

مقاله پژوهشی

## تخمین هدایت الکتریکی (EC) خاک شور و سدیمی طی فرآیند آبخوبی با استفاده از برنامه HYDRUS-1D

ساره شفیعی فر<sup>۱</sup>، احمد فرخیان فیروزی<sup>۲\*</sup>، عطاالله خادم‌الرسول<sup>۳</sup>

تاریخ پذیرش: ۱۳۹۹/۱۰/۸

تاریخ دریافت: ۱۳۹۷/۱۲/۱۲

۱- دانشجوی کارشناسی ارشد علوم خاک، دانشکده کشاورزی، دانشگاه شهید چمران اهواز

۲- دانشیار، گروه علوم و مهندسی خاک، دانشکده کشاورزی، دانشگاه شهید چمران اهواز

۳- استادیار، گروه علوم و مهندسی خاک، دانشکده کشاورزی، دانشگاه شهید چمران اهواز

\* مسئول مکاتبات، پست الکترونیکی: a.farrokhan@scu.ac.ir

### چکیده

تخریب خاک در نتیجه شور و سدیمی شدن یکی از مهم‌ترین مشکلات مناطق خشک و نیمه خشک است. برای حل این مشکل، آبخوبی نمک‌های تجمع یافته در این خاک‌ها ضروری است. این پژوهش به منظور شبیه‌سازی آبخوبی املاح از نیمرخ خاک شور و سدیمی طی فرآیند آبخوبی با استفاده از برنامه HYDRUS-1D انجام شد. همچنین اثر اسید سولفوریک به عنوان ماده اصلاح کننده بر کارایی آبخوبی املاح در خاک شور و سدیمی آهکی بررسی شد. آبخوبی به روش منقطع شامل تیمار دارای ماده اصلاح کننده (اسید سولفوریک) و تیمار بدون ماده اصلاح کننده و چهار تیمار عمق آب آبخوبی شامل ۲۵، ۵۰، ۷۵ و ۱۰۰ سانتی‌متر آب در چهار تکرار در کرت‌های ۱×۱ متر مربع صورت پذیرفت. منحنی‌های شوری خاک پس از هر مرحله آبخوبی رسم گردید. ویژگی‌های هیدرولیکی خاک براساس خصوصیات زود یافت اندازه‌گیری شده با استفاده از برنامه Rosetta برآورد شد. همچنین، بافت خاک، مقدار رطوبت ظرفیت زراعی و پژمردگی، هدایت هیدرولیکی اشباع و توزیع شوری در نیمرخ خاک اندازه‌گیری شد. پارامترهای هیدرولیکی و همچنین مقدار شوری اندازه‌گیری شده نیمرخ خاک به عنوان ورودی برنامه HYDRUS-1D استفاده شدند و تغییرات شوری نیمرخ خاک طی دوره‌های مختلف آبخوبی به روش حل معکوس برآورد شد. نتایج نشان داد خاک‌های تیمار شده با ماده اصلاح کننده EC متفاوتی نسبت به شاهد داشتند اما این تفاوت چشمگیر نبود زیرا گچ و آهک موجود در خاک‌های مورد مطالعه کلسیم مورد نیاز برای اصلاح را تامین کرده بودند. بهترین برآورد EC مربوط به اعماق کمتر از ۱۰۰ سانتی متری خاک و دوره‌های اول و دوم آبخوبی بود. بطور کلی نتایج حاصل از شبیه‌سازی نشان داد در طی دوره‌های آبخوبی، مدل HYDRUS-1D برآورد مناسبی از توزیع شوری نیمرخ خاک دارد. بنابراین می‌توان مدل HYDRUS-1D را به عنوان ابزاری مناسب برای پیش‌بینی انتقال املاح در خاک‌های شور و سدیمی معرفی کرد.

واژه‌های کلیدی: آبخوبی، شوری، خوزستان، مدل.

## Estimation of Electrical Conductivity of Saline-Sodic Soils During Leaching Process Using HYDRUS-1D

S Shafiefar<sup>1</sup>, A Farrokhian Firouzi<sup>\*2</sup>, A Khademalrasoul<sup>3</sup>

Accepted: 2020-12-28

Received: 2019-03-03

<sup>1</sup>M.Sc. Student, Dept. of Soil Sci. and Eng., Faculty of Agric., Shahid Chamran University of Ahvaz, Ahvaz, Iran

<sup>2</sup>Assoc. Prof., Dept. of Soil Sci. and Eng., Faculty of Agric., Shahid Chamran University of Ahvaz, Ahvaz, Iran

<sup>3</sup>Assist. Prof., Dept. of Soil Sci. and Eng., Faculty of Agric., Shahid Chamran University of Ahvaz, Ahvaz, Iran

\* Corresponding Author, Email: a.farrokhian@scu.ac.ir

### Abstract

Soil degradation caused by salinization and sodification is one of the major problems in arid and semi-arid regions. To overcome this problem, leaching of accumulated salts from such soils is necessary. This research was intended to simulate salt leaching in saline-sodic soil profile during the desalination process using HYDRUS-1D. Moreover, the effect of sulfuric acid as amendment on salt leaching efficiency in calcareous saline-sodic soil was investigated. Leaching experiments with and without sulfuric acid were performed in 1×1 m<sup>2</sup> plots. All experiments were accomplished by applying 100 cm of water in four-25 cm intervals. Desalination leaching curves were plotted. Soil hydraulic properties were estimated based on easily obtainable soil properties using the Rosetta program. Furthermore, soil profile salinity, texture, saturated hydraulic conductivity, field capacity and permanent wilting point water contents were measured. The measured soil hydraulic properties and soil salinity content during leaching periods were used as input in HYDRUS-1D. Soil salinity changes during different leaching periods were estimated by inverse solution method. The results of the study indicated that the used amendment showed a pronounced difference in EC compared with control but the difference wasn't significant. These observations can be attributed to the fact that the soils have enough calcium carbonate and gypsum which provide enough calcium for reclamation. The model predicted soil EC in depths less than 100cm better than other depths (100-150 cm). The simulated results also indicated that the amount of estimated EC in the first and second period of leaching fitted the observed data better than other periods. Overall, the results of the simulation revealed that HYDRUS-1D provide reasonable prediction of salinity distribution in soil profile. Therefore, HYDRUS-1D model can be introduced as a suitable tool for prediction solute transport in soil under field conditions.

**Keywords:** Khuzestan, Leaching, Model, Salinity.

### مقدمه

می‌تواند باعث تجمع املاح شود (دروگرز و همکاران ۲۰۰۰). اصلاح خاک‌های شور به وسیله آبشویی نمک-های محلول با کاربرد آب دارای کیفیت مناسب انجام و در مورد خاک‌های شور و سدیمی معمولاً عملیات آبشویی املاح همراه با استفاده از مواد اصلاح کننده

در ایران حدود ۵۰ درصد از اراضی کشاورزی شور می‌باشند و یا با مشکلاتی مرتبط با شوری روبرو هستند. منبع اصلی املاح در خاک مواد معدنی اولیه در پوسته زمین است. همچنین آبیاری با آب‌های شور و حرکت املاح به سطح خاک توسط جریان مویبندی نیز

صورت می‌گیرد (هیریرو و پیریز کووتا ۲۰۰۵). زیرا به دلیل بالا بودن غلظت یون سدیم و pH خاک، به هنگام آبشویی آنها خطر پراکنده شدن ذرات خاک و کاهش شدید نفوذپذیری وجود دارد. لذا در این خاک‌ها عملیات آبشویی توأم با استفاده از مواد اصلاح کننده خاک ضروری به نظر می‌رسد. مهمترین مواد اصلاح کننده که باعث افزایش غلظت کلسیم محلول خاک می‌شوند شامل گچ ( $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ )، کلرید کلسیم ( $\text{CaCl}_2$ ،  $2\text{H}_2\text{O}$ )، اسید سولفوریک، گوگرد، سولفات‌های آهن و آلومینیوم می‌باشند (برزگر ۲۰۰۰). طی پژوهش‌های مختلف تاثیر مثبت این مواد اصلاح کننده در بهبود ویژگی‌های خاک بویژه در کاهش مقدار سدیم تبدلی مشخص گردیده است (یزدان‌پناه و همکاران ۲۰۱۳). نتایج پژوهش قدیر و شوبرت (۲۰۰۲) نشان داد از آنجا که حلالیت آهک برای تأمین کلسیم بسیار کم است، لذا بایستی از یک ماده اسیدی و یا اسیدزا (میشل و همکاران ۲۰۰۰) مانند گچ (ونگ و همکاران ۲۰۰۹) و یا اسیدسولفوریک (یزدان‌پناه و همکاران ۲۰۱۳) برای تأمین کلسیم خاک استفاده شود. با توجه به وجود گچ و آهک در خاک‌های شور و سدیمی استان خوزستان بررسی کاربرد مواد اصلاح کننده از نظر اقتصادی ضروری به نظر می‌رسد.

با توجه به پیچیدگی‌های حاکم بر روابط موجود در آب و خاک و در نهایت گیاه (که متاثر از شرایط خاک و اتمسفر می‌باشد) امکان اندازه‌گیری‌های مزرعه‌ای در تمامی حالات و شرایط وجود ندارد، لذا بهره‌گیری از مدل‌های ریاضی و کامپیوتری می‌تواند ابزاری مفید به منظور پایش رخدادهای صورت پذیرفته و یا احتمالی در نیمرخ خاک باشد. در همین راستا همزمان با پیشرفت تکنولوژی در علوم مختلف و ارائه مدل‌های کامپیوتری، حل معادلات انتقال املاح و پیش‌بینی

سرنوشت آب و املاح در خاک امکان‌پذیر گردیده است (سیمونک و همکاران ۲۰۰۶). از جمله این مدل‌ها بسته نرم‌افزاری HYDRUS-1D است که به منظور شبیه‌سازی حرکت آب، املاح و حرارت در محیط‌های متخلخل در شرایط اشباع و غیراشباع ارائه شده است (سیمونک و همکاران ۱۹۹۸). محمدی و دلبری (۲۰۱۵)، شبیه‌سازی حرکت آب و نمک‌ها ( $\text{Na}^+$ ،  $\text{K}^+$ ،  $\text{Ca}^{2+}$ ،  $\text{Mg}^{2+}$ ) را در خاک با استفاده از مدل HYDRUS-1D بررسی کردند. نتایج نشان داد که نرم‌افزار HYDRUS-1D بیشترین دقت در شبیه‌سازی  $\text{Ca}^{2+}$  را در عمق ۴۰ سانتی‌متری داشته است. شبیه‌سازی  $\text{Na}^+$  در عمق ۲۰ سانتی‌متری،  $\text{Mg}^{2+}$  و  $\text{K}^+$  در عمق ۸۰ سانتی‌متری، بیشترین مقدار را دارا بود. از طرفی دقت شبیه‌سازی رطوبت خاک در عمق ۴۰ سانتی‌متری بیشتر از سایر عمق‌ها بود. آن‌ها گزارش کردند که در آینده از این نرم‌افزار برای مدیریت بهتر آبیاری و آبشویی نمک خاک‌های شور می‌توان بهره جست. راموس و همکاران (۲۰۰۸)، به منظور بررسی انتقال چندگانه املاح در دو نوع خاک با بافت متوسط و درشت تحت شرایط مزرعه در طی سه سال از مدل HYDRUS-1D استفاده کردند. آنان نتایج اندازه‌گیری‌شده برآوردشده مقدار آب، غلظت  $\text{Na}^+$ ،  $\text{Ca}^{2+}$ ،  $\text{Mg}^{2+}$  و EC محلول، نسبت جذب سدیم<sup>۱</sup> (SAR) و درصد سدیم قابل تبادل<sup>۲</sup> (ESP) را با هم مقایسه کردند. تخمین مدل از مقدار رطوبت، شوری و غلظت سدیم محلول مزرعه موفقیت‌آمیز بود، در حالی که برآورد مدل از  $\text{Ca}^{2+}$ ،  $\text{Mg}^{2+}$ ، SAR و ESP کمتر از مقادیر اندازه‌گیری شده بود. آنان مدل HYDRUS-1D را به عنوان ابزار موثری برای مدیریت آبیاری و پیش‌بینی اثرات کیفیت آب آبیاری بر روی کیفیت آب زیرزمینی و خاک معرفی کردند. در پژوهشی دیگر تاوو

<sup>1</sup> Sodium adsorption ratio

<sup>2</sup> Exchangeable sodium percentage

زیاد شدن عمق آب آبشویی سبب عدم تحقق اهداف اصلاحی خاک شده و به نوعی منجر به اتلاف منابع می‌گردد. از طرفی کاربرد مواد اصلاح کننده برای افزایش راندمان آبشویی اهمیت شایانی دارد. لذا در راستای مدیریت پایدار منابع آب و خاک به هنگام آبشویی خاک‌های شور و سدیمی بایستی به گونه‌ای عمل کرد که با حداقل عمق آب و کاربرد ماده اصلاح کننده مناسب حداکثر بازدهی بدست آید. خاک‌های شور و سدیمی استان خوزستان دارای مقدار زیاد گچ و آهک می‌باشند (پارسایی ۲۰۱۰). لذا ضروری است امکان کاربرد اسید سولفوریک برای افزایش مقدار یون کلسیم محلول و در نتیجه کاهش مقدار عمق آب آبشویی مورد نیاز و افزایش راندمان آبشویی بررسی شود. از طرفی مدل‌های عددی با شبیه‌سازی شرایط واقعی حرکت آب و املاح در خاک قادر به ارزیابی وضعیت رطوبت و نمک‌های خاک بوده و می‌تواند با پیش‌بینی دقیق‌تر انتقال املاح در نیمرخ خاک مفید واقع شوند. هدف از این پژوهش بررسی امکان شبیه‌سازی شوری نیمرخ خاک با برنامه HYDRUS-1D طی فرآیند آبشویی و اصلاح خاک‌های شور و سدیمی بود.

و همکاران (۲۰۱۰)، به منظور مدیریت بهتر آب و کاهش شوری خاک در مزرعه از مدل HYDRUS برای ارزیابی اثر مقدار آب آبیاری بر رطوبت و دینامیک شوری خاک در مناطقی با سطح آب زیرزمینی کم عمق استفاده کردند. سپس داده‌های حاصل از شبیه‌سازی مدل و داده‌های مشاهده شده در مزرعه مورد مقایسه قرار دادند. نتایج این پژوهش نشان داد ارتباط قابل قبولی بین شبیه‌سازی مدل و داده‌های مشاهده‌ای وجود دارد. در کشور ایران نیز به علت شرایط آب و هوایی و موقعیت جغرافیایی خاص، اراضی شور و سدیمی در سطح وسیعی یافت می‌شود. از جمله در استان خوزستان و بویژه در نواحی مرکزی، جنوبی و جنوب غرب استان که با توجه به کمبود بارش‌ها، سنگین بودن بافت خاک، بالا بودن سطح آب زیرزمینی و شور بودن آب خطرات مربوط به شور شدن خاک و نیز شور و سدیمی شدن به مراتب بیشتر می‌باشد، لذا آبشویی و بررسی پدیده انتقال املاح در این منطقه امری ضروری و موثر در کنترل املاح می‌باشد. یکی از فاکتورهای بسیار مهم و موثر، عمق آب مورد استفاده جهت عملیات آبشویی خاک‌های شور و سدیمی است. در واقع کم یا

### مواد و روش‌ها

الکتریکی گل اشباع با استفاده از دستگاه هدایت‌سنج، pH عصاره اشباع با استفاده از دستگاه pH متر، جرم مخصوص ظاهری به روش استوانه، ظرفیت تبادل کاتیونی به روش باور (رودس ۱۹۸۲)، سدیم قابل تبادل (Na.exch) که نشان دهنده نسبت میزان سدیم تبادلی به سایر کاتیون‌های غالب و قابل تبادل است با روش استات آمونیم یک نرمال در pH=7 (لاوکولیچی ۱۹۸۱) و درصد سدیم تبادلی (ESP) با استفاده از معادله زیر محاسبه گردید.

$$ESP = \frac{Na.exch}{CEC} \times 100$$

[۱]

این آزمایش در سری خاک خیرآباد (Coarse-loamy, mixed, Hyperthermic, Typic Haplosalids) واقع در دشت شاور استان خوزستان انجام شد. محل انجام آزمایش از نظر موقعیت جغرافیایی در ۴۸ درجه، ۲۵ دقیقه، ۲۴ ثانیه طول شرقی و ۳۱ درجه ۵۴ دقیقه و ۵۴ ثانیه عرض شمالی واقع گردیده است. مهم‌ترین منبع آبی منطقه رودخانه شاور می‌باشد که آب این رودخانه طبق دیاگرام ویل کوکس در کلاس C3 - S1 قرار می‌گیرد (بی‌نام ۲۰۰۶). در این پژوهش بافت خاک به روش هیدرومتر (جی و بودر ۱۹۸۶)، مقدار هدایت

جرم مخصوص ظاهری خاک بر حسب تن بر متر مکعب و  $D_z$ ، ضخامت لایه خاک بر حسب متر می‌باشد. سپس به منظور آبخویی املاح در همه کرت‌ها ۱۰۰ سانتی‌متر آب در چهار تناوب مصرف شد، به صورتی که در دور اول به همه کرت‌ها ۲۵ سانتی‌متر آب افزوده و پس از گذشت ۴۸ ساعت نمونه‌برداری از کرت اول (با سه تکرار از هر عمق) تا عمق ۱۵۰ سانتی‌متری و با فواصل ۲۵ سانتی‌متر انجام گرفت و این کرت حذف گردید. در ادامه آزمایش به ۳ کرت باقیمانده ۲۵ سانتی‌متر آب افزوده و پس از گذشت ۴۸ ساعت نمونه‌برداری از کرت دوم نیز به همان صورت انجام شد و این عمل تا افزودن ۱۰۰ سانتی‌متر آب ادامه یافت. قبل از شروع آبخویی از محلی نزدیک به کرت‌ها نمونه خاک شاهد از اعماق ۰-۲۵، ۲۵-۵۰، ۵۰-۷۵، ۷۵-۱۰۰، ۱۰۰-۱۵۰ سانتی‌متری تهیه گردید. در هر آزمایش مقدار هدایت الکتریکی در گل اشباع با استفاده از دستگاه هدایت‌سنج اندازه‌گیری شد (رودس ۱۹۸۲). پس از اندازه‌گیری تغییرات هدایت الکتریکی در نیمرخ خاک پس از هر مرحله آبخویی، با استفاده از نرم‌افزار HYDRUS-1D تغییرات EC شبیه‌سازی شد.

خصوصیات خاک به روش معکوس را داراست. نماید. در این شرط مرزی اجازه استقرار ارتفاعی از آب روی سطح خاک داده می‌شود که این ارتفاع با بارندگی افزایش یافته و یا بر عکس با نفوذ آب به خاک و یا تبخیر و تعرق از آن کاسته می‌شود. برای مرز پایینی مقطع خاک، زهکشی آزاد در نظر گرفته شد. در منطقه مورد مطالعه سطح آب زیرزمینی در عمق بیش از ۳ متر قرار داشت.

هدایت هیدرولیکی اشباع خاک به روش استوانه مضاعف، رطوبت ظرفیت زراعی و نقطه پژمردگی دائم با صفحات فشاری اندازه‌گیری شدند. عصاره‌گیری کاتیون‌های محلول و تبدیلی به ترتیب با آب مقطر و استات آمونیوم انجام گرفت. سپس کلسیم و منیزیم با روش تیتراسیون و سدیم و پتاسیم با استفاده از دستگاه فلیم فتومتر اندازه‌گیری شدند. برای انجام این آزمایش قطعه زمینی یکنواخت از سری خاک مورد مطالعه انتخاب شد و سپس ۸ کرت به ابعاد ۱×۱ متر با فاصله یک متر از یکدیگر ایجاد نموده و دیواره‌های کرت‌ها کاملاً کوبیده و بوسیله پلاستیک پوشانیده شد. قبل از افزودن آب آبخویی مقداری مشخص ماده اصلاح‌کننده اسید سولفوریک که از معادله ۲ محاسبه و به ۴ کرت اضافه شد و ۴ کرت بدون اضافه کردن اسید سولفوریک مورد آزمون قرار گرفتند.

$$A = \frac{(ESP_i - ESP_f) \times CEC \times BD \times 8.61 \times D_i \times 0.61}{100} \quad [2]$$

که در آن  $A$ ، مقدار اسید سولفوریک مورد نیاز بر حسب تن در هکتار،  $ESP_i$ ، درصد سدیم تبدیلی اولیه خاک،  $ESP_f$ ، درصد سدیم تبدیلی نهایی خاک (این مقدار ۱۰ در نظر گرفته شد زیرا در این مقدار گسیختگی خاکدانه‌ها مشهود نمی‌باشد)،  $CEC$ ، ظرفیت تبادل کاتیونی بر حسب میلی اکی والان در ۱۰۰ گرم خاک خشک،  $BD$ ،

#### مدل HYDRUS-1D

مدل HYDRUS-1D یکی از مدل‌های پیشرفته در ارتباط با حرکت یک بعدی آب، املاح و گرما در خاک می‌باشد این مدل توسط سیمونک و همکاران (۱۹۹۸) بسط داده شده است که شامل حل عددی معادله ریچاردز برای بررسی حرکت آب در خاک و جریان توده‌ای-انتشار (CDE<sup>1</sup>) برای بررسی حرکت املاح و گرما در خاک است. این مدل قادر به شبیه‌سازی در شرایط اشباع و غیراشباع بوده و توانایی تخمین

<sup>1</sup> Convective-Dispersive Equation

## برآورد پارامترهای هیدرولیکی خاک با استفاده از

## مدل Rosetta

در این مطالعه توابع نگهداشت آب در خاک  $(\theta(h))$  و هدایت هیدرولیکی خاک  $(K(h))$  با استفاده از مدل منحنی رطوبتی وانگنوختن (۱۹۸۰) و مدل هدایت هیدرولیکی معادله وانگنوختن - معلم (۱۹۸۰) بیان شدند که به ترتیب در معادلات ۳ و ۴ آمده‌اند.

$$\theta = \theta_r + \frac{\theta_s - \theta_r}{\left[1 + (\alpha|h|)^n\right]^m} \quad m = 1 - \frac{1}{n} \quad [۲]$$

که در آن  $\theta_r$  مقدار رطوبت باقیمانده،  $\theta_s$  مقدار رطوبت اشباع،  $\alpha$ ،  $n$  و  $m$  پارامترهای تجربی هستند.

$$K(S_e) = K_s S_e^l \left[ \left( 1 - S_e^m \right) \right]^2 \quad S_e = \frac{\theta - \theta_r}{\theta_s - \theta_r} \quad [۴]$$

که در آن  $K_s$  هدایت هیدرولیکی اشباع،  $S_e$  درجه اشباع خاک و  $l$  پارامتر تجربی می‌باشد که در برنامه Rosetta مقدار ثابت ۰/۵ در نظر گرفته شده است.

در این پژوهش با استفاده از ویژگی‌های زود یافت اندازه‌گیری شده خاک (بافت، جرم مخصوص ظاهری و رطوبت ظرفیت زراعی  $(\theta_{FC})$  و پژمردگی  $(\theta_{PWP})$ )، پارامترهای هیدرولیکی خاک شامل رطوبت باقیمانده  $(\theta_r)$ ، رطوبت اشباع  $(\theta_s)$ ، هدایت هیدرولیکی اشباع  $(K_s)$ ،  $\alpha$ ،  $n$  و  $l$  توسط مدل Rosetta (اسخاپ و همکاران ۲۰۰۱) که در برنامه HYDRUS-1D واقع شده برآورد شدند. سپس این پارامترهای هیدرولیکی به عنوان ورودی برنامه HYDRUS-1D برای شبیه‌سازی روند شوری‌زدایی پس از هر مرحله آبخوبی خاک استفاده شد.

## انتقال املاح

به منظور پیش‌بینی شوری خاک پس از هر مرحله آبخوبی از معادله یک بعدی جریان توده‌ای-انتشار (CDE) استفاده شد (سیمونک و وانگنوختن ۲۰۰۸):

$$\frac{\partial(\theta c)}{\partial t} = \frac{\partial \theta}{\partial z} \left( \theta D \frac{\partial c}{\partial z} \right) - \frac{\partial(qc)}{\partial z} \quad [۵]$$

که در آن  $c$  غلظت نمک  $(M L^{-3})$ ،  $q$  شدت جریان  $(L T^{-1})$ ،  $D$  ضریب انتشار هیدرودینامیکی  $(L^2 T^{-1})$  می‌باشد. در این پژوهش مقدار  $EC$  در نیمرخ خاک پس از هر مرحله آبخوبی پیش‌بینی شد. از آنجائی که  $EC$  شاخصی جامع از غلظت املاح خاک است لذا آن به عنوان یک ماده حل شده غیرواکتش‌گر<sup>۲</sup> فرض شد. همچنین به دلیل اثر مقیاس، تعیین ضریب پخشیدگی  $(L T^{-1})$   $(W)$  و ضریب انتشارپذیری  $(L)$   $(\lambda)$  دشوار است  $\left( \lambda = \frac{D\theta}{q} \right)$ . بنابراین در فرآیند حل عددی برای بافت لوم مقدار اولیه پارامتر  $\lambda$  برابر ۳۰ سانتیمتر فرض شد. همچنین مقدار اولیه پارامتر  $W$  برابر  $0.05 \text{ cm}^2 \text{ day}^{-1}$  در نظر گرفته شد (شانگ و همکاران ۲۰۱۶).

## شرایط اولیه برای حل معادله انتقال املاح

شرایط اولیه برای حل این معادله میزان شوری خاک قبل از شروع آزمایش بود. بدین منظور، شوری عمق-های ۰-۲۵، ۲۵-۵۰، ۵۰-۷۵، ۷۵-۱۰۰، ۱۰۰-۱۲۵ و ۱۲۵-۱۵۰ سانتی‌متری به مدل داده شد. در این محدوده فرض بر این بود که از طرفین جریانی صورت نمی‌گیرد و مرز انتهایی مرز زهکش آزاد است.

## ارزیابی مدل

در این پژوهش برای ارزیابی مدل HYDRUS-1D در پیش‌بینی شوری نیمرخ خاک در هر مرحله از آبخوبی از دو شاخص آماری ضریب تبیین  $(R^2)$  و ریشه میانگین مربعات خطا<sup>۳</sup> (RMSE) استفاده شد:

<sup>1</sup> Convective-Dispersive Equation

<sup>2</sup> Non-reactive solute

<sup>3</sup> Root Mean Square Error

موجود می‌باشد. همان‌طوری که نتایج تجزیه شیمیایی نشان می‌دهد خاک مورد مطالعه تا عمق ۱۵۰ سانتی-متری شور و سدیمی بوده و مقدار شوری آن با افزایش عمق بیشتر می‌شود. درصد سدیم تبدالی در لایه‌های مختلف خاک از ۲۰/۴ تا ۲۷/۶ درصد متغیر است. بطور متوسط مقدار  $EC_e$  تا عمق مورد مطالعه برابر ۱۵ دسی‌زیمنس بر متر و مقدار متوسط ESP برابر ۲۵/۲ درصد می‌باشد. با وجود ESP بالا، مقدار اسیدیته خاک لایه‌های مختلف خاک بین ۷/۷ تا ۸/۰ تغییر می‌کند که دلیل آن را می‌توان مقدار زیاد گچ و آهک در نیمرخ خاک دانست؛ مقدار گچ و آهک به ترتیب ۲۴ تا ۲۷ و ۳۵ تا ۴۲ درصد تغییر می‌کند. همچنین نتایج نشان می‌دهد یون‌های غالب عصاره اشباع خاک به ترتیب کاتیون‌های سدیم، کلسیم و منیزیم می‌باشد؛ آنیون‌های غالب آن کلرید و سولفات است. در این خاک چون غلظت الکترولیت زیاد است، pH خاک معمولاً کمتر از ۸/۵ بوده و خاک حالت هم‌اور دارد. با این حال، در صورتی که نمک‌های محلول شسته شوند، معمولاً  $Na^+$  به یک مشکل بزرگتر تبدیل شده، pH خاک به بیش از ۸/۵ افزایش یافته و ذرات خاک پراکنده می‌شود (اوستان ۲۰۰۴). لذا در این پژوهش به منظور رفع پراکندگی احتمالی ذرات خاک و مشکل نفوذ آب به خاک اسید سولفوریک به عنوان ماده اصلاح کننده نیز به خاک اضافه شد.

$$R^2 = \frac{\sum_{i=1}^n (P_i - \bar{O})^2}{\sum_{i=1}^n (O_i - \bar{O})^2} \quad [6]$$

$$RMSE = \left( \frac{\sum_{i=1}^n (P_i - O_i)^2}{n} \right)^{0.5} \quad [7]$$

که در آن  $P_i$  مقدار برآورد شده توسط مدل،  $O_i$  مقدار اندازه‌گیری شده،  $n$  تعداد مشاهدات،  $\bar{P}$  میانگین مقادیر  $P_i$ ،  $\bar{O}$  میانگین مقادیر  $O_i$  می‌باشد. چنانچه تمام مقادیر برآورد شده و اندازه‌گیری شده برابر باشند به ترتیب مقدار  $R^2$  و RMSE برابر یک و صفر خواهد شد.

### نتایج و بحث

برخی ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی اندازه‌گیری شده لایه‌های مختلف خاک مورد مطالعه پیش از انجام آبشویی در جدول ۱ و ۲ آمده است. همان‌طوری که ملاحظه می‌گردد این خاک دارای بافت متوسط بوده و خاک شور و سدیمی می‌باشد. نتایج نشان می‌دهد پیش از آبشویی خاک منطقه مورد مطالعه دارای کلاس شوری بسیار زیاد و سدیمی زیاد ( $S_4A_3$ ) بوده است. خاک‌های شور و سدیمی دارای  $EC_e$  بزرگتر از ۴ دسی‌زیمنس بر متر و ESP بزرگتر از ۱۵ هستند. لذا در این خاک‌ها نمک‌های محلول و  $Na^+$  تبدالی، به میزان زیادی

جدول ۱- ویژگی‌های فیزیکی خاک پیش از آبشویی.

تخلخل کل	نفوذپذیری	جرم مخصوص ظاهری	جرم مخصوص حقیقی	$\Theta_{PWP}$	$\Theta_{FC}$	بافت	عمق خاک
(%)	( $cm\ h^{-1}$ )	( $g\ cm^{-3}$ )	( $g\ cm^{-3}$ )	( $cm^3\ m^{-3}$ )	( $cm^3\ m^{-3}$ )		
۴۴/۲	۸/۴۶	۱/۴۳	۲/۵۹	۸/۳۴	۱۶/۷۸	L	۲۵-۰
۴۴/۰	۸/۰۱	۱/۴۵	۲/۵۷	۸/۶۳	۱۷/۳۹	L	۵۰-۲۵
۴۴/۴	۸/۰۸	۱/۴۵	۲/۵۹	۸/۶۰	۱۷/۴۰	L	۷۵-۵۰
۴۴/۸	۸/۲۲	۱/۴۴	۲/۵۹	۸/۵۴	۱۷/۱۸	L	۱۰۰-۷۵
۴۴/۴	۸/۱۹	۱/۴۵	۲/۵۹	۸/۶۱	۱۷/۳۰	L	۱۵۰-۱۰۰

جدول ۲- ویژگی‌های شیمیایی خاک قبل از آبتیوی

HCO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup>	Cl <sup>-</sup>	Na <sup>+</sup>	Mg <sup>2+</sup>	Ca <sup>2+</sup>	CaSO <sub>4</sub>	CaCO <sub>3</sub>	CEC	pH	SAR	ESP	ECe	عمق خاک
(meq L <sup>-1</sup> )			(%)				(%)	(cmol kg <sup>-1</sup> )	-	(mmol L <sup>-1</sup> ) <sup>0.5</sup>	(%)	(dS m <sup>-1</sup> )	
۲/۰	۴۵/۶	۶۱/۳	۷۵/۳	۱۳	۲۱	۲۶/۶	۳۷/۶۰	۱۲/۷	۷/۷	۱۸/۳	۲۰/۴	۱۰/۸	۲۵-۰
۲/۰	۶۱/۸	۸۰	۱۰۹	۱۲	۲۳	۲۶/۸	۳۸/۳	۱۲/۶	۸/۰	۲۶/۰	۲۷/۳	۱۴/۲	۵۰-۲۵
۲/۵	۶۰	۱۱۱/۳	۱۲۸	۱۹	۲۷	۲۲/۲	۳۵/۴	۱۲/۳	۷/۹	۲۶/۷	۲۷/۶	۱۷/۱	۷۵-۵۰
۲/۲۵	۵۹/۴	۱۰۵	۱۱۸	۲۳	۲۶	۲۱/۶	۳۹/۳	۱۲/۵	۷/۹	۲۳/۸	۲۵/۴	۱۶/۵	۱۰۰-۷۵
۲/۵	۶۱	۱۰۶/۳	۱۲۰	۲۵	۲۵	۲۳/۴	۴۲/۱	۱۲/۴	۷/۸	۲۴/۰	۲۶/۲	۱۶/۷	۱۵۰-۱۰۰

نرم افزار HYDRUS-1D شبیه‌سازی شد و نتایج با داده‌های اندازه‌گیری شده با استفاده از آماره‌های R<sup>2</sup> و RMSE مقایسه گردید. شکل ۱ میزان EC پیش‌بینی شده توسط مدل HYDRUS-1D در چهار مرحله آبتیوی و شش عمق بدون کاربرد اسید سولفوریک را نشان می‌دهد. همان‌طوری که ملاحظه می‌گردد نتایج به خوبی نشان می‌دهد مدل در سه مرحله اول آبتیوی برآوردی خوب از شوری خاک در عمق‌های کمتر از ۱۰۰ سانتی-متر داشته است و با افزایش عمق از دقت آن کاسته شده است. در حالی که در سه مرحله اول

آبتیوی، در عمق‌های بیش از ۱۰۰ سانتی‌متر مدل برآوردی بیشتر از شوری خاک داشته است. نتایج ارزیابی دقت مدل در جدول ۵ آمده است. با توجه به آماره‌های این جدول، مدل برآوردی قابل قبول از تغییرات EC ارائه داده است. هر چه مقدار R<sup>2</sup> به یک نزدیک‌تر و مقدار آماره RMSE به صفر نزدیک‌تر باشد دقت مدل مورد مطالعه بیشتر است. ضریب تبیین در عمق‌های مختلف بین ۰/۷۲ تا ۰/۹۸ متغیر است. در حالی که مقادیر RMSE بین ۱/۳۱ تا ۷/۰۷ dS m<sup>-1</sup> متغیر است. کمترین مقدار ضریب تبیین (۰/۷۲) و بیشترین مقدار ریشه میانگین مربعات خطا (۷/۰۷) مربوط به مرحله چهارم آبتیوی است. با توجه به اینکه با افزایش آبتیوی از غلظت املاح و شوری در عمق‌های سطحی کاسته شده و املاح در عمق‌های بیشتر تجمع می‌کنند، بنابراین می‌توان افزایش سدیم خاک و اثرات آن بر روی ساختمان خاک، نفوذپذیری و هدایت هیدرولیکی

نتایج تجزیه شیمیایی آب رودخانه شاوور در محل سد خیرآباد در جدول ۳ گزارش شده است. بر اساس این نتایج و مطابق دیاگرام ویل کوکس در کلاس C3-S1 قرار می‌گیرد. لذا از نظر کیفیت آب متوسط می‌باشد. همچنین نتایج نشان می‌دهند نسبت جذب سدیم این آب پایین است و نسبت سدیم محلول آب به مجموع کاتیون‌های آب که می‌تواند تأثیر منفی بر خاک بجای بگذارد زیاد نیست. از طرفی مقدار کلراید محلول آن نیز که آنیون سمی برای گیاه محسوب می‌شود نسبت به کل آنیون‌های محلول کم است. بنابراین می‌توان استفاده از آب رودخانه شاوور برای انجام مطالعات آبتیوی و اصلاح اراضی شور و سدیمی توصیه نمود.

در جدول ۴ پارامترهای هیدرولیکی برآورد شده خاک توسط مدل Rosetta آورده شده است. پارامترهای منحنی رطوبتی وان‌گنوختن (۱۹۸۰) و مدل هدایت هیدرولیکی معلم-وان‌گنوختن (وان‌گنوختن ۱۹۸۰) با استفاده از ویژگی‌های زودیافت شامل توزیع اندازه ذرات و جرم مخصوص ظاهری، مقدار رطوبت ظرفیت زراعی و پژمردگی برآورد شدند. سپس این پارامترها در شبیه‌سازی انتقال املاح به عنوان ورودی برنامه HYDRUS-1D استفاده شدند.

### شبیه‌سازی تغییرات شوری (EC) در نیمرخ خاک طی مراحل مختلف آبتیوی

تغییرات EC در نیمرخ خاک در مراحل مختلف آبتیوی در دو حالت با و بدون اسید به روش معکوس به وسیله



بطور میانگین دارای ۳۸/۵ درصد آهک و ۲۳/۲ درصد گچ است (جدول ۲). بعلاوه نتایج بیانگر آن است ضریب تبیین مربوط به عمق‌های مختلف بین ۰/۷۸ تا ۰/۹۹ متغیر است (جدول ۵). بهترین شبیه‌سازی مربوط به لایه‌های بالاتر از ۱۰۰ سانتی‌متری خاک است که ضریب تبیین بیشتر و RMSE کمتری دارند. پارسایی و همکاران (۲۰۱۰) نیز در مطالعه‌ای به منظور شبیه‌سازی انتقال کلراید در خاکی با بافت سیلتی کلی لوم در شمال خوزستان نشان دادند که بین نتایج حاصل از اندازه‌گیری و شبیه‌سازی به خصوص در عمق‌های سطحی منطقه تطابق بیشتری وجود دارد. محمدی و دلبری (۲۰۱۵) نیز نشان دادند که مدل HYDRUS-1D در پیش‌بینی حرکت آب و املاح (Ca, K, Na, EC, TDS, pH) و (Mg) از کارایی بالایی برخوردار است و می‌تواند در مدیریت آبیاری مورد استفاده قرار گیرد.

خاک را به عنوان عاملی که خروجی‌های مدل را در مرحله چهارم تحت تاثیر قرار می‌دهد و از کارایی مدل می‌کاهد، بیان کرد.

شکل ۲ مقدار EC پیش‌بینی شده توسط مدل HYDRUS-1D در حالت کاربرد اسید سولفوریک به عنوان ماده اصلاح کننده را نشان می‌دهد. همان‌طوری که مشاهده می‌شود مدل برآوردی خوب از شوری خاک لایه‌های سطحی خاک (عمق کمتر از ۱۰۰ سانتی‌متر) داشته است. مقایسه منحنی مرحله اول آبتوی شکل ۱ با ۲ نشان می‌دهد مدل برآوردی بسیار خوب از شوری خاک در تمام عمق‌ها در حالت کاربرد اسید داشته است. که دلیل آن را می‌توان افزایش حلالیت آهک و گچ موجود در خاک دانست که علاوه بر افزایش کارایی آبتوی سبب بهبود ویژگی‌های هیدرولیکی خاک مانند نفوذ آب به خاک نیز شده است. خاک مورد مطالعه

جدول ۳- نتایج تجزیه شیمیایی آب رودخانه شاوور.

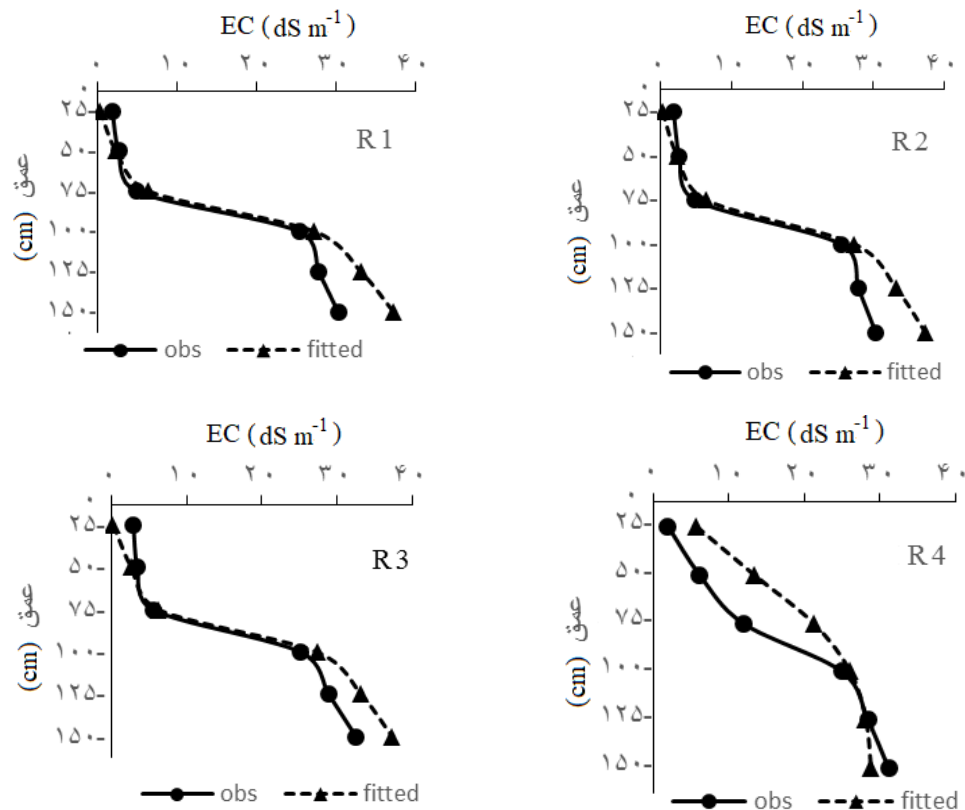
HCO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup>	Cl <sup>-</sup>	K <sup>+</sup>	Na <sup>+</sup>	Mg <sup>2+</sup>	Ca <sup>2+</sup>	pH	SAR	EC <sub>w</sub>
(mmol L <sup>-1</sup> ) <sup>0.5</sup>							-	(mmol L <sup>-1</sup> ) <sup>0.5</sup>	(dSm <sup>-1</sup> )
۳/۶	۳/۴	۲/۷۰	۰/۰۸	۴/۹	۱/۰	۳/۲	۷/۴	۳/۲	۰/۸۹۸

جدول ۴- پارامترهای هیدرولیکی خاک برآورد شده با Rosetta.

l	K <sub>s</sub>	n	α	θ <sub>s</sub>	θ <sub>r</sub>	بافت خاک
(-)	(cm day <sup>-1</sup> )	(-)	(cm <sup>-1</sup> )	(cm <sup>3</sup> cm <sup>-3</sup> )	(cm <sup>3</sup> cm <sup>-3</sup> )	لوم
۰/۵	۲۹/۹۶	۱/۵	۰/۰۳۶	۰/۴۳	۰/۰۷۸	

جدول ۵- مقایسه نتایج شبیه‌سازی تغییرات شوری نیمرخ خاک در دوره‌های مختلف آبتوی.

RMSE (dS m <sup>-1</sup> )		R <sup>2</sup>		مرحله آبتوی
بدون اسید	با اسید	بدون اسید	با اسید	
۱/۶۰	۰/۱۱	۰/۹۸	۰/۹۹	مرحله اول
۱/۳۱	۲/۴۷	۰/۹۶	۰/۹۷	مرحله دوم
۱/۵۶	۴/۵۲	۰/۹۵	۰/۹۶	مرحله سوم
۷/۰۷	۵/۰۳	۰/۷۲	۰/۷۸	مرحله چهارم



شکل ۱- مقدار شوری (EC) نیمرخ خاک اندازه‌گیری شده و برآورد شده با مدل HYDRUS-1D در مراحل مختلف آبتشویی در حالت بدون کاربرد اسید سولفوریک (R با پانویس ۱ تا ۴، نشان دهنده مراحل ۱ تا ۴ آبتشویی است).

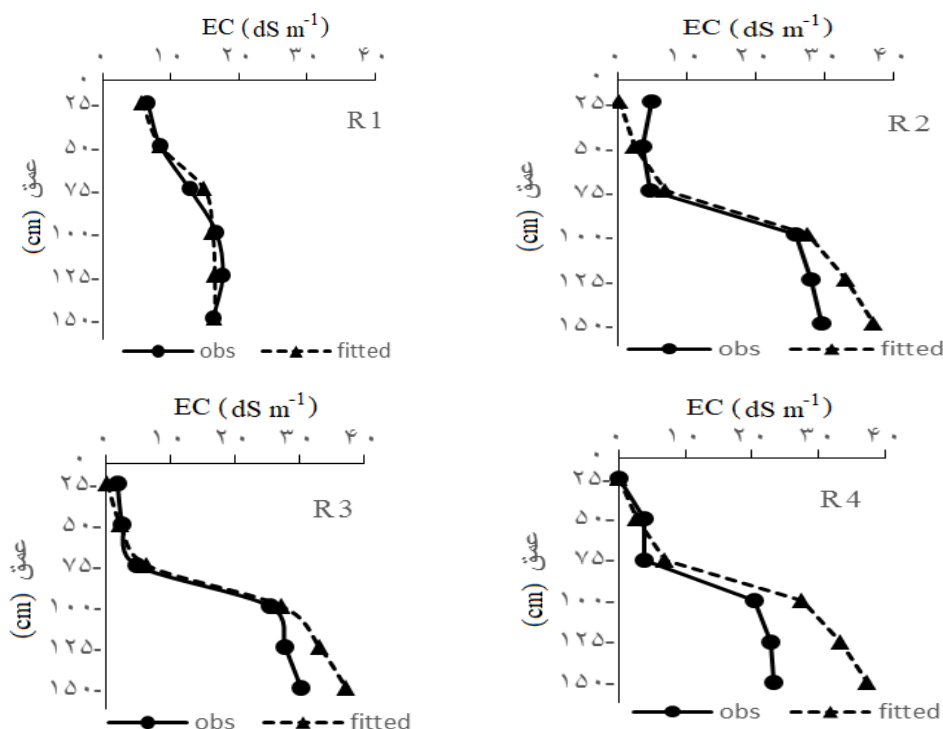
منطقه مطالعاتی، آزمون مقایسه میانگین جفت شده<sup>۱</sup> بین شوری نیمرخ خاک پس از عملیات آبتشویی در دو حالت با و بدون کاربرد ماده اصلاح کننده اسیدسولفوریک انجام شد. نتایج نشان داد مقدار شوری خاک در مراحل مختلف آبتشویی تفاوتی معنی‌دار در سطح ۵ درصد با هم ندارند. همچنین مقایسه منحنی‌های شوری نیمرخ خاک پس از آبتشویی در دو حالت با و بدون اسید سولفوریک (شکل‌های ۱ و ۲) نیز تفاوت چندانی را نشان نمی‌دهد. دلیل این نتایج این است که خاک شور و سدیمی مورد مطالعه دارای آهک و گچ به مقدار زیاد می‌باشد (جدول ۲) که در اثر آبتشویی باعث تامین کلسیم کافی برای تبادل با سدیم می‌شود وجود این املاح همراه با کلسیم و منیزیم در آب آبتشویی سبب شده است که نیازی به اضافه کردن مواد اصلاح کننده

با توجه به بالا بودن غلظت یون سدیم و همچنین pH بالای خاک‌های شور و سدیمی، به هنگام آبتشویی خاک با آب خالص خطر پراکنده شدن ذرات خاک و کاهش شدید نفوذپذیری وجود دارد، لذا در اصلاح این خاک‌ها توصیه شده است عملیات آبتشویی توام با استفاده از مواد اصلاح کننده خاک مانند گچ، کربنات کلسیم، اسید سولفوریک باشد (غریبه و همکاران ۲۰۱۲). از طرفی خاک‌های شور و سدیمی خوزستان غالباً حاوی آهک و گچ به مقدار زیاد می‌باشند (پارسایی ۲۰۱۰). بطوری که مقدار گچ و آهک خاک مورد مطالعه به ترتیب از ۲۴ تا ۲۷ و ۳۵ تا ۴۲ درصد متغیر بود که به هنگام آبتشویی می‌تواند تامین کننده کلسیم مورد نیاز برای تبادل با سدیم باشد. بدین منظور در این بخش از پژوهش به منظور بررسی ضرورت افزودن اسیدسولفوریک جهت اصلاح خاک شور و سدیمی

<sup>1</sup> Paired t Test

کاربرد آنها در حذف شوری از نیمرخ این خاک تفاوت قابل ملاحظه و معنی‌داری را نشان ندهد.

مانند اسید سولفوریک، گچ و اسید کلریدریک به این خاک نباشد و کاربرد مواد اصلاح کننده و یا عدم



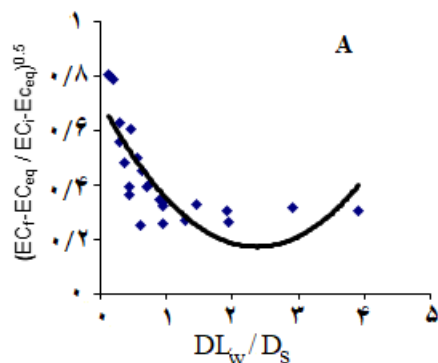
شکل ۲- شوری (EC) اندازه‌گیری شده و برآورد شده با مدل HYDRUS-1D در مراحل مختلف آبتشویی با اسید سولفوریک (R با پانویس ۱ تا ۴، نشان دهنده مراحل ۱ تا ۴ آبتشویی است).

تقریباً مشابه است و هر در حالت مقدار شوری پس از چهار تا  $DL_w/D_s$ ، تقریباً به مقدار ۷۰ درصد کاهش یافته است. همچنین مقایسه این منحنی‌ها نشان می‌دهد که در منحنی‌های شوری‌زدایی با کاربرد اسید پس از کمتر از یک  $DL_w/D_s$  مقدار ۷۵ درصد شوری خاک کاهش یافته است در حالی‌که در حالت بدون اسید پس از استفاده از  $1/5$  تا  $D_w/D_s$  هنوز ۶۵ درصد شوری کاهش یافته است. لذا می‌توان نتیجه گرفت کاربرد اسید سولفوریک به هنگام آبتشویی املاح خاک شور و سدیمی سبب می‌شود با صرف زمان و آب کمتر خاک را اصلاح نمود. به‌طور کلی راندمان شوری‌زدایی خاک تحت تاثیر مقدار حلالیت ماده اصلاح کننده و همگنی محلول آبتشویی می‌باشد. اسیدسولفوریک، محلول اسیدی همگنی تولید

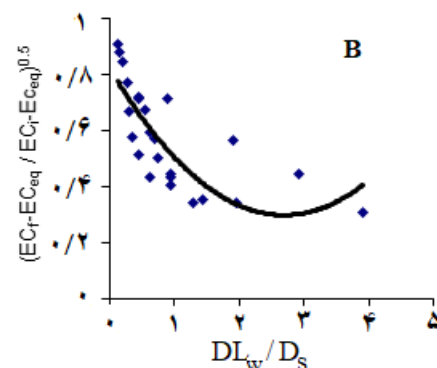
بررسی تاثیر اسیدسولفوریک بر افزایش راندمان آبتشویی

منحنی‌های شوری‌زدایی در حالت با و بدون کاربرد اسیدسولفوریک در شکل ۳ گزارش شده است. منحنی شوری‌زدایی از ترسیم تغییرات نسبی در شوری خاک  $(EC_f - EC_{eq} / EC_i - EC_{eq})$  در مقابل  $DL_w/D_s$  بدست می‌آید. که در آن  $EC_i$ ،  $EC_f$  و  $EC_{eq}$  به ترتیب هدایت الکتریکی عصاره اشباع خاک قبل از آبتشویی، بعد از آبتشویی و در حال تعادل شیمیایی با آب آبتشویی می‌باشد. همچنین پارامترهای  $DL_w$  و  $D_s$  به ترتیب عمق خالص آب آبتشویی و عمق خاک می‌باشند. مقایسه منحنی‌های شوری‌زدایی نشان می‌دهد که در هر دو حالت (با و بدون ماده اصلاح کننده) راندمان آبتشویی

اسیدسولفوریک در ابتدای آبخویی کارایی بیشتری را در مقایسه آب خالص نشان داده است. نکته مهم درباره گچ بالاتر بودن انحلال آن در آب نسبت به آهک است. انحلال گچ تحت تاثیر اسیدیته و یا فشار گاز کربنیک قرار نداشته و در دمای معمول خاک نیز تقریباً ثابت می‌باشد.



می‌کند که با افزایش انحلال آهک خاک، خیلی سریع‌تر یون‌های کلسیم را برای جانشینی با سدیم فراهم می‌کند اما در مقابل در حالت بدون کاربرد اسید، آهک خاک حلالیت اندکی داشته و به آب بیشتری برای آبخویی نیاز است (غریبه و همکاران ۲۰۱۲). لذا همان‌طوری‌که منحنی شوری‌زدایی نشان داده تیمار آبخویی با



شکل ۳- منحنی شوری‌زدایی خاک مورد مطالعه در حالت با (A) و بدون (B) اضافه کردن اسید سولفوریک.

تفاوت بین میزان EC اندازه‌گیری شده و شبیه‌سازی شده در دور سوم و چهارم آبخویی و در عمق‌های بیشتر از ۱۰۰ سانتی‌متری خاک دیده شد. با توجه به اینکه در این مناطق با افزایش دور آبخویی از غلظت املاح و شوری در عمق‌های سطحی کاسته شده و املاح در عمق‌های بیشتر از ۱۰۰ سانتی‌متر تجمع یافته‌اند، بنابراین می‌توان افزایش شوری خاک و اثرات آن بر روی ساختمان خاک، نفوذپذیری و هدایت هیدرولیکی خاک را به عنوان عاملی که خروجی‌های مدل را تحت تاثیر قرار می‌دهد و از کارایی مدل در برآورد EC در عمق‌های پایین‌تر می‌کاهد، بیان کرد.

نتایج این پژوهش نشان داد ورود کلسیم به محلول خاک از طرق انحلال کانی‌های حاوی کلسیم امکان‌پذیر است. دو کانی اصلی حاوی کلسیم که در مناطق خشک و نیمه خشک به وفور وجود دارند، شامل آهک یا کربنات کلسیم و گچ است. مشکل اصلی آهک حلالیت بسیار کم (۰/۰۱۴ گرم در لیتر) آن

### نتیجه‌گیری کلی

در این پژوهش با استفاده از برنامه HYDRUS-1D تغییرات EC نیمرخ خاک پس از مراحل مختلف آبخویی به روش معکوس شبیه‌سازی شد. نتایج حاکی از آن است که این برنامه قادر است برآوردی قابل قبول از تغییرات EC را در خاک داشته باشد. پس از بررسی نتایج بدست آمده از برآورد مدل HYDRUS-1D از تغییرات EC در شش عمق باید به این نکته توجه کرد که نوع آنیون‌ها و کاتیون‌های موجود در خاک در روند تغییرات EC تاثیرگذار است. با توجه به نتایج تشریح پروفیل خاک مورد مطالعه دارای بافت لوم بوده و نمک-های غالب آن سدیمی گزارش شده است که حلالیت بیشتری نسبت به نمک‌های کلسیمی و منیزیمی دارد و همچنین میزان EC و ESP پایین‌تر در این منطقه و کلسیم زیاد که اثرات تخریبی سدیم را کاهش می‌دهد. همه این عوامل سبب شد مدل HYDRUS-1D در منطقه برآوردی خوب از تغییرات EC داشته باشد. حداکثر

## سپاسگزاری

بدین‌وسیله از خانم مهندس پیوند پاپن کارشناس ارشد خاکشناسی، سازمان آب و برق خوزستان به دلیل همکاری و مساعدت در جمع‌آوری داده‌های این پژوهش تشکر و قدردانی می‌شود.

در شرایط معمول خاک است. حلالیت آهک خاک با اسیدی شدن شرایط افزایش پیدا می‌کند به همین دلیل می‌توان نتیجه گرفت در خاک‌های شور و سدیمی دارای آهک با اسیدی کردن شرایط و افزایش حلالیت آهک می‌توان غلظت یون کلسیم را افزایش و میزان سدیم تبادل را کاهش داد و خاک را اصلاح کرد.

## منابع مورد استفاده

- Anonymous, 2006. Guide to the application of experimental and theoretical models of leaching of saline and sodic soils. Planning and Budget Organization, Tehran, Iran. (In Persian).
- Anonymous, 2007. Report of field experiments and leaching studies and land remediation of irrigation and drainage networks in Shavor plain of Khuzestan province. Green Tak Consultant Engineers, Tehran, Iran. (In Persian).
- Barzegar AR, 2000. Salt-affected Soils: Diagnosis and Productivity. Shahid Chamran University Press, Ahvaz, Iran. (In Persian).
- Droogers P, Salemi HR and Mamanpoush A, 2000. Exploring Basin Scale Salinity Problems Using Handbook no. 60. US Government Printing Office, Washington D.C.
- Gee GW and Bauder JW, 1986. Particle-size Analysis. Pp. 383-411. In: Page AL, (ed.), Methods of Soil Analysis, Part 1, Physical and Mineralogical Methods. Second Edition, Agronomy Monograph 9, American Society of Agronomy, Madison, WI.
- Gharaibeh MA, Eltaif NI and Shra'a SH, 2012. Desalination and desodification curves of highly saline-sodic soil amended with phosphoric acid and by-Product gypsum. International Journal of Environmental Science and Development 3(1): 39-42.
- Herrero J and Pérez-Coveta O, 2005. Soil salinity changes over 24 years in a Mediterranean irrigated district. Gerderma, 125: 287-308
- Lavkulich LM, 1981. Methods Manual, Pedology Laboratory. Department of Soil Science, University of British Columbia, Vancouver, British Columbia, Canada.
- Mitchell JP, Shennan C, Singer MJ, Peters DW, Miller RO, Prichard T, Grattan SR, Rhoades JD, May DM and Munk DS, 2000. Impacts of gypsum and winter cover crops on soil physical properties and crop productivity when irrigated with saline water. Agricultural Water Management 45: 55-71.
- Mohammadi E and Delbari M, 2015. Simulation of water and salt transport in soil using the HYDRUS-1D software. Soil and Water Science. 25(1): 67-78. (In Persian with English abstract).
- Oustan SH, 2004. Soil Chemistry with Environmental Perception. First edition. Tabriz University Press. (In Persian).
- Parsaei N, Sayyad Gh and Landi A, 2011. Simulation of chloride transport in soil with silty clay loam texture in northern Khuzestan. 3rd Irrigation and Drainage Network Management National Conference, Ahvaz, Iran.
- Qadir M and Schubert S, 2002. Degradation processes and nutrient constraints in sodic soils. Land Degradation and Development 13: 275-294.
- Ramos TB, Goncalves MC, Prazeres A and Martins JC, 2008. Multicomponent solute transport in two multifactorial experiments. The Second HYDRUS Workshop. 28 March, Czech University of Life Sciences, Prague, Czech.
- Rhoades JD, 1982. Cation exchange capacity. Pp. 149-158. In: Page AL, Miller RH and Keeney DR (eds.), Methods of Soil Analysis. Part 2. Agron. Monogr. 9. ASA and SSSA, Madison, WI.
- Schaap MG, Leij FJ and van Genuchten MTh, 2001. Rosetta: a computer program for estimating soil hydraulic parameters with hierarchical pedotransfer functions. Journal of Hydrology 251: 163-176.

- Shang FZ, Ren SM, Zou T, Yang PL and Sun N, 2016. Modeling the risk of the salt for polluting groundwater irrigation with recycled water and ground water using HYDRUS-1 D. *Water Air Soil Pollution* 227(189): 2-22.
- Simunek J, Jacques D, Van Genuchten MTh and Mallants D, 2006. Multicomponent geochemical transport modeling using HYDRUS-1D and HP1. *Journal of the American Water Resources Association* 12: 1537-1547
- Simunek J, Van Genuchten MTh, Gribb MM and Hopmans JW, 1998. Parameter estimation of unsaturated soil hydraulic properties from transient flow processes. *Soil Tillage Research* 47:1-2.
- Simunek J, Sejna M, Saito H, Sakai M and van Genuchten MTh, 2008. The HYDRUS-1D software package for simulating the one-dimensional movement of water, heat, and multiple solutes in variably-saturated media, Version 4.0x, Hydrus Series 3. Department of Environmental Sciences, University of California Riverside, CA, USA.
- Tao X, Liu X and Tao S, 2010. The effect of groundwater table and flood irrigation strategies on soil water and salt dynamic and reed water use in the Yellow River Delta, China. *Journal of Ecological Modeling* 4: 1-12 .
- Van Genuchten MTh, 1980. A closed-form equation for predicting the hydraulic conductivity of soils. *Soil Science Society of America Journal* 44: 892-898.
- Van Genuchten MTh, 1985. Convection-dispersion transport of solutes involved in sequential first-order decay reactions. *Geoscience* 11(2): 129-147.
- Wong VNL, Dalal RC and Greene RSB, 2009. Carbon dynamics of sodic and saline soils following gypsum and organic material additions: A laboratory incubation. *Applied Soil Ecology* 41: 29-40.
- Yazdanpanah N, Pazira E, Neshat A, Mahmoodabadi M and H Naghavi, 2013. Redistribution of exchange cations in soil by application of soil reclamation materials. *Iranian Journal of Soil Research*. 27(2): 179-193. (In Persian with English abstract).