

ارزیابی مدل Hydrus-1D در پیش‌بینی هدایت الکتریکی و یون‌های پروفیل خاک (مطالعه موردی؛ کشت نیشکر تحت تنش شوری)

منا گلابی*، محمد الباجی و عبد علی ناصری^۱

(تاریخ دریافت: ۱۳۹۴/۰۷/۱۳؛ تاریخ پذیرش: ۱۳۹۶/۰۳/۲۱)

چکیده

در پژوهش حاضر از نرم‌افزار Hydrus-1D جهت شبیه‌سازی میزان هدایت الکتریکی، اسیدیته و یون‌های سدیم، پتاسیم، کلسیم، منیزیم، کلر و سولفات پروفیل خاک استفاده گردید. آزمایش‌های مزرعه‌ای در مرکز تحقیقات نیشکر بر روی نیشکر واریته CP۴۸-۱۰۳ با یک تیمار آب کارون و سه تیمار زه‌آب رقیق شده با سه تکرار انجام شد. نمونه‌برداری از سه عمق صفر تا ۳۰، ۶۰-۳۰ و ۹۰-۶۰ سانتی‌متری قبل از هر آبیاری انجام و در آزمایشگاه هدایت الکتریکی و آنیون‌ها و کاتیون‌ها عصاره اشباع خاک اندازه‌گیری گردید. با هدف صحت‌سنجی نرم‌افزار Hydrus-1D ابتدا آنالیز حساسیت و واسنجی انجام شد. آنالیز حساسیت مدل نشان داد که نرم‌افزار نسبت به رطوبت حجمی اشباع حداکثر حساسیت را دارا می‌باشد. کمترین حساسیت مدل نسبت به عکس پتانسیل ورود هوا به داخل خاک، پارامتر پیچ و خم (تورجسیتی) در تابع جریان و رطوبت حجمی باقیمانده بوده و نسبت به هدایت هیدرولیکی اشباع حساسیت متوسط دارد. همچنین مدل نسبت به پارامتر تجربی شکل منحنی رطوبتی خاک حساس نمی‌باشد. از واسنجی مدل ضرایب هدایت هیدرولیکی اشباع، رطوبت حجمی باقیمانده، رطوبت حجمی اشباع، عکس پتانسیل ورود هوا به خاک، پارامتر تجربی شکل منحنی رطوبتی خاک و پارامتر تورجسیتی در تابع جریان به ترتیب $(\text{cm}^3/\text{cm}^3)$ ، 0.04 ، $(\text{cm}^3/\text{cm}^3)$ ، 0.63 ، (cm^{-1}) ، 0.12 ، 0.12 و 0.6 به دست آمدند. نتایج صحت‌سنجی مدل نشان داد که ضریب تعیین برای تمام پارامترهای مورد بررسی بیش از 0.85 به دست آمده که بیانگر توانایی مدل در شبیه‌سازی میزان هدایت الکتریکی، اسیدیته، آنیون‌ها و کاتیون‌ها را می‌باشد. در مدل‌سازی صورت گرفته مقدار NRMSE بین 0.11 تا 0.18 درصد به دست آمده که عملکرد مناسب مدل را نشان می‌دهد. مقدار معیار کارایی نش- ساتکلیف بین 0.72 تا 0.8 بیانگر تطابق مناسب مدل با واقعیت می‌باشد. ضریب باقیمانده در این مقاله برای هدایت الکتریکی، اسیدیته و یون‌های سدیم، پتاسیم، کلسیم و منیزیم منفی و برای کلر و سولفات مثبت برآورد شده است.

واژه‌های کلیدی: زه‌آب، مدل Hydrus-1D، نیشکر

۱. گروه آبیاری و زهکشی، دانشکده مهندسی علوم آب، دانشگاه شهید چمران اهواز

*: مسئول مکاتبات: پست الکترونیکی: mona_golabi@yahoo.com

مقدمه

اکثر مردم بر این عقیده‌اند که فرسایش بادی فقط در مناطق املاح خاک در اثر آبیاری، در مناطق خشک و نیمه‌خشک به دلیل کیفیت آب، تبخیر و خصوصیات خاک افزایش می‌یابد. داشتن آگاهی از مقدار نمک‌های موجود در خاک به دلیل تأثیر مستقیم بر میزان محصول تولیدی از اهمیت خاصی برخوردار است. زیرا تجمع نمک‌ها در خاک، جذب آب توسط گیاه را با مشکل مواجه ساخته و بر کمیت و کیفیت محصول تولیدی تأثیر می‌گذارد. به منظور تعیین مقدار نمک و یون‌های موجود در خاک، دو روش اصلی وجود دارد: روش اول، نمونه‌برداری و انجام آزمایش بوده، که روشی وقت‌گیر و هزینه‌بر می‌باشد و روش دوم، استفاده از مدل‌های شبیه‌ساز است. در مقایسه با روش اول، کاربرد مدل‌های شبیه‌ساز روشی ارزان و سریع می‌باشد. در سال‌های اخیر، مدل‌های شبیه‌ساز معتبری برای پاسخ‌گویی به مسائل مربوط به آب، خاک و گیاه ارائه و توسعه یافته‌اند، که می‌توان به مدل SALTMED (۱۷)، مدل SWATRE، MACRO (۱۳)، SWAP (۱۱)، LEACHM (۱۹)، Hydrus-1D (۱۶) اشاره نمود.

مدل Hydrus-1D قادر است حرکت یک بعدی آب، املاح، گرما و جذب آب توسط ریشه همچنین رشد ریشه در شرایط اشباع و غیر اشباع را در خاک شبیه‌سازی نماید. از این مدل در مطالعات آب و خاک دونتسوا و همکاران، جکیوز و همکاران و جیانگ و همکاران استفاده شده است (۵، ۹ و ۱۰). یانگ و همکاران از مدل Hydrus-1D جهت شبیه‌سازی سرعت نفوذ لحظه‌ای و تجمعی در یک ستون خاک و مقایسه نتایج با مدل گرین-آپت استفاده کرده‌اند و نتایج نشان داد که مدل از دقت مناسبی برخوردار است (۲۰).

هیئت‌ول و مک‌کاری مدل Hydrus-1D را به منظور مدل‌سازی پتانسیل انتقال نیتروژن در، شرایط غیر اشباع در منطقه وسیعی، در حومه ایالت کلرادو که در مجاورت سیستم فاضلاب قرار داشت، به کار بردند و نتایج حاکی از دقت بالای مدل در تخمین انتقال نیترات حاصل از فاضلاب و سرعت نیترات‌زدایی بود (۸).

محمدی و دلبری از نرم‌افزار Hydrus-1D جهت شبیه‌سازی حرکت آب و نمک در خاک در مزرعه تحت آبخشوی استفاده کردند. نتایج نشان داد که بیشترین دقت در شبیه‌سازی هدایت الکتریکی، کل مواد جامد محلول و کلسیم عصاره اشباع خاک در عمق ۴۰ سانتی‌متری بود (۴).

راموس و همکاران به منظور بررسی انتقال املاح در دو نوع خاک با بافت متوسط و درشت تحت شرایط مزرعه در طی سه سال از مدل HYDRUS-1D استفاده کردند. آنها نتایج آزمایشگاهی و شبیه‌سازی میزان آب، غلظت Na^+ ، Ca^{2+} ، Mg^{2+} و EC محلول، SAR و ESP را با هم مقایسه کردند. پیش‌بینی مدل برای اندازه‌گیری‌های مزرعه‌ای میزان آب، شوری و غلظت سدیم محلول موفقیت‌آمیز بود، در حالی که برآورد Ca^{2+} ، Mg^{2+} ، SAR و ESP کمتر از مقادیر اندازه‌گیری شده بود. در خاتمه آنان مدل HYDRUS-1D را به عنوان ابزاری مؤثر برای مدیریت آبیاری و پیش‌بینی اثرات کیفیت آب آبیاری بر روی کیفیت آب زیرزمینی و خاک معرفی کردند (۱۸).

فورکاتسا و سومر برای بررسی توزیع آب و املاح، صعود مویینه‌ای و شوری آب زیرزمینی کم عمق در اراضی تحت کشت با بافت شن لومی مطالعات صحرائی و مدل شبیه‌سازی را به کار بردند. نتایج حاکی از این بود که مدل HYDRUS-1D نوسانات سریع شوری خاک را در طول دوره آبخشوی ضعیف برآورد کرد. در حالی که نتایج شبیه‌سازی انتقال املاح نسبت به تعادل شوری در منطقه ریشه قابل قبول بود، به این دلیل که غلظت نمک مشاهده‌ای و شبیه‌سازی شده در ابتدا و انتهای دوره تقریباً یکسان بود (۷).

ذاکرنیا و همکاران مدل HYDRUS-1D را برای تخمین ویژگی‌های هیدرولیکی خاک و بررسی تغییرات زمانی آنها در اثر آبیاری‌های مکرر با آب شور به کار بردند. نتایج تحقیق نشان داد که در صورت داشتن داده‌های کافی، مدل HYDRUS-1D توانایی بالایی در برآورد ویژگی‌های هیدرولیکی خاک و روند تغییرات زمانی آنها دارد (۲).

اژدری و همکاران با استفاده از مدل HYDRUS-1D به



شکل ۱. موقعیت مکانی منطقه مورد مطالعه

شرکت کشت و صنعت نیشکر و صنایع جانبی اهواز استفاده گردید (۳). این مرکز در ۴۰ کیلومتری جنوب اهواز، غرب رودخانه کارون و شرق جاده اهواز- خرمشهر، در طول جغرافیایی $15^{\circ} 31'$ تا 40° شرقی و عرض جغرافیایی 31° شمالی جنب ایستگاه اصلی پمپاژ آب کشت و صنعت امیر کبیر قرار گرفته است. منطقه محل اجرای طرح از لحاظ جغرافیایی در پایین‌ترین قسمت دشت آبرفتی رودخانه کارون قرار گرفته و دارای آب و هوای خشک می‌باشد، همچنین در تقسیم بندی اقلیمی به روش گوسن استان خوزستان جزء اقلیم نیمه‌بیابانی است. این منطقه بارندگی تابستانه ندارد و بیشترین بارندگی در زمستان و فصل سرد انجام می‌گیرد. شکل (۱) موقعیت مکانی منطقه مورد مطالعه را نشان می‌دهد.

با هدف تعیین خصوصیات فیزیکی و شیمیایی خاک قبل از کشت، اواخر مرداد ماه ۱۳۸۶، ابتدا زمین مورد نظر انتخاب و از پنج نقطه زمین (به شکل W) از اعماق صفر تا ۳۰، ۶۰-۳۰ و ۹۰-۶۰ سانتی‌متری نمونه‌برداری انجام گرفت. از نمونه‌های برداشت شده نمونه‌ی مرکب تهیه گردید. بعد از انتقال نمونه‌ها به آزمایشگاه مرکز تحقیقات شرکت کشت و صنعت نیشکر، بافت، اسیدیته، هدایت الکتریکی، وزن مخصوص ظاهری، آنیون‌ها و کاتیون‌های نمونه مرکب اندازه‌گیری شد. برای تعیین جرم مخصوص ظاهری از هر لایه خاک نمونه‌های دست نخورده با استفاده از استوانه‌های نمونه‌برداری تهیه و جرم مخصوص ظاهری هر نمونه تعیین شد. نتایج آنالیز نمونه‌های خاک در جدول (۱) ارائه شده است.

اصلی‌ترین هدف این پژوهش ارزیابی مدل Hydrus-1D در

بررسی روند تغییرات رطوبت و نیتروژن در خاک در مزرعه‌ای که تحت سیستم آبیاری قطره‌ای قرار داشت، پرداختند. نتایج نشان داد که تکرار آبیاری هر ۴۸ ساعت یکبار می‌تواند میزان رطوبت ناحیه ریشه را در حد ظرفیت مزرعه نگه داشته، جریان عمودی آب را کند و میزان نفوذ عمقی را به حداقل برساند (۱). استان خوزستان از جمله مناطق خشک و نیمه‌خشک ایران محسوب می‌شود. یکی از محدودیت‌های اصلی کشاورزی استان و به‌ویژه جنوب استان پس از مسئله کمبود آب، شوری خاک است. سدیمی بودن خاک باعث تخریب خاکدانه‌ها، پراکندگی ذرات رس، سله‌بندی، کاهش تخلخل و نفوذپذیری می‌شود. پایش شوری و یون‌های موجود در خاک به‌منظور ارزیابی اثرات آبیاری با آب‌های نامتعارف می‌تواند کمک به‌سزایی در افزایش راندمان کشاورزی باشد که در این زمینه مدل HYDRUS-ID با توجه به کارایی و قابلیت‌های آن می‌تواند مفید واقع شود. بنابراین در تحقیق حاضر توانایی مدل Hydrus-ID در شبیه‌سازی شوری و میزان یون‌های موجود در خاک تحت کشت نیشکر در شرایط استفاده از زه‌آب رقیق شده مورد بررسی قرار گرفت، تا روش‌های سخت‌افزاری را به روش‌های نرم‌افزاری در منطقه مورد مطالعه سوق داد. هدف اصلی مقایسه آماری نتایج شبیه‌سازی شده با مقادیر واقعی صحرائی بود.

مواد و روش‌ها

منطقه مورد مطالعه

در تحقیق حاضر از داده‌های اندازه‌گیری شده از شهریور (۱۳۸۶) تا آذر ماه (۱۳۸۷) در مزرعه آزمایشی مرکز تحقیقات

جدول ۱. ویژگی‌های خاک مزرعه طرح

عمق نمونه (cm)	EC (dS/m)	pH	وزن مخصوص ظاهری (gr/cm ³)	درصد رطوبت اشباع	درصد رطوبت حجمی ظرفیت زراعی	درصد رطوبت حجمی نقطه پژمردگی	بافت
۰-۳۰	۲/۳۵	۷/۸۸	۱/۵۴	۴۴	۲۰	۱۱/۴	Sandy Loam
۳۰-۶۰	۲/۱۰	۷/۹۴	۱/۵۵	۵۰	۳۶/۵	۱۹/۳	Sandy Clay Loam
۶۰-۹۰	۲/۲۱	۷/۹۴	۱/۵۵	۵۰	۳۶/۱	۱۹/۲	Sandy Clay Loam

CP۴۸-۱۰۳ و مقایسه مقادیر اندازه‌گیری با مقادیر شبیه‌سازی شده توسط مدل Hydrus-1D می‌باشد.

تشریح مدل Hydrus-1D

مدل Hydrus-1D یکی از مدل‌های پیشرفته با قابلیت شبیه‌سازی حرکت یک بعدی آب، نمک، گرما و جذب آب توسط ریشه همچنین رشد ریشه در شرایط اشباع و غیر اشباع در خاک می‌باشد. این مدل به حل عددی معادله ریچاردز برای جریان آب در خاک و معادلات انتشار-پخشیدگی برای انتقال نمک و گرما می‌پردازد. در این مدل از اطلاعات مربوط به بافت خاک به همراه یک سری توابع انتقالی برای تعیین هدایت هیدرولیکی و منحنی رطوبت خاک استفاده می‌گردد. کلیه معادلات حرکت آب و نمک در Hydrus-1D به صورت عددی حل می‌شوند. برای حل معادله ریچاردز، از روش اجزای محدود گالرکین استفاده می‌شود. با فرض این که فاز گازی در فرآیند جریان نقش چندانی نداشته باشد و با صرف نظر کردن از جریان آب بر اثر شیب دمایی، حرکت یک بعدی آب در خاک به وسیله معادله ریچاردز به صورت زیر در مدل ارائه شده است (۱۶).

$$\frac{\partial \theta}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left[K(\theta) \left(\frac{\partial h}{\partial x} + \cos \beta \right) \right] - S \quad (1)$$

که در آن θ رطوبت حجمی $[L^3/L^3]$ ، زمان t [T]، هدایت هیدرولیکی غیراشباع $[L/T]$ ، h مکش ماتریک $[L]$ ، β زاویه بین مسیر جریان و محور عمودی، S آب جذب شده توسط ریشه از $[L^3/(L^3.T)]$ و x فاصله $[L]$.

توصیف مشخصات هیدرولیکی خاک مانند منحنی رطوبتی و هدایت هیدرولیکی غیراشباع در معادله فوق توسط روابط متعددی انجام شده است که از متداول‌ترین آنها رابطه وان

پیش‌بینی میزان هدایت الکتریکی، اسیدیته و یون‌های سدیم، پتاسیم، کلسیم، منیزیم، کلر و سولفات خاک تحت کشت نیشکر واریته CP۴۸-۱۰۳ می‌باشد. بدین منظور، از چهار سطح آب با هدایت الکتریکی آب معمول آبیاری منطقه (آب رودخانه) و هدایت الکتریکی ۳، ۴/۵ و ۶ دسی زیمنس بر متر جهت آبیاری استفاده گردید. به منظور تهیه آب با هدایت الکتریکی ۳، ۴/۵ و ۶ دسی زیمنس بر متر، زه‌آب‌های شرکت کشت و صنعت امیرکبیر با آب معمولی مخلوط شد. بدین منظور، زه‌آب با هدایت الکتریکی زیاد از شرکت با تانکری نزدیک زمین طرح منتقل و جهت هر بار آبیاری با آب معمول منطقه مخلوط و هدایت الکتریکی مورد نظر تهیه می‌شد. با هدف آگاهی از کیفیت آب آبیاری کاربردی، آنالیز کامل فیزیکی و شیمیایی آب آبیاری انجام گرفت. نتایج حاصل در جدول‌های (۲) و (۳) ارائه شده است.

روش آبیاری نیشکر در اراضی استان خوزستان جوی و پشته‌ای می‌باشد. برای آبیاری هر شیار با اتصال شلنگ به شیر تعبیه شده روی خطوط فرعی و باز کردن آن آبیاری انجام می‌گرفت. به منظور کنترل میزان آب مصرفی نیشکر در این مرحله با در نظر گرفتن نیاز آبی نیشکر در هر دور آبیاری، حجم آب و زمان مورد نیاز آبیاری هر شیار محاسبه گردید. علاوه بر آن دبی شیرهای خطوط فرعی نیز به روش حجمی اندازه‌گیری شد. بدین ترتیب با توجه به معلوم بودن حجم کل آب مصرفی به‌ازاء هر سطح شوری که در مخازن موجود بود، هر شیار به‌ازاء زمان محاسبه شده آبیاری می‌شد.

در این پژوهش هدف اصلی بررسی اثرات چهار سطح کیفیت آب بر تجمع املاح خاک تحت کشت نیشکر واریته

جدول ۲. تجزیه آب تهیه شده جهت آبیاری (زه آب رقیق شده)

طبقه بندی Classification	کاتیون ها (meq/l)				آنیون ها (meq/l)				مجموع مواد محلول TDS (mg/l)	نسبت جذب سدیم SAR	pH	EC (dS/m)	شماره نمونه
	کلسیم Ca ²⁺	منیزیم Mg ²⁺	پتاسیم K ⁺	سدیم Na ⁺	سولفات SO ₄ ²⁻	کلر Cl ⁻	بی کربنات HCO ₃ ⁻	کربنات CO ₃ ²⁻					
C ₁ S ₁	۵/۳۸	۸/۵۰	۰/۱۵	۲۴/۱۰	۱۳/۶۰	۳۰/۰۴	۳/۶۰	۰/۰۰	۱۱۲۵	۹/۱۵	۷/۷۵	۳/۰۰	S _۲
C ₁ S _۲	۶/۹۳	۸/۷۳	۰/۱۷	۲۵/۹۴	۱۷/۲۰	۴۵/۳۹	۳/۹۰	۰/۰۰	۱۵۰۰	۹/۲۷	۷/۸۴	۴/۵۰	S _۲
C ₁ S _۳	۷/۸۷	۹/۶۰	۰/۲۱	۲۹/۳۴	۱۹/۰۶	۶۰/۴۱	۴/۰۰	۰/۰۰	۲۰۰۰	۹/۹۳	۷/۷۸	۶/۰۰	S _۲

جدول ۳. آنالیز آب معمولی (S₁) مورد استفاده در طول فصل رشد (شهریور ۱۳۸۶ تا آبان ۱۳۸۷)

طبقه بندی Classification	کاتیون ها (meq/l)				آنیون ها (meq/l)				مجموع مواد محلول TDS (mg/l)	نسبت جذب سدیم SAR	pH	EC (dS/m)	ماه
	کلسیم Ca ²⁺	منیزیم Mg ²⁺	پتاسیم K ⁺	سدیم Na ⁺	سولفات SO ₄ ²⁻	کلر Cl ⁻	بی کربنات HCO ₃ ⁻	کربنات CO ₃ ²⁻					
C _۲ S _۱	۳/۰۰	۴/۰۰	۰/۱۲	۱۴/۰۰	۷/۰۰	۲۳/۴۳	۳/۲۰	۰/۰۰	۱۲۰۰	۷/۵۰	۸/۰۳	۱/۵۲	شهریور
C _۲ S _۲	۴/۴۰	۴/۲۰	۰/۱۰	۹/۰۰	۱۱/۰۰	۲۲/۰۳	۳/۲۰	۰/۰۰	۱۰۰۰	۴/۳۰	۷/۶۷	۱/۸۸	مهر
C _۲ S _۳	۵/۶۰	۳/۸۰	۰/۱۱	۹/۳۰	۵/۳۰	۲۲/۹۴	۳/۲۰	۰/۰۰	۱۲۰۰	۴/۳۰	۷/۹۰	۱/۸۹	آبان
C _۲ S _۴	۵/۸۰	۳/۹۰	۰/۱۱	۱۱/۱۰	۱۱/۰۰	۲۱/۰۵	۲/۵۰	۰/۰۰	۸۰۰	۵/۲۰	۷/۸۰	۱/۶۰	آذر
C _۲ S _۵	۴/۰۰	۱۳/۰۰	۰/۱۰	۷/۳۰	۱۰/۷۰	۱۹/۹۷	۳/۰۰	۰/۰۰	۸۰۰	۲/۵۰	۷/۲۷	۱/۵۰	دی
C _۲ S _۶	۵/۷۰	۲/۱۰	۰/۱۰	۱۰/۸۱	۸/۶۰	۱۸/۴۱	۳/۳۰	۰/۰۰	۱۰۰۰	۵/۴۵	۷/۶۷	۱/۴۰	بهمن
C _۲ S _۷	۵/۰۰	۳/۰۰	۰/۱۱	۱۰/۰۰	۶/۰۰	۲۴/۰۹	۲/۰۰	۰/۰۰	۱۲۰۰	۵/۰۰	۷/۸۹	۱/۸۵	اسفند
C _۲ S _۸	۴/۶۰	۵/۶۰	۰/۱۰	۱۳/۵۰	۶/۶۰	۲۴/۲	۳/۰۰	۰/۰۰	۸۰۰	۶/۰۰	۸/۰۴	۲/۱۱	فروردین
C _۲ S _۹	۵/۱۰	۵/۶۵	۰/۱۱	۶/۶۰	۸/۰۰	۲۴/۸۶	۵/۰۰	۰/۰۰	۱۲۰۰	۲/۹۰	۷/۸۳	۲/۳۲	اردیبهشت
C _۲ S _{۱۰}	۵/۰۰	۴/۴۰	۰/۱۲	۱۳/۵۰	۸/۰۰	۲۵/۸۳	۳/۰۰	۰/۰۰	۱۶۰۰	۶/۲۰	۷/۹۱	۲/۷۳	خرداد
C _۲ S _{۱۱}	۵/۴۰	۴/۸۰	۰/۱۲	۱۵/۵۰	۶/۶۰	۲۶/۸۸	۲/۶۰	۰/۰۰	۱۲۰۰	۶/۹۰	۷/۸۴	۲/۲۹	تیر
C _۲ S _{۱۲}	۵/۴۰	۶/۴۰	۰/۱۳	۱۵/۴۰	۶/۴۰	۲۹/۳	۲/۲۰	۰/۰۰	۱۶۰۰	۶/۴۰	۸/۳۳	۲/۴۰	مرداد
C _۲ S _{۱۳}	۵/۶۰	۶/۲۰	۰/۱۳	۱۸/۲۰	۱۱/۰۰	۲۷/۰۷	۳/۲۰	۰/۰۰	۱۶۰۰	۷/۵۰	۸/۲۲	۳/۱۶	شهریور
C _۲ S _{۱۴}	۶/۲۰	۵/۸۰	۰/۱۱	۱۸/۰۰	۹/۳۰	۲۶/۸۳	۲/۸۰	۰/۰۰	۱۶۰۰	۷/۳۰	۸/۱۴	۲/۳۴	مهر
C _۲ S _{۱۵}	۵/۶۰	۵/۶۰	۰/۱۱	۱۸/۸۰	۶/۴۰	۲۸/۰۹	۳/۸۰	۰/۰۰	۱۵۰۰	۷/۹۰	۷/۶۴	۲/۳۱	آبان

جدول ۴. دامنه تغییرات ضریب حساسیت (۱۲)

$S_c = 0$	بدون حساسیت
$0 < S_c < 0.3$	حساسیت کم
$0.3 < S_c < 1/5$	حساسیت متوسط
$1/5 < S_c$	حساسیت زیاد

مدل اجرا می‌گردد و نتایج خروجی به‌عنوان داده‌های خروجی پایه در نظر گرفته می‌شود، سپس در مراحل بعدی در هر بار اجرای مدل یکی از داده‌های ورودی مدل تغییر داده (میزان تغییر داده‌های ورودی در محدوده ضرایب ۰/۲۵، ۰/۵، ۰/۷۵، ۱/۲۵ و ... قرار دارد) و بقیه داده‌ها ثابت نگه داشته می‌شوند و مدل اجرا می‌گردد. سرانجام نتایج به‌دست آمده با نتایج پایه مقایسه و ضریب حساسیت محاسبه می‌شود. جهت تعیین ضریب از رابطه زیر استفاده می‌گردد (۱۲).

$$S_c = \frac{\frac{\Delta W}{\bar{W}}}{\frac{\Delta P}{\bar{P}}} \quad (6)$$

که در آن S_c ضریب حساسیت، ΔW اختلاف مقدار پارامتر خروجی قبل و بعد از تغییر داده ورودی، \bar{W} متوسط پارامتر خروجی قبل و بعد از تغییر داده ورودی، ΔP اختلاف مقدار ورودی یک پارامتر به مدل و \bar{P} متوسط مقدار ورودی یک پارامتر به مدل است. پس از محاسبه ضریب حساسیت مقادیر به‌دست آمده با دامنه تعریف شده (جدول ۴) مقایسه می‌گردد.

به‌منظور تحلیل حساسیت مدل از داده‌های یک تکرار شوری حداکثر (شوری شش دسی‌زیمنس بر متر) استفاده گردید و با تغییر مثبت و منفی ۵۰ درصدی ورودی‌های مدل نتایج استخراج شدند. تحلیل حساسیت بر هدایت هیدرولیکی اشباع، رطوبت حجمی باقیمانده، رطوبت حجمی اشباع، عکس پتانسیل ورود هوا به داخل خاک، پارامتر تجربی شکل منحنی رطوبتی خاک و پارامتر تورجسیتی در تابع جریان انجام گرفت.

پس از آنالیز حساسیت، واسنجی مدل با هدف تنظیم ورودی‌های مدل جهت استفاده در مرحله صحت‌سنجی یا اعتبار‌سنجی انجام شد. برای واسنجی مدل از داده‌های یک

گنوختن است. شرایط اولیه و مرزی برای شبیه‌سازی حرکت نمک به شرح زیر تعریف می‌شود:

$$\theta(x, t) = \theta_0(x) \quad (2)$$

$$t = 0 \quad x > 0$$

$$c(x, t) = c_0(x) \quad (3)$$

$$t = 0 \quad x > 0$$

$$\theta(x, t) = \theta \quad (4)$$

$$t > 0 \quad x = 0$$

$$c(x, t) = c \quad (5)$$

$$t > 0 \quad x = 0$$

معادلات (۲) و (۳) بیانگر شرایط اولیه رطوبت و غلظت نمک و معادلات (۴) و (۵) شرایط مرزی رطوبت و غلظت نمک را نشان می‌دهد.

اطلاعات ورودی به مدل علاوه بر شرایط اولیه و شرایط مرزی شامل اطلاعات منحنی رطوبتی خاک، خصوصیات خاک (درصد اجزای بافت خاک، تعداد لایه‌های خاک، عمق خاک) چگالی ظاهری و تبخیر و تعرق می‌باشد. از طرفی، خروجی‌های مدل شامل مقدار رطوبت، مکش و بیلان رطوبت خاک و غلظت نمک در زمان‌های مورد نظر می‌باشد. در پژوهش حاضر از اطلاعات زود یافت خاک شامل درصد اجزای بافت خاک، چگالی ظاهری و مقدار رطوبت در مکش‌های ظرفیت زراعی و نقطه پژمردگی دائم و نرم‌افزار Rosetta برای تخمین اولیه مشخصات هیدرولیکی خاک ($\theta_s, \theta_r, \alpha, n, K_s$) استفاده می‌گردد (۱۵).

آنالیز حساسیت، واسنجی و ارزیابی مدل Hydrus-1D

قبل از استفاده از یک مدل، آشنایی با نحوه رفتار و حساسیت آن نسبت به پارامترهای ورودی لازم است. آنالیز حساسیت راه کاری است که میزان تغییرات خروجی را ورودی بررسی و ارزیابی می‌کند. در واقع با این روش می‌توان میزان تأثیر پذیری مدل را نسبت به داده‌های ورودی مورد مطالعه قرار داد. چنانچه تغییرات داده‌های ورودی، تأثیر کمی بر مقادیر خروجی مدل داشته باشد، می‌توان استنباط نمود که داده‌های ورودی تأثیر اندکی بر نتایج دارد و بر عکس. در این تحقیق آنالیز حساسیت مدل Hydrus-1D با استفاده از روش پیشنهادی لیو و همکاران انجام گردید (۱۲).

در آنالیز حساسیت مدل، ابتدا با استفاده از داده‌های ورودی،

جدول ۵. مقادیر ضرایب واسنجی شده مدل

پارامتر تورجستی	پارامتر تجربی شکل	عکس پتانسیل ورود	رطوبت حجمی	رطوبت حجمی	هدایت هیدرولیکی
در تابع جریان	منحنی رطوبتی خاک	هوا به داخل خاک	اشباع	باقیمانده	اشباع
I	n	$\alpha(\text{cm}^{-1})$	$\theta_s(\text{cm}^3/\text{cm}^3)$	$\theta_r(\text{cm}^3/\text{cm}^3)$	$K_s(\text{cm}/\text{day})$
۰/۶	۱/۲	۰/۰۱۲	۰/۶۳	۰/۰۴	۱۸

جدول ۶. نتایج ارزیابی آماری مدل جهت شبیه‌سازی هدایت الکتریکی، آنیون و کاتیون‌های خاک

SO ₄ ^{۲-}	Cl ⁻	Mg ^{۲+}	Ca ^{۲+}	K ⁺	Na ⁺	pH	EC	نوع آماره
mg/l								dS/m
۰/۸۵	۰/۸۸	۰/۹۱	۰/۹۲	۰/۹۰	۰/۹۳	۰/۹۱	۰/۹۵	R ^۲
%۱۸	%۱۷	%۱۳	%۱۴	%۱۵	%۱۵	%۱۲	%۱۱	NRMSE
۰/۷۲	۰/۷۵	۰/۸۱	۰/۸۲	۰/۸۰	۰/۸۰	۰/۸۱	۰/۸۳	NSE
۰/۱۶	۰/۱۲	-۰/۰۸	-۰/۰۸	-۰/۰۷	-۰/۰۷	-۰/۰۹	-۰/۰۰۶	CRM
۶	۵	۳	۲	۴	۳	۳	۱	رتبه نهایی

مقادیر اندازه‌گیری شده، n تعداد نمونه‌ها و O_{ave} مقدار متوسط پارامتر مشاهده شده می‌باشد. چنانچه تمام مقادیر پیش‌بینی و اندازه‌گیری شده با هم برابر شوند، مقدار عددی NRMSE و CRM برابر صفر و مقدار R^۲ و NSE برابر یک خواهد شد (۱۴).

نتایج و بحث

به‌منظور شبیه‌سازی میزان هدایت الکتریکی، اسیدیته و یون‌های سدیم، پتاسیم، کلسیم، منیزیم، کلر و سولفات همان‌طور که ذکر شد ابتدا مدل Hydrus-1D آنالیز حساسیت و واسنجی شد. نتایج آنالیز حساسیت نشان داد که مدل نسبت به رطوبت حجمی اشباع حداکثر حساسیت (ضریب حساسیتی معادل ۲/۵) را دارا می‌باشد. کمترین حساسیت مدل نسبت به عکس پتانسیل ورود هوا به داخل خاک، پارامتر پیچ و خم (تورجستی) در تابع جریان و رطوبت حجمی باقیمانده با مقادیر عددی به ترتیب ۰/۴۵، ۰/۷۸ و ۱/۲۰ بوده و نسبت به هدایت هیدرولیکی اشباع حساسیت متوسط با ضریب ۰/۲۸ را دارا می‌باشد. همچنین مدل نسبت به پارامتر تجربی شکل منحنی رطوبتی خاک حساس نمی‌باشد. پس از آنالیز حساسیت، مدل واسنجی گردید که نتایج

تکرار شوری‌های مختلف استفاده شد و در نهایت میانگین جهت مرحله صحت‌سنجی استفاده گردید.

برای سنجش اعتبار و درستی نتایج شبیه‌سازی مدل از آماره‌های ضریب تعیین (R^۲)، میانگین مربعات خطای نرمال شده (NRMSE)، معیار کارایی نش-ساتکلیف (NSE) و ضریب باقیمانده (CRM) استفاده شده است. فرمول‌های این آماره‌ها به‌صورت زیر می‌باشند.

$$R^2 = \frac{[\sum_{i=1}^n (O_i - O_{ave})(P_i - P_{ave})]^2}{\sum_{i=1}^n (O_i - O_{ave})^2 \sum_{i=1}^n (P_i - P_{ave})^2} \quad (7)$$

$$NRMSE = \left[\frac{\sum_{i=1}^n (P_i - O_i)^2}{n} \right]^{1/2} \times \frac{100}{O} \quad (8)$$

$$NSE = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (P_i - O_i)^2}{\sum_{i=1}^n (O_i - O_{ave})^2} \quad (9)$$

$$CRM = \frac{\sum_{i=1}^n O_i - \sum_{i=1}^n P_i}{\sum_{i=1}^n O_i} \quad (10)$$

در فرمول‌های ارائه شده، P_i مقادیر پیش‌بینی شده، O_i

در جدول (۵) ارائه شده است.

بیشترین دقت مدل در برآورد هدایت الکتریکی عصاره اشباع خاک و کلسیم تطابق دارد (۴). همچنین توانایی مناسب مدل در شبیه‌سازی حرکت نمک در خاک در تحقیق حاضر نیز تأیید شده است.

با استفاده از نتایج مرحله واسنجی، ورودی‌های مورد نیاز به مدل وارد و اجرا گردید. به‌منظور مقایسه نتایج مقادیر اندازه‌گیری و شبیه‌سازی شده از آماره‌هایی که قبلاً ذکر شد استفاده گردید. نتایج در جدول (۶) ارائه شده است.

نتیجه‌گیری

در مقاله حاضر از مدل Hydrus-1D جهت پیش‌بینی هدایت الکتریکی، اسیدیته، سدیم، پتاسیم، کلسیم، منیزیم، کلر و سولفات در پروفیل خاک تحت کشت نیشکر استفاده گردید. بدین منظور ابتدا مدل آنالیز حساسیت و واسنجی گردید. سپس صحت سنجی مدل انجام گرفت و نتایج زیر به‌صورت خلاصه به‌دست آمد.

مطابق جدول (۶) آماره R^2 که نسبت پراکنندگی را بین مقادیر پیش‌بینی شده و اندازه‌گیری نشان می‌دهد، برای تمام پارامترهای مورد بررسی بیش از ۰/۸۵ به‌دست آمده که توانایی مناسب مدل در شبیه‌سازی میزان هدایت الکتریکی، اسیدیته، آنیون‌ها و کاتیون‌ها را نشان می‌دهد. به لحاظ رتبه‌بندی مدل در شبیه‌سازی با توجه به آماره ضریب تعیین هدایت الکتریکی عصاره اشباع خاک موفق‌تر بوده است.

- مدل نسبت به رطوبت حجمی اشباع حداکثر حساسیت را دارا می‌باشد.

مقدار NRMSE در حالت ایده‌آل ۱۰ درصد، در بازه ۱۰ تا ۲۰ عملکرد مناسب، ۲۰-۳۰ درصد عملکرد متوسط و بیش از ۳۰ درصد بیانگر عملکرد نامناسب مدل را ارائه می‌نماید. در مدل‌سازی صورت گرفته این پارامتر بین ۱۱ تا ۱۸ درصد به‌دست آمده که عملکرد مناسب مدل را نشان می‌دهد.

- کمترین حساسیت مدل نسبت به عکس پتانسیل ورود هوا به داخل خاک، پارامتر پیچ و خم در تابع جریان و رطوبت حجمی باقیمانده بوده و نسبت به هدایت هیدرولیکی اشباع حساسیت متوسط دارد.

شاخص NSE، شاخصی بدون بعد بوده که به یک ختم می‌شود (از منفی بی‌نهایت تا یک). وقتی مقدار این شاخص برابر با یک گردد بدین معناست که مدل کاملاً با واقعیت تطابق دارد. نتایج این بررسی مقدار معیار کارایی نش-ساتکلیف بین ۰/۷۲ تا ۰/۸ نشان داده که بیانگر تطابق مناسب مدل با واقعیت می‌باشد.

- مدل نسبت به پارامتر تجربی شکل منحنی رطوبتی خاک حساس نمی‌باشد.

ضریب باقیمانده در این مقاله برای هدایت الکتریکی، اسیدیته و یون‌های سدیم، پتاسیم، کلسیم و منیزیم منفی و برای کلر و سولفات مثبت برآورد شده است. مقادیر مثبت این شاخص برآورد کمتر و مقادیر منفی برآورد بیشتر مدل را نشان می‌دهد.

- نتیجه رتبه‌بندی پارامترهای مورد بررسی بر اساس شاخص‌های آماری نشان داد که مدل بیشترین دقت را در برآورد مقدار هدایت الکتریکی عصاره اشباع خاک داشته و پس از آن به‌ترتیب کلسیم در رتبه دوم، اسیدیته، سدیم و منیزیم (هر سه در رتبه سوم)، پتاسیم، کلر و سولفات قرار دارند.

پس از بررسی منفرد شاخص‌های آماری هر پارامتر رتبه‌بندی شد. نتیجه رتبه‌بندی نشان داد که مدل بیشترین دقت را در برآورد مقدار هدایت الکتریکی عصاره اشباع خاک داشته و پس از آن به ترتیب کلسیم در رتبه دوم، اسیدیته، سدیم و منیزیم (هر سه در رتبه سوم)، پتاسیم، کلر و سولفات قرار دارند.

- در شرایط تحقیق حاضر مدل هدایت الکتریکی، اسیدیته و یون‌های سدیم، پتاسیم، کلسیم و منیزیم را بیشتر از مقدار کلر و سولفات را کمتر از مقدار واقعی برآورد نموده است.

به‌طور کلی می‌توان بیان نمود که مدل Hydrus-1D در صورتی که دارای ورودی‌های مناسبی باشد و با دقت واسنجی شود می‌تواند نتایج قابل قبولی را ارائه نماید.

نتایج تحقیق حاضر با پژوهش محمدی و دلبری به لحاظ

منابع مورد استفاده

۱. اژدری، خ.، ا. فرخی و ح. زارع ابیانه. ۱۳۸۸. مطالعه تغییرات کود نیتروژن و رطوبت در مزرعه‌ای مجهز به سیستم کودآبیاری قطره‌ای. اولین کنفرانس بین‌المللی مدیریت منابع آب. دانشگاه صنعتی شاهرود. ۲۵ مرداد تا ۲۷ مرداد ۱۳۸۸.
۲. ذاکرنیا، م.، ف. عباسی و ت. سهرابی. ۱۳۸۶. بررسی تغییرات هیدرولیکی خاک با استفاده از روش معکوس. مجله تحقیقات مهندسی کشاورزی ۸(۱): ۱۳-۳۰.
۳. گلابی، م. ۱۳۸۸. مدل سازی ریاضی واکنش نیشکر به شوری زه آب به‌عنوان آب آبیاری و کاربرد در مدل SALTMED برای مدیریت آبیاری نیشکر در شرایط گرم و خشک. پایان نامه دکتری آبیاری و زهکشی. دانشکده مهندسی علوم آب، دانشگاه شهید چمران اهواز.
۴. محمدی، ا. و م. دلبری. ۱۳۹۴. شبیه سازی حرکت آب و نمک در خاک با استفاده از نرم‌افزار Hydrus-1D. مجله دانش آب و خاک ۲۵(۱): ۶۷-۷۸.
5. Dontsova, K. M., J. C. Pennington, C. Hayes, J. Simunek and C. W. Williford. 2009. Dissolution and transport of 2, 4-DNT and 2, 6-DNT from M1 propellant in soil. *Chemosphere* 77(4): 29-41.
6. Fechter, J., B. E. Allison, M. V. K. Sivalcumar, R. R. Van Der Ploeg and J. Beley. 1991. An evaluation of the SWATRER and CERES-Millet models for southwest Niger. PP. 505-513. *In: Sivakumar MVK, Wallace JS, Renard C, Giroux C (Ed.), Soil Water Balance in the Sudano-Sahhellian Zone. International Association of Hydrological Sciences, Wallingford, UK.*
7. Forkutsa, I. and R. Sommer. 2005. Imperceptive simulation of salt dynamic and balance – a HYDRUS-1D flow. *Proceeding of workshop on HYDRUS applications. Department of Earth Sciences. Uteacht University. 19 October, the Netherlands.* 26-29.
8. Heatwole, K. K. and J. E. Mccary. 2007. Modeling potential vadose-zone transport of nitrogen from onsite wastewater at the development scale. *J. of Contaminant Hyd.* 91: 184-201.
9. Jacques, D., J. Simunek, D. Mallants and M. T. Van Genuchten. 2008. Modelling coupled water flow, salt transport and geochemical reactions affecting heavy metal migration in a podzol soil. *Geoderma* 145: 449-461.
10. Jiang, S. h., L. Pang, G. D. Buchan, J. Simunek, M. J. Noonan and M. E. Close. 2009. Modeling water flow and bacterial transport in undisturbed lysimeters under irrigation of dairy shed effluent and water using HYDRUS-1D. *Water Res.* 44: 1050-1061.
11. Kroes, J. G., J. C. van Dam, J. Huygen and R. W. Vervoor. 1999. Simulation of water flow, salt transport and plant growth in the Soil-Water-Atmosphere-Plant environment. *User's Guide of SWAP version 2.0; Wageningen Agricultural University. Report 81, DLO Winand Staring Centre. Technical Document 53, 128.*
12. Liu, H. F., M. Genard, S. Guichard and N. Bertin. 2007. Model assisted analysis of tomato fruit growth in relation to carbon and water fluxes. *J. of Experimental Botany* 58(13): 3567-3580.
13. Moeys, J., M. Larsbo, L. Bergström, C. D. Brown, Y. Coquet and N. J. Jarvis. 2012. Functional test of pedotransfer functions to predict water flow and salt transport with the dual-permeability model MACRO. *Hydrology and Earth Sys. Sci.* 16: 2069-2083.
14. Moriasi, D. N., J. G. Arnold, M. W. Van Liew, R. L. Bingner, R. D. Harmel and T. Veith. 2007. Model evaluation guidelines for systematic quantification of accuracy in watershed simulations. *Transactions of the ASABE* 50: 885-900.
15. Schaap, M. G., F. J. Leij and M.T. van Genuchten. 2001. Rosetta: a computer program for estimating soil hydraulic parameters with hierarchical pedotransfer functions. *J. of Hyd.* 251: 163-176.
16. Simunek, J., M. Sejna, H. Saito, M. Sakai and M. T. van Genuchten. 2008. The HYDRUS-1D Software package for simulating the movement of water, heat, and Multiple salts in variably saturated media, version 4.0, HYDRUS software series 3, Department of Environmental Sciences, University of California Riverside, Riverside, California, USA.
17. Ragab, R. 2000. An integrated modelling approach for irrigation water management using saline and non-saline water: The SALTMED model, 6th International Micro-Irrigation Congress, South Africa.
18. Ramos, T., M. Goncalves, A. Prazeres and J. Martins. 2008. Multicomponent Solute transport in two multifactorial experiments. The second HYDRUS workshop. Czech University of sciences, Prague, Faculty of Agrobiolgy. Food and Natural Resources 13-20.
19. Wagenet, R. J. and J. L. Hutson. 1989. Leaching Estimation and Chemistry Model: LEACHM. *Water Resource*

Institute, Ithaca, NY.

20. Yiang, M., F. Shaoyuan, S. Dongyuan, G. Guangyuo and H. Zailin. 2010. Modeling water infiltration in a large layered soil column with a modified Green-Ampt model and HYDRUS-1D. *Comput. and Electronics in Agric.* 71: 40-47.

Assessment of Hydrus-1D Model to Predict Electrical Conductivity and the Ions of Soil Profile (Case Study: Sugarcane under Salinity Stress)

M. Golabi*, M. Albaji and A. A. Naseri¹

(Received: Oct. 05-2015 ; Accepted: June 11-2017)

Abstract

In the present study Hydrus-1D software was used to simulate electrical conductivity, pH and sodium, potassium, calcium, magnesium, chloride and sulfate ions. Field experiments were performed at the Sugarcane Research Center located in south of Ahvaz on sugarcane varieties CP48-103 with four water treatments (one treatment was Karun river water and three treatments were diluted drainage water) and three replications. The samples were collected from 0-30, 30-60 and 60-90 cm soil depth before irrigation and electrical conductivity and anions and cations of soil were measured in the laboratory. Sensitivity analysis and calibration were first performed with the aim of verifying the Hydrus-1D software. The sensitivity analysis indicated that the software had maximum sensitivity to the saturated volumetric water content. Minimum sensitivity was for the inverse of the air-entry suction, tortuosity parameter, residual volumetric water contents and moderate sensitivity was for hydraulic conductivity at natural saturation. Also, the software did not show any sensitivity to empirical parameter related to the pore size distribution that is reflected in the slope of water retention curve. In calibration stage the amount of hydraulic conductivity at natural saturation, residual volumetric water contents, saturation volumetric water contents, the inverse of the air-entry suction, empirical parameter related to the pore size distribution and tortuosity were obtained as 18 (cm/day), 0.04 (cm³/cm³), 0.63(cm³/cm³), 0.012 (cm⁻¹), 1.2 and 0.6 respectively. The results showed that the coefficient of determination of all parameters was more than 0.85 which confirms the appropriate capabilities of the model in simulation of electrical conductivity, pH, anions and cations. In the modeling carried out the amount of NRMSE was between 11 and 18 percent which indicates good performance of the model. The Nash-Sutcliffe efficiency criterion was obtained 0.72 to 0.8 that indicates a good match of the model with reality. The coefficient of residual mass in this paper was positive for electrical conductivity, pH and sodium, potassium, calcium, magnesium and negative for chloride and sulfate. The positive and negative coefficient of the residual mass shows less and over estimation of the model.

Keywords: Drainage water, Hydrus-1D model, Sugarcane.

1. Dept. of Irrigation and Drainage, Faculty of Water Sci. Eng., Shahid Chamran Univ. of Ahvaz, Ahvaz, Iran.

*: Corresponding Author, Email: mona_golabi@yahoo.com