



ISSN 2251-7480

تعیین ضریب راندمان آبشویی برای شوری زدایی خاک‌های شور و سدیمی منطقه ویس - استان خوزستان^۱

زهرا بهبهانی زاده رضائیان^۱، ابراهیم پذیرا^{۲*}، ابراهیم بناهیپور^۳ و نرگس ظهراپی^۴

(۱) دانشجوی دکتری فیزیک و حفاظت خاک؛ دانشکده کشاورزی و منابع طبیعی؛ دانشگاه آزاد اسلامی؛ واحد علوم تحقیقات؛ تهران؛ ایران

(۲*) استاد گروه خاکشناسی؛ دانشکده کشاورزی و منابع طبیعی؛ دانشگاه آزاد اسلامی؛ واحد علوم تحقیقات؛ تهران؛ ایران
*نویسنده مسئول مکاتبات: ebrahimpazira@gmail.com

(۳) استادیار گروه خاکشناسی؛ دانشکده کشاورزی و منابع طبیعی؛ دانشگاه آزاد اسلامی؛ واحد اهواز؛ اهواز؛ ایران

(۴) استادیار گروه آبیاری و زهکشی؛ دانشکده کشاورزی و منابع طبیعی؛ دانشگاه آزاد اسلامی؛ واحد اهواز؛ اهواز؛ ایران

تاریخ دریافت: ۱۳۹۳/۰۸/۰۴ تاریخ پذیرش: ۱۳۹۴/۱۲/۲۹

چکیده

آبشویی نمک‌های محلول در نیمرخ خاک یکی از روش‌های بهسازی خاک‌های شور و سدیمی است. برآورد آب مورد نیاز برای اصلاح این خاک‌ها به‌منظور مدیریت بهینه منابع آب و خاک ضروری است. به‌همین منظور، در این پژوهش سه روش آبشویی غرقاب دائم، غرقاب متناوب و پاششی بر روی خاک‌های شور و سدیمی منطقه ویس در استان خوزستان مورد بررسی قرار گرفت. این پژوهش به صورت آزمایشگاهی در ستون‌های خاک دست نخورده به ارتفاع یک متر و قطر ۱۵ سانتی‌متر (با فشردن لوله پلی‌اتیلن از سطح دیواره نیمرخ حفر شده به سمت پایین به صورت عمودی) اجرا شد. در ستون‌های خاک با میانگین شوری اولیه ۱۴/۱۳ دسی‌زیمنس بر متر، چهار لایه به ضخامت ۲۵ سانتی‌متر در نظر گرفته شد که به ترتیب، از بالا به پایین دارای بافت لومی رسی، لوم و دو لایه آخر لوم سیلتی بود. ستون‌های خاک در طول اجرای آزمایش به وسیله آب کانال آبیاری منشعب شده از کارون بزرگ با شوری ۲/۸۶ دسی‌زیمنس بر متر با عمق‌های ۲۵، ۵۰، ۷۵ و ۱۰۰ سانتی‌متر تیمار گردید. پس از اعمال هر کدام از عمق‌های آبشویی، ستون مربوطه از دور آبشویی خارج گردید. براساس نتایج بدست آمده، مدل تجربی مشخصی برای هر روش آبشویی ارائه شد. در این میان، مدل نمایی در آبشویی غرقاب دائم بر مبنای ضریب همبستگی بالاتر و خطای استاندارد کمتر، به‌عنوان بهترین مدل معرفی گردید. لیکن، آبشویی غرقاب متناوب علاوه بر حجم آب مورد نیاز کمتر برای شوری زدایی خاک، ضریب راندمان آبشویی بهتری را متناسب با بافت خاک منطقه نشان داد. با توجه به بحران کمبود آب در شرایط کنونی و ضریب راندمان آبشویی برابر با ۰/۳۳ تا ۰/۳۵ در لایه‌های متوالی خاک از بالا به پایین، می‌توان روش غرقاب متناوب را برای آبشویی خاک‌های منطقه مورد مطالعه توصیه نمود.

کلیدواژه‌ها: آبشویی پاششی؛ آبشویی غرقاب دائم؛ آبشویی غرقاب متناوب؛ ضریب راندمان آبشویی؛ مدل آبشویی

^۱ برگرفته از رساله دکتری گروه خاکشناسی، دانشکده کشاورزی و منابع طبیعی، دانشگاه آزاد اسلامی واحد علوم و تحقیقات، تهران، ایران

مقدمه

شوری و سدیمی بودن خاک یکی از مشکلات بارز در خاک‌های مناطق خشک و نیمه خشک است. بنا به آمار موجود، حدود یک میلیارد هکتار از اراضی جهان به طور طبیعی و حدود ۷۷ میلیون هکتار از آن‌ها در نتیجه فعالیت‌های بشر شور شده است (FAO, 1994). در قاره آسیا، ایران پس از کشورهای آسیای میانه، چین، هندوستان و پاکستان دارای بیشترین اراضی شور و سدیمی است (سالمی و حیدری، ۱۳۸۱). بیش از سه چهارم خاک‌های تحت تأثیر شوری و قلیائیت در سطح کره زمین به دلیل آبیاری نادرست و فقدان شبکه‌های زهکشی به شوری اصلی شوری خاک شامل استفاده از آب شور، تبخیر شدید، آبشویی ناکافی، کمبود آبیاری مناسب و مدیریت زهکشی اراضی می‌باشد (Rajabzadeh, et al., 2009).

مساحت گسترده ای از گستره کشور را اقلیم‌های خشک و نیمه‌خشک تشکیل می‌دهد و توزیع زمانی ریزش‌های آسمانی نیز غیریکنواخت و میانگین آن در کشور کمتر از یک سوم میانگین بارش‌های سالانه کره زمین است. با توجه به رشد جمعیت، محدودیت کیفیت و کمیت منابع آب و گسترده‌گی خاک‌های شور به ویژه در مناطق خشک و نیمه خشک جهان، لزوم پیشگیری و مقابله با شوری امری ضروری تلقی شده است (Behzad and Akhoond-Ali, 2002). صرف نظر از اینکه عامل شوری مربوط به عوامل طبیعی یا عوامل انسانی باشد، عملیات آبشویی به تنهایی و یا به همراه احداث شبکه‌های زهکشی راه‌حلی‌هایی غیرقابل جایگزینی برای شوری‌زدایی خاک‌های شور است (Noroozi et al., 2012).

تراکم و انباشت نمک‌ها در نیمرخ خاک بر ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی خاک‌ها از جمله، فشار اسمزی، نفوذپذیری، هدایت‌هیدرولیکی، آن چنان اثراتی باقی می‌گذارد که در نتیجه آن ممکن است رشد و نمو بیشتر گیاهان زراعی و باغی دچار اختلال جدی و یا به طور

کامل متوقف شود (پذیرا، ۱۳۸۵). ارزیابی مقدار آب مورد نیاز برای آبشویی نمک‌های محلول خاک از اقدامات مهم در برنامه‌ریزی اصلاح خاک‌های شور است (Corwin et al., 2007). در عملیات آبشویی و اصلاح اراضی نیاز به مقدار آب زیادی می‌باشد، از این نظر تعیین درجه اصلاح‌پذیری خاک از نظر کارایی فرآیند آبشویی در کاهش شوری و سدیمی بودن خاک و برآورد دقیق حجم آب مورد نیاز، با توجه به مسئله بحران کم‌آبی به منظور حفاظت منابع آبی، از اهمیت خاصی برخوردار است (سالمی و حیدری، ۱۳۸۱). ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی خاک‌ها از جمله میزان شوری اولیه، بافت و ضخامت لایه‌ی خاک، گیاهان انتخابی در الگوی کشت و روش آبشویی نمک‌های محلول خاک از شاخص‌های اصلی مشخص‌کننده‌ی مقدار آب مورد نیاز برای آبشویی می‌باشند (Corwin, et al., 2007). با تعیین مقدار آب موردنیاز جهت انتقال نمک‌های محلول خاک و کاهش هدایت الکتریکی آن‌ها می‌توان با انتظار عملکرد مناسب اقدام به کشت و زرع نمود. همچنین می‌توان زمان لازم برای آبشویی و ضرورت کاربرد مواد اصلاح کننده را مورد بررسی قرار داد (Rahimi, 2005). طبق پژوهش‌های صورت گرفته بر روند کاهش توام شوری و میزان درصد سدیم تبادلی در اثر فرآیند آبشویی، به روش غرقاب دائم، در خاک‌های لومی با میزان درصد سدیم تبادلی ۱۹، پژوهشگران اعلام داشتند که میزان درصد سدیم تبادلی در همه تیمارها نسبت به تیمار شاهد ۴۰/۶٪ کاهش داشته است (Li & keren, 2009). همچنین، در تحقیقی که در کویر بجستان- ایران به منظور بررسی اصلاح‌پذیری خاک‌های منطقه انجام گرفته است، بیان شده که با کاربرد یک متر آب به روش غرقاب متناوب، شوری خاک از ۳۹ به ۱۰ دسی‌زیمنس برمتر و درصد سدیم تبادلی از ۶۱ به ۲۵ درصد کاهش یافته است (Rahimi, 2005).

از نظر عملی و تجربی، آبشویی نمک‌های محلول از نیمرخ خاک‌های شور و سدیمی را می‌توان با استفاده از

شرایط آزمایش انجام شده، صادق می‌باشند (Van Hoorn and Van Alphen, 1990). با توجه به اینکه در منطقه مورد مطالعه تاکنون اقدام به تهیه منحنی‌های آبخویی نشده است، این تحقیق با هدف تعیین ضریب بازده آبخویی اراضی شور منطقه ویس - استان خوزستان با استفاده از ستون‌های دست‌نخورده خاک، لیکن در محیط آزمایشگاهی انجام شد. بررسی روند اصلاح خاک شور به وسیله آبخویی، تعیین برنامه اصلاحی برای بهسازی و ممانعت از تخریب و هدر رفت منابع خاک و آب منطقه، همچنین مقایسه راندمان آبخویی در سه روش آبخویی غرقاب‌دائم، غرقاب متناوب و پاششی از دیگر اهداف این پژوهش بوده است.

مواد و روش‌ها

آزمایش‌های آبخویی بر روی ستون‌های خاک دست‌نخورده‌ی استخراج شده از عمق صفر تا ۱۰۰ سانتی‌متری که از مزرعه دانشگاه آزاد اسلامی واحد اهواز در منطقه ویس استان خوزستان تهیه شد، انجام گردید. این منطقه در شمال شرقی شهر اهواز و در عرض جغرافیایی ۳۱ درجه و ۲۸ دقیقه و ۴۱ ثانیه شمالی و طول جغرافیایی ۴۸ درجه و ۵۲ دقیقه و ۴۹ ثانیه شرقی با ارتفاع ۲۰ متر از سطح دریا قرار دارد. این منطقه دارای رژیم رطوبتی Typic Tempustic و رژیم حرارتی Hyper Thermic می‌باشد. خاک بخش اعظمی از این منطقه، بافت رسی و سنگین دارد که در بیشتر اراضی مشکل شوری و سدیمی بودن وجود دارد. این خاک‌ها بر پایه طبقه‌بندی Soil Taxonomy در رده Entisols و زیر رده Typic Ustifluvents و فامیلی خاک fine, Loamymixed, Carbonutic Hyperthermic نامگذاری شده است (طاهرزاده، ۱۳۸۰). آب مورد استفاده از کانال آبیاری منشعب شده از کارون بزرگ با شوری ۲/۸۶ دسی‌زیمنس بر متر تامین شد که کیفیت آب آن با توجه به دیاگرام ویلکاکس (Richards, 1954) در زمان پژوهش مربوطه، در کلاس C_2S_1 قرار داشت.

آب آبخویی به یکی از روش‌های غرقاب‌دائم یا غرقاب متناوب و یا با آبیاری بارانی انجام داد که هر روش محدودیت و مزیت‌های خاص خود را دارد (پذیرا، ۱۳۸۵). راندمان آبخویی در روش‌های غیراشباع در مقایسه با غرقاب دائم به علت ایجاد شرایط غیراشباع و عبور آب از منافذ ریز بیشتر است (Cote et al., 2000). به منظور افزایش راندمان آبخویی، بهتر است رطوبت خاک در حد کمتر از رطوبت اشباع باشد (Nielsen and Biggar, 1961)، زیرا بیشترین مقدار آبخویی نمک‌های محلول از خاک در چنین شرایطی صورت می‌گیرد (Gardner and fireman, 1958). کاهش میزان نسبت جذب سدیم (SAR) و درصد سدیم تبادلی (ESP) تا حدود ۲۵ درصد در اعماق مختلف خاک در اثر کاربرد روش آبخویی غرقاب متناوب گزارش شده است (Mostafazadeh.fard et al., 2008).

برای تعیین آب مورد نیاز برای آبخویی دو روش عملی و نظری وجود دارد. از آنجا که مطالعات مزرعه‌ای مستلزم صرف وقت و هزینه زیاد است، استفاده از روابط و مدل‌های مبتنی بر نظریه آبخویی و انتقال نمک‌ها مورد توجه قرار گرفته است. این مدل‌ها براساس روابط ریاضی و تجربی به‌دست آمده‌اند (Metternicht & Zinck, 2003). در بررسی روابط تجربی شوری و سدیم‌زدایی خاک‌های شور منطقه ملائانی در استان خوزستان، مشاهده شد که با کاربرد یک واحد عمق آب آبخویی به روش غرقاب دائم، حدود ۸۰ درصد نمک‌های محلول از نیم‌رخ خاکی با بافت رسی لومی در منطقه مذکور خارج شده است (Behzad and Akhoond-Ali, 2002).

ضریب راندمان آبخویی (f) از عوامل مهم و موثر در شناخت عکس‌العمل خاک به فرآیند آبخویی و خروج نمک‌های محلول از نیم‌رخ خاک است. این پارامتر مبین کفایت عمق آب کاربردی برای آبخویی نمک‌ها و کاهش میزان شوری و سدیمی بودن خاک می‌باشد. منحنی‌های آبخویی مربوطه در دامنه‌ای از تغییرات شوری که در آن

این پژوهش به صورت آزمایشگاهی در ستون‌های خاک دست نخورده به ارتفاع یک متر و قطر ۱۵ سانتی‌متر (با فشردن لوله پلی‌اتیلن از سطح دیواره نیم‌رخ حفر شده به سمت پایین به صورت عمودی) اجرا شد. به منظور جلوگیری از خروج خاک در طی مراحل آبخویی، توری مشبک و ارتفاع ۵ سانتی‌متری از سنگریزه‌هایی با قطر حدود ۱۰ میلی‌متر در انتهای ستون قرار گرفت. همچنین برای حصول اطمینان از عدم عبور آب از فضای بین جداری لوله و خاک پیش از شروع آبخویی حاشیه کناری خاک منتهی به جدار ستون به وسیله میله فلزی محکم و نازکی آب‌بندی شد. آبخویی به سه روش غرقاب دائم، غرقاب متناوب و پاششی انجام شد. عمق آب کاربردی در هر سه روش معادل ۱۰۰ سانتی‌متر بود. برای هر روش آبخویی ۴ ستون مجزا با سه تکرار در نظر گرفته شد که به ترتیب مقادیر ۲۵، ۵۰، ۷۵ و ۱۰۰ سانتی‌متر آب آبخویی برای آن‌ها به کار رفت. این کار به این دلیل صورت گرفت تا بتوان خصوصیات فیزیکی و شیمیایی خاک مربوطه به هر عمق آبخویی را جداگانه مورد بررسی و تحلیل قرار داد. در روش غرقاب دائم، مقادیر آب ۲۵، ۵۰، ۷۵ و ۱۰۰ برای هر ستون به صورت یکباره و بدون انقطاع استفاده شد. در واقع، نحوه آبیاری بر حسب مقدار آب در نظر گرفته شده برای هر ستون به صورتی بود که همواره ستون خاک در حالت غرقاب با ارتفاع حدود ۱۰ سانتی‌متری آب بر روی سطح خاک به صورت دائم باقی بماند و با خروج زه‌آب از کف ستون، مقدار آبی معادل از بالا به آن اضافه می‌شد. در روش آبخویی غرقاب متناوب، مقدار آب داده شده به هر ستون با تناوب ۲۵ سانتی‌متری در نظر گرفته شد. به این صورت که ابتدا به هر ۴ ستون ۲۵ سانتی‌متر آب داده شد و پس از پایان آبخویی و خروج زه‌آب کامل و فاصله زمانی حدود ۴۸ ساعت مرحله بعد آبخویی ادامه یافت. این مراحل برای ستون دوم، سوم و چهارم که به ترتیب می‌بایست با ۵۰، ۷۵ و ۱۰۰ سانتی‌متر آب، مورد آبخویی قرار می‌گرفتند در یک تناوب ۲۵ سانتی‌متری دیگر

تکرار شد. پس از اتمام خروج زه‌آب و رعایت فاصله زمانی مذکور تناوب ۲۵ سانتی‌متر بعدی برای ستون‌های آبخویی با عمق ۷۵ و ۱۰۰ سانتی‌متر اجرا شد. همین مراحل برای ستون ۱۰۰ سانتی‌متر آب آبخویی نیز پس از طی مراحل خروج زه‌آب کامل و رعایت فاصله زمانی حدود ۴۸ ساعت نیز ادامه یافت. مراحل اجرای عملیات آبخویی در روش آبخویی پاششی نیز همانند روش غرقاب متناوب انجام گرفت. لیکن در روش غرقاب متناوب ارتفاع اندکی آب در شروع آبخویی روی سطح خاک ایجاد شد که به مرور با پایین رفتن آب و خروج زه‌آب ناپدید می‌گشت که این شرایط در روش آبخویی پاششی وجود نداشت. آبخویی در روش پاششی با کمک دوش متصل به ورودی آب با مساحت دوش ۱۰ سانتی‌متر و ارتفاع پاشش ۲۰ سانتی‌متر صورت گرفت که دبی ورودی آب به ستون خاک ۱ طوری تنظیم شد که در طی مراحل آبخویی هیچ ارتفاع آبی بر روی سطح خاک ایجاد نگردد. این شرایط به وسیله آزمون و خطا انجام شد تا نهایتاً شدت پاشش و دبی خروجی روی ۰/۲ لیتر در دقیقه تنظیم شود که موجب اشباع خاک نگردد.

لازم به ذکر است که پس از اتمام آبخویی در هر سه روش در هر ستون خاک، بر مبنای عمق آب آبخویی در نظر گرفته شده برای آن و خروج کامل زه‌آب، ستون مربوطه از مراحل آبخویی خارج می‌شد. سپس ستون پلی‌اتیلنی، به صورت افقی برش داده شده و از اعماق ۲۵-، ۵۰-۲۵، ۷۵-۵۰ و ۱۰۰-۷۵ سانتی‌متری نمونه‌برداری تصادفی صورت گرفت. این نمونه‌ها به همراه نمونه‌های عمق متناظر پیش از آبخویی و زه‌آب خارج شده از هر ستون به منظور بررسی خصوصیات فیزیکی و شیمیایی خاک به آزمایشگاه معتبر خاک سبز مارون در بهبهان انتقال یافت. در هر نمونه خاک میزان هدایت الکتریکی به وسیله EC سنج (Mclean, 1982)، واکنش گل اشباع به وسیله pH متر (Allison and moodie, 1965)، غلظت کلسیم و منیزیم به روش کمپلکسومتری با EDTA، غلظت سدیم به

در این رابطه Na^+ ، Mg^2 و Ca_x به ترتیب غلظت کاتیون‌های سدیم، منیزیم و کلسیم در عصاره اشباع خاک بر حسب میلی‌اکی‌والانت بر لیتر است که اثرات گاز کربنیک (CO_2)، بی‌کربنات (HCO_3) و شوری آب کاربردی (EC_w) بر روی کلسیم اولیه و موجود لحاظ شده است. مقادیر Ca_x را می‌توان از جداول منابع مرجع استخراج نمود (Ayers and Wescat, 1985).

در عمل امکان دارد مقداری از آب آبشویی صرف رفع یا جبران کمبود رطوبت خاک اعماق مربوطه گردد و در فرآیند آبشویی بی‌اثر باشد، به این مقدار کسر رطوبت خاک گفته می‌شود. به منظور محاسبه کسر رطوبت در هر سه روش ابتدا رطوبت اولیه خاک تعیین و پس آبشویی با ۲۵ سانتی‌متر آب و رسیدن به حد رطوبت ظرفیت زراعی (F.C) از مقدار به دست آمده برای ظرفیت زراعی کسر شد. با توجه به مطالب ارائه شده مقادیر کسر رطوبت در روش‌های آبشویی غرقاب دائم، غرقاب متناوب و پاششی به ترتیب ۸/۹۵، ۱۰/۳۵ و ۹/۲۴ سانتی‌متر در نظر گرفته شد.

بر پایه ارقام جداول فوق با استفاده از ارقام هدایت الکتریکی عصاره اشباع خاک و درصد سدیم تبادلی محاسبه شده، میانگین وزنی (EC_e) و درصد سدیم تبادلی برای لایه‌های ۰-۲۵، ۰-۵۰، ۰-۷۵، ۰-۱۰۰ سانتی‌متری خاک محاسبه شد. مقدار هدایت الکتریکی تعادلی خاک (EC_{eq}) برابر ۲/۸۵ دسی‌زیمنس بر متر در نظر گرفته شد. بر پایه مقادیر EC_e و EC_{eq} لایه‌های مختلف و با توجه به ارقام جدول‌های مذکور متغیرهایی به شکل روابط زیر تعریف گردید (بی‌نام، ۱۳۸۵):

$$X = \frac{D_{lw}}{D_s} \quad \text{و} \quad y = \frac{EC_f - EC_{eq}}{EC_i - EC_{eq}} \quad (۴)$$

که در آن: EC_f و EC_i به ترتیب هدایت الکتریکی عصاره اشباع خاک پیش و پس از آبشویی (D_{lw} ، (dS/m) عمق خالص آب آبشویی (Cm) و D_s عمق لایه خاک (Cm) می‌باشد.

وسیله فلیم فوتومتر، درصد کل مواد خشتی شونده (%T.N.V) به روش تیتراسیون برگشتی با سود (Nelson, Walkly, 1982)، درصد مواد آلی به روش والکی و بلک (USDA and Black, 1934)، درصد گچ به روش استن (Soil, 1972)، درصد رطوبت اشباع به روش وزنی، درصد اندازه ذرات خاک (بافت خاک) به روش هیدرومتری (Bouyoucos, 1962)، جرم مخصوص ظاهری (ρ_b) به روش کلوخه (Klute, 1986) و نفوذپذیری به روش آزمایشگاهی بر روی استوانه‌های خاک دست نخورده اندازه‌گیری شد. براساس ارقام مربوطه مقادیر نسبت جذب سدیم (SAR)، نسبت جذب سدیم تعدیل شده ($adjR_{Na}$)، درصد سدیم تبادلی (ESP)، تخلخل (n) و رطوبت حجمی (حاصلضرب رطوبت وزنی در جرم مخصوص ظاهری) به دست آمد. برای نمونه‌های آب مورد استفاده در آبشویی و زه‌آب خروجی با تناوب ۲۵ سانتی‌متری نیز مقادیر pH، EC، غلظت کلسیم، منیزیم و سدیم اندازه گیری شد، که در نهایت مقادیر SAR و $adjR_{Na}$ نیز برای آن‌ها محاسبه شد (جداول ۱، ۲ و ۳).

لازم به ذکر است که SAR که به معنای نسبت جذبی سدیم می‌باشد که از فرمول زیر به دست می‌آید:

$$SAR = \frac{Na}{\sqrt{\frac{(Ca+Mg)}{2}}} \quad (۱)$$

که در آن Na ، Ca و Mg غلظت یون‌های موجود در محلول بر حسب میلی‌اکی‌والانت بر لیتر می‌باشد (علیزاده، ۱۳۸۴). همچنین، درصد سدیم تبادلی (ESP) را به شرح زیر می‌توان ارائه نمود (GLGR, 1999)

$$ESP = 100(0.015 adjR_{Na}) / 1 + (0.015 adjR_{Na}) \quad (۲)$$

که در آن $adjR_{Na}$ نسبت جذب سدیم تعدیل شده است و از طریق رابطه زیر محاسبه می‌شود:

$$adjR_{Na} = \frac{Na}{\sqrt{\frac{(Ca_x + Mg)}{2}}} = Na[0.5(Ca_x + Mg)]^{-0.5} \quad (۳)$$

$$n = \left(1 - \frac{\rho_b}{\rho_s}\right) * 100 \quad \text{خاک } \rho_s$$

جدول ۱. برخی ویژگی‌های فیزیکی خاک منطقه مورد مطالعه پیش از آیشویی

بافت خاک	فراوانی نسبی (%)			نفوذپذیری (mm/hr)	تخلخل کل (%)	جرم مخصوص ظاهری (gr/Cm ³)	درصد رطوبت اشباع	عمق نمونه برداری (Cm)
	رس	سیلت	شن					
Clay loam	۲۹/۲	۴۸/۹	۲۱/۹	۰/۷۳	۴۰	۱/۵۸	۴۳/۹	۲۵-۰
Loam	۲۵/۶	۴۸/۹	۲۵/۵	۲/۵۰	۳۶	۱/۵۹	۴۳/۵	۵۰-۲۵
Silt loam	۲۲/۰	۵۰/۷	۲۷/۳	۱/۳۰	۴۲	۱/۵۴	۴۳/۸	۷۵-۵۰
Silt loam	۲۵/۶	۵۲/۵	۲۱/۹	۱/۳۰	۴۲	۱/۵۵	۴۷/۷	۱۰۰-۷۵

جدول ۲. مشخصات کیفیت آب مورد استفاده در عملیات آیشویی

تاریخ نمونه برداری	کلاس آب	EC (dS/m)	pH	کلسیم (meq/lit)	منیزیم (meq/lit)	سدیم (meq/lit)	SAR (meq/lit) ^{0.5}	adjR _{Na} (meq/lit) ^{0.5}
۱۳۹۳/۱۲/۴	C ₂ S ₁	۲/۸۶	۷/۵۵	۷/۶۵	۶/۳۵	۱۵/۸۷	۶/۰۰	۶/۲۰

در رابطه ۵، EC_w هدایت الکتریکی آب آیشویی بر حسب دسی‌زیمنس بر متر، EC_{eq} هدایت الکتریکی نهایی لایه مورد نظر پس از کاربرد مقدار معینی آب آیشویی بر حسب دسی‌زیمنس بر متر، D_w عمق ناخالص آب آیشویی بر حسب سانتی‌متر و D_p عمق خالص آب آیشویی یا تراوشات عمقی (D_p=D_{lw}) بر حسب سانتی‌متر می‌باشد. در رابطه ۶، θv، رطوبت حجمی (Cm³/Cm³) و f ضریب راندمان آیشویی است که پارامتری بدون بعد است و سایر پارامترهای آن مانند رابطه ۴ تعریف می‌شود. برحسب آنچه براساس بافت خاک انتظار می‌رفت نتایج برتر انتخاب شد و در نهایت با توجه به مقادیر پارامترهای فیزیکی خاک شامل درصد اندازه ذرات خاک، جرم مخصوص ظاهری و تخلخل، معادله‌ای ریاضی برای روابط بین این پارامترها و ضریب راندمان آیشویی برتر حاصل شد. با قرار دادن مقادیر پارامترها در معادله به-دست آمده، ضریب راندمان آیشویی جدیدی برای هر لایه از خاک محاسبه و بهترین رابطه برای محاسبه ضریب راندمان آیشویی در منطقه مورد نظر ارائه گردید.

پس از دستیابی به کلیه ارقام آزمون‌های آیشویی، تجزیه و تحلیل‌های لازم بر روی طرح بلوک کاملاً تصادفی با استفاده از نرم افزار SPSS، Curve Expert و Excel انجام شد. بدین ترتیب که چهار مدل ریاضی شامل: مدل‌های توانی، معکوس، لگاریتمی و نمایی بر ارقام هدایت الکتریکی عصاره اشباع برازش داده شد و برای هر روش آیشویی، بهترین مدل تجربی انتخاب گردید. این مدل‌ها با برخی معیارهای آماری مانند، ضریب تبیین و خطای استاندارد در سطح معنی‌داری ۹۵٪ مورد تجزیه و تحلیل قرار گرفتند. در نهایت بهترین مدل شوری‌زدایی خاک منطقه مورد نظر و بهترین روش آیشویی تعیین گردید. از آنجایی که از دیگر اهداف این پژوهش تعیین ضریب راندمان آیشویی بود، با توجه به ارقام جداول ارائه شده و با استفاده از روابط ۵ و ۶ ضریب راندمان آیشویی خاک برای هر عمق تجمعی نیمرخ خاک نیز به صورت زیر به دست آمد (بی‌نام، ۱۳۸۵):

$$f = \frac{r \cdot EC_w}{EC_{eq}} \quad \text{و} \quad r = \frac{D_w}{D_p} \quad (5)$$

$$f = \frac{D_s}{D_{lw}} \times \theta v \left[\ln \frac{EC_i - EC_{eq}}{EC_f - EC_{eq}} \right] \quad (6)$$

نتایج و بحث

هدایت الکتریکی به‌طور مستقیم با مجموع آنیون‌ها و کاتیون‌ها مرتبط است. بنابراین به عنوان شاخصی مناسب برای شناسایی مقادیر کل نمک‌های موجود در آب آبیاری و عصاره اشباع خاک به حساب می‌آید (Alizadeh *et al.*, 2001). با مقایسه نتایج ارائه شده در جدول ۴ با مقادیر اولیه آن‌ها در جدول ۳ مشاهده می‌شود پس از کاربرد آب آبخوئی، مقدار شوری خاک کاهش یافته است. این توزیع که عکس توزیع نمک‌ها پیش از آبخوئی است، به علت شسته شدن نمک‌ها از سطح به عمق خاک می‌باشد.

پس از آبخوئی، کاهش زیادی در میزان شوری و درصد سدیم تبادلی در تمام لایه‌ها مشاهده شد. کاهش شوری برای لایه‌های سطحی به ویژه لایه ۰-۲۵ سانتی‌متری، بیشتر بود. نتایج پژوهشگران در بخشی از اراضی جنوب شرق استان خوزستان نیز نشان می‌دهد که بیشترین هدایت الکتریکی قبل از آبخوئی به روش غرقاب متناوب مربوط به عمق ۰-۲۵ سانتی‌متری خاک برابر با ۷۸/۲۰ دسی‌زیمنس بر متر بوده است که پس از آبخوئی با تناوب‌های ۲۵ سانتی‌متری با آبی با شوری ۲ دسی‌زیمنس بر متر در عمق مذکور، به‌طور متوسط به ۴ دسی‌زیمنس بر متر کاهش یافته است. همین روند در مورد کاهش درصد سدیم تبادلی لایه‌ها نیز مشاهده شده است (Mohsenifar *et al.*, 2006). سایر پژوهشگران نیز گزارش کرده اند که آبخوئی به روش غرقاب دائم در

شوری‌زدایی خاک شنی در منطقه بهار شهرستان همدان به میزان زیادی موثر بوده است و منجر به افزایش عملکرد گیاهان زراعی در خاک‌های مذکور شده است (Kolahchi and Jalali, 2007).

متوسط کاهش شوری و درصد سدیم تبادلی در روش‌های آبخوئی غرقاب دائم، غرقاب متناوب و پاششی به ترتیب ۴/۸۵، ۸/۰۱ و ۹/۱۹ دسی‌زیمنس بر متر و ۳۸، ۴۴ و ۳۳۴ دسی‌زیمنس بر متر شوری خاکی با بافت رسی لومی در منطقه ملاثانی و ۰/۵ درصدی میزان سدیم تبادلی در روش آبخوئی غرقاب دائم گزارش شده است (Behzad and Akhond-Ali, 2002). همچنین، کاهش ۶/۵۳ دسی‌زیمنس بر متر هدایت الکتریکی خاک و ۴/۵۸ درصدی میزان سدیم تبادلی در روش آبخوئی غرقاب متناوب پس از صرف ۱۰۰ سانتی‌متر آب آبخوئی در تناوب‌های ۲۵ سانتی‌متری، تا عمق ۱۰۰ سانتی‌متری خاکی با بافت سیلتی رسی، در ۲۰ کیلومتری جنوب شهر اهواز توسط دیگر پژوهشگران نیز ارائه شده است (اسدی و همکاران، ۱۳۹۱).

به منظور بررسی بهتر نتایج مقادیر میانگین وزنی شوری اولیه و نهایی عصاره اشباع خاک پیش و پس از آبخوئی در هر سه روش آبخوئی با مقادیر متفاوت آب مورد استفاده محاسبه شد که در جدول ۵ نشان داده شده است.

جدول ۳. برخی ویژگی‌های شیمیایی خاک منطقه مورد مطالعه پیش از آبخوئی^۱

ESP	adjR _{Na} (meq/lit) ^{0.5}	SAR (meq/lit) ^{0.5}	گج (%)	مواد آلی (%)	درصد کل مواد خشی شونده		هدایت الکتریکی (dS/m)	عمق نمونه‌برداری (Cm)
					T.N.V	pH		
۲۴/۹۰	۲۲/۱۰	۲۱/۵۰	۱/۵۳	۰/۴۰	۳۳	۸/۰۰	۳۴/۵۰	۲۵-۰
۱۴/۶۵	۱۰/۹۲	۱۰/۵۷	۰/۴۱	۰/۳۰	۴۱	۷/۹۰	۸/۹۷	۵۰-۲۵
۹/۷۷	۶/۵۱	۶/۳۰	۰/۷۰	۰/۲۰	۳۹	۸/۲۰	۷/۳۴	۷۵-۵۰
۸/۹۰	۴/۸۲	۴/۶۵	۰/۳۰	۰/۲۰	۳۹	۸/۰۰	۵/۷۱	۱۰۰-۷۵
۱۴/۵۵	۱۱/۰۸	۱۰/۷۵	۰/۵۱	۰/۲۷	۳۸	۸/۰۲	۱۴/۱۳	میانگین

۱. ارقام مندرج در این جدول میانگین سه رقم تجزیه می‌باشند.

جدول ۴. برخی ویژگی‌های شیمیایی لایه‌های نیم‌رخ خاک پس از آبخوئی به سه روش غرقاب دائم، غرقاب متناوب، پاششی^۱

روش آبخوئی	عمق نمونه برداری (Cm)	EC (dS/m)	pH	T.N.V (%)	مواد آلی (%)	گچ (%)	SAR (meq/lit) ^{0.5}	adjR _{Na} (meq/lit) ^{0.5}	ESP
آبخوئی	۲۵-۰	۴/۹۳	۷/۸۰	۳۲/۸	۰/۳۰	-	۱۳/۸۶	۱۳/۳۷	۱۳/۹۵
	۵۰-۲۵	۱۳/۱۰	۸/۰۰	۴۱/۰۰	۰/۴۰	-	۸/۵۰	۱۲/۰۴	۱۴/۲۵
	۷۵-۵۰	۱۱/۴۵	۷/۷۰	۳۹/۰۰	۰/۲۰	-	۹/۴۳	۱۱/۰۷	۱۴/۵۵
غرقاب	۱۰۰-۷۵	۸/۷۰	۸/۰۰	۳۹/۰۰	۰/۲۰	-	۹/۳۹	۱۰/۹۳	۱۳/۹۴
	میانگین	۹/۵۵	۷/۷۸	۳۷/۹۵	۰/۲۷	-	۱۰/۲۹	۱۱/۷۵	۱۴/۱۷
	اختلاف	-۴/۸۵	-۰/۱۵	-۰/۰۵	۰/۰۰	-	-۰/۴۶	۰/۶۷	-۰/۳۸
آبخوئی	۲۵-۰	۵/۱۷	۸/۰۰	۳۲/۳۰	۰/۲۰	-	۸/۵۶	۱۱/۰۰	۱۱/۵۵
	۵۰-۲۵	۵/۳۶	۸/۱۰	۴۰/۵۰	۰/۵۰	-	۴/۹۲	۵/۷۵	۷/۰۹
	۷۵-۵۰	۵/۵۵	۷/۷۰	۳۸/۵۰	۰/۲۰	-	۴/۴۰	۵/۲۶	۶/۳۳
غرقاب	۱۰۰-۷۵	۸/۳۸	۷/۹۰	۳۸/۵۰	۰/۲۰	-	۸/۳۷	۸/۸۰	۱۱/۵۶
	میانگین	۶/۱۲	۷/۹۲	۳۷/۴۵	۰/۲۷	-	۶/۵۶	۷/۷۰	۹/۱۳
	اختلاف	-۸/۰۱	-۰/۱۰	-۰/۵۵	۰/۰۰	-	-۴/۱۹	-۳/۳۷	-۴/۴۲
آبخوئی	۲۵-۰	۶/۸۷	۸/۴۰	۳۳/۰۰	۰/۳۰	-	۶/۳۱	۷/۰۹	۸/۸۴
	۵۰-۲۵	۵/۹۷	۷/۶۰	۴۱/۰۰	۰/۴۰	-	۴/۳۶	۵/۶۲	۶/۳۲
	۷۵-۵۰	۳/۹۸	۷/۹۰	۳۸/۵۰	۰/۲۰	-	۴/۵۲	۵/۲۵	۶/۵۸
پاششی	۱۰۰-۷۵	۲/۹۲	۷/۸۰	۳۹/۰۰	۰/۲۰	-	۴/۲۱	۴/۸۳	۶/۱۶
	میانگین	۴/۹۴	۰/۹۲	۳۷/۵۰	۰/۲۷	-	۴/۵۸	۵/۶۹	۶/۹۸
	اختلاف	-۹/۱۹	-۰/۱۰	-۰/۵۰	۰/۰۰	-	-۵/۹۰	-۵/۳۸	-۶/۵۷

۱. ارقام مندرج در جدول میانگین سه رقم تجزیه می‌باشند.

شده است. لیکن، تفاوتی در روند کاهش میزان درصد سدیم تبادلی خاک نسبت به شوری مشاهده شد. در روش آبخوئی غرقاب متناوب و پاششی در کاهش میزان درصد سدیم تبادلی خاک تفاوت معنی‌دار مشاهده شد ($P < 0.05$) و در مقایسه میانگین‌های آن‌ها کاهش درصد سدیم تبادلی خاک در روش غرقاب متناوب نسبت به قبل از آبخوئی اختلاف معنی‌داری را در سطح ۹۵٪ نشان داده است ($P < 0.05$). با توجه به مشابه بودن روند کاهشی درصد سدیم تبادلی از این پس به بررسی روند شوری‌زدایی و معادلات و مدل استخراج شده در مورد آن پرداخته خواهد شد. نتایج Rajabzadeh و همکاران (2009)، همچنین، نتایج اسدی و همکاران (۱۳۹۱) نیز مؤید روند

بررسی نتایج ارائه شده در جدول ۵ نشان می‌دهد که میزان هدایت الکتریکی در هر سه روش نسبت به قبل از آبخوئی کاهش داشته است و در روش غرقاب متناوب و پاششی، این میزان کاهش به ازای حجم آب منفذی متناظر نسبت به روش آبخوئی غرقاب دائم به میزان تقریبی ۱/۵ برابر بیشتر بوده است. لیکن اختلاف معنی‌داری در کاهش میزان شوری در هر سه روش آبخوئی نسبت به قبل از آبخوئی مشاهده نشده است ($P > 0.05$). همچنین عدم معنی‌داری میزان کاهش شوری میان سه روش نیز وجود دارد ($P > 0.05$). همین روند در مورد کاهش میزان درصد سدیم تبادلی در لایه‌های مختلف خاک، میان روش‌های آبخوئی و همچنین میزان درصد سدیم تبادلی خاک قبل از شروع آبخوئی و پس از آبخوئی در هر روش مشاهده

با استفاده از ارقام میانگین وزنی مقادیر شوری قبل و پس از آبخویی، درصد نمک‌های شسته‌شده و درصد نمک‌های باقیمانده نسبت به نمک‌های موجود در خاک قبل از آبخویی محاسبه شد. نتایج نشان داد که با کاربرد ۱۰۰ سانتی‌متر آب به روش غرقاب‌دائم میزان ۶۷/۱۷، ۵۸/۵۲، ۴۱/۹۸ و ۳۲/۴۵ درصد از نمک‌های اولیه خاک شسته شده است که این مقادیر به ترتیب برابر با ۹/۰۳، ۴/۳۹، ۲/۷۹ و ۱/۲۹ واحد آب منفذی برای اعماق ۰-۲۵، ۰-۵۰، ۰-۷۵ و ۰-۱۰۰ می‌باشد. محققین گزارش کردند که در نیمرخ ۱۰۰ سانتی‌متری یک خاک سیلتی رسی لومی حدود ۳۵٪ نمک‌ها از دو واحد حجم منفذی به ازای ۹۸ سانتی‌متر آب آبخویی انتقال می‌یابد که با نتایج شوری‌زدایی به‌دست آمده هم‌خوانی دارد (Behzad & Akhoond-Ali, 2002).

کاهش شوری و درصد سدیم تبدلی در لایه‌های خاک و مشابهت این کاهش در لایه‌های یکسان خاک می‌باشد. با توجه به نتایج ارائه شده در کاهش میزان هدایت الکتریکی و درصد سدیم تبدلی خاک‌های شور و سدیمی منطقه می‌توان بیان کرد که آبخویی غرقاب متناوب مناسب‌تر و قادر به کاهش میزان بیشتری از نمک‌های خاک بوده است. در پژوهشی که به‌منظور آبخویی نمک‌های محلول از نیمرخ خاک‌های رسوبی و سنگین بافت شور و سدیمی بخشی از اراضی میانی خوزستان صورت گرفته است نیز، روش آبخویی غرقاب متناوب در کاهش این نمک‌ها تاثیر مطلوبی داشته است. همچنین گزارش شده است این کاهش در لایه‌های سطحی نیمرخ خاک با بافت سیلتی رسی به دلیل تغییرات غرقاب متناوب میزان رطوبت خاک موثرتر بوده است (Rajabzade *et al.*, 2009).

جدول ۵. مقادیر میانگین وزنی شوری اولیه و نهایی عصاره اشباع خاک قبل و پس از کاربرد مقادیر متفاوت آب در سه روش آبخویی

میانگین EC _f	شوری عصاره اشباع خاک پس از کاربرد مقادیر متفاوت آب آبخویی (dS/m)				شوری عصاره اشباع خاک قبل از آبخویی (dS/m)		روش آبخویی
	D _w (100) EC _f (100)	D _w (75) EC _f (75)	D _w (50) EC _f (50)	D _w (25) EC _f (25)	(EC _i)	اعماق خاک (Cm)	
۱۵/۶۰	۱۱/۳۳	۱۳/۴۶	۱۵/۷۴	۲۰/۸۷	۳۴/۵۰	۲۵-۰	غرقاب دائم
۱۲/۶۳	۹/۰۲	۱۱/۵۵	۱۰/۲۳	۱۹/۷۳	۲۰/۷۴	۵۰-۰	
۱۲/۳۲	۹/۸۳	۱۲/۰۷	۹/۷۸	۱۷/۶۰	۱۶/۹۴	۷۵-۰	
۱۱/۴۸	۹/۵۵	۱۰/۸۳	۸/۲۶	۱۷/۳۰	۱۴/۱۳	۱۰۰-۰	غرقاب متناوب
۱۷/۵۲	۱۳/۱۲	۱۵/۷۷	۱۹/۳۰	۲۱/۹۰	۳۴/۵۰	۲۵-۰	
۱۱/۷۱	۵/۲۷	۸/۵۱	۱۴/۴۰	۱۸/۶۷	۲۰/۷۴	۵۰-۰	
۱۰/۷۷	۵/۳۶	۸/۵۷	۱۱/۹۷	۱۷/۱۸	۱۶/۹۴	۷۵-۰	پاششی
۱۰/۱۵	۶/۱۲	۸/۶۹	۱۰/۶۰	۱۵/۱۹	۱۴/۱۳	۱۰۰-۰	
۲۱/۶۰	۱۵/۶۶	۱۸/۵۹	۲۲/۹۲	۲۹/۲۳	۳۴/۵۰	۲۵-۰	
۱۳/۲۰	۶/۴۲	۹/۰۲	۱۶/۱۸	۲۱/۲۰	۲۰/۷۴	۵۰-۰	پاششی
۱۱/۹۴	۵/۶۱	۸/۰۹	۱۵/۷۵	۱۸/۳۱	۱۶/۹۴	۷۵-۰	
۱۱/۴۵	۴/۹۴	۸/۲۹	۱۵/۹۱	۱۶/۶۴	۱۴/۱۳	۱۰۰-۰	

آبشویی با میزان ناکافی آب قابل انجام نمی‌باشد، هرچند که استفاده از آب اضافی ممکن است منجر به بروز مشکلاتی در ذخیره آب و سیستم زهکشی منطقه شود. همچنین، کاربرد آب اضافی در فرآیند آبشویی ممکن است منجر به خروج عناصر غذایی مورد نیاز گیاهان، نظیر یون‌های محلول، از منطقه رشد ریشه شود (Anapail, 2001). به همین منظور میزان آب لازم برای شوری‌زدایی خاک منطقه مورد مطالعه با استفاده از سه روش آبشویی غرقاب دائم، غرقاب متناوب و پاششی نیز برآورد شده است. برای این برآورد می‌بایست ابتدا مدل تجربی مناسبی برای هر روش آبشویی ارائه گردد. بنابراین، با استفاده مقادیر کسر رطوبت خاک و ارقام گزارش شده در جدول ۵ دو متغیر x و y معرفی شده در رابطه ۴ محاسبه شد. براساس مقادیر x و y بدست آمده چهار مدل ریاضی شامل مدل‌های معکوس، توانی، لگاریتمی و نمایی به آن‌ها برازش داده شد. بهترین مدل از نظر ضریب همبستگی بالاتر و خطای استاندارد کمتر برای هر روش آبشویی مشخص گردید که در جدول ۶ ارائه شده است.

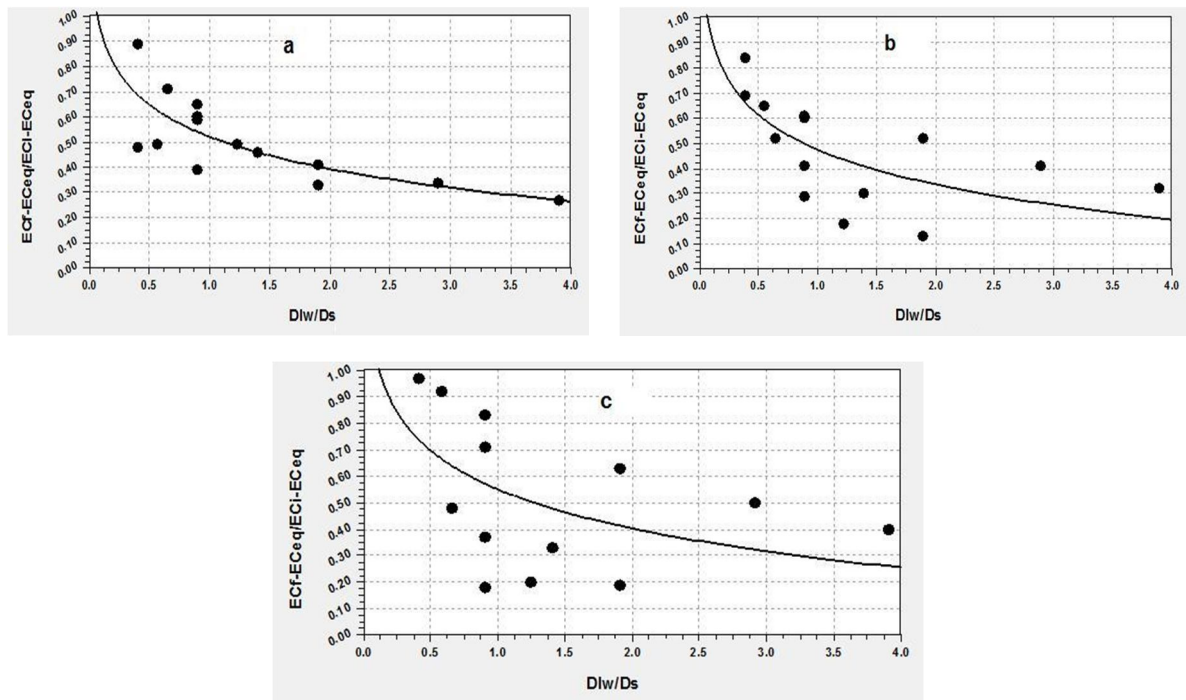
با کاربرد معادلات ارائه شده در جدول فوق و مقادیر متغیرهای x و y ، منحنی‌های شوری‌زدایی خاک برای هر روش آبشویی رسم شد، که در شکل ۱ (a تا c) نشان داده شده است.

با کاربرد ۱۰۰ سانتی‌متر آب در روش آبشویی غرقاب متناوب، میزان نمک‌های اولیه شسته شده برای اعماق ذکر شده به ترتیب برابر با ۶۱/۹۷، ۷۵/۷۸، ۶۸/۳۵ و ۵۶/۷۲ درصد برای تخلخل منفذی ۹/۸۷، ۴/۳۵، ۲/۵۴ و ۱/۶۵ به‌دست آمده است. نتایج مطالعات اسدی و همکاران (۱۳۹۱) در مورد شوری‌زدایی خاک‌های شور منطقه‌ای در جنوب شهر اهواز با بافت سیلتی رسی تحت آبشویی غرقاب متناوب، مشابه با نتایج این پژوهش می‌باشد. نامبردگان گزارش کردند که کاربرد ۱۰۰ سانتی‌متر آب آبشویی موجب کاهش ۷۳/۳۵ درصد شوری اولیه در عمق ۵۰ سانتی‌متری می‌شود که مقدار آب نفوذ یافته متناظر با ۴/۹ واحد آب منفذی است.

بررسی‌ها نشان می‌دهد که مصرف ۱۰۰ سانتی‌متر آب به روش پاششی موجب آبشویی ۵۴/۶۰، ۷۰/۴۶، ۶۶/۹۰ و ۶۵/۰۷ درصد از نمک‌های اولیه اعماق تجمعی مذکور شده است. این مقادیر به ترتیب برابر با ۸/۴۹، ۴/۰۳، ۲/۵۷ و ۱/۷۵ واحد تخلخل منفذی لایه‌های خاک بوده است. نتایج Raj و Nath (1980) نشان داد که کاربرد یک برابر حجم آب منفذی سبب شستشوی حدود ۸۰٪ از نمک‌های خاک شنی شده است. آن‌ها دلیل این میزان زیاد نمک شسته شده را بافت سبک خاک منطقه مورد مطالعه گزارش کردند.

جدول ۶. بهترین مدل‌های تجربی در سه روش آبشویی

روش ردیف	نام مدل		ضرایب ثابت		رابطه ریاضی	آماره‌های محاسبه شده
	فارسی	انگلیسی	a	b		
۱ غرقاب دائم	نمایی	Exponential	۰/۷۳۷	-۰/۳۰۵	$Y=a.e^{bx}$	خطای ضریب همبستگی استاندارد ۰/۱۱۶ ۰/۷۴۳
۲ غرقاب متناوب	لگاریتمی	logaritmik	۰/۴۷۶	-۰/۲۰۱	$Y=a+blnx$	۰/۱۵۸ ۰/۶۷۲
۳ پاششی	لگاریتمی	logaritmik	۰/۵۴۹	-۰/۲۱۳	$Y=a+blnx$	۰/۲۲۵ ۰/۶۲۰



شکل ۱. منحنی‌های شوری زدایی خاک منطقه مورد مطالعه در روش آبخویی a: غرقاب دائم، b: غرقاب متناوب و c: پاششی

خاک در روش‌های غرقابی، غرقاب متناوب و پاششی به ترتیب از روابط ۷، ۸ و ۹ قابل محاسبه است.

(۷) روش غرقاب دائم

$$Dlw = Ds * 3.27 \ln \left[0.737 \left(\frac{ECi - ECeq}{ECf - ECeq} \right) \right]$$

$$ECf = \left[0.737 * \left(\frac{Dlw}{Ds} \right)^{-0.305} * (ECi - ECeq) \right] - ECeq$$

(۸) روش غرقاب متناوب

$$Dlw = Ds * e^{\left[\frac{\left(\frac{ECf - ECeq}{ECi - ECeq} \right) - 0.476}{-0.201} \right]}$$

$$ECf = \left[\left(0.476 - 0.201 \ln \left(\frac{Dlw}{Ds} \right) \right) * (ECi - ECeq) \right] - ECeq$$

(۹) روش پاششی

$$Dlw = Ds * e^{\left[\frac{\left(\frac{ECf - ECeq}{ECi - ECeq} \right) - 0.549}{-0.213} \right]}$$

همان‌طور که در شکل (a,b,c) مشاهده می‌شود، آبخویی نمک‌ها در روش غرقاب متناوب، پاششی و غرقاب دائم به ترتیب سریع‌تر، متوسط و کندتر بوده است. همچنین مقایسه این سه منحنی نشان می‌دهد که در روش غرقاب دائم آب بیشتری برای آبخویی خاک نسبت به دو روش غرقاب متناوب و پاششی لازم است. دلیل آن برقراری شرایط اشباع در روش غرقاب دائم گزارش شده است که در نهایت سبب کاهش راندمان آبخویی می‌شود (Cot et al., 2000).

با استفاده از منحنی‌های شوری زدایی به دست آمده بر اساس معادلات جدول ۶ می‌توان هدایت الکتریکی نهایی (EC_f) و عمق خالص آب مورد نیاز برای شوری زدایی خاک (D_{LW}) را برآورد نمود. برآورد زمان و میزان آب مصرفی می‌تواند از هدررفت آب اضافی جلوگیری و از منابع آبی حفاظت نماید (Oad et al., 2001). به منظور محاسبه میزان آب لازم برای آبخویی خاک در هر روش می‌بایست رابطه ۴ را در معادله تجربی هر یک جایگزین نماییم. با انجام این کار عمق آب لازم برای شوری زدایی

$$ECf = \left[\left(0.549 - 0.213 \ln \left(\frac{Dlw}{Ds} \right) \right) * (ECi - ECeq) \right] - ECeq$$

ضریب راندمان آبشویی را بافت سنگین خاک دانستند زیرا در خاک‌های سنگین بافت، قابلیت نفوذ آب به خاک کمتر است. چگونگی منافذ درشت خاک متأثر از نوع ساختمان خاک است. بنابراین، متغیرهایی مانند جرم مخصوص ظاهری و تخلخل خاک به عنوان شاخص‌های بیانگر ساختمان خاک، می‌توانند در سرعت نفوذ آب به خاک و افزایش راندمان آبشویی مؤثر باشند (پذیرا، ۱۳۸۵). با توجه به این مطالب بر اساس ارقام گزارش شده در جدول ۷ و فراوانی درصد اندازه خاک، جرم مخصوص ظاهری و تخلخل در لایه‌های مختلف خاک معادله‌ای خطی به‌دست آمد که به صورت زیر می‌باشد:

(۱۰)

$$Y=9.78x_1+9.42x_2+9.87x_3+6.86x_4+17.15x_5-27.12$$

در معادله فوق پارامتر Y ضریب راندمان آبشویی می‌باشد که بدون بعد است. در این معادله x_1 فراوانی رس، x_2 فراوانی سیلت و x_3 فراوانی شن خاک به صورت اعشاری می‌باشد. x_4 جرم مخصوص ظاهری برحسب گرم بر سانتی‌متر مربع و x_5 تخلخل به صورت اعشاری بوده است.

برخی پژوهشگران تحقیقاتی در زمینه برآورد ضریب راندمان آبشویی خاک نموده و مدل‌های نظری را در این زمینه ارائه نموده‌اند (Gupta and pandy, 1980). دیگر پژوهشگران با اندازه‌گیری غلظت یون کلر در زه‌آب خروجی از زهکش و اصلاح اراضی دشتی در اسپانیا، با کاربرد مدل نظری سری مخازن و ارائه مدل نظری دیگر، ضریب راندمان آبشویی خاک‌های منطقه مورد نظر را تعیین نمودند (Martinez Bardenas, 1978). با توجه به ارقام جدول ۷ و رابطه نوین (رابطه ۱۰)، ضریب راندمان آبشویی دیگری برای لایه‌های خاک محاسبه شد. این مقادیر در جدول مذکور با علامت f_3 نشان داده شده است. همان‌طور که مشاهده می‌شود مقادیر به‌دست آمده از رابطه نوین با مقادیر به‌دست‌آمده از رابطه تحلیلی (رابطه ۶)، مشابهت بیشتری دارد و در تحلیل آماری

بر مبنای روابط بالا میزان آب لازم برای آبشویی اعماق مختلف خاک منطقه مورد مطالعه محاسبه شد. در این محاسبات شوری اولیه از ۳۶ تا ۸ شوری نهایی ۴ دسی‌زیمنس بر متر و مقدار شوری تعادلی برابر با ۲/۸۵ بوده است. نتایج نشان داد که اصلاح خاک‌ها از شوری ۳۶ به ۴ دسی‌زیمنس بر متر به مقدار قابل توجهی آب نیاز دارد، در صورتی که برای آبشویی به صورت تدریجی از میزان آب مورد نیاز برای شوری‌زدایی خاک به مقدار قابل توجهی کاسته خواهد شد که خود دلیل دیگری بر برتری روش غرقاب متناوب می‌باشد. در پژوهشی مقدار آب لازم برای اصلاح یک سانتی‌متر از خاک به وسیله‌ی آبشویی غرقاب دائم، تحت شرایط مزرعه‌ای از ۰/۳ سانتی‌متر تا ۲/۵۸ سانتی‌متر گزارش شده است (Gupta, 1992). نتایج گزارش شده توسط سایر پژوهشگران نیز نشان داد که در شرایط کاهش تدریجی میزان آب مورد نیاز برای آبشویی به میزان قابل ملاحظه‌ای کمتر از شرایطی است که اقدام به کاهش یکباره شوری از ۴۶ به ۴ دسی‌زیمنس بر متر شده است (محمدزاده و همکاران، ۱۳۹۲).

به منظور بررسی دقیق‌تر، ضریب راندمان آبشویی برای هر روش آبشویی، در اعماق مختلف خاک محاسبه شد که به ترتیب با علامت f_1 و f_2 در جدول ۷ نشان داده شده است. بررسی معنی‌داری ارقام به‌دست آمده نشان داد که دو ضریب راندمان آبشویی اختلاف معنی‌داری در سطح ۵٪ با یکدیگر دارند ($P < 0.05$). لازم به ذکر است که ارقام حاصل از رابطه تحلیلی (رابطه ۶)، با بافت خاک منطقه که طبق نظر برخی محققین می‌بایست حدود ۰/۲ تا ۰/۳۷ بدست آید، هم‌خوانی بهتری دارد (پذیرا، ۱۳۸۵). در پژوهش محمدزاده و همکاران (۱۳۹۲) دلیل کم‌بودن

اختلاف آن‌ها معنی‌دار نبوده است ($P>0.05$). لیکن تفاوت مقادیر f_3 با مقادیر به‌دست آمده از رابطه تجربی (رابطه ۵)، معنی‌دار بوده است ($P<0.05$).

جدول ۷. برآورد ضریب راندمان آبشویی بر اساس خصوصیات فیزیکی خاک و مقایسه با مقادیر f_1 و f_2 در خاک منطقه مورد مطالعه در سه روش آبشویی

خصوصیات فیزیکی خاک و ضرایب راندمان آبشویی	روش آبشویی											
	غرقاب دائم				غرقاب متناوب				پاششی			
	اعماق مختلف خاک											
	۲۵-۰	۵۰-۰	۷۵-۰	۱۰۰-۰	۲۵-۰	۵۰-۰	۷۵-۰	۱۰۰-۰	۲۵-۰	۵۰-۰	۷۵-۰	۱۰۰-۰
رس	۰/۲۷	۰/۲۷	۰/۲۷	۰/۲۶	۰/۲۷	۰/۲۷	۰/۲۶	۰/۲۷	۰/۲۷	۰/۲۷	۰/۲۶	۰/۲۷
سیلت	۰/۴۹	۰/۵۰	۰/۵۱	۰/۵۱	۰/۴۷	۰/۴۸	۰/۴۹	۰/۴۹	۰/۴۷	۰/۴۷	۰/۴۷	۰/۴۷
شن	۰/۲۴	۰/۲۳	۰/۲۱	۰/۲۳	۰/۲۶	۰/۲۵	۰/۲۴	۰/۲۵	۰/۲۶	۰/۲۳	۰/۲۶	۰/۲۸
جرم مخصوص ظاهری	۱/۷۱	۱/۷۱	۱/۷۸	۱/۶۰	۱/۷۸	۱/۷۳	۱/۷۳	۱/۷۵	۱/۷۸	۱/۷۳	۱/۷۳	۱/۷۵
تخلخل	۰/۳۵	۰/۳۵	۰/۳۳	۰/۴۰	۰/۳۳	۰/۳۵	۰/۳۵	۰/۳۳	۰/۳۳	۰/۳۳	۰/۳۳	۰/۳۳
f_1	۰/۳۸	۰/۴۰	۰/۴۳	۰/۴۵	۰/۲۹	۰/۴۱	۰/۵۴	۰/۵۶	۰/۲۹	۰/۴۳	۰/۴۳	۰/۴۸
f_2	۰/۳۲	۰/۳۴	۰/۳۵	۰/۳۵	۰/۳۳	۰/۳۶	۰/۳۷	۰/۳۷	۰/۳۳	۰/۳۵	۰/۳۶	۰/۳۸
f_3	۰/۳۱	۰/۳۳	۰/۳۳	۰/۳۴	۰/۳۳	۰/۳۴	۰/۳۴	۰/۳۵	۰/۳۳	۰/۳۴	۰/۳۴	۰/۳۶

در روش آبشویی غرقاب متناوب در مقایسه با غرقاب دائم به علت برقراری شرایط غیراشباع و آبشویی بهتر نمک‌های خاک بیشتر می‌باشد (Cote et al., 2000).

نتیجه‌گیری

خاک‌های اراضی واقع در منطقه ویس استان خوزستان، تحت تأثیر شوری و سدیمی بودن به خاک‌های غیرقابل کشت یا با کیفیت نامطلوب تبدیل شده‌اند. بالا بودن نمک‌ها در خاک سبب کاهش عملکرد گیاهان و نفوذپذیری خاک به ویژه در خاک‌هایی با بافت رسی و سنگین شده است. از طریق آبشویی صورت گرفته به سه روش در پژوهش حاضر مشخص شد که این خاک‌ها قابلیت شوری‌زدایی و سدیم‌زدایی را دارند، به این صورت که شوری نیم‌رخ خاک، از کلاس شوری S_1A_1 در قلیابیت S_2A_2 پیش از آبشویی، به کلاس شوری S_1A_0 در روش آبشویی غرقاب متناوب و کلاس S_1A_0 در آبشویی پاششی تقلیل یافت. در روش غرقاب دائم، هر چند کاهش در میزان شوری و سدیمی بودن خاک مشاهده

نتایج مؤید این مطلب است که ضریب راندمان آبشویی به‌دست آمده قابل قبول و دارای ارزش است. همچنین می‌توان بیان کرد که علاوه بر بافت خاک، سایر ویژگی‌های فیزیکی خاک، مانند جرم مخصوص ظاهری و تخلخل خاک و روش آبشویی نیز در میزان ضریب راندمان آبشویی موثر می‌باشند. همان‌طور که مشاهده می‌شود هرچه بافت خاک سنگین‌تر باشد و درصد ذرات سیلت و رس بیشتر و شن کمتر باشد، ضریب راندمان آبشویی کمتر است، که به سختی عبور آب آبشویی از میان منافذ ریز مربوط می‌باشد. هرچند ضریب راندمان آبشویی غرقاب متناوب، در لایه‌های مختلف خاک نسبت به روش غرقاب دائم و پاششی بیشتر بوده است. لیکن این تفاوت بین روش‌های آبشویی معنی‌دار نبوده است. پژوهشگران گزارش کرده‌اند آبشویی نمک‌ها به شدت تحت تأثیر بافت خاک، کیفیت آب آبشویی، سرعت جریان آب و رطوبت اولیه خاک می‌باشد (Raj and Nath, 1980). همچنین گزارش شده است که راندمان آبشویی

مختلف استان خوزستان اغلب بافت رسی و سنگین دارند، بهتر است به منظور اندازه‌گیری ضریب راندمان آبخوئی در آن‌ها از رابطه تحلیلی استفاده شود، زیرا در این خاک‌ها خصوصیات فیزیکی خاک در میزان راندمان آبخوئی بسیار مؤثر است که در رابطه مذکور لحاظ شده است. همچنین رابطه نوین به‌دست آمده نیز در شرایط مشابه قابل استفاده می‌باشد. پیشنهاد می‌شود در پژوهش‌های آتی، اصلاح خاک منطقه مورد مطالعه با کاربرد انواع اصلاح‌کننده‌های شیمیایی مورد بررسی قرار گیرد تا تأثیر این اصلاح‌کننده‌ها بر روی ضریب راندمان آبخوئی مشخص شود.

شد، لیکن میزان کاهش به اندازه ای نبود که کلاس شوری خاک را تغییر دهد و در همان کلاس S_2A_2 باقی ماند. بنابراین، توجه به روش آبخوئی مناسب‌تر که بالاترین راندمان آبخوئی و کمترین میزان عمق آب لازم به منظور کاهش نمک‌های خاک و بهسازی منابع خاکی را داشته باشد، حائز اهمیت می‌باشد. از میان روش‌های مورد بررسی، آبخوئی غرقاب متناوب در خاک مورد مطالعه نتایج بهتری ارائه داده است. این نتایج هم در مورد ضریب راندمان آبخوئی بالاتر و هم در مورد میزان عمق آب لازم کمتر، جهت اصلاح خاک در این روش آبخوئی صدق می‌کند. با توجه به اینکه اراضی واقع در مناطق

فهرست منابع

- اسدی کپورچال، ص.، همایی، م. و پذیرا، ا. ۱۳۹۱. مدلسازی آب آبخوئی موردنیاز برای بهسازی خاک‌های شور. نشریه حفاظت منابع آب و خاک، ۲(۲): ۶۵-۸۲
- پذیرا، ا. ۱۳۸۵. راهنمای کاربرد مدل‌های تجربی و نظری آبخوئی نمک‌های خاک‌های شور. نشریه ی ۳۵۹، سازمان مدیریت و برنامه ریزی کشور، ۳۲-۵۷.
- پذیرا، ا. ۱۳۸۵. شوری‌زدایی تدریجی خاک به وسیله نفوذ عمقی آب آبیاری. چهارمین کارگاه فنی زهکشی، ۲۱-۳۸.
- سالمی، ح.، و حیدری، ن. ۱۳۸۱. تعیین ضریب بازده آبخوئی خاک‌های شور و سدیمی (منطقه رودشت اصفهان). مجله تحقیقات مهندسی کشاورزی، ۳(۱۰): ۶۱-۷۴.
- طاهرزاده، م.ح. ۱۳۸۰. مشخصات و طبقه‌بندی خاک‌های شور و سدیمی استان خوزستان پس از آبخوئی. مجله علوم آب و خاک، ویژه‌نامه خاک‌شناسی و ارزیابی اراضی، ۱۳۹-۱۴۹.
- علیزاده، ا. ۱۳۸۴. رابطه آب و خاک و گیاه. انتشارات دانشگاه امام رضا (ع)، مشهد، چاپ پنجم، ۴۴۳-۴۵۲.
- محمدزاده، م.، همایی، م. و پذیرا، ا. ۱۳۹۲. مدلی کاربردی برای بهسازی خاک‌های شور و سدیمی. نشریه حفاظت منابع آب و خاک، ۳(۱): ۴۳-۵۹.
- Allison, L.E., and Moodie, C.D. 1965. Carbonate. In: C. A. Black (Eds.), Methods of Soil Analysis. Part 2, Monograph No. 9, Agron., Madison, WI, Pp: 1379-1396
- Alizadeh, A., Bazari, M.E. Velayati, S. Hasheminia, M. and yaghmai, A. 2001. Using reclaimed municipal wastewater for irrigation of Corn. ICID International workshop on wastewater Reuse Management. September 19-20. Seoul, Korea, Pp: 147-154.
- Anapali, O., Shahin, V. Oztas, T. and Hanay, A. 2001. Defining effective salt leaching regions between drains. Turk. J. agric, 25:51-56.
- Ayres, J.E. and Schoneman, R. 1993. Long term use of saline water for irrigation. J Irrigation Science, 14: 27-34.
- Behzad, M. and Akhoond-Ali, A. 2002. Investigation and presentation of desalinization and desodification experimental equations in Mollasani Region. Khozestan province. Scientific agriculture journal, 25(1):106-126.
- Bouyoucos, C. J. 1962. Hydrometer method improved for making particle-size analysis of soil. Journal of Agron, 54:406- 465.

- Corwin, D.L., Rhoades, J.D. and Simunek, J. 2007. Leaching requirement fore soil salinity control : Steady – state versus transient models. *Agricul , Water Manage*, 90(3):165-180.
- Cote, C.M., Bristow, K.L. and Rose, P.J. 2000. Increasing the efficiency of solute leaching: impacts of flow interruption with drainage of the "preferential flow paths". *Journal of Contaminant Hydrology*, 43: 191–209.
- Gardner, W.R. and Fireman, M. 1958. Laboratory studies of evaporation from soil columns in the presence of a water table. *Soil*, 5: 244-249.
- GIGR, G. 1999. Handbook of Agricultural Engineering. Land and Water Engineering ASAE, Vol. I. Pp 123.
- Gupta, S.K. 1992. Leaching of Salt Affected Soils. Technical bulletin No. 17, CSSRI, Karnal, India, 89Pp.
- Gupta, S.K. and Pandey, R.N. 1980. The leaching efficiency criterion and its evaluation during reclamation of saline soils. *J. International symposium on salt-affected soil*, 18-21 Feb: 300-306.
- Klute, A. 1986. Water retention: laboratory methods. In: A. Klute (Eds.), *Methods of Soil Analysis*. SSSA, Madison, Wisconsin, USA, PP: 635-662.
- Kolahchi, Z. and Jalali, M. 2007. Effect of water quality on the leaching of potassium from sandy soil. *J Arid Environ*, 68:624-639.
- Li, F. H., and Keren, R. 2009. Calcareous sodic soil reclamation as affected by corn stalk application and incubation: A laboratory study. *Pedosphere*, 19:465-475.
- Martinez Beltran, J. 1978. Drainage and reclamation of salt- affected soils. Bardenas area. Spain. International Institute for Land Reclamation and Improvement. Pub. 24. Wageningen. The Netherlards, 321 p.
- McLean, E.O. 1982. Soil pH and lime requirement. In: A.L. Page, R.H. Miller and D.R. Keeney, (Eds.), *Methods of Soil Analysis. Part 2 :Chemical and Biological Properties*. 2nd ed., Soil Sci. Soc. Am. Inc. Pub, USA, PP:199-224.
- Metternicht, GI. and Zinck, JA. 2003. Remote sensing of soil salinity: potentials and constraints. *Journal of Remote Sensing of Environment*, 58(1-2):1-20.
- Mohsenifar, K., Pazira, A. and Najafi, P. 2006. Evaluation of different types of leaching models in two pilots of south east Khoozestan province. 18th World Congress of Soil Science, Philadelphia, Pennsylvania, USA, 6Pp.
- Mostafazadeh-Fard, B., Heidarpour, M. Aghakhani, A. and Feizi, M. 2008. Effects of leaching soil desalinization for wheat crop in an arid region. *Plant Soil Environ*, 54:20-29.
- Nelson, R. E. 1982. Carbonate and Gypsum. In: A.L. Page (Eds.), *Methods of Soil Analysis. Part2*. American Society of Agronomy, Inc. Madison, Wisconsin. USA,45-75.
- Nielsen, D.R. and Biggar, J.W. 1961. Miscible displacement in soils. I. Experimental information. *Soil Science Society of America Proceeding*, 215: 1–5.
- 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. *Environ Sci*, 8(1):59-74.
- Oad, F.C., Soomra, A. Oad, N.L. Abro, Z.A. Issani, M.A. and Gandahi, A.W. 2001. Yield and water use efficiency of sunflower crop under moisture depletions and bed shapes in saline soil. *Online J Biological Sci*, 1:361-362.
- Rahimi, H. 2005. The effects of leaching in decrease saline and sodic land in the margin of Kaveer Namak in Bajestan. *Pajouhesh & Sazandegi*, 88-96.
- Raj, M. and Nath, J. 1980. Leaching of salts as modified by soil texture and quality of leaching water. *Trans Isdt Ucds*, 5:54-59.
- Rajabzadeh, F., Pazira, E. Mahdian, MH. Mahmoudi, S. and Heidarizadeh, M. 2009. Leaching saline and sodic soils along with reclamation-rotation program in the mid-part of Khuzestan, Iran. *Journal of Applied Science*, 9: 4020-4025.
- Richards, L.A. (Editor). 1954. Diagnosis and improvement of saline and alkaline soils. U.S Department of Agriculture. Handbook, No. 60.
- Van Hoorn, J.W., and Van Alphen, J.G. 1990. Salinity control, salt balance and leaching requirement of irrigated soil. 26th international course on land drainage. Wageningen. The Netherlands, 96 p.
- Walkly, A., and Black, I.A. 1934. An examination of the degtjareff method for determining soil organic matter and a proposed modification of the chromic acid titration method. *Soil Science* 37: 29-38.



ISSN 2251-7480

Determination of leaching efficiency coefficient for desalinization of saline and sodic soil in Veis area, Khuzistan province

Zahra Behbahani Zadeh Rezaeyan¹, Ebrahim Pazira^{2*}, Ebrahim Panahpour³ and Narges Zohrabi⁴

1) Zahra Behbahani Zadeh Rezaeyan Ph.D. student, Department of Soil Science, Faculty of Agriculture and Natural Resources, Islamic Azad University, Science and Research Branch, Tehran, Iran

2*) Professor, Department of Soil Science, Faculty of Agriculture and Natural Resources, Islamic Azad University, Science and Research Branch, Tehran, Iran

*corresponding author email: ebrahimpazira@gmail.com

3) Assistant professor, Department of Soil Science, Faculty of Agriculture and Natural Resources, Islamic Azad University, Ahvaz, Iran

4) Assistant professor, Department of Irrigation and Drainage, Faculty of Agriculture and Natural Resources, Islamic Azad University, Ahvaz, Iran

Received: 26-10-2014

Accepted: 19-03-2016

Abstract

Leaching of soluble salts from soil profile could be done as the most appropriate method to emend and reclaim saline and sodic soils. Determination of appropriate depth of leaching water to reclaim this type of soils for optimal management of water and soil resources seems to be necessary. For this reason in this study three different leaching methods including continuous ponding, intermittent ponding and sprayer leaching have been performed on saline and sodic soils in Veis area, Khuzistan. This evaluation was performed as an experiment on natural and intact soil columns with 1 meter height and 15 cm diameter (by pushing polyethylene pipe from upper part of excavated profile wall to the lower part vertically). Soil columns with primary salinity average of 14.13 dS/m, four layers 25 cm thick with clay loam and loam texture, and silt loam texture for the last two layers (from top to bottom) were used. Soil columns were treated with Karun of river water feed canal with 2.86 dS/m salinity in four different depths including 25, 50, 75 and 100 cm during experiment. Which was transferred through canals after each treatment of leaching depths, the columns were removed from leaching. At the end, experimental model was presented for each leaching method. Exponential model in continuous ponding method was considered as the best model based on better correlation coefficient and lower standard error. However, intermittent ponding method showed lower water consumption for soil desalinization and better leaching efficiency coefficient corresponding to soil texture of the area. Due to the shortage of water in the present condition and considering the leaching efficiency coefficient which is between 0.33 and 0.35 in different consecutive soil layers from top to bottom, intermittent ponding method will be appropriate for the studied area.

Keywords: sprayer leaching, continuous ponding, intermittent ponding, leaching efficiency coefficient, leaching model