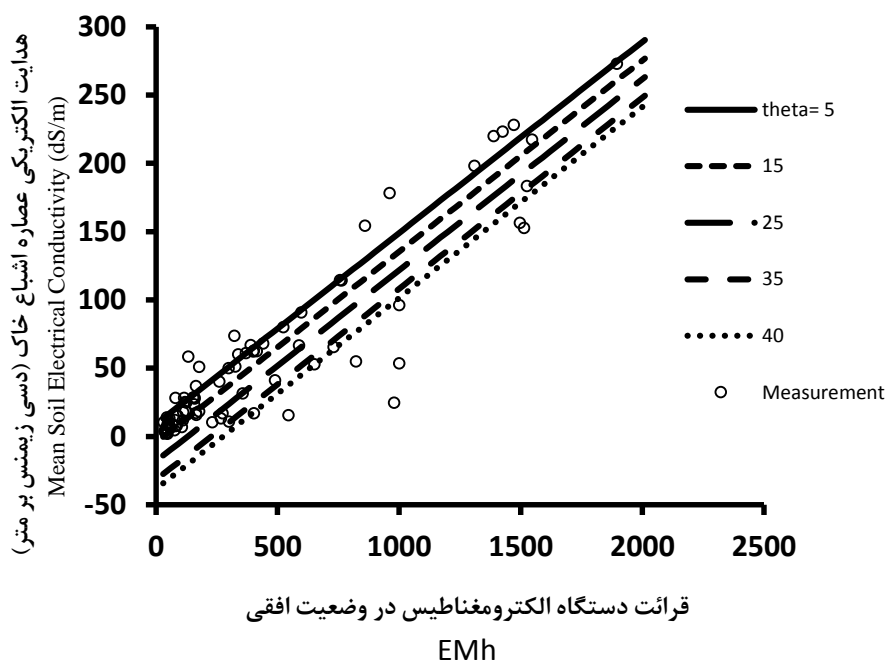
معادله رگرسیون چندگانه حاصله به صورت زیر است:

$$EC_e = 3.78 + 0.14 \times EM_h + 0.46 \times C - 1.36 \times \theta \quad (1)$$

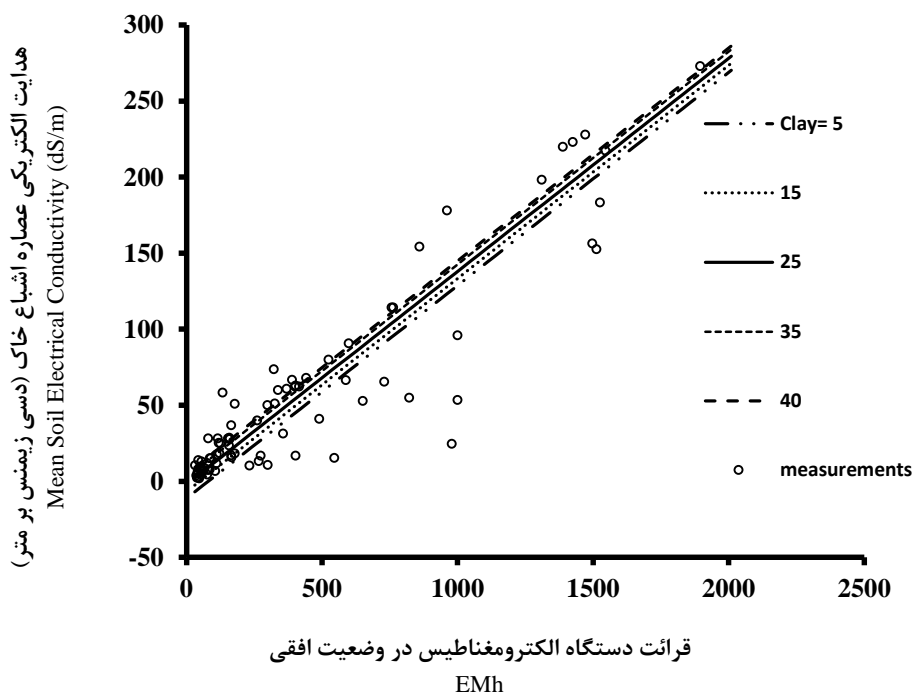
در معادله فوق تاثیر درصد رطوبت با علامت منفی ظاهر شده است. هر چند رابطه رطوبت خاک با هدایت الکتریکی ظاهری خاک مستقیم است ولی در هنگام برآورد هدایت الکتریکی از روی هدایت الکتریکی ظاهری بایستی بخشی از هدایت الکتریکی ظاهری که به دلیل رطوبت ایجاد شده است از مقدار برآورد شده شوری کم شود و در نتیجه در معادله با علامت منفی ظاهر شده است. بدیهی است اگر متغیر وابسته هدایت الکتریکی ظاهری بود انتظار می رفت که رطوبت خاک با علامت مثبت در مدل ظاهر شود.

برای تحلیل حساسیت معادله ۱ نخست دامنه تغییرات درصد رس و مقدار رطوبت خاک مشخص شد و سپس یک بار با تغییر دادن رطوبت خاک در دامنه تغییرات و ثابت نگه داشتن درصد رس در مقدار میانگین، نمودارهای مربوطه رسم شدند آنگاه با ثابت نگه داشتن رطوبت خاک در مقدار میانگین و تغییر درصد رس در دامنه تغییرات نمودارهای مشابه تهیه گردید. آنالیز حساسیت برای درصد رطوبت در شکل ۳ و برای درصد رس در شکل ۴ نشان داده شده است. مقایسه این دو شکل با یکدیگر نشان می دهد که حساسیت معادله ۱ نسبت به

1- Root Mean Square Error
2- Mean Bias Error



شکل ۳- آنالیز حساسیت معادله ۱ نسبت به تغییر درصد رطوبت خاک
Figure 3- Sensitivity analysis of equation 1 to changes in soil moisture percent



شکل ۴- آنالیز حساسیت معادله ۱ نسبت به تغییر درصد رس خاک
Figure 4- Sensitivity analysis of equation 1 to changes in soil clay percent

درصد می‌تواند در مدل ایجاد شود. همچنین خطا در برآورد رطوبت خاک می‌تواند تا ۶۵ درصد بیش‌برآورد شوری با استفاده از رابطه ۱

لیکن در صورت استفاده از رابطه ۱ برای برآورد شوری خاک و ۲۰ درصد خطا در تخمین مقدار رس خاک، میزان بیش‌برآوردی تا ۶۳

خطا می‌باشد که اگر این خطا به ۲۰ درصد برسد، می‌تواند تا حدود ۶۵ درصد بیش برآورد ایجاد کند. به همین دلیل در سال دوم پژوهش تنها از اندازه‌گیری ECa در ۲۲۱ نقطه و نمونه‌برداری خاک در ۲۵ نقطه استفاده شد. در هر نقطه نمونه‌برداری در سال دوم یک قرائت EM38 انجام شد. ضمن اینکه از ۸ نقطه به فواصل ۳۰ متری در چهار طرف نقطه مرکزی نیز ۸ قرائت EM38 انجام گرفت. با استفاده از رابطه به دست آمده در شکل ۲ مقادیر قرائت EM38 به شوری عصاره اشباع خاک تبدیل شد. رابطه همبستگی بین مقادیر هدایت الکتریکی عصاره اشباع خاک اندازه‌گیری شده در مرکز موقعیت نمونه‌برداری با مقدار محاسبه شده از روی قرائت EM38 در نقطه مرکز در شکل ۵ (الف) و رابطه بین مقدار شوری خاک اندازه‌گیری شده در مرکز با مقدار شوری خاک محاسبه شده از روی قرائت EM38 در ۹ نقطه حول نقطه مرکزی در شکل ۵ (ب) نشان داده شده است. همان گونه که مشخص است، استفاده از میانگین ۹ قرائت ECa به جای یک قرائت، دقت تخمین شوری خاک از روی هدایت الکتریکی ظاهری خاک را افزایش می‌دهد. همان گونه که در جدول ۳ نیز مشخص بود، بیشترین وابستگی تخمین شوری خاک به عدد EMh می‌باشد. در نتیجه استفاده از میانگین ۹ نقطه به جای یک نقطه از واریانس تغییرات این مقدار کاسته و تخمینی نزدیک‌تر به واقعیت ارائه می‌نماید.

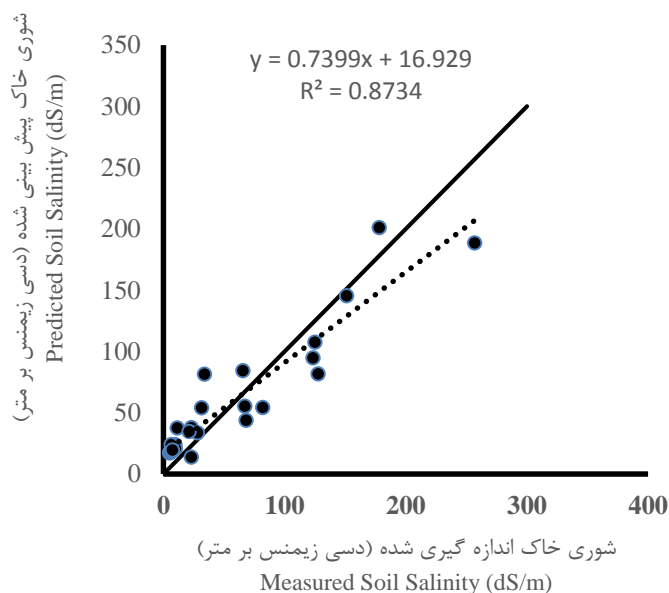
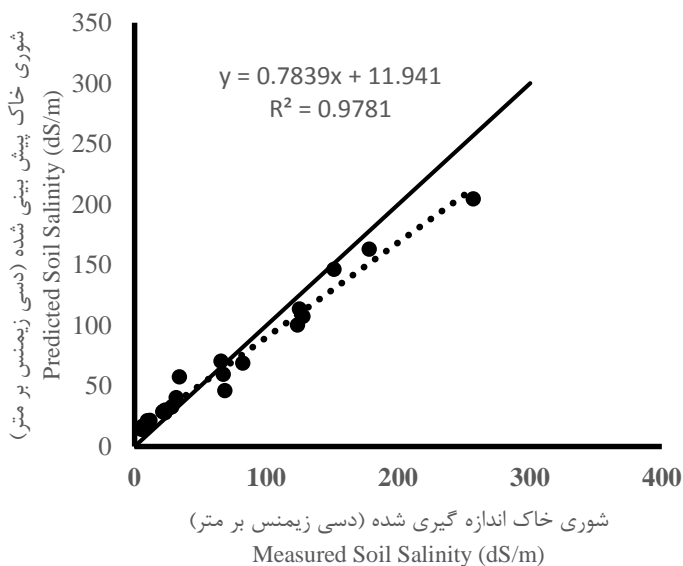
ایجاد نماید. در نتیجه رابطه ۱ به کم برآورد رطوبت و بیش برآورد درصد رس خاک بسیار حساس‌تر است.

جدول ۴- خطای برآورد شوری خاک با استفاده از رابطه ۱ در مقادیر

اندازه‌گیری شده و ۲۰ درصد کمتر و بیشتر از مقادیر اصلی
Table 4- Soil salinity estimates residuals using equation 1 at its original values and 20% upper and lower than original values

آماره ارزیابی خطای برآورد Residual Statistics	میانگین مربعات خطا RMSE (%)	خطای چولگی میانگین MBE (%)
رابطه ۱ با استفاده از مقادیر اندازه‌گیری شده		
Equation 1 with original values	159	50
$\theta + 20\%$ رطوبت + ۲۰٪	149	35
$\theta - 20\%$ رطوبت - ۲۰٪	173	65
C+20% رس + ۲۰٪	174	63
C-20% رس - ۲۰٪	147	37

با توجه به مطالب فوق، به رغم اینکه رطوبت خاک عاملی موثر در تعیین شوری خاک با استفاده از هدایت الکتریکی ظاهری است لیکن تخمین آن در مزرعه افزون بر زمان بر بودن همراه با مقداری



شکل ۵- روابط بین مقادیر شوری خاک اندازه‌گیری شده در مرکز با مقدار شوری خاک محاسبه شده از روی قرائت EM38 در نقطه مرکز (راست) و همبستگی بین مقدار شوری خاک اندازه‌گیری شده در مرکز با مقدار شوری خاک محاسبه شده از روی قرائت EM38 در ۹ نقطه حول نقطه مرکزی (چپ). خطوط پررنگ نشان دهنده رابطه ۱:۱ هستند

Figure 5- Relationships between measured soil salinity and predicted from EM38 reading at the center (right) and predicted from 9 points EM38 readings around the center (left). Solid lines show 1:1 relation

نتیجه گیری کلی

به عنوان نتیجه گیری نهایی در موقع استفاده از روش القای الکترومغناطیس برای تعیین شوری خاک با توجه به حساسیت روابط واسنجی به رطوبت خاک و راه کار قابل استفاده است. نخست انجام واسنجی در هر رطوبت به صورت جداگانه است. این پیشنهاد تنها در مقیاس مزرعه قابل کاربرد است و به این ترتیب می توان قطعاتی را که زمان مشابهی از آبیاری آن ها گذشته است و خاک کمابیش مشابهی دارند در یک رابطه واسنجی مشابه کالیبره نمود. راه کار دوم تخمین رطوبت خاک در مزرعه است. از آنجا که قرار است روش پس از واسنجی کمترین اتکا را به نمونه برداری مستقیم داشته باشد و همچنین واسنجی آن به رطوبت خاک حساس است در نتیجه شاید بتوان با تخمین صحرایی آن، رطوبت خاک را نیز به عنوان یک تخمین گر وارد مدل واسنجی کرد. این راه کار مستلزم کسب تجربه کاربر است و ممکن است برای کاربران مختلف نتایج متفاوتی را ارایه نماید. در نهایت تقسیم بندی خاک ها به رطوبت های کم و زیاد، هر چند ممکن است تخمین تقریبی رطوبت در مزرعه امکان پذیر نباشد ولی می توان با مشاهده خاک آن را در دسته خاک های خشک و یا مرطوب قرار داد و سپس از روابط واسنجی متفاوتی برای هر کدام از این دو دسته استفاده کرد. البته باید دقت شود که قرار دادن یک معیار کمی بر مبنای درصد رطوبت خاک برای تقسیم بندی آن به دو دسته خشک و مرطوب چندان عملی نیست چرا که احساس افراد از خشک و مرطوب بودن خاک ها علاوه بر درصد رطوبت به درصد اشباع خاک نیز وابسته است که خود تابعی از بافت خاک است.

همچنین با قرائت ۸ نقطه به فاصله ۳۰ متری در چهار طرف نقطه مرکزی، مساحتی حدود ۱/۴ هکتار در اطراف نقطه مرکزی اسکن می شود که در بررسی روابط بین شوری خاک با مقادیر پارامترها و اندیس های استخراج شده از روی تصاویر ماهواره ای به دلیل استفاده از میانگین ۱۶ پیکسل به جای یک نقطه، روابط همبستگی را ارتقا خواهد داد.

تبدیل هدایت الکتریکی ظاهری خاک به شوری عصاره اشباع خاک در این تحقیق وابستگی معنی داری به درصد رطوبت خاک داشت در حالی که این وابستگی به درصد رس خاک معنی دار نبود. با توجه به این که عمده رسانایی الکتریکی ظاهری خاک از فاز محلول انجام می شود، در نتیجه با افزایش رطوبت خاک مقدار هدایت الکتریکی ظاهری خاک نیز افزایش می یابد. همچنین درصد رس خاک با نگهداری رطوبت خاک وابستگی مستقیمی دارد. این نتیجه با نتایج کاجانوسکی و همکاران (۱۰ و ۱۱)؛ رحیمیان و هاشمی نژاد (۲۴)؛ میسرا و پادهی (۱۹) و پادهی و میسرا (۲۲) نیز همبستگی دارد. نتایج آنالیز حساسیت نیز حاکی از تغییرات شدیدتر شوری خاک به ازای تغییرات رطوبت خاک در محدوده این مطالعه بود تا تغییرات مقدار رس خاک. با توجه به این که در روش الکترومغناطیسی و پس از واسنجی آن، نمونه خاک گرفته نخواهد شد، در نتیجه به رغم حساسیت روش به رطوبت خاک، خطا در برآورد رطوبت منجر به خطای قابل ملاحظه ای در برآورد شوری خاک می شود. بر این اساس در صورتی که تعداد اندازه گیری های هدایت الکتریکی ظاهری خاک در هر نقطه به جای یک قرائت به ۹ قرائت افزایش یابد، ضریب تعیین رگرسیون تا حدود ۹۸ درصد قابل افزایش است. استفاده از این روش دقت درون یابی و نیز مدل کردن تغییرات شوری خاک با استفاده از تصاویر ماهواره ای را نیز افزایش می دهد.

منابع

- 1- Brevik E.C., Fenton T.E., and Lazari A. 2006. Soil electrical conductivity as a function of soil water content and implication for soil mapping. *Precision Agric.* 7: 393- 404.
- 2- Corwin D.L., and Lesch S.M. 2005. Apparent soil electrical conductivity measurements in agriculture. *Computers and Electronics in Agriculture.* 46: 11- 43
- 3- Corwin D.L., and Lesch S.M. 2014. A simplified regional-scale electromagnetic induction— Salinity calibration model using ANOCOVA modeling techniques, *Geoderma*, 230- 231: 288- 295.
- 4- Corwin D.L., Lesch S.M., Shouse P.J., Soppe R., and Ayars J.E. 2003. Identifying soil properties that influence cotton yield using soil sampling directed by apparent soil electrical conductivity. *Agronomy Journal.* 95 (2), 352- 364.
- 5- Doolittle J. A., and Brevik E.C. 2014. The use of electromagnetic induction techniques in soils studies, *Geoderma*, 223- 225: 33- 45.
- 6- Friedman S.P. 2005. Soil properties influencing apparent electrical conductivity: a review. *Computer Electronic Agriculture.* 46, 45- 70.
- 7- Ghassemi F., Jakeman A.J., and Nix H.A. 1995. Salinisation of land and water resources: Human causes, management and case studies. University of New South Wales Press, Sydney, Australia.
- 8- Homae M., and Schmidhalter U. 2008. Water integration by plants root under non- uniform soil salinity. *Irrigation*

- Science. 27 (1): 83- 95.
- 9- Homae M. 2002. Plants Response to Salinity. Iranian National Committee on Irrigation and Drainage (IRNCID). 105 pp. (in Persian).
 - 10- Kachanoski R.G., De Jong E., and Van Wesenbeck I.J. 1990. Field scale patterns of soil water storage from non-contacting measurements of bulk electrical conductivity. *Canadian Journal of Soil Science*. 70, 537– 541.
 - 11- Kachanoski R.G., Gregorich E.G., and Van Wesenbeck I.J. 1988. Estimating spatial variations of soil water content using non contacting electromagnetic inductive methods. *Canadian Journal of Soil Science*. 68, 715– 722.
 - 12- Khorsandi F., Vaziri J., and Azizi Zohan A.K. 2010. Haloculture: Sustainable Use of Saline Soil and Water Resources in Agriculture. Iranian National Committee on Irrigation and Drainage, Tehran, Iran. 320 pp. (in Persian).
 - 13- Klute A. 1986. *Methods of Soil Analysis. Part 1. Physical and Mineralogical Methods*. CAB Direct. 1188 pp.
 - 14- Lesch S.M., Strauss D.J., and Rhoades J.D. 1995. Spatial prediction of soil salinity using electromagnetic induction techniques: 1. Statistical prediction models. Comparison of multiple linear regression and cokriging. *Water Resources Research*. 31, 373– 386.
 - 15- Lobell D.B., Lesch S.M., Corwin D.L., Ulmer M.G., Anderson K.A., Potts D.J., Doolittle J. A., Matos M.R., and Baltas M.J. 2010. Regional scale assessment of soil salinity in the Red River valley using multi- year MODIS EVI and NDVI. *Journal of Environmental Quality*. 39 (1): 35- 41.
 - 16- McNeill J.D. 1980. Electrical conductivity of soil and rocks. Technical Note TN-5, Geonics Ltd., Mississauga, Ontario, Canada.
 - 17- Meshkat M.A., Rahimian M.H., and Taghizadeh-Mehrjardi R.H. 2013. Investigation of EM38 accurassy for monitoring of soil salinity and its comparing with traditional method (Case study: Yazd-Ardakan plain). *Arid Biom Scientific and Research Journal*. 3 (2): 72- 83. (in Persian with English abstract).
 - 18- Minasny B., and McBratney A.B. 2006. A conditioned Latin hypercube method for sampling in the presence of ancillary information. *Computers and Geosciences*, 32: 1378– 1388.
 - 19- Misra R.K., and Padhi J. 2014. Assessing field-scale soil water distribution with electromagnetic induction method. *Journal of Hydrology*. 516: 200– 209.
 - 20- Moameni A. 2011. Geographical Distribution and Salinity Levels of Soil Resources of Iran. *Soil Research (Salinity Issue)*. 24 (3): 203- 216. (in Persian with English abstract).
 - 21- Noroozi A.A., Homae M., and Farshad A. 2012. Integrated application of remote sensing and spatial statistical models to the identification of soil salinity: A case study from Garmsar plain, Iran. *Environmental Sciences*. 9 (1): 59- 74.
 - 22- Padhi J., and Misra R.K. 2011. Sensitivity of EM38 in determining soil water distribution in an irrigated wheat field. *Soil and Tillage Research*. 117, 93– 102.
 - 23- Qadir M., Qurshi A.S., and Cheraghi S.A.M. 2007. Extent and characterization of salt-affected soils in Iran and strategies for their amelioration and management. *Land Degradation and Development*. International Water Management Institute. 30p. (IWMI Working Paper 125).
 - 24- Rahimian M.H., and Hasheminejhad Y. 2011. Calibration of Electromagnetic Induction Device (EM38) for Soil Salinity Assessment. 24 (3): 243- 252. (in Persian with English abstract).
 - 25- Rhoades J. D., Waggoner B. L., Shouse P.J., and Alves W.J. 1989. Determining soil salinity from soil and soil-paste electrical conductivities: Sensitivity analysis of models. *Soil Science Society of America*. 53 (5): 1368- 1374.
 - 26- Rhoades J.D. 1992. Instrumental field methods of salinity appraisal. In: *Advances in Measurements of Soil Physical Properties: Bringing Theory into Practice*, SSSA Special Publication 30. ASA, CSSA, SSSA, Madison, WI, USA, pp. 231– 248.
 - 27- Rhoades J.D., Chanduvi F., and Lesch S. 1999. Soil salinity assessment, methods and interpretation of electrical conductivity measurements. *FAO Irrigation and Drainage Paper* 57.
 - 28- Richards L.A. 1954. *Diagnosis and Improvement of Saline and Alkali Soils*. Agric. Handbook no. 60, USDA.
 - 29- Scudiero E., Skaggs T.H., and Corwin D.L. 2014. Regional scale soil salinity evaluation using Landsat 7, western San Joaquin Valley, California, USA, *Geoderma Regional*, 2– 3: 82- 90.
 - 30- Suarez D.L., and Simunek J. 1993. Modeling carbon dioxide transport and production in soil. 2. Parameter selection, sensitivity analysis and comparison of model predictions to field data. *Water Resources Research*. 29 (2): 499- 513.
 - 31- Tromp-van Meerveld H.J., and Mc Donnell J.J. 2009. Assessment of multi-frequency electromagnetic induction for determining soil moisture patterns at the hillslope scale. *J. Hydrol*. 368, 56– 67.

Sensitivity Analysis of Electromagnetic Induction Technique to Determine Soil Salinity in Large -Scale

Y. Hasheminejad¹- M. Homae^{2*}- A.A. Noroozi³

Received: 07-11-2015

Accepted: 08-02-2016

Introduction: Monitoring and management of saline soils depends on exact and updatable measurements of soil electrical conductivity. Large scale direct measurements are not only expensive but also time consuming. Therefore application of near ground surface sensors could be considered as acceptable time- and cost-saving methods with high accuracy in soil salinity detection. . One of these relatively innovative methods is electromagnetic induction technique. Apparent soil electrical conductivity measurement by electromagnetic induction technique is affected by several key properties of soils including soil moisture and clay content.

Materials and Methods: Soil salinity and apparent soil electrical conductivity data of two years of 50000 ha area in Sabzevar- Davarzan plain were used to evaluate the sensitivity of electromagnetic induction to soil moisture and clay content. Locations of the sampling points were determined by the Latin Hypercube Sampling strategy, based on 100 sampling points were selected for the first year and 25 sampling points for the second year. Regarding to difficulties in finding and sampling the points 97 sampling points were found in the area for the first year out of which 82 points were sampled down to 90 cm depth in 30 cm intervals and all of them were measured with electromagnetic induction device at horizontal orientation. The first year data were used for training the model which included 82 points measurement of bulk conductivity and laboratory determination of electrical conductivity of saturated extract, soil texture and moisture content in soil samples. On the other hand, the second year data which were used for testing the model integrated by 25 sampling points and 9 bulk conductivity measurements around each point. Electrical conductivity of saturated extract was just measured as the only parameter in the laboratory for the second year samples.

Results and Discussion: Results of the first year showed a significant correlation between electrical conductivity and apparent conductivity with a regression coefficient of 0.78. Although multiple linear regression by inclusion of soil moisture and clay content as independent variables improved the regression coefficient to 0.80 but the effect of clay content was not significant in this multiple model. Sensitivity analysis by maintaining one variable at its average value and changing the second variable also showed greater sensitivity of the model to soil moisture in comparison with soil clay content. Generally under estimation of soil moisture and over estimation of soil clay content produced about 63 to 65 percent Mean Bias Error (MBE) while over estimation of soil moisture and under estimation of soil clay content produced about 35- 37 percent of MBE. So the model is quite sensitive to both parameters and they cannot be estimated in the field by feeling and the other field methods. Simple linear regression model between ECe and EMh was tested on the second year because the errors in estimating soil moisture could be imposed a significant error on estimating soil salinity. Once the model was tested for estimation of soil salinity in the central point based on EMh reading at the center and then it was tested for estimation of soil salinity based on the average EMh of 9 points in each location. Results showed that the correlation between soil salinity and apparent soil electrical conductivity could be improved to 0.98 using the average of 9 measurements instead of 1 measurement.

Conclusion: Based on the results the electromagnetic induction device is sensitive to soil moisture. Although its sensitivity to clay content is less than the sensitivity to moisture content, but the total model error as a result of over estimating soil moisture is about equal to its error resulted from under estimating clay content and vice versa. So the field and feeling methods could not be implemented as inputs for the multiple regression models but these methods have enough accuracy to divide soil samples into two groups of dry and wet soils or sandy or clayey soils, on the other hand measurements of these parameters imposes more cost and time to soil salinity surveys. Results also showed that the repeated EM measurements around each sampling point could

1 and 2- Ph.D. Graduated Soil Physics and Conservation and Professor, Soil Science Department, Tarbiat Modares University, Tehran, Iran

(*- Corresponding Author Email: mhomaee@modares.ac.ir)

3- Assisstant Professor, Soil Conservation and Watershed Management Research Center, Tehran

improve the strength of the regression. Therefore regarding to the sensitivity of the technique to soil moisture three methods are suggested to improve accuracy of calibration: a)- measurement and calibration under the same moisture conditions; b)- field approximation of soil moisture and dividing soil samples into two groups of dry and moist soils and deriving two different groups of calibration equations.

Keywords: Bulk soil electrical conductivity, Multiple regression, Soil moisture, Soil salinity