

## مدلسازی آب آبخویی مورد نیاز برای بهسازی خاک‌های شور\*\*

صفورا اسدی کپورچال<sup>۱</sup>، مهدی همایی<sup>۲</sup> و ابراهیم پذیرا<sup>۳</sup>

\*<sup>۱</sup> استادیار گروه خاکشناسی؛ دانشکده کشاورزی؛ دانشگاه گیلان؛ گیلان؛ ایران؛ نویسنده مسئول مکاتبات: [safoura.asadi@yahoo.com](mailto:safoura.asadi@yahoo.com)

<sup>۲</sup> استاد گروه خاکشناسی؛ دانشکده کشاورزی؛ دانشگاه تربیت مدرس؛ تهران؛ ایران

<sup>۳</sup> استاد گروه خاکشناسی؛ دانشگاه آزاد اسلامی؛ واحد علوم و تحقیقات؛ تهران؛ ایران

تاریخ دریافت: ۱۳۹۱/۰۴/۱۰ تاریخ پذیرش: ۱۳۹۱/۰۹/۳۰

### چکیده

بهسازی خاک‌های شور از دیدگاه حفاظت بهینه منابع خاک و آب اهمیت فراوانی دارد. در خاک‌های شور، عملکرد گیاه مستقیماً از مقدار املاح محلول در نیمرخ خاک و موقعیت سطح ایستایی شور متأثر می‌شود. نخستین گام برای بهسازی این خاک‌ها، کاهش شوری خاک تا حد بهینه از راه آبخویی املاح و جلوگیری از ماندابی شدن آنها است. بهسازی خاک‌های شور به کیفیت آب کاربردی، مقدار آب کاربردی و وضعیت زهکشی خاک بستگی دارد. هدف از این پژوهش، ارائه مدلی تجربی برای شوری‌زدایی خاک‌های شور به گونه‌ای بود که تنها با تغییر برخی پارامترهای محیطی و محلی بتوان آب اصلاحی مورد نیاز و حد نهایی شوری را برآورد کرد. بدین منظور، منطقه‌ای به مساحت ۳۲۱۶ هکتار در استان خوزستان با کلاس شوری و سدیمی  $S_4A_3$  انتخاب شد. آزمون‌های صحرایی مورد نیاز با استفاده از استوانه‌های دوگانه و با آرایشی دایره‌ای، با دو تیمار و دو تکرار اجرا گردید. در تیمار نخست از هیچگونه ماده اصلاحی استفاده نشد و تنها با کاربرد ۱۰۰ سانتی‌متر آب آبخویی در چهار تناوب ۲۵ سانتی‌متری اجرا شد. لیکن در تکرار دوم، پنج تن در هکتار اسید سولفوریک به کار رفت و ادامه آبخویی با استفاده از آب آبیاری انجام شد. نمونه‌های خاک پیش، حین و پس از کاربرد هر تناوب آبیاری از اعماق ۰-۲۵، ۲۵-۵۰، ۵۰-۷۵، ۷۵-۱۰۰، ۱۰۰-۱۲۵ و ۱۲۵-۱۵۰ سانتی‌متری برداشت و تجزیه‌های فیزیکی و شیمیایی مورد نیاز بر روی آنها انجام شد. پس از دستیابی به نتایج حاصل از آزمایشات، نسبت به برازش مدل‌های تجربی-ریاضی اقدام شد. نتایج نشان داد که از میان مدل‌های مورد بررسی، مدل لگاریتمی در مقایسه با دیگر مدل‌ها از کارایی بهتری برای تخمین مقدار آب لازم برای بهسازی خاک‌های شور برخوردار است. در نهایت، مدل پیشنهادی با میانگین وزنی آب مورد نیاز آبخویی ۳۸ سانتی‌متر که کمترین مقدار نسبت به سایر مدل‌ها است به عنوان مدل برتر انتخاب گردید. این مدل از نظر صرفه‌جویی در مصرف آب مورد نیاز آبخویی در رتبه نخست قرار گرفت.

**واژه‌های کلیدی:** آبخویی؛ خاک‌های شور؛ شوری‌زدایی؛ مدل‌سازی

### مقدمه

شور انجام می‌شود، شوری‌زدایی آنها است. با توجه به اینکه خاک‌های زیادی در ایران یا شور و یا سدیمی هستند، حفاظت بهینه از منابع خاک و آب مستلزم اصلاح این خاک‌ها است. همچنین، از دیدگاه مصرف آب، خاک‌های شور نیاز به آب بیشتری نسبت به خاک‌های غیر شور دارند. بنابراین بهسازی این خاک‌ها هم از لحاظ حفاظت بهینه منابع آب کشور و هم بهره‌برداری پایدار از

شوری<sup>۱</sup> و سدیمی بودن منابع خاک از جمله مهم‌ترین عوامل در کاهش باروری خاک‌هاست. انجام کشاورزی در چنین خاک‌هایی بدون اجرای عملیات اصلاحی، تقریباً غیر ممکن است. یکی از اقدامات حفاظتی که برای خاک‌های

\*\* برگرفته از رساله دکتری گروه خاکشناسی، دانشگاه آزاد اسلامی، واحد علوم و تحقیقات تهران.

کاهش تبخیر از سطح خاک می‌شود. کاربرد مقادیر آب آبیاری لازم (آب مورد نیاز گیاه + نیاز آبشویی نمک‌ها) برای آبشویی و تخلیه نمک‌هایی که به وسیله آب آبیاری به سطح خاک و نیمرخ آن افزوده می‌شوند ضروری است. اصلاح خاک‌های شور و سدیمی نیازمند کاربرد مواد اصلاح کننده‌ای همچون گچ، اسید سولفوریک، گوگرد و یا کلرور کلسیم برای جایگزینی یون سدیم است.

هرچند پژوهش‌هایی پرشمار در ارتباط با جنبه‌های مختلف شوری توسط پژوهشگران مختلف انجام شده است، لیکن بیشتر این پژوهش‌ها به واکنش گیاهان به شوری و نه آبشویی آن‌ها پرداخته اند (Corwin *et al.*, 2007; Ben-Gal *et al.*, 2008; Cote *et al.*, 2000; Konukcu *et al.*, 2006; Chen *et al.*, 2010; Sharma and Minhas, 2005; Hendrikus Barnard *et al.*, 2010; حسینی و همکاران، ۱۳۸۷؛ اسماعیلی و همکاران، ۱۳۸۴؛ سعادت و همکاران، ۱۳۸۴). در بیشتر پژوهش‌های مرتبط با شوری، آستانه تحمل گیاه طی کل دوره رشد یکسان فرض شده و تنها یک آستانه کاهش برای هر گیاه ارائه شده است. در پژوهشی جلالی و همایی (۱۳۸۹)، بررسی کمی پاسخ گیاه کلزا به تنش شوری را طی دو آزمایش جداگانه (تحت تنش شوری از ابتدا و تحت تنش در مرحله آخر رشد) انجام و مقادیر عملکرد نسبی دانه در شوری‌های مختلف با استفاده از مدل‌های (1977) Genuchten - Hoffman, Maas - Hoffman (1984) و (1993) Van Dirksen *et al.*, (2002) Homae *et al.* برآورد و پارامترهای مورد نظر به دست آمد. برآزش مدل‌های مختلف بر مقادیر اندازه‌گیری شده در این دو آزمایش نشان داد که مدل همایی و همکاران از دقت بیشتری نسبت به سایر مدل‌ها برخوردار است. در پژوهشی دیگر که با هدف بررسی نقش شوری محلول خاک بر جوانه‌زنی و رشد گیاهچه سورگوم علوفه‌ای در خاک‌های شور طبیعی انجام شد، نتایج نشان داد که جوانه‌زنی بذرها در خاک تا شوری ۴ دسی‌زیمنس بر متر با موفقیت انجام و

خاک‌های شور حائز اهمیت است. در خاک‌های شور، عملکرد گیاهان، تحت تأثیر مستقیم مقدار املاح محلول در نیمرخ خاک و عمق سطح ایستابی است (Cullu, 2003; Minhas *et al.*, 1998).

علت گرایش خاک‌ها به سمت شور و سدیمی شدن بر اثر دو دسته عوامل طبیعی و غیرطبیعی است که هر دو گروه می‌توانند تحت تأثیر مستقیم عوامل مکانی و زمانی، دامنه تغییرات قابل ملاحظه‌ای داشته باشند. علت اصلی تراکم نمک در نیمرخ خاک، در مناطق خشک و نیمه-خشک، کیفیت آب آبیاری و یا کمبود آن است. مواردی نیز وجود دارد که نشان می‌دهد شوری خاک در نتیجه ویژگی‌های شیمیایی سنگ‌های مادری است. به هر حال، خاک‌هایی که بدین ترتیب در این مناطق ایجاد شده، توسعه و یا تکامل می‌یابند، به دلیل ناچیز بودن مقدار بارش‌های آسمانی، امکان آبشویی طبیعی نمک از نیمرخ آنها تقریباً ناچیز است (Pazira and Homae, 2010).

منظور از اصلاح خاک‌های شور، آبشویی نمک‌های محلول از ناحیه رشد ریشه می‌باشد. هرچند در عمل برای دستیابی به این نتیجه، مقدار قابل ملاحظه‌ای آب به عنوان آب آبشویی به کار می‌رود و یا ممکن است مورد نیاز باشد، لیکن در شرایطی که وضعیت زهکشی طبیعی خاک نامناسب باشد، کاربرد این مقدار آب شرایط موجود را نامطلوب‌تر می‌کند. در این شرایط، باید یک سامانه زهکشی مناسب تعبیه کرد. روش‌های اصلاح خاک‌های شور به کیفیت آب کاربردی، مقدار آب کاربردی و وضعیت زهکشی خاک بستگی دارد. کاربرد مقادیر قابل ملاحظه‌ای آب حاوی نمک‌های کم برای آبشویی به روش‌های غرقاب دایم و یا به طور ترجیحی غرقاب متناوب و یا بارانی مناسب می‌باشد. زیرا مقادیر آب لازم از این طریق به کل سطح مزرعه افزوده می‌شود. کشت گیاهان مقاوم به شوری به ویژه در خاک‌های سنگین بافت در اصلاح این خاک‌ها بسیار مؤثر است، زیرا رشد چنین گیاهانی باعث افزایش نفوذپذیری و پوشش گیاهی و

آزمون‌های مزرعه‌ای در منطقه هانسای-هاریان<sup>۲</sup> هندوستان توسط Leffelaar and Sharma نشان داد مدل Reeve (1957) در محاسبه عمق آب آبخویی برای خاک‌های سبک بیش برآورد است. آن‌ها آزمایش‌های مربوطه را به دو روش غرقاب دائم و متناوب در خاکی که شوری اولیه‌ی آن تا عمق ۸۰ سانتی‌متری، ۳۰ دسی‌زیمنس بر متر بود انجام داده و از رابطه‌ی هذلولی مشابهی برای برازش داده‌ها به صورت زیر استفاده کردند:

$$\frac{[(EC_f - EC_{eq}) / (EC_i - EC_{eq})]}{= 0.062(D_s/D_{lw}) + 0.034} \quad (۳)$$

که در آن،  $EC_{eq}$  شوری تعادلی عصاره اشباع خاک بر حسب دسی‌زیمنس بر متر می‌باشد.

با استفاده از رابطه‌ی تجربی فوق عمق آب مورد نیاز آبخویی به صورت زیر قابل محاسبه است:

$$D_{lw} = 0.062 D_s \left[ \frac{EC_f - EC_{eq}}{EC_i - EC_{eq}} - 0.034 \right]^{-1} \quad (۴)$$

هافمن (۱۹۸۰) با استفاده از داده‌هایی که از سراسر جهان گردآوری کرده بود، مدلی برای تعیین عمق آب لازم برای آبخویی به صورت زیر ارائه کرد:

$$D_{lw} = K D_s [(EC_i - EC_{eq}) / (EC_f - EC_{eq})] \quad (۵)$$

که در آن،  $K$  ضریبی تجربی<sup>۳</sup> و بدون بعد بوده و مقدار آن برای خاک‌های لومی شنی در روش آبخویی با غرقاب دائم معادل ۰/۱ و برای خاک‌های رسی تا ۰/۳ تغییر می‌کند. همین مقدار را می‌توان برای خاک‌هایی با بافت لومی سیلتی، رسی سیلتی و سیلتی لومی هم در نظر گرفت. در آبخویی به روش غرقاب متناوب با عمق آبی معادل ۵ تا ۱۵ سانتی‌متر در هر تناوب، صرف‌نظر از نوع خاک می‌توان مقدار ضریب  $K$  را ۰/۱ در نظر گرفت.

تا شوری ۱۴ دسی‌زیمنس بر متر کاهش داشته و در شوری بیشتر از ۱۴ دسی‌زیمنس بر متر جوانه زنی بذرها در خاک متوقف می‌شود (سعادت و همکاران، ۱۳۸۴).

در مورد اصلاح خاک‌های شور، مدل‌های ریاضی در مقیاس‌های آزمایشگاهی موفقیت آمیز بوده‌اند، لیکن تعمیم نتایج به مقیاس‌های بزرگ‌تر دشوار بوده و بنابراین همچنان انجام آزمایش‌های صحرائی ضروری می‌باشد (Jurinak, 1981). از نظر ریاضی، مدل‌های تجربی موجود برای آبخویی یا به صورت توابع هذلولی (Reeve, 1957, Hoffman, 1980, Leffelaar and Sharma, 1977, Pazira and Kawachi, 1981) یا توانی (Verma and Gupta, 1989, Pazira and Keshavarz 1998) یا نمایی (Dieleman, 1963) می‌باشند.

اولین رابطه کمی و تجربی آبخویی، بر مبنای کار صحرائی توسط Reeve (1975) ارائه شده است. مطالعات مزرعه‌ای که در منطقه کوچیلا<sup>۱</sup> ایالت کالیفرنیا انجام شده نشان می‌دهد که منحنی آبخویی از شکل عمومی خاصی پیروی می‌کند. در پژوهشی که بر روی خاکی با بافت رسی سیلتی لومی با شوری اولیه‌ی ۴۰ دسی‌زیمنس بر متر و به روش آبخویی غرقاب دائم انجام شد، رابطه‌ی هذلولی زیر بدست آمد:

$$\frac{D_w}{D_s} = \frac{EC_i}{5(EC_f)} + 0.15 \quad (۱)$$

که در آن،  $EC_i$  و  $EC_f$  به ترتیب هدایت الکتریکی عصاره اشباع خاک پیش و پس از کاربرد عمق مشخصی از آب آبخویی ( $D_w$ ) بر حسب دسی‌زیمنس بر متر و  $D_s$  و  $D_s$  به ترتیب عمق ناخالص آب به کار رفته (آبخویی) و ضخامت لایه خاک بر حسب متر می‌باشند.

با استفاده از رابطه‌ی فوق عمق آب مورد نیاز آبخویی به صورت زیر قابل محاسبه است:

$$D_w = D_s \left[ \frac{1}{5} \left( \frac{EC_i}{EC_f} \right) + 0.15 \right] \quad (۲)$$

<sup>2</sup> Hansai-Haryana

<sup>3</sup> Empirical Coefficient

<sup>1</sup> Coachella

۲۰ کیلومتری جنوب شهر اهواز بین ۳۱ درجه و ۵۱ دقیقه تا ۳۱ درجه و ۵۵ دقیقه عرض شمالی و ۴۸ درجه و ۲۰ دقیقه تا ۴۸ درجه و ۳۸ دقیقه طول شرقی قرار داشت.

خاک‌های این منطقه عمیق (بیش از ۱/۲ متر)، دارای رنگ قهوه‌ای تیره متمایل به زرد با بافت سنگین SiCL و SiC و ساختمان توده‌ای<sup>۱</sup> می‌باشند. به همین دلیل، قابلیت نفوذ آنها "متوسط" و گاه "آهسته" تعیین شد. در نتیجه، هرگونه افزایش آب به آنها ممکن است به رواناب سطحی و یا تبخیر از سطح خاک منجر شود. در این خاک‌ها، بدلیل نامناسب بودن شرایط زهکشی، آب افزوده شده به خاک در نیمرخ آن باقی مانده و به دلیل فزونی تبخیر بر مقدار بارندگی، از طریق تبخیر صعود نموده و موجب تغلیظ املاح محلول در نیمرخ خاک می‌شود. این امر یکی از عوامل مهم شور و سدیمی شدن اراضی منطقه مورد مطالعه است.

با توجه به اینکه ۲۱۶۷۸ هکتار از ۲۲۵۰۰ هکتار از اراضی محدوده مورد بررسی با محدودیت شوری و قلیائیت از سطوح کم تا خیلی زیاد مواجه بود، می‌توان گفت که عمده‌ترین محدودیت کیفی بیش از ۹۶ درصد خاک‌های منطقه، شوری و قلیائیت است. این خاکها بر پایه‌ی طبقه‌بندی جامع خاک<sup>۲</sup> در رده انتی‌سول (Entisols) و زیر رده Aquic Torriorthents قرار داشته و بر اساس طبقه‌بندی فائو<sup>۳</sup> (۱۹۹۸) Calcaric Regosols نام‌گذاری شدند.

برای انجام آزمون‌های مورد نیاز، زمینی به مساحت ۳۲۱۶ هکتار در سری عمیشیه و با کلاس S4A3 (شوری فوق‌العاده زیاد و سدیمی بودن زیاد) انتخاب شد. موقعیت، سری و کلاس شوری و سدیمی بودن خاک‌های مربوطه، همچنین برخی ویژگی‌های فیزیکی لایه‌های مختلف نیمرخ خاک پیش از آبخوبی به ترتیب در جدول‌های ۱ و ۲ ارائه شده است. این آزمون با دو تیمار و دو تکرار اجرا گردید.

پذیرا و کاواچی (۱۹۸۱) رابطه‌ی تجربی زیر را برای بخش مرکزی استان خوزستان در ایران ارائه دادند:

$$\left[ \frac{EC_f - EC_{eq}}{EC_i - EC_{eq}} \right] = \frac{0.076}{\left[ \frac{D_{lw}}{D_s} \right]} + 0.023 \quad (6)$$

رابطه‌ی فوق از نظر شکل با مدل‌های تجربی Reeve و Leffelaar and Sharma شباهت کلی دارد. عمق آب مورد نیاز آبخوبی نمک‌های محلول از نیمرخ خاک‌های منطقه از رابطه‌ی زیر قابل محاسبه می‌باشد:

$$D_{lw} = 0.076 D_s \left[ \frac{EC_f - EC_{eq}}{EC_i - EC_{eq}} - 0.023 \right]^{-1} \quad (7)$$

محسنی‌فر و همکاران (۱۳۸۵)، به منظور بررسی امکان آبخوبی نمک‌های محلول از نیمرخ خاک‌ها در منطقه‌ای در جنوب شرق استان خوزستان مدلی تجربی ارائه دادند.

نظر به اینکه گیاه نیشکر به شوری و سدیمی بودن حساس است، اکثر خاک‌های استان خوزستان برای کشت این محصول باید اصلاح شوند. مدل‌های نظری و تجربی چندی در گذشته برای برآورد آب مورد نیاز اصلاحی خاک (RR) و پیش‌بینی حد نهایت شوری (EC<sub>f</sub>) در استان خوزستان اجرا شده که دامنه کاربرد آنها به دلیل محلی بودن محدوده‌های مطالعاتی، پاسخگوی ارایه‌ی رهنمودهای لازم برای کل اراضی جنوب استان نمی‌باشد. در این پژوهش با در نظر داشتن کاستی‌های ناشی از کمبود اطلاعات اولیه مورد نیاز مدل‌های نظری و تجربی انجام شده، با دیدگاهی نوین مدلی جامع و کاربردی ارائه و مورد ارزیابی و اعتبارسنجی قرار گرفت. به طوری که بتوان فقط با تغییر برخی پارامترهای محیطی و محلی به نتایجی کاربردی برای برآورد آب اصلاحی مورد نیاز و پیش‌بینی حد نهایی شوری دست یافت.

#### مواد و روش‌ها

منطقه‌ی مورد آزمایش با مساحت ۲۲۵۰۰ هکتار، بخشی از اراضی شور و سدیمی جنوب استان خوزستان در

<sup>1</sup> Massive

<sup>2</sup> Soil Taxonomy

<sup>3</sup>FAO

برای انجام آزمایش‌های صحرائی، ابتدا نقاط مورد نظر بر روی زمین مشخص و پس از آن ضمن بازدیدهای صحرائی، مندرجات نقشه‌ها با عوارض سطح اراضی در محل مورد نظر تطابق داده شد. در مرحله بعد، قطعه زمینی یکنواخت به مساحت ۱۰۰ متر مربع انتخاب و آزمون‌های آبخویی در آن انجام شد.

در تیمار نخست، از هیچ‌گونه ماده‌ی اصلاحی استفاده نگردید و فقط با کاربرد یک متر آب آبخویی در چهار تناوب ۰/۲۵ متری اجرا شد. لیکن در تیمار دوم پنج تن در هکتار اسید سولفوریک غلیظ ۹۵٪ به کار رفت و سپس ادامه آبخویی با استفاده از آب آبیاری انجام شد.

جدول ۱- موقعیت، سری، کلاس شوری و قلیائیت و برخی ویژگی‌های فیزیکی خاک‌های مورد آزمون

سرعت نفوذ پایه اراضی پیش از آبخویی (cm/hr)	عمق لایه غیر قابل نفوذ (m)	ضریب آبگذری (m/day)	عمق سطح ایستایی (m)	کلاس شوری و قلیائیت اراضی پیش از اجرای آزمون		سری خاک
				تیمار اول	تیمار دوم	
۰/۴۸	> ۶/۰۰	۰/۶۰	۲/۸۰	۰/۳۷	۰/۵۹	میانگین
						عمیشه

جدول ۲- برخی ویژگی‌های فیزیکی لایه‌های مختلف نیمرخ خاک پیش از آبخویی

کسر رطوبت نمونه‌های خاک (cm)	نفوذپذیری (mm/hr)	تخلخل (%)	جرم ویژه حقیقی	جرم ویژه ظاهری	میزان رطوبت خاک (%)			عمق خاک بافت خاک (cm)	
					PWP	M	FC		
۵/۹۳	۰/۵۹	۴۶/۱۳	۲/۷۱	۱/۴۶	۲۱/۹۴	۵/۷	۱۴/۴۹	SiCL	۲۵-۰
۹/۲۹	۰/۸۷	۴۰/۷۵	۲/۷۱	۱/۶	۲۱/۳	۱۲/۹	۱۴/۹۶	SiCL	۵۰-۲۵
۱۲/۴۱	۰/۲	۳۸/۸۹	۲/۷۱	۱/۶۵	۲۰/۶۷	۱۳/۱	۱۵/۳۶	SiC	۷۵-۵۰
۱۴/۷۵	۰/۲	۳۸/۸۹	۲/۷۱	۱/۶۵	۲۰/۶۷	۱۵	۱۵/۳۶	SiC	۱۰۰-۷۵
۱۵/۹۳	۰/۲	۴۰/۳۷	۲/۷۱	۱/۶۱	۲۰/۷۴	۱۷/۸	۱۵/۵۱	SiCL	۱۲۵-۱۰۰
۱۶/۹۱	۰/۴	۴۰/۱۵	۲/۶۹	۱/۶۱	۲۴/۳۲	۲۱/۹	۱۵/۴۸	SiC	۱۵۰-۱۲۵

M: رطوبت اولیه خاک

نیمرخ خاک با تناوب‌های گفته شده (۲۵ سانتی‌متری) فقط تا عمق ۱ متری از سطح خاک بوده است. از آب کاربردی برای آبخویی نیز نمونه برداری شده و مورد تجزیه قرار گرفت. افزون بر این، وضعیت لایه‌بندی افق‌های مختلف خاک، عمق برخورد به آب زیرزمینی و هدایت هیدرولیکی اشباع خاک نیز در منطقه مطالعاتی بررسی شد. به منظور تعیین سرعت نفوذ آب به خاک و اثر آبخویی بر آن، در نخستین و آخرین نوبت مصرف آب آبخویی، اندازه‌گیری نفوذپذیری انجام گردید.

آرایش استوانه‌های دوگانه به کار رفته در این آزمایش به صورت دایره‌ای بود. تعداد شش استوانه دوگانه بر روی محیطی دایره‌ای به شعاع ۵ متر و با فواصل ۵ متری از

نمونه برداری از خاک پیش از اجرای آزمایش‌ها تا عمق ۱/۵ متری از سطح خاک از اعماق ۰-۲۵، ۲۵-۵۰، ۵۰-۷۵، ۷۵-۱۰۰ و ۱۰۰-۱۵۰ سانتی‌متری انجام گرفت و کلاس شوری و سدیمی بودن محل اجرای آزمایش بار دیگر تعیین گردید. روش آبخویی در این مطالعه، "غرقاب متناوب" با جمع کل عمق آب کاربردی ۱۰۰ سانتی‌متر از رودخانه کارون بود که در چهار تناوب ۲۵ سانتی‌متری اجرا شد. اعماق نمونه برداری از خاک پس از کاربرد کل عمق آب مصرفی مشابه مورد پیش از آبخویی یعنی ۱/۵ متر در نظر گرفته شد. لیکن پس از کاربرد ۰/۲۵، ۰/۵ و ۰/۷۵ متر عمق آب آبخویی که به ترتیب در تناوب‌های اول، دوم و سوم به کار برده شد، اعماق نمونه برداری از

به ترتیب در جدول‌های ۳ و ۴ ارائه شده است. از آنجا که ویژگی‌های شیمیایی خاک پیش از آبخوبی در هر دو تیمار (با و بدون کاربرد ماده اصلاحی) یکسان است، شرح کیفی آن در قسمت نتایج بیان می‌شود. برای دستیابی به مقادیر شوری تعادلی پس از نفوذ ۱۰۰ سانتی‌متر آب به سطح خاک، از عمق ۰-۵ سانتی‌متری یک نمونه خاک (در سه تکرار) تهیه و برای انجام آزمایش به آزمایشگاه فرستاده شد. کیفیت آب کاربردی در این آزمون (در هر دو تیمار) در جدول ۵ ارائه گردیده است و بر مبنای دیاگرام ویلکاکس در کلاس C<sub>4</sub>-S<sub>2</sub> (شوری خیلی زیاد و قلیائیت متوسط) قرار می‌گیرد و از نظر pH حالت نرمال دارد. مقدار شوری (ECw) و نسبت جذب سدیم (adj RNa) به ترتیب ۲/۳۶۲ دسی‌زیمنس بر متر و ۶/۱۹ میلی‌اکی‌والنت بر لیتر به توان نیم می‌باشد. مقایسه‌های لازم بین دو روش اصلاحی، یعنی آب آبخوبی به تنهایی و با مصرف اسید سولفوریک مورد بررسی قرار گرفت.

یکدیگر مستقر شدند. از مرکز دایره، نمونه برداری خاک تا عمق ۱/۵ متری و از عمق‌های ۰-۲۵، ۲۵-۵۰، ۵۰-۷۵، ۷۵-۱۰۰، ۱۰۰-۱۲۵ و ۱۲۵-۱۵۰ سانتی‌متری انجام گرفت. به این صورت که پس از نفوذ اولین دور آب آبخوبی و انجام نمونه‌برداری از اعماق مورد نظر، یک جفت از استوانه‌ها از دور آزمایش حذف و افزودن آب آبخوبی تا کاربرد آخرین دور آب ادامه یافت. نمونه‌ها در دو تکرار با تناوب ۲۵ سانتی‌متری و تا عمق گفته شده از خاک برداشت شدند. برای کلیه نمونه‌های آب و خاک برداشت شده مقادیر شوری، pH، یون‌های Na<sup>+</sup>، Ca<sup>2+</sup>، Mg<sup>2+</sup>، Cl<sup>-</sup>، SO<sub>4</sub><sup>2-</sup> و HCO<sub>3</sub><sup>3-</sup> اندازه‌گیری شد. درصد کربنات کلسیم و مقدار گچ نمونه‌های خاک پیش و پس از آبخوبی نیز اندازه‌گیری گردید. تجزیه‌های شیمیایی مورد نظر در حین آبخوبی شامل هدایت الکتریکی عصاره اشباع خاک، pH و کاتیون‌های محلول سدیم، کلسیم و منیزیم بود. ویژگی‌های شیمیایی لایه‌های مختلف خاک پیش و پس از کاربرد ۱۰۰ سانتی‌متر آب آبخوبی در تیمارهای مربوطه

جدول ۳- برخی ویژگی‌های شیمیایی لای‌های مختلف نیم‌رخ خاک پیش و پس از آبخوبی برای تیمار اول

ESP	SAR	Na <sup>+</sup>	Ca <sup>2+</sup>	Mg <sup>2+</sup>	Ex.Na <sup>+</sup>	C.E.C	Gypsum	T.N.V	pH	ECe	عمق خاک	زمان نمونه برداری
		meq/lit			meq/100gr soil			%		(dS/m)	(cm)	
۳۷/۳۱	۷۳/۵۳	۷۵۷/۰	۶۴/۰	۱۴۸/۰	۴/۸۵	۱۳/۰	۴/۴	۴۵/۳	۷/۹	۶۶/۵۰	۲۵-۰	
۶/۸۲	۴۵/۷۵	۳۸۰/۰	۶۵/۵	۷۲/۵	۱/۰۵	۱۵/۴	۴/۱	۴۸/۲	۸/۱	۳۵/۹	۵۰-۲۵	
۱۲/۵	۴۱/۷۶	۳۴۳/۷	۶۴/۰	۷۱/۵	۱/۳۵	۱۰/۸	۴/۳	۴۷/۰	۸/۲	۳۲/۰	۷۵-۵۰	پیش از آبخوبی
۱۶/۴۸	۳۷/۶۶	۳۵۴/۸	۷۲/۵	۱۰۵	۱/۵	۹/۱	۴/۵	۴۶/۰	۸/۱	۳۴/۴	۱۰۰-۷۵	
۶/۳	۳۷/۴۷	۳۰۳/۸	۶۳/۰	۶۸/۵	۰/۷۵	۱۱/۹	۲/۰	۴۷/۲	۸/۱	۲۷/۲	۱۲۵-۱۰۰	
۱۷/۹۷	۳۴/۴۵	۲۸۲/۰	۶۶/۰	۶۸/۰	۲/۳	۱۲/۸	۲/۲	۴۸/۵	۸/۱	۳۰/۲	۱۵۰-۱۲۵	
۵/۵۷	۲/۴۹	۱۰/۷	۲۶/۰	۱۱/۰	۰/۷۸	۱۴/۰	۲/۰	۴۷/۰	۸/۱	۴/۸	۲۵-۰	پس از کاربرد
۱۳/۵۱	۳/۲۰	۱۳/۴	۲۲/۰	۱۳/۰	۲/۰۸	۱۵/۴	۰/۵	۴۸/۰	۸/۲	۴/۸	۵۰-۲۵	
۸/۱۸	۷/۲۱	۳/۱۰	۲۵/۰	۱۲/۰	۰/۹	۱۱/۰	۱۳/۰	۴۵/۰	۸/۲	۵/۲	۷۵-۵۰	۱۰۰
۲۳/۴۹	۱۳/۲۲	۵۸/۴	۲۴/۰	۱۵/۰	۲/۱	۸/۹۴	۱۳/۰	۴۴/۰	۸/۲	۷/۴	۱۰۰-۷۵	ساتنی‌متر
۱۰/۰	۲۳/۰۳	۱۲۴/۰	۳۴/۰	۲۴/۰	۱/۲	۱۲/۰	۱۴/۲	۴۷/۰	۸/۲	۱۵/۲	۱۲۵-۱۰۰	آب آبخوبی
۹/۱۳	۳۱/۲۰	۱۶۸/۰	۲۵/۰	۳۳/۰	۱/۲	۱۳/۱۴	۱۴/۲	۴۷/۰	۸/۲	۱۹/۱	۱۵۰-۱۲۵	
۱۶/۲۳	۴۵/۱	۴۰۳/۵۵	۶۵/۸۳	۸۸/۹۲	۱/۹۷	۱۲/۱۷	۳/۵۸	۴۷/۰۳	۸/۰۸	۳۷/۷	پیش میانگین	
۱۱/۶۵	۱۳/۳۹	۶۷/۵۸	۲۶/۰	۱۸/۰	۱/۳۸	۱۲/۴۱	۹/۴۸	۴۶/۳۳	۸/۲	۹/۴۲	پس کاهش	
۴/۵۸	۳۱/۷۱	۳۳۵/۹۷	۳۹/۸۳	۷۰/۹۲	۰/۵۹	-	-	۰/۷	-	۲۸/۲۸	تفاوت افزایش	
-	-	-	-	-	-	۰/۲۴	۵/۹	-	۰/۱۲	-	-	

جدول ۴- برخی ویژگی‌های شیمیایی لایه‌های مختلف نیم‌رخ خاک پیش و پس از آبخویی برای تیمار دوم

ESP	SAR	Na <sup>+</sup> Ca <sup>2+</sup> Mg <sup>2+</sup>			Ex.Na <sup>+</sup>	C.E.C	Gypsum	T.N.V	EC <sub>e</sub>	عمق خاک (cm)	زمان نمونه برداری
		meq/lit									
۳۷/۳۱	۷۳/۵۳	۷۵۷/۰	۶۴/۰	۱۴۸/۰	۴/۸۵	۱۳/۰	۴/۴	۴۵/۳	۷/۹	۶۶/۵۰	۲۵-۰
۶/۸۲	۴۵/۷۵	۳۸۰/۰	۶۵/۵	۷۲/۵	۱/۰۵	۱۵/۴	۴/۱	۴۸/۲	۸/۱	۳۵/۹	۵۰-۲۵
۱۲/۵	۴۱/۷۶	۳۴۳/۷	۶۴/۰	۷۱/۵	۱/۳۵	۱۰/۸	۴/۳	۴۷/۰	۸/۲	۳۲/۰	پیش از آبخویی
۱۶/۴۸	۳۷/۶۶	۳۵۴/۸	۷۲/۵	۱۰/۵	۱/۵	۹/۱	۴/۵	۴۶/۰	۸/۱	۳۴/۴	۱۰۰-۷۵
۶/۳	۳۷/۴۷	۳۰۳/۸	۶۳/۰	۶۸/۵	۰/۷۵	۱۱/۹	۲/۰	۴۷/۲	۸/۱	۲۷/۲	۱۲۵-۱۰۰
۱۷/۹۷	۳۴/۴۵	۲۸۲/۰	۶۶/۰	۶۸/۰	۲/۳	۱۲/۸	۲/۲	۴۸/۵	۸/۱	۳۰/۲	۱۵۰-۱۲۵
۳/۲۹	۲/۲۹	۱۱/۳	۲۸/۰	۲۰/۵	۰/۴۶	۱۴/۰	۶/۶	۴۷/۰	۸/۰	۵/۵	پس از کاربرد
۴/۸۳	۳/۴۹	۱۶/۲	۲۲/۰	۲۱/۰	۰/۸۴	۱۷/۴	۱/۵	۴۸/۰	۸/۲	۵/۵	۵۰-۲۵
۹/۷۷	۱۲/۳۰	۵۵/۰	۱۸/۰	۲۲/۰	۱/۲۶	۱۲/۹	۰/۵	۴۶/۰	۸/۲	۶/۵	۷۵-۵۰
۳۳/۹۸	۲۷/۱۷	۱۲۳/۰	۲۲/۰	۱۹/۰	۳/۵	۱۰/۳	۱۲/۰	۴۴/۰	۸/۳	۱۳/۳	۱۰۰-۷۵
۲۱/۴۳	۴۶/۴۴	۳۷۱/۰	۵۳/۰	۷۵/۰	۲/۱	۹/۸	۱۵/۰	۴۵/۰	۸/۲	۴۰/۸	تر آب آبخویی
۱۷/۳۲	۳۸/۱۱	۲۹۴/۰	۵۲/۰	۶۷/۰	۲/۲	۱۲/۷	۴/۷	۴۶/۰	۸/۱	۳/۵	۱۵۰-۱۲۵
۱۶/۲۳	۴۵/۱	۴۰۳/۵۵	۶۵/۸۳	۸۸/۹۲	۱/۹۷	۱۲/۱۷	۳/۵۸	۴۷/۰۳	۸/۰۸	۳۷/۷	پیش میانگین
۱۵/۱۰	۲۱/۶۳	۱۴۵/۰۸	۳۲/۵۰	۳۷/۴۲	۱/۷۳	۱۲/۸۵	۶/۷۲	۴۶/۰	۸/۱۷	۱۷/۷۷	پس
۱/۱۳	۲۳/۴۷	۲۵۸/۴۷	۳۳/۳۳	۵۱/۵۰	۰/۲۴	-	-	۱/۰۳	-	۱۹/۹۳	کاهش تفاوت
-	-	-	-	-	-	۰/۶۸	۳/۱۴	-	۰/۰۹	-	افزایش

جدول ۵- نتایج تجزیه شیمیایی نمونه‌های آب کاربردی در آزمون شوری زدایی

ECw	T.D.S	pH	Na <sup>+</sup>	Ca <sup>2+</sup>	Mg <sup>2+</sup>	K <sup>+</sup>	Sum of Cations	Cl <sup>-</sup>	SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup>	HCO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	CO <sub>3</sub> <sup>2-</sup>	Sum of anions	SAR	adjR <sub>Na</sub>
(dS/m)	(mg/lit)													
۲/۳۶۲	۱۵۱۲/۰	۸/۲	۱۵/۰	۲/۰	۱۰/۰	-	۲۷/۰	۱۳/۰	۱۱/۰	۳/۰	-	۲۷/۰	۶/۱۰	۶/۱۹

هدایت الکتریکی عصاره اشباع نمونه‌ها پیش، حین و پس از آبخویی برای لایه‌های مختلف خاک و میانگین‌های وزنی محاسبه شده به ازای مقادیر مختلف عمق آب مصرفی در جدول‌های ۶ و ۷ ارائه شده است.

جدول ۶- میانگین وزنی شوری اولیه و نهایی عصاره اشباع خاک، پیش و پس از کاربرد مقادیر متفاوت آب آبخویی در اعماق مختلف نمونه برداری شده برای تیمار اول

عمق نمونه برداری از خاک (cm)	هدایت الکتریکی عصاره اشباع خاک پیش از آبخویی (dS/m)	هدایت الکتریکی عصاره اشباع خاک پس از کاربرد تناوبهای مختلف آب کاربردی (dS/m)			
		D <sub>w</sub> =۱۰۰cm	D <sub>w</sub> =۷۵cm	D <sub>w</sub> =۵۰cm	D <sub>w</sub> =۲۵cm
		میانگین EC <sub>f</sub> (۱۰۰)	میانگین EC <sub>f</sub> (۷۵)	میانگین EC <sub>f</sub> (۵۰)	میانگین EC <sub>f</sub> (۲۵)
۲۵-۰	۶۶/۵۰	۴/۸	۴/۲	۴/۴۱	۵/۶
۵۰-۰	۵۱/۲۰	۴/۸	۴/۸۵	۶/۰۶	۷/۰۹
۷۵-۰	۴۴/۸۰	۴/۹۳	۵/۴	۶/۶۷	۱۴/۸۶
۱۰۰-۰	۴۲/۲۰	۵/۵۵	۸/۳۸	۱۰/۰۰	۲۱/۰۵
۱۲۵-۰	۳۹/۲۰	۷/۴۸	۱۲/۳	۱۵/۲۰	۲۴/۷۶
۱۵۰-۰	۳۷/۷۰	۹/۴۲	۱۴/۴۵	۱۸/۶۷	۲۷/۲۳

جدول ۷- میانگین وزنی شوری اولیه و نهایی عصاره اشباع خاک، پیش و پس از کاربرد مقادیر متفاوت آب آشوبی در

اعماق مختلف نمونه برداری شده برای تیمار دوم

میانگین	هدایت الکتریکی عصاره اشباع خاک پس از کاربرد تناوبهای مختلف آب کاربردی (dS/m)				هدایت الکتریکی عصاره اشباع خاک پیش از آشوبی (dS/m)	عمق نمونه برداری از خاک (cm)
	$D_w=100\text{cm}$	$D_w=75\text{cm}$	$D_w=50\text{cm}$	$D_w=25\text{cm}$		
	$EC_f(100)$	$EC_f(75)$	$EC_f(50)$	$EC_f(25)$		
۵/۳۳	۵/۵	۵	۶	۴/۸	۶۶/۵۰	۲۵-۰
۵/۹۹	۵/۵	۵/۲	۶/۵۰	۶/۷۵	۵۱/۲۰	۵۰-۰
۷/۵۱	۵/۸۳	۵/۸	۷/۲۳	۱۱/۱۷	۴۴/۸۰	۷۵-۰
۱۱/۲۶	۷/۷	۸/۰	۱۱/۲۳	۱۸/۱۳	۴۲/۲۰	۱۰۰-۰
۱۴/۵۲	۱۴/۳۲	۱۳/۸	۱۵/۴۴	-	۳۹/۲۰	۱۲۵-۰
۱۴/۷۶	۱۷/۷۷	۱۶/۳۳	-	-	۳۷/۷۰	۱۵۰-۰

پس از تأمین کسر رطوبت خاک لایه‌ی مورد نظر به صورت ثقلی از آن لایه‌ی خاک خارج می‌شود. کم کردن مقدار  $EC_{eq}$  از بالا و پایین کسر مذکور ( $Y$ ) باعث می‌شود تا نتایج حاصل از عوامل خارجی مؤثر همچون میزان تبخیر، شرایط زهکشی داخلی خاک، کیفیت آب آشوبی و شرایط اجرای آزمایش مستقل گردد. بر مبنای رقم‌های مندرج در جدول‌های ۸ و ۹، منحنی‌های شوری زدایی خاک‌های مورد آزمایش تهیه شدند. در این سری آزمایش‌ها، میانگین مقدار شوری تعادلی به ترتیب ۵/۲۳ و ۲/۷۹ دسی‌زیمنس بر متر محاسبه شد.

با استفاده از نرم افزار CurveExpert و SPSS، چهار مدل ریاضی از نوع توانی، نمایی، معکوس و لگاریتمی به ارقام شوری زدایی محاسبه شده مندرج در جدول‌های ۸ و ۹ برازش داده شد.

در عمل ممکن است مقداری از آب آشوبی صرف جبران کمبود رطوبت خاک شده و در فرآیند آشوبی بی اثر باشد. همچنین بر اثر مصرف آب آشوبی، کاهش شوری حتی به مقدار زیاد در لایه‌های سطحی خاک ممکن است الزاماً منجر به حصول تعادل شیمیایی کامل با آب آشوبی در کوتاه مدت نشود. به همین دلیل، بر پایه‌ی میانگین‌های وزنی شوری و با استفاده از ارقام جدول‌های ۳ و ۴ نسبت به تهیه رقم‌های شوری زدایی به شرح زیر اقدام و نتایج در جدول‌های ۸ و ۹ ارائه شد.

$$X = [Dlw / Ds] \quad (10)$$

$$Y = [(EC_f - EC_{eq}) / (EC_i - EC_{eq})] \quad (11)$$

کمیت  $Dlw$  در واقع نشان‌دهنده مقدار آبی است که



جدول ۸- ارقام مربوط به شوری زدایی خاک‌های مورد آزمون برای تیمار اول

عمق نمونه برداری از خاک (cm)				عمق خالص آب آبتویی و نسبت‌های مربوط به آن (X, Y)		
۹۴/۰۷	۶۹/۰۷	۴۴/۰۷	۱۹/۰۷	Dlw (cm)		
۳/۷۶	۲/۷۶	۱/۷۶	۰/۷۶	X=dlw/Ds		۲۵-۰
-	-	-	۰/۰۱	Y=ECf-ECeq/ECi-ECeq		
۹۰/۷۱	۶۵/۷۱	۴۰/۷۱	۱۵/۷۱	Dlw (cm)		
۱/۸۱	۱/۳۱	۰/۸۱	۰/۳۱	X=dlw/Ds		۵۰-۰
-	-	۰/۰۲	۰/۰۴	Y=ECf-ECeq/ECi-ECeq		
۸۷/۵۹	۶۲/۵۹	۳۷/۵۹	۱۲/۵۹	Dlw (cm)		
۱/۱۷	۰/۸۳	۰/۵۰	۰/۱۷	X=dlw/Ds		۷۵-۰
-	۰/۰۰	۰/۰۴	۰/۳۴	Y=ECf-ECeq/ECi-ECeq		
۸۵/۲۵	۶۰/۲۵	۳۵/۲۵	۱۰/۲۵	Dlw (cm)		
۰/۸۵	۰/۶۰	۰/۳۵	۰/۱۰	X=dlw/Ds		۱۰۰-۰
۰/۰۱	۰/۰۹	۰/۱۳	۰/۴۳	Y=ECf-ECeq/ECi-ECeq		
۸۴/۰۷	۵۹/۰۷	۳۴/۰۷	۹/۰۷	Dlw (cm)		
۰/۶۷	۰/۴۷	۰/۲۷	۰/۰۷	X=dlw/Ds		۱۲۵-۰
۰/۰۷	۰/۲۱	۰/۲۹	۰/۵۷	Y=ECf-ECeq/ECi-ECeq		
۸۳/۰۹	۵۸/۰۹	۳۳/۰۹	۸/۰۹	Dlw (cm)		
۰/۵۵	۰/۳۹	۰/۲۲	۰/۰۵	X=dlw/Ds		۱۵۰-۰
۰/۱۳	۰/۲۸	۰/۴۱	۰/۶۸	Y=ECf-ECeq/ECi-ECeq		

dS/m  $e_{23}$  EC<sub>eq</sub>=

جدول ۹- ارقام مربوط به شوری زدایی خاک‌های مورد آزمون برای تیمار دوم

عمق نمونه برداری از خاک (cm)				عمق خالص آب آبتویی و نسبت‌های مربوط به آن (X, Y)		
۹۴/۰۷	۶۹/۰۷	۴۴/۰۷	۱۹/۰۷	Dlw (cm)		
۳/۷۶	۲/۷۶	۱/۷۶	۰/۷۶	X=dlw/Ds		۲۵-۰
۰/۰۴	۰/۰۳	۰/۰۵	۰/۰۳	Y=ECf-ECeq/ECi-ECeq		
۹۰/۷۱	۶۵/۷۱	۴۰/۷۱	۱۵/۷۱	Dlw (cm)		
۱/۸۱	۱/۳۱	۰/۸۱	۰/۳۱	X=dlw/Ds		۵۰-۰
۰/۰۶	۰/۰۵	۰/۰۸	۰/۰۸	Y=ECf-ECeq/ECi-ECeq		
۸۷/۵۹	۶۲/۵۹	۳۷/۵۹	۱۲/۵۹	Dlw (cm)		
۱/۱۷	۰/۸۳	۰/۵۰	۰/۱۷	X=dlw/Ds		۷۵-۰
۰/۰۷	۰/۰۷	۰/۱۱	۰/۲۰	Y=ECf-ECeq/ECi-ECeq		
۸۵/۲۵	۶۰/۲۵	۳۵/۲۵	۱۰/۲۵	Dlw (cm)		
۰/۸۵	۰/۶۰	۰/۳۵	۰/۱۰	X=dlw/Ds		۱۰۰-۰
۰/۱۲	۰/۱۳	۰/۲۱	۰/۳۹	Y=ECf-ECeq/ECi-ECeq		
۸۴/۰۷	۵۹/۰۷	۳۴/۰۷	۹/۰۷	Dlw (cm)		
۰/۶۷	۰/۴۷	۰/۲۷	۰/۰۷	X=dlw/Ds		۱۲۵-۰
۰/۳۲	۰/۳۰	۰/۳۵	-	Y=ECf-ECeq/ECi-ECeq		
۸۳/۰۹	۵۸/۰۹	۳۳/۰۹	۸/۰۹	Dlw (cm)		
۰/۵۵	۰/۳۹	۰/۲۲	۰/۰۵	X=dlw/Ds		۱۵۰-۰
۰/۴۳	۰/۳۹	-	-	Y=ECf-ECeq/ECi-ECeq		

EC<sub>eq</sub>= ۲/۷۹ dS/m

برآورد شده و اندازه‌گیری شده را نشان می‌دهد. EF مقادیر برآورد شده را با میانگین مقادیر اندازه‌گیری شده مقایسه می‌کند. مقدار منفی EF بیانگر آن است که میانگین مقادیر اندازه‌گیری شده برآورد بهتری نسبت به مقادیر برآورد شده می‌دهد. CRM، شاخصی برای سنجش تمایل مدل به بیش‌برآوردی و یا کم‌برآوردی نسبت به مقادیر اندازه‌گیری شده است. CRM منفی بیانگر بیش‌برآوردی مدل است. اگر همه داده‌های برآورد شده و اندازه‌گیری شده یکسان باشند، EF و CD برابر یک و CRM، ME و RMSE برابر صفر می‌باشند.

از آنجا که طراحی سیستم‌های زهکشی سطحی و زیرسطحی، پیش‌نیاز بهسازی خاک‌های شور و سدیمی در مقیاس بزرگ است، بر پایه‌ی داده‌های به‌دست آمده از این پژوهش عمق بهینه نصب و فواصل زهکش‌های زیرزمینی با استفاده از معادله Glover - (1960) Dumm محاسبه شد.

$$L = \pi \frac{\left[ \frac{K(d_e + 0.5Y_0) * t}{S} \right]^{\frac{1}{2}}}{\left[ \ln 1.16 \frac{Y_0}{Y_t} \right]^{\frac{1}{2}}} \quad (17)$$

که در آن  $t$  تناوب بین دو دوره آبیاری یا بارندگی (روز)،  $S$ ، تخلخل قابل زهکشی،  $Y_0$  حداکثر ارتفاع سطح ایستابی در بخش بالایی زهکش‌ها (متر)،  $Y_t$  ارتفاع متغیر سطح ایستابی به‌عنوان تابعی از زمان (متر)،  $K$  میانگین هدایت آبی اشباع در نیمرخ خاک (متر در روز)،  $d_e$  عمق معادل هوشهات (متر) و  $L$  فاصله بین دو خط زهکش (متر) می‌باشد.

### نتایج و بحث

بررسی جدول‌های ۱ و ۲ نشان می‌دهد که بافت لایه ۰-۵۰ سانتی‌متری خاک نسبتاً سنگین و در لایه ۲۰۰-۵۰ سانتی‌متری (به‌جز لایه ۱۲۵-۱۰۰ سانتی‌متری که متوسط است) سنگین تا بسیار سنگین می‌باشد. ضریب آبگذری

مدل‌های برازش داده شده با استفاده از آماره‌های ضریب تبیین و خطای استاندارد در سطح معنی‌دار ۰/۱ مورد تجزیه و تحلیل قرار گرفتند. سپس، بهترین مدل که دارای بیشترین ضریب همبستگی و کمترین خطای استاندارد بود به عنوان مدل "برتر" برگزیده شد. به منظور ارزیابی دقت، اعتبار و کارایی مدل پیشنهادی، از آماره‌های  $ME^1$ ،  $RMSE^2$ ،  $CD^3$ ،  $EF^4$  و  $CRM^5$  استفاده شد (Homaei et al., 2002; Zarei et al., 2010). بیان ریاضی این آماره‌ها به صورت زیر است:

$$ME = \max |P_i - O_i|_{i=1}^n \quad (12)$$

$$RMSE = \left[ \frac{\sum_{i=1}^n (P_i - O_i)^2}{n} \right]^{1/2} \quad (13)$$

$$CD = \frac{\sum_{i=1}^n (O_i - \bar{O})^2}{\sum_{i=1}^n (P_i - \bar{O})^2} \quad (14)$$

$$EF = \frac{\sum_{i=1}^n (O_i - \bar{O})^2 - \sum_{i=1}^n (P_i - O_i)^2}{\sum_{i=1}^n (O_i - \bar{O})^2} \quad (15)$$

$$CRM = \frac{\sum_{i=1}^n O_i - \sum_{i=1}^n P_i}{\sum_{i=1}^n O_i} \quad (16)$$

که در آنها  $P_i$  و  $O_i$  به ترتیب مقادیر برآورد شده و اندازه‌گیری شده،  $n$  تعداد نمونه‌ها و  $\bar{O}$  میانگین مقادیر اندازه‌گیری شده است.

حد پایینی  $ME$ ،  $RMSE$  و  $CD$  صفر و بیشترین مقدار  $EF$  یک است.  $CRM$  و  $EF$  می‌توانند منفی باشند. مقدار  $ME$  نشان دهنده ناکارآمدی مدل است، درحالی‌که مقدار  $RMSE$  نشان دهنده میزان کم‌برآوردی یا بیش‌برآوردی مدل است. آماره‌ی  $CD$  نسبت پراکنش مقادیر

<sup>1</sup> Maximum Error

<sup>2</sup> Root Mean Square Error

<sup>3</sup> Coefficient of Determination

<sup>4</sup> Modeling efficiency

<sup>5</sup> Coefficient of Residual Mass

صورت تراوشات عمقی از عمق ۱۵۰ سانتی‌متری خاک خارج شده و منجر به آبخویی لایه‌های فوقانی می‌شود. بررسی جدول‌های ۳ و ۴ نشان می‌دهد که خاک لایه‌ی ۰-۲۵ سانتی‌متری پیش از آبخویی فوق العاده شور و به میزان قابل توجهی سدیمی است. مقادیر متوسط شوری، pH، درصد سدیم تبادل، آهک و گچ خاک تا عمق ۱۵۰ سانتی‌متری به ترتیب ۳۷/۷ دسی‌زیمنس بر متر، ۸/۰۸، ۱۶/۲۳ درصد، ۴۷/۰۳ درصد و ۳/۵۸ میلی‌اکی‌والنت در صد گرم خاک خشک بود. بر پایه اطلاعات جدول‌های فوق و با استفاده از رقم‌های هدایت الکتریکی عصاره اشباع خاک، میانگین وزنی هدایت الکتریکی برای لایه‌های ۰-۲۵، ۰-۵۰، ۰-۷۵، ۰-۱۰۰ و ۰-۱۵۰ سانتی‌متری محاسبه گردید. نتایج مربوط به آزمون‌های شوری‌زدایی تیمارهای اول و دوم آزمایش به ترتیب در جدول‌های ۱۰ و ۱۱ ارائه شده است.

خاک، متوسط، عمق لایه غیر قابل نفوذ، خیلی عمیق، سطح ایستابی مربوطه، متوسط و سرعت نفوذ پایه اراضی در اولین دور کاربرد ۲۵ سانتی‌متر آب آبخویی، متوسط می‌باشد. همچنین، درصد رطوبت خاک در ظرفیت زراعی بین ۲۰/۶۷ تا ۲۴/۳۲ و در نقطه پژمردگی بین ۱۴/۴۹ تا ۱۵/۵۱ می‌باشد. نفوذپذیری تمام لایه‌های نمونه‌برداری شده خاک "آهسته" تا "خیلی آهسته" و جرم ویژه حقیقی و ظاهری خاک‌ها به ترتیب از حداقل ۲/۶۹ و ۱/۴۶ تا حداکثر ۲/۷۱ و ۱/۶۵ گرم بر سانتی‌متر مکعب متغیر بود. بدین ترتیب، درصد تخلخل کل خاک‌های محل مورد آزمون بین ۳۸/۸۹ تا ۴۶/۱۳ است. همچنین، رطوبت قابل استفاده برای لایه‌های متفاوت و تا عمق ۱۵۰ سانتی‌متری در مجموع نزدیک به ۱۶/۹ سانتی‌متر است. بنابراین از ۱۰۰ سانتی‌متر عمق آب کاربردی، تنها ۸۰/۱ سانتی‌متر آن به

جدول ۱۰- نتایج برازش مدل‌های مختلف به ارقام شوری زدایی برای تیمار اول

مدل ریاضی	ضرایب ثابت رابطه		آماره‌های مدل	
	a	b	r	SE
$Y=a.e^{b.x}$	۰/۷۴۲	-۴/۰۷۳	۰/۹۱۷	۰/۰۸۴
$Y=a.X^b$	۰/۰۷۴	-۰/۷۵۵	۰/۹۱۳	۰/۰۸۶
$Y=a+b \ln X$	-۰/۰۳۵	-۰/۲۲۰	۰/۹۲۵	۰/۰۷۹
$Y=a+b/x$	۰/۰۵۰	-۰/۰۳۴	۰/۸۹۸	۰/۰۹۲

جدول ۱۱- نتایج برازش مدل‌های مختلف به ارقام شوری زدایی برای تیمار دوم

مدل ریاضی	ضرایب ثابت رابطه		آماره‌های مدل	
	a	b	r	SE
$Y=a.e^{b.x}$	۰/۲۲	-۰/۶۷	۰/۶۸	۰/۶۷
$Y=a.X^b$	۰/۰۹	-۰/۷۵	۰/۶۵	۰/۶۰
$Y=a+b \ln X$	۰/۱۲	-۰/۱۰	۰/۶۶	۰/۱۰
$Y=a+b/x$	۰/۰۹	۰/۰۳	۰/۵۶	۰/۱۱

مورد آزمون است. بدین ترتیب می‌توان رابطه زیر را ارائه نمود:

$$Y = -0.035 - 0.22 \ln X \quad (18)$$

نتایج تجزیه و تحلیل‌های آماری و برازش مدل‌های مختلف تجربی در جدول ۱۰ بیانگر آن است که مدل لگاریتمی با بزرگترین ضریب همبستگی و کمترین خطای استاندارد، مناسب‌ترین مدل برای شوری‌زدایی خاک‌های

معرفی نمود:

$$Y = -0.103 + 0.125 \ln X \quad (23)$$

پس از جایگزینی متغیرهای مربوطه، رابطه را به صورت زیر نیز می‌توان نوشت:

$$\ln(Dlw/Ds) = \frac{(ECf - ECeq)}{ECi - ECeq} = -0.103 + 0.125 \ln X \quad (24)$$

با استفاده از رابطه‌ی فوق، عمق لازم آب برای آبتویی املاح از نیمرخ خاکی با ضخامت مشخص و میزان شوری نهایی عصاره اشباع خاک را به صورت زیر می‌توان محاسبه کرد:

$$Dlw/Ds = \exp [(Y-a)/b] \quad (25)$$

$$Dlw = Ds \cdot \exp [(Y - 0.125) / (-0.103)] \quad (26)$$

$$ECf = [(0.125 - 0.103 \ln (Dlw/Ds)) \times ECi - ECeq] + ECeq \quad (27)$$

درصد نمک‌های اولیه باقیمانده و شسته شده با استفاده از جدول‌های ۶ و ۷ محاسبه گردید که نتایج آن در جدول‌های ۱۲ و ۱۳ ارائه شده است.

با جایگزینی متغیرهای مربوطه، رابطه به صورت زیر

نوشته می‌شود:

$$\ln(Dlw/Ds) = \frac{(ECf - ECeq)}{ECi - ECeq} = -0.103 + 0.125 \ln X \quad (19)$$

با استفاده از رابطه ۱۹، عمق لازم برای آبتویی املاح محلول از نیمرخ خاک به ضخامت مشخص و میزان شوری نهایی عصاره اشباع خاک به صورت زیر قابل محاسبه می‌باشد:

$$Dlw/Ds = \exp [(Y-a)/b] \quad (20)$$

$$Dlw = Ds \cdot \exp [(Y + 0.103) / (-0.125)] \quad (21)$$

$$ECf = [(-0.103 + 0.125 \ln (Dlw/Ds)) \times ECi - ECeq] + ECeq \quad (22)$$

نتایج تجزیه و تحلیل‌های آماری و برازش مدل‌های تجربی مختلف در جدول ۱۱ بیانگر آن است که برای تیمار دوم نیز مدل لگاریتمی با بزرگترین ضریب همبستگی و کمترین خطای استاندارد مناسب‌ترین مدل شوری زدایی برای خاک‌های مورد آزمون می‌باشد. بدین ترتیب رابطه زیر را می‌توان به عنوان رابطه‌ی برتر

جدول ۱۲- رابطه مقادیر مختلف عمق آب آبتویی کاربردی و تغییرات مقادیر نمک‌های اولیه باقیمانده و شسته شده

موجود در عصاره اشباع خاک در اعماق مختلف برای تیمار اول

میانگین ECE	اعماق مختلف نیمرخ خاک (Ds) (سانتی‌متر)				درصد نمک اولیه (%)	D <sub>w</sub> (cm)
	۱۰۰-۰	۷۵-۰	۵۰-۰	۲۵-۰		
۲۶/۳۳	۴۹/۸۸	۳۳/۱۷	۱۳/۸۵	۸/۴۲	باقیمانده	۲۵
۷۳/۶۸	۵۰/۱۲	۶۶/۸۳	۸۶/۱۵	۹۱/۵۸	شسته شده	
۱۴/۲۶	۲۳/۷۰	۱۴/۸۹	۱۱/۸۲	۶/۶۳	باقیمانده	۵۰
۸۵/۷۴	۷۶/۳۰	۸۵/۱۱	۸۸/۱۸	۹۳/۳۷	شسته شده	
۱۱/۹۲	۱۹/۸۶	۱۲/۰۵	۹/۴۷	۶/۳۲	باقیمانده	۷۵
۸۸/۰۸	۸۰/۱۴	۸۷/۹۵	۹۰/۵۳	۹۳/۶۸	شسته شده	
۱۰/۱۹	۱۳/۱۵	۱۱/۰۰	۹/۳۸	۷/۲۲	باقیمانده	۱۰۰
۸۹/۸۱	۸۶/۸۵	۸۹/۰۰	۹۰/۶۲	۹۲/۷۸	شسته شده	
۱۵/۶۸	۲۶/۶۵	۱۷/۷۸	۱۱/۱۳	۷/۱۵	باقیمانده	میانگین
۸۴/۳۲	۷۳/۳۵	۸۲/۲۲	۸۸/۸۷	۹۲/۸۵	شسته شده	

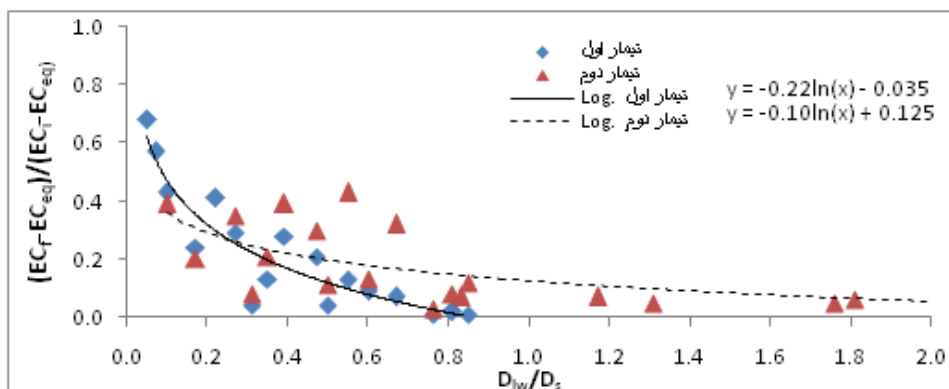
جدول ۱۳- رابطه مقادیر مختلف عمق آب آبخویی کاربردی و تغییرات مقادیر نمک‌های اولیه باقیمانده و شسته شده موجود در عصاره اشباع خاک در اعماق مختلف برای تیمار دوم

Dw (cm)	درصد نمک اولیه (%)	اعماق مختلف نیمرخ خاک (Ds) (سانتی متر)				میانگین ECe
		۱۰۰-۰	۷۵-۰	۵۰-۰	۲۵-۰	
۲۵	باقیمانده	۴۲/۹۶	۲۴/۹۳	۱۳/۱۸	۷/۲۲	۲۲/۰۷
	شسته شده	۵۷/۰۴	۷۵/۰۷	۸۶/۸۲	۹۲/۷۸	۷۷/۹۳
۵۰	باقیمانده	۲۶/۶۱	۱۶/۱۴	۱۲/۷۰	۹/۰۲	۱۶/۱۲
	شسته شده	۷۳/۳۹	۸۳/۸۶	۸۷/۳۰	۹۰/۹۸	۸۳/۸۸
۷۵	باقیمانده	۱۸/۹۶	۱۲/۹۵	۱۰/۱۶	۷/۵۲	۱۲/۳۹
	شسته شده	۸۱/۰۴	۸۷/۰۵	۸۹/۸۴	۹۲/۴۸	۸۷/۶۱
۱۰۰	باقیمانده	۱۸/۲۵	۱۳/۰۱	۱۰/۷۴	۸/۲۷	۱۲/۵۷
	شسته شده	۸۱/۷۵	۸۶/۹۹	۸۹/۲۶	۹۱/۷۳	۸۷/۴۳
میانگین	باقیمانده	۲۶/۶۸	۱۶/۷۶	۱۱/۷۰	۸/۰۲	۱۵/۷۹
	شسته شده	۷۳/۳۲	۸۳/۲۴	۸۸/۳۰	۹۱/۹۸	۸۴/۲۱

و ۷۳/۳۲ درصد نمک‌های اولیه از اعماق مربوطه آبخویی شده و مقدار آب به‌کار رفته برابر با ۸/۶۷، ۴/۹، ۳/۴۲ و ۲/۵۷ واحد آب منفذی است.

منحنی‌های شوری زدایی با استفاده از روابط ۱۸ و ۲۳ که بهترین مدل‌های تجربی برای خاک‌های مورد آزمون می‌باشند، رسم گردید که نتایج در شکل ۱ نشان داده شده است.

بر پایه‌ی جدول ۱۲ مشخص می‌شود که با کاربرد ۱۰۰ سانتی‌متر آب به ترتیب ۹۲/۸۵، ۸۸/۸۷، ۸۲/۲۲ و ۷۳/۳۵ درصد از نمک‌های اولیه از اعماق مربوطه آبخویی شده است. مقدار آب به‌کار رفته برابر با ۸/۶۷، ۴/۹، ۳/۴۲ و ۲/۵۷ واحد آب منفذی<sup>۱</sup> برای اعماق مربوطه می‌باشد. ارقام مندرج در جدول ۱۳ نیز نشان می‌دهد که با کاربرد ۱۰۰ سانتی‌متر آب به ترتیب ۹۱/۹۸، ۸۸/۳۰، ۸۳/۲۴



شکل ۱- منحنی شوری زدایی خاک‌های مورد آزمون

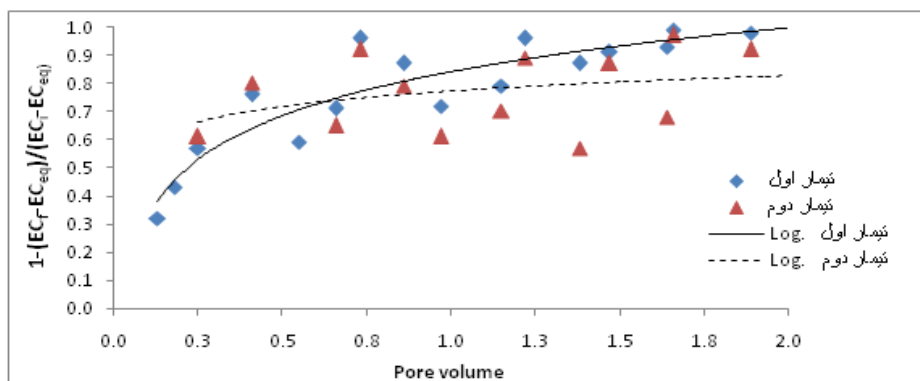
<sup>1</sup> Pore Volume

درصد املاح اولیه شسته شوند. برخی پژوهش‌ها نیز یافته‌های Nielsen and Biggar (1961) را تأیید کرده‌اند. مثلاً در پژوهشی نشان داده شده در یک خاک لوم شنی، به ازای یک واحد تخلخل حجمی ۷۵٪ از نمک‌ها شسته می‌شوند (Khosla et al., 1979). همچنین، Van Der Molen (1956) نشان داد که ۵۰٪ از نمک‌های محلول به ازای کاربرد آب معادل یک واحد تخلخل حجمی شسته می‌شود. لیکن با توجه به شکل ۲ در این پژوهش به ازای یک واحد تخلخل حجمی حدود ۸۴ و ۷۸ درصد نمک‌های اولیه به ترتیب برای تیمار اول و دوم شسته می‌شوند و شستشوی املاح باقیمانده احتیاج به زمان دارد.

پنج آماره ریاضی محاسبه شده مربوط به داده‌های مشاهده شده و برازش داده شده برای دو تیمار خاک‌های مورد آزمایش در جدول ۱۴ ارائه شده است.

با استفاده از این منحنی‌ها، عمق خالص آب (DIw) مورد نیاز برای کاهش عملی شوری خاک نیز قابل برآورد است. مقادیر استخراجی از این منحنی‌ها، نیاز خالص آبشویی نمک‌های محلول را نشان می‌دهد. بدیهی است برای برآورد کل مقدار آب لازم برای آبشویی (Dw) باید به مقادیر کسر رطوبتی لایه خاک موردنظر، تبخیر از سطح آب و خاک و میزان بارندگی توجه نموده و این عوامل را در محاسبات و برنامه‌ریزی‌های آبشویی در نظر گرفت. حدود تغییرات منحنی‌های شوری زدایی به دست آمده در این آزمون بین ۶۶/۵۰ تا ۲۷/۲ دسی‌زیمنس بر متر متغیر بود.

از آنجا که فرآیند آبشویی از نظریه جابجایی اختلاط پذیر پیروی می‌کند، بر پایه‌ی یافته‌های Nielsen and Biggar (1961) باید به ازای یک واحد تخلخل حجمی، ۵۰ درصد و به ازای دو واحد تخلخل حجمی، ۸۰



شکل ۲- مقادیر نمک‌های اولیه شسته شده به ازاء مقادیر مختلف آب منفذی

جدول ۱۴- آماره های محاسبه شده برای ارزیابی مدل های برازش داده شده به خاک های مورد آزمون

مدل	تیمار	RMSE	CRM	CD	EF	ME
نمایی	۱	۰/۰۸	۰/۰۶	۱/۱۰	۰/۸۵	۰/۱۵
	۲	۰/۵۸	۰/۲۱	۰/۰۵	۰/۸۸	۰/۲۸
توانی	۱	۰/۰۱	-۰/۰۴	۰/۴۳	۰/۳۷	۰/۵۱
	۲	۰/۱۱	۰/۱۳	۱/۶۱	۰/۳۱	۰/۲۹
لگاریتمی	۱	۰/۰۷	۰/۰۰	۱/۱۵	۰/۸۷	۰/۱۸
	۲	۰/۱۰	۰/۰۰	۰/۰۰	۰/۴۴	۰/۲۴
معکوس	۱	۰/۰۹	۰/۰۰	۱/۲۴	۰/۸۱	۰/۲۱
	۲	۰/۱۱	۰/۰۰	۳/۱۱	۰/۳۲	۰/۲۸

مدل نزدیک به صفر است، این گرایش چندان قوی نیست. همچنین به‌جز مدل توانی و معکوس، اختلافی معنی‌دار بین دیگر مدل‌ها وجود ندارد. کمترین مقدار ME مربوط به مدل لگاریتمی می‌باشد. برای این تیمار نیز، بررسی پنج آماره نشان می‌دهد که مدل‌های برازش داده شده با اندک اختلافی از روندی نسبتاً یکسان پیروی می‌کنند، لیکن مدل لگاریتمی برای شوری زدایی خاک‌های مورد آزمون بهتر از دیگر مدل‌ها است.

هرچند که در هر دو تیمار، مدل لگاریتمی کارآیی بهتری نسبت به دیگر مدل‌ها داشت، لیکن در شرایط برابر، با در نظر گرفتن ضریب تبیین، خطای استاندارد و سایر آماره‌های ریاضی، عدم مصرف هرگونه ماده اصلاح‌کننده طی فرآیند شوری زدایی، به کاربرد اسید سولفوریک برتری داشته است و بدین ترتیب رابطه‌ی ۱۸ به عنوان مدل برتر معرفی می‌گردد. برای تجزیه و تحلیل مدل شوری زدایی ارائه شده، مقایسه‌ای بین مدل حاصله و برخی مدل‌های تجربی آبخویی از دیدگاه برآورد مقدار آب مورد نیاز برای آبخویی نمک‌های محلول مطابق جدول ۱۵ انجام شد.

بر اساس این جدول، مقدار RMSE در چهار مدل نمایانگر آن است که برای تیمار اول آزمایش مذکور مدل لگاریتمی از دیگر مدل‌ها کارآیی بهتری دارد. گرایش به بیش برآوردی<sup>۱</sup> یا کم برآوردی<sup>۲</sup> در هر چهار مدل تقریباً یکسان بوده، لیکن با توجه به اینکه مقدار CRM در هر چهار مدل نزدیک به صفر می‌باشد، این گرایش چندان قوی نیست. همچنین، به‌جز مدل توانی، اختلافی معنی‌دار بین دیگر مدل‌ها وجود ندارد. کمترین مقدار ME مربوط به مدل‌های نمایی و لگاریتمی است. در بررسی این پنج آماره نشان می‌دهد که مدل‌های برازش داده شده با اندک اختلافی از یک روند پیش‌بینی شده تبعیت می‌کنند، لیکن مدل لگاریتمی برای شوری زدایی خاک‌های محدوده مورد مطالعه بهتر از مدل‌های دیگر است.

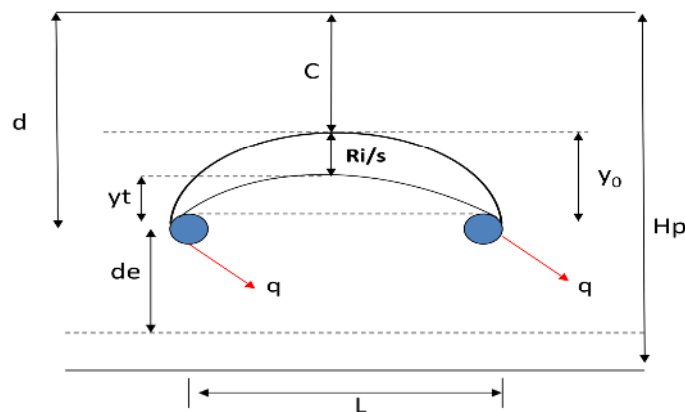
مقدار RMSE در تیمار دوم این آزمون، برای هر چهار مدل نشان می‌دهد که در این تیمار نیز مدل لگاریتمی از دیگر مدل‌ها کارآیی بهتری دارد. همچنین گرایش به بیش برآوردی یا کم برآوردی در چهار مدل تقریباً یکسان است. لیکن با توجه به اینکه مقدار CRM در هر چهار

جدول ۱۵- مقایسه نتایج حاصل از کاربرد مدل‌های تجربی آبخویی خاک‌ها

نام مدل	سال ارائه	مقادیر آب مورد نیاز اصلاح خاک (m)				رتبه تناسب مدل کاربردی
		اعماق اصلاحی خاک مورد نظر (m)				
		(Ds)				
		۱/۰۰	۰/۷۵	۰/۵۰	۰/۲۵	
Reeve	۱۹۵۷	۱/۵۰	۲/۰۱	۱/۵۰	۰/۵۰	۸
Dieleman	۱۹۶۳	۱/۲۵	۲/۲۳	۰/۵۶	۰/۱۴	۹
Leffelaar and Sharma	۱۹۷۷	۰/۲۷	۰/۸۴	۰/۲۱	۰/۰۵	۴
Hoffman	۱۹۸۰	۰/۵۱	۰/۹۳	۰/۲۳	۰/۰۶	۷
Pazira and Kavachi	۱۹۸۱	۰/۵۰	۰/۸۹	۰/۲۲	۰/۰۶	۶
Verma and Gupta	۱۹۸۹	۰/۴۹	۰/۸۹	۰/۲۲	۰/۰۶	۵
Pazira and Keshavarz	۱۹۹۸	۰/۳۸	۰/۶۷	۰/۱۷	۰/۰۴	۳
Mohsenifar	۲۰۰۶	۰/۳۰	۰/۵۵	۰/۱۳	۰/۰۳	۲
رابطه نوین	۲۰۱۰	۰/۳۹	۰/۵۲	۰/۲۶	۰/۱۳	۱

خاک‌های مورد آزمون و روش اجرای آزمون‌های آبتشویی نسبت داد.

با فرض اینکه کشت غالب منطقه، گیاه نیشکر بوده و میانگین هدایت آبی اشباع در نیمرخ خاک (K) برابر ۰/۶ متر در روز، محل قرار گرفتن سطح خاک تا لایه غیر قابل نفوذ (Hp) ۶ متر، عمق نصب زهکش‌ها از سطح زمین (d) ۲ متر، بالاترین نقطه سطح ایستابی تا سطح خاک (C) ۱/۲ متر، تخلخل قابل زهکشی (S) ۰/۰۷۷، تناوب بین دو دور آبیاری یا بارندگی (t) ۵ روز و تراوشات آبیاری که زیر زهکش‌ها نفوذ می‌کند (Ri) ۰/۰۲۵ متر به ازای آبیاری گیاه مورد نظر باشد، در این صورت و بر مبنای رابطه‌ی ۱۷ فاصله کاربردی و اقتصادی بین زهکش‌های زیرزمینی ۵۰ متر خواهد بود (شکل ۳).



شکل ۳- نمایی از چگونگی محاسبه فاصله زهکش‌های زیرزمینی

اولیه در تیمار اول و ۸۸/۳۰ و ۷۳/۳۲ درصد شوری اولیه در تیمار دوم افق‌های ۵۰ و ۱۰۰ سانتی‌متری نیمرخ خاک می‌شود که مقدار آب نفوذ یافته‌ی متناظر آن به ترتیب برابر با ۴/۹ و ۲/۵۷ واحد آب منفذی است. همچنین، مقادیر آب آبتشویی کاربردی و تراوشات عمقی حاصله موجب آبتشویی ۸۴/۳۲ درصد از مقادیر اولیه شوری نیمرخ خاک تا عمق یک متری در تیمار اول و ۸۴/۲۱ درصد از مقادیر اولیه شوری نیمرخ خاک تا عمق یک متری در تیمار دوم

در این مقایسه، شوری اولیه تا عمق ۱۵۰ سانتی‌متری نیمرخ خاک برابر ۴۵، شوری نهایی برابر با ۸ و شوری تعادلی برابر با ۳/۵۴ دسی‌زیمنس بر متر در نظر گرفته شد. نتایج نشان داد که مدل‌های Mohsenifar (2006)، Leffelaar and Pazira and Keshavarz (1998)، Sharma (1977) و Verma and Gupta (1989) به ترتیب پس از مدل نوین به‌دست آمده در این پژوهش، کمترین مقدار آب لازم برای آبتشویی خاک را برآورد می‌کنند. دیگر مدل‌های مورد مقایسه یعنی مدل‌های Hoffman (1980)، Reeve (1957) و Dieleman (1963) برآورد مناسبی از مقدار آب مورد نیاز آبتشویی در منطقه مورد مطالعه ارائه نمی‌دهند. این موضوع را می‌توان به تفاوت ویژگی‌های فیزیکی (بافت و ساختمان)، ویژگی‌های شیمیایی (شوری و درصد سدیم تبادلی اولیه)

#### نتیجه‌گیری

آبتشویی نمک‌های محلول از نیمرخ خاک‌های شور رسوبی و سنگین بافت منطقه مورد مطالعه به روش غرقاب متناوب، در کاهش نمک‌های محلول به‌ویژه در لایه‌های سطحی نیمرخ خاک به دلیل تغییرات متناوب مقدار رطوبت خاک بسیار مؤثر می‌باشد. کاربرد ۱۰۰ سانتی‌متر آب آبتشویی موجب کاهش ۸۸/۷۸ و ۷۳/۳۵ درصد شوری

<sup>1</sup> Overestimate

<sup>2</sup> Underestimate



- Proc American Society of Agricultural Engineers Meeting, Memphis: 4-7.
- Hendrikus Barnard, J., van Rensburg, L.D. and Peter Bennie, A.T. 2010. Leaching irrigated saline sandy to sandy loam apedal soils with water of a constant salinity. *Irrigation Science*, 28 (2):191-201.
- Hoffman, G.J. 1980. Guidelines for reclamation of salt-affected soils. PP: 49-64 in Proceedings of International American Salinity and Water Management, Technical Conference. Juar. Mecxico.
- Homaee, M., Dirksen, C. and Feddes, R.A. 2002. Simulation of root water uptake: I. Nonuniform transient salinity using different macroscopic reduction functions. *Agriculture Water Management*, 57 (2): 89-109.
- Homaee, M., Feddes, R.A. and Dirksen, C. 2002. A macroscopic water extraction model for non-uniform transient salinity and water stress. *Soil Science Society American Journal*, 66: 1764-1772.
- Jurinak, J.J. 1981. Salt-affected soils, Utah state university. Logan, Utah. Chapter V: 1-13.
- Khosla, B.K., Gupta, R.K. and Abrol, I.P. 1979. Salt leaching and the effect of gypsum application in a saline-sodic soil. *Agricultural water management*, 2 (3): 193-202.
- Konukcu, F., Gowing, J.W. and Rose, D.A. 2006. Dry drainage: A sustainable solution to water logging and salinity problems in irrigation areas. *Agriculture water management*, 83 (1-2):1-12.
- Leffelaar, P.A. and Sharma, P. 1977. Leaching of a highly saline- sodic soil. *Journal of Hydrology*, 32: 203-218.
- Maas, E.V. and Hoffman, G.J. 1977. Crop salt tolerance - current assessment. *Journal of Irrigation and Drainage Engineering*, 103: 115-134.
- Minhas, P.S., Sharma, O.P. and Patil, S.G. (Editors). 1998. 25 Years of research on management of salt-affected soils and use of saline water in agriculture, CSSRI, Karnal, India, 220 P.
- Mohsenifar, K., Pazira, E. and Najafi, P. 2006. Evaluation different type of leaching models in two pilots of South East Khuzestan province. *Journal Research in Agricultural Science*, IAU. Esfahan, Iran, 2(1): 73-92.
- Nielsen, D.R. and Biggar, J.W. 1961. Miscible displacement in soils. *Soil Science Society American*, 25: 1-5.
- Pazira, E. and Kawachi, T. 1981. Studies on appropriate depth of leaching water, Iran .A case study. *Journal of Integrated Agricultural Water*
- می‌شود. مدل پیشنهادی این پژوهش با میانگین وزنی آب مورد نیاز آبخویی ۰/۳۸ که کمترین مقدار نسبت به دیگر مدل‌ها است به عنوان مدل برتر معرفی گردید، زیرا از نظر صرفه- جویی در مصرف آب مورد نیاز آبخویی در رتبه نخست قرار می‌گیرد.
- فهرست منابع**
- جلالی، و. ر. و همایی، م. ۱۳۸۹. مدل‌سازی اثر زمان اعمال تنش شوری محیط ریشه بر عملکرد گیاه کلزا. *مجله به‌زراعی کشاورزی*، ۱۲ (۱): ۲۹-۴۰.
- سعادت، س.، همایی، م. و لیاقت، ع. م. ۱۳۸۴. اثر شوری محلول خاک بر جوانه زنی و رشد گیاهچه سورگوم علوفه‌ای. *مجله علوم خاک و آب*، ۱۹ (۲): ۲۴۳-۲۵۴.
- Ben-Gal, A., Ityel, E., Dudley, L., Cohen, Sh., Yermiyahu, U., Presnov, E., Zigmond, L. and Shani, U. 2008. Effect of irrigation water salinity on transpiration and on leaching requirements: A case study for bell peppers. *Agricultural water management*, 95: 587-597.
- Chen, W., Hou, Zh., Wu, L., Liang, Y. and Wei, Ch. 2010. Evaluating salinity distribution in soil irrigated with saline water in arid regions of northwest China. *Agricultural water management*, 97 (12): 2001-2008.
- Corwin, D.L., Rhoades, J.D. and Simunek, J. 2007. Leaching requirement for soil salinity control: steady-state versus transient models. *Agriculture Water Management*, 90: 165-180.
- Cote, C.M., Bristow, K.L. and Ross, 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.
- Cullu, MA. 2003. Estimation of the effect of soil salinity on crop yield using remote sensing and geographic information system. *Turkish Journal of Agriculture and Forestry*, 27: 23-28.
- Dieleman, P.J. 1963. Reclamation of salt -affected soils in Iraq. Veenman, Wageningen, 175 P.
- Dirksen, C., Kool, J.B., Koorevaar, P. and Van Genuchten, M.Th. 1993. HYSWASOR-Simulation model of hysteretic water and solute transport in the root zone. In: Russo D and Dagan G (Eds.), *Water Flow and Solute Transport in Soils*. Springer Verlag, New York, 99-122.
- Glover, F. and Dumm, L. 1960. Validity and use of the transient flow concept in subsurface drainage.

- Use and Freshening Reservoirs, Kyoto University Japan, 6:39-49.
- Pazira, E., Keshavarz, A. and Torii, K. 1998. Studies on appropriate depth of leaching water, International Workshop on the Use of Saline and Brackish-Water for Irrigation, Indonesia.
- Pazira, E. and Homae, M. 2010. Salt leaching efficiency of subsurface drainage systems at presence of diffusing saline water table boundary: a case study in Khuzestan plains, Iran. Proceedings of the XVIIth World Congress of the International Commission of Agricultural Engineering (CIGR), Quebec City, Canada, 1-15.
- Reeve, R.C. 1957. The relation of salinity to irrigation and drainage requirements. Third Congress of International Commission on Irrigation and Drainage, Transactions, 5: 10.175-10.187.
- Sharma, B.R. and Minhas, P.S. 2005. Strategies for managing saline/alkali waters for sustainable agricultural production in South Asia. *Agriculture Water Management*, 78 (1-2): 136-151.
- Van Der Molen, W.H. 1956. Desalinization of saline soils as a column Process. *Soil Science*, 81(1): 19-28.
- Van Genuchten, M.Th. and Hoffman, G.J. 1984. Analysis of crop salt tolerance data. In: Shainberg I and shalhevet J (Eds.), *Soil salinity under irrigation process and management*. Ecological Studies, 51. Springer-Verlag, New York, 258-271.
- Verma, S.K. and Gupta, R.K. 1989. Leaching of saline clay soil under two modes of water application. *Journal of the Indian Society of Soil Science*, 37: 803-808.
- Zarei, Gh., Homae, M., Liaghat, A.M., and Hoorfar. A.H. 2010. A model for soil surface evaporation based on Campbell's retention curve. *Journal of Hydrology*, 380: 356-361.



## Modeling leaching requirement for desalinization of saline soils

Safoora Asadi Kapourchal<sup>1\*</sup>, Mehdi Homae<sup>2</sup> and Ebrahim Pazira<sup>3</sup>

<sup>1\*</sup>) Assistant professor, Department of Soil Sciences, Faculty of Agriculture, Gilan University, Gilan, Iran,  
Corresponding author email: [safouraasadi@yahoo.com](mailto:safouraasadi@yahoo.com)

<sup>2</sup>) Professor, Department of Soil Science, Tarbiat Modares University, Tehran 14115-336, Iran

<sup>3</sup>) Professor, Department of Soil Science, Science and Research Branch, Islamic Azad University, Tehran, Iran

Received: 01-07-2012

Accepted: 19-12-2012

### Abstract

Reclamation of saline soils is an important practice from soil and water resources conservation point of view. In saline soils, crop production is adversely affected by soluble salts within the root zone as well as by shallow saline water table. The first step for reclamation of such soils is reducing the soil salinity to optimum level by capital leaching. Reclamation of saline soils depends on quantity and quality of applied water, as well as soil drainage conditions. The objective of this study was to develop a model to estimate water requirement for reclamation of saline soils based on some obtainable soil physical characteristics. Consequently, a large area of 3,216 ha with S4A3 salinity/sodicity class in Khuzestan, Iran, was selected to obtain the required data. This experiment was conducted with two treatments and two replicates. In the first treatment, the experiment was conducted by applying just 100 cm water depth in four-25 cm intervals. In the second treatment, 5,000 kg/ha Sulfuric Acid was applied prior to salt leaching together with leaching water. The intermittent ponding method was conducted with double rings in a circular array. Soil samples were taken from 0-25, 25-50, 50-75, 75-100, 100-125 and 125-150 cm soil depths before, during and after each leaching water application interval. The required physical and chemical analyses were performed on the collected data. Several mathematical models were applied to the obtained data to verify their performances. The results indicated that the logarithmic model can estimate the capital leaching requirement much than other models. This empirical model with minimum weighted mean of capital leaching water (38 cm) represents the best performance from water saving point of view compares to other models.

**Keywords:** desalinization; modeling; saline soils; salt leaching

