

مقاله پژوهشی

## مدل‌سازی دو بُعدی آبشویی نمک‌ها در نیمرخ خاک بین دو زهکش

رضا سعیدی<sup>۱</sup>

تاریخ دریافت: ۱۳۹۹/۶/۲۷ تاریخ پذیرش: ۱۳۹۹/۱۰/۳۰

### چکیده

مدل‌سازی آبشویی در شرایط عدم یکنواختی آبشویی نمک‌ها در نیمرخ خاک، یکی از چالش‌های شوری‌زدایی به‌شمار می‌رود. شوری نهایی در نیمرخ خاک بین دو زهکش، در دو بُعد عمق خاک و فاصله از زهکش دارای مقادیر متفاوتی می‌باشد. لذا تخمین مقادیر شوری در نیمرخ خاک، نیازمند مدل‌سازی دو بُعدی آبشویی می‌باشد. در این پژوهش، داده‌های مورد نیاز مدل‌سازی با اجرای عملیات آبشویی نیمرخ خاک در مدل فیزیکی با ابعاد (ارتفاع×عرض×طول)  $1 \times 0.5 \times 2$  متر تهیه شد. در مدل مذکور، شرایط زهکشی خاک برای نصف فاصله بین دو زهکش ایجاد شد. هدف از پژوهش، مقایسه روابط یک بُعدی (بُعد عمق خاک) و دو بُعدی (بُعد عمق خاک و فاصله از زهکش) در مدل‌سازی آبشویی بود. مدل‌ها شامل توابع خطی، نمایی، لگاریتمی، درجه دوم و توانی بود که به‌عنوان مدل‌های رگرسیونی انتخاب شدند. نتایج نشان داد در مدل‌سازی یک بُعدی، ضریب  $R^2$  برای توابع خطی، نمایی، لگاریتمی، درجه دوم و توانی به ترتیب برابر با  $0.392$ ،  $0.557$ ،  $0.404$ ،  $0.406$  و  $0.562$  بود. اما در مدل‌سازی دو بُعدی، به ترتیب برابر با  $0.796$ ،  $0.94$ ،  $0.55$ ،  $0.614$  و  $0.587$  شد. بنابراین افزایش ضریب  $R^2$  در مدل‌سازی دو بُعدی، نشان‌دهنده افزایش اعتبار در مدل‌سازی آبشویی بود. در ارزیابی مدل‌های دو بُعدی، از نظر آماره‌های  $ME$ ،  $RMSE$ ،  $R^2$ ،  $EF$  و  $R^2_{adj}$ ، به ترتیب مدل‌های نمایی و خطی به‌عنوان مدل بهینه انتخاب شد. دستاورد کلی این بود که برای مدل‌سازی آبشویی در نیمرخ خاک بین دو زهکش، استفاده از مدل دو بُعدی معرفی شده در این پژوهش دارای کارایی بهتری نسبت به مدل یک بُعدی بود.

**واژه‌های کلیدی:** تخمین شوری، زهکشی، شوری‌زدایی، مدل فیزیکی

### مقدمه

برسد که مانع از جوانه‌زنی و رشد رویشی گیاه شده، کیفیت و کمیت تولید محصولات را کاهش داده و به‌طور کلی، قابلیت کشت را در زمین‌های کشاورزی از بین ببرد (Wallender and Tanji, 2011). از مهم‌ترین دلایل شور شدن خاک می‌توان به کاهش بارندگی، افزایش تبخیر از سطح خاک، توپوگرافی سطح زمین، کیفیت نامناسب آب آبیاری و نوع سنگ مادری تشکیل‌دهنده خاک اشاره نمود (Pazira and Homae, 2010). از این‌رو برای تداوم تولید محصولات کشاورزی در زمین‌های تحت آبیاری و استفاده پایدار از زمین، آبشویی خاک ضروری می‌باشد (Yang et al., 2019). در شرایط ماندگار، برای دفع ۸۰ درصد از نمک‌ها خاک لازم است که حجم آبی به‌مقدار  $1/5$  برابر متوسط حجم منافذ خاک از آن عبور نماید (Dafonseca et al., 2007). لذا با ایجاد شبکه‌های زهکشی سطحی یا زیرزمینی و انجام آبشویی خاک، نمک‌ها به‌همراه آب‌های مازاد از نیمرخ خاک تخلیه شده و موجب بهبود کیفیت خاک می‌گردد. اما جذب آب به‌وسیله ریشه گیاه و عملکرد نهایی محصول، تحت تأثیر میزان یکنواختی شوری باقی‌مانده در نیمرخ خاک می‌باشد. به‌طوری که شوری و توزیع آن در نیمرخ خاک، در زمان‌ها و

ایجاد بستر کشت مطلوب و کاهش نمک‌های خاک تا حد آستانه تحمل گیاه، از نکات ضروری و قابل توجه در بخش کشاورزی به‌شمار می‌رود. تجمع نمک‌های آسیب‌رسان به گیاه در منطقه‌ی ریشه، باعث اعمال تنش شوری بر گیاه می‌شود. لذا شوری خاک یکی از چالش‌های مهم کشاورزی پایدار در مناطق خشک و نیمه‌خشک محسوب می‌گردد. تجمع نمک‌ها در نواحی رشد ریشه بر ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی خاک از قبیل پتانسیل اسمزی، نفوذپذیری و ... اثر گذاشته و در نهایت رشد و نمو گیاهان را مختل و متوقف می‌نماید (اسدی کپورچال و همایی، ۱۳۹۶). شوری خاک می‌تواند به‌حدی

۱- دکترای آبیاری و زهکشی گروه مهندسی آب، دانشکده کشاورزی و منابع طبیعی، دانشگاه بین‌المللی امام خمینی (ره)، قزوین، ایران  
(\*) نویسنده مسئول: Email: saeidi@org.ikiu.ac.ir  
DOR: 20.1001.1.20087942.1400.15.2.2.4

از عدد  $0/1$  تا  $0/3$  متغیر است (Hoffman, 1980)،  $D_w$ : عمق خالص آب کاربردی برای آبشویی خاک (سانتی‌متر) و  $D_s$ : عمق خاک تحت آبشویی (سانتی‌متر) می‌باشد. در تعیین مدل‌های تجربی آبشویی (شوری‌زدایی)، کسر  $\left(\frac{EC_f - EC_{eq}}{EC_i - EC_{eq}}\right)$  به‌عنوان متغیر وابسته (Y) و کسر  $\left(\frac{D_w}{D_s}\right)$  به‌عنوان متغیر مستقل (X) در نظر گرفته می‌شود.

تاکنون رابطه (۱) به‌عنوان رابطه‌ی اصلی در مدل‌سازی آبشویی استفاده شده است. از این‌رو، در تحقیقی کاربرد مدل‌های شوری‌زدایی به‌منظور ارائه برنامه‌ی اصلاح و به‌سازی خاک‌های شور و سدیمی بررسی شد. نتایج نشان داد از میان مدل‌های مختلف، مدل لگاریتمی از کارایی بهتری برای تخمین مقدار آب موردنیاز در اصلاح خاک‌های شور و سدیمی برخوردار بود (اسدی کپورچال و همایی، ۱۳۹۶). در پژوهشی بر روی سه نوع خاک منطقه جفیر در جنوب جلگه خوزستان، مدل توانی برای تخمین مقدار آب موردنیاز جهت آبشویی خاک ارائه شد (محمدزاده و همکاران، ۱۳۹۲). در تحقیق دیگر، روش‌های مختلف آبشویی نمک‌های محلول از نیمرخ خاک‌های شور و سدیمی اجرا شد. در این پژوهش تأثیر عمق‌های آب آبشویی شامل ۲۵، ۵۰، ۷۵ و ۱۰۰ سانتی‌متر بر لایه‌های ۰-۲۵، ۲۵-۵۰، ۵۰-۷۵ و ۷۵-۱۰۰ سانتی‌متری ستون خاک بررسی شد. نتایج نشان داد بهترین مدل تجربی برای آبشویی بر مبنای ضریب همبستگی بالاتر، مدل نمایی بود (بهبهانی‌زاده رضائیان و همکاران، ۱۳۹۶). در تحقیق دیگر به‌منظور برآورد آب موردنیاز آبشویی در خاک‌های شور استان خوزستان، آبشویی در چهار تناوب عمق ۰/۲۵ متری آب، با آب رودخانه کارون انجام شد. بر اساس نتایج حاصل، مدل تجربی نمایی با ضریب همبستگی ۰/۸۵ به‌عنوان مدل بهینه ارائه شد (رجب‌زاده و همکاران، ۱۳۹۰). در تحقیقات صورت گرفته تاکنون، مدل‌های تجربی آبشویی به‌صورت یک بُعدی (رابطه ۱) ارائه شد که قابلیت تخمین مقادیر شوری در یک ستون از خاک را داشت. در این شرایط مقادیر شوری یک عمق مشخص از خاک، برای فواصل مختلف از زهکش، به‌طور یکسان تخمین زده شد. یعنی تأثیر بُعد فاصله از زهکش، بر مقدار شوری نیمرخ خاک در نظر گرفته نشد. اما با توجه به نحوه‌ی توزیع و خطوط جریان آب در نیمرخ خاک بین دو زهکش زیرزمینی، مقادیر شوری نهایی در فواصل مختلف از نیمرخ خاک را نمی‌توان یکسان در نظر گرفت، زیرا منحنی سطح ایستابی در شکل (۱) نشان می‌دهد که فاصله عمودی بین عمق آب زیرزمینی تا سطح زمین، از محل نصب زهکش‌ها تا میان دو زهکش، یکسان نمی‌باشد. با توجه به شکل هلالی سطح آب زیرزمینی، به نظر می‌رسد که مقدار و سرعت نفوذ آب در سطح خاک نیز تحت تأثیر موقعیت زهکش بوده و متفاوت باشد. یعنی ممکن است وجود زهکش‌ها باعث افزایش نفوذپذیری سطح خاک بالای زهکش‌ها نسبت به اواسط بین دو زهکش بشود. بنابراین اگرچه تصور می‌شود که یک ارتفاع ثابت

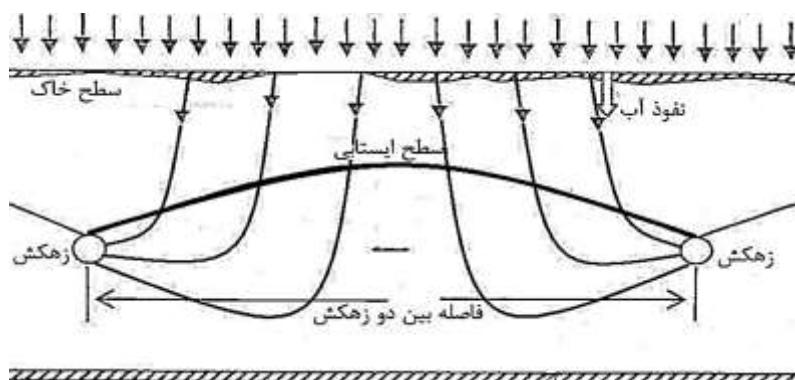
مکان‌های مختلف متفاوت بوده و تابعی از بارش، آبیاری، تبخیر-ترقرق، آبشویی، زهکشی و اثر متقابل بین عوامل مذکور می‌باشد. در این میان روابط بین عوامل مؤثر بر شوری خاک، از پیچیدگی بسیاری برخوردار است (Corwin et al., 2007). همچنین شرایط مرزی زهکشی نیز می‌تواند بر توزیع شوری در نیمرخ خاک تأثیر بگذارد (Raij et al., 2016). در پژوهشی گزارش شد که در عملیات زهکشی، میزان نشست آب از خاک، از محل نصب زهکش‌ها تا منطقه‌ی متعلق به وسط دو زهکش کاهش می‌یابد. در این شرایط برای رسیدن به آبشویی یکنواخت خاک، به مقدار زیادی آب شیرین نیاز می‌باشد (Yu et al., 2018). از آنجایی که آبشویی خاک از راه‌های عملی برای احیای اراضی شور بوده و نیازمند مصرف زیاد آب می‌باشد، شناخت روابط حاکم بر آن به درک بهتر فرآیند آبشویی کمک می‌نماید که در نتیجه، کاهش هزینه‌ها، بهبود عملیات آبشویی و صرفه‌جویی در مصرف آب را به‌دنبال خواهد داشت (شریفی‌پور و همکاران، ۱۳۹۶). با توجه به این‌که پژوهش‌های مزرعه‌ای آبشویی مستلزم صرف وقت و هزینه زیاد می‌باشد، استفاده از مدل‌های فیزیکی، روابط و مدل‌های مبتنی بر نظریه آبشویی و انتقال نمک‌ها در خاک، همواره موردتوجه محققان بوده است. مدل‌های مذکور بر اساس روابط ریاضی و تجربی بین مقادیر شوری اعماق خاک و سایر پارامترها توسعه می‌یابند (Metternich and Zinck, 2003). مدل‌های تجربی حاصل داده‌های مشاهداتی و اندازه‌گیری‌های آزمایشگاهی و میدانی می‌باشند که بر نوعی معادله‌ی ریاضی برآزش داده می‌شوند. در برآورد مدل‌های تجربی، هیچ‌گونه پیش‌فرض فیزیکی و ریاضی اعمال نمی‌گردد (پاپن و همکاران، ۱۳۹۶). لذا در تحقیقی با استفاده از ارقام و اطلاعات حاصل از اجرای آزمایش‌های مزرعه‌ای در کشور آمریکا و سایر نقاط جهان، رابطه‌ی تجربی (۱) ارائه شد. در رابطه‌ی مذکور، شوری نهایی عصاره‌ی اشباع خاک بر اساس نسبت عمق آب آبیاری به عمق خاک برآورد شد (Hoffman, 1980).

$$\left(\frac{EC_f - EC_{eq}}{EC_i - EC_{eq}}\right) = K \left(\frac{D_w}{D_s}\right) \quad (1)$$

در این رابطه  $EC_f$  و  $EC_i$ : هدایت الکتریکی عصاره اشباع خاک (دسی‌زیمنس بر متر) به‌ترتیب قبل و بعد از عملیات آبشویی می‌باشد،  $EC_{eq}$ : هدایت الکتریکی معادل خاک (دسی‌زیمنس بر متر) بعد از آبشویی طولانی مدت است که نمک‌های محلول در خاک با نمک‌های آب آبیاری به تعادل می‌رسند. در این شرایط، مقدار  $EC_{eq}$  از شوری آب آبیاری بیشتر و از شوری اولیه خاک کمتر خواهد بود.  $EC_{eq}$  که کمترین مقدار شوری تبدالی خاک می‌باشد، در لایه سطحی صفر تا پنج سانتی‌متری عمق خاک و بعد از اتمام عملیات آبشویی اندازه‌گیری می‌شود (مشعل و همکاران، ۱۳۹۲).  $K$ : ضریب تجربی (بی‌بُعد) بوده و مقدار آن برای خاک‌های لومی شنی تا رسی به‌ترتیب

آبشویی در نظر گرفت تا تخمین بهتری برای عمق آب کاربردی و مقادیر شوری نهایی خاک داشت. لذا هدف از این پژوهش مدل‌سازی دو بُعدی آبشویی، در نیمرخ خاک بین دو زهکش بود. مدل‌سازی دو بُعدی نیز شامل در نظر گرفتن عمق خاک و فاصله از زهکش در مدل‌های تجربی است. با این کار می‌توان تخمین واقعی و دقیق‌تری از هدایت الکتریکی نهایی در شبکه نیمرخ خاک به عمل آورد.

آب بر روی خاک به طور یکسان در داخل خاک نفوذ می‌کند، اما چنین نیست. همچنین با عنایت به شکل (۱)، یک قطره آب در سطح خاک بالای زهکش‌ها نسبت به سطح خاک وسط دو زهکش، مسیر کوتاه‌تری را برای رسیدن به خروجی زهکش طی می‌نماید. بنابراین یک ارتفاع ثابت آب بر روی سطح خاک، اثر متفاوتی بر شوری نهایی (در بُعد عمق و طول) نیمرخ خاک خواهد گذاشت. در این شرایط علاوه بر عمق خاک، باید بُعد فاصله از زهکش را نیز در مدل‌سازی



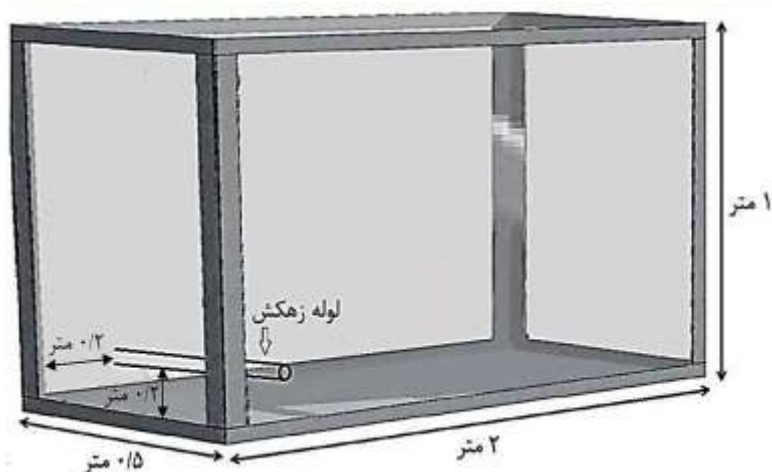
شکل ۱- الگوی جریان آب به سمت زهکش لوله‌ای (Smedema et al., 2004)

آبیک در استان قزوین تهیه شد. مشخصات فیزیکی و شیمیایی خاک مطابق جدول (۱) بود. لوله‌ی زهکش، متشکل از یک لوله‌ی گالوانیزه با قطر داخلی ۲ سانتی‌متر و طول ۴۵ سانتی‌متر بود. با توجه به استاندارد DIN 1187 آلمان برای ساخت لوله‌های زهکشی، یک درصد از مساحت جانبی لوله‌ی گالوانیزه به سوراخ‌های زهکش اختصاص داده شد. سوراخ‌ها با قطر دو میلی‌متر و با فاصله‌ی یکسان از هم، در سطح خارجی لوله پراکنده شد و شرایط زهکشی خاک را فراهم ساخت. برای جلوگیری از انسداد لوله و افزایش هدایت هیدرولیکی در اطراف آن، از پوشش ماسه‌ای با ضخامت یک سانتی‌متر و دانه‌بندی با قطری بزرگ‌تر از سوراخ‌های زهکش استفاده شد. به وسیله‌ی یک توری پلاستیکی، پوشش ماسه‌ای دور لوله‌ی زهکش نگه داشته شد. به منظور بررسی شرایط هیدرولیکی و تعیین موقعیت سطح ایستابی در خاک، یک دسته‌ی پیزومتر در فواصل ۲۵ سانتی‌متری از طول و ارتفاع مدل، در دیواره‌ی پشتی مدل نصب شد. در شکل (۳) تصویر واقعی از مدل فیزیکی و شبکه‌ی پیزومتری در پشت آن قابل مشاهده است.

## مواد و روش‌ها

### شبیه‌سازی فیزیکی

این آزمایش در دانشگاه بین‌المللی امام خمینی<sup>(۵)</sup> واقع در شهر قزوین و در موقعیت جغرافیایی ۳۶ درجه و ۱۹ دقیقه و ۲۲ ثانیه عرض شمالی و ۵۰ درجه و صفر دقیقه و ۳۹ ثانیه طول شرقی انجام شد. برای شبیه‌سازی عملیات آبشویی در نیمرخ خاک شور، از یک مخزن مستطیلی (مدل فیزیکی) با ابعاد  $2 \times 0.5 \times 1$  متر (ارتفاع  $\times$  عرض  $\times$  طول) استفاده شد (شکل ۲). علت انتخاب ابعاد مذکور این بود که نتایج حاصل از مدل آزمایشگاهی، امکان تعمیر به شرایط طبیعی فرایند آبشویی و زهکشی خاک را داشته باشد. دیواره‌ی جلوی مخزن از جنس ورق شفاف پلکسی گلس (Plexiglass) و سایر دیواره‌ها از جنس ورق گالوانیزه بود. در این پژوهش، نیمرخ خاک برای حالت نصف فاصله‌ی بین دو زهکش زیرزمینی شبیه‌سازی شد. به این صورت که در پایین‌ترین نقطه‌ی مدل، یعنی فاصله‌ی ۲۰ سانتی‌متری از کف و دیواره‌ی سمت چپ مخزن، یک لوله‌ی زهکش تعبیه شد (شکل ۲). برای شبیه‌سازی شرایط در نیمرخ خاک بین دو زهکش، داده‌های برداشت شده از مدل فیزیکی به‌طور قرینه تعمیر داده شد. در محفظه‌ی مدل فیزیکی، خاک شور تا ارتفاع ۸۰ سانتی‌متری به‌صورت لایه‌ای ریخته شد و با مترآکم ساختن آن، به چگالی  $1/5 \left( \frac{g}{cm^3} \right)$  رسانده شد. خاک مورد آزمایش، خاک شور با شوری اولیه  $9/8 \left( \frac{dS}{m} \right)$  بود که از شوره‌زارهای مناطق اطراف شهر



شکل ۲- نمای سه بُعدی مدل فیزیکی

جدول ۱- خصوصیات فیزیکی و شیمیایی خاک

کلر ( $\frac{meq}{L}$ )	سدیم ( $\frac{meq}{L}$ )	کلسیم ( $\frac{meq}{L}$ )	منیزیم ( $\frac{meq}{L}$ )	پتاسیم ( $\frac{meq}{L}$ )	اسیدیته (pH)	سیلت (%)	شن (%)	رس (%)	چگالی ظاهری خاک ( $\frac{gr}{cm^3}$ )	$EC_e$ ( $\frac{dS}{m}$ )	بافت خاک
۲۰/۲	۲۰	۳۰/۵	۲۷/۲	۹/۸	۷/۹	۲۷	۵۵	۱۸	۱/۵	۹/۸	شن لومی



شکل ۳- تصویر واقعی از نمای جلو (الف) و پشت (ب) مدل فیزیکی

شبکه‌ای از نقاط در اعماق ۲۰، ۴۰ و ۶۰ سانتی‌متری از سطح خاک و فواصل ۲۵، ۷۵، ۱۲۵ و ۱۷۵ سانتی‌متری از محل نصب زهکش (جمعاً ۱۲ نقطه) اندازه‌گیری شد. لازم به ذکر است در مرحله‌ی دوم آزمایش، خاک آبشویی شده (متعلق به مرحله اول) تخلیه شد و خاک جدید با شرایط قبلی در مدل فیزیکی جایگزین شد. از داده‌های ثبت شده در مرحله‌ی اول برای واسنجی مدل‌های پیشنهادی و از داده‌های مرحله‌ی دوم برای ارزیابی مدل‌ها استفاده شد.

#### مدل سازی تجربی

برای اولین بار و در این پژوهش، مقادیر کسر  $\frac{EC_f - EC_{eq}}{EC_i - EC_{eq}}$

#### داده‌برداری آزمایشگاهی

آزمایش شامل اجرای دو مرحله آبشویی خاک، به منظور واسنجی و اعتبارسنجی مدل‌های پیشنهادی در تخمین متغیر وابسته بود. به این صورت که در هر دو مرحله، ارتفاع ۲۰ سانتی‌متر آب با هدایت الکتریکی  $0.51 \left(\frac{dS}{m}\right)$  به‌طور یک‌باره و یکنواخت روی سطح خاک توزیع شد و با باز کردن خروجی زهکش، فرصت آبشویی داده شد. با توجه به حجم گسترده مدل، این امکان وجود داشت که با استفاده از ابزار اوگر، نمونه‌ی خاک از اعماق مختلف داخل مدل برداشت شده و عصاره اشباع نمونه خاک نیز توسط پمپ خلأ گرفته شود. بنابراین پس از آبشویی، هدایت الکتریکی نهایی عصاره‌ی اشباع خاک در یک

$$\left(\frac{EC_f - EC_{eq}}{EC_i - EC_{eq}}\right) = A_0 + A_1 \ln\left(\frac{D_w}{D_s}\right) + A_2 \ln\left(\frac{L_i}{L}\right) \quad (5)$$

$$\left(\frac{EC_f - EC_{eq}}{EC_i - EC_{eq}}\right) = A_0 + A_1 \left(\frac{D_w}{D_s}\right) + A_2 \left(\frac{D_w}{D_s}\right)^2 + A_3 \left(\frac{L_i}{L}\right) + A_4 \left(\frac{L_i}{L}\right)^2 + A_5 \left(\frac{D_w}{D_s}\right) \cdot \left(\frac{L_i}{L}\right) \quad (6)$$

$$\left(\frac{EC_f - EC_{eq}}{EC_i - EC_{eq}}\right) = A_0 \left(\frac{D_w}{D_s}\right)^{A_1} \cdot \left(\frac{L_i}{L}\right)^{A_2} \quad (7)$$

### ارزیابی مدل‌های تجربی

در این پژوهش، داده‌های واقعی کسر  $\frac{EC_f - EC_{eq}}{EC_i - EC_{eq}}$  در مرحله دوم آبشویی خاک، به‌عنوان داده‌های مشاهده‌ای (Observation) و داده‌های تخمینی کسر مذکور (توسط مدل)، به‌عنوان داده‌های پیش‌بینی شده (Predict) در نظر گرفته شد. سپس عملکرد مدل‌های تجربی در تخمین مقدار کسر مذکور در شبکه (۱۲ نقطه‌ای) نیمرخ خاک، ارزیابی و صحت‌سنجی شد. برای این کار از آماره‌های حداکثر خطا<sup>۱</sup> (ME)، ریشه‌ی خطای میانگین مربعات<sup>۲</sup> (RMSE)، ضریب تبیین<sup>۳</sup> ( $R^2$ )، ضریب تبیین تنظیم شده<sup>۴</sup> ( $R_{adj}^2$ )، کارایی مدل‌سازی<sup>۵</sup> (EF) و ضریب باقیمانده<sup>۶</sup> (CRM)، استفاده و مدل بهینه انتخاب شد. در نقاط مختلف شبکه نیمرخ خاک، آماره ME نشان‌دهنده بیشترین اختلاف ممکن بین یک داده واقعی و مقدار تخمینی آن است. آماره RMSE مجموع خطاهای داده‌های تخمینی را نسبت به خط رگرسیون مدل برآورد می‌کند. آماره CRM بیش‌برآوردی یا کم‌برآوردی مدل در تخمین داده‌ها را تعیین می‌نماید. آماره  $R^2$  بیانگر میزان هم‌بستگی بین داده‌های واقعی و تخمینی بوده و آماره EF نشان‌دهنده راندمان مدل‌سازی می‌باشد. به‌طور کلی برای اولویت‌بندی عملکرد مدل‌ها، هر مدلی که آماره RMSE، ME و CRM آن حداقل بوده و آماره‌های  $R^2$ ،  $R_{adj}^2$  و EF آن نزدیک‌تر به عدد یک باشد، بیشترین دقت را دارد. آماره  $R^2$  نشان می‌دهد که هر متغیر مستقل  $\left(\frac{L_i}{L}\right)$  و  $\left(\frac{D_w}{D_s}\right)$  در مدل، به‌تنهایی چه مقدار از تغییرات موجود در متغیر وابسته  $\left(\frac{EC_f - EC_{eq}}{EC_i - EC_{eq}}\right)$  را تبیین می‌کند، به‌طوری‌که اثر ترکیبی متغیرهای مستقل در مدل، حتی در صورت زیاد بودن مقدار آماره  $R^2$  مشخص نمی‌باشد. بنابراین نیاز بود تأثیر مرکب متغیرهای مستقل بر متغیر وابسته تبیین شود. برای این منظور، از آماره  $R_{adj}^2$  برای بررسی همبستگی بین داده‌ها استفاده شد، تا با اطمینان بیشتری به

نیمرخ خاک بین دو زهکش با استفاده از رابطه (۲) مدل‌سازی شد. در این فرایند با مشخص بودن مقادیر هدایت الکتریکی معادل ( $EC_{eq}$ ) و اولیه ( $EC_i$ ) خاک، مقدار هدایت الکتریکی نهایی خاک ( $EC_f$ ) قابل تخمین بود. در نهایت، رابطه (۱) و (۲) مورد مقایسه قرار گرفت تا دقت هر یک از آن‌ها در تخمین متغیر وابسته  $\frac{EC_f - EC_{eq}}{EC_i - EC_{eq}}$  بررسی شده و رابطه‌ی بهتر انتخاب گردد. در این پژوهش مقادیر  $EC_i$  و  $EC_{eq}$  به‌ترتیب برابر با  $9/8 \left(\frac{ds}{m}\right)$  و  $1/2 \left(\frac{ds}{m}\right)$  بود. در رابطه (۲) کسر  $\frac{EC_f - EC_{eq}}{EC_i - EC_{eq}}$  به‌عنوان متغیر وابسته و کسرهای  $\frac{L_i}{L}$  و  $\frac{D_w}{D_s}$  به‌عنوان متغیر مستقل در نظر گرفته شد. در رابطه (۱) توضیح داده شد که کسر  $\frac{D_w}{D_s}$  نسبت بی‌بُعد عمق آب کاربردی به عمق خاک تحت آبشویی می‌باشد. اما رابطه (۲)، مدل توسعه داده شده‌ی رابطه (۱) بود. به‌این صورت که علاوه بر کسر  $\frac{D_w}{D_s}$ ، تأثیر فاصله از محل نصب زهکش نیز از طریق کسر بی‌بُعد  $\frac{L_i}{L}$  در نظر گرفته شد. لذا این پژوهش نسبت به سایر پژوهش‌های مشابه، دارای نوآوری بود. در رابطه (۲)، پارامتر  $L$  به‌عنوان نصف فاصله‌ی بین دو زهکش و پارامتر  $L_i$  به‌عنوان فاصله‌ی متغیر از زهکش که دارای شرایط  $L_i \ll L$  بود، لحاظ شد. در این پژوهش بر روی یک نمونه‌ی خاک همگن و بدون درز و شکاف (جریان ترجیحی)، یک ارتفاع ثابت آب قرار داده شد و عملیات آبشویی به‌طور یکنواخت در نیمرخ خاک انجام شد. مقصود از خاک همگن یک خاک غریبال شده بدون سنگ‌های درشت بود که با تراکم ثابت (چگالی  $1/5$  گرم بر سانتی متر مکعب) در داخل محفظه‌ی مدل قرار داشت. بنابراین از تأثیر سایر عوامل بر عملیات آبشویی صرف‌نظر گردید و پارامتر  $A_0$  به‌عنوان بردار ثابت سایر عوامل مؤثر در نظر گرفته شد. برای مدل‌سازی، توابع پیشنهاد شده در نرم‌افزار اکسل بین متغیرهای مستقل و وابسته برازش داده شد. این توابع شامل شکل‌های خطی، نمایی، لگاریتمی، درجه دوم و توانی (به‌ترتیب روابط ۳ الی ۷) بود که به‌عنوان توابع تولید کسر  $\frac{EC_f - EC_{eq}}{EC_i - EC_{eq}}$  در شبکه‌ی دو بُعدی نیمرخ خاک استفاده شد. در مرحله‌ی واسنجی مدل‌ها، ابتدا مقادیر کسر  $\frac{EC_f - EC_{eq}}{EC_i - EC_{eq}}$  با استفاده از داده‌های  $EC_f$  در مرحله‌ی اول آبشویی خاک محاسبه شد. سپس ضرایب توابع مذکور (روابط ۳ الی ۷) از طریق نرم‌افزار SPSS برآورد شد و مدل‌های تجربی تولید شد. برای تعیین معنی‌داری کلی توابع، از آماره F استفاده شد. همچنین برای تعیین تأثیر معنی‌داری دو عامل عمق خاک  $\left(\frac{D_w}{D_s}\right)$  و فاصله از زهکش  $\left(\frac{L_i}{L}\right)$  بر مقادیر کسر  $\frac{EC_f - EC_{eq}}{EC_i - EC_{eq}}$  از آماره t استفاده شد.

$$\left(\frac{EC_f - EC_{eq}}{EC_i - EC_{eq}}\right) = f\left(\frac{D_w}{D_s}, \frac{L_i}{L}, A_0\right) \quad (2)$$

$$\left(\frac{EC_f - EC_{eq}}{EC_i - EC_{eq}}\right) = A_0 + A_1 \left(\frac{D_w}{D_s}\right) + A_2 \left(\frac{L_i}{L}\right) \quad (3)$$

$$\left(\frac{EC_f - EC_{eq}}{EC_i - EC_{eq}}\right) = A_0 \cdot \left(\frac{D_w}{D_s}\right)^{A_1} \cdot \left(\frac{L_i}{L}\right)^{A_2} \cdot e^{[A_3 \left(\frac{D_w}{D_s}\right) + A_4 \left(\frac{L_i}{L}\right)]} \quad (4)$$

1- Maximum Error

2- Root of Mean Squared Error

3- Coefficient of determination

4- Adjust coefficient of determination

5- Modeling Efficiency

6- Coefficient of Residual Mass

۱/۶ میلی‌متر بر ساعت بود. بنابراین در شرایط طبیعی وقتی که آب در بالای زهکش با سرعت بیشتری در خاک نفوذ می‌کند، بلافاصله آب از فاصله دورتر از زهکش به محل بالای زهکش منتقل شده و سطح آب تراز می‌گردد، که این موضوع در حالت طبیعی قابل رؤیت نیست. در نتیجه علی‌رغم وجود ارتفاع برابر آب در همه جای سطح خاک، نفوذ آب به داخل خاک نابرابر بوده و آبشویی به‌طور یکنواخت انجام نمی‌گیرد. دلیل دیگر عدم آبشویی یکنواخت نیمرخ خاک این بود که طول مسیر حرکت آب در بالای زهکش، کوتاه‌تر از مسیر وسط دو زهکش بود. در نتیجه خاک بالای زهکش‌ها نسبت به خاک وسط دو زهکش، بهتر آبشویی شده بود. اما آنچه که در واقعیت با هدف آبشویی یکنواخت نیمرخ خاک اتفاق می‌افتد این است که برای آبشویی زمین‌های کشاورزی، عمق آب کاربردی تقریباً معادل عمق خاک در نظر گرفته می‌شود. در این شرایط به‌نظر می‌رسد که بابت هدف مذکور، بیش از حد نیاز آب مصرف می‌شود، زیرا به‌دلیل عدم شستشوی یکنواخت نیمرخ خاک، آن قدر از آب استفاده می‌شود تا دورترین نقاط از زهکش‌ها نیز به شوری دلخواه برسد. در نتیجه علاوه بر خروج مواد مغذی از نیمرخ خاک، آب اضافی که در شرایط بحران کمبود آب می‌تواند به مصرف گیاه برسد، به هدر رفته و باعث خسران بیشتر می‌گردد. اما با توجه به نتایج این پژوهش و تأثیر زهکش بر نفوذپذیری سطح خاک، پیشنهاد می‌شود برای شرایط طبیعی در مزرعه، فاصله شعاع تأثیر زهکش بر نفوذپذیری سطح خاک تعیین گردد. از این رو در محدوده فاصله تأثیر زهکش می‌توان اقدامات مدیریتی از قبیل کرت‌بندی سطح خاک و کاربرد اعماق متغیر آب در داخل کرت‌ها در نظر گرفت، تا آبشویی یکنواخت‌تری انجام گیرد. در این شرایط با کمتر در نظر گرفتن عمق آب کاربردی (نسبت به عمق خاک تحت آبشویی)، از مصرف زیاد آب در فرایند آبشویی جلوگیری می‌شود.

#### منحنی آبشویی یک بُعدی (در عمق خاک)

منحنی‌های آبشویی، عاملی مهم و مؤثر در تعیین و شناخت عکس‌العمل خاک، به‌فرایند آبشویی و خروج نمک‌های محلول از نیمرخ خاک می‌باشند. بر اساس رابطه (۱) که پایه منحنی آبشویی می‌باشد، می‌توان کفایت عمق آب کاربردی را در آبشویی نمک‌ها و کاهش مقدار شوری نیمرخ خاک، بررسی نمود. در این پژوهش، منحنی آبشویی در شکل‌های مختلف خطی، نمایی، لگاریتمی، درجه دوم و توانی ارائه شد (شکل ۵). نتایج نشان داد ضریب تبیین ( $R^2$ ) بین متغیرهای  $\frac{Dw}{D_s}$  (متغیر مستقل) و  $\frac{EC_f - EC_{eq}}{EC_i - EC_{eq}}$  (متغیر وابسته)، در شکل‌های خطی، نمایی، لگاریتمی، درجه دوم و توانی به‌ترتیب برابر با ۰/۳۹۲، ۰/۵۵۷، ۰/۴۰۴، ۰/۴۰۶ و ۰/۵۶۲ بود.

همبستگی آن‌ها استناد شود. در مجموع، معادلات مربوط به آماره‌های فوق، در روابط (۸) الی (۱۳) ارائه شده است. در معادلات مذکور، حروف  $O_i, P_i, \bar{O}, \bar{P}, n$  و  $k$  به‌ترتیب بیانگر داده‌های مشاهده‌ای در آزمایشگاه، داده‌های تخمین زده شده توسط مدل مربوطه، میانگین داده‌های مشاهده‌ای، مجموع تعداد داده‌ها و تعداد متغیر مستقل بود.

$$ME = \max |P_i - O_i|_{i=1}^n \quad (8)$$

$$RMSE = \left[ \frac{\sum_{i=1}^n (P_i - O_i)^2}{n} \right]^{\frac{1}{2}} \times \frac{100}{\bar{O}} \quad (9)$$

$$R^2 = \frac{(\sum_{i=1}^n (O_i - \bar{O}) \cdot (P_i - \bar{P}))^2}{\sum_{i=1}^n (O_i - \bar{O})^2 \cdot \sum_{i=1}^n (P_i - \bar{P})^2} \quad (10)$$

$$R_{adj}^2 = 1 - \frac{(1 - R^2)(n - 1)}{n - k - 1} \quad (11)$$

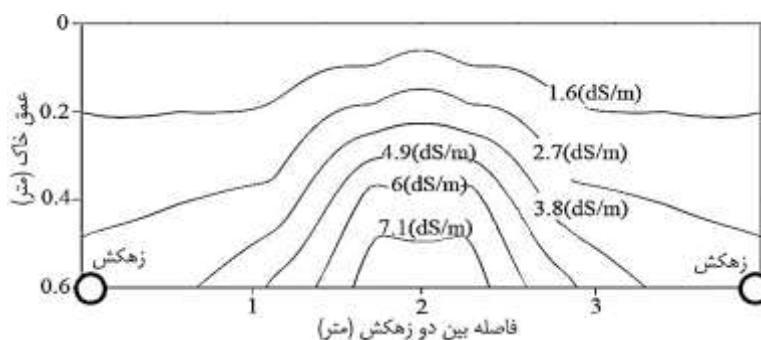
$$EF = \frac{\sum_{i=1}^n (O_i - \bar{O})^2 - \sum_{i=1}^n (P_i - O_i)^2}{\sum_{i=1}^n (O_i - \bar{O})^2} \quad (12)$$

$$CRM = \frac{\sum_{i=1}^n O_i - \sum_{i=1}^n P_i}{\sum_{i=1}^n O_i} \quad (13)$$

## نتایج و بحث

### مقادیر شوری در شبکه نیمرخ خاک

پس از انجام عملیات آبشویی، مقادیر شوری عصاره اشباع خاک در شبکه‌ای از فواصل افقی ۲۵، ۷۵، ۱۲۵ و ۱۷۵ سانتی‌متری از زهکش و اعماق ۲۰، ۴۰ و ۶۰ سانتی‌متری از سطح خاک، اندازه‌گیری شد. اعداد اندازه‌گیری شده از سطح تا بستر شبکه‌ی نیمرخ خاک در بازه‌ی ۱/۲ تا ۷/۶ دسی‌زیمنس بر متر قرار داشت (شکل ۴). با بررسی تغییرات شوری در نیمرخ خاک بین دو زهکش و ترسیم خطوط هم‌EC در شکل (۴)، پراکندگی مقادیر شوری در نیمرخ خاک مشاهده شد. مقادیر شوری در سطح خاک و در نقطه‌ی بالای زهکش‌ها دارای کمترین مقدار و در فاصله‌ی میانی بین دو زهکش که منتهی به بستر خاک بود، دارای بیشترین مقدار بود. نتایج نشان داد که از دو جهت طول و ارتفاع نیمرخ خاک، فاصله گرفتن از محل نصب زهکش، بر کاهش آبشویی خاک مؤثر بود. یکی از دلایل نتایج مذکور این بود که علی‌رغم وجود تراکم یکسان و یکنواخت خاک در همه جای مدل (شبهه شرایط طبیعی مزرعه)، مقدار نفوذپذیری سطح خاک (از محل بالای زهکش تا وسط دو زهکش) به‌علت وجود زهکش، متغیر بود. به‌طوری که بیشترین مقدار نفوذپذیری سطح خاک از سطح خاک بالای زهکش آغاز شد و در وسط دو زهکش، به کمترین مقدار خود رسید. برای اثبات ادعای فوق که مقدار نفوذپذیری سطح خاک تحت تأثیر زهکش قرار داشت، سطح خاک مدل (در طول ۲ متری) توسط ۳ دیواره (از جنس پلکسی گلس) از هم جدا شد. دیواره‌ها تا عمق ۱۰ سانتی‌متری از سطح خاک امتداد داشت و سطح خاک را به ۴ کرت ۰/۵×۰/۵ متر تقسیم کرد. در این حالت، در همه کرت‌ها ارتفاع آب برابر قرار داده شد و سرعت نفوذ آب در آن‌ها اندازه‌گیری شد. نتایج نشان داد که سرعت نفوذپذیری سطح خاک از کرت بالای زهکش تا دورترین کرت نسبت به زهکش به‌ترتیب برابر با ۲/۱، ۱/۸۹، ۱/۷۲ و



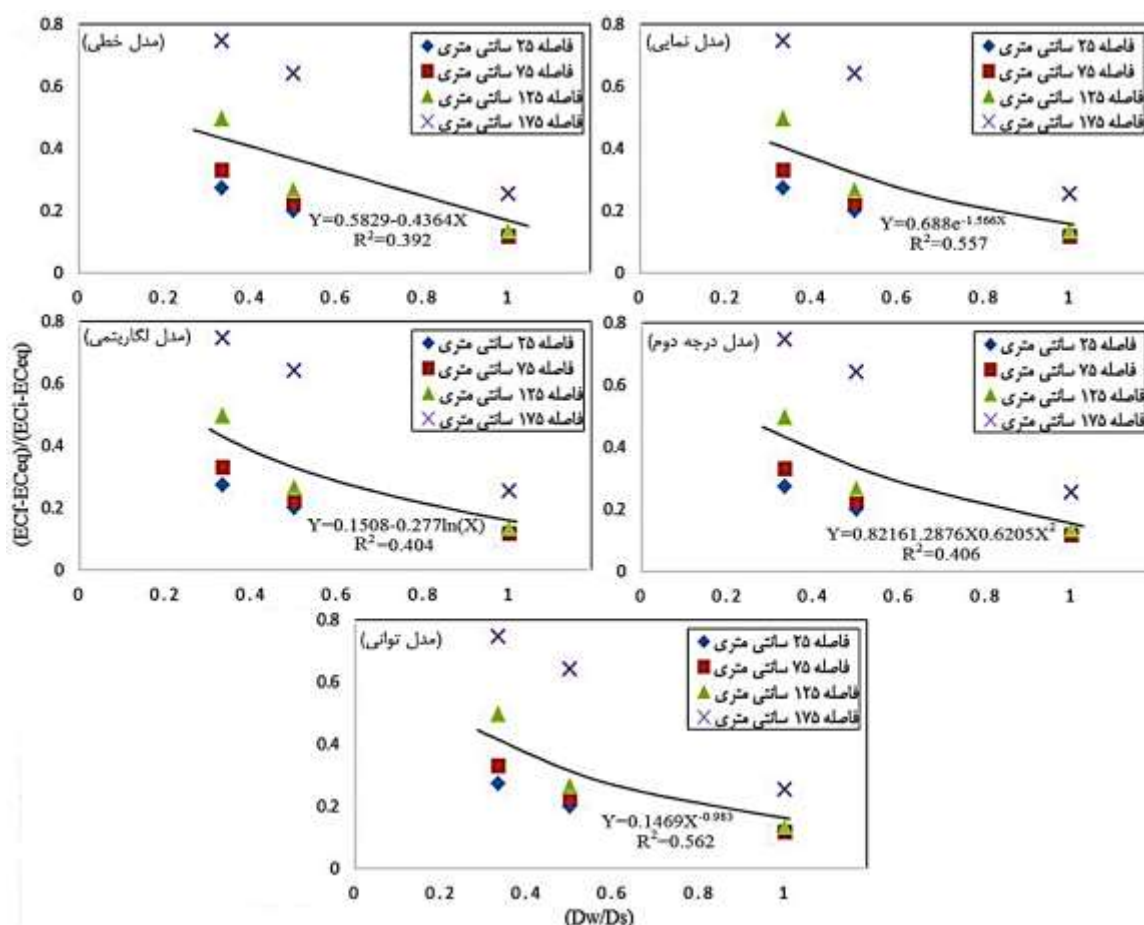
شکل ۴ - خطوط هم‌EC پس از آبخشوی نیم‌رخ خاک

رگرسیون بین دو متغیر مستقل  $\frac{Dw}{Ds}$  و  $\frac{Li}{L}$  و متغیر وابسته  $\frac{EC_f - EC_{eq}}{EC_i - EC_{eq}}$  برآزش داده شد. مدل‌های تجربی شامل توابع خطی، نمایی، لگاریتمی، درجه دوم و توانی (روابط ۳ الی ۷) بود که به‌عنوان مدل‌های رگرسیونی انتخاب شد. محدودیت این قبیل مدل‌ها، شامل وابستگی آن‌ها به شرایط خاص خاک مکان مورد مطالعه بود. اما نسبت به سایر روش‌های تئوری و ریاضی که بر پایه فرضیات متعددی بودند، ترجیح داده شد. لذا با استفاده از داده‌های آزمایش و معرفی توابع مذکور در نرم‌افزار SPSS، ضرایب هر کدام از توابع، مطابق جدول (۲) تعیین و مدل مذکور واسنجی شد. در جدول مذکور، آماره F بیانگر معنی‌داری کلی مدل رگرسیونی در تخمین مقادیر کسر  $\frac{EC_f - EC_{eq}}{EC_i - EC_{eq}}$  بود. سپس اعتبار مدل‌های مذکور در تخمین نتایج مرحله‌ی دوم آبخشوی، از طریق روابط (۸) الی (۱۳) ارزیابی شد (جدول ۳). برای اولویت‌بندی مدل‌ها، هر مدلی که آماره RMSE، ME و CRM آن نزدیک به صفر بود و یا آماره‌های  $R^2$  و EF آن نزدیک به عدد یک بود، به‌عنوان مدل بهینه انتخاب شد. از نظر آماره‌های ME، RMSE،  $R^2$ ،  $R^2_{adj}$  و EF اولویت انتخاب مدل بهینه به ترتیب مربوط به مدل‌های نمایی و خطی بود. مدل‌های درجه دوم، توانی و لگاریتمی در اولویت‌های بعدی قرار گرفتند. از لحاظ مقدار آماره CRM مدل خطی نسبت به مدل نمایی برتری یافت، زیرا بیشتر بودن مقدار آماره CRM نشان‌دهنده‌ی بیش برآوردی مدل بود. برای مشاهده همبستگی بین مقادیر واقعی و تخمین زده شده، عملکرد مدل‌های مذکور در شکل (۶) نشان داده شد. بر این اساس نزدیک‌ترین و دورترین مقادیر به داده‌های واقعی، به ترتیب توسط مدل نمایی و مدل لگاریتمی تخمین زده شد. نتیجه‌ی کلی این بود که مدل نمایی از لحاظ آماری و مدل خطی از لحاظ سادگی در بهره‌برداری، به‌عنوان مدل‌های بهینه تخمین مقادیر کسر  $\frac{EC_f - EC_{eq}}{EC_i - EC_{eq}}$  برگزیده شد. با توجه به شکل (۵) اگر متغیر مذکور از طریق رابطه (۱) مدل‌سازی می‌شد، ضریب تبیین مدل‌های خطی، نمایی، لگاریتمی، درجه دوم و توانی به ترتیب برابر با ۰/۳۹۲، ۰/۵۵۷، ۰/۴۰۴، ۰/۴۰۶ و ۰/۵۶۲ بود.

در شکل (۵) مشاهده شد که با فاصله گرفتن از زهکش، پراکندگی نقاط نسبت به منحنی آبخشوی بیشتر شد. یعنی تفاوت مقادیر شوری در ستون‌های نیم‌رخ خاک، باعث کاهش ضریب  $R^2$  شد. به‌طور کلی در فرایند آبخشوی، برخی نقاط در نیم‌رخ خاک بین دو زهکش بیش از حد شسته شده و نقاط دیگر کمتر درگیر آبخشوی بود، لذا تفاوت مقادیر شوری در شبکه‌ی نیم‌رخ خاک وجود داشت و همبستگی کمتری برقرار بود. علت مقادیر کم به‌دست آمده برای ضریب  $R^2$  این بود که در رابطه (۱)، فقط تغییرات شوری در عمق خاک، به‌عنوان متغیر مستقل در نظر گرفته شده بود. در حالی که نتایج این پژوهش نشان داد که علاوه بر عمق خاک، در فواصل افقی از زهکش نیز تغییرات شوری وجود دارد. بنابراین بدون در نظر گرفتن تأثیر فاصله از زهکش، میزان اعتماد به نتایج به‌دست آمده از رابطه (۱) کاهش می‌یابد. در تحقیق مشابهی در منطقه رامشیر خوزستان، مقادیر شوری خاک برای شرایط با و بدون کاربرد ماده‌ی اصلاح کننده اسید سولفوریک مدل‌سازی شد. مدل‌های خطی، لگاریتمی، معکوس، درجه دوم و سوم، توانی، لجستیک و نمایی، بین مقادیر کسرهای  $\frac{EC_f - EC_{eq}}{EC_i - EC_{eq}}$  و  $\frac{Dlw}{Ds}$  برآزش داده شد. نتایج نشان داد مدل‌های درجه دوم و سوم، بیشترین همبستگی را بین کسرهای مذکور داشت (پاپین و همکاران، ۱۳۹۶). در تحقیقی در اراضی زراعی دانشگاه آزاد اسلامی واحد میانه با کاربرد ۱۰۰ سانتی‌متر آب آبخشوی در چهار تناوب ۲۵ سانتی‌متری، نمونه‌های خاک از اعماق ۰-۲۵، ۲۵-۵۰، ۵۰-۷۵، ۷۵-۱۰۰، ۱۰۰-۱۲۵ و ۱۲۵-۱۵۰ سانتی‌متری برداشت شد. چهار مدل توانی، نمایی، معکوس و لگاریتمی به داده‌ها برآزش داده شد و از میان آن‌ها، مدل لگاریتمی با رابطه‌ی  $\frac{EC_f - EC_{eq}}{EC_i - EC_{eq}} = 0.071 - 0.112 \ln \left( \frac{Dlw}{Ds} \right)$  به‌عنوان مدل برتر انتخاب شد (نظری، ۱۳۹۶).

#### مدل‌سازی دو بُعدی و ارزیابی مدل‌ها

با استفاده از داده‌های آزمایشگاهی، عملیات آبخشوی در شبکه‌ی نیم‌رخ خاک بین دو زهکش مدل‌سازی شد. برای این منظور روابط



شکل ۵- منحنی‌های آبشویی با روابط مختلف تجربی، در عمق خاک

غرق آبی آبشویی شد. بر اساس نتایج حاصل، رابطه‌ی تجربی نمایی  $\frac{EC_f - EC_{eq}}{EC_i - EC_{eq}} = 0.0764 \left(\frac{D_{iw}}{D_s}\right)^{-0.864}$  برای آبشویی معرفی شد (Pazira et al., 1998). در تحقیقی در اراضی شور و سدیمی جنوب خوزستان، با کاربرد ۱۰۰ سانتی متر آب در چهار دوره متناوب آبیاری، آبشویی خاک مدل سازی شد. بر اساس نتایج به دست آمده، مدل لگاریتمی با رابطه  $\frac{EC_f - EC_{eq}}{EC_i - EC_{eq}} = -0.035 - 0.22 \ln\left(\frac{D_{iw}}{D_s}\right)$  و ضریب همبستگی ۰/۹۲۵، مناسب‌ترین مدل برای شوری زدایی خاک‌های مورد آزمون بود (اسدی کپورچال و همکاران، ۱۳۹۱). در تحقیقی نیز چهار مدل ریاضی شامل مدل‌های توانی، معکوس، لگاریتمی و نمایی بر مقادیر هدایت الکتریکی عصاره اشباع خاک برآزش داده شد. بهترین مدل تجربی از نظر ضریب همبستگی بالاتر و خطای استاندارد کمتر برای هر روش آبشویی مشخص گردید که مدل لگاریتمی مناسب‌تر بود (بهبهانی‌زاده رضائیان و همکاران، ۱۳۹۶).

اما با استفاده از مدل توسعه داده شده در این پژوهش، ضرایب تبیین مدل‌های مذکور به ترتیب برابر با ۰/۶۱۴، ۰/۵۵۵، ۰/۹۴، ۰/۷۹۶ و ۰/۵۸۷ شد که دستاورد کاربردی مطلوبی بود. در گذشته نیز تحقیقات مشابهی در این باره صورت گرفت. در تحقیقی، خاکی با بافت رسی سیلتی لومی و شوری اولیه  $40 \left(\frac{dS}{m}\right)$  تحت آبشویی غرق آب دائم قرار گرفت. نتایج نشان داد منحنی آبشویی نمک‌ها در نیمرخ خاک، از شکل عمومی خاصی تبعیت نکرد و معادله‌ی آن به شرح  $\frac{D_w}{D_s} = \frac{1}{5} \left(\frac{EC_i}{EC_f}\right) + 0.15$  بود (Reeve et al., 1955). در تحقیقی در بخش مرکزی خوزستان، خاکی با بافت رسی سیلتی و هدایت الکتریکی  $65 \left(\frac{dS}{m}\right)$  به صورت غرق آب متناوب آبشویی شد. بر اساس نتایج به دست آمده، رابطه‌ی تجربی هذلولی  $\frac{EC_f - EC_{eq}}{EC_i - EC_{eq}} = \frac{0.07}{D_s} + 0.023$  برای آبشویی نمک‌ها ارائه شد (Pazira and Kawachi, 1981). در تحقیق دیگر در استان خوزستان، خاک‌هایی دارای بافت لومی رسی و هدایت الکتریکی اولیه  $38 \left(\frac{dS}{m}\right)$  به صورت



جدول ۲- ضرایب شکل‌های مختلف مدل‌های تجربی

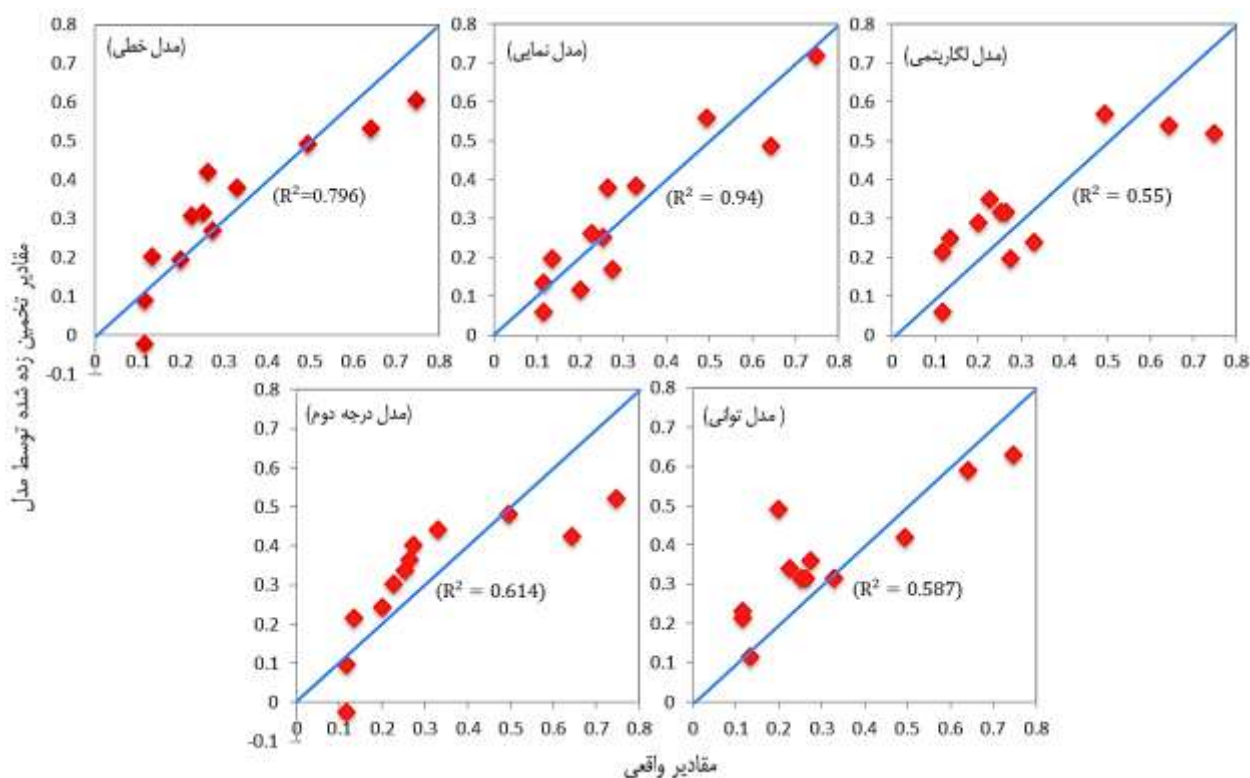
شکل توانی	شکل درجه دوم	شکل لگاریتمی	شکل نمایی	شکل خطی	ضرایب
$0.316^{**(-9/174)}$	$0.822^{**(-3/4.5)}$	$0.316^{**(-3/838)}$	$0.278^{*(-2/973)}$	$0.358^{*(4/-64)}$	A <sub>0</sub>
$0.0001^{**(-5/521)}$	$-1/528^{ns(-1/87)}$	$0.0001^{**(-3/5)}$	$-0.953^{ns(-1/75)}$	$-0.436^{*(-4/179)}$	A <sub>1</sub>
$0.0001^{**(-3/84)}$	$0.621^{ns(1/738)}$	$0.0001^{*(3/-0.5)}$	$0.737^{*(-2/979)}$	$0.45^{*(4/256)}$	A <sub>2</sub>
-	$0.0001^{ns(-1/36)}$	-	$0.0001^{ns(-1/318)}$	-	A <sub>3</sub>
-	$0.0001^{**(-4/132)}$	-	$0.0001^{**(-5/137)}$	-	A <sub>4</sub>
-	$0.482^{**(-4/153)}$	-	-	-	A <sub>5</sub>
۷/۷*	۸/۲۶**	۷/۷*	۳۱/۹**	۱۷/۷۹**	F آماره

ns، \* و \*\*: به ترتیب بیانگر عدم تفاوت معنی‌دار و تفاوت معنی‌دار در سطح احتمال ۵ و ۱ درصد بوده و مقادیر داخل پرانتز، آماره t می‌باشد.

جدول ۳- شاخص‌های آماری برای ارزیابی اعتبار مدل‌های تجربی

CRM	EF	R <sub>adj</sub> <sup>2</sup>	R <sup>2</sup>	RMSE (%)	ME	نوع تابع
$-1.04 \times 10^{-2(1)}$	$0.798^{(2)}$	$0.751^{(2)}$	$0.796^{(2)}$	$28/0.6^{(2)}$	$0.158^{(2)*}$	خطی
$0.118^{(3)}$	$0.846^{(1)}$	$0.927^{(1)}$	$0.94^{(1)}$	$24/5^{(1)}$	$0.154^{(1)}$	نمایی
$-0.029^{(4)}$	$0.573^{(5)}$	$0.45^{(5)}$	$0.55^{(5)}$	$34/0.3^{(3)}$	$0.228^{(4)}$	لگاریتمی
$-3.5 \times 10^{-4(2)}$	$0.616^{(3)}$	$0.529^{(3)}$	$0.614^{(3)}$	$28/66^{(5)}$	$0.225^{(3)}$	درجه دوم
$-0.143^{(5)}$	$0.604^{(4)}$	$0.495^{(4)}$	$0.587^{(4)}$	$36/17^{(4)}$	$0.29^{(5)}$	توانی

#: اعداد داخل پرانتز نشان دهنده اولویت انتخاب مدل، بر اساس شاخص‌های آماری است.



شکل ۶- همبستگی بین مقادیر واقعی و تخمینی کسر  $(EC_f - EC_{eq}) / (EC_i - EC_{eq})$

$$\left( \frac{EC_f - EC_{eq}}{EC_i - EC_{eq}} \right) = f \left( \frac{D_w}{D_s}, \frac{L_i}{L}, A_0 \right) \quad \text{و} \quad \left( \frac{EC_f - EC_{eq}}{EC_i - EC_{eq}} \right) = f \left( \frac{D_w}{D_s}, A_0 \right)$$

مورد مقایسه قرار گرفت. توابع رگرسیونی در قالب شکل‌های خطی،

### نتیجه گیری

در این پژوهش، مدل‌سازی آبشویی از طریق روابط

- مفاهیم نظری و روابط حاکم بر آبشویی نمک‌ها از نیمرخ خاک. مجله مدیریت آب در کشاورزی. ۴(۱): ۳۹-۴۸.
- محمدزاده، م.، همایی، م. و پذیرا، ا. ۱۳۹۲. مدلی کاربردی برای بهسازی خاکهای شور و سدیمی. مجله حفاظت منابع آب و خاک. ۳(۱): ۴۳-۵۹.
- مشعل، م.، دانشور، م.، امامی، س. و وراوی پور، م. ۱۳۹۲. ارزیابی مدل‌های نظری آبشویی املاح خاک (مطالعه‌ی موردی: اراضی لابار-دشت ساوه). مجله مدیریت آب و آبیاری. ۳(۱): ۱۲۱-۱۳۴.
- نظری، ن. ۱۳۹۶. تعیین یک مدل تجربی برای آبشویی خاک‌های شور اراضی زراعی دانشگاه آزاد اسلامی واحد میانه. فصلنامه بوم‌شناسی گیاهان زراعی، ۱۳(۲): ۳۵-۵۱.
- Corwin, D. L., Rhoades, J. D. and Symone, J. 2007. Leaching requirement for soil salinity control: Steady - state versus transient models. *Journal of Agriculture Water Management*. 90(3):165-180.
- Da Fonseca, A. F., Melfi, A. J., Monteiro, F. A., Montes, C. R., Almeida, V. V. and Herpin, U. 2007. Treated sewage effluent as a source of water and nitrogen for Tifton 85 bermudagrass. *Journal of Agriculture Water Management*. 87: 328-336.
- Hoffman, G. J. 1980. Guideline for reclamation of salt affected soils. *Proceeding of International American Salinity and Water Management, Technical Conference*. Juan. Mexico. 49-64.
- Metternich, G. I. and Zinck, J. A. 2003. Remote sensing of soil salinity: potentials and constraints. *Journal of Remote Sensing of Environment*. 58(1-2):1-20.
- Pazira, E., and T., Kawachi. 1981. Studies on appropriate depth of leaching water, Iran. A Case study. *Journal of Integrate Agricultural Water Use and Freshening Reservoirs*, Kyoto University Japan. 6: 39-49.
- Pazira, E., Keshavarz, A. and K., Torii. 1998. Studies on appropriate depth of leaching water, *International Workshop on Use of Saline and Brackish Water for Irrigation*, Indonesia. 328-338.
- Pazira, E. and Homaeae, M. 2010. Salt leaching efficiency of subsurface drainage systems at presence of diffusing saline water table boundary: a case study in Khuzestan plains, Iran. *Proceedings of International of the 2th World Congress of the International Commission of Agricultural Engineering (CIGR)*, Quebec City, Canada. 1-15
- Raij, I., Simunek, J., Ben-Gal, A. and Lazarovitch, N. 2016. Water flow and multicomponent solute transport in drip-irrigated lysimeters. *Journal of Water Resource*. 52(8): 6557-6574.
- Reeve, R. C., Pillsbury, A. F. and Wilcox, L. V. 1955. Reclamation of saline and high boron soil in the Coachella Valley of California. *Hilgardia*. 24: 69-91.
- Smedema, L. K., Vlotman, W. F. and Rycroft, D. W. 2004. *Modern Land Drainage: Planning, Design*

نمایی، لگاریتمی، درجه دوم و توانی، به‌عنوان مدل‌های آبشویی در نظر گرفته شد. بر اساس نتایج حاصل، فاصله گرفتن از زهکش، بر مقدار شوری نهایی در یک عمق ثابت از نیمرخ خاک مؤثر بود. بنابراین علاوه بر عمق خاک، فاصله از زهکش نیز در مدل آبشویی توسعه داده شده توسط نگارنده (مدل دو بُعدی) در نظر گرفته شد. نتایج نشان داد در مدل‌سازی یک بُعدی، ضریب تبیین ( $R^2$ ) در شکل‌های خطی، نمایی، لگاریتمی، درجه دوم و توانی به‌ترتیب برابر با ۰/۳۹۲، ۰/۵۵۷، ۰/۴۰۴، ۰/۴۰۶ و ۰/۵۶۲ بود. اما در مدل‌سازی دو بُعدی، به‌ترتیب برابر با ۰/۷۹۶، ۰/۹۴، ۰/۵۵، ۰/۶۱۴ و ۰/۵۸۷ شد. افزایش ضریب همبستگی در مدل‌سازی دو بُعدی، نشان‌دهنده‌ی افزایش دقت در مدل‌سازی آبشویی نیمرخ خاک بین دو زهکش بود. در ارزیابی مدل‌های دو بُعدی، از نظر آماره‌های  $ME$ ،  $RMSE$ ،  $R^2$ ،  $EF$  و  $R^2_{adj}$ ، به‌ترتیب مدل‌های نمایی و خطی به‌عنوان مدل بهینه انتخاب شد. مدل‌های درجه دوم، توانی و لگاریتمی در اولویت‌های بعدی قرار گرفتند. نتیجه‌ی کلی این بود که برای تخمین دقیق‌تر مقادیر شوری در عملیات آبشویی اولیه، می‌توان از مدل توسعه داده شده در این پژوهش استفاده کرده و بعد فاصله از زهکش را نیز در مدل‌سازی آبشویی لحاظ نمود.

## منابع

- اسدی کپورچال، ص.، همایی، م. و پذیرا، ا. ۱۳۹۱. مدل‌سازی آب آبشویی مورد نیاز برای بهسازی خاک‌های شور. مجله حفاظت منابع آب و خاک. ۲(۲): ۶۵-۸۳.
- اسدی کپورچال، ص. و همایی، م. ۱۳۹۶. کاربرد مدل‌های شوری‌زدایی به‌منظور تدوین برنامه تناوب زراعی خاک‌های شور و سدیمی (مطالعه موردی منطقه رامهرمز). مجله حفاظت منابع آب و خاک. ۶(۴): ۹۱-۱۰۶.
- بهبهانی‌زاده رضائیان، ز.، پذیرا، ا.، پناهپور، ا. و ظهراپی، ن. ۱۳۹۶. مقایسه روش‌های مختلف آبشویی نمک‌های محلول از نیمرخ خاک‌های شور و سدیمی. فصلنامه تخصصی علوم و مهندسی آب دانشگاه آزاد اسلامی واحد اهواز. ۱۵(۷): ۷۹-۹۳.
- پاین، پیوند، گلابی، م. و مکوندی، ا. ۱۳۹۶. بررسی مدل‌های ریاضی آبشویی در منطقه رامشیر استان خوزستان. سومین همایش ملی مدیریت آب در مزرعه، اسفند ماه، کرج، ایران.
- رجب‌زاده، ف.، پذیرا، ا. و مهدیان، م. ج. ۱۳۸۹. بررسی و تعیین یک مدل تجربی برای آبشویی خاک‌های شور و سدیمی بخش میانی استان خوزستان. مجله پژوهش‌های حفاظت آب و خاک. ۱۸(۳): ۶۱-۸۴.
- شریفی‌پور، م.، ناصری، ع. ع.، هوشمند، ع.، حسن اقلی، ع. و معاضد، ه. ۱۳۹۶. آبشویی و اصلاح اراضی شور و سدیمی، بخش اول:

- Assessing salinity leaching efficiency in three soils by the HYDRUS-1D and -2D simulations. *Journal of Soil and Tillage Research*. 194: 104342.
- Yu, X., Dan, H. and Xin, P. 2018. Method for Improving Leaching Efficiency of Coastal Subsurface Drainage Systems. *Journal of Irrigation and Drainage Engineering*. 144(8): 1-11.
- and Management of Agricultural Drainage Systems (2th ed.). Balkema publishers.
- Wallender, W. W. and Tanji, K. K. 2011. Agricultural salinity assessment and management (ed). American Society of Civil Engineers (ASCE), New York.
- Yang, T., Simunek, J., Mo, M., Mccullough, B., Shahrokhnia, H., Cherchian, S. and Wu, L. 2019.

## Two-Dimensional Modeling of Salts Leaching, in the Soil Profile between Two Drains

R. Saeidi<sup>1</sup>

Received: Sep.17, 2020

Accepted: Jan.19, 2021

### Abstract

Leaching modeling in the conditions of non-uniformity leaching in soil profile is desalination challenges. The final salinity in the soil profile has different values in two dimensions of soil depth and distance from the drainage pipe. Therefore, estimation the salinity values in the soil profile requires two-dimensional modeling of leaching. In this research, the data required for modeling were prepared by soil profile leaching in a physical model with dimensions (height  $\times$  width  $\times$  length) of  $1 \times 0.5 \times 2$  m. In this model, soil drainage conditions were created for half the distance between the two drains. The target of this study was to compare the relationships of one-dimensional (in soil depth) and two-dimensional (in soil depth and distance from drain) in leaching modeling. Regression models included linear, exponential, logarithmic, polynomial and power functions. The results showed that in one-dimensional modeling, the coefficient  $R^2$  for linear, exponential, logarithmic, polynomial and power functions were equal to 0.392, 0.557, 0.404, 0.406 and 0.562, respectively. But in two-dimensional modeling, it was equal to 0.796, 0.94, 0.55, 0.614 and 0.587, respectively. Therefore, increasing the coefficient  $R^2$  in two-dimensional modeling, showed an increase in validity in leaching modeling. In evaluating two-dimensional models by terms of ME, RMSE,  $R^2$ ,  $R^2_{adj}$  and EF, were selected exponential and linear models as the optimal model, respectively. For leaching modeling in the soil profile between two drains, using the two-dimensional model had better performance than the one-dimensional model.

**Keywords:** Desalination, Drainage, Physical model, Salinity estimation

---

1- Ph.D. of irrigation and drainage Engineering, Department of Water Engineering, Faculty of Agriculture and Natural Resources, Imam Khomeini International University, Qazvin, Iran  
(\*- Corresponding Author Email: saeidi@org.ikiu.ac.ir)