



مدیریت آب و آبیاری

دوره ۳ ■ شماره ۱ ■ بهار و تابستان ۱۳۹۲

صفحه‌های ۱۳۴-۱۲۱

ارزیابی مدل‌های نظری آبخوئی املاح خاک (مطالعه موردی: اراضی لابار - دشت ساوه)

محمود مشعل*^۱، محمد دانشور^۲، سعید امامی^۲، مریم وراوی پور^۳

۱. استادیار گروه مهندسی آبیاری و زهکشی، پردیس ابوریحان، دانشگاه تهران، پاکدشت - ایران
۲. کارشناس ارشد گروه مهندسی آبیاری و زهکشی، پردیس ابوریحان، دانشگاه تهران، پاکدشت - ایران
۳. استادیار گروه مهندسی آبیاری و زهکشی، پردیس ابوریحان، دانشگاه تهران، پاکدشت - ایران

تاریخ پذیرش مقاله: ۱۳۹۲/۲/۲۱

تاریخ وصول مقاله: ۱۳۹۰/۱۲/۲

چکیده

شور شدن خاک فرایندی است که طی آن تأثیر تجمع املاح محلول در قشر سطحی خاک بر ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی خاک از جمله فشار اسمزی، نفوذپذیری و هدایت هیدرولیکی، سبب اختلال جدی در رشد و نمو بیشتر گیاهان یا توقف کامل رشد آنها می‌شود. در این پژوهش، چهار مدل نظری آبخوئی خاک شامل سری مخازن (SRM)، مدل نظری ستون پیوسته خاک (TPTM)، انتقال - انتشار (CDM) و روش حل عددی (NM) به منظور انتخاب و معرفی مناسب‌ترین مدل پیش‌بینی شوری نهایی خاک بررسی و نتایج با داده‌های واقعی به دست آمده از آزمایش‌های صحرایی مقایسه شد. به این منظور ابتدا ۱۵ کرت به مساحت یک متر مربع ساخته و آماده شد و سپس در سه ردیف و هر ردیف شامل پنج عمق، آبخوئی به مقدار ۲۰، ۴۰، ۶۰، ۸۰ و ۱۰۰ سانتی‌متر اعمال شد. نتایج نشان داد که به ازای عمق‌های مختلف آب، آبخوئی مدل‌های مورد بررسی عملکردهای متفاوتی دارد، اما به طور کلی مدل سری مخازن، شوری نهایی را با دقت بیشتری برآورد می‌کند.

کلیدواژه‌ها: خاک‌های شور - سدیمی، شوری‌زدایی، مدل انتقال - انتشار، مدل سری مخازن، مدل نظری ستون پیوسته خاک.

مقدمه

شور شدن خاک فرایندی است که طی آن تأثیر تجمع املاح محلول در قشر سطحی خاک بر ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی خاک از جمله فشار اسمزی، نفوذپذیری و هدایت هیدرولیکی، سبب اختلال جدی در رشد و نمو بیشتر گیاهان یا توقف کامل رشد آنها می‌شود (۱). عوامل مهم شور یا سدیمی شدن خاک‌ها متفاوت بوده و شامل تبخیر و تعرق، روش‌های نادرست آبیاری، نبود زهکش، کیفیت نامطلوب آب مورد استفاده در آبیاری، بالا بودن سطح ایستابی، مقدار بارش، جنس و بافت خاک است. در خاک‌های شور و سدیمی، وجود املاح محلول و سدیم تبدلی مشکلی اساسی محسوب می‌شود. بنابراین در نظر گرفتن مقادیر نفوذ عمقی افزون بر نیاز آبی گیاه که موجب خروج املاح و سدیم تبدلی^۱ می‌شود، سبب شده که اعمال مدیریت صحیح آبیاری تأثیر بسیار مهمی در اصلاح این خاک‌ها داشته باشد. از این رو مطالعات شوری‌زدایی به دلیل بررسی مقدار املاح محلول با اعمال مقادیر متفاوت آب آبخویی، لازمه پروژه‌های زهکشی و اصلاح خاک^۲ است (۵). یکی از گزینه‌های مهم برای اصلاح خاک‌های شور و سدیمی، تأمین آب کافی باکیفیت است. در نتیجه تعیین دقیق حجم آب مورد نیاز با توجه به مسئله کمبود آب، اهمیت فراوانی دارد. عمق آب لازم برای آبخویی نمک‌ها، به شدت شوری اولیه، بافت و عمق خاک، نوع گیاه انتخابی در الگوی کشت و روش آبخویی نمک‌های محلول بستگی دارد (۶، ۷). در روش‌های متداول با اعمال مقادیر مختلف آب و تهیه نمونه‌های متعدد آب و خاک و زه‌آب، تغییرات مقدار املاح بررسی می‌شود. اجرای این روش‌ها که عمومی‌ترین و مرسوم‌ترین شیوه‌های اصلاح خاک‌های

یادشده‌اند، مستلزم صرف وقت و هزینه زیاد و آزمایش‌های صحرائی است (۲). اهمیت این فرایند (آبخویی اصلاح) سبب شده که مدل‌های تجربی و نظری گوناگونی برای تعیین و پیش‌بینی این فرایند ارائه شود (۸ - ۱۱). مدل‌های تجربی، حاصل داده‌های مشاهده‌ای و اندازه‌گیری تجربی (آزمایشگاهی یا میدانی) هستند که بر نوعی رابطه ریاضی برآزش داده می‌شوند. بنابراین در اشتقاق آنها هیچ پیش‌فرض فیزیکی و ریاضی اعمال نشده است. برخلاف مدل‌های تجربی، در اشتقاق مدل‌های نظری، از پیش‌فرض‌های فیزیکی و ریاضی ساده تا پیچیده‌ای در اشتقاق مدل‌ها یا روابط نظری استفاده می‌شود و به همین دلیل دامنه کاربرد آنها گسترده‌تر از مدل‌های تجربی است. در روابط یا مدل‌های نظری، تغییرات مقدار عامل مورد نظر (شوری خاک) به ازای کاربرد مقادیر معین آب آبخویی با کیفیت مشخص، قابل محاسبه و پیش‌بینی است و به این ترتیب در یک مدل مناسب می‌توان عملیات مدیریتی مختلفی را در آبخویی نمک‌های محلول اعمال و نتایج را مقایسه کرد و آنها را برای تحقیقات بعدی یا بررسی فرایندهایی که در ساختار مدل گنجانده نشده‌اند، اعمال، اصلاح یا تعدیل کرد. با توجه به اهمیت تعیین دقیق حجم آب مورد نیاز آبخویی و نیز با در نظر گرفتن مسئله کمبود آب و اعمال مدیریت صحیح و بهره‌برداری و مصرف علمی معقول و مدبرانه از منابع آب و خاک، در این پژوهش چهار مدل نظری پیش‌بینی شوری نهایی خاک بررسی شد که عبارتند از مدل سری مخازن (SRM)، مدل نظری ستون پیوسته خاک (TPTM)، مدل انتقال - انتشار (CDM) و روش حل عددی (NM). نتایج با داده‌های واقعی به‌دست‌آمده از آزمایش‌های صحرائی به‌منظور تعیین بهترین مدل نظری مقایسه شد.

1. Exchangeable Sodium
2. Soil reclamation

مدیریت آب و آبیاری

مواد و روش‌ها

مدل‌های نظری آبخویی

تاکنون چند مدل نظری برای پیش‌بینی شوری نهایی خاک بعد از عمل آبخویی ارائه شده است که در این تحقیق چهار مدل، بررسی و ارزیابی شد.

اگر آبخویی به‌دقت بررسی شود، مشاهده می‌شود که اختلاط کامل محلول آب خاک و آب آبخویی در لایه‌های مختلف خاک امکان‌پذیر نیست، زیرا عوامل اختلاط در خاک از قبیل پخشیدگی، تغییر رژیم رطوبتی خاک در اثر آبیاری و تبخیر و تعرق یا تلاطم جریان فقط در محدوده کوچکی مؤثر است (۱). مقداری از آب مصرفی نیز پس از اختلاط با محلول خاک در هر لایه به‌سمت لایه پایین‌تر حرکت می‌کند و به تدریج از عمق آب نفوذیافته به لایه‌های پایین‌تر کاسته می‌شود. بنابراین عمق مؤثر اختلاط آب و محلول خاک محدود است (۱۱). فن‌درمولن به‌منظور وارد کردن دامنه این محدودیت در محاسبات و تعدیل نتایج، مدل سری مخازن (SRM¹) را ارائه کرد (۱۲). در این مدل، خاک منطقه توسعه ریشه به چند لایه تقسیم و هر لایه، یک مخزن در نظر گرفته می‌شود. در مخزن اول، محلول خاک و بخشی از آب آبخویی که وارد مخزن شده است، اختلاط می‌یابد و فرایند شست‌وشوی املاح صورت می‌پذیرد. زهاب خروجی از مخزن اول، آب آبخویی ورودی به مخزن دوم محسوب می‌شود. بنابراین هر مخزن، آب آبخویی خود را از مخزن بالایی دریافت می‌کند. این در شرایطی است که به تدریج از مقدار آب آبخویی کاسته می‌شود و برعکس، غلظت املاح محلول در آن افزایش می‌یابد. در این مدل همچنین فرض می‌شود که حرکت همزمان آب و املاح در هر مخزن از رطوبت حد ظرفیت مزرعه به بعد شروع می‌شود و حجم آب درون هر لایه،

طی فرایندهای انحلال و شست‌وشوی املاح ثابت می‌ماند (۳، ۴). در این مدل، غلظت جریان خروجی از لایه‌های مختلف از روش‌های زیر به دست می‌آید.

$$C_1 = C_i + (C_0 - C_i) \cdot e^{-f \frac{t}{T}} \quad [1]$$

$$C_2 = C_i + (C_0 - C_i) \cdot (1 + f \frac{t}{T}) \cdot e^{-f \frac{t}{T}} \quad [2]$$

$$C_n = C_i + (C_0 - C_i) \cdot e^{-f \frac{t}{T}} \cdot \sum_{k=0}^{k=n-1} \left(1 + \frac{f^n t^n}{n! \cdot T^n} \right) \quad [3]$$

در معادله‌های بالا فرض شده که غلظت اولیه املاح (C₀) در تمام لایه‌های خاک یکسان است. اگر غلظت اولیه املاح در لایه‌های متوالی خاک، متفاوت در نظر گرفته شود و هر لایه ضریب بازده آبخویی و نسبت $\frac{t}{T}$ معینی داشته باشد، باید از ضریب بازده آبخویی و نسبت $\frac{t}{T}$ همان لایه استفاده شود. به‌منظور تعیین ضریب بازده آبخویی، با در نظر گرفتن خاک به‌عنوان مخزن منفرد با مجرای فرعی از رابطه زیر استفاده می‌شود:

$$f = \frac{W_{fc}}{Qt} \cdot \ln \left(\frac{C_0 - C_i}{C_f - C_i} \right) \quad [4]$$

در این رابطه، f: غلظت نهایی املاح محلول خاک پس از آبخویی به دست آمده از آزمون صحرایی، Q_t: عمق آب آبخویی و W_{fc}: مقدار رطوبت خاک در حالت ظرفیت مزرعه است. در این مدل فرض بر این است که پس از ذخیره آب در اولین مخزن، آب به لایه بعدی نفوذ می‌کند. از این رو در مخزن اول پس از اینکه رطوبت خاک به حد اشباع رسید، به لایه بعدی نفوذ می‌کند. اختلاط آب آبخویی و محلول خاک در هر عمقی انجام می‌گیرد، اما دامنه اختلاط مؤثر محدود است. گلاوکف تئوری خود را در بیان دامنه اختلاط و اثر آب آبخویی و محلول خاک در عمق‌های مختلف ارائه و معادله زیر را پیشنهاد کرد (۱۳):

$$\left(\frac{\partial q}{\partial v} \right)_{D_s} + \left(\frac{\partial c}{\partial D_s} \right)_v - K \left(\frac{\partial^2 c}{\partial D_s^2} \right)_v = 0 \quad [5]$$

خارج می‌شوند (۱۴ و ۱۵). نیلسن و بیگر در تحقیقات خود برای معادلهٔ دیفرانسیل به دست آمده توسط لپیدیوس و آماندن که در آن تلفیق فرایندهای پخشیدگی - انتشار در پدیدهٔ جابه‌جایی املاح محلول خاک نشان داده شده است، راه حل پیشنهادی خود را ارائه کردند (۱۶). در خاک همگن، شکل یک‌بعدی معادلهٔ آب و املاح به صورت زیر است (۵):

$$\left(\frac{\partial C}{\partial t}\right) = -D \left(\frac{\partial^2 c}{\partial D_s^2}\right) - v \left(\frac{\partial c}{\partial D_s}\right) \quad [9]$$

در این رابطه، D ضریب پخشیدگی بر حسب متر مربع بر روز یا سانتی‌متر مربع بر ثانیه است و دیگر علائم معانی پیشین را دارند. شرایط مرزی اولیه عبارت است از:

$$\begin{aligned} C &= 0, & D_s &> 0, & t &= 0. \\ C &= 0, & D_s &= 0, & t &> 0. \\ C &= 0, & D_s &\rightarrow \infty, & t &> 0. \end{aligned}$$

حل معادلهٔ ۹ با توجه به شرایط مرزی عنوان شده و در حالتی که آب کاربردی حاوی املاح محلول به غلظت C_i باشد، به صورت زیر خواهد بود:

[۱۰]

$$\frac{C - C_i}{C_s - C_i} = \frac{1}{2} \left[\operatorname{erfc} \left(\frac{D_s - vt}{\sqrt{4Dt}} \right) + e^{\frac{vD_s}{D}} \operatorname{erfc} \left(\frac{D_s + vt}{\sqrt{4Dt}} \right) \right]$$

با جایگزینی‌های صورت گرفته در زیر، معادلهٔ ۱۰ که معرف مدل انتقال - انتشار هیدرودینامیکی (CDM)^۳ است به صورت زیر در می‌آید:

$$P = \frac{vt}{D_s}, \quad t = \frac{PD_s}{v} \quad [11]$$

$$\frac{C - C_i}{C_s - C_i} = \frac{1}{2} \left[\operatorname{erfc} \left(\frac{1 - P}{\sqrt{2DP/vD_s}} \right) + e^{\frac{vD_s}{D}} \operatorname{erfc} \left(\frac{1 + P}{\sqrt{2DP/vD_s}} \right) \right] \quad [12]$$

که در آن، q : مقدار یون‌های جذب شده توسط خاک در حالت تعادل با محلول به غلظت C ، D_s : عمق خاک از سطح زمین و K نصف طول مؤثر که در آن اختلاط انجام می‌پذیرد. فرایند شوری‌زدایی از نیم‌رخ خاک همگن توسط مدل نظری ستون پیوستهٔ خاک (TPTM)^۱ به صورت معادلهٔ زیر بیان می‌شود:

$$C - C_i = \frac{1}{2} (C - C_i) \left[\operatorname{erfc} \left(\frac{fP - 1}{\sqrt{fP}} \sqrt{N} \right) - e^{*N} \operatorname{erfc} \left(\frac{fP + 1}{\sqrt{fP}} \sqrt{N} \right) \right] \quad [6]$$

که در آن P و N با استفاده از معادله‌های ۷ و ۸ تعیین می‌شوند:

$$P = \frac{D_w}{\theta_{fc} \cdot D_s} \quad [7]$$

$$N = \frac{D_s}{2K} \quad [8]$$

erfc متمم تابع خطا^۲ است که با استفاده از جدول‌های مربوط تعیین می‌شود. بر خلاف مدل سری مخازن که در آن فرض شده که خاک از چند لایهٔ مجزا تشکیل شده است، در مدل ستون پیوسته، در حقیقت خاک از لایه‌های جداگانه تشکیل نشده، بلکه ستون پیوسته‌ای از خاک وجود دارد. در محیط متخلخل مانند خاک، اختلاط دو سیال ممکن است تحت تأثیر فرایند پخشیدگی املاح از سیالی به سیال دیگر واقع شود. در حالتی که سرعت عبور جریان از محیط متخلخل به اندازهٔ کافی زیاد باشد، عامل اصلی جابه‌جایی املاح، پدیدهٔ انتشار خواهد بود. از آنجاکه فرایند پخشیدگی در حفره‌های تشکیل شده توسط خلل و فرج رخ می‌دهد، محلول‌های درون خاک تحت تأثیر عمل پخشیدگی یا انتشار یا ترکیبی از این دو که جابه‌جایی اختلاط‌پذیر نامیده می‌شود، با هم مخلوط شده و از محیط

$$f_r \cdot (a - D_i) \cdot C_i + b_r \cdot C_r = [f_r(a - D_i) + b_r] \cdot C_r \quad [17]$$

به روش مشابه می‌توان معادله‌های بیلان املاح را در لایه‌های دیگر نیمرخ خاک حاصل کرد. در این صورت شکل کلی مدل حل عددی به صورت زیر خواهد بود:

$$C_n = \frac{f_n \cdot (a - \sum_{i=1}^{n-1} D_i) \cdot C_{n-1} + b_n \cdot C_n}{f_n(a - \sum_{i=1}^{n-1} D_i) + b_n} \quad [18]$$

در این رابطه‌ها، a مقدار عمق آب آبیویی، D_i میزان کمبود رطوبت خاک تا حد ظرفیت مزرعه در لایه i ام، b_i میزان رطوبت اولیه در لایه i ام، C_{0i} شوری اولیه در لایه i ام، C_i شوری نهایی پس از آبیویی هستند (اندیس‌ها نمایشگر شماره لایه‌ها هستند).

روش اجرای آزمایش‌ها

در این پژوهش از داده‌های حاصل از آزمایش‌های سری خاک لابار که توسط شرکت مهندسی مشاور راماب به مرحله اجرا در آمده است، استفاده شد. محل اجرای این آزمایش در محدوده اراضی لابار بوده که بر محدوده S_4A_4 (با محدودیت بسیار زیاد شوری و سدیمی بودن) نقشه شوری و قلیائیت خاک و اراضی منطقه مورد نظر منطبق است. این منطقه در استان مرکزی و در جنوب شرقی شهرستان ساوه بین $34^\circ 45'$ تا $35^\circ 10'$ عرض شمالی و $50^\circ 10'$ تا $50^\circ 50'$ طول شرقی واقع شده است. منطقه مورد بررسی از نظر آب‌وهوایی، جزء مناطق خشک و سرد، با تابستان‌هایی ملایم با متوسط مقدار بارندگی سالانه 191 میلی‌متر و متوسط درجه حرارت سالیانه $17/8$ درجه سانتی‌گراد است. بر اساس آمار موجود، جمع مقدار تبخیر سالانه از سطح تشتک تبخیر کلاس A در این منطقه $3262/3$ میلی‌متر در سال برآورد شده که بیشترین مقدار آن مربوط به مردادماه و به مقدار $552/2$ میلی‌متر در ماه است.

با توجه به اینکه فضای حرکت آب در خاک کمتر از حجم کل (ظاهری) خاک است، سرعت واقعی آب در خاک بیشتر از سرعت دارسی است (۱). در معادله‌های بالا v سرعت منفذی^۱ است که به صورت زیر حاصل می‌شود:

$$v = \frac{v_d}{\phi} \quad [13]$$

$$v_d = k \frac{\Delta H}{\Delta L} \quad [14]$$

در این رابطه، V_d : سرعت ظاهری آب در خاک یا سرعت دارسی بر حسب سانتی‌متر در ساعت، k - ضریب آبگذری بر حسب سانتی‌متر در ساعت، $\frac{\Delta H}{\Delta L}$ - شیب هیدرولیکی و ϕ : تخلخل خاک است.

از دیگر روش‌های برآورد شوری نهایی خاک، روش حل عددی است. در این روش، نیمرخ خاک ترکیبی از چند لایه جداگانه و متوالی فرض شده و آب آبیویی پس از اختلاط با محلول خاک در هر لایه، وارد لایه زیرین خود می‌شود. مقدار آبیویی املاح در هر لایه به غلظت اولیه املاح، مقدار کمبود رطوبت خاک نسبت به رطوبت ظرفیت مزرعه و ضریب بازده آبیویی بستگی دارد (۱۰). اگر آب آبیویی به مقدار a و غلظت C_i وارد لایه اول خاک با غلظت اولیه C_{01} و مقدار رطوبت b_1 شود، پس از اختلاط با محلول خاک، شوری این لایه را به C_1 خواهد رساند:

$$f_1 \cdot a \cdot C_i + b_1 \cdot C_{01} = (f_1 a + b_1) \cdot C_1 \quad [15]$$

یا:

$$C_1 = \frac{f_1 \cdot a \cdot C_i + b_1 \cdot C_{01}}{f_1 a + b_1} \quad [16]$$

به روش مشابه در غلظت املاح در لایه دوم و یا به عبارتی غلظت املاح در آب خروجی از لایه دوم و واردشده به لایه سوم به صورت زیر محاسبه می‌شود:

1. Pore Water Velocity

برخی ویژگی‌های فیزیکی لایه‌های مختلف نیمرخ خاک قبل از آیشویی در جدول ۱ ارائه شده است. بافت خاک تا عمق ۱۵۰ سانتی‌متر از نوع لوم رسی سیلتی که معرف خاک به نسبت سنگین است، تشکیل شده است. عمق سطح ایستابی نسبت به سطح خاک ۱/۵ متر و ضریب آبگذری آن ۷/۲ متر در روز گزارش شده است. لایه نفوذناپذیر در عمق ۲/۲ متر از سطح خاک قرار دارد. بررسی ارقام جدول ۱ نشان می‌دهد که رطوبت خاک در حد ظرفیت مزرعه بین ۳۵/۲ و ۲۹/۲ درصد است و در حد نقطه پژمردگی بین ۲۳/۷ و ۱۹/۰ درصد نوسان دارد. نفوذپذیری خاک هم از "خیلی آهسته" تا "آهسته" متغیر است.

اراضی این منطقه با مشکل شوری و قلیابیت کم تا متوسط مواجه است و در بخش بزرگی از اراضی، مسائل شوری و قلیابیت در حالت‌های زیاد تا بسیار زیاد وجود دارد. آب مصرف‌شده در این رشته آزمایش‌ها از چاه آرتزینی با نام ده‌آقا تأمین می‌شود که در آن هدایت الکتریکی برابر با ۱/۳ دسی‌زیمنس بر متر و مقدار اسیدیته ۸/۲ است و کاتیون‌های غالب آب کاربردی را به ترتیب سدیم و (کلسیم + منیزیم) تشکیل می‌دهند که مقادیر آنها به ترتیب برابر با ۹/۵ و ۴/۶ میلی‌اکی‌والان در لیتر است. نسبت جذب سدیم ۶/۳ است و در طبقه‌بندی آمریکایی در کلاس C_3-S_2 قرار می‌گیرد. همچنین آنیون‌های کلر، سولفات، کربنات و بی‌کربنات آب کاربردی به ترتیب برابر با ۵/۲، ۶/۲، ناچیز و ۳/۲ میلی‌اکی‌والان در لیتر و بنابراین آنیون‌های غالب به ترتیب سولفات، کلر و بی‌کربنات هستند.

جدول ۱. مشخصات فیزیکی خاک‌های منطقه مورد بررسی قبل از آیشویی

ردیف	مشخصات نمونه		عمق نمونه برداری	درصد رطوبت خاک			نفوذپذیری (mm/h)	وزن مخصوص (g/cm ³)	تخلخل کل (درصد)				
	بافت خاک	نام توصیفی		رطوبت	ظرفیت مزرعه	نقطه پژمردگی							
۱	نسبتاً سنگین	Si.C.L	۰-۲۰	۱۴/۷	۱۹/۰	۳۵/۲	۴۵/۴	۲۳/۷	۳۰/۶	۰/۵۰	خیلی آهسته	۱/۲۹	۵۱/۳
۲	نسبتاً سنگین	Si.C.L	۲۰-۴۰	۱۹/۴	۲۴/۴	۳۲/۷	۴۱/۲	۲۳/۴	۲۹/۵	۰/۳۸	خیلی آهسته	۱/۲۶	۵۲/۴
۳	نسبتاً سنگین	Si.C.L	۴۰-۶۰	۲۴/۱	۳۰/۴	۳۲/۷	۴۱/۲	۲۳/۴	۲۹/۵	۰/۳۸	خیلی آهسته	۱/۲۶	۵۲/۴
۴	نسبتاً سنگین	Si.C.L	۶۰-۸۰	۱۷/۱	۲۱/۵	۳۲/۷	۴۱/۲	۲۳/۴	۲۹/۵	۰/۳۸	خیلی آهسته	۱/۲۶	۵۲/۴
۵	نسبتاً سنگین	Si.C.L	۸۰-۱۰۰	۲۳/۴	۳۰/۷	۳۰/۹	۴۰/۵	۲۱/۲	۲۷/۸	۱/۶۳	آهسته	۱/۳۱	۵۰/۶
۶	نسبتاً سنگین	Si.C.L	۱۰۰-۱۵۰	۳۳/۲	۴۵/۶	۲۹/۲	۴۰/۰	۱۹/۰	۲۶/۰	۲/۸۸	آهسته	۱/۳۷	۴۸/۳

ارزیابی مدل‌های نظری آبشویی املاح خاک (مطالعه موردی: اراضی لا بار - دشت ساوه)

جدول ۲. نتایج تجزیه شیمیایی نمونه خاک در اعماق مختلف، با کاربرد پنج عمق آب آبشویی

نسبت جذب سدیم <i>SAR</i>	سدیم تبادلی <i>Ex.Na</i> <i>meq/100gr</i>	اسیدیته	ظرفیت تبادل کاتیونی <i>C.E.C</i> <i>meq/100gr</i>	<i>EC</i> <i>(dS/m)</i>	عمق نمونه برداری (سانتی متر)	عمق آب کاربردی (سانتی متر)
۲۵/۶	۱۰/۰	۸/۵	۱۳/۱	۷۵/۰	۰-۲۰	
۴۵/۹	۱۴/۸	۸/۲	۱۷/۲	۱۸/۵	۲۰-۴۰	
۴۹/۰	۱۷/۱	۸/۲	۱۸/۴	۱۴/۵	۴۰-۶۰	
۴۲/۷	۱۷/۳	۸/۴	۹/۸	۹/۰	۶۰-۸۰	
۳۹/۵	۱۴/۲	۸/۴	۱۷/۲	۶/۹	۸۰-۱۰۰	
۲۶/۴	۱۳/۱	۸/۳	۲۱/۱	۵/۸	۱۰۰-۱۵۰	
۱۸/۳	۶/۵	۸/۳	۱۹/۵	۷/۵	۰-۲۰	
۲۴/۵	۹/۲	۸/۶	۲۳/۷	۸/۹	۲۰-۴۰	
۲۳/۴	۱۰/۷	۸/۴	۲۱/۱	۸/۳	۴۰-۶۰	۲۰
۲۰/۷	۷/۷	۸/۳	۱۹/۵	۷/۵	۶۰-۸۰	
۱۴/۸	۶/۴	۸/۱	۱۵/۸	۶/۷	۸۰-۱۰۰	
-	-	-	-	-	۱۰۰-۱۵۰	
۱۸/۳	۶/۰	۸/۳	۱۹/۸	۷/۳	۰-۲۰	
۳۸/۳	۹/۶	۸/۸	۲۱/۸	۱۱/۲	۲۰-۴۰	
۵۰/۶	۱۸/۷	۸/۸	۱۹/۸	۲۱/۰	۴۰-۶۰	
۶۰/۹	۱۸/۵	۸/۷	۱۹/۵	۲۴/۰	۶۰-۸۰	۴۰
۵۷/۲	۱۶/۸	۸/۷	۱۹/۸	۲۳/۰	۸۰-۱۰۰	
-	-	-	-	-	۱۰۰-۱۵۰	
۲۱/۰	۷/۱	۸/۵	۱۹/۲	۹/۸	۰-۲۰	
۱۵/۶	۵/۸	۸/۳	۱۹/۸	۷/۳	۲۰-۴۰	
۱۹/۲	۸/۱	۸/۳	۱۹/۸	۶/۹	۴۰-۶۰	
۳۰/۴	۸/۴	۸/۴	۱۸/۹	۱۰/۲	۶۰-۸۰	۶۰
۳۴/۱	۱۱/۴	۸/۳	۱۷/۴	۱۲/۴	۸۰-۱۰۰	
-	-	-	-	-	۱۰۰-۱۵۰	
۱۲/۶	۵/۲	۸/۲	۱۷/۸	۶/۸	۰-۲۰	
۲۳/۹	۷/۶	۸/۴	۱۹/۸	۹/۶	۲۰-۴۰	
۳۵/۰	۵/۵	۸/۵	۲۱/۱	۱۲/۴	۴۰-۶۰	
۵۱/۱	۱۶/۵	۸/۶	۱۹/۵	۱۶/۵	۶۰-۸۰	۸۰
۶۱/۵	۱۶/۵	۸/۵	۲۰/۵	۲۱/۰	۸۰-۱۰۰	
-	-	-	-	-	۱۰۰-۱۵۰	
۹/۸	۴/۵	۸/۲	۱۷/۲	۴/۵	۰-۲۰	
۸/۶	۴/۰	۸/۱	۱۷/۸	۴/۴	۲۰-۴۰	
۲۳/۸	۹/۶	۸/۳	۱۸/۴	۸/۳	۴۰-۶۰	
۲۳/۱	۱۲/۵	۸/۳	۱۹/۸	۷/۶	۶۰-۸۰	۱۰۰
۳۵/۵	۱۴/۰	۸/۵	۱۸/۴	۱۰/۶	۸۰-۱۰۰	
-	-	۸/۲	-	-	۱۰۰-۱۵۰	

مدیریت آب و آبیاری

دوره ۳ ■ شماره ۱ ■ بهار و تابستان ۱۳۹۲

شاخص مجموع مربعات خطا (SSE) مدل‌ها ارزیابی شد.

$$SSE = \sum_{i=1}^n (EC_o - EC_e)^2 \quad [19]$$

در این رابطه EC_o هدایت هیدرولیکی عصاره اشباع مشاهده شده خاک بعد از کاربرد عمق آب، (EC_e) : هدایت هیدرولیکی عصاره اشباع خاک برآورده شده توسط مدل و n تعداد عمق‌های نمونه برداری خاک است.

منحنی حقیقی شوری

منحنی شوری، رابطه کاهش شوری را به ازای مصرف مقادیر مختلف آب آبخویی نشان می‌دهد. با استفاده از این منحنی می‌توان عمق آب مورد نیاز آبخویی عمقی را در شرایط مشابه تعیین کرد. شکل کلی این منحنی‌ها به صورت نزولی است و حالت نمایی دارد که بیانگر کاهش مقدار آبخویی در مقابل افزایش آب کاربردی است. این منحنی‌ها در انتها به صورت مجانب و موازی محور افقی در می‌آید که تعادل املاح محلول خاک و آب آبیاری را نشان می‌دهند.

شکل کلی معادله منحنی آبخویی (شوری زدایی) به صورت رابطه ۲۰ است.

$$\left(\frac{EC_f - EC_{eq}}{EC_i - EC_{eq}} \right) = f \left(\frac{D_{lw}}{D_s} \right) \quad [20]$$

در این رابطه، EC_f : هدایت هیدرولیکی عصاره اشباع خاک بعد از کاربرد عمق آب آبخویی (خالص) بر حسب ds/m ؛ EC_i : هدایت هیدرولیکی عصاره اشباع خاک قبل از کاربرد عمق آب آبخویی (خالص) بر حسب ds/m و EC_{eq} : هدایت هیدرولیکی عصاره اشباع خاک که به حال تعادل شیمیایی با آب آبیاری یا آبخویی درمی‌آید، بر حسب ds/m هستند.

برای لحاظ کردن اثر املاح آب آبیاری، تبخیر از سطح خاک در ضمن عملیات آبخویی، شرایط زهکشی داخل خاک‌ها، کیفیت آب کاربردی و دیگر شرایط اثرگذار، از

در آزمایش‌های صورت گرفته ابتدا قطعه زمینی به ابعاد 10×10 متر میخ‌کوبی شد و از محل با استفاده از مته در اعماق ۲۰، ۴۰، ۶۰، ۸۰، ۱۰۰، ۱۵۰ و ۱۰۰ سانتی‌متری نمونه برداری صورت گرفت. این نمونه‌ها به‌عنوان شاهد در نظر گرفته شد. در اجرای آزمون‌های مورد نیاز ۱۵ کرت به مساحت یک متر مربع در سه ردیف و هر ردیف مشتمل بر پنج تیمار ساخته و آماده شد. تیمارهای آبخویی پنج عمق آب به اندازه ۲۰، ۴۰، ۶۰، ۸۰ و ۱۰۰ سانتی‌متر است. روش آبخویی اعمال شده "آبخویی متناوب" بود، به این صورت که ابتدا ۲۰ سانتی‌متر آب آبخویی به همه کرت‌ها اضافه شد و پس از گذشت ۲۴ ساعت از نفوذ آب در داخل خاک، فقط از کرت اول در سه تکرار برای اعماق خاک ذکر شده نمونه برداری صورت گرفت. در تناوب بعد کرت‌های نمونه برداری شده از دور آزمایش حذف شده و ۲۰ سانتی‌متر دیگر آب به کرت‌های باقی‌مانده اضافه شد و پس از نفوذ دومین تناوب آب کاربردی دوباره از کرت‌های شماره دو در سه تکرار برای اعماق خاک ذکر شده نمونه برداری صورت گرفت و به همین ترتیب افزودن نوبت بعدی آب آبخویی به سطح کرت‌های ۳، ۴ و ۵ به صورتی که بیان شد، استمرار یافت. سپس نمونه‌های خاکی که در سه بار (مربوط به هر عمق) برای هر نوبت آب آبخویی برداشت شد، پس از خشک شدن در هوای آزاد و عبور از الک دو میلی‌متری با هم مخلوط شده و یک نمونه مرکب از سه نمونه برای تجزیه‌های شیمیایی شامل هدایت الکتریکی، مقدار سدیم، کلسیم و منیزیم، کلر و کربنات به آزمایشگاه ارسال شد. نتایج تجزیه‌های شیمیایی نمونه خاک در اعماق مختلف، با کاربرد پنج عمق آب آبخویی در جدول ۲ نشان داده شده‌اند.

پس از محاسبه شوری نهایی با بررسی عملکرد مدل‌ها به ازای عمق‌های مختلف آبخویی و همچنین با استفاده از

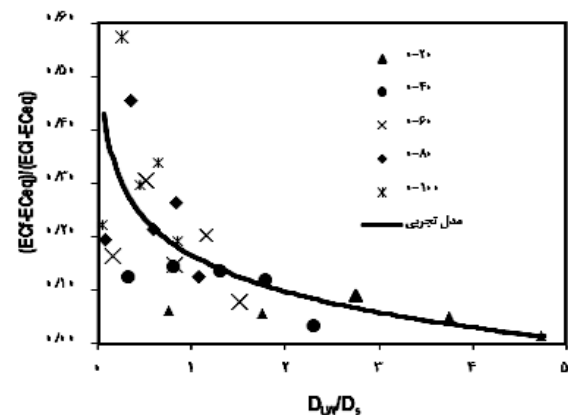
خاک و حل عددی است. ابتدا ضریب بازده آبشویی (f) برای مخازن منفرد ۲۰-، ۴۰-، ۶۰-، ۸۰- و ۱۰۰- سانتی متری خاک با استفاده از رابطه ۳ محاسبه و سپس برای لایه‌های ۲۰-، ۴۰-، ۶۰-، ۸۰- و ۱۰۰- سانتی متر تفکیک شد. جدول ۳، ضریب بازده آبشویی را در اعماق مختلف خاک به ازای کاربرد مقادیر آب آبشویی در آزمایش‌های منطقه مورد بررسی نشان می‌دهد. ضریب بازده آبشویی با غلظت اولیه املاح در خاک و مقدار رطوبت خاک رابطه مستقیم و با شوری آب آبشویی مقدار آب نسبت عکس دارد. بررسی ضریب بازده آبشویی در این منطقه نشان می‌دهد که کاربرد آب بیش از ۶۰ سانتی متر تأثیر معناداری

بر ضریب بازده آبشویی نداشته است. با مصرف عمق آب آبشویی کمتر از ۶۰ سانتی متر، تجمع املاح شسته شده از بخش فوقانی خاک، در لایه ۱۰۰-۵۰ سانتی متر مشاهده می‌شود. کاهش ضریب بازده آبشویی با افزایش آب کاربردی را می‌توان ناشی از خروج سریع بخش زیادی از املاح در مراحل اولیه دانست. افزایش بازده آبشویی را با افزایش عمق برای مقدار ثابت آب آبشویی، می‌توان ناشی از کاهش آب ورودی به لایه‌های زیرین خاک دانست. البته این نسبت همواره وجود نداشته است، زیرا با افزایش عمق خاک، پارامترهای دیگری چون جنس خاک، ساختمان خاک، نوع املاح موجود و مقدار رطوبت اولیه بر بازده آبشویی تأثیرگذارند. در جدول ۳ مشاهده می‌کنیم که ضریب بازده آبشویی املاح در عمق ۱/۰-۰ متری خاک منطقه ساوه ۶۰-۰/۲۳ است که با مقادیر پیشنهادی FAO برای خاک با بافت سنگین و نسبتاً سنگین که ۰/۳ تا ۰/۶ است، هماهنگی دارد (۲، ۳).

صورت و مخرج کسر مقدار ثابت ECEq کسر می‌شود. به این ترتیب روابط حاصل از موارد مطرح شده بالا، مستقل شده و منحصراً به ویژگی‌های خاک مورد آزمون بستگی خواهد داشت (۱). در واقع ECEq کمترین مقادیر شوری تبدلی خاک است که در لایه سطحی (۵-۰ سانتی متری نیمرخ خاک) پس از پایان عملیات آبشویی با کیفیت مشخصی از آب کاربردی حاصل می‌شوند. منحنی آبشویی یا شوری خاک در دشت ساوه در شکل ۱ ارائه شده است. با در نظر گرفتن شکل ریاضی این منحنی، مدل تجربی شوری زدایی به صورت رابطه ۲۱ به دست آمد.

$$Y = 0.1552 - 0.0948 \ln(X) \quad [21]$$

که ضریب همبستگی ارقام در سطح ۱ درصد معنادار بوده است ($r=0.80$).



شکل ۱. منحنی شوری زدایی خاک در اراضی دشت ساوه

بحث و نتایج

تعیین ضریب بازده آبشویی حقیقی

ضریب بازده آبشویی، f، از جمله اطلاعات ضروری در به کارگیری مدل‌های آبشویی سری مخازن، ستون پیوسته

جدول ۳. ضرایب بازده آبشویی (f) لایه‌های خاک در منطقه مورد بررسی

عمق خاک (سانتی‌متر)	عمق آب آبشویی (سانتی‌متر)					میانگین
	۲۰	۴۰	۶۰	۸۰	۱۰۰	
۰-۲۰	۰/۷۶	۰/۳۹	۰/۲۱	۰/۲۰	۰/۲۰	۰/۳۵
۲۰-۴۰	۰/۷۸	۰/۴۹	۰/۴۳	۰/۴۰	۰/۳۸	۰/۵۰
۴۰-۶۰	۰/۷۵	۰/۳۱	۰/۳۰	۰/۲۷	۰/۲۷	۰/۳۸
۶۰-۸۰	۰/۴۲	۰/۲۸	۰/۲۶	۰/۲۳	۰/۲۲	۰/۲۸
۸۰-۱۰۰	۰/۳۱	۰/۲۵	۰/۱۴	۰/۱۱	۰/۱۰	۰/۱۸
میانگین	۰/۶۰	۰/۳۴	۰/۲۷	۰/۲۴	۰/۲۳	۰/۳۴

مقایسه عملکرد مدل‌های آبشویی

همان‌طور که گفته شد، به منظور بررسی عملکرد هر یک از مدل‌ها، به ازای عمق‌های آب کاربردی از شاخص مجموع مربعات خطا استفاده شد که نتایج در جدول ۴ ارائه شده‌اند. با توجه به این جدول در مدل شوری‌زدایی سری مخازن (SRM)، در اکثر حالت‌ها، شوری نهایی محاسبه شده بیشتر از شوری واقعی است و برای مصرف ۸۰ سانتی‌متر آب آبشویی، مقدار شوری پیش‌بینی شده خاک تا عمق یک متری به مقادیر اندازه‌گیری شده نزدیک است و کمترین مقدار مجموع مربعات خطا مشاهده می‌شود. نتایج آزمایش‌های آبشویی و نیز مقادیر شوری پیش‌بینی شده توسط مدل ستون پیوسته خاک (TPTM) نشان می‌دهد که اختلاف بین مقادیر مشاهده‌ای و محاسبه شده از طریق این مدل به خصوص به ازای ۴۰ سانتی‌متری آب آبشویی زیاد است. مجموع مربعات خطا در همه لایه‌ها به جز لایه‌های اول و دوم، زیاد است. دقت این مدل در لایه‌های سطحی (با عمق کمتر از ۴۰ سانتی‌متر) بسیار خوب ارزیابی می‌شود. بررسی مدل شوری‌زدایی انتقال-انتشار (CDM) نشان می‌دهد که تفاوت شوری محاسبه شده و اندازه‌گیری شده تا عمق ۴۰ سانتی‌متری خاک کمتر از اعماق پایین خاک است.

نتایج مجموع مربعات خطا در جدول ۴ نشان می‌دهد

که اختلاف بین مقادیر محاسبه شده و اندازه‌گیری شده در عمق آبشویی ۲۰ سانتی‌متر بیشترین است و به ازای کاربرد ۶۰ سانتی‌متر آب، کمترین انحرافات وجود دارد. کاربرد این مدل، مقادیر آب آبشویی لازم برای کاهش مقدار معینی از شوری را اندکی بیشتر از مقدار واقعی آن پیش‌بینی می‌کند. همچنین به منظور آنالیز چشمی عملکرد هر یک از مدل‌های مورد بررسی در عمق‌های مختلف آب آبشویی، نمودار مقدار برآورد هر یک از مدل‌ها در عمق‌های مختلف خاک در شکل ۲ ارائه شد. برای تفسیر نتایج باید وضعیت مدل شوری‌زدایی انتقال-انتشار CDM بررسی شود.

مدل پیشنهادی نیلسن و بیگر بر اساس حرکت یک‌بعدی و هم‌جهت آب و املاح در بافت متخلخل همگن و اشباع با ثابت فرض کردن ضریب پخشیدگی و سرعت حرکت آب پدیده جابه‌جایی املاح را نشان می‌دهد. با توجه به ناهمگنی خاک محل آزمون و اشباع نشدن همه لایه‌های خاک به دلیل وجود درز و ترک و معابر فرعی آب می‌توان نتیجه گرفت که مقدار شوری پیش‌بینی شده خاک پس از آبشویی با مقادیر شوری اندازه‌گیری شده اختلاف دارد. مدل انتقال-انتشار در حالتی که لایه‌های مختلف خاک برای مدت طولانی تری تحت شرایط غرقاب و اشباع باشند، نتایج بهتری داشته است.

مدیریت آب و آبیاری

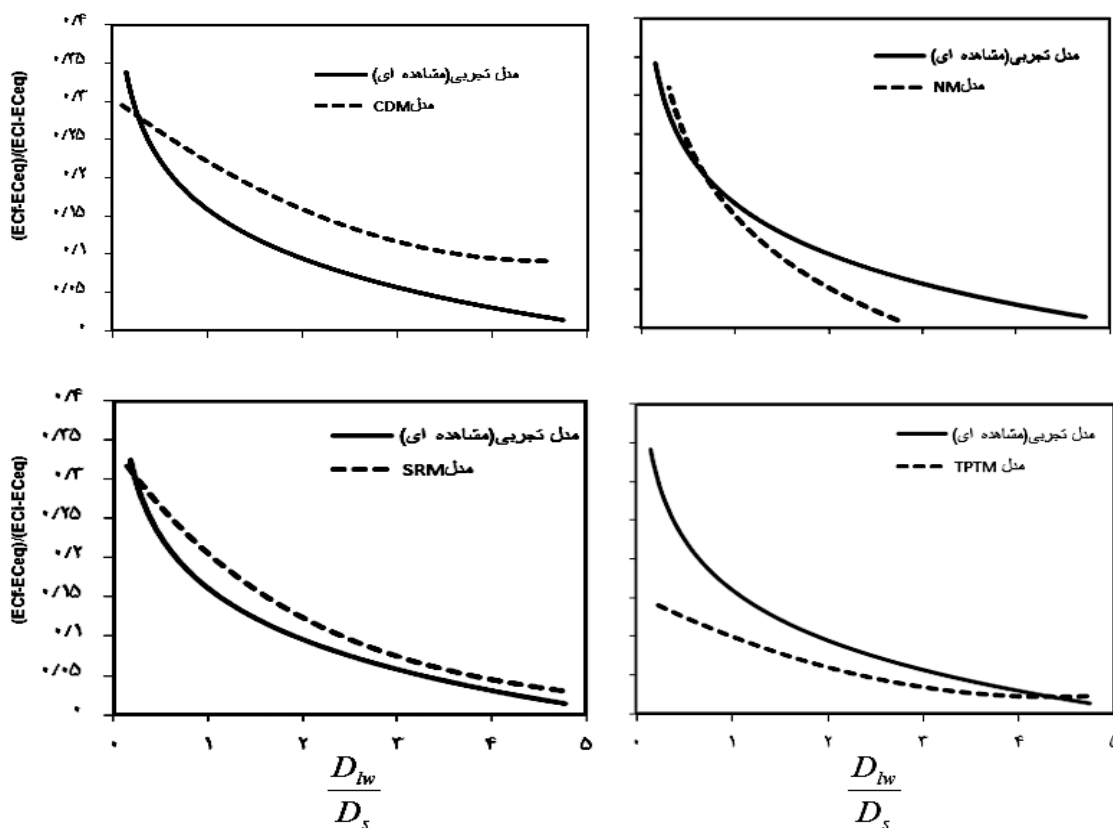
ارزیابی مدل‌های نظری آبشویی املاح خاک (مطالعه موردی: اراضی لابار - دشت ساوه)

جدول ۴. شوری محاسبه شده به ازای مقادیر متفاوت آب آبشویی

مدل	عمق خاک	مقدار آب کاربردی سانتی‌متر									
		۰	۲۰	۴۰	۶۰	۸۰	۱۰۰	۰	۲۰	۴۰	۶۰
		EC _C	EC _O	EC _C	EC _O	EC _C	EC _O	EC _C	EC _O	EC _C	EC _O
TPTM	۰-۲۰	۷۵/۰	۷/۵	۶/۶	۷/۳	۶/۴	۹/۸	۸/۱	۶/۸	۶/۲	۴/۵
	-۴۰	۱۸/۵	۸/۹	۶/۹	۱۱/۲	۶/۶	۷/۳	۸/۱	۹/۶	۶/۲	۴/۴
	-۶۰	۱۴/۵	۸/۳	۶/۹	۲۰/۱	۶/۷	۶/۹	۸/۰	۱۲/۴	۶/۳	۸/۳
	-۸۰	۹/۰	۷/۵	۶/۰	۲۰/۴	۶/۲	۲۰/۲	۷/۸	۱۰/۵	۶/۲	۷/۶
	-۱۰۰	۶/۹	۶/۷	۴/۴	۱۸/۰	۵/۶	۱۲/۴	۶/۲	۱۲/۰	۵/۲	۱۰/۶
	SSE	۱۴/۳۱	۵۵۶/۹۳	۴۸/۹۴	۱۱۳/۸۶	۵۸/۶۶					
CDM	۰-۲۰	۷۵/۰	۷/۵	۱/۸	۷/۳	۷/۶	۹/۸	۹/۱	۶/۸	۹/۶	۴/۵
	-۴۰	۱۸/۵	۸/۹	۲/۲	۱۱/۲	۸/۶	۷/۳	۱۰/۱	۹/۶	۱۰/۶	۴/۴
	-۶۰	۱۴/۵	۸/۳	۲/۵	۲۰/۱	۹/۲	۶/۹	۱۰/۶	۱۲/۴	۱۱/۱	۸/۳
	-۸۰	۹/۰	۷/۵	۲/۶	۲۰/۴	۹/۱	۱۰/۲	۱۰/۴	۱۰/۵	۱۰/۸	۷/۶
	-۱۰۰	۶/۹	۶/۷	۲/۷	۱۸/۰	۸/۹	۱۲/۴	۱۰/۰	۱۲/۰	۱۰/۴	۱۰/۶
	SSE	۱۵۱/۰۳	۳۳۶/۱۶	۲۷/۸۲	۱۳/۱۸	۸۹/۰۳					
SRM	۰-۲۰	۷۵/۰	۷/۵	۷/۶	۷/۳	۷/۳	۹/۸	۹/۸	۶/۸	۷/۰	۴/۵
	-۴۰	۱۸/۵	۸/۹	۱۳/۵	۱۱/۲	۱۲/۸	۷/۳	۱۳/۸	۹/۶	۱۲/۰	۴/۴
	-۶۰	۱۴/۵	۸/۳	۱۳/۸	۲۰/۱	۱۳/۸	۶/۹	۱۱/۴	۱۲/۴	۱۱/۶	۸/۳
	-۸۰	۹/۰	۷/۵	۱۱/۷	۲۰/۴	۱۱/۷	۱۰/۲	۸/۸	۱۰/۵	۹/۴	۷/۶
	-۱۰۰	۶/۹	۶/۷	۸/۹	۱۸/۰	۸/۷	۱۲/۴	۷/۹	۱۲/۰	۸/۴	۱۰/۶
	SSE	۷۳/۹	۲۰۴/۴۳	۸۴/۷۱	۲۰/۶۱	۴۴/۷۲					
NM	۰-۲۰	۷۵/۰	۷/۵	۱۲/۸	۷/۳	۶/۲	۹/۸	۴/۴	۶/۸	۳/۳	۴/۵
	-۴۰	۱۸/۵	۸/۹	۱۹/۵	۱۱/۲	۱۱/۷	۷/۳	۶/۸	۹/۶	۴/۴	۴/۴
	-۶۰	۱۴/۵	۸/۳	۱۶/۱	۲۰/۱	۱۴/۶	۶/۹	۹/۴	۱۲/۴	۵/۹	۸/۳
	-۸۰	۹/۰	۷/۵	۱۲/۱	۲۰/۴	۱۵/۱	۱۰/۲	۱۱/۸	۱۰/۵	۷/۷	۷/۶
	-۱۰۰	۶/۹	۶/۷	۸/۵	۱۸/۰	۱۳/۷	۱۲/۴	۱۳/۲	۱۲/۰	۹/۵	۱۰/۶
	SSE	۲۲۵/۶۹	۷۸/۲۹	۳۸/۸۶	۹۵/۶۳	۴۹/۱۵					

مدیریت آب و آبیاری

دوره ۳ ■ شماره ۱ ■ بهار و تابستان ۱۳۹۲



شکل ۲. نمودار عملکرد مدل‌های مورد بررسی در برآورد شوری نهایی خاک به ازای عمق‌های مختلف آب آبخویی

به صورت یکنواخت انجام می‌گیرد. با توجه به ناهمگنی و غیریکنواخت بودن شرایط فیزیکی و شیمیایی خاک محل آزمون، شرایط حقیقی مزرعه با فرضیه‌های مدل اختلاف دارد که سبب شده است مقدار شوری پیش‌بینی شده توسط مدل با مقادیر واقعی تفاوت داشته باشد. همچنین در این مدل افزایش آب آبخویی توانسته رطوبت خاک را در لایه‌های سطحی (۰-۴۰) به حد ظرفیت زراعی (FC) برساند و سبب توزیع مناسب‌تر رطوبت در این لایه‌ها شود که دقت مدل را با توجه به فرضیه‌های گلوچکف افزایش داده است.

نتیجه‌گیری

نتایج ارزیابی چهار مدل نظری پیش‌بینی شوری نهایی

به نظر می‌رسد به دلیل یادشده، دقت مدل در تخمین شوری باقی‌مانده در لایه‌های نخست که برای مدت طولانی‌تری تحت شرایط غرقاب و اشباع بوده، نتایج بهتری داشته است. در مورد مدل ستون پیوسته خاک (TPTM) باید اضافه کرد که گلوچکف^۱ مدل شوری زدایی خود را برای یک ستون پیوسته و همگن از خاک در نظر گرفته و دانسیته و لزوجت آب آبخویی را در نیمرخ خاک ثابت فرض کرده است. وی در این ستون پیوسته و در شرایط رطوبتی کمتر از اشباع، پدیده پخشیدگی املاح را عامل اصلی جابه‌جایی نمک‌های خاک فرض کرده است. در شرایط یادشده، اختلاط آب آبخویی و محلول خاک

1. Glueckauf

۲. وزیری، ژ (۱۳۷۴). ارزیابی مدل‌های شوری‌زدایی خاک با آزمون مزرعه‌ای، دانشگاه صنعتی اصفهان، اصفهان. پایان‌نامه کارشناسی ارشد.
۳. مهاجر میلانی، پ؛ تولایی، م؛ توسلی، ا (۱۳۷۲). «تعیین راندمان آبخویی املاح با استفاده از مدل سری مخازن»، مجموعه مقالات خاک و آب، نشریه فنی و تحقیقاتی مؤسسه تحقیقات خاک و آب، ۸ (۶)
۴. عظیم‌زاده، ح (۱۳۷۳). مطالعه و بررسی روند بهسازی خاک‌های شور-قلیا همگام با کشت و تهیه مدل کامپیوتری مخزن با معبر فرعی، دانشگاه تربیت مدرس، دانشکده کشاورزی، تهران، پایان‌نامه کارشناسی ارشد.
۵. نشریه شماره ۲۵۵ (۱۳۸۱). «دستورالعمل آزمایش‌های آبخویی خاک‌های شور و سدیمی در ایران»، انتشارات سازمان مدیریت و برنامه‌ریزی کشور.
6. Corwin, D.L., Rhoades, J.D., Simunek, J. (2007) Leaching requirements for soil salinity control: steady-state versus transient models. *Agricultural Water Management*. 90: 165-180.
7. 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 (3-4). pp. 191-209
8. Jury WA (1982) Simulation of solute transport using a transfer function model. *Water resources research*. 18(2):363-368
9. Leffelaar PA and Sharma P (1977) Leaching of a highly saline-sodic. *Journal of Hydrology*. 32:203-218

خاک در این تحقیق نشان داد که مدل‌های مورد بررسی در عمق‌های مختلف آب آبخویی عملکرد متفاوتی دارند. با وجود این، در مقایسه با دیگر مدل‌ها، مقدار شوری نهایی برآورده شده با مدل سری مخازن به ازای مقادیر مختلف آب آبخویی از روند پایدارتری برخوردار است. این نتایج با یافته‌های تحقیق وزیر (۲) که در آن به ارزیابی چهار مدل شوری‌زدایی خاک شامل سری مخازن (SRM)، مدل نظری ستون پیوسته خاک (TPTM)، انتقال - انتشار (CDM) و روش حل عددی (NM) در دو منطقه رودشت اصفهان و کنگاور کرمانشاه با اجرای دو آزمون مزرعه‌ای در شرایط آبخویی غرقاب دائم و متناوب پرداخت و در آن، برتری مدل سری مخازن نسبت به دیگر مدل‌ها تأیید شد، مطابقت دارد. همچنین نتایج نشان داد که دقت مدل حل عددی (NM) در پیش‌بینی شوری خاک به ازای عمق آب آبخویی ۴۰ سانتی‌متر نسبت به مدل‌های دیگر بهتر است و در دیگر مقادیر آب کاربردی دقت کمی دارد. دقت مدل تئوری ستون پیوسته خاک (TPTM) در لایه ۴۰-۰ سانتی‌متری خاک به ازای مقادیر مختلف آب آبخویی بیشتر از سایر مدل‌ها بوده است. از این‌رو در مواردی که محاسبه شوری نهایی در لایه‌های فوقانی (ناحیه توسعه ریشه) نیاز باشد، کاربرد این مدل نسبت به دیگر مدل‌ها ارجح است، اما دقت آن در پیش‌بینی شوری نهایی لایه‌های زیرین کم است و قابل توصیه و کاربرد نیست. مدل انتقال و انتشار (CDM)، شوری خاک را پس از آبخویی با تفاوت به نسبت زیادی نسبت به شوری اندازه‌گیری شده، پیش‌بینی کرده است و در نتیجه مدل مناسبی نخواهد بود.

منابع

۱. نشریه شماره ۳۵۹ (۱۳۸۵). «راهنمای کاربردی مدل‌های تجربی و نظری آبخویی نمک‌های خاک‌های شور»، انتشارات سازمان مدیریت و برنامه‌ریزی کشور.

10. Biggar JW and Nielsen DR (1961) Miscible displacement in porous materials. Journal of Soil Science. 12 : 188-197
11. Eloubaidy AF Hussain SM and Al-Taie (1993). Field evaluation of desalinization models. Agric Water Management. 24 : 1-13
12. Van Der Molen WH (1979). Salt balance and leaching requirement . Drainage principles and application. Vol. II. ILR I. Wageningen. The Netherlands.
13. Glueckauf D (1949) Activity coefficients in concentrated solution containing several electrolytes. Nature 163 : 414-415.
14. Pazira A (1960) Hydrodynamics of salts in the soil. Faculty of Agriculture, Kyoto University.
15. Salam AW and Hamza M (1966) Leaching and reclamation equations for saline soils. Utah State University. Ph.D Dissertation.
16. Nielsen DR and Biggar JW (1963) Miscible Displacement: III. Theoretical Considerations. Soil Science Society of America Journal . 26 : 216-221.