

مقاله پژوهشی

شبیه‌سازی فرایند انتقال نیتрат خاک تحت روش آبیاری سنترپیوت با استفاده از مدل بهینه‌ساز HYDRUS-PSO

سمانه اطمینان^۱، وحیدرضا جلالی^{۲*}، مجید محمودآبادی^۳، عباس خاشعی سیوکی^۴ و محسن پوررضا بیلندی^۵

چکیده

یکی از مسائل مهم و چالش‌برانگیز در کشاورزی و محیط‌زیست در طی چند دهه گذشته، آلودگی منابع آب و خاک بوده‌است؛ از این‌رو، در این تحقیق با استفاده از الگوریتم بهینه‌ساز ازدحام ذرات برآورد پارامترهای هیدرولیکی و انتقال املاح در خاک تحت روش آبیاری سنترپیوت انجام شد و نتایج حاصل از بهینه‌سازی در شبیه‌سازی انتقال رطوبت و نیترات خاک در امتداد پروفیل خاک به‌منظور بررسی میزان آلودگی خاک در یک مزرعه تحت کشت یونجه چهارساله به‌کار گرفته‌شد. بدین‌منظور پروفیلی در مزرعه مورد نظر حفاری و روند تغییرات غلظت نیترات و آمونیوم خاک در امتداد پروفیل خاک در بازه‌های زمانی مختلف اندازه‌گیری شد. همچنین الگوریتم بهینه‌ساز ازدحام ذرات به مدل HYDRUS، لینک و پارامترهای حاکم در فرایند انتقال نیترات و رطوبت خاک تحت شرایط مدیریتی برآورد شد. نتایج حاصل نشان داد که مدل HYDRUS-PSO جریان آب در خاک با NSE برابر با ۰/۸۹ و RMSE ۰/۰۰۱، انتقال آمونیوم را با NSE ۰/۹۸ و RMSE ۰/۰۰۱ و انتقال نیترات را با NSE ۰/۹۴ و RMSE ۰/۰۳۵ در لایه سطحی خاک به‌خوبی شبیه‌سازی کرد. همچنین ارزیابی مدل در لایه زیرین نشان داد که مدل HYDRUS-PSO با NSE برابر با ۰/۹۴، ۰/۹۶ و ۰/۹۷ به‌ترتیب روند تغییرات رطوبت، آمونیوم و نیترات خاک را به‌خوبی برآورد کرد. با توجه به نتایج حاصل می‌توان ذکر کرد که مدل HYDRUS-PSO در روش آبیاری سنترپیوت توانسته به‌خوبی روند تغییرات رطوبت و املاح خاک را در امتداد پروفیل شبیه‌سازی کند؛ بنابراین می‌توان از الگوریتم‌های فراابتکاری در برآورد پارامترها به‌عنوان یک ابزار توانمند و کاربردی برای افزایش کارایی مدل‌های عددی در مطالعات آب و خاک بهره گرفت.

واژه‌های کلیدی: آلودگی، الگوریتم فراابتکاری، املاح خاک و مدل عددی.

ارجاع: اطمینان س. جلالی و. محمودآبادی م. خاشعی سیوکی ع. و پوررضا بیلندی م. ۱۴۰۲. شبیه‌سازی فرایند انتقال نیترات خاک تحت روش آبیاری سنترپیوت با استفاده از مدل بهینه‌ساز HYDRUS-PSO. مجله پژوهش آب ایران. ۵۰: ۱۱۳-۱۰۳. <https://dx.doi.org/10.22034/IWRJ.2023.14384.2527>

۱- دکتری فیزیک و حفاظت خاک (دانشجوی سابق دانشگاه شهید باهنر کرمان، کرمان، ایران).

۲- دانشیار گروه مهندسی طبیعت، دانشکده کشاورزی شیروان، دانشگاه بجنورد.

۳- استاد گروه علوم خاک، دانشگاه شهید باهنر کرمان.

۴- استاد گروه مهندسی آب، دانشگاه بیرجند.

۵- دانشیار گروه مهندسی آب، دانشگاه بیرجند.

* نویسنده مسئول: v.jalali@ub.ac.ir

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۲/۰۵/۰۸

تاریخ دریافت: ۱۴۰۲/۰۲/۲۱

مقدمه

پدیده تغییر اقلیم و گرم‌شدن زمین در کنار خشکسالی سبب کاهش منابع آب در سرتاسر جهان به‌ویژه در مناطق خشک و نیمه‌خشک در طی چند دهه گذشته شده است. از سوی دیگر در این مناطق کیفیت خاک‌ها از نظر مواد آلی و درجه حاصلخیزی پایین است و به‌علاوه مسئله شوری خاک‌ها از دیگر معضلات کشاورزی است که بر میزان بهره‌وری از منابع آب و خاک و سطح تولید تأثیر می‌گذارد. یکی از راهکارهای مدیریتی در مناطق خشک و نیمه‌خشک برای غلبه بر شوری خاک و کمبود منابع آب، کاربرد کود به دفعات زیاد در سطح مزارع به‌منظور افزایش سطح کشت و افزایش عملکرد محصول است که در طی گذر زمان تخریب خاک و آلودگی منابع آب و خاک را به‌دنبال دارد. آلودگی نیترات در آب و خاک یکی از مهم‌ترین چالش‌های محیط‌زیست در دهه اخیر است که حاصل کاربرد کود در سطح مزارع کشاورزی است (پاچ-ماسگیو و همکاران، ۲۰۱۴). مطالعات صورت‌گرفته نشان می‌دهد که در شرایط مدیریت مناسب ۳۰ درصد کودهای نیتروژنی آبشویی و به آب‌های زیرزمینی راه می‌یابد؛ بنابراین مدیریت منابع آب یکی از مهم‌ترین فاکتورهای اثرگذار در میزان آلودگی آب و خاک است؛ علاوه‌براین، مدیریت روش آبیاری در مناطق خشک و نیمه‌خشک به‌منظور آبشویی نمک، افزایش ذخیره رطوبت خاک و میزان قابل‌دسترس‌بودن عناصر غذایی در محیط ریشه نیز در مدیریت کشاورزی و افزایش سطح تولید از عوامل کلیدی است (ژو و همکاران، ۲۰۱۵). با تبدیل روش‌های سنتی به روش‌های نوین و هوشمند در سطح مزارع می‌توان از هدرروی آب در مزارع و آلودگی منابع آب جلوگیری کرد. همچنین کاربرد روش‌های نوین آبیاری می‌تواند گام مؤثری در کاهش برداشت از آب‌های زیرزمینی و سطحی، مدیریت مسائل محیط‌زیستی و نشست زمین باشد. مطابق با گزارشات سالانه سازمان جهاد کشاورزی، در کاربرد روش آبیاری قطره‌ای میزان هدررفت آب تا ۵ درصد و در روش آبیاری بارانی تا ۲۰ درصد کاهش می‌یابد که در مقایسه با روش آبیاری سطحی سبب افزایش بازدهی آب و توسعه اقتصادی پایدار در بخش کشاورزی می‌شود. مطالعه و ارزیابی روش‌های نوین آبیاری با هدف بررسی محدودیت‌ها و مسائل قابل‌طرح در کاربرد روش‌های نوین آبیاری، نقش مهمی

در افزایش بهره‌وری از سطح زیر کشت خواهد داشت که این امر از طریق به‌ حداقل‌رساندن حجم آب مصرفی و نیز کنترل میزان هدرروی آب مصرفی گام مهمی در مدیریت منابع آب و تولیدات کشاورزی خواهد بود (جسیوس و همکاران، ۲۰۱۷). نتایج تحقیقات رادور و همکاران (۲۰۱۷) نشان داد طی کاهش حجم آبیاری به روش آبیاری نوین همراه با کاهش مصرف کود نیتروژن در سطح مزرعه گندم و در مناطق خشک و نیمه‌خشک، میزان ضریب کارایی نیتروژن گیاه و راندمان آب آبیاری دارای روند افزایشی است. در کنار بررسی میزان بازدهی روش مدیریتی به‌کاررفته در سطح مزرعه، روند جریان آب در خاک، نوسانات رطوبت خاک در عمق‌های مختلف و روند حرکت املاح و قابل‌دسترس‌بودن آن یکی‌دیگر از مسائل قابل‌طرح در کاربرد روش‌های نوین آبیاری است؛ ازاین‌رو، طی چندین دهه اخیر توجه محققان به درک مفهومی و تشریح ریاضی جریان آب در محیط ریشه معطوف شده است که سبب ارائه مدل‌های عددی در این زمینه با هدف بررسی جریان آب در خاک با توجه به نوع روش آبیاری، کوددهی و عملیات کشاورزی شده است. در این زمینه می‌توان مدل HYDRUS را نام برد که دارای قابلیت شبیه‌سازی توزیع رطوبت خاک و الگوی جذب آب توسط ریشه گیاه به‌صورت شعاعی و عمودی است (سیمونک و همکاران، ۱۹۹۹). نتایج مطالعات توکارو و همکاران (۲۰۲۰)، گرسک و همکاران (۲۰۱۹) و یانگ و همکاران (۲۰۱۹) بیانگر کارایی مدل HYDRUS در شبیه‌سازی فرایند حرکت آب در خاک و انتقال املاح تحت روش‌های نوین آبیاری است. در فرایند شبیه‌سازی با استفاده از مدل HYDRUS نیاز به تعیین پارامترهای هیدرولیکی و انتقال املاح است که در این مدل از روش حل معکوس براساس الگوریتم مارکوارت-لونیبرگ استفاده می‌شود. الگوریتم مارکوارت-لونیبرگ^۱ یک الگوریتم محلی است که با توجه به نوع ساختاری که دارد، می‌تواند در کاهش عملکرد مدل HYDRUS اثرگذار باشد؛ ازاین‌رو در چند دهه اخیر الگوریتم‌های فراابتکاری ازجمله الگوریتم بهینه‌ساز ازدحام ذرات^۲ PSO در بحث شبیه‌سازی جریان آب و انتقال املاح در مدل HYDRUS مورد توجه قرار گرفته است (آزاد و همکاران، ۲۰۲۰؛ جین و همکاران،

1- Marquita- Lovenberg

2- Particle swarm optimization(PSO)

مطالعه انتخاب شد. از کود فسفات دی آمونیوم به طور تناوبی در چین‌ها به روش سرک استفاده شد. پروفیلی به عمق ۱۰۰ سانتی‌متر حفاری، به دو افق تفکیک و ویژگی‌های فیزیکی-شیمیایی آن مورد ارزیابی قرار گرفت (جدول ۱). میزان رطوبت، نیتрат و آمونیوم خاک در مزرعه مورد مطالعه به طور پیوسته طی ۴ ماه، از ۲۰ خرداد ۱۳۹۷ تا ۲۰ شهریور ۱۳۹۷ در هر دور آبیاری، قبل و بعد از آبیاری در هر افق به ترتیب با استفاده از دستگاه TDR (مدل IMKO) و اسپکتروفتومتر اندازه‌گیری شد.

جریان آب در خاک

مدل هیدرولیکی HYDRUS-1D با حل عددی معادله ریچاردز (۱) به بررسی جریان آب در خاک می‌پردازد:

$$\frac{\partial \theta}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x_i} \left[K \left(K_{ij}^A \frac{\partial h}{\partial x_j} + K_{iz}^A \right) \right] - S \quad (1)$$

که در آن θ درصد رطوبت حجمی خاک ($L^3 L^{-3}$)، h بار فشاری آب خاک (L)، z عمق خاک (L) و S به عنوان میزان جذب آب توسط ریشه گیاه ($L^3 L^{-3} T^{-1}$) تعریف می‌شود.

برای حل عددی معادله ریچاردز، به یک سری پارامترهای هیدرولیکی خاک نیاز است که به طور دقیق بیان‌گر وضعیت هیدرولیکی محیط متخلخل و غیرهمگن خاک مورد مطالعه است. از سوی دیگر مقدار این پارامترهای هیدرولیکی، با توجه به نوع مدیریت اعمال شده در سطح مزارع، نوع و وضعیت ساختمان خاک و سایر ویژگی‌های هیدرولیکی خاک تغییر می‌کنند؛ بنابراین در این مطالعه به منظور ارزیابی تغییرپذیری ویژگی‌های خاک در امتداد عمودی پروفیل خاک از مدل معلم (۱۹۷۶) استفاده شده است:

$$\theta = \begin{cases} \frac{\theta_s - \theta_r}{(1 + (\alpha|h|)^n)^m} + \theta_r & \text{if } h \leq 0 \\ \theta_s & \text{if } h > 0 \end{cases} \quad (2)$$

$$S_e = \frac{\theta - \theta_r}{\theta_s - \theta_r} \quad (3)$$

$$m = 1 - 1/n \quad (4)$$

$$K = \begin{cases} K_e S_e^L \left[1 - (1 - S_e^{1/m})^m \right]^2 & \text{if } h \leq 0 \\ K_s & \text{if } h > 0 \end{cases} \quad (5)$$

که در آن θ_r رطوبت باقی‌مانده ($L^3 L^{-3}$)، θ_s رطوبت اشباع خاک ($L^3 L^{-3}$)، K_s هدایت هیدرولیکی اشباع خاک ($L T^{-1}$)، n شیب منحنی رطوبتی خاک (-) و α نقطه

نتایج تحقیقات برون‌تی و همکاران (۲۰۱۶) و (۲۰۱۸) بیانگر توانایی الگوریتم PSO در برآورد پارامترهای منحنی رطوبتی خاک تحت مدل ون‌گنوختن-معلم در بحث جریان آب در خاک با استفاده از مدل HYDRUS است. لی و همکاران (۲۰۱۸) بیان کردند که الگوریتم فراابتکاری PSO نسبت به الگوریتم‌های محلی قابلیت حل مسائل چندمتغیره در بحث جریان آب در خاک را دارد. مطالعات ژو و همکاران (۲۰۲۲) نشان‌دهنده کارایی الگوریتم PSO در برآورد پارامترهای هیدرولیکی و انتقال املاح در مدل HYDRUS است. زینگ و همکاران (۲۰۲۲) با استفاده از شبکه عصبی لینک‌شده به الگوریتم PSO به برآورد میزان جذب کریستال بنفش از فاضلاب با استفاده از کمپوست nZVI/Zr-Ce-SBA-15 پرداختند. نتایج ایشان بیانگر افزایش دقت و قابلیت شبکه عصبی در برآورد تغییرات با استفاده از الگوریتم PSO است. خاشعی و همکاران (۲۰۲۳) نیز بیان کردند الگوریتم‌های فراابتکاری نسبت به RETC و Rosetta قابلیت بهتری در برآورد پارامترهای منحنی رطوبتی خاک براساس مدل ون‌گنوختن و بروکز-کوری دارند. با توجه به اهمیت روش آبیاری در میزان کنترل شوری خاک، انتقال املاح در امتداد پروفیل خاک طی کوددهی و نقش آن در کنترل آلودگی آب و خاک، در این تحقیق با استفاده از الگوریتم PSO که به مدل HYDRUS لینک شده است، به برآورد پارامترهای هیدرولیکی و انتقال املاح در شبیه‌سازی حرکت آب و نیترات در خاک طی روش آبیاری سنتریپوت در مزرعه یونجه چهارساله پرداخته شد تا میزان کارایی مدل HYDRUS-PSO و میزان عملکرد روش آبیاری در تأمین رطوبت خاک و اثر آن در انتقال نیترات خاک سنجیده شود.

مواد و روش‌ها

این مطالعه در مزرعه تحقیقاتی دانشکده کشاورزی دانشگاه بیرجند صورت گرفت. شهرستان بیرجند با اقلیم خشک-نیمه‌خشک، با ارتفاع ۱۴۹۱ متر از سطح دریا، دارای میانگین دمای سالانه برابر با ۱۶/۵ درجه سانتی‌گراد و ۱۵۵ میلی‌متر میانگین بارش سالانه است (عابدینی و همکاران، ۲۰۲۲). در این مزرعه زمینی به وسعت سه هکتار که تحت کشت یونجه چهارساله و روش آبیاری سنتریپوت قرار داشت، با دور آبیاری ۶ روزه به مدت ۸ ساعت با دبی ۰/۵ مترمکعب در ساعت برای

ورود هوا (L^{-1}) منحنی رطوبتی خاک، S_e اشباع مؤثر
(-)، L بیان‌گر اعوجاج و پیوستگی خلل و فرج خاک است
که به‌طور معمول برابر با ۰/۵ فرض می‌شود (معلم،
۱۹۷۶).

جدول ۱- ویژگی‌های فیزیکی-شیمیایی خاک

عمق خاک (cm)	شن (%)	سیلت (%)	رس (%)	EC (dS/m)	pH	OM (%)	CaCO ₃ (%)	T.N.V (%)	NH ₄ (mg/L)	ρ_b (g/cm ³)	F (%)
۰-۴۰	۶۱	۱۸	۲۱	۱/۲۵	۷/۶	۰/۵	۵/۲۵	۰/۲	2×10^{-5}	۱/۵	۴۰
۴۰-۱۰۰	۷۳	۸	۱۹	۱۲۲	۷/۴	۰/۴	۸	۱۵۰	10^{-5}	۱/۷	۳۴

می‌شود و افزایش شدت پخشیدگی اکسیژن در خاک
فراهم می‌شود، با توجه به شرایط حاکم، از فرایند
دنیتریفیکاسیون نیز صرف‌نظر شد (راندال و ایراگوراپیو،
۱۹۹۵).

معادلات حاکم در فرایند انتقال املاح در خاک

فرایند انتقال املاح در خاک تحت سه مکانیسم انتقال
همرفت، پخشیدگی و انتشار صورت می‌گیرد. در مطالعه
اشکال نیتروژن در خاک، ملزم به در نظر گرفتن
واکنش‌های درجه صفرم و درجه اول هستیم. معادلات
دیفرانسیل حاکم بر انتقال املاح طی جریان آب در خاک
در یک محیط متخلخل با شرایط اشباع تغییرپذیر
براساس معادله انتقال-انتشار به روش حل عددی
المان‌های محدود گالرکین به شرح ذیل است (سیمونک
و همکاران، ۲۰۱۳).

$$\frac{\partial \theta C}{\partial t} + \frac{\partial \rho S}{\partial t} + \frac{\partial a C_g}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left(\theta D_w \frac{\partial C}{\partial x} \right) + \quad (6)$$

$$\frac{\partial}{\partial x} \left(\theta D_g \frac{\partial C_g}{\partial x} \right) - \frac{\partial q C}{\partial x} - S C_{root} - (\mu_w - \mu'_w) \theta C_k -$$

$$(\mu_s - \mu'_s) p_b S_k + \gamma_w \theta + \gamma_s p_b$$

که در آن C و C_g به‌ترتیب بیانگر غلظت املاح در فاز مایع
و گاز ($M L^{-1}$)، s غلظت املاح در فاز جامد ($M L^{-1}$)، θ
رطوبت حجمی خاک ($L^3 L^{-3}$)، p_b جرم مخصوص
ظاهری خاک ($M L^{-3}$)، q شدت جریان آب ($L day^{-1}$)،
 μ_w و μ_s ضرایب ثابت واکنش درجه اول در فاز مایع
خاک (day^{-1})، μ'_w و μ'_s مشابه ضرایب ثابت واکنش اول
است که در اتصال حلقه‌های زنجیره واکنش استفاده
می‌شوند. γ_w و γ_s ضرایب ثابت واکنش درجه صفرم در
فاز جامد خاک (day^{-1})، r_a جذب عناصر غذایی توسط
ریشه ($M L^{-1} day^{-1}$)، D_w ضریب پخشیدگی در فاز مایع
خاک ($L^2 day^{-1}$)، D_g ضریب پخشیدگی در فاز جامد
خاک ($L^2 day^{-1}$)، هستند. ضریب پخشیدگی مولکولی
آمونیم و نیترات در آب خالص به‌ترتیب برابر با ۰/۰۶۴ و

انتقال املاح در خاک

براساس معادله انتقال-انتشار به روش حل عددی
المان‌های محدود گالرکین، میزان انتقال نیترات و آمونیوم
ارزیابی شد. براساس مطالعه هانسن و همکاران (۲۰۰۶)
روند تغییرات NH_4 شامل (۱) تبخیر آمونیاک (۲) فرایند
نیتریفیکاسیون (۳) فرایند دنیتریفیکاسیون (۴) جذب
سطحی آمونیوم در سطح خاک و (۵) جذب آمونیوم و
نیترات توسط سیستم ریشه گیاه است. ارزیابی مواد آلی
خاک نشان داد که مقدار آن پایین است (جدول ۱).
همچنین نیتروژن کل خاک حدود ۱/۲ درصد (بعد از
چهار سال کشت یونجه) به‌دست آمد. در بحث
معدنی‌شدن نیتروژن خاک، نیاز به تعیین نسبت کربن آلی
خاک و نیتروژن (C/N) خاک است؛ البته این فرایند متأثر
از رطوبت خاک است. از سوی دیگر فرایند معدنی‌شدن
نیتروژن خاک به نوع رس خاک، مقدار آمونیوم، رطوبت،
دما و مقدار پتاسیم خاک نیز بستگی دارد. با توجه به
شرایط اقلیمی منطقه؛ درجه حرارت، تهویه، رطوبت
خاک، اسیدیته خاک، درصد مواد آلی خاک و نسبت کربن
و نیتروژن (C/N) اولیه خاک (قبل از کشت یونجه)
می‌توان از فرایند معدنی‌شدن نیتروژن خاک صرف‌نظر
کرد. براساس ترکیبات معدنی نیتروژن در آب آبیاری
به‌کاررفته در مزرعه در این تحقیق فرایند نیتریفیکاسیون
(تبدیل آمونیوم به نیترات خاک) در نظر گرفته شد. با
کاربرد روش آبیاری سنترپیوت میزان آب مصرفی به
حدی نبود که بتوان گفت شرایط اشباع در مزرعه رخ داده
است. از سوی دیگر آبیاری در یک بازه زمانی مشخص
صورت نمی‌گرفت، بلکه به صورت چرخه‌ای در زمان‌های
مختلف شبانه‌روز انجام می‌شد. همچنین در مزرعه مورد
مطالعه، گیاهی که دارای سیستم ریشه تکامل‌یافته است،
مورد مطالعه قرار گرفت. در این شرایط به‌دلیل وجود یک
سیستم ریشه تکامل‌یافته، آب در محیط ریشه تخلیه

مرزی پایینی انتخاب شد. برای فرایند انتقال املاح در امتداد پروفیل نیز از مرز کوشی استفاده شد.

بهینه‌سازی مدل HYDRUS

در این مطالعه برای بهینه‌سازی پارامترهای هیدرولیکی و انتقال املاح در یک بُعد از تابع هدف زیر استفاده شد.

$$\text{Min } f(b) = \sum_{i=1}^n [q_o(x, t_i) - q_s(x, t_i, b)]^2 \quad (7)$$

q_o و q_s به ترتیب بیانگر مقادیر اندازه‌گیری و شبیه‌سازی شده در زمان t_i و عمق x است. b نیز بیانگر بردار پارامترهای هیدرولیکی و انتقال املاح است که بهینه‌سازی شدند. در شکل ۱ فلوچارت مدل بهینه‌ساز HYDRUS-PSO ارائه شده است.

برای تعیین دامنه تغییرات پارامترهای هیدرولیکی خاک از اطلاعات راثولس و همکاران (۱۹۸۲) جدول ۲، از اطلاعات لاتس و همکاران (۱۹۹۲) برای دامنه تغییرات پارامترهای انتقال نیترا و آمونیوم خاک استفاده شد. الگوریتم بهینه‌ساز PSO دارای چهار پارامتر است که در هر کلاس بافتی این پارامترها مقادیر متفاوتی دارند. N بیانگر تعداد تکرار، w ضریب وزن‌دهی، c_1 و c_2 ضریب‌های ثابت شتاب هستند که در اندازه گام تأثیر دارند. مقدار این پارامترها در تعیین مقدار بهینه پارامترهای مورد مطالعه نقش دارند و با توجه به شرایط مورد مطالعه و تابع هدف مورد نظر مقدار این پارامترها نوسان دارد و در حل مسئله براساس تابع هدف تعریف شده تغییر می‌کنند. مقدار این پارامترها نیز براساس کمترین مقدار RMSE تعیین شد (جدول ۲).

کالیبراسیون مدل HYDRUS-PSO

برای کالیبراسیون عملکرد مدل HYDRUS در شبیه‌سازی رطوبت خاک، نیترا و آمونیوم خاک در هر یک از مزرعه‌های مورد مطالعه، سه ماه نخست نمونه‌برداری (از ۲۰ خرداد تا ۲۰ مرداد) برای واسنجی و ماه آخر (از ۲۰ مرداد تا ۲۰ شهریور) برای اعتبارسنجی عملکرد مدل HYDRUS انتخاب شد. برای ارزیابی عملکرد مدل از شاخص آماری، مجذور میانگین مربعات خطا^۱ (RMSE) و معیار نش-ساتکلِف^۲ (NSE) بهره گرفته شد.

۰/۰۶۸ سانتی‌متر مربع در ساعت در نظر گرفته شد (کوت و همکاران، ۲۰۰۳). در کاربرد معادله CDE در فرایند شبیه‌سازی انتقال املاح براساس روش حل عددی المان‌های محدود، نیاز به بررسی میزان کارایی هریک از پارامترهای ارائه‌شده در این معادله است:

۱- μ_w و μ_s زمانی در بررسی فرایند شبیه‌سازی اعمال می‌شوند که فرایند تصعید آمونیاک یا فرایند دنیتریفیکاسیون یا طی تبدیل شدن ترکیبات معدنی به آلی در اثر فعالیت میکروارگانیسم‌های خاک یا گیاه در خاک رخ دهد. در این تحقیق مشاهده شد که شرایط مناسب برای همزیستی میکروارگانیسم خاک و تولید نیتروژن آلی در محیط ریشه فراهم نشده است.

۲- μ_w و μ_s طی تبدیل اشکال نیتروژن به یکدیگر لحاظ می‌شوند.

۳- γ_w و γ_s املاح از طریق معدنی شدن ترکیبات آلی یا بقایای گیاهی وارد خاک شوند.

برای تعیین ضریب جذب سطحی آمونیوم (K_d) و برای ضریب تبدیل آمونیوم به نیترا در فاز مایع و جامد خاک (μ_w و μ_s) از نتایج مطالعات لاتس و همکاران (۱۹۹۲) استفاده شد.

انتقال و تبدیل فرم‌های نیتروژن در خاک و همچنین اختلاف موجود در جذب فعال و غیرفعال اشکال نیتروژن در خاک توسط ریشه بسیار پیچیده است. برای اجتناب از این پیچیدگی، در این مطالعه فرایند جذب املاح در محیط ریشه از نوع جذب غیرفعال نامحدود در نظر گرفته شد. در نتیجه حداکثر غلظت املاح قابل جذب (C_{max}) همراه با آب جذب‌شده توسط ریشه در محدوده ریشه برابر با بیشترین مقدار غلظت نسبت به غلظت شبیه‌سازی در فرایند مدل‌سازی تنظیم شد (رومس و همکاران، ۲۰۱۲).

شرایط اولیه و مرزی

در این تحقیق مرز بالایی به دلیل اینکه در تماس با اتمسفر است و میزان تبخیر از سطح خاک، بارندگی، تعرق از سطح گیاه و سطح آب زیرزمینی تأثیرگذار هستند، شرایط مرزی اتمسفریک در نظر گرفته شد. از سوی دیگر به دلیل پایین بودن سطح آب زیرزمینی در سطح مزرعه، آب مازاد از منطقه ریشه گیاه خارج شد و امکان تهویه و تنفس ریشه گیاه فراهم بود، زهکشی آزاد به عنوان شرایط

پس مقدار رطوبت خاک در روند تغییرات این پارامتر نقش دارد. مزرعه مورد مطالعه تحت روش آبیاری سنترپیوت است و از سوی دیگر دارای بافت‌های با توزیع اندازه ذرات درشت و در نتیجه میزان رطوبت نگهداشت آب پایین است. روش و حجم آب آبیاری در میزان رطوبت خاک در امتداد پروفیل تأثیرگذار است که از عوامل مؤثر در مقدار این پارامتر است. مقدار پارامتر μ_w بیانگر مقدار تبدیل آمونیوم به نیترات در سطح ذرات خاک است. به‌طبع بافت‌هایی که دارای ظرفیت تبادل بالایی هستند و رس‌هایی از نوع ورمیکولایت و ایلایت داشته باشند، شرایط برای این تبدیل فراهم‌تر می‌شود که نهایتاً سبب مقادیر بالای این پارامتر می‌شود. ضریب پخشیدگی املاح در خاک متأثر از جرم مخصوص ظاهری خاک و درصد تخلخل کل خاک است. با افزایش تخلخل کل و فضای خلل و فرج درشت‌تر امکان جابه‌جایی املاح فراهم‌تر است. بالطبع مقدار ضریب پخشیدگی املاح در این نوع شرایط بیشتر حاصل می‌شود. بیشترین مقدار ضریب پخشیدگی طولی املاح در عمق زیرین به‌دست آمد. نتایج حاصل از بهینه‌سازی پارامترهای انتقال املاح با نتایج مطالعات لی و همکاران (۲۰۱۵) و سیمیونک و همکاران (۲۰۱۱) مطابقت دارد. برای بررسی میزان توانایی مدل در شبیه‌سازی روند تغییرات رطوبت، غلظت نیترات و آمونیوم خاک، از دو شاخص آماری RMSE و NSE در واسنجی و اعتبارسنجی مدل بهینه‌شده استفاده شد.

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N [P_i - O_i]^2} \quad (8)$$

$$NSE = 1 - \frac{\sum_{i=1}^N (O_i - P_i)^2}{\sum_{i=1}^N (O_i - \bar{O})^2} \quad (9)$$

O_i : مقدار اندازه‌گیری‌شده در روز i ام. P_i : مقدار شبیه‌سازی‌شده در روز i ام. $\bar{O}$: میانگین مقدار اندازه‌گیری‌شده. N : تعداد کل نقاط نمونه‌برداری.

نتایج و بحث

با مطالعه جدول ۱ و بررسی روند تغییرات درصد شن و وزن مخصوص ظاهری خاک می‌توان بیان کرد که پروفیل بیانگر حاکم‌بودن شرایط غیرهمگن در سطح مزرعه است. در این شرایط بایستی پارامترهای هیدرولیکی خاک در هر عمق به‌طور مجزا برآورد شود. الگوریتم PSO از چندین پارامتر تشکیل شده است که در بهینه‌سازی پارامترهای مورد نظر مورد استفاده قرار می‌گیرد. این پارامترها در امتداد پروفیل خاک با تغییر کلاس بافتی خاک رفتار متفاوتی نشان می‌دهند. نتایج کاربرد الگوریتم PSO در برآورد پارامترهای مورد مطالعه در فرایند شبیه‌سازی در جدول ۴ ارائه شده‌است.

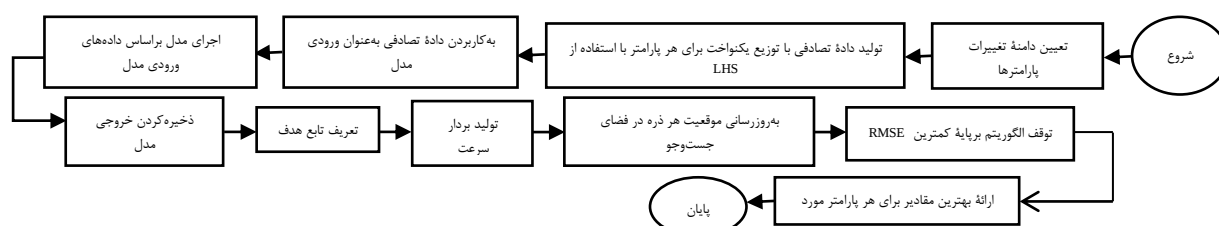
مقدار پارامترهای حاصل طی فرایند بهینه‌سازی با نتایج مطالعات آزاد و همکاران (۲۰۱۸) و برونیتی و همکاران (۲۰۱۸) دارای یک روند مشابه است. مقدار μ_w بیانگر میزان تبدیل آمونیوم به نیترات در فاز محلول خاک است.

جدول ۲- دامنه تغییرات پارامترهای هیدرولیکی خاک در بهینه‌ساز مدل HYDRUS-1D

کلاس بافتی خاک	$\theta_r (cm^3 \cdot cm^{-3})$	$\theta_s (cm^3 \cdot cm^{-3})$	$\alpha (cm^{-1})$	$n (-)$	$K_s (cm \cdot day^{-1})$
لوم رس شنی	۰/۰۰-۰/۱۳۷	۰/۳۳۲-۰/۴۶۴	۰-۱	۱-۴	۷/۶۹-۸/۴۹
لوم شنی	۰/۰۰-۰/۱۰۶	۰/۳۵۱-۰/۵۵	۰-۱	۱-۴	۴۶/۸۸-۴۷/۵۲

جدول ۳- تغییرات پارامترهای الگوریتم بهینه‌ساز PSO در بافت‌های مختلف

کلاس بافتی خاک	N	w	C ₁	C ₂
لوم رس شنی	۳۰۰	۰/۷۴	۱/۵۴	۱/۴۹
لوم شنی	۱۰۰	۰/۷۴	۱/۵۴	۱/۴۹



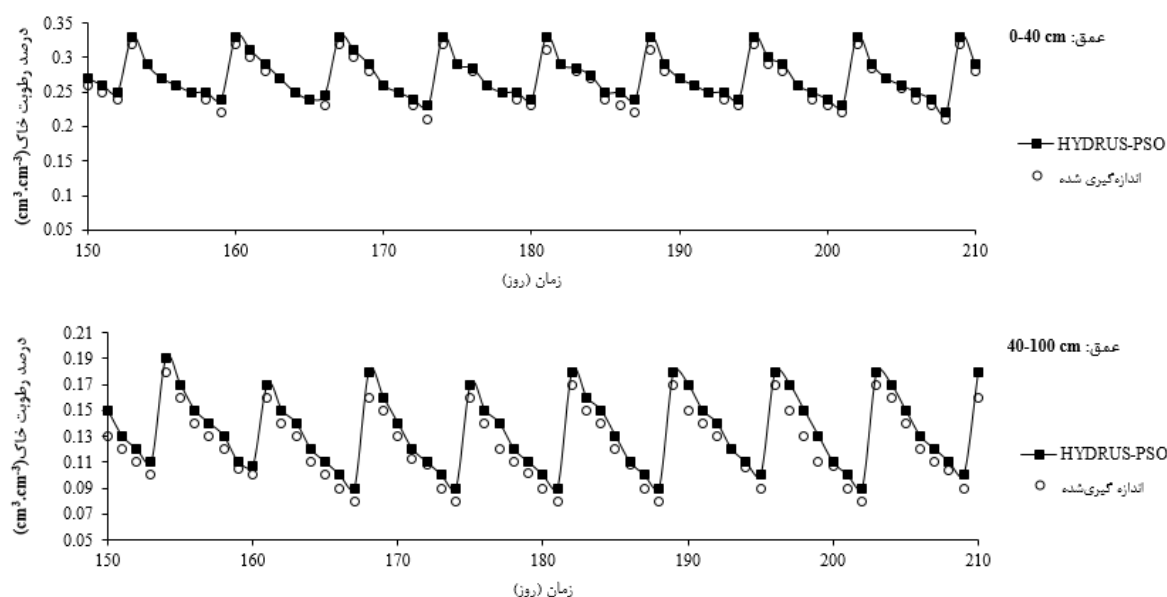
شکل ۱- فلوچارت مدل بهینه‌ساز HYDRUS-PSO

جدول ۴- پارامترهای بهینه‌شده طی ارزیابی کالیبراسیون مدل HYDRUS-PSO

پارامترهای انتقال املاح در خاک					پارامترهای هیدرولیکی خاک				
DL (cm)	μ_s (day ⁻¹)	μ_w (day ⁻¹)	K_d (cm ² .gr ⁻¹)	K_s (cm.day ⁻¹)	n (-)	α (cm ¹)	θ_s (cm ³ .cm ⁻³)	θ_r (cm ³ .cm ⁻³)	عمق خاک (cm)
۱۲/۳	۰/۲۰۶	۰/۲۰۳	۳/۵۲	۸/۲	۱/۲۴	۰/۰۰۲	۰/۳۵	۰/۰۳۴	۰-۴۰
۱۴/۵	۰/۲۰۴	۰/۳۴	۳/۳۱۸	۴۷/۲	۱/۸	۰/۰۰۵	۰/۳۷	۰/۰۰۰۱	۴۰-۱۰۰

میزان عملکرد مدل هستند. برای بررسی دقیق‌تر عملکرد مدل HYDRUS-PSO در شبیه‌سازی فرایندهای مورد مطالعه، در شکل‌های ۲ و ۳ به ترتیب روند تغییرات رطوبت، آمونیوم و نیتрат خاک نسبت به داده‌های اندازه‌گیری‌شده ارزیابی شد. بهترین عملکرد مدل HYDRUS-PSO در شبیه‌سازی جریان آب در خاک در لایه سطحی مشاهده شد (شکل ۲). در مقابل با افزایش عمق میزان دقت مدل بهینه‌شده نسبت به داده‌های اندازه‌گیری‌شده کاهش یافته است. میزان کاهش عملکرد مدل در برآورد رطوبت خاک در عمق زیرین خاک را می‌توان به روند تغییرپذیری ویژگی‌های خاک مرتبط دانست. به‌ویژه اینکه در امتداد پروفیل مورد مطالعه، با افزایش عمق خاک درصد شن خاک روند افزایشی داشته است و همچنین تفاوت عمده بین هدایت هیدرولیکی اشباع لایه سطحی و زیرین وجود دارد که یک مانع دیگر در انتقال رطوبت خاک محسوب می‌شود. از سوی دیگر تجمع ریشه در محدوده مرز بین دو لایه و جذب آب توسط ریشه، یک مانع دیگر در شبیه‌سازی رطوبت خاک در لایه زیرین خاک محسوب می‌شود. با بررسی روند تغییرات غلظت نمک اندازه‌گیری‌شده نسبت به مقدار شبیه‌سازی‌شده در شکل ۳ مشاهده می‌شود که روند تغییرات نمک طی شبیه‌سازی مشابه روند تغییرات غلظت نمک اندازه‌گیری‌شده است. هرچند در بازه روزهای ۱۶۰ تا ۱۶۵ مقدار نمک اندازه‌گیری‌شده نسبت به شبیه‌سازی کمتر به دست آمده است؛ البته تفاوت بین مقدار نمک شبیه‌سازی‌شده نسبت به مقدار اندازه‌گیری‌شده برای آمونیوم بیشتر قابل مشاهده است که می‌تواند به دلیل کوددهی و زمان وجین باشد. به‌ویژه اینکه شکل کود مصرفی آمونیوم دی فسفات است که سبب شده مقدار نمک آمونیوم در زمان کوددهی بیش‌برآورد شود. همچنین این تغییر می‌تواند به دلیل پایان دوره رشد محصول در آن بازه زمانی باشد.

با توجه به نتایج حاصل در جدول ۵ می‌توان بیان کرد که مدل به‌خوبی توانسته است روند تغییرات حاصل از هر دو فرایند مورد مطالعه را ارزیابی کند. روند تغییرات دو شاخص آماری RMSE و NSE در واسنجی مدل بهینه‌شده در شبیه‌سازی جریان آب در خاک نشان می‌دهد که در عمق سطحی مدل عملکرد بهتری دارد و با افزایش عمق خاک از دقت مدل کاسته شده است. شرایط غیراشباع حاصل از روش آبیاری و توسعه ریشه علاوه بر شرایط غیرهمگن خاک از علل کاهش دقت مدل در شبیه‌سازی فرایند جریان آب در خاک است. آزاد و همکاران (۲۰۱۸) نیز با استفاده از الگوریتم PSO به برآورد پارامترهای هیدرولیکی خاک در روش آبیاری قطره‌ای با مدل HYDRUS پرداختند. نتایج ایشان بیانگر توانایی مدل بهینه‌شده HYDRUS در برآورد رطوبت خاک بود. همچنین آنها بیان کردند که میزان تفاوت موجود بین داده‌های شبیه‌سازی و اندازه‌گیری‌شده به همگن‌فرض کردن شرایط مطالعه تحت مدل HYDRUS مرتبط است. درحالی‌که مطالعات میدانی و شرایط غیرکنترلی در سطح مزرعه سبب ایجاد یک محیط غیرهمگن می‌شود که موجب رفتارهای غیریکسان مدل در امتداد پروفیل خاک می‌شود. با توجه به جدول ۵ می‌توان بیان کرد که مدل به‌خوبی توانسته است روند تغییرات هر دو نمک را در مزرعه ارزیابی کند. میزان عملکرد مدل در فرایند برآورد نیترات خاک نیز در عمق سطحی خاک کاهش یافت. این کاهش عملکرد می‌تواند به دلیل زمان کوددهی باشد که همراه با آبیاری بوده که منجر به آبشویی و انتقال کود به لایه‌های زیرین شده است. از سوی دیگر در این مزرعه به‌طور تناوب و به‌صورت سرک کوددهی صورت گرفته است که می‌تواند یک عامل دیگر در کاهش غلظت نمک در لایه سطحی باشد. همچنین شرایط غیرهمگن خاک و پراکندگی حجم ریشه گیاه در امتداد پروفیل خاک نیز از دیگر عوامل مؤثر بر



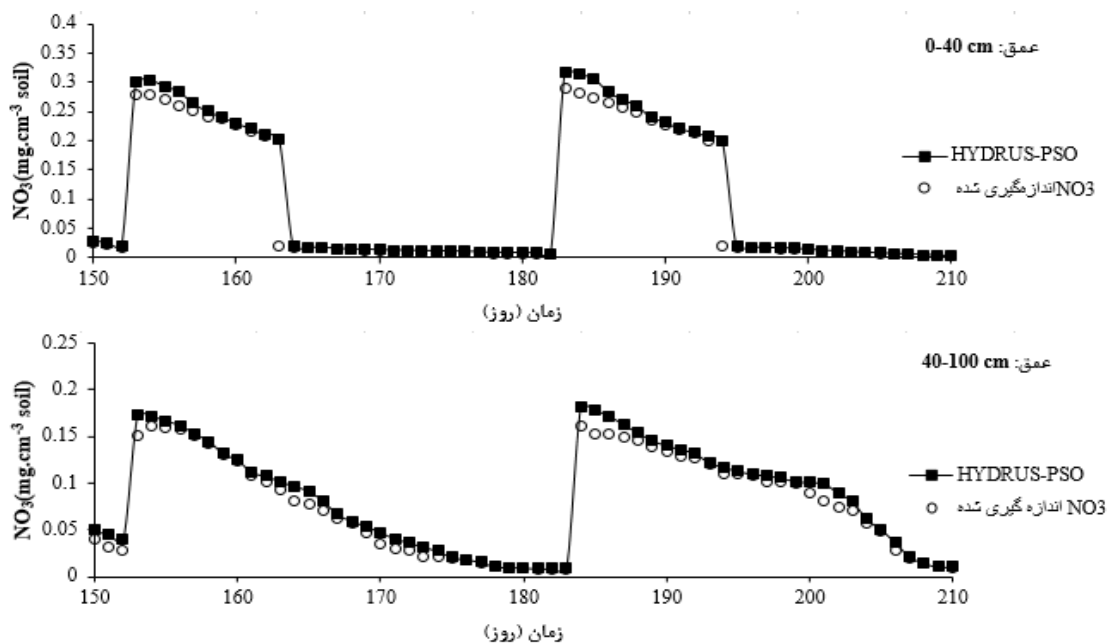
شکل ۲- عملکرد مدل HYDRUS-PSO در شبیه‌سازی فرایند جریان آب در خاک

افزایش دوره رشد رویشی گیاه یونجه که در روزهای بین ۲۰۰ و ۲۱۰ است، می‌باشد. رشد گیاه در این بازه زمانی به حداکثر مقدار ممکن می‌رسد و به مرحله وجین نزدیک می‌شود که بالطبع مقدار آمونیوم باقی‌مانده بعد از کوددهی، فرایندهای تصاعد و آبشویی، مورد مصرف گیاه قرار می‌گیرد و از تجمع غلظت آمونیوم در خاک کاسته می‌شود. در لایه سطحی با توجه به شکل ۳ از غلظت نیترات نیز بین بازه زمانی ۱۹۰ تا ۲۱۰ کاسته شده است که از طرفی به کاهش غلظت آمونیوم بازمی‌گردد، زیرا نمک نیترات حاصل دنیتریفیکاسیون آمونیوم است که با کاهش غلظت آمونیوم از مقدار آن کاسته می‌شود و از طرفی دیگر مقدار نیترات موجود یا مورد مصرف گیاه قرار گرفته یا طی آبیاری به عمق زیرین آبشویی می‌شود. با بررسی شکل ۳ در زمینه تغییرات غلظت نیترات خاک در لایه زیرین مشاهده می‌شود که برای بازه زمانی بین ۱۹۰ و ۲۱۰ مقدار نیترات نسبت به لایه سطحی بیشتر است و برخلاف لایه سطحی حالت پله‌ای ندارد که به تجمع نیترات در لایه زیرین که محل تجمع ریشه گیاه است، اشاره دارد؛ البته روند تغییرات نیترات در لایه زیرین و غلظت آن بیانگر تجمع نیترات در حد آلودگی نیست. پس می‌توان بیان کرد که روند کوددهی و مقدار مصرفی آن همراه با روش آبیاری سنتریپوت سبب تجمع نمک‌های نیتروژنی به‌ویژه در لایه زیرین خاک نشده است؛ البته روش کوددهی به‌کاررفته، توانسته است نیاز غذایی گیاه را

در بازه زمانی بعد از روز ۱۸۰م نیز یک پیک در نمودار تغییرات غلظت آمونیوم مشاهده می‌شود که باز بیانگر افزایش مقدار این نمک در خاک به‌دلیل کوددهی است؛ علاوه‌براین بعد از ۲۵ روز (یا نزدیک به ۳۰ روز) عمل وجین رخ داد که خود یک عامل دیگر در افزایش غلظت نمک آمونیوم در خاک است که البته با آبیاری در این روزها مقدار زیادی از نمک آمونیوم آبشویی و به عمق پایین‌تر انتقال داده شده است که این افزایش مقدار در عمق زیرین در شکل ۳ نیز قابل‌مشاهده است. بالطبع با افزایش این نمک فرایند دنیتریفیکاسیون نیز رخ داده است که منجر به افزایش غلظت نمک نیترات در این بازه زمانی در هر دو عمق شده است. از آنجایی که در این مطالعه یک گیاه کامل در فرایند بررسی انتقال جریان آب و انتقال املاح مشارکت داشته است، پس مقدار کود مصرفی برای توسعه ریشه صرف نشده است و کود مصرفی بیشتر برای تأمین نیاز غذایی گیاه در فرایند رشد رویشی است؛ بنابراین کوددهی در زمان وجین سبب افزایش غلظت هر دو نمک مورد مطالعه در پروفیل خاک می‌شود که با مطالعه شکل ۳ دو پیک قابل‌تمایزی قابل‌مشاهده است که بیانگر تطبیق زمان کوددهی و برداشت محصول است. در مقابل در روزهای ۱۹۰ به بعد یعنی روزهای ۲۰۰ و ۲۱۰ مقدار آمونیوم در خاک به حداقل مقدار ممکن می‌رسد و می‌توان بیان کرد که به صفر نزدیک شده است که این دوره زمانی مصادف با

آبیاری تحت فشار در بافت‌های لوم، سیلت لوم و شن لومی نشان‌دهنده کارایی بالای مدل HYDRUS در مطالعه انتقال املاح و رطوبت خاک در عمق‌های مختلف خاک است. در شکل ۳ عدم تجمع نیترات در عمق زیرین پروفیل خاک مشاهده شد. از سوی دیگر حداکثر غلظت نیترات خاک در مرز سمیت و زمینه ایجاد آلودگی قرار ندارد؛ البته در این مزرعه آمونیوم نیز دارای روند کاهشی از سطح به لایه‌های زیرین است که به روند جذب آن توسط گیاه و تبدیل شدن شکل نیتروژن به نیترات اشاره می‌کند. این روند تغییرات بیانگر کارایی روش کوددهی و کاربرد حجم مناسب کود در مزرعه است. از سوی دیگر، میزان عناصر غذایی خاک برای رشد گیاه فراهم شده و از تجمع نیترات و آلودگی خاک ممنعت می‌شود.

در مراحل مختلف رشد تأمین کند. بررسی شاخص‌های آماری در سایر عمق‌ها بیانگر دقت بالای مدل و همچنین بیانگر روند تغییرات غلظت نمک‌ها تحت روش مدیریتی به‌کاررفته در سطح مزرعه است؛ علاوه‌براین نتایج حاصل بیانگر عملکرد مناسب الگوریتم PSO در برآورد پارامترهای انتقال املاح خاک است. آبدیلازیز و زامبران-بیگارینی (۲۰۱۴) بیان کردند که الگوریتم PSO قابلیت بالایی در برآورد پارامترهای انتقال املاح خاک در مدل‌های هیدرولوژیکی خاک دارد. روند تغییرات غلظت نمک‌ها در شکل ۳ نشان‌دهنده توانایی مدل HYDRUS در شبیه‌سازی روند کوددهی تحت روش آبیاری سنترپیوت است. مطالعات الترابیلی و همکاران (۲۰۱۹) در بررسی عملکرد مدل HYDRUS در مدیریت روش‌های



شکل ۳- عملکرد مدل HYDRUS-PSO در شبیه‌سازی فرآیند انتقال املاح در خاک

جدول ۵- نتایج واسنجی و اعتبارسنجی مدل HYDRUS-PSO در فرایندهای مورد مطالعه

اعتبارسنجی NO ₃		واسنجی NO ₃		اعتبارسنجی NH ₄		واسنجی NH ₄		اعتبارسنجی θ		واسنجی θ		عمق خاک (cm)
RMSE	NSE	RMSE	NSE	RMSE	NSE	RMSE	NSE	RMSE	NSE	RMSE	NSE	
۰/۰۳۵	۰/۹۴	۰/۰۴	۰/۹۲	۰/۰۰۱	۰/۹۸	۰/۰۰۰۸	۰/۹۶	۰/۰۰۱	۰/۸۹	۰/۰۸	۰/۹۱	۰-۴۰
۰/۰۱۹	۰/۹۶	۰/۰۰۸	۰/۹۹	۰/۰۰۰۴	۰/۹۷	۰/۰۰۰۴	۰/۹۸	۰/۰۱۱	۰/۹۴	۰/۰۱	۰/۸۳	۴۰-۱۰۰

در سطح مزرعه یونجه پرداخته شد. نتایج حاصل بیانگر قابلیت الگوریتم PSO در برآورد پارامترهای هیدرولیکی، انتقال نیترات و آمونیوم خاک در امتداد پروفیل خاک است. با بررسی عملکرد مدل HYDRUS-PSO نسبت به

نتیجه‌گیری

در این مطالعه به ارزیابی کاربرد الگوریتم PSO در میزان عملکرد مدل HYDRUS تحت دو فرایند جریان آب در خاک و انتقال املاح خاک تحت روش مدیریتی اعمال شده

4. Azad N. Behmanesh J. Rezaverdinejad V. Abbasi F. and Navabian M. 2018. Developing an optimization model in drip fertigation management to consider environmental issues and supply plant requirements. *Agricultural water management*. 208: 344-356.
5. Brunetti G. Šimůnek J. and Piro P. 2016. A comprehensive numerical analysis of the hydraulic behavior of a permeable pavement. *Journal of Hydrology*. 540: 1146-1161.
6. Brunetti G. Porti M. and Piro P. 2018. Multi-level numerical and statistical analysis of the hygrothermal behavior of a non-vegetated green roof in a mediterranean climate. *Applied Energy*. 221: 204-219.
7. Cote C.M. Bristow K.L. Charlesworth P.B. Cook F.J. and Thorburn P.J. 2003. Analysis of soil wetting and solute transport in subsurface trickle irrigation. *Irrigation Science*. 22(3-4): 143-156.
8. Eltarabily M.G. Bali K.M. Negm A.M. and Yoshimura C. 2019. Evaluation of root water uptake and urea fertigation distribution under subsurface drip irrigation. *Water*. 11(7): 1487.
9. Grecco K.L. de Miranda J. H. Silveira L.K. and van Genuchten M.T. 2019. HYDRUS-2D simulations of water and potassium movement in drip irrigated tropical soil container cultivated with sugarcane. *Agricultural Water Management*. 221: 334-347.
10. Hansen M.N. Henriksen K. & Sommer S.G. (2006). Observations of production and emission of greenhouse gases and ammonia during storage of solids separated from pig slurry: effects of covering. *Atmospheric Environment*. 40(22): 4172-4181.
11. Jesus F.L.F.D. Nascimento J. G. Coelho R. D. Duarte S. N. and Mendonça F. C. 2017. Water use in irrigated agriculture: an approach to water productivity in drip and sprinkler systems.
12. Jin X. Li Z. Yang G. Yang H. Feng H. Xu X. ... and Luo J. 2017. Winter wheat yield estimation based on multi-source medium resolution optical and radar imaging data and the AquaCrop model using the particle swarm optimization algorithm. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*. 126: 24-37.
13. Khashei Siuki A. Etminan S. Shahidi A. Pourreza Bilondi M. and Jalali V. 2023. Investigating the performance of differential algorithm in estimating soil hydraulic parameters. *Water and Soil Management and Modelling*.
14. Li Y. Šimůnek J. Zhang Z. Jing L. and Ni L. 2015. Evaluation of nitrogen balance in a direct-seeded-rice field experiment using Hydrus-1D. *Agricultural Water Management*. 148: 213-222.

داده‌های حاصل از TDR نشان داده شد که این الگوریتم بهینه‌ساز سبب افزایش کارایی مدل HYDRUS در برآورد تغییرات رطوبت خاک تحت روش آبیاری سنتریپوت می‌شود. هرچند به دلیل حاکم‌بودن شرایط غیرهمگن در امتداد پروفیل و وجود اختلاف معنی‌دار بین هدایت هیدرولیکی اشباع در لایه سطحی و زیرسطحی خاک، از کارایی مدل HYDRUS-PSO در لایه زیرین نسبت به لایه سطحی کاسته شد. همچنین روند تغییرات آمونیوم و نیترات خاک نشان داد که مدل HYDRUS-PSO توانسته روند تغییرات املاح خاک را تحت روش کوددهی سرک با روش آبیاری سنتریپوت در امتداد پروفیل خاک را به‌خوبی شبیه‌سازی کند. نتایج حاصل از این مطالعه بیانگر قابلیت الگوریتم بهینه‌ساز PSO برای افزایش توانمندی مدل HYDRUS در برآورد غلظت نمک‌ها و نشان‌دادن روند تغییرات در امتداد پروفیل خاک متأثر از میزان جذب توسط ریشه، آبشویی و تجمع نمک در خاک است. براساس نتایج حاصل می‌توان بیان کرد در کاربرد روش کوددهی سرک همراه با آبیاری سنتریپوت، اگرچه روش آبیاری سبب افزایش حجم بالای رطوبت در سطح خاک می‌شود، حضور گیاه و کاربرد کود به‌صورت تناوبی از تجمع و آلودگی نیترات در خاک ممانعت می‌کند. درنهایت می‌توان ذکر کرد که کاربرد الگوریتم‌های فراابتکاری نقش مؤثری در افزایش قابلیت مدل HYDRUS به‌ویژه در شرایط غیرهمگن و مدیریت حفاظتی در مطالعه میزان کارایی روش‌های نوین آبیاری دارد.

منابع

1. Abdelaziz R. and Zambrano-Bigiarini M. 2014. Particle swarm optimization for inverse modeling of solute transport in fractured gneiss aquifer. *Journal of contaminant hydrology*. 164: 285-298.
2. Abedini E. Mousavi Bayegi M. Khashei Siuki A. and Selahvarzi Y. 2022. Investigating the Trend of extreme Temperature Events Based on the Fifth IPCC Report (Case Study: South Khorasan Province). *Journal of Climate Research*. 1400(48):1-22.
3. Azad N. Behmanesh J. Rezaverdinejad V. Abbasi F. and Navabian M. 2020. An analysis of optimal fertigation implications in different soils on reducing environmental impacts of agricultural nitrate leaching. *Scientific Reports*. 10(1): 1-15.

- and multiple solutes in variably-saturated porous media. Department of environmental sciences university of California riverside riverside, California
26. Tokarev K.E. Rogachev A.F. Protsyuk M.P. Rudenko A.Y. Chernyavsky A.N. and Tokareva Y.M. 2020. Analysis of promising methods of irrigation and melioration techniques of crops in arid climate. In IOP Conference Series: Earth and Environmental Science. 488(1): 45-61.
 27. Xiang G. Long S. and Dang A. 2022. Fabrication of the Ordered Mesoporous nZVI/Zr-Ce-SBA-15 Composites Used for Crystal Violet Removal and Their Optimization Using RSM and ANN-PSO. Sustainability. 14(11): 6566.
 28. Xu P. Zhang Y. Gong W. Hou X. Kroeze C. Gao W. and Luan S. 2015. An inventory of the emission of ammonia from agricultural fertilizer application in China for 2010 and its high-resolution spatial distribution. Atmospheric Environment. 115: 141-148.
 29. Yang T. Šimůnek J. Mo M. McCullough-Sanden B. Shahrokhnia H. Cherchian S. and Wu L. 2019. Assessing salinity leaching efficiency in three soils by the HYDRUS-1D and-2D simulations. Soil and Tillage Research. 194: 104342.
 30. Zhou T. Šimůnek J. Braud I. Nasta P. Brunetti G. and Liu Y. 2022. The impact of evaporation fractionation on the inverse estimation of soil hydraulic and isotope transport parameters. Journal of Hydrology. 612: 128100.
 15. Li Y.B. Liu Y. Nie W. B. and Ma X. Y. 2018. Inverse modeling of soil hydraulic parameters based on a hybrid of vector-evaluated genetic algorithm and particle swarm optimization. Water. 10(1): 84.
 16. Lotse E. G. Jabro J. D. Simmons K. E. and Baker D. E. 1992. Simulation of nitrogen dynamics and leaching from arable soils. Journal of contaminant hydrology. 10(3): 183-196.
 17. Mualem Y. 1976. A new model for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated porous media. Water resources research. 12(3): 513-522.
 18. Poch-Masegú R. Jiménez-Martínez J. Wallis K. J. de Cartagena F. R. and Candela L. 2014. Irrigation return flow and nitrate leaching under different crops and irrigation methods in Western Mediterranean weather conditions. Agricultural Water Management. 134: 1-13.
 19. Randall G. W. and Iragavarapu T. K. 1995. Impact of long-term tillage systems for continuous corn on nitrate leaching to tile drainage. American Society of Agronomy, Crop Science Society of America, and Soil Science Society of America. 24(2): 360-366.
 20. Rathore V.S. Nathawat N.S. Bhardwaj S. Sasidharan R.P. Yadav B.M. Kumar M. and Yadav O.P. 2017. Yield, water and nitrogen use efficiencies of sprinkler irrigated wheat grown under different irrigation and nitrogen levels in an arid region. Agricultural Water Management. 187: 232-245.
 21. Rawls W. J. Brakensiek D. L. and Saxton K. E. 1982. Estimation of soil water properties. Transactions of the ASAE. 25(5): 1316-1320.
 22. Ramos T.B. Šimůnek J. Gonçalves M.C. Martins J.C. Prazeres A. and Pereira L. S. 2012. Two-dimensional modeling of water and nitrogen fate from sweet sorghum irrigated with fresh and blended saline waters. Agricultural Water Management. 111: 87-104.
 23. Šimůnek J. and Van Genuchten M.T. 1999. Using the HYDRUS-1D and HYDRUS-2D codes for estimating unsaturated soil hydraulic and solute transport parameters. Characterization and measurement of the hydraulic properties of unsaturated porous media. 1: 523-1.
 24. Šimůnek J. van Genuchten M.Th. and Sejna M. 2011. The HYDRUS software package for simulating two- and three-dimensional movement of water, heat, and multiple solutes in variably-saturated media. Technical Manual, Version 2. PC Progress, Prague, Czech Republic.
 25. Šimůnek J. Šejna M. Saito H. Sakai M. and van Genuchten M.Th. 2013. The HYDRUS software package for simulating the two-and three-dimensional movement of water, heat,

