ارزیابی مدل‌های رایانه‌ای SWAP و LEACHC در آبشویی مزرعه‌ای املاح خاک در منطقه چاه افضل استان یزد

وحید خاکساری[۱]، سیدعلی‌اکبر موسوی[۱]، سیدعلی محمد چراغی[۲]، علی‌اکبر کامگار حقیقی[۱] و شاهرخ زند پارسا[۱]

چکیده

انجام آزمایش‌های مزرعه‌ای به منظور تعیین مقدار بهینه آب مصرفی برای اصلاح شوری خاک، وقت‌گیر و پرهزینه بوده، بنابراین استفاده از مدل‌های کامپوتری (رایانه‌ای) آبشویی رایج شده است، ولی قبل از به کارگیری چنین مدل‌هایی، درستی نتایج آنها باید در مقایسه با نتایج آزمایش‌های مزرعه‌ای ارزیابی شود. در این پژوهش دو مدل رایانه‌ای SWAP و LEACHC در شبیه‌سازی نیم‌رخ رطوبت و شوری خاک حاصل از انجام آزمایش‌های آبشویی مورد ارزیابی قرار گرفت. در شبیه‌سازی حرکت و توزیع رطوبت در خاک، مدل SWAP نتایج بهتری را ارائه داد. با وجود برتری مدل SWAP نسبت به مدل LEACHC در پیش‌بینی رطوبت خاک، بر اساس شاخص‌های آماری محاسبه شده، هر دو مدل نتایج رضایت‌بخشی داشته‌اند. در پیش‌بینی شوری نیم‌رخ خاک در زمان‌های مختلف، مدل LEACHC به دلیل بهره‌گیری از سه مکانیسم انتقال املاح یعنی جابه‌جایی، انتشار و پخشیدگی و نیز در نظر گرفتن برهم‌کنش‌های شیمیایی در محیط خاک، مانند جذب، رسوب، انحلال و غیره در مقایسه با مدل SWAP نتایج بهتری را نشان داد. هر دو مدل با وجود اختلاف مقادیر پیش‌بینی شده و اندازه‌گیری شده شوری در آبشویی‌های اول، توانسته‌اند روند شوری‌زدایی خاک را به نحو قابل قبولی پیش‌بینی نمایند.

واژه‌های کلیدی: آبشوئی، چاه افضل، SWAP، LEACHC

مقدمه

با توجه به رشد روزافزون جمعیت، نیاز به تولید محصولات غذایی بیشتر، بیش از پیش احساس می‌شود. کشاورزی به عنوان یکی از محوری‌ترین بخش‌ها در تأمین مایحتاج غذایی بشر مطرح است و در حال حاضر تقریباً یک سوم غذای جهان را تأمین می‌کند که تا سال ۲۰۴۰ میلادی این رقم باید به ۵۰ درصد برسد. این افزایش تولید تنها از طریق افزایش سطح زیر کشت و یا بالا بردن عملکرد در واحد سطح میسر است. سطح اراضی کره زمین ۱۳/۲ میلیارد هکتار می‌باشد که ۷ میلیارد هکتار آن اراضی قابل کشت و ۱/۵ میلیارد هکتار تحت

۱. به ترتیب دانشجوی سابق کارشناسی ارشد، استادیار، دانشیار و استادیار مهندسی آب، دانشکده کشاورزی، دانشگاه شیراز
۲. استادیار پژوهش مرکز تحقیقات شوری یزد

[Downloaded from jcpp.iut.ac.ir on 2026-11-26]

[DOR: 20.1001.1.22518517.1385.10.2.5.7]

کشت است (۲۲). از اراضی تحت کشت، حدود ۰/۳۴ میلیارد هکتار (۲۳ درصد) اراضی شور و ۰/۵۶ میلیارد هکتار (۳۷ درصد) خاک‌های سدیمی است (۲۰). در ایران قریب به ۵۰ در صد از اراضی که دارای استعداد کشاورزی آبی هستند، مبتلا به مسأله شوری می‌باشد (۱).

آزمون‌های مزرعه‌ای مرتبط با شوری به دلیل محدودیت‌های اجرایی، زمان بر بودن و نیاز به نیروی انسانی و هزینه زیاد، به تدریج جای خود را به مدل‌های رایانه‌ای داده‌اند (۷). با استفاده از مدل‌های رایانه‌ای می‌توان در کوتاه‌ترین زمان، روش‌های مختلف مدیریتی را اعمال و روند آبشویی را با دقت مناسب بررسی کرد (۲). در سال‌های اخیر مدل‌های بسیاری برای مطالعه روند آبشویی املاح خاک ارائه شده است.

العبیدی و همکاران (۸) پنج مدل شناخته شده ریاضی، هر یک با درونمایه تحلیلی متفاوت را برای ارزیابی در مقابل مقادیر غلظت املاح اندازه‌گیری شده در چهار ایستگاه آزمایشی واقع در چهار پروژه بزرگ اصلاح در مکان‌های مختلف جلگهٔ مزوپوتامیان (Mesopotamian) عراق انتخاب کردند. این مدل‌ها عبارت بودند از مدل سری مخازن (Series of Reservoirs Model) (SRM)، مدل مخزن با معبر فرعی (Reservoir with Bypass Model) (RBM)، مدل تئوری ستون پیوسته خاک (Theoretical Plate-Thickness Model) (TPTM)، مدل انتقال – انتشار (Convection-Dispersion Model) (CDM) و مدل تابع انتقال (Transfer Function Model) (TFM) بودند.

وزیری (۳) چهار مدل شوری‌زدایی خاک، شامل مدل سری مخازن (SRM)، مدل تئوری ستون پیوسته خاک (TPTM)، مدل انتقال – انتشار هیدرودینامیکی (CDM) و مدل عددی (NM) را در دو منطقه رودشت اصفهان و کنگاور کرمانشاه با اجرای دو آزمون مزرعه‌ای در شرایط آبشویی غرقاب دائم و متناوب و با کاربرد مقادیر ۵۰، ۷۵، ۱۰۰ و ۱۲۵ سانتی‌متر آب، مورد ارزیابی و مطالعه قرار داد.

نقل و انتقال ماده حل شده در خاک، فرایند پویایی است که از طریق مجموعه‌ای از معادلات دیفرانسیل که به کمک کامپیوتر حل می‌شوند، با دقیق‌ترین شکل توصیف می‌شود.

در این تحقیق، دو مدل کامپیوتری SWAP (Soil, Water, Atmosphere, Plant) و LEACHC (نسخه مربوط به شوری در خاک‌های آهکی از مدل LEACHM، Leaching Estimation and Chemistry Model) برای شبیه سازی فرایند آبشویی املاح از نیم‌رخ خاک به کار گرفته شده است. SWAP یک مدل شبیه سازی بیلان آب و املاح در یک خاک زیرکشت یا آیش با انواع مختلف شرایط مرزی و با در نظر گرفتن امکان‌پذیری زه‌کشی مصنوعی و آبیاری است.

SWAP، معادله ریچاردز را برای حرکت آب در خاک به کار می‌گیرد. توابع هیدرولیکی خاک به وسیله بیان‌های تحلیلی وان‌گنوختن و معلم (Van Genuchten and Mualem) و یا به وسیله مقادیر جدول‌بندی شده تعریف می‌شوند (۲۴). حل عددی معادله ریچاردز طوری تطبیق یافته که حل، هم برای منطقه اشباع و هم برای منطقهٔ غیر اشباع به کار می‌رود. در منطقه غیر اشباع، SWAP روندهای مختلف انتقال املاح، جابه‌جایی، پخشیدگی و انتشار، جذب غیر خطی، انحلال مرتبه اول و جذب به وسیله ریشه را شبیه‌سازی می‌کند. این امر، شبیه‌سازی انتقال معمولی نمک و علف‌کش، شامل تأثیر شوری بر رشد گیاه را مجاز می‌کند. در ارتباط با شبیه‌سازی تغییرات شوری در خاک، SWAP فقط از مکانیسم‌های جابه‌جایی و انتشار استفاده می‌کند و از جذب توسط ریشه و ذرات خاک و نیز انحلال صرف‌نظر شده است.

LEACHM توسط هاتسون و واگنت (۱۲) در بخش علوم خاک، گیاه و اتمسفر در دانشگاه Cornell توسعه یافته است. جریان آب و انتقال املاح، توسط معادلات ریچاردز و انتقال – انتشار تشریح شده است. در LEACHC تعادل شیمیایی در معادله انتقال – انتشار به علت پیچیدگی‌هایی که دارد وارد نشده است؛ در عوض، فرایندهای شیمیایی، شامل تبادل کاتیونی، تبادل اتمسفری و ترسیب – انحلال در یک زیر برنامه تعادل مواد شیمیایی مجزا CHEM (۱۸) شبیه سازی شده است. مدل

[Downloaded from jcpp.iut.ac.ir on 2026-11-26]

[DOR: 20.1001.1.22518517.1385.10.2.5.7]

SWAP توسط محققین مختلف برای شبیه سازی حرکت آب و املاح در خاک (۱۰ و ۱۲)، آثار کمّیت و کیفیت آب آبیاری و شوری خاک (۷)، مدیریت کمّیت و کیفیت آب آبیاری و شوری خاک (۱۹)، مورد استفاده قرار گرفته و مناسب تشخیص داده شده است. هم‌چنین قابلیت مدل LEACHC در شبیه سازی انتقال املاح در بالای سطح ایستابی کم عمق و بررسی تأثیر گزینه‌های مختلف مدیریتی و شرائط اولیه بر شوری منطقه ریشه، مورد بررسی قرار گرفته و نتایج به دست آمده رضایت‌بخش بوده است (۳، ۶ و ۱۱).

در این پژوهش آبشویی خاک شور ایستگاه مرکز ملی تحقیقات شوری یزد، واقع در منطقه چاه افضل، مورد مطالعه قرار گرفت. اهداف این پژوهش به شرح زیر است:

۱. پیش‌بینی نیم‌رخ رطوبت و املاح خاک با استفاده از مدل‌های SWAP و LEACHC، در طول مدت آبشویی خاک.

۲. ارزیابی مدل‌های رایانه‌ای SWAP و LEACHC در تخمین رطوبت و شوری نیم‌رخ خاک در مقایسه با نتایج آزمون مزرعه‌ای آبشویی در چاه افضل یزد، به دو روش: (الف) مقایسه ترسیمی و (ب) استفاده از شاخص‌های آماری.

مواد و روش‌ها

این پژوهش در ایستگاه مرکز ملی تحقیقات شوری در منطقهٔ چاه افضل یزد انجام گرفت. این ایستگاه پژوهشی در فاصله ۷۰ کیلومتری شمال غربی یزد، در مجاورت روستای چاه افضل واقع است. چاه افضل بخشی از زیر حوزه کویر سیاه‌کوه می‌باشد. به طور کلی منابع آب منطقه چاه افضل از حوزه‌ای به وسعت ۲۸۱۵۰ کیلومتر مربع تأمین می‌گردد. در حقیقت این منطقه چاله زه‌کشی حوزه‌های آبخیز شیرکوه یزد – اردکان، نایین – عقدا، توت و هریش است (۱۵). مراحل مختلف اصلاح خاک شور که در این پژوهش مورد استفاده قرار گرفته به این صورت انجام گرفت که با تعیین محل انجام آزمایش در ایستگاه تحقیقات شوری در چاه افضل، نقشه‌برداری دقیق برای تعیین ابعاد و فاصله بین کرت‌ها انجام شد. به منظور تعیین عوامل هیدرولیکی و خصوصیات فیزیکی نیم‌رخ خاک، یک پروفیل در مزرعه آزمایشی مورد نظر، حفر و نمونه‌های خاک دست خورده و دست نخورده از تمامی عمق‌ها و به تعداد کافی از هر عمق برداشته شد. سپس بررسی‌های خاک‌شناسی و تعیین تعداد لایه‌های خاک در عمق مورد نظر انجام شد. به منظور جلوگیری از حرکت جانبی آب از کرتی به کرت دیگر، دیواره عایق پلاستیکی تا عمق یک متر در اطراف تمام کرت‌ها، کار گذاشته شد و نیز برای تعیین دقیق مقدار آب استفاده شده در سطح کرت‌ها، لوله کشی از محل ایستگاه پمپاژ تا محل کرت‌ها انجام و در مسیر این لوله کشی کنتورهای حجمی آب نصب شدند.

به منظور بررسی نحوهٔ تغییرات شوری نیم‌رخ خاک و تعیین منحنی آبشویی، آزمایش‌های آبشویی در زمستان سال ۱۳۸۰ به صورت کرت‌های کاملاً تصادفی خرد شده در زمان و در چهار تکرار به مرحلهٔ اجرا در آمد. تیمارها بدین ترتیب انتخاب شدند: (D1L1) آبشویی کرت‌ها در ده نوبت به فواصل زمانی سه روز و در هر نوبت ۱۵۰ میلی‌متر آب، (D2L1) آبشویی کرت‌ها در ده نوبت به فواصل زمانی سه روز و در هر نوبت ۲۰۰ میلی‌متر آب، (D1L2) آبشویی کرت‌ها در ده نوبت به فواصل زمانی شش روز و در هر نوبت ۱۵۰ میلی‌متر آب، (D2L2) آبشویی کرت‌ها در ده نوبت به فواصل زمانی شش روز و در هر نوبت ۲۰۰ میلی‌متر آب.

نمونه برداری اولیه قبل از شروع آبشویی صورت گرفت. نمونه‌ها به آزمایشگاه منتقل و آزمایش‌های مورد نظر بر روی آنها انجام شد. این آزمایش‌ها عبارت بودند از: بررسی‌های خاک‌شناسی و لایه بندی خاک در عمق مورد نظر، تهیه منحنی شاخص رطوبتی خاک در تمام لایه‌ها، تعیین بافت و توزیع اندازه ذرات خاک. بعد از تعیین تعداد لایه‌های خاک از نظر خصوصیات ظاهری و خاک‌شناسی، برای اندازه‌گیری هدایت هیدرولیکی اشباع در هر لایه خاک از نفوذ سنج گلف (Guelph Permeameter) (۱۶) و نیز از حلقه نفوذ (۱۷) استفاده شد.

[Downloaded from jcpp.iut.ac.ir on 2026-11-26]

[DOR: 20.1001.1.22518517.1385.10.2.5.7]

به منظور قرائت رطوبت در ابتدای شروع آزمایش و نیز در مراحل مختلف در حین آبشویی از نمونه برداری تخریبی (دست خورده) خاک برای عمق ۱۵-۰ سانتی‌متر و از نوترون متر برای عمق‌های ۴۰- ۱۵، ۷۰-۴۰ و ۱۰۰-۷۰ سانتی‌متر استفاده شد. نمونه خاک به دست آمده به خاطر نصب لوله‌های نوترون متر در وسط کرت‌ها که تا عمق ۱۲۰ سانتی‌متری انجام شده بود برای واسنجی کردن نوترون متر و نیز تعیین مقادیر اولیه قبل از آبشویی EC، pH، آنیون‌ها و کاتیون‌های عصاره اشباع خاک مورد استفاده قرار گرفت. نمونه برداری برای تعیین رطوبت و شوری از لایه‌های خاک با فاصله زمانی ۷ روز انجام گرفت.

برای اجرای مدل SWAP پس از آماده سازی فایل‌های لازم، اطلاعات مورد نظر در این فایل‌ها وارد شد. از جمله شاخص‌های لازم، داده‌های مربوط به آب خاک و نیم‌رخ خاک است که شامل انتخاب مدل مناسب برای تبخیر از سطح خاک و تعیین ضریب مربوطه می‌باشد. مدل انتخاب شده در این پژوهش مدل بلاک و همکاران (۵) است.

در این فایل‌ها، تعداد لایه‌های خاک (در صورت مطبق بودن خاک) و نام فایل ورود، اطلاعات فیزیکی و هیدرولیکی برای هر لایه تعریف می‌شود. با حفر پروفیل در نزدیکی محل انجام آزمایش تا عمق ۱/۵متر و پس از بررسی‌های کارشناسی معلوم شد که خاک مورد نظر تا عمق ۱ متر دارای ۴ لایه مجزا از هم است. با مشخص شدن تعداد لایه‌های خاک، می‌بایست برای هر لایه عوامل مربوط به تابع نگه‌داری رطوبت خاک وان گنوختن یعنی θ_r (رطوبت باقی‌مانده)، θ_s (رطوبت اشباع)، α، λ و n (پارامترهای مدل Van Genuchten)و نیز K_s (هدایت هیدرولیکی اشباع خاک) وارد شود.

برای به دست آوردن این پارامترها بدین ترتیب عمل شد که با رینگ‌های مخصوص، نمونه خاک دست نخورده از تمام لایه‌ها برداشته شد. این نمونه‌ها به آزمایشگاه منتقل و با بهره‌گیری از قیف بوخنر و ستون آویزان (Hanging column) و نیز دستگاه محفظه فشاری (Pressure plate) مقادیر رطوبت حجمی نمونه‌ها در ۱۴ مکش مختلف: ۰، ۱۰، ۳۰، ۶۰، ۹۰، ۱۲۰، ۱۵۰، ۲۰۰، ۲۸۰، ۳۸۷، ۵۹۱، ۱۰۰۰، ۲۱۵۰، ۵۰۰۰، ۱۰۰۰۰، و ۱۵۰۰۰ سانتی‌متر، بین حالت اشباع و نقطهٔ پژمردگی دائم تعیین گردید. سپس با این تعداد نقطه اندازه‌گیری شده برای هر چهار لایه و با بهره‌گیری از نرم افزار تحت ویندوز RETC، معادلهٔ تابع نگه‌داری رطوبت وان گنوختن به این نقاط برازش داده شده و پارامترهای مورد نظر تعیین شدند (۲۵).

به منظور تعیین هدایت هیدرولیکی اشباع در لایه ۱۵-۰ سانتی‌متر یعنی لایه سطحی خاک از روش استوانه نفوذ (۱۷) و در عمق‌های ۴۰-۱۵، ۷۰-۴۰ و ۱۰۰-۷۰ سانتی‌متر، از روش نفوذ سنج گلف استفاده شد (۱۶).

اطلاعات هواشناسی مورد نیاز پس از استخراج داده‌های ایستگاه هواشناسی میبد، واقع در نزدیکی محل آزمایش و تبدیل آنها به فرمت مناسب در فایل اطلاعات هواشناسی وارد شد. به علاوه مقادیر اولیه رطوبت، شوری و دمای عمق‌های مختلف خاک در اولین روز شبیه‌سازی اندازه‌گیری و در فایل‌های مربوطه وارد می‌گردد. در فایلی دیگر نیز مقدار آب استفاده شده در کرت‌های مختلف و زمان اجرای آبشویی‌ها (تیمارها) وارد می‌شود.

برای اجرای مدل LEACHC که نسخهٔ شبیه سازی شوری مدل LEACHM است، سه گروه از داده‌های ورودی برای به کارگیری مدل، مورد نیاز است. اولین گروه داده‌ها شامل پارامترهای فیزیکی و شیمیایی خاک است، این اطلاعات شامل مقدار اولیه رطوبت خاک و روابط مشخصه خاک در ارتباط با مقدار رطوبت، پتانسیل ماتریک و هدایت هیدرولیکی است. هم‌چنین مقادیر اولیه یون‌های شیمیایی مختلف در نیم‌رخ خاک (Cl^-، SO_4^{2-}، HCO_3^-، Ca^{2+}، Mg^{2+} و Na^+) است که با نمونه‌برداری از عمق‌های مورد نظر در نیم‌رخ خاک و در آزمایشگاه با روش‌های استاندارد (۲۳) اندازه‌گیری شد. به علاوه ضرایب انتخاب نوع گاپون که ارتباط بین محلول خاک و کاتیون‌های قابل تبادل را توصیف می‌کند، با استفاده از تحلیلی که توسط متا و همکارانش (۱۳) ارائه شده برآورد و در فایل

[Downloaded from jcpp.iut.ac.ir on 2026-11-26]

[DOR: 20.1001.1.22518517.1385.10.2.5.7]

جدول ۱. برخی خصوصیات شیمیایی لایه‌های مختلف خاک قبل از آبشویی خاک (ایستگاه تحقیقات چاه افضل)

عمق خاک (سانتی‌متر)	EC dS/m	pH	Na^{+}	Mg^{++}	Ca^{++}	Cl^{-}	HCO_3^{-}	SO_4^{--}	SAR
			میلی اکی والان در لیتر						
۰–۱۵	۱۳۱/۹۰	۸/۲۰	۱۵۲۵	۳۴/۳۴	۵۹/۷۵	۱۲۴۱/۰	۱/۴۲	۳۷۵/۶	۲۲۲/۳
۱۵–۴۰	۷۱/۴۰	۸/۰۴	۶۸۵/۷	۳۸/۳۹	۵۱/۳۹	۶۰۶/۴	۱/۷۸	۱۶۷/۱	۱۰۲/۳
۴۰–۷۰	۲۸/۱۱	۷/۸۶	۲۲۵/۸	۲۹/۲۹	۴۱/۱۶	۲۰۷/۵	۱/۸۳	۸۷/۰	۳۸/۰۵
۷۰–۱۰۰	۱۸/۰۹	۷/۸۶	۱۳۷/۷	۲۷/۳۱	۳۴/۶۱	۱۱۸/۹	۱/۷۵	۷۸/۳	۲۴/۷۵

جدول ۲. برخی خصوصیات فیزیکی لایه‌های مختلف خاک قبل از آبشویی (ایستگاه تحقیقات چاه افضل)

عمق خاک (سانتی‌متر)	بافت خاک	شن	سیلت	رس	چگالی ظاهری (gr/cm^3)	درصد حجمی رطوبت در ظرفیت زراعی
		درصد				
۰–۱۵	لوم شنی	۶۲	۳۰/۴	۷/۶	۱/۳۱	۲۳/۶
۱۵–۴۰	لوم	۴۸	۳۲/۵	۱۹/۵	۱/۲۶	۲۸/۸
۴۰–۷۰	لوم	۴۲	۴۴/۴	۱۳/۶	۱/۰۷	۲۷/۹
۷۰–۱۰۰	لوم سیلتی	۲۸	۵۸/۴	۱۳/۶	۱/۱۷	۲۸/۹

ورود اطلاعات استفاده شده است. دومین گروه داده‌ها شامل تناوب و مدت آبیاری و بارندگی‌ها می‌باشد. در سومین گروه داده‌ها نیز ترکیب یونی آب آبیاری است که با نمونه‌گیری از آب مورد استفاده برای آبشویی که از چاه پمپاژ موجود در ایستگاه تحقیقات شوری تأمین می‌شد، در ابتدا و انتهای انجام آزمایش‌ها و با روش‌های استاندارد به دست آمد.

با آماده شدن فایل‌های ورود اطلاعات، مدل‌ها اجرا شده و نتایج حاصل در ارتباط با مقادیر رطوبت و شوری نیم‌رخ خاک با مقادیر اندازه‌گیری شده مورد مقایسه قرار گرفتند.

در این پژوهش ملاک‌های آماری شاخص جذر میانگین مجذور خطا (Root Mean Square Error) (RMSE)، شاخص کارایی مدل کردن (Modeling efficiency) (EF)، ضریب جرم باقی‌مانده (Coefficient of Residual Mass) (CRM) و ضریب مناسب بودن برازش (Coefficient of Determination) (R^2) برای ارزیابی اجرای مدل‌ها استفاده شده است (۹).

نتایج و بحث

برخی خصوصیات فیزیکی و شیمیایی لایه‌های مختلف خاک قبل از انجام آزمایش‌های آبشویی در منطقه چاه افضل در جدول‌های ۱ و ۲ نشان داده شده است.

میانگین شوری در نیم‌رخ خاک برابر با ۶۲/۳۷ دسی‌زیمنس بر متر بوده و بنابراین جزو خاک‌های خیلی شور

[Downloaded from jcpp.iut.ac.ir on 2026-11-26]

[DOR: 20.1001.1.22518517.1385.10.2.5.7]

جدول ۳. پارامترهای محاسبه شده برای مدل وان گنوختن – معلم، تابع کمپبل، و هدایت هیدرولیکی اشباع اندازه‌گیری شده برای لایه‌های مختلف خاک مزرعه

شماره لایه	عمق لایه (cm)	θ_r رطوبت باقی‌مانده	θ_s رطوبت اشباع	α	n	m	h_e (cm) مکش ورود هوا	B عامل تابع کمپبل	K_s (cm/day)
			پارامترهای مدل Van Genuchten						
۱	۰–۱۵	۰/۰۱	۰/۴۵	۰/۰۹	۱/۱۸	۰/۱۵	۸/۰۶	−۶/۲۳	۱۹۰/۲
۲	۱۵–۴۰	۰/۱۲	۰/۴۹	۰/۰۵	۱/۲	۰/۱۶	۸/۳۴	−۹/۳۲	۶۸/۲۵
۳	۴۰–۷۰	۰/۱۰	/۴۱	۰/۰۱	۲/۳	۰/۵۶	۲۱/۴۳	−۳/۷۸	۲۱۹/۴۵
۴	۷۰–۱۰۰	۰/۰۹	۰/۵۲	۰/۰۲	۱/۵۳	۰/۳۴	۱۴/۳۸	−۴/۳۱	۶۷/۴

(EC_e> ۴ ds/m) محسوب می‌شود. میانگین SAR در نیم‌رخ، برابر با ۹۶/۸ است و باعث شده تا خاک جزو خاک‌های سدیمی (SAR> ۱۳) طبقه‌بندی شود. بنابراین خاک مورد آزمایش، خاکی شور و سدیمی است.

علی‌رغم پیشرفت قابل توجه در زمینهٔ علم اصلاح اراضی، پیش‌بینی مقدار آب آبشویی یا اصلاح‌کننده مورد نیاز برای کاهش دادن یک کمّیت ویژه (مانند درصد سدیم قابل تبادل) تا حد غلظت و عمقی معین در نیم‌رخ خاک، کمتر مد نظر قرار گرفته است (۲۱). به همین منظور در این پژوهش دو مدل شناخته شده SWAP و LEACHC که قابلیت شبیه‌سازی حرکت آب و املاح را در خاک در شرایط مزرعه‌ای داراست، انتخاب شده و نتایج پیش‌بینی مدل‌ها با نتایج به دست آمده از آزمون مزرعه‌ای آبشویی مورد مقایسه قرار گرفته است. پارامترهای محاسبه شده برای مدل وان گنوختن– معلم با استفاده از مدل RETC و هم‌چنین پارامترهای تابع کمپبل و هدایت هیدرولیکی ۱ اشباع اندازه‌گیری شده برای لایه‌های مختلف خاک مزرعه در جدول ۳ درج شده است. مقادیر اندازه‌گیری شده رطوبت در برابر مقادیر پیش‌بینی شده مدل‌های SWAP و LEACHC به همراه خط یک به یک رسم شده که برای تیمار D1L1 این مقایسه به ترتیب در شکل‌های ۱ و ۲ نشان داده شده است.

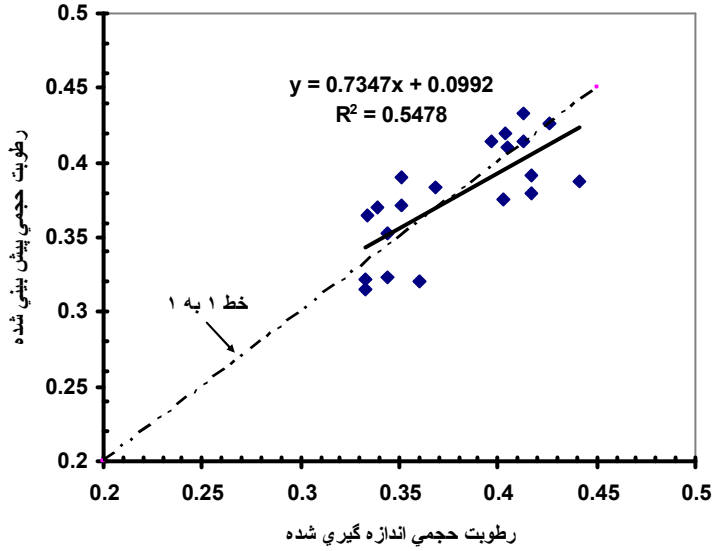
ملاحظه می‌شود که مدل SWAP توانسته است رطوبت را در نیم‌رخ خاک در عمق‌ها و زمان‌های مختلف و صرف‌نظر از فواصل به کارگیری آب در سطح خاک به خوبی پیش‌بینی نماید. در حالی که بر اساس شکل ۲ مدل LEACHC، عموماً مقدار رطوبت را در نیم‌رخ خاک بالاتر از مقدار اندازه‌گیری شده پیش‌بینی کرده است.

در مدل SWAP امکان انتخاب و یا تعیین تعداد بیشتری گره در نیم‌رخ خاک در مقایسه با مدل LEACHC وجود دارد. از طرف دیگر فواصل گره‌ها نیز در مدل LEACHC لزوماً باید یکسان باشد، در حالی که در مدل SWAP اختیار عمل در انتخاب فاصله متفاوت بین گره‌ها در عمق خاک وجود دارد. این مسأله می‌تواند در جاهایی که تغییرات ناگهانی در مقدار رطوبت وجود دارد (لایه سطحی خاک و حد فاصل لایه‌های مختلف خاک) تأثیر بسزایی در بهبود نتایج اجرای مدل داشته باشد. در مورد این مطالعه نیز به دلیل تفاوت در ضخامت لایه‌ها محدودیت‌های مدل LEACHC در نتایج تأثیر داشته است.

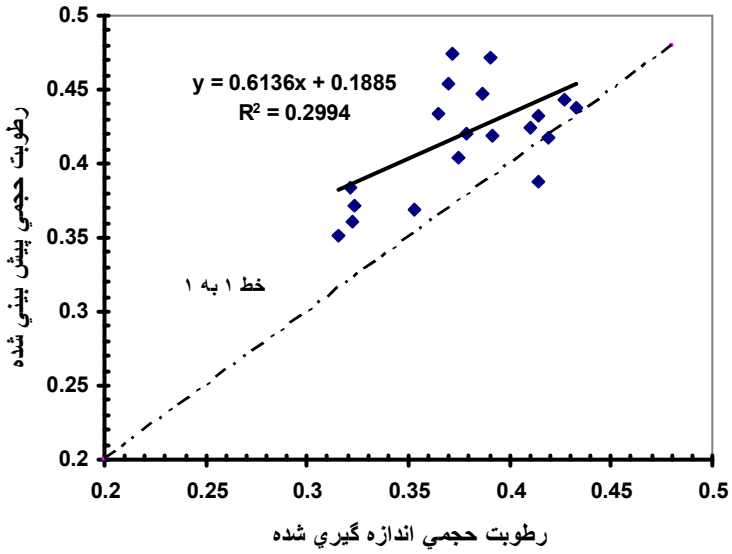
در کل و برای هر دو مدل، بخشی از اختلاف بین

[Downloaded from jcpp.iut.ac.ir on 2026-11-26]

[DOR: 20.1001.1.22518517.1385.10.2.5.7]



شکل ۱. مقایسه مقادیر اندازه‌گیری شده رطوبت حجمی در برابر مقادیر پیش‌بینی شده با مدل SWAP در تیمار D1L1



شکل ۲. مقایسه مقادیر اندازه‌گیری شده رطوبت حجمی در برابر مقادیر پیش‌بینـــی شده با مدل LEACHC در تیمار D1L1

نیم‌رخ‌های مقادیر رطوبت اندازه‌گیری شـده و پـیش‌بینـی شـده ممکن است ناشی از محدودیت‌های ذاتی مدل‌هـا باشـد. بـرای مثال، تأثیرات پدیدهٔ پس‌مانـد رطوبـت (Hysteresis) و جریـان معبری آب از میان ماکروپورها در مدل‌ها منظور نشده است. این مکانیسم‌ها می‌تواند مقدار سرعت جریان آب بـه زیـر عمـق ۳۰ سانتی‌متر بعد از عمل نفوذ را تغییر دهد. دلیل ممکن دیگر برای بی دقتی مدل‌ها، سـاده‌سـازی‌هـای مـرتبط بـا بعـضی داده‌هـای ورودی است، به طور مثال، مقادیر روزانه بارندگی با این فرض، توسط مدل SWAP استفاده می‌شود که باران به طور یک‌نواخت در تمام طول روز توزیع شده و یـا در مـدل LEACHC شـدت باران در تمام زمان وقوع بارندگی ثابت نیست، در حالی که عدد ثابتی که ممکن است دقت زیادی هم نداشته باشد در مدل وارد

[Downloaded from jcpp.iut.ac.ir on 2026-11-26]

[DOR: 20.1001.1.22518517.1385.10.2.5.7]

جدول ۴. شاخص‌های آماری برای مقایسه مقادیر اندازه‌گیری شده رطوبت و پیش‌بینی شده توسط دو مدل SWAP و LEACHC در چهار تیمار آزمایشی

تیمار	RMSE (%)		EF		CRM		R^2	
	SWAP	LEACHC	SWAP	LEACHC	SWAP	LEACHC	SWAP	LEACHC
D1L1	۶/۸۳۸	۱۴/۷۴۱	۰/۴۷۳	−۱/۴۴۹	−۰/۰۰۴	−۰/۱۱۱	۰/۵۴۸	۰/۲۸۷
D2L1	*	۱۶/۰۶۳	*	−۰/۳۳۱	*	−۰/۱۲۰	*	۰/۴۱۱
D1L2	۶/۹۳۴	۱۰/۶۸۵	۰/۶۱۱	۰/۰۷۵	۰/۰۲۳	۰–/۰۶۲	۰/۶۶۶	۰/۴۳۵
D2L2	۸/۳۶۲	۱۰/۶۰۲	۰/۵۵۰	۰/۲۷۷	۰/۰۰۳	−۰/۰۶۷	۰/۵۵۲	۰/۵۷۰

*: چون از اطلاعات مربوط به این تیماردر فرایند کالیبره کردن مدل SWAP استفاده شده در محاسبه شاخص‌های آماری منظور نشده است.

می‌شود. بنابراین تأثیر الگوی واقعی باران در نفوذ و توزیع رطوبت نمی‌تواند به درستی بیان شود.

هم‌چنین تغییر پذیری و غیر دقیق بودن داده‌های مزرعه‌ای، شاید در تفاوت‌های بین پیش‌بینی مدل‌ها و اندازه‌گیری‌ها نقش داشته باشد. به طور مثال روابط θ(h) و K(h) از نمونه‌های دست نخورده خاک که محدود به دو نقطه در سطح مزرعه می‌شده، ممکن است به درستی تغییر پذیری مکانی مشهود خاک‌های طبیعی را لحاظ نکرده باشد. برای بررسی بهتر نتایج، محاسبات شاخص‌های آماری برای هر تیمار و برای هر کدام از مدل‌ها به طور جداگانه در جدول ۴ ارائه شده است.

مقدار RMSE نشان می‌دهد که تا چه حد اختلاف بین تک‌تک مقادیر پیش‌بینی شده نسبت به مقدار اندازه‌گیری شده متناظر، صرف‌نظر از این که کمتر یا بیشتر باشد، وجود دارد. توجه به مقادیر محاسبه شده این شاخص نیز نشان می‌دهد که مدل SWAP پیش‌بینی‌های بهتری را انجام داده است، اگرچه مقادیر RMSE برای مدل LEACHC نیز در حد کاملاً قابل قبولی است.

مقدار EF مقادیر شبیه سازی شده را نسبت به مقدار میانگین مشاهدات مقایسه می‌کند. در صورتی که تمام پیش‌بینی‌ها برابر با مشاهدات باشد، مقدار EF برابر با یک می‌شود و در صورت اختلاف مقادیر پیش‌بینی شده و اندازه‌گیری شده، این اختلاف نسبت به اختلاف بین مشاهدات با مقدار میانگین مشاهدات سنجیده می‌شود و در صورت بزرگ‌تر بودن اختلاف بین پیش‌بینی‌ها و مشاهدات متناظر نسبت به اختلاف بین مشاهدات و میانگین مشاهدات مقدار EF به سمت بی نهایت میل می‌کند. همان طور که از مقادیر جدول ۴ مشهود است، مدل SWAP مقادیر EF نزدیک به عدد یک که بهترین حالت ممکن است را دارد و این نشان دهندهٔ پیش‌بینی قابل قبول رطوبت، توسط مدل SWAP است. مقادیر ضریب کارایی مدل LEACHC گرچه در تمام تیمارها کمتر از مدل SWAP است، ولی مقادیری نزدیک به صفر و یا یک دارد. به نظر می‌رسد که مدل LEACHC مقادیر رطوبت را در تیمارهای دور آبشویی ۶ روز بهتر از تیمارهای دور آبشویی ۳ روز پیش‌بینی کرده است. این موضوع می‌تواند به خاطر کاهش رطوبت نیم‌رخ خاک از رطوبت اشباع در تیمارهای ۶ روز نسبت به تیمارهای ۳ روز دور آبشویی باشد. زیرا در مکش‌های رطوبتی نزدیک به صفر، مقدار رطوبت بر اساس تابع کمپبل برابر مقدار رطوبت اشباع است که در تیمارهای دور آبشویی ۳ روز که نیم‌رخ خاک رطوبت‌های نزدیک اشباع دارد، می‌تواند عامل بروز خطا باشد.

[Downloaded from jcpp.iut.ac.ir on 2026-11-26]

[DOR: 20.1001.1.22518517.1385.10.2.5.7]

مقدار CRM نشان دهنده تمایل مدل برای برآورد بالاتر یا پایین‌تر در مقایسه با اندازه‌گیری‌هاست. مقادیر مثبت برای CRM نشان دهندهٔ برآورد کمتر مدل و مقادیر منفی CRM به معنی برآورد بیشتر مدل نسبت به اندازه‌گیری‌هاست. در مدل LEACHC همان طور که در شکل ۲ دیده می‌شود، مقادیر پیش‌بینی‌شده بالاتر از مقادیر اندازه‌گیری‌شده است. این تخمین بیشتر از مشاهدات مدل LEACHC در تیمارهای دور آبشویی ۶ روز تا حدودی تعدیل شده است. مدل SWAP رطوبت را در تیمار دور آبشویی ۳ روز بیشتر و در تیمارهای دور آبشویی ۶ روز کمتر پیش‌بینی کرده است.

براساس ضریب R^2 نیز مدل SWAP مقادیر اندازه‌گیری شده رطوبت را بهتر از مدل LEACHC تخمین زده است. براساس مقادیر R^2 مدل LEACHC به غیر از تیمار D_1L_1، مقادیر رطوبت را در حد نسبتاً قابل قبولی پیش‌بینی کرده است.

چنانچه ذکر شد، علاوه بر رطوبت، پیش‌بینی مدل‌های SWAP و LEACHC در ارتباط با شوری نیم‌رخ خاک در فرایند شوری زدایی نیز در این تحقیق مورد مطالعه و بررسی قرار گرفته است. معادله شوری زدایی خاک بر اساس اطلاعات شوری و عمق آب آبشویی در کلیه تیمارها با استفاده از نرم‌افزار Curve Expert به صورت معادله ۱ به دست آمد. هم‌چنین برای این که دقت منحنی شوری‌زدایی به دست آمده معلوم شود، شوری نیم‌رخ خاک در طول آزمایش با استفاده از این معادله و برای هر کدام از تیمارها به صورت جداگانه تعیین شد.

$$\sqrt{\frac{(EC_f - EC_{eq})}{(EC_i - EC_{eq})}} = \frac{۰/۱۰۴}{\left(D_w / D_s\right)} + ۰/۱۵۱ \qquad [۱]$$

در این معادله EC_i، EC_e و EC_{eq} به ترتیب هدایت الکتریکی عصاره اشباع اولیه، نهایی و تعادلی خاک و D_w و D_s به ترتیب عمق آب آبشویی و عمق خاک است. رسم مقادیر اندازه‌گیری شده شوری خاک در برابر مقادیر پیش‌بینی شده توسط دو مدل SWAP و LEACHC برای تیمار D1L1 در شکل ۳ نشان داده شده است.

با این که مدل LEACHC دقت مدل SWAP را در پیش‌بینی رطوبت خاک ندارد ولی به خاطر در بر داشتن مکانیسم‌های دقیق‌تر در شبیه‌سازی، فعل و انفعالات شیمیایی محلول خاک توانسته نتایج بهتری را در مقایسه با مدل SWAP که از یک مکانیسم ساده استفاده می‌کند، ارائه دهد. اختلاف مقادیر پیش‌بینی شده توسط معادله ۱ و مقادیر اندازه‌گیری شده نشان می‌دهد که فواصل انجام آبشویی‌ها در پروژه‌های اصلاح خاک تا چه حد می‌تواند تأثیرگذار باشد و اصولاً می‌بایست بهترین فاصله زمانی بین آبشویی‌ها نیز در کنار عمق بهینه آب مصرفی در کاهش شوری در آزمایش‌های اصلاح به روش آبشویی منقطع خاک، مد نظر قرار گیرد تا بازدهی بالایی برای مصرف آب در کاهش شوری به دست آید.

جدول ۵، نتایج حاصل از محاسبه تمام شاخص‌های آماری برای هر یک از تیمارها و به صورت مجزا برای دو مدل و نیز معادله ۱، را نشان می‌دهد. بر اساس هر چهار شاخص آماری مورد بحث، مدل LEACHC بهتر از مدل SWAP (به استثنای تیمارD1L1) توانسته مقادیر شوری اندازه‌گیری شده را پیش‌بینی نماید. مقایسه مقادیر پیش‌بینی شده، برتری مدل‌های LEACHC و SWAP را نسبت به معادله ۱ نشان می‌دهد. بر اساس شاخص‌های آماری محاسبه شده نیز ضعف معادله ۱ در مقایسه با دو مدل مورد بحث آشکار است.

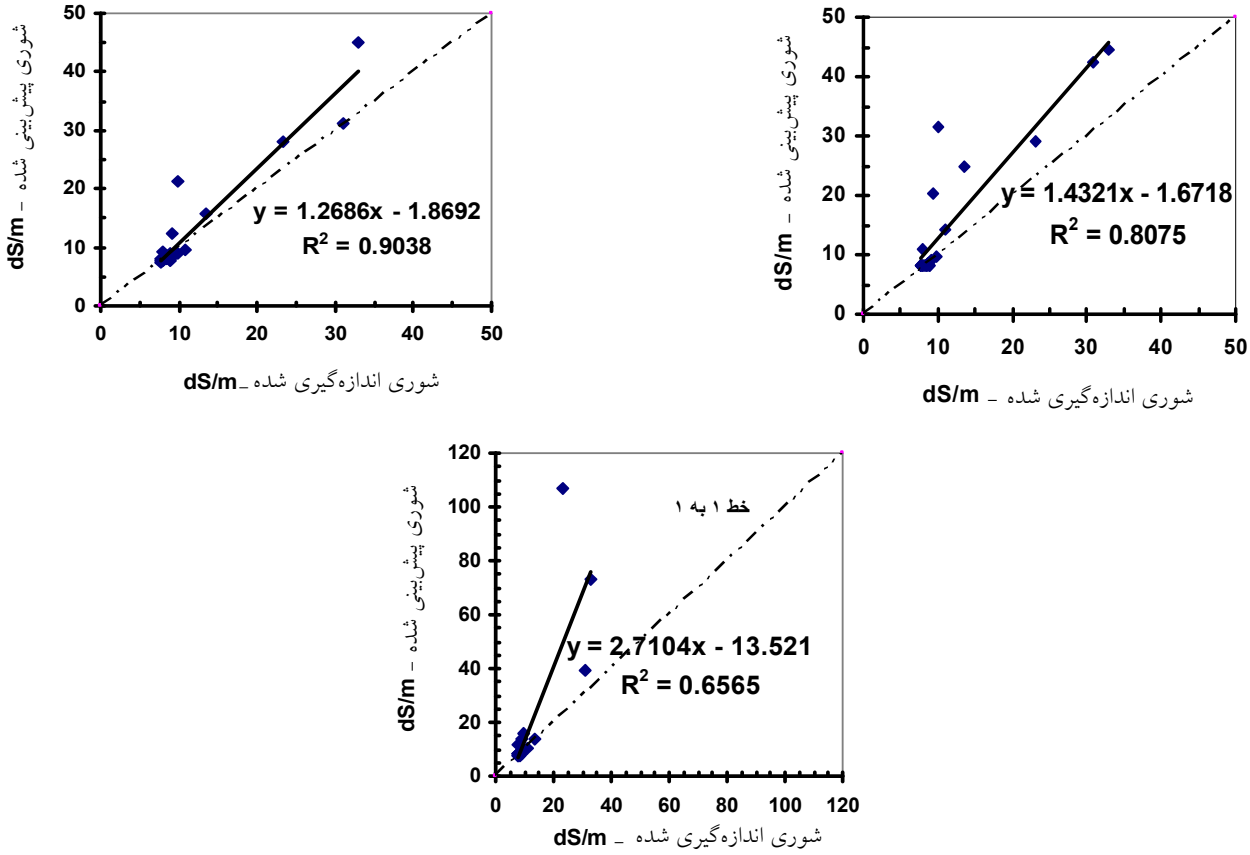
بررسی نتایج به دست آمده از اولین مرحله آبشویی نشان داد که مدل‌ها نتوانسته‌اند برآورد خوبی از میزان شوری خاک در مقایسه با مقادیر اندازه‌گیری شده داشته باشند، بنابراین با کند شدن شدت تغییرات املاح در مراحل بعدی، شبیه سازی به خوبی صورت گرفته است. اگر چه در این مقاله، تحلیل نتایج با ارائه نمودار فقط برای تیمار D1L1 صورت گرفته، ولی برای سایر تیمارها نیز نمودارها رسم شده و برای رعایت اختصار نتایج عددی آنها در جدول‌های ۴ و ۵ ارائه شده است.

نتیجه‌گیری

نتایج نشان می‌دهد که هر دو مدل در حد قابل قبولی توانسته

[Downloaded from jcpp.iut.ac.ir on 2026-11-26]

[DOR: 20.1001.1.22518517.1385.10.2.5.7]



شکل ۳. مقایسه مقادیر اندازه‌گیری شده شوری در برابر مقادیر پیش‌بینی شده با مدل SWAP (بالاچپ) LEACHC (بالا راست) و معادله ۱ (پایین) در تیمار D1L1

جدول ۵. شاخص‌های آماری برای مقایسه مقادیر اندازه‌گیری شده شوری و پیش‌بینی شده توسط مدل‌های SWAP و LEACHC و معادله ۱ در چهار تیمار آزمایشی

تیمار	RMSE			EF			CRM			R^2		
	SWAP	LEA-CHC	معادله ۱	SWAP	LEA-CHC	معادله ۱	SWAP	LEA-CHC	معادله ۱	SWAP	LEA-CHC	معادله ۱
D1L1	۳۱/۷۵	۵۷/۵۱	۱۶۶/۵۵	۰/۷۳	۰/۱۰	-۶/۵۲	-۰/۱۰	۰/۲۹	-۰/۵۳	۰/۹۰	۰/۸۱	۰/۶۶
D2L1	*	۲۳/۷۴	۸۱/۵۵	*	۰/۹۰	-۰/۲۱	*	۰/۰۰۴	۰-/۱۵	*	۰/۹۰	۰/۷۸
D1L2	۶۶/۶۳	۲۱/۲۳	۱۳۱/۴۷	۰/۵۶	۰/۹۵	-۰/۸۶	۰/۲۱	-۰/۰۵	-۰/۱۲	۰/۶۴	۰/۹۷	۰/۲۸
D2L2	۷۴/۷۷	۵۵/۷۷	۷۳/۸۵	۰/۵۹	۰/۷۵	۰/۵۷	۰/۲۳	۰/۰۷	۰/۱۲	۰/۶۶	۰/۸۶	۰/۵۸

*: چون از اطلاعات مربوط به این تیماردر فرایند کالیبره کردن مدل SWAP استفاده شده در محاسبه شاخص‌های آماری منظور نشده است.

[Downloaded from jcpp.iut.ac.ir on 2026-11-26]

[DOR: 20.1001.1.22518517.1385.10.2.5.7]

است رطوبت نیم‌رخ خاک را در زمان‌های مختلف به درستی پیش‌بینی کند. با این که اساس معادلات به کار رفته در هر دو مدل برای شبیه‌سازی حرکت آب در خاک یکسان است ولی روش‌های حل عددی به کار گرفته شده برای حل چنین معادلاتی در این دو مدل متفاوت است و در کل مدل SWAP توانسته پیش‌بینی‌های بهتری را انجام دهد. با وجود برتری نسبی مدل SWAP در شبیه‌سازی، حرکت و توزیع رطوبت در خاک نسبت به مدل LEACHC، مدل LEACHC به خاطر برتری‌هایی که در ارتباط با شبیه‌سازی فرایندهای شیمیایی در محیط خاک دارد، در پیش‌بینی شوری خاک نتایج بهتری در مقایسه با مدل SWAP ارائه کرده است. این برتری‌ها به طور خلاصه عبارت‌اند از: ۱) از هر سه مکانیسم شناخته شده انتقال املاح استفاده می‌کند ۲) حرکت و جابه‌جایی تک تک یون‌های موجود در محلول خاک را به جای کل املاح محلول TDS (که در مدل SWAP استفاده می‌شود) مورد بررسی قرار می‌دهد و ۳) تعادل شیمیایی محلول خاک را بر اساس غلظت‌های جدید یون‌های فاز محلول، فاز جامد و رسوب کرده با در نظر گرفتن تأثیر گچ یا آهک در محیط و با استفاده از یک زیر برنامه مجزا محاسبه می‌کند.

در کل نتایج نشان می‌دهد که علی‌رغم اختلاف بین پیش‌بینی مدل‌ها و مقادیر اندازه‌گیری شده شوری مخصوصاً در مراحل اولیه آبشویی (شوری بالای نیم‌رخ خاک)، مدل‌ها توانسته‌اند روند کاهش شوری خاک را به خوبی پیش‌بینی نمایند. مقایسه نتایج حاصل از کاربرد معادله منحنی شوری‌زدایی به دست آمده از اطلاعات تمام تیمارها در پیش‌بینی شوری خاک به صورت جداگانه در هر کدام از تیمارها با مقادیر اندازه‌گیری شده و پیش‌بینی شده شوری خاک توسط دو مدل SWAP و LEACHC نشان دهندهٔ ناکارآمد بودن استفاده از چنین معادله‌ای در تخمین مقدار شوری نیم‌رخ خاک است.

با اصلاح خاک و کاهش شوری و به دست آمدن شرایط ماندگار در ارتباط با مقدار شوری نیم‌رخ خاک، پیش‌بینی مدل‌ها همخوانی بیشتری با مقادیر اندازه‌گیری شده دارد و این می‌تواند از نظر کاربردهای کشاورزی مدل‌ها بسیار قابل توجه باشد.

منابع مورد استفاده

۱. ابطحی، ع. ۱۳۸۰. واکنش نهال دو رقم پسته نسبت به مقدار و نوع شوری خاک در شرایط گلخانه. علوم و فنون کشاورزی و منابع طبیعی ۵ (۲) :۹۳-۱۰۱.

۲. شعبانپور شهرستانی، م.، س.ف. موسوی، م. افیونی و س. سعادت. ۱۳۷۹. انتقال برماید در شرایط مزرعه. علوم خاک و آب ۱۴ (۱) :۹۲-۹۷.

۳. وزیری، ژ. ۱۳۷۴. ارزیابی مدل‌های شوری‌زدایی خاک با آزمون مزرعه‌ای. پایان نامه کارشناسی ارشد آبیاری و زه‌کشی، دانشگاه صنعتی اصفهان، ۱۴۳ صفحه.

4. Ali, R., L. Elliott, J. K. Ayrars and E. W. Stevens. 2000. Soil salinity modeling over shallow water tables. I: Validation of LEACHC. J. Irrig. and Drain Eng. 126(4):223-233.
5. Black, T. A., W. R. Gardner and G. W. Thurtell. 1969. The prediction of evaporation, drainage and soil water storage for a bare soil. Soil Sci. Soc. Am. J. 33:655-660.
6. Clemente, R. S., R. De Jong, N.N. Hayhoe, W.D. Reynolds and M. Hares. 1994. Testing and comparison of three unsaturated soil water flow models. Agric. Water Manag. 25:135-152.
7. Droogers, P., M. Akbari, M. Torabi and P. Droogers. 2000. Exploring field scale salinity using simulation modelig , example for Rudasht area , Esfahan Province, Iran. IAERI-IWMI Research Reports 2. 16pp.
8. Eloubaidy, A. F., S. M. Hussain and M. T. Al-Taie. 1993. Field evaluation of desalinization models. Agric. Water Manag. 24:1-13.
9. El-Sadek, A., J. Feyen and J. Berlamont. 2001. Comparison of models for computing drainage. J. Irrig. and Drain. ASCE 127(6): 363-369.

[Downloaded from jcpp.iut.ac.ir on 2026-11-26]

[DOR: 20.1001.1.22518517.1385.10.2.5.7]

10. Feddess, R. A., J. C. Van Dam and A. Hamdy. 1997. Modeling of water flow and solute transport for irrigation management and drainage design. Volume 1. Keynote papers, Water management, salinity and pollution control towards sustainable irrigation in the Meditranian Regions. CIHEAM International Conference, Valenzo, Bari, Italy, 22-26 September, PP: 145-179.
11. Hagi-Bishaw, M. and R. B. Bonnel. 2000. Assessment of LEACHM-C model for semi-arid saline irrigation. ICID J. 49(1):29-42.
12. Hutson, J. L. and R. J. Wagenet. 1992. LEACHM (Leaching Estimation and Chemistry Model): A process-based model of water and solute movement, transformations, plant uptake and chemical reactions in the unsaturated zone, Vers. 3.0. Department of Soil, Crop and Atmospheric Sciences. Cornell Univ., Ithaca, N.Y.
13. Metha, S. C., S. R. Poonia and R. Pal. 1985. Dependence of different exchange selectivity coefficients on sodium saturation of soils. J. Indian Soc. Soil Sci. 33:15-19.
14. Prathapar, S. A. and A. S.Qureshi. 1999. Mechanically reclaiming abandoned saline soils, A numerical evaluation, Research Report 30. Colombo, Sri Lanka, International Water Manag. Inst. 18pp.
15. Rastegari, J., R. Amidi, S. Saadat, A. Khorasani, F. Dehghani, M. A. Mousavi Shalmani, T. Mostatabi, A. R. Okhovatian and R. Vakil. 2000. Sustainable utilization of salt affected wastelands and saline ground water for plant production. IAEA Project (INT/5/144). 39PP.
16. Reynolds, W. D. and D. E. Elrick. 1985. In sito measurement of field-saturated hydraulic conductivity, sorptivity and the α parameter using the Guleph permeameter. Soil Sci. 140:292-302.
17. Reynolds, W. D. and D. E. Elrick. 1990. Ponded infiltration from a single ring: I. Analysis of steady flow. Soil. Sci. Soc. Am. J. 54:1233-1241.
18. Robbins, G. W., R. J. Wagenet and J. J. Jurinak. 1980. A combined salt transport-chemical equilibrium model for calcareous and gypsiferous soils. Soil Sci. Soc. Am. J. 44:1191-1194.
19. Smets, S. M. P., M. Kuper, J. C. Van Dam and R. A. Feddes. 1997. Salinization and crop transpiration of irrigated fields in Pakistan's Punjab. Agric. Water Manag. 35(1-2):43-60.
20. Szabolcs, I. 1989. Salt Affected Soils. CRC Press Inc., Boca Raton, Florida.
21. Tanji, K. K., L. D. Doneen., G. V. Ferry and R. S. Ayers. 1972. Computer simulation analysis on reclamation of salt-affected soils in San Joaquin Valley, California. Soil Sci. Soc. Am. Proc. 36:127-133.
22. Tanji, K. K. 1990. Agricultural Salinity Assessment and Management. ASCE, New York.
23. Thomas, G. W. 1982. Exchangeable Cations, Method of Soil Analysis. Part 2, Chemical and Microbial Properties. 2nd ed., Am. Soc. Agron., SSSA, Madison, WI., pp. 159-165.
24. Van Genuchten, M. Th. 1980. A closed form equation for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated soils. Soil Sci. Soc. Am. J. 44:892-898.
25. Van Genuchten, M. Th., J. Simunek, F. J. Leij and M. Sejna. 1998. RETC, Version 6.0; Code for quantifying the hydraulic functions of unsaturated soils. US Salinity Laboratory , USDA, ARS.

[Downloaded from jcpp.iut.ac.ir on 2026-11-26]

[DOR: 20.1001.1.22518517.1385.10.2.5.7]