

## واسنجی دستگاه القاگر الکترومغناطیس به منظور برآورد تغییرات عمودی شوری خاک با استفاده از روش‌های فراکاووشی

روح‌الله تقی‌زاده مهرجردی<sup>۱\*</sup>، سمیه آسمانی<sup>۲</sup>، فریدون سرمدیان<sup>۳</sup>، مهدی تازه<sup>۴</sup>، محمد حسن رحیمیان<sup>۵</sup>

(تاریخ دریافت: ۱۳۹۵/۰۲/۱۰ تاریخ پذیرش: ۱۳۹۵/۰۶/۱۴)

### چکیده

شوری خاک یکی از مشکلات اساسی در مناطق خشک و نیمه‌خشک می‌باشد. بنابراین، تهیه و به روز رسانی نقشه‌های شوری خاک جهت شناسایی مراحل اولیه شوری‌زائی خاک حائز اهمیت می‌باشد. دستگاه القاگر الکترومغناطیس به‌عنوان جایگزینی برای روش سنتی جهت ارزیابی سریع شوری خاک می‌باشد. به‌منظور واسنجی داده‌های دستگاه القاگر الکترومغناطیس از روش‌های مختلفی استفاده می‌شود. این پژوهش به واسنجی دستگاه القاگر الکترومغناطیس مدل EM38 در یکی از باغات پسته در حاشیه شهرستان اردکان با استفاده از روش‌های رگرسیون خطی چندگانه، شبکه عصبی مصنوعی و مدل نروفازی پرداخته است. نتایج نشان داد که مناسب‌ترین روش برای واسنجی داده‌های قابلیت هدایت الکتریکی این دستگاه، به‌کارگیری مدل نروفازی برای تخمین شوری خاک در ۹ عمق به‌ترتیب از عمق اول تا عمق نهم با ضریب تبیین ۰/۰۶، ۰/۱۱، ۰/۳۰، ۰/۵۹، ۰/۶۹، ۰/۶۴، ۰/۷۰، ۰/۷۴ و ۰/۷۴ و با میانگین ریشه مربعات خطا به‌ترتیب ۴/۰۹، ۳/۶۶، ۲/۸۷، ۲/۲۲، ۲/۲۶، ۲/۶۲، ۲/۴۶، ۲/۳۸ و ۲/۵۰ بود، که دقت آن نسبت به دو مدل دیگر در تخمین مقادیر شوری خاک و واسنجی دستگاه بالاتر بود.

**واژه‌های کلیدی:** رگرسیون خطی چندمتغیره، قابلیت هدایت الکتریکی ظاهری توده خاک، شبکه عصبی مصنوعی، نروفازی

۱-استادیار دانشکده کشاورزی و منابع طبیعی، دانشگاه اردکان (مکاتبه کننده)

۲-دانشجوی کارشناسی ارشد بیابان‌زدایی، دانشکده کشاورزی منابع طبیعی، دانشگاه اردکان

۳-استاد مهندسی علوم خاک دانشگاه تهران

۴-استادیار دانشکده کشاورزی و منابع طبیعی، دانشگاه اردکان

۵-مربی مرکز ملی تحقیقات شوری

پست الکترونیک: [rtaqizadeh@ardakan.ac.ir](mailto:rtaqizadeh@ardakan.ac.ir)

## مقدمه

شور شدن خاک پدیده‌ای است که از جهات گوناگون (از جمله کاهش چشمگیر کمی و کیفی محصولات کشاورزی و تخریب محیط زیست) زندگی انسان و سایر موجودات را تحت تأثیر قرار می‌دهد. در کشور ایران، بخش وسیعی از اراضی کشاورزی و بایر شور هستند. لذا کنترل و مدیریت این پدیده ضرورت دارد. به منظور مدیریت شوری خاک، بررسی و پایش تغییرات زمانی و مکانی آن گریزناپذیر است. اقدامات انجام شده برای پایش و ارزیابی قابلیت هدایت-الکتریکی خاک به طور فزاینده‌ای در سطح دنیا در حال گسترش است. زیرا نه تنها قابلیت هدایت-الکتریکی تحت تأثیر برخی ویژگی‌های خاک مثل شوری، درصد رطوبت، عمق خاک و میزان رس آن می‌باشد، بلکه اطلاعات بسیار مهمی راجع به اثرات و پیامدهای درازمدت فعالیت‌ها و عملیات درون‌مزرعه‌ای مثل آبیاری، مدیریت گیاه و همچنین خاک را در مقیاس مزرعه‌ای و منطقه‌ای ارائه می‌کند (Sudduth *et al.*, 2002). یکی از روش‌هایی که در نقاط مختلف دنیا برای مدیریت شوری خاک به کار می‌رود، تکنیک-های الکترومغناطیسی است. دستگاه القاگر الکترو مغناطیس<sup>1</sup> (EM) امکان پایش شوری خاک را بدون تماس مستقیم با آن و با صرف کمترین زمان و هزینه نسبت به سایر روش‌های صحرایی فراهم می‌آورد (Rahimian *et al.*, 2014).

مهم‌ترین نقص فناوری القاگر الکترومغناطیس، مربوط به ماهیت نسبی اندازه‌گیری مقادیر قابلیت هدایت الکتریکی ظاهری است. از آنجا که پاسخ القاگر الکترومغناطیس وابسته به ویژگی‌های گوناگون خاک مثل شوری، مقدار آب و رس خاک است، برای تبدیل مقادیر قابلیت هدایت الکتریکی ظاهری به‌منظور برآورد مطلق شوری خاک، قابلیت هدایت الکتریکی مطلق لازم خواهد بود. فرآیند تبدیل مقادیر قابلیت هدایت الکتریکی ظاهری به قابلیت هدایت الکتریکی مطلق شامل واسنجی داده‌های القاگر الکترومغناطیس از راه نمونه‌برداری‌های خاک و تجزیه و تحلیل‌های آماری است. چنین فرآیندی باید خیلی دقیق صورت

گیرد تا برآورد درستی از شوری خاک حاصل شود (Rahimian *et al.*, 2014). محققین مختلفی کارایی داده‌های دستگاه القاگر الکترومغناطیس را تأیید کرده-اند. به عنوان مثال، تریانتافیلیس و بوچنان (Triantafilis & Buchanan, 2010) برای تهیه نقشه شوری خاک و بالا بردن دقت نقشه از داده‌های کمکی دستگاه القاگر الکترومغناطیس استفاده کردند. همچنین سودوت و همکاران (Sudduth *et al.*, 2002) و سای و همکاران (Saey *et al.*, 2009) نیز کارایی بالای داده‌های دستگاه القاگر الکترومغناطیس را نشان داده‌اند. رحیمیان و هاشمی‌نژاد (Rahimian & Hasheminejad, 2010) نشان دادند که بهترین روش برای واسنجی دستگاه القاگر الکترومغناطیس، به-کارگیری مستقیم روابط رگرسیون چندمتغیره خطی است. همچنین این پژوهش‌گران نتیجه گرفتند که روابط رگرسیونی بین شوری اعماق مختلف خاک و قرائت‌های افقی و عمودی دستگاه مذکور، در رطوبت وزنی ۳۵ درصد در مقایسه با درصد رطوبت وزنی ۲۵ درصد بهتر قابل استخراج بوده و ضرایب همبستگی بین ۰/۶۷ تا ۰/۸۵ برای اعماق مختلف خاک به‌دست خواهد آمد و علت آن را تأثیر رطوبت بر قرائت‌های دستگاه القاگر بیان کردند. همچنین در این تحقیق به کمک قرائت‌های دستگاه مذکور، نقشه‌های شوری باغات پسته در اعماق مختلف خاک و نیز نقشه تغییرات عمقی شوری در ابتدا و انتهای نوارهای آبیاری نیز ترسیم و تفسیر شده است. تقی‌زاده-مهرجردی و همکاران (Taghizadeh Mehrjardi *et al.*, 2013) به بررسی پهنه‌بندی شوری خاک با استفاده از تکنیک زمین‌آمار و دستگاه القاگر الکترومغناطیس در منطقه اردکان پرداخته‌اند و نتایج نشان داد که برای پهنه‌بندی شوری خاک، روش کوکریجینگ با متغیرهای کمکی هدایت‌گر الکترومغناطیس دارای دقت مناسب‌تری می‌باشد. همچنین نقشه‌های نهایی شوری خاک نشان‌دادند که بیشترین مقدار تجمع نمک در قسمت شمالی منطقه و کمترین میزان شوری در مناطق مرتفع‌تر می‌باشد. تاکنون روش‌های متعددی برای واسنجی دستگاه القاگر الکترومغناطیس و ارائه ضرایب مربوطه پیشنهاد

1-Electro Magnetic Induction

متغیره دستگاه را واسنجی کردند. شبکه عصبی مصنوعی یک روش شبیه‌سازی و الهام گرفته از مطالعه سیستم مغز و شبکه عصبی موجودات زنده است. قدرت بالای عملکرد سیستم‌های بیولوژیک، ناشی از طبیعت موازی برنامه‌ریزی نرون‌های آن‌هاست. یک شبکه عصبی مصنوعی این ساختار را با توزیع شبیه‌سازی در واحدهای پردازشگر کوچک و ساده به هم-پیوسته (نرون) انجام می‌دهد (Taghizadeh, Mehrjardi et al., 2014). اسکاچ و همکاران (Schaap et al., 1998) نشان دادند شبکه‌های عصبی می‌توانند پیش‌بینی‌هایی با خطاهای کمتر، نسبت به روش‌های متداول رگرسیونی ارائه دهند. در تحقیق رحیمیان و همکاران (Rahimian et al., 2014) در باغات پسته اردکان در استان یزد، مشخص شد که شبکه عصبی مصنوعی پرسپترون چندلایه یکی از مناسب‌ترین روش‌ها برای واسنجی قرائت‌های دستگاه EM38 می‌باشد. به کمک این روش می‌توان ضریب همبستگی ۰/۶۶ (که توسط روش رگرسیون چندگانه حاصل شده بود) را به ۰/۷۸ ارتقا داد.

از دیگر روش‌های مناسب در تخمین ویژگی‌های خاک، استفاده از سیستم‌های فازی عصبی است. سیستم (مدل) نروفازی، که ترکیب شبکه عصبی با منطق فازی است، با استفاده از الگوریتم آموزش شبکه عصبی، پارامترهای سیستم فازی را تعیین می‌کند. این سیستم ترکیبی، بر اساس سیستم فازی که بیانگر عدم قطعیت‌هاست، پایه‌گذاری شده‌است. از انواع مدل‌های نروفازی می‌توان به نروفازی هم‌زمان<sup>۱</sup>، نروفازی تعاونی<sup>۲</sup> و نروفازی دوره‌<sup>۳</sup> اشاره کرد. در مدل‌های نروفازی دوره‌ تغییرات انجام شده در روند یادگیری را می‌توان از هر دو منظر- شبکه عصبی و منطق فازی - تفسیر کرد. از این شبکه‌ها می‌توان به سیستم فازی تطبیق‌پذیر مبتنی بر شبکه عصبی اشاره کرد. این مدل یک سیستم فازی را در ساختاری عصبی اجرا می‌کند و برای فرایند آموزش از ترکیبی از روش‌های آموزش شامل شیب نزولی و حداقل مربعات خطا استفاده می‌کند (Kisi., 2005; Drake, 2000).

گردیده‌است که از آن جمله می‌توان به ضرایب رگرسیون چندمتغیره (رودز و کورون) (Rhoades & Corwin, 1981)، ضرایب وزنی وابسته به عمق و لنه‌پیت (Wollenhaupt et al., 1986) و ضرایب حاصل از مدل‌سازی‌های اسلاویچ (Slavich, 1990) و اسلاویچ و پترسون (Slavich & Petterson, 1990) اشاره کرد. یکی از روش‌های موفق در واسنجی و ارائه ضرایب مربوط به دستگاه القاگر الکترومغناطیس، روش رگرسیون چندمتغیره است که به تعداد نسبتاً زیاد و قابل قبولی از قرائت‌های دستگاه نیاز دارد. مبنای روش مذکور مرتبط ساختن قرائت‌های افقی و عمودی دستگاه با شوری عصاره اشباع خاک (یا شوری اعماق مختلف خاک و یا متوسط وزنی شوری پروفیل خاک) به صورت یک‌سری از ضرایب رگرسیونی است که در صورت امکان می‌توان ضرایب متفاوتی را برای انواع مختلف نیمرخ‌های شوری خاک تعیین و به صورت معادلات مجزا ارائه نمود (Rahimian et al., 2014). پدی و میسرا (Padhi & Misra, 2011) در تحقیق خود بیان کردند که با استفاده از دستگاه EM-38 می‌توان در اعماق مختلف خاک با استفاده از مدل‌های گوناگون، مقدار آب را در خاک تخمین زد. همچنین با استفاده از دستگاه EM-38 می‌توان اندازه‌گیری سریع قابلیت هدایت الکتریکی خاک را در سطح مزرعه انجام داد.

برای ارتباط دادن متغیرها با میزان شوری خاک، روش‌های مختلفی وجود دارد. از آن جمله می‌توان به رگرسیون چندمتغیره خطی و تکنیک‌های هوش محاسباتی (تلفیق شبکه‌های عصبی و سامانه‌های فازی) اشاره کرد. رگرسیون روشی آماری برای بررسی و مدل‌سازی رابطه بین متغیرها است. لش و همکاران (Lesch et al., 1995) از روش رگرسیون برای واسنجی دستگاه القاگر الکترومغناطیس استفاده کردند و پس از به‌دست آوردن رابطه مورد نظر، به تخمین ویژگی‌های خاک اقدام نمودند. نتایج ایشان حاکی از ارتباط بالای داده‌های هدایت‌گر و شوری خاک است. سومر و همکاران (Sommer et al., 2003) نیز از داده‌های القاگر مغناطیسی برای تهیه نقشه شوری خاک استفاده کرده و با استفاده از روش رگرسیون چند

1-Same time neuro-fuzzy  
2-Cooperative neuro-fuzzy  
3-Hybrid neuro-fuzzy

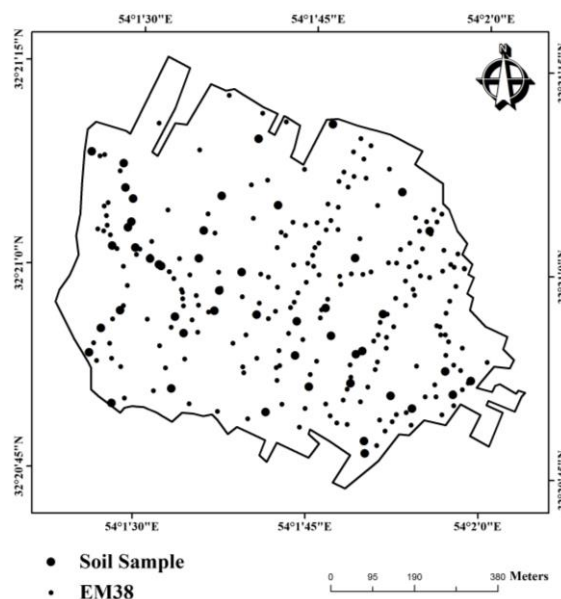
### معرفی منطقه

این مطالعه در قسمتی از باغات پسته شمال اردکان در استان یزد انجام گردید (شکل ۱). وسعت منطقه مورد مطالعه ۶۲ هکتار می‌باشد، که در بین طول‌های جغرافیایی ۵۴ درجه و یک دقیقه تا ۵۴ درجه و سه دقیقه شرقی و عرض‌های جغرافیایی ۳۲ درجه و ۲۰ دقیقه تا ۳۲ درجه و ۲۲ دقیقه شمالی واقع شده است. بافت غالب خاک در نقاط مختلف این منطقه لوم شنی، لوم رسی و لوم است. منبع آبیاری در این منطقه یک حلقه چاه عمیق با دبی تقریبی ۲۵ لیتر در ثانیه است که در مجاورت باغات پسته قرار گرفته است. نتایج تجزیه ویژگی‌های شیمیایی آب آبیاری نشان می‌دهد که هدایت الکتریکی آن ۱۲/۰۶ دسی-زیمنس بر متر بوده و نسبت جذب سدیم آب نیز ۳۳/۰۴ است، که نشان‌دهنده شور-سدیمی بودن آب آبیاری در این منطقه است (Rahimian et al., 2014).

مطالعات اخیر، کارایی بیشتر مدل‌های نروفازی را در مقایسه با دیگر توابع انتقالی، نشان می‌دهد. مک‌برانتی و اوده (McBratney & Odeh, 1997) قابلیت منطق فازی را در علوم خاک، مانند نقشه‌برداری، ارزیابی و مدل کردن فرآیندهای فیزیکی به‌خوبی نشان دادند. نتایج تحقیق عالی و همکاران (Aali et al., 2009) در زمینه تخمین درصد شوری خاک با استفاده از مدل‌های رگرسیون چندگانه و شبکه عصبی مصنوعی و نروفازی حاکی از بالاتر بودن کارایی مدل نروفازی نسبت به مدل‌های مورد استفاده در تحقیق ایشان است.

هدف از انجام تحقیق حاضر، واسنجی دستگاه القاگر الکترومغناطیس با استفاده از مدل‌های رگرسیون چندمتغیره خطی، شبکه عصبی مصنوعی و نروفازی و سپس برآورد شوری خاک در لایه‌های مختلف خاک در باغات پسته اردکان می‌باشد.

### مواد و روش‌ها



شکل ۱- منطقه مورد مطالعه و توزیع مکانی نمونه‌های برداشت شده از خاک و قرائت‌های دستگاه القاگر الکترومغناطیس  
Figure 1- The studied area and spatial distributions of soil sampling and EM38 reading points

واریوگرام محلی به لایه‌های پیوسته تبدیل گردید (Taghizadeh Mehrjardi et al., 2014). همچنین جهت تعیین محل نمونه‌ها از روش هایپرکیوب<sup>۱</sup> بهره

### نمونه‌برداری

برای نمونه‌برداری بهینه از منطقه مورد مطالعه، در ابتدا با استفاده از دستگاه القاگر الکترومغناطیس تعداد ۲۵۲ قرائت در دو حالت عمودی و افقی انجام گرفت. سپس نقاط با استفاده از کریجینگ معمولی با

1 -Hyper Cube

الکترومغناطیس در یک طرف، و یک سیم پیچ گیرنده امواج الکترومغناطیس در طرف دیگر قرار دارد. سیم پیچ فرستنده حلقه‌هایی از جریان‌های الکترو مغناطیسی دوار را در خاک زیرین خود القاء می‌کند. اندازه هریک از این حلقه‌های جریان به طور مستقیم متناسب با هدایت الکتریکی خاک اطراف آن حلقه می‌باشد. هر یک از این حلقه‌های جریان یک میدان الکترومغناطیسی ثانویه ایجاد می‌کنند که اندازه این میدان وابسته به مقدار جریانی است که در بین این حلقه‌ها وجود دارد. بخشی از این میدان الکترومغناطیسی ثانویه در اطراف هر حلقه، توسط سیم پیچ گیرنده دستگاه دریافت می‌گردد. تمامی سیگنال‌های دریافت‌شده پس از تقویت شدن به یک ولتاژ خروجی تبدیل، و بر روی نمایشگر دستگاه مشاهده می‌گردند. ولتاژ خروجی دستگاه به صورت خطی وابسته به مقادیر قابلیت هدایت الکتریکی در اعماق مختلف نیم‌رخ خاک بوده، و اصطلاحاً گفته می‌شود که این مقادیر به صورت وزنی وابسته به عمق هستند. حجم و عمق اندازه‌گیری‌های دستگاه القاگر الکترومغناطیس بستگی به ارتفاع قرارگیری آن نسبت به سطح زمین و همچنین وضعیت قرارگیری آن نسبت به سطح خاک (افقی یا عمودی) دارد. عمق مؤثر اندازه‌گیری دستگاه القاگر الکترومغناطیس مدل ژئونیکس<sup>۲</sup> برای وضعیت‌های قرارگیری افقی و عمودی بر سطح خاک به ترتیب حدود ۱ و ۲ متر می‌باشد. عرض مؤثر اندازه‌گیری‌ها به حدود ۰/۵ متر از طرفین و نیز از دو انتهای دستگاه می‌رسد. لذا این دستگاه، اندازه‌گیری را در یک حجم بیضی‌شکل از خاک با طول حدود ۲ متر و عرض ۱ متر و عمق متغیر (وابسته به وضعیت قرارگیری) انجام می‌دهد (Rhoades et al., 1997).

گرفته شد. این روش، یک طرح تصادفی طبقه‌بندی شده‌ای است که باعث نمونه‌برداری مؤثری به کمک توزیع چند متغیر می‌شود. یک شبکه مربع حاوی موقعیت‌های نمونه، یک شبکه لاتین است، اگر و تنها اگر فقط یک واحد نمونه‌برداری در هر ردیف و هر ستون وجود داشته باشد. یک هایپرکیوب لاتین، تعمیم این مفهوم به تعداد اختیاری از ابعاد است. به طوری که هر واحد نمونه‌برداری فقط در یک صفحه آن قرار گرفته باشد. هایپرکیوب لاتین شامل نمونه‌برداری  $n$  مقدار از توزیع تشریح شده هر متغیر است. توزیع تجمعی هر متغیر به  $n$  فاصله با احتمال مساوی تقسیم می‌شود و یک مقدار از هر فاصله، به طور تصادفی انتخاب می‌شود. سپس،  $n$  مقدار به دست آمده برای هر متغیر با متغیرهای دیگر جفت می‌شود. این روش یک پوشش کاملی از هر متغیر را ایجاد می‌کند (Minasny & McBratney, 2006). سپس از عمق‌های ۰-۳۰، ۳۰-۶۰ و ۶۰-۹۰ سانتی‌متری خاک نمونه‌برداری انجام گرفت. پس از آماده‌سازی نمونه‌ها (خشک شدن و الک کردن)، قابلیت هدایت الکتریکی در عصاره اشباع اندازه‌گیری شد. در نهایت شوری خاک در سه عمق نمونه‌برداری شده با استفاده از توابع عمق اسپیلاین به نه عمق استاندارد (پروژه جهانی خاک) تبدیل گردید (Malone et al., 2009). اعماق استاندارد مذکور شامل عمق‌های ۰-۱۰، ۱۰-۲۰، ۲۰-۳۰ سانتی‌متری بودند که در این پژوهش به ترتیب با شماره‌های ۱ تا ۹ مشخص گردیده‌اند.

#### معرفی دستگاه القاگر الکترومغناطیس (EM<sub>38</sub>)

این دستگاه تقریباً به شکل مستطیلی با طول ۱ متر، پهنای ۱۰ سانتی‌متر و ضخامت حدود ۵ سانتی‌متر می‌باشد (شکل ۲). این دستگاه را می‌توان مستقیماً بر روی سطح خاک قرار داد و یا اینکه بدون تماس با سطح زمین و در یک ارتفاع معین (مثلاً نیم متر) و موازی با سطح زمین قرار داده و آن را قرائت کرد. عدم تماس مستقیم دستگاه با سطح خاک آن را در زمره ابزارهای سنجش از نزدیک<sup>۱</sup> خاک نیز قرار داده‌است. در داخل این دستگاه یک سیم پیچ فرستنده امواج



شکل ۲- دستگاه القاگر الکترومغناطیس مورد استفاده در این پژوهش

Figure 2- EM-38 used at present research

### واسنجی دستگاه القاگر الکترومغناطیس

بدست آوردن روابط معنی دار آماری بین قرائت‌های دستگاه القاگر الکترومغناطیس و شوری خاک، می‌تواند منجر به تخمین مناسب شوری توسط این دستگاه بشود. در این عملیات که به "واسنجی" معروف است، ارتباط بین شوری یک یا چند عمق مشخص از خاک با EMv (قرائت عمودی دستگاه)، EMh (قرائت افقی دستگاه) یا هر دو بررسی می‌شود. در این مبحث، شوری خاک (ECi) متغیر وابسته و EMv و EMh متغیرهای مستقل خواهند بود (Rahimian *et al.*, 2014).

### روش‌های واسنجی دستگاه در این پژوهش

#### رگرسیون چندمتغیره خطی

در تجزیه‌های آماری، هنگامی که بیش از یک متغیر مستقل وجود داشته باشد، بایستی از مدل‌های آماری چندگانه استفاده شود. رگرسیون چندگانه خطی یکی از این مدل‌ها است که شکل عمومی آن به صورت رابطه (۱) است.

$$Y = \beta_1 X_1 + \beta_2 X_2 + \dots + e \quad (1)$$

در این فرمول، Y متغیر وابسته مورد مطالعه (شوری خاک) است و X ها متغیرهای مستقل (EMv و EMh) هستند. EMv قابلیت هدایت الکتریکی ظاهری است که دستگاه به صورت عمودی اندازه‌گیری کرده و EMh نیز قابلیت هدایت الکتریکی ظاهری می‌باشد که دستگاه به صورت افقی اندازه‌گیری کرده‌است. ضرایب متغیرهای مستقل با  $\beta$  بیان می‌شوند و  $\varepsilon$  عدد ثابت این معادله است.

### شبکه عصبی مصنوعی

اهیت تجربی و منعطف روش شبکه عصبی مصنوعی باعث می‌شود تا در پیش‌بینی ساختارها و رفتارهای غیرخطی و پیچیده، به خوبی قابل استفاده باشد. یکی از متداول‌ترین شبکه‌های عصبی مورد استفاده، شبکه عصبی پرسپترون چندلایه است. این شبکه از یک لایه ورودی، یک لایه خروجی و یک یا چند لایه بین آن‌ها که مستقیماً به داده‌های ورودی و نتایج خروجی متصل نیستند، تشکیل شده است. واحدهای لایه ورودی وظیفه توزیع مقادیر ورودی‌ها و خروجی‌ها می‌باشند، و لایه یا لایه‌های پنهان وظیفه ارتباط لایه‌های ورودی به لایه‌های خروجی و به‌دست آوردن روابط خطی و غیرخطی را بر عهده دارند (Minansny *et al.*, 1999). شبکه‌های عصبی پرسپترون چندلایه جزء شبکه‌های عصبی پیشخور می‌باشند که قادرند با انتخاب مناسب تعداد لایه‌ها و نرون‌ها، یک نگاهت غیرخطی را با دقت دلخواه انجام دهند. از مهم‌ترین قسمت‌های تعیین ساختار بهینه شبکه پرسپترون چندلایه، تعیین تعداد لایه‌های پنهان و تعداد نرون‌های هر لایه پنهان برای دستیابی به کمترین خطا می‌باشد (Chio *et al.*, 2004). ساختار بهینه شبکه به روش سعی و خطا با استفاده از معیارهای ریشه مربعات خطا و ضریب تبیین تعیین گردید.

### ساختار سیستم فازی تطبیق‌پذیر مبتنی بر

#### شبکه عصبی (نروفازی) (ANFIS)

طور تکرارپذیری انجام می‌شود و این روش را مؤثرتر می‌کند. در چنین شرایطی بهترین گزینه برای اعتبارسنجی مدل نقشه‌برداری رقومی، اعتبارسنجی به روش حذف داده و پیش‌بینی آن است. در این روش، پایگاه داده (n) به n-1 موقعیت برای واسنجی و یک موقعیت برای اعتبارسنجی تقسیم می‌شود. در هر تکرار، مدل برای موقعیت حذف شده اجرا می‌گردد و متغیر حذف شده، پیش‌بینی می‌گردد. سپس با مقدار واقعی مقایسه می‌گردد و خطای پیش‌بینی محاسبه می‌شود. این فرآیند برای همه موقعیت‌های نمونه-برداری انجام می‌شود. پس از تعیین مدل مناسب، بررسی عملکرد روش‌های مختلف از طریق معیارهای برازش قابل مقایسه است. در ارزیابی روش‌های واسنجی در این پژوهش از مجذور میانگین مربعات خطا (RMSE)، ضریب تبیین ( $R^2$ ) و میانگین خطا (ME) استفاده شد (Navabian et al., 2003; Amini et al., 2005) که به صورت روابط ۲ تا ۴ است.

$$RMSE = \left[ \frac{\sum (X_o - X_e)^2}{n} \right]^{1/2} \quad (2)$$

$$R^2 = \left[ \frac{\sum ((X_e - \bar{X}_e)(X_o - \bar{X}_o))}{\sqrt{\sum ((X_e - \bar{X}_e)^2)(X_o - \bar{X}_o)^2}} \right]^2 \quad (3)$$

$$ME = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (X_o - X_e) \quad (4)$$

در این روابط؛  $X_o$  و  $X_e$  به ترتیب شوری مشاهده‌ای و تخمین زده شده،  $\bar{X}_o$  و  $\bar{X}_e$  به ترتیب میانگین شوری مشاهده‌ای و تخمین زده شده و n تعداد داده‌ها است. علاوه بر آماره‌های یادشده، برای بررسی کارایی، روش‌های مختلف از شاخص بهبود نسبی نیز استفاده شد که نشان دهنده میزان کاهش خطا در مدل‌های مختلف نسبت به مدل بدتر است (رابطه ۵). همچنین ارزیابی عملکرد مدل‌ها در ۹ عمق نیز از رابطه ۶ برآورد گردید.

$$RI = \left( \frac{RMSE_a - RMSE_b}{RMSE_a} \right) \times 100 \quad (5)$$

$$PE = \sqrt{(RMSE)^2 - (ME)^2} \quad (6)$$

مدل سیستم فازی تطبیق‌پذیر مبتنی بر شبکه عصبی، اولین بار بوسیله ژانگ در سال ۱۹۹۳ معرفی شد (Jang et al., 1997). این مدل یک سیستم فازی سوگنو را در یک ساختار عصبی اجرا می‌کند و برای فرایند آموزش از ترکیبی از روش‌های آموزش پس-انتشار خطا و حداقل مربعات خطا استفاده می‌کند. در سیستم‌های فازی دیگر، خروجی به صورت یک مجموعه فازی است که باید دفازی شوند، ولی در سیستم سوگنو، خروجی به صورت خطی یا ثابت است (MATLAB user's guide 2006).

مدل نروفازی یک شبکه چندلایه پیش‌رونده بوده، که از الگوریتم‌های یادگیری شبکه‌های عصبی مصنوعی و استدلال‌های فازی، برای توصیف یک فضا یا مکان ورودی به یک فضا یا مکان خروجی استفاده می‌کند (Firat & Gungor, 2007). در واقع تلفیق منطق فازی و شبکه‌های عصبی منجر به ایجاد سیستم نروفازی می‌شود که حاوی مزیت‌های هر دو سیستم فازی و شبکه عصبی می‌باشد (Jang et al., 1997; Srinivasan & Fisher, 1995). به عبارت دیگر، یک سیستم نروفازی یک سیستم فازی است که برای تعیین پارامترهای (مجموعه‌های فازی و قانون فازی) از نمونه آموزشی پردازش شده از الگوریتم آموزش که بوسیله تئوری شبکه عصبی مشتق شده و یا الهام گرفته شده است، استفاده می‌کند. عملکرد شبکه‌های عصبی، به‌طور مستقیم با تعداد و کمیت داده‌های آموزشی در ارتباط است (Kosko, 1992). بنابراین زمانی که تعداد داده‌های آموزشی کم باشد، نتایج شبکه‌های عصبی چندان مطلوب نیست. در چنین مواردی ترکیب شبکه‌های عصبی و منطق فازی باعث بهبود عملکرد سیستم شبکه عصبی و نتایج قابل قبول می‌شود (Nava & Taylor, 1996).

### معیارهای ارزیابی مدل

برای بررسی کارایی مدل به‌منظور تخمین شوری خاک، اعتبارسنجی به روش حذف یک داده و پیش-بینی آن انجام گرفت. در شرایطی که زمان و بودجه کافی برای برداشت نمونه احتمالی وجود ندارد، بهترین گزینه اعتبارسنجی به روش حذف داده است. برخلاف روش تقسیم داده‌ها، در این روش تقسیم کردن به

## نتایج و بحث

مقدار قابلیت هدایت الکتریکی در خاک‌های منطقه نسبتاً بالاست. همچنین می‌توان گفت که تغییرات شوری نسبت به عمق چندان زیاد نمی‌باشد. همانطور که در جدول ۱ ملاحظه می‌شود، چولگی داده‌های قابلیت هدایت الکتریکی به راست می‌باشد.

خلاصه آماری مقادیر قابلیت هدایت الکتریکی در ۹ عمق استاندارد و مقادیر قابلیت هدایت الکتریکی ظاهری در جدول ۱ نشان داده شده است. با توجه به این‌که منطقه مورد مطالعه در ناحیه خشک واقع شده و همچنین با آب شور آبیاری می‌شود، به طور کلی

جدول ۱- خلاصه آماری مقادیر قابلیت هدایت الکتریکی (ECi) ( $\text{dS m}^{-1}$ ) در نه عمق استاندارد و مقادیر قابلیت هدایت

الکتریکی ظاهری دستگاه EM38 در جهات افقی و عمودی (EMv و EMh)

Table1- Summary of statistics of soil electrical conductivity (ECi:  $\text{dS/m}$ ) in 9 standard depths and EM38 apparent electrical conductivity of horizontal and vertical orientations (EMh and EMv)

عمق	حداقل	حداکثر	میانگین	انحراف	چولگی	افراشتگی	چارک	چارک	چارک	ضریب
Depth	min	max	mean	StDev	Skewness	Kurtosis	Q1	Q2	Q3	CV
EC1	5.71	24.92	10.31	4.15	1.56	2.50	7.23	9.14	12.03	40.33
EC2	5.99	23.11	10.26	3.82	1.61	2.75	7.33	9.18	11.87	37.23
EC3	6.59	23.74	10.17	3.39	1.92	4.79	7.68	9.27	11.75	33.36
EC4	7.23	26.12	10.07	3.53	2.63	8.63	7.92	8.92	11.29	35.08
EC5	6.06	27.16	10.13	4.09	2.57	7.29	7.95	8.65	10.82	40.44
EC6	5.37	26.31	10.39	4.44	2.24	5.20	7.94	8.83	11.32	42.76
EC7	5.62	26.55	10.82	4.58	1.94	3.68	8.07	9.11	11.90	42.33
EC8	5.95	27.04	10.15	4.75	1.78	3.13	8.05	9.71	12.53	42.64
EC9	5.95	27.29	11.32	4.88	1.73	2.99	8.17	9.97	12.78	43.15
EMV	69.0	266.0	134.80	47.42	0.64	-0.16	93.00	133.00	167.00	35.18
EMh	47.0	217.0	105.39	43.56	0.71	-0.06	67.50	98.00	137.00	41.34

$$EC_2 = 9.11 + 0.0172 \times EM_v - 0.0110 \times EM_h \quad (8)$$

$n = 49$

$$EC_3 = 6.85 + 0.0477 \times EM_v - 0.0295 \times EM_h \quad (9)$$

$n = 49$

$$EC_4 = 3.79 + 0.088 \times EM_v - 0.0530 \times EM_h \quad (10)$$

$n = 49$

$$EC_5 = 1.55 + 0.110 \times EM_v - 0.0579 \times EM_h \quad (11)$$

$n = 49$

$$EC_6 = 0.59 + 0.107 \times EM_v - 0.0434 \times EM_h \quad (12)$$

$n = 49$

$$EC_7 = 0.71 + 0.0823 \times EM_v - 0.0094 \times EM_h \quad (13)$$

$n = 49$

$$EC_8 = 0.98 + 0.0612 \times EM_v - 0.0182 \times EM_h \quad (14)$$

$n = 49$

$$EC_9 = 1.11 + 0.0504 \times EM_v - 0.0324 \times EM_h \quad (15)$$

$n = 49$

$$R^2 = 0.597$$

برای تعیین رگرسیون چندمتغیره خطی شوری خاک در عمق‌های مختلف خاک (۰-۱۰، ۰-۲۰، ۱۰-۳۰، ۲۰-۳۰، ۳۰-۴۰، ۴۰-۵۰، ۵۰-۶۰، ۶۰-۷۰، ۷۰-۸۰ و ۸۰-۹۰ سانتی‌متری)، رابطه رگرسیونی مربوطه به صورت روابط ۷ تا ۱۵ برای ۹ عمق استاندارد به دست آمد. در این روش نتایج ریشه مربعات خطا و ضریب تبیین به ترتیب ۴/۱۱ و ۰/۰۰۱ برای شوری در عمق ۱۰-۰ سانتی‌متری، و در عمق‌های ۱۰-۲۰، ۲۰-۳۰، ۳۰-۴۰ و ۴۰-۵۰ سانتی‌متری به ترتیب ۳/۷۶ و ۰/۰۰۹، ۳/۱۹ و ۰/۰۹۷، ۲/۸۷ و ۰/۳۲، ۲/۹۸ و ۰/۴۶ بوده و در عمق‌های ۵۰-۶۰، ۶۰-۷۰، ۷۰-۸۰ و ۸۰-۹۰ سانتی‌متری به ترتیب ۲/۹۹ و ۰/۵۳، ۲/۹۱ و ۰/۵۸، ۵/۱۰ و ۰/۶۰، ۷/۹۹ و ۰/۵۹ به دست آمد. نتایج تجزیه واریانس نیز از معنادار بودن در سطح ۰/۰۵ معادلات برازش داده شده حکایت دارد ( $p < 0.05$ ). البته معادلات رگرسیونی در سه عمق اول معنادار نبودند.

$$EC_1 = 10.2 + 0.0023 \times EM_v - 0.0019 \times EM_h \quad (7)$$

$n = 49$

$$R^2 = 0.001$$



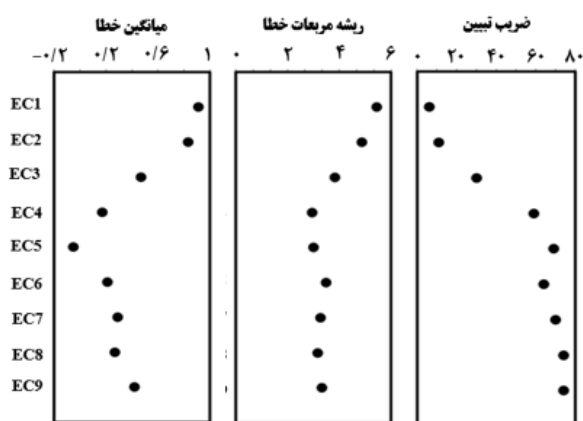
عمق اول به سمت عمق نهم روند کاهشی داشته و مقادیر  $R^2$  نیز از سطح خاک یعنی عمق اول تا عمق نهم روند افزایشی داشته است. شکل ۳ نمایانگر تغییرات  $RMSE$  و  $R^2$  و  $ME$  در اعماق خاک است که با افزایش عمق، دقت مدل زیاد شده است. این در حالی است که در پژوهش تقی‌زاده مهرجردی و همکاران (Taghizadeh Mehrjardi et al., 2012) خشک بودن منطقه باعث کاهش دقت شده است. اما در این پژوهش به دلیل کوچک‌تر بودن منطقه و مرطوب بودن خاک، در اعماق خاک واریانس داده‌ها کمتر شده است. البته یکی از عیوب دستگاه القاگر الکترومغناطیس این است که تحت تأثیر رطوبت و مقدار رس قرار می‌گیرد. در مقایسه تحقیق رحیمیان و هاشمی‌نژاد (Rahimian & Hasheminejhad, 2010) نتایج پایش شوری در دو قطعه با رطوبت‌های مختلف خاک نشان داد که همبستگی بین قرائت‌های دستگاه هدایت‌گر الکترومغناطیس در خاک با رطوبت وزنی ۳۵ درصد بیشتر از خاک با رطوبت وزنی ۲۰ درصد است. با افزایش رطوبت خاک دقت اندازه‌گیری‌های این ابزار نیز افزایش خواهد یافت. نتایج مربوط به نروفازی، شبکه عصبی و رگرسیون چندگانه خطی مربوط به شوری اندازه‌گیری شده در جدول ۳ آمده است. با توجه به این جدول، بهترین عملکرد برای پیش‌بینی شوری خاک مربوط به مدل نروفازی می‌باشد و از لحاظ هر چهار معیار، بهتر از دو مدل شبکه عصبی و رگرسیون چندگانه خطی است.

که در آن‌ها  $ECi$  قابلیت هدایت الکتریکی، و  $EMv$  و  $EMh$  به ترتیب قرائت عمودی و قرائت افقی دستگاه القاگر الکترومغناطیس می‌باشند.

ملاحظه می‌شود که ضریب تبیین در این معادلات با افزایش عمق زیاد شده و فقط در عمق ۹ به صورت جزئی روند کاهشی داشته است (امواج هدایت الکترومغناطیسی بسیار وابسته به رطوبت هستند. با توجه به اینکه خاک‌های عمق‌های پایینی مزرعه مورد مطالعه نیز دارای رطوبت بیشتری در هنگام قرائت دستگاه بودند، بنابراین انتظار می‌رفت که ضریب همبستگی بالاتر در این اعماق خاک مشاهده شود).

در مدل شبکه عصبی مصنوعی حداقل مقدار ریشه مربعات خطا در شوری عمق هفتم یا عمق ۶۰ تا ۷۰ سانتی‌متر مربوط به شبکه با ۱۱ نرون در لایه مخفی، برای شوری عمق‌های ۳۰ تا ۴۰، ۴۰ تا ۵۰، ۵۰ تا ۶۰، ۶۰ تا ۷۰، ۷۰ تا ۸۰، ۸۰ تا ۹۰، ۹۰ تا ۱۰۰، ۱۰۰ تا ۱۱۰ و ۱۱۰ تا ۱۲۰ سانتی‌متر، به ترتیب مربوط به شبکه با ۸، ۱۱، ۳، ۲، ۸، ۷، ۹ و ۱۰ نرون در لایه مخفی می‌باشد. نتایج خطای این روش بر اساس مقدار ریشه مربعات خطا و ضریب تبیین به ترتیب ۴/۱۰ و ۰/۳۸ برای شوری در عمق ۱۰-۲۰ سانتی‌متری، ۳/۶۸ و ۰/۹۱ برای شوری در عمق ۲۰-۳۰ سانتی‌متری، ۳/۰۱ و ۰/۲۱ برای شوری در عمق ۳۰-۴۰ سانتی‌متری، ۲/۶۴ و ۰/۶۸ برای شوری در عمق ۴۰-۵۰ سانتی‌متری، ۲/۷۴ و ۰/۶۵ برای شوری در عمق ۵۰-۶۰ سانتی‌متری، ۲/۵۸ و ۰/۶۸ برای شوری در عمق ۶۰-۷۰ سانتی-متری، ۳/۵ و ۰/۴۴ برای شوری در عمق ۷۰-۸۰ سانتی‌متری و ۷/۸۰ و ۰/۴۷ برای شوری در عمق ۸۰-۹۰ سانتی‌متری به دست آمد.

برای ایجاد شبکه در نروفازی، باید چند پارامتر بهینه شوند که شامل نوع تابع عضویت، تعداد تابع و روش یادگیری و تعداد اپوک می‌باشد. برای این کار تمام حالات به وسیله سعی و خطا به دست آمد، که نتایج ویژگی‌های مدل نروفازی به کار رفته برای تخمین شوری در عمق‌های مختلف در جدول ۲ نشان داده شده است. بهترین ساختار با توجه به معیار  $RMSE$  تعیین گردید. نتایج نشان داد که مقادیر  $RMSE$  از



شکل ۳- ریشه مربعات خطا، ضریب تبیین و میانگین خطا در مدل نروفازی در ۹ عمق استاندارد خاک

Figure 3- RMSE, R<sup>2</sup> & ME of ANFIS model in 9 standard soil depths

جدول ۲- پارامترهای بهینه شده مدل نروفازی برای پیش‌بینی شوری خاک

Table 2- Optimized parameters of ANFIS model for prediction of soil salinity

روش دفاژی کردن Defuzzification Method	روش یادگیری Ventilation Method	نوع تابع عضویت membership function	تکرار repeat	تعداد توابع عضویت Number of membership functions	عمق Depth
4	100	pimf	hybrid	Weighted Average	EC1
3	100	gaussmf	hybrid	Weighted Average	EC2
5	100	Gauss2mf	hybrid	Weighted Average	EC3
5	100	psigmf	hybrid	Weighted Average	EC4
5	100	dsigmf	hybrid	Weighted Average	EC5
5	100	trapmf	hybrid	Weighted Average	EC6
5	100	pimf	hybrid	Weighted Average	EC7
5	100	dsigmf	hybrid	Weighted Average	EC8
5	100	gaussmf	hybrid	Weighted Average	EC9

عمق ۳۰-۴۰ سانتی‌متری به میزان ۲۲/۶۴ درصد، برای شوری در عمق ۴۰-۵۰ سانتی‌متری به میزان ۲۴/۱۶ درصد، برای شوری در عمق ۵۰-۶۰ سانتی-متری به میزان ۱۲/۳۷ درصد، برای شوری در عمق ۶۰-۷۰ سانتی‌متری به میزان ۱۵/۴۶ درصد، برای شوری در عمق ۷۰-۸۰ سانتی‌متری به میزان ۵۳/۳۳ درصد و برای شوری در عمق ۸۰-۹۰ سانتی‌متری به میزان ۶۸/۷۱ درصد افزایش داده‌است (جدول ۳). در کل مدل شبکه عصبی دارای دقت بالاتری نسبت به رگرسیون چندگانه خطی است. زیرا ممکن است از یک طرف کارایی توابع انتقالی به‌دست آمده در مناطق مختلف با هم تفاوت داشته، و از طرف دیگر طبق نظر اسکاپ و همکاران (Schaap et al., 1998) در طراحی شبکه‌های عصبی نوع خاصی از معادلات لازم نبوده و

بعد از مدل نروفازی، شبکه عصبی بهترین عملکرد را به خود اختصاص داده‌است. همچنین از شاخص بهبود نسبی برای ارزیابی کارایی مدل‌ها استفاده شد. این آماره میزان کاهش خطا در مدل‌های نروفازی و شبکه عصبی نسبت به روش رگرسیون (بدترین مدل در این پژوهش) می‌باشد. شکل ۳ نیز مؤید دقت بیشتر مدل نروفازی نسبت به سایر مدل‌ها است. در این شکل  $RMSE$  و  $ME$  با افزایش عمق روند کاهشی و  $R^2$  روند افزایشی دارند. مدل نروفازی دقت پیش‌بینی را نسبت به روش رگرسیون خطی چندگانه برای شوری در عمق ۰-۱۰ سانتی‌متری به میزان ۰/۴۸ درصد، برای شوری در عمق ۱۰-۲۰ سانتی‌متری به میزان ۲/۶۵ درصد، برای شوری در عمق ۲۰-۳۰ سانتی‌متری به میزان ۱۰/۰۳ درصد، برای شوری در

پردازش توابع انتقالی خاک به همین علت باشد (Mohammadi, 2007). همچنین محمدی و طاهری (Mohammadi & Taheri, 2005) نتیجه گرفتند که روش رگرسیون فازی در شرایطی که روابط ابهامی بین متغیرها و به طور کلی در مواردی که با خطاهای ناشی از ابهام در ساختار معادلات رگرسیونی مطرح است، می‌تواند مکمل و جایگزین مناسبی برای روش رگرسیون آماری تلقی شود. در این تحقیق نیز نتایج مشابهی به دست آمد. به طوری که شبکه عصبی مصنوعی در مقایسه با نروفازی دارای کارایی کمتری در برآورد شوری خاک بود. مقدار RMSE محاسبه شده مدل نروفازی در مورد تمام عمق‌های خاک کمتر از شبکه عصبی مصنوعی و رگرسیون به دست آمد که نشان دهنده دقت بالاتر این مدل در مقایسه با سایر مدل‌ها می‌باشد. برای ارزیابی کارایی مدل‌ها از شاخص  $RI$  (بهبود نسبی) استفاده شد که این آماره نشان داد که مدل نروفازی دقت تخمین را نسبت به روش رگرسیون خطی چندگانه افزایش داده است. محققین زیادی بر کارایی مدل نروفازی در علوم خاک اشاره داشته‌اند (فنج و همکاران) (Feng et al., 2006). امروزه خاک‌شناسان، بیش از گذشته نسبت به تغییرپذیری پیوسته خاک‌ها در گستره‌های مکانی و چگونگی توصیف و ساختار آن‌ها حساسیت نشان می‌دهند و نسبت به عدم قطعیت سیستم طبیعی خاک و کارکردهای آن در فرایند شناخت و درک این سیستم، آگاه می‌باشند و از راهکارهای سنتی پردازش آن نامطمئن هستند. این عدم قطعیت بیشتر در نتیجه فراوانی و پیچیدگی‌های اطلاعات و آگاهی‌های بشر و رشد شتابان ساختارهای علمی و تکنولوژی است. حل این مسئله نیازمند مسلح شدن به نظریه‌های مبتنی بر منطق کارآمد و جامع‌نگر است. هم‌اکنون تنها گزینه در پیش‌روی انسان نظریه فازی است (Minasny & McBratney, 2006). بنابراین پیشنهاد این است که در مطالعات آینده در زمینه علوم خاک و واسنجی از مدل‌های مجموعه‌های فازی به خصوص نروفازی استفاده گردد.

با ایجاد رابطه مناسب بین داده‌های ورودی و خروجی، می‌توان به نتایج مناسب دست یافت. به علت وجود روابط غیرخطی بین متغیرهای وابسته و پیش‌بینی شونده، شبکه عصبی عملکرد بهتری نسبت به مدل‌های رگرسیونی داشته‌است. نتایج تحقیق حاضر با نتایج تقی‌زاده مهرجردی و همکاران (Taghizadeh et al., 2013) در برآورد شوری خاک در دشت یزد- اردکان، همخوانی دارد. نتایج ایشان نیز نشان داد که شبکه‌های عصبی در برآورد شوری خاک نسبت به سایر توابع انتقالی که به صورت خطی هستند، کارایی بالاتری دارند. محمدی (Mohammadi, 2007) با استفاده از آماره‌های ضریب همبستگی و ریشه میانگین مربعات خطا به بررسی شبکه عصبی مصنوعی و آنالیز رگرسیون پرداخته و نتیجه گرفت که شبکه عصبی، برآورد بهتر و با خطای کمتری، بر اساس داده‌های زود یافت خاک دارد. همچنین نتایج مشابهی توسط تماری و همکاران (Tamari et al., 1996) به دست آمده‌است. آن‌ها نیز مقدار RMSE کمتری از برآورد ویژگی‌های خاک با شبکه عصبی مصنوعی نسبت به رگرسیون چندگانه خطی به دست آوردند و نشان دادند که اگر ناپایداری داده‌ها بالا باشد، شبکه عصبی از مدل‌های رگرسیونی خطی بهتر نخواهد بود. اما زمانی که داده‌هایی با دقت بالا به کار برده شوند، شبکه عصبی مصنوعی کارایی بالاتری خواهد داشت. تمامی این روش‌ها بر پایه فرض دقیق بودن متغیرهای مورد مطالعه و مشاهدات مربوط به آن‌ها استوار است و روابط بین متغیرها نیز دقیق فرض شده‌است. در حالی که در سیستم‌های طبیعی مثل خاک، معمولاً مشاهدات یا روابط ناشناخته‌ای بین متغیرها وجود دارد. در چنین شرایطی از مدل‌هایی می‌توان بهره گرفت که قادر به ارائه الگوهای مناسب-تری از روابط بین متغیرها باشند. به گونه‌ای که این مدل‌ها بتوانند انطباق بیشتری با دنیای واقعی داشته باشند. بدین ترتیب، با توجه به ماهیت ابهام‌آمیز پدیده‌های مرتبط با خاک، به نظر می‌رسد با تقریبی بودن مقادیر اندازه‌گیری شده ویژگی‌های مختلف خاک، کارایی بالاتر مدل مبتنی بر مجموعه‌های فازی در

جدول ۳- ارزیابی معیارهای خطا مدل‌های نروفازی، شبکه عصبی و رگرسیون چندگانه خطی جهت پیش‌بینی

شوری خاک

Table3- Evaluation of error criteria for ANFIS, ANN and multiple linear regression models on prediction of soil salinity

متغیر Variable	مدل model	ریشه مربعات خطا RMSE	ضریب تبیین: R <sup>2</sup>	میانگین خطا ME	ارزیابی عملکرد PE	بهبود نسبی (%) RI
EC1	رگرسیون چندمتغیره خطی Linear Multivariate Regression	4.11	0.001	0.001	4.11	0
	شبکه عصبی مصنوعی ANN	4.10	0.038	0.23	4.09	0.24
	نروفازی anfis	4.09	0.06	0.91	3.98	0.48
EC2	رگرسیون چندمتغیره خطی Linear Multivariate Regression	3.76	0.009	0.002	3.76	0
	شبکه عصبی مصنوعی ANN	3.68	0.091	0.86	3.67	2.12
	نروفازی anfis	3.66	0.11	0.83	3.56	2.65
EC3	رگرسیون چندمتغیره خطی Linear Multivariate Regression	3.19	0.097	0.004	3.19	0
	شبکه عصبی مصنوعی ANN	3.01	0.21	0.11	3	5.64
	نروفازی anfis	2.87	0.30	0.47	2.83	10.03
EC4	رگرسیون چندمتغیره خطی Linear Multivariate Regression	2.87	0.32	0.007	2.87	0
	شبکه عصبی مصنوعی ANN	2.64	0.68	0.19	2.63	8.21
	نروفازی anfis	2.22	0.59	0.17	2.21	22.64
EC5	رگرسیون چندمتغیره خطی Linear Multivariate Regression	2.98	0.46	0.04	2.98	0
	شبکه عصبی مصنوعی ANN	2.68	0.57	0.41	2.64	10.06
	نروفازی anfis	2.26	0.69	0.05	2.25	24.16
EC6	رگرسیون چندمتغیره خطی Linear Multivariate Regression	2.99	0.53	0.04	2.99	0
	شبکه عصبی مصنوعی ANN	2.74	0.65	0.42	2.70	8.36
	نروفازی anfis	2.62	0.64	0.21	2.61	12.37

ادامه جدول ۳...

0	2.91	0.007	0.58	2.91	رگرسیون چندمتغیره خطی Linear Multivariate Regression	EC7
11.34	2.54	0.40	0.68	2.58	شبکه عصبی مصنوعی ANN	
15.46	2.44	0.29	0.70	2.46	نروفازی anfis	
0	3.36	3.84	0.60	5.10	رگرسیون چندمتغیره خطی Linear Multivariate Regression	EC8
31.37	3.49	0.17	0.44	3.5	شبکه عصبی مصنوعی ANN	
53.33	2.36	0.27	0.74	2.38	نروفازی anfis	
0	4.14	6.83	0.59	8	رگرسیون چندمتغیره خطی Linear Multivariate Regression	EC9
2.37	7.78	0.42	0.04	7.80	شبکه عصبی مصنوعی ANN	
68.71	2.46	0.42	0.74	2.50	نروفازی anfis	

\*در ستون PE هرچه عدد آن کوچکتر باشد، مدل بهتر است.

این علت می‌تواند باشد. از طرفی دیگر، با توجه به اینکه روابط مذکور وابسته به مکان بوده و قابلیت تعمیم‌پذیری آن‌ها کم است، توصیه می‌شود که مدل نروفازی مذکور برای سایر شرایط خاک (نظیر رطوبت، رس، ماده آلی، نحوه مدیریت اراضی و ...)، ارزیابی شده و سپس برای آن شرایط مورد استفاده قرار گیرد. در هر حال، نتایج این پژوهش نشان داد که تکنیک واسنجی نروفازی جایگزین مناسبی برای سایر تکنیک‌های واسنجی قرائت‌های دستگاه القاگر الکترومغناطیس نظیر رگرسیون چندمتغیره و شبکه عصبی مصنوعی می‌باشد.

### نتیجه‌گیری کلی

برای پیش‌بینی شوری اعماق مختلف خاک، از مقادیر دستگاه القاگر الکترومغناطیس در دو حالت عمودی و افقی با هم استفاده گردید. نتایج بررسی نشان داد که با توجه به معیارهای ارزیابی ( $RI$ ,  $PE$ ,  $ME$ ,  $RMSE$ ,  $R^2$ )، مدل نروفازی دارای بالاترین دقت در پیش‌بینی شوری خاک است. بعد از آن، شبکه عصبی مصنوعی نسبت به معادلات رگرسیونی چندمتغیره خطی کارایی بهتر داشته‌است. باید متذکر شد که با توجه به ماهیت مبهم پدیده‌های مرتبط با خاک و تقریبی بودن مقادیر اندازه‌گیری شده، کارایی بالاتر مدل نروفازی در پردازش داده‌های دستگاه القاگر الکترومغناطیس به

### References

- Aali K., Parsinejan M., and Rahmani, B. 2009. Estimation of saturation percentage of soil using multiple regression, ANN, and ANFIS techniques. *Computer and Information Science*, 2: 127-136.
- Amini M., Afyuni M., Fathianpour N., Khademi H., and Fluchler, H. 2005. Continuous soil pollution mapping using fuzzy logic and spatial interpolation. *Geoderma*, 124: 223-233.
- Chio J., Teresa A., Bahia M., and Hussain, U. 2004. Pavement roughness modeling using back-propagation neural networks. *Computer-Aided Civil and Infrastructure Engineering*, 19: 295-303.

- Drake J. 2000. Communications phase synchronization using the adaptive network fuzzy inference system. PhD. dissertation, New Mexico State University, Las Cruces, New Mexico, USA. 168p.
- Feng Q., Zhu A., Harrower M., and Brut J.E. 2006. Fuzzy soil mapping based on prototype category theory. *Geoderma*, 136: 774-787.
- Firat M., and Gungor M. 2007. River flow estimation using adaptive neuro-fuzzy inference system. *Mathematics and Computers in Simulation*, 75:87-96.
- Jang J., Sun C. and Mizutani E. 1997. Neuro-fuzzy and soft computing: A computational approach to learning and machine intelligence. Prentice Hall, Upper Saddle River, New Jersey, USA. 640p.
- Kisi O. 2005. Suspended sediment estimation using neuro-fuzzy and neural network approaches. *Hydrological Sciences-Journal-des Sciences Hydrologiques*, 50: 683-696.
- Kosko B. 1992. Neural networks and fuzzy systems: Dynamical approach to machine intelligence. Prentice Hall, Englewood Cliffs, NJ. 449p.
- Lesch S., Strauss D.J. and Rhoades J.D. 1995. Spatial prediction of soil salinity using electromagnetic induction techniques 1. Statistical prediction models. A comparison of multiple linear regression and cokriging. *Water Resources Research*, 31: 373-386.
- Malone B.P., McBratney A.B., Minasny B., and Laslett G.M. 2009. Mapping continuous depth functions of soil carbon storage and available water capacity. *Geoderma*, 154: 138-152.
- MATLAB User's Guide. 2006. Fuzzy logic Toolbox, by the math works Inc. 235p.
- McBratney A.B., and Odeh I.O.A. 1997. Application of fuzzy sets in soil science: Fuzzy logic, fuzzy measurements and fuzzy decisions. *Geoderma*, 77: 85- 113.
- Minasny B., McBratney A.B., and Bristow K.L. 1999. Comparison of different approaches to the development of pedotransfer functions for water retention curves. *Geoderma*, 93: 225-253.
- Minasny B., and McBratney A.B. 2006. A conditioned Latin hypercube method for sampling in the presence of ancillary information. *Geology*, 32: 1378-1388.
- Mohammadi J., and Taheri M. 2005. Estimation of pedotransfer function using fuzzy regression. *Journal of Agriculture Science & Technology*, 2: 51-60. (In Persian)
- Mohammadi J. 2007. Testing an artificial neural network for predicting soil water retention characteristics from soil physical and chemical properties. 17<sup>th</sup> World Congress of Soil Science, Thailand, Paper No 221.
- Nava P., and Taylor J. 1996. The optimization of neural network performance through incorporation of fuzzy theory. In: Proceedings of the Eleventh International Conference on Systems Engineering, 897-901.
- Navabian M., Liaghat A., and Homae M. 2003. Determination of soil saturated hydraulic conductivity using pedotransfer function. *Agriculture Engineering, Research Journal*, 4: 1-12. (In Persian)
- 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.
- Rahimian M.H. and Hasheminejhad Y. 2010. Calibration of electromagnetic induction device (EM38) for soil salinity assessment. *Journal of Water and Soil Sciences*, 3: 243-252. (In Persian)
- Rahimian M.H., Hasheminejhad Y., Meshkat M.A., and Qaeminia A.M. 2014. Monitoring of soil salinity using electromagnetic induction device, EM38 (Instructions for use, calibration method and relevant software). National Salinity Research Center, technical manual, 49p. (In Persian)
- Rahimian M.H., Noori M.R., Hasheminejhad Y., Tabatabaei S.H., and Neshat, E. 2014. Determination of leaching fraction in Ardakan pistachio orchards through Integration of Wetting Front Detector and Electromagnetic Induction Devices. *Journal of Water and Soil Sciences*, 28: 163-173. (In Persian)
- Rhoades J.D., and Corwin D.L. 1981. Determination soil electrical conductivity-depth relations using an inductive electromagnetic soil conductivity meter. *Journal of Soil Science Society of American*, 40: 651-655.

- Rhoades J.D., Leach S.M., LeMert R.D., and Alves, W.J. 1997. Assessing irrigation/drainage/salinity management using spatially referenced salinity measurements. *Agricultural Water Management*, 35: 147-165.
- Saey T., Van Meirvenne M., Vermeersch H., Ameloot N., and Cockx L. 2009. A pedotransfer function to evaluate the soil profile textural heterogeneity using proximally sensed apparent electrical conductivity. *Geoderma*, 150: 389-395.
- Schaap M.G., Leij F.J., and Van Genuchten M.T. 1998. Neural network analysis for hierarchical prediction of soil hydraulic properties. *Journal of Soil Science Society of America*, 62: 847-855.
- Slavich P.G. 1990. Determining EC, depth profiles from electromagnetic induction measurements. *Australian Journal of Soil Research*, 28: 443-452.
- Slavich P.G., and Petterson G.H. 1990. Estimating average rootzone salinity from electromagnetic induction (EM38) measurements. *Australian Journal of Soil Research*, 28: 453-463.
- Sommer M., Wehrhan M., Zipprich M., Castell Z.W., Weller U., Castell W., Ehrich S., Tandler B. and Selige T. 2003. Hierarchical data fusion for mapping soil units at field scale. *Geoderma*, 112: 179-196.
- Srinivasan K., and Fisher D. 1995. Machine learning approaches to estimating software development effort. *IEEE Transactions on Software Engineering*, 21: 126-137.
- Sudduth K., Drummond S., and Kitchen N. 2002. Accuracy issues in electromagnetic induction sensing of soil electrical conductivity for precision agriculture. *Computers and Electronics in Agriculture*, 31: 239-264.
- Taghizadeh Mehrjardi R., Sarmadian F., Omid M., Savaghebi G.R., Rousta M.G., and Rahimian M.H. 2012. Zoning soil salinity use the techniques geostatistice and EM in Ardakan. *Journal of Water and Soil Sciences*, 26: 369-380. (In Persian)
- Taghizadeh Mehrjardi R., Sarmadian F., Savaghebi G.R., Omid M., Tomanian N., Rousta M.G., and Rahimian M.H. 2013. Comparison of fuzzy techniques, genetic algorithms, neural networks and multivariate regression prediction of soil salinity (Case study: Ardekan city). *Journal of Range and Watershed Management*, 66: 207-222. (In Persian)
- Taghizadeh Mehrjardi R., Minasny B., Sarmadian F., and Malone P.B. 2014. Digital mapping of soil salinity in Ardakan region, central Iran. *Geoderma*, 213: 15-28.
- Tamari S., Wosten J.H.M., and Ruz-suarez J.C. 1996. Testing an artificial neural network for predicting soil hydraulic conductivity. *Journal of Soil Science Society of America*, 60: 1732-1741.
- Triantafilis J., and Buchanan S.M. 2010. Mapping the spatial distribution of subsurface saline material in the Darling River valley. *Journal of Applied Geophysics*, 70: 144-160.
- Wollenhaupt N.C., Richardson J.L., Foss J.E., and Doll E.C. 1986. A rapid method for estimating weighted soil salinity from apparent soil electrical conductivity measured with an above ground electromagnetic induction meter. *Journal of Soil Science Society of America*, 66: 315-321.

## Calibration of Electromagnetic Induction Device (EM38) in Order to Estimate Vertical Variation of Soil Salinity Using Machine Learning Techniques

Roh Allah Taghizadeh-Mehrjardi,<sup>1</sup> Somayeh Asemani,<sup>2</sup> Feridon Sarmadian,<sup>3</sup> Mehdi Tazeh,<sup>4</sup> Mohammad Hasan Rahimian,<sup>5</sup>

(Received: April 2016      Accepted: September 2016)

### Abstract

Soil salinity is a serious environmental problem especially in arid and semiarid areas. Therefore, it is vital to generate and update soil salinity maps in order to determine early stage of salinization. Electromagnetic induction instrument is an alternative to traditional methods for assessing soil salinity. Different methods have been used to calibrate electromagnetic induction instrument. At present research, an attempt was made to calibrate EM38 in pistachio orchard located in Ardakan city using multi-linear regression (MLR), artificial neural network (ANN) and neuro-fuzzy (ANFIS). To calibrate and predict soil salinity in nine standard depths, the best result was obtained by ANFIS model with  $R^2$  of 0.06, 0.11, 0.30, 0.59, 0.69, 0.64, 0.70, 0.74 and 0.74; and RMSE of 4.09, 3.66, 2.87, 2.22, 2.26, 2.62, 2.46, 2.38 and 2.50, respectively; which showed the accuracy of ANFIS was higher than other models (ANN and MLR) to predict soil salinity and calibrate EM38.

**Keywords:** Multi-linear regression, Apparent electrical conductivity, Artificial neural network, Neuro-fuzzy

---

1- Faculty of Agriculture and Natural Resources, Ardakan University

2- Faculty of Agriculture and Natural Resources, Ardakan University

3- Professor of Soil Science, University of Tehran

4- Faculty of Agriculture and Natural Resources, Ardakan University

5- Member of National Salinity Research Center

\*Corresponding author Email: [rtaghizadeh@ardakan.ac.ir](mailto:rtaghizadeh@ardakan.ac.ir)