

## ارزیابی مدل Hydrus-1D در پیش‌بینی هدایت الکتریکی و یون‌های پروفیل خاک

(مطالعه موردی؛ کشت نیشکر تحت تنش شوری)

منا گلایی<sup>۱\*</sup>، محمد الباجی<sup>۲</sup> و عبد علی ناصری<sup>۳</sup>

### 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 بروی نیشکر واریته CP48-103 با یک تیمار آب کارون و سه تیمار زه‌آب رقیق شده با سه تکرار انجام شد. نمونه‌برداری از سه عمق ۰-۳۰، ۳۰-۶۰ و ۶۰-۹۰ سانتی‌متری قبل از هر آبیاری انجام و در آزمایشگاه هدایت الکتریکی و آنیون‌ها و کاتیون‌ها عصاره اشباع خاک اندازه‌گیری گردید. با هدف صحت-سنجی 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 (تورجستی) در تابع جریان و رطوبت حجمی باقی‌مانده بوده و نسبت به هدایت هیدرولیکی اشباع 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 تورجستی در تابع جریان به ترتیب  $(\text{cm}/\text{day})$ ،  $0.18$ ،  $(\text{cm}^3/\text{cm}^3)$ ،  $0.04$ ،  $(\text{cm}^3/\text{cm}^3)$ ،  $0.63$ ،  $(\text{cm}^{-1})$ ،  $0.12$ ،  $1/2$  و  $1/6$  به دست آمدند. نتایج صحت سنجی مدل نشان داد که ضریب تعیین برای تمام پارامترهای مورد بررسی بیش از ۸۵٪ 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 ۱۱ تا ۱۸ درصد به دست آمده که عملکرد مناسب مدل را نشان می‌دهد. مقدار معیار کارایی نفل-ساتکلیف بین ۰/۷۲ تا ۰/۸ 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.

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

- ۱- استادیار گروه آبیاری و زهکشی دانشکده مهندسی علوم آب، دانشگاه شهید چمران اهواز
- ۲- استادیار گروه آبیاری و زهکشی دانشکده مهندسی علوم آب، دانشگاه شهید چمران اهواز
- ۳- استاد گروه آبیاری و زهکشی دانشکده مهندسی علوم آب، دانشگاه شهید چمران اهواز

\*مسئول مکاتبات، پست الکترونیکی: mona\_golabi@yahoo.com

## مقدمه

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 MACRO (۱۳)، مدل SWAP (۱۱)، LEACHM (۱۹)، SWATRE (۶) و 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 غیراشباع 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-آمپت استفاده کرده‌اند. نتایج نشان داد که مدل از دقت مناسبی برخوردار است (۲۰). هیت‌ول و مک‌کاری مدل Hydrus-1D را به منظور مدل‌سازی پتانسیل انتقال نیتروژن در شرایط غیراشباع در منطقه وسیعی، در حومه ایالت کلرادو که در مجاورت سیستم فاضلاب قرار داشت، به کار بردند. نتایج حاکی از دقت بالای مدل در تخمین انتقال نترات حاصل از فاضلاب و سرعت نترات‌زدایی بود (۸).

محمدی و دلبری از نرم افزار Hydrus-1D جهت شبیه‌سازی حرکت آب و نمک در خاک در مزرعه تحت آبیاری 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 به‌عنوان ابزاری موثر برای مدیریت آبیاری و پیش‌بینی اثرات کیفیت آب آبیاری بر روی کیفیت آب زیرزمینی و خاک معرفی کردند (۱۸).

فورتسا 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 صحرايي و مدل شبیه‌سازی را به کار بردند. نتایج حاکی از این بود که مدل HYDRUS-1D نوسانات سریع شوری خاک را در طول دوره آبخوبی 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 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 به منظور ارزیابی اثرات آبیاری با آب‌های نامتعارف می‌تواند کمک به‌سزایی در افزایش راندمان کشاورزی باشد که در این زمینه مدل HYDRUS-1D با توجه به کارایی و قابلیت‌های آن می‌تواند مفید واقع شود. بنابراین در تحقیق حاضر توانایی مدل Hydrus-1D 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 صحرايي 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 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 "۱۲° ۴۸' شرقی و عرض جغرافیایی "۱۵° ۳۱' تا "۴۰° ۳۱' شمالی جنب ایستگاه اصلی پمپاژ آب کشت و صنعت امیرکبیر 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 نیمه بیابانی 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.



شکل ۱. موقعیت مکانی منطقه مورد مطالعه

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 ۰-۳۰، ۳۰-۶۰ و ۶۰-۹۰ سانتی متری **نمونه برداری** 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 نمونه برداری تهیه و جرم مخصوص ظاهری هر نمونه تعیین شد. نتایج آنالیز نمونه‌های خاک در جدول (۱) ارائه شده است.

جدول ۱. ویژگی‌های خاک مزرعه طرح

عمق نمونه (cm)	EC (dS/m)	pH	وزن مخصوص ظاهری (gr/cm <sup>3</sup> )	درصد رطوبت	درصد رطوبت	درصد رطوبت	بافت
(cm)	(dS/m)		(gr/cm <sup>3</sup> )	حجمی ظرفیت زراعی	حجمی نقطه پژمردگی	حجمی نقطه پژمردگی	
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

اصلی‌ترین هدف این پژوهش ارزیابی مدل Hydrus-1D در پیش‌بینی میزان هدایت الکتریکی، اسیدیته و یون‌های سدیم، پتاسیم، کلسیم، منیزیم، کلر و سولفات خاک تحت کشت نیشکر واریته CP48-103 می‌باشد. بدین منظور، از چهار سطح آب با هدایت الکتریکی آب معمول آبیاری منطقه (آب رودخانه) و هدایت الکتریکی ۳، ۴/۵ و ۶ دسی‌زیمنس بر متر جهت آبیاری استفاده گردید. به منظور تهیه آب با هدایت الکتریکی ۳، ۴/۵ و ۶ دسی‌زیمنس بر متر، زه‌آب‌های شرکت کشت و صنعت امیرکبیر با آب معمولی مخلوط شد. بدین منظور، زه‌آب با هدایت الکتریکی زه‌آب 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.

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

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

جدول ۳- آنالیز آب معمولی (S<sub>1</sub>) مورد استفاده در طول فصل رشد (شهریور ۱۳۸۶ تا آبان ۱۳۸۷)

ماه	EC (dS/m)	pH	مجموع مواد محلول TDS (mg/l)	نسبت جذب سدیم SAR	آنیون‌ها (meq/l)				کاتیون‌ها (meq/l)			
					کربنات C <sub>3</sub> <sup>2-</sup>	بی‌کربنات HCO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	کلر Cl <sup>-</sup>	سولفات SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup>	سدیم Na <sup>+</sup>	پتاسیم K <sup>+</sup>	منیزیم Mg <sup>2+</sup>	کلسیم Ca <sup>2+</sup>
شهریور	۱/۵۲	۸/۰۳	۱۲۰۰	۷/۵۰	۰/۰۰	۳/۲۰	۲۳/۴۳	۷/۰۰	۱۴/۰۰	۰/۱۲	۴/۰۰	۳/۰۰
مهر	۱/۸۸	۷/۶۷	۱۰۰۰	۴/۳۰	۰/۰۰	۳/۲۰	۲۲/۰۳	۱۱/۰۰	۹/۰۰	۰/۱۰	۴/۲۰	۴/۴۰
آبان	۱/۸۹	۷/۹۰	۱۲۰۰	۴/۳۰	۰/۰۰	۳/۲۰	۲۲/۹۴	۵/۳۰	۹/۳۰	۰/۱۱	۳/۸۰	۵/۶۰
آذر	۱/۶۰	۷/۸۰	۸۰۰	۵/۲۰	۰/۰۰	۲/۵۰	۲۱/۰۵	۱۱/۰۰	۱۱/۱۰	۰/۱۱	۳/۹۰	۵/۱۰
دی	۱/۵۰	۷/۲۷	۸۰۰	۲/۵۰	۰/۰۰	۳/۰۰	۱۹/۹۷	۱۰/۷۰	۷/۳۰	۰/۱۰	۱۳/۰۰	۴/۰۰
بهمن	۱/۴۰	۷/۶۷	۱۰۰۰	۵/۴۵	۰/۰۰	۳/۳۰	۱۸/۴۱	۸/۶۰	۱۰/۸۱	۰/۱۰	۲/۱۰	۵/۷۰

C <sub>3</sub> S <sub>2</sub>	۵/۰۰	۳/۰۰	۰/۱۱	۱۰/۰۰	۶/۰۰	۲۴/۰۹	۲/۰۰	۰/۰۰	۵/۰۰	۱۲۰۰	۷/۸۹	۱/۸۵	اسفند
C <sub>3</sub> S <sub>2</sub>	۴/۶۰	۵/۶۰	۰/۱۰	۱۳/۵۰	۶/۶۰	۲۴/۲	۳/۰۰	۰/۰۰	۶/۰۰	۸۰۰	۸/۰۴	۲/۱۱	فروردین
C <sub>4</sub> S <sub>1</sub>	۵/۱۰	۵/۶۵	۰/۱۱	۶/۶۰	۸/۰۰	۲۴/۸۶	۵/۰۰	۰/۰۰	۲/۹۰	۱۲۰۰	۷/۸۳	۲/۳۲	اردی بهشت
C <sub>4</sub> S <sub>2</sub>	۵/۰۰	۴/۴۰	۰/۱۲	۱۳/۵۰	۸/۰۰	۲۵/۸۳	۳/۰۰	۰/۰۰	۶/۲۰	۱۶۰۰	۷/۹۱	۲/۷۳	خرداد
C <sub>4</sub> S <sub>2</sub>	۵/۴۰	۴/۸۰	۰/۱۲	۱۵/۵۰	۶/۶۰	۲۶/۸۸	۲/۶۰	۰/۰۰	۶/۹۰	۱۲۰۰	۷/۸۴	۲/۲۹	تیر
C <sub>4</sub> S <sub>2</sub>	۵/۴۰	۶/۴۰	۰/۱۳	۱۵/۴۰	۶/۴۰	۲۹/۳	۲/۲۰	۰/۰۰	۶/۴۰	۱۶۰۰	۸/۳۳	۲/۴۰	مرداد
C <sub>4</sub> S <sub>2</sub>	۵/۶۰	۶/۲۰	۰/۱۳	۱۸/۲۰	۱۱/۰۰	۲۷/۰۷	۳/۲۰	۰/۰۰	۷/۵۰	۱۶۰۰	۸/۲۲	۳/۱۶	شهریور
C <sub>4</sub> S <sub>2</sub>	۶/۲۰	۵/۸۰	۰/۱۱	۱۸/۰۰	۹/۳۰	۲۶/۷۳	۲/۸۰	۰/۰۰	۷/۳۰	۱۶۰۰	۸/۱۴	۲/۳۴	مهر
C <sub>4</sub> S <sub>2</sub>	۵/۶۰	۵/۶۰	۰/۱۱	۱۸/۸۰	۶/۴۰	۲۸/۰۹	۳/۸۰	۰/۰۰	۷/۹۰	۱۵۰۰	۷/۶۴	۲/۳۱	آبان

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 اندازه گیری شد. بدین ترتیب با توجه به معلوم بودن حجم کل آب مصرفی به ازاء هر سطح شوری که در مخازن موجود بود، هر شیار به ازاء زمان محاسبه شده آبیاری می‌شد.

در این پژوهش هدف اصلی بررسی اثرات چهار سطح کیفیت آب بر تجمع املاح خاک تحت کشت نیشکر واریته CP48-103 و مقایسه مقادیر اندازه گیری 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 هم-چنین 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  $\theta$  رطوبت حجمی  $[L^3/L^3]$ ،  $t$  زمان  $[T]$ ،  $K(\theta)$  هدایت هیدرولیکی غیراشباع  $[L/T]$ ،  $h$  مکش ماتریک  $[L]$ ،  $\beta$  زاویه بین مسیر جریان و محور عمودی،  $S$  آب جذب شده توسط ریشه  $[L^3/(L^3.T)]$  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 گنوختن است. شرایط اولیه و مرزی برای شبیه سازی حرکت نمک به شرح زیر

تعریف می شود:

$$\theta(x, t) = \theta_0(x) \quad t=0 \quad x \geq 0 \quad (2)$$

$$c(x, t) = c_0(x) \quad t=0 \quad x \geq 0 \quad (3)$$

$$\theta(x, t) = \theta \quad t > 0 \quad x = 0 \quad (4)$$

$$c(x, t) = c \quad t > 0 \quad x = 0 \quad (5)$$

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

اطلاعات ورودی به مدل علاوه بر شرایط اولیه و شرایط مرزی شامل اطلاعات منحنی رطوبتی خاک، خصوصیات خاک (درصد اجزای بافت خاک، تعداد لایه های خاک، عمق خاک) چگالی ظاهری و تخییر و تعرق می باشد. از طرفی، خروجی های مدل شامل مقدار رطوبت، مکش و بیلان رطوبت خاک و غلظت نمک در زمان های مورد نظر می باشد. در پژوهش حاضر از اطلاعات زودیافت خاک شامل درصد اجزای بافت خاک، چگالی ظاهری و مقدار رطوبت در مکش های ظرفیت زراعی و نقطه پژمردگی دائم و نرم افزار Rosetta برای تخمین اولیه مشخصات هیدرولیکی خاک ( $K_s, \alpha, n, \theta_r, \theta_s$ ) استفاده می گردد (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 می کند. در واقع با این روش می توان میزان تأثیر پذیری مدل را نسبت به داده های ورودی مورد مطالعه قرار داد. چنان چه تغییرات داده های ورودی، تأثیر کمی بر مقادیر خروجی مدل داشته باشد، می توان استنباط نمود که داده های 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، مدل اجرا می‌گردد و نتایج خروجی به عنوان 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 به دست 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،  $\Delta W$  اختلاف مقدار پارامتر خروجی قبل و بعد از تغییر داده ورودی،  $\bar{W}$  متوسط پارامتر خروجی قبل و بعد از تغییر داده ورودی،  $\Delta P$  اختلاف مقدار ورودی یک پارامتر به مدل و  $\bar{P}$  متوسط مقدار ورودی یک پارامتر به مدل. پس از محاسبه ضریب حساسیت مقادیر به دست آمده با دامنه تعریف شده (جدول ۴) مقایسه می‌گردد.

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

به منظور 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 باقی مانده، رطوبت حجمی اشباع، عکس پتانسیل ورود هوا به داخل خاک، پارامتر تجربی شکل منحنی رطوبتی خاک و پارامتر تورجیستی 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 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 ( $R^2$ )، میانگین مربعات خطای نرمال شده (NRMSE)، معیار کارایی نش-ساتکلیف (NSE) و ضریب باقی‌مانده (CRM) استفاده شده است. فرمول‌های این آماره‌ها به صورت 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،  $O_i$  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  $R^2$  و NSE برابر یک خواهد شد (۱۴).

## نتایج و بحث

به منظور شبیه‌سازی میزان هدایت الکتریکی، اسیدیته و یون‌های سدیم، پتاسیم، کلسیم، منیزیم، کلو 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 در جدول (۵) ارائه شده است.

جدول ۵- مقادیر ضرایب واسنجی شده مدل

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

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

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

نوع آماره	EC <sup>a</sup> dS/m	pH	Na <sup>+</sup>	K <sup>+</sup>	Ca <sup>2+</sup>	Mg <sup>2+</sup>	Cl <sup>-</sup>	SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup>
R <sup>2</sup>	۰/۹۵	۰/۹۱	۰/۹۳	۰/۹۰	۰/۹۲	۰/۹۱	۰/۸۸	۰/۸۵
NRMSE	۰/۱۱	۰/۱۲	۰/۱۵	۰/۱۵	۰/۱۴	۰/۱۳	۰/۱۷	۰/۱۸
NSE	۰/۸۳	۰/۸۱	۰/۸۰	۰/۸۰	۰/۸۲	۰/۸۱	۰/۷۵	۰/۷۲
CRM	-۰/۰۰۶	-۰/۰۰۹	-۰/۰۰۷	-۰/۰۰۷	-۰/۰۰۸	-۰/۰۰۸	۰/۱۲	۰/۱۶
رتبه نهایی	۱	۳	۳	۴	۲	۳	۵	۶

مطابق جدول (۶) آماره R<sup>2</sup> که نسبت پراکندگی را بین مقادیر پیش‌بینی شده و اندازه‌گیری نشان می‌دهد، برای تمام پارامترهای مورد بررسی بیش از ۸۵٪ به دست 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 آماره‌ی ضریب تعیین هدایت الکتریکی عصاره اشباع خاک موفق‌تر بوده است.

مقدار NRMSE در حالت ایده‌آل ۱۰ درصد، در بازه‌ی 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 به دست آمده که عملکرد مناسب مدل را نشان می‌دهد.

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 ۰/۷۸ نشان داده که 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. مقادیر مثبت این شاخص برآورد کمتر و مقادیر منفی برآورد بیشتر مدل را نشان می‌دهد.

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، اسیدیت، سدیم و منیزیم (هر سه در رتبه سوم)، پتاسیم، کلر و سولفات قرار دارند.

نتایج تحقیق حاضر با پژوهش محمدی و دلبری به لحاظ 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.

### نتیجه‌گیری

در مقاله حاضر از مدل Hydrus-1D جهت پیش‌بینی هدایت الکتریکی، اسیدیت، 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 به صورت خلاصه به دست آمد.

- مدل نسبت به رطوبت حجمی اشباع حداکثر حساسیت را دارا می باشد.
- کمترین حساسیت مدل نسبت به عکس پتانسیل ورود هوا به داخل خاک، پارامتر **پیچ و خم** در تابع جریان و رطوبت حجمی باقی مانده بوده و نسبت به هدایت هیدرولیکی اشباع حساسیت متوسط دارد.
- مدل نسبت به پارامتر تجربی شکل منحنی رطوبتی خاک حساس نمی باشد.
- 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 به ترتیب کلسیم در رتبه دوم، اسیدیت، سدیم و منیزیم (هر سه در رتبه سوم)، پتاسیم، کلر و سولفات قرار دارند.
- در شرایط تحقیق حاضر مدل هدایت الکتریکی، اسیدیت و یون‌های سدیم، پتاسیم، کلسیم و منیزیم را بیشتر از مقدار کلر و سولفات را کمتر از مقدار واقعی برآورد نموده است.
- به طور 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.

## منابع مورد استفاده

۱. اژدری، خ.، ا. فرخی و ح. زارع ایبانه. ۱۳۸۸. مطالعه تغییرات کود نیتروژن و رطوبت در مزرعه‌ای مجهز به سیستم کودآبیاری قطره‌ای. مجموعه مقالات کنفرانس بین‌المللی مدیریت منابع آب. دانشگاه صنعتی شاهرود. ۲۲۱-۲۱۴.
۲. ذاکرنیا، م.، ف. عباسی و ت. سهرابی. ۱۳۸۶. بررسی تغییرات هیدرولیکی خاک با استفاده از روش معکوس. مجله تحقیقات مهندسی کشاورزی (۱۸): ۳۰-۱۳.
۳. گلایی، 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. دانشگاه شهید چمران اهواز.
۴. محمدی، ا. و م. دلبری. ۱۳۹۴. شبیه سازی حرکت آب و نمک در خاک با استفاده از نرم افزار *Hydrus-1D*. مجله دانش آب و خاک (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. In: Sivakumar MVK, Wallace JS, Renard C, Giroux C (Eds). *Soil Water Balance in the Sudano-Sahelian Zone*. International Association of Hydrological Sciences, Wallingford, UK. 505-513.
7. Forkutsa, I and R. Sommer. 2005. Imperceptible simulation of salt dynamic and balance – a HYDRUS-1D flow. *Proceeding of workshop on HYDRUS applications*. Department of Earth Sciences. Uteacht University. 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. *Journal of Contaminant Hydrology* 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 Research* 44: 1050-1061.
11. Kroes, J.G., J.C. van Dam, J. Huygen and R.W. Vervoort. 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, *Journal 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 System Sciences* 16: 2069-2083.
14. Moriassi, 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. *Journal of Hydrology* 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, 6<sup>th</sup> 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 Agrobiological Sciences, 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. Computers and Electronics in Agriculture 71: 40-47.

مقاله پذیرفته شده، ویراستاری نشده

**Assessment Hydrus-1D Model to Predict Electrical Conductivity and the Ions of Soil  
Profile (Case Study, Sugarcane under Salinity Stress)  
M. Golabi<sup>1\*</sup>, M. Albaji<sup>2</sup> and A. A. Naseri<sup>3</sup>**

**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 that is 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. With the aim of application Hydrus-1D software, sensitivity analysis and calibration was done. The sensitivity analysis indicated that 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 had moderate sensitivity to hydraulic conductivity at natural saturation. Also, software did not have 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 18 (cm/day), 0.04 (cm<sup>3</sup>/cm<sup>3</sup>), 0.63(cm<sup>3</sup>/cm<sup>3</sup>), 0.012 (cm<sup>-1</sup>), 1.2 and 0.6 respectively. The results showed that the coefficient of determination for all parameters was more than 0.85 which confirms the appropriate capabilities of model in simulation of electrical conductivity, pH, anions and cations. In the modeling was carried out the amount of NRMSE was between 11 and 18 percent. This amount shows good performance of model. The Nash-Sutcliffe efficiency criteria was obtained 0.72 to 0.8 that indicates a good match of model with reality. The coefficient of residual mass in this paper for electrical conductivity, pH and sodium, potassium, calcium, magnesium was positive and for chloride and sulfate was negative. Positive and negative of Coefficient of residual mass show less and over estimation of model.

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

---

1. Assistance Professor of Department of Irrigation and Drainage., Faculty of Water Science Engineering., Shahid Chamran University of Ahvaz.
2. Assistance Professor of Department of Irrigation and Drainage., Faculty of Water Science Engineering., Shahid Chamran University of Ahvaz.
3. Professor of Department of Irrigation and Drainage., Faculty of Water Science Engineering., Shahid Chamran University of Ahvaz.

مقاله پذیرفته شده، ویراستاری نشده