

Assessing the hydraulic parameter's uncertainty of the HYDRUS model using DREAM method

Samaneh Etminan^{1*} , Vahidreza Jalali² , Majid Mamodabadi³ , Abbas Khashei-Siuki⁴ , Mohsen Pourreza-Bilondi⁵ 

¹ Ph.D. Student, Department of Soil Science, Shahid Bahonar University of Kerman, Kerman, Iran

² Associate Professor, Department of Nature Engineering, Shirvan Faculty of Agriculture, Bojnord University, Bojnord, Iran

³ Professor, Department of Soil Science, Shahid Bahonar University of Kerman, Kerman, Iran

⁴ Professor, Department of Water Engineering, Birjand University, Birjand, Iran

⁵ Associate Professor, Department of Water Engineering, Birjand University, Birjand, Iran

Extended Abstract

Introduction

The accuracy and efficiency of the analytical and numerical models to describe water flow in soil, in unsaturated environments are affected by input data uncertainty, model structure uncertainty, and hydraulic required parameters by the model. Parameter uncertainty has an impact on the model simulation by displaying uncertainty in the simulation results. Hence, the quantitative assessment of the parameter uncertainty and its influence on the model simulation is important in reducing simulation uncertainty. The Bayesian method is a common method for uncertainty analysis that has widespread application in science and engineering to reconcile the concepts of model structure with data (assimilation of input and model outputs, and inference of the parameters). Therefore, a Markov chain Monte Carlo (MCMC) algorithm based on the Bayesian inference to improve the computational efficiency of the analysis was used. The DREAM algorithm is one of the adaptive methods, the Markov chain sampling method which is known as an effective method in used soil-water models due to searching in vast space and solving complex models with a large number of variables. In addition, one of the main problems in using Bayesian inference for hydrological models is their nonlinear relations and using them in heterogenic conditions, DREAM algorithm has been developed to use Bayesian analysis in soil-water problems. Hence, this study has taken the efficiency of the DREAM algorithm as a global optimization method and convergence parser in sampling chain paths and posterior distribution of parameters. The HYDRUS model is a hydraulic model to study the soil-water processes that include nonlinear equations. In addition, center pivot irrigation is a modern method of water management that need to study using hydraulic models under various conditions. Hence, the main purpose of this article is assessment the role of the management method and environmental prevailing conditions in the uncertainty of hydraulic parameters and model structure in estimating water flow under a center pivot irrigation system in four-year alfalfa cultivation.

Materials and Methods

The profile was dug at 120 cm depth. The soil profile was divided into three layers and two soil texture classes. The physical-chemical soil properties were studied in each layer. Assessment of soil properties stated that exists a heterogeneous layer in this soil profile. TDR was used to measure soil water content before, after, and during every irrigation period. Soil water content was measured from 10 June to 11 September 2018 consecutively. The van Genuchten-Mualem equation was used to estimate soil hydraulic parameters and describe water flow in the HYDRUS model. The HYDRUS model is coupled with the DREAM algorithm to evaluate parameter uncertainty and the model structure uncertainty based on measured soil water content data using TDR in every three categorized layers. In this article the p-factor, d-factor, and S and T indices were used to evaluate parameter uncertainty, the model structure uncertainty, and model performance.

Results and Discussion

The qualitative evaluation of soil hydraulic parameters was compiled by the posterior distributions of parameters in every three depths. The parameters had a normal distribution, the model could be recognized the value of

parameters, whereas the parameters didn't have a normal distribution and had high uncertainty. The " α " parameter had high uncertainty in every three depths, in other words, in two soil texture classes, this parameter compared to other parameters had high uncertainty. Along heterogeneous soil profiles, the " α ", " θ_s ", and " n " parameters were shown high uncertainty to the Hydraulic conductivity parameter of soil saturation. The value of p -factor and d -factor were obtained equal to 83.6 and 0.13 on the soil surface and 10 and 0.14 on the subsurface soil. Reducing the p -factor index in the lower soil layers explained the overlap between measured soil water content points with estimated soil water content. So, along the soil profile could be observed high uncertainty of soil hydraulic parameters under center pivot irrigation. On the other hand, increasing the d -factor index in the sub-surface soil stated increased confidence intervals which indicate the model structure uncertainty and the poor performance of the HYDRUS model in heterogenic conditions. Also, the value of two indices of S and T were obtained 0.3 and 0.76 for the surface layer and 0.88 and 1.4 in the lower soil layers respectively. The values of S and T indices stated the ability of the DREAM algorithm to reduce parameter uncertainty and the model structure uncertainty in soil surface whereas the trend of changes in the two indices explained Asymmetry of the confidence interval with respect to the measured points and the pre-estimation of the model in the lower soil layers. Therefore, the trend of the d -factor, S and T indices showed the influence of the mathematical-physics concepts in the HYDRUS model structure in the heterogenic layer and unsaturated conditions. The research results stated the ability of the HYDRUS model in describing water flow under center pivot irrigation as a novel method of managing water sources, especially in arid and semi-arid areas. Even though, the results of the assessment indices showed decreasing model performance in the lower soil layers.

Conclusion

The results of soil profile indicated the effect of parameter uncertainty and the model structure uncertainty in soil moisture estimation affected by management and environmental conditions. In addition, the results showed the ability of the DREAM algorithm to simultaneously evaluate the uncertainty of the parameters and the model structure in order to increase the accuracy of the HYDRUS model under the applied conditions. Also, in this study, the DREAM algorithm indicated the role of the heterogeneous layer in parameter uncertainty and its effect on the accuracy of the model performance. The DREAM algorithm is a practical and management option to evaluate the HYDRUS model during the application of the center pivot irrigation method at the farm level. So, this is an appropriate option to study the efficiency of the HYDRUS model using modern methods in agricultural practices. Moreover, to survey the efficiency of hydraulic models under the prevailing conditions could be used the ability of the DREAM algorithm based on the Markov chain.

Keywords: Center pivot irrigation, DREAM algorithm, Hydraulic model, Optimizer algorithm

Article Type: Research Article

*Corresponding Author, E-mail: etminan.s@agr.uk.ac.ir

Citation: Etminan, S., Jalali, V.R., Mamodabadi, M., Khashei-Siuki, A., & Pourreza-Bilondi, M. (2023). Assessing the hydraulic parameter's uncertainty of the HYDRUS model using DREAM method. *Water and Soil Management and Modeling*, 3(4), 1-15.

DOI: 10.22098/mmws.2022.11659.1152

DOR: 20.1001.1.27832546.1402.3.4.20.4

Received: 13 October 2022, Received in revised form: 29 October 2022, Accepted: 03 November 2022, Published online: 03 November 2022

Water and Soil Management and Modeling, Year 2023, Vol. 3, No. 4, pp. 1-15

Publisher: University of Mohaghegh Ardabili

© Author(s)





ارزیابی عدم قطعیت پارامترهای هیدرولیکی مدل HYDRUS با استفاده از روش DREAM

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

^۱ دانشجوی دکتری، گروه علوم خاک، دانشگاه شهید باهنر کرمان، کرمان، ایران

^۲ دانشیار، گروه مهندسی طبیعت، دانشکده کشاورزی شیروان، دانشگاه بجنورد، بجنورد، ایران

^۳ استاد، گروه علوم خاک، دانشگاه شهید باهنر کرمان، کرمان، ایران

^۴ استاد، گروه مهندسی آب، دانشگاه بیرجند، بیرجند، ایران

^۵ دانشیار، گروه مهندسی آب، دانشگاه بیرجند، بیرجند، ایران

چکیده

دقت و کارایی مدل‌های تحلیلی و عددی در توصیف جریان آب در خاک، در محیط‌های غیراشباع متأثر از عدم قطعیت داده‌های ورودی، ساختار مدل و پارامترهای هیدرولیکی مورد نیاز مدل است. الگوریتم DREAM یکی از روش‌های تطبیقی نمونه‌برداری زنجیره مارکف است که به دلیل جستجو در فضای وسیع و حل مدل‌های پیچیده با تعداد زیاد متغیر، به عنوان یک روش مؤثر در کاربرد مدل‌های آب-خاک شناخته شده است. هدف اصلی این پژوهش، مطالعه نقش روش مدیریتی و شرایط محیطی حاکم در میزان عدم قطعیت پارامترهای هیدرولیکی و ساختار مدل در برآورد جریان آب در خاک تحت روش آبیاری سنتریپوت در یک مزرعه چهارساله یونجه است. از این‌رو، مدل HYDRUS به الگوریتم DREAM ارتباط داده شد تا میزان عدم قطعیت ساختار مدل و پارامترهای هیدرولیکی بر پایه داده‌های رطوبتی اندازه‌گیری شده با TDR بررسی شود. ارزیابی توزیع پسین پارامترها در امتداد یک پروفیل غیرهمگن خاک، نشان‌دهنده عدم قطعیت بالای پارامتر هدایت هیدرولیکی اشباع خاک نسبت به پارامترهای α ، θ_s و n بود. روند تغییرات مقدار شاخص‌های p -factor و d -factor برای لایه سطحی $83/6$ و $13/1$ و برای لایه زیرین 10 و $14/0$ به ترتیب بیان‌گر افزایش عدم قطعیت پارامترها و ساختار مدل HYDRUS در برآورد جریان آب در خاک تحت روش آبیاری سنتریپوت در امتداد پروفیل خاک است. همچنین مقدار دو شاخص S و T برای لایه سطحی برابر با $0/3$ و $0/76$ و در لایه زیرین به ترتیب برابر با $0/88$ و $1/4$ حاصل شد که نشان‌دهنده کاهش عملکرد مدل که متأثر از عدم قطعیت ساختار مدل در برآورد رطوبت خاک تحت شرایط حاکم است. بنابراین، می‌توان بیان نمود که نتایج حاصل از چهار شاخص ارزیابی نشان‌دهنده اثر عدم قطعیت پارامترهای هیدرولیکی خاک و ساختار مدل در برآورد رطوبت خاک که متأثر از روش آبیاری، شرایط محیطی و مفاهیم ریاضی فیزیکی به کار رفته در مدل HYDRUS است. همچنین بیان‌گر اثر عدم قطعیت در کاهش کارایی مدل HYDRUS در امتداد پروفیل خاک است. بنابراین، می‌توان ذکر نمود که الگوریتم DREAM بر پایه زنجیره مارکف، یک روش کارآمد در مطالعه میزان تأثیرگذاری روش‌های مدیریتی و شرایط مختلف آزمایشگاهی در ارزیابی عدم قطعیت داده‌های ورودی مدل، پارامترهای هیدرولیکی خاک، ساختار مدل و میزان تأثیرگذاری آن‌ها در عملکرد مدل‌های هیدرولیکی است.

واژه‌های کلیدی: آبیاری سنتریپوت، الگوریتم بهینه‌ساز، الگوریتم DREAM، مدل هیدرولیکی

نوع مقاله: پژوهشی

*مسئول مکاتبات، پست الکترونیکی: etminan.s@agr.uk.ac.ir

استناد: اطمینان، سمانه جلالی، وحیدرضا، محمودآبادی، مجید، خاشعی سیوکی، عباس، و پوررضا بیلندی، محسن (۱۴۰۲). ارزیابی عدم قطعیت پارامترهای هیدرولیکی مدل HYDRUS با استفاده از روش DREAM. *مدل سازی و مدیریت آب و خاک*، ۳(۴)، ۱-۱۵.

DOI: 10.22098/mmws.2022.11659.1152

DOR: 20.1001.1.27832546.1402.3.4.20.4

تاریخ دریافت: ۱۴۰۱/۰۷/۲۱، تاریخ بازنگری: ۱۴۰۱/۰۸/۰۷، تاریخ پذیرش: ۱۴۰۱/۰۸/۱۲، تاریخ انتشار: ۱۴۰۱/۰۸/۱۲

مدل سازی و مدیریت آب و خاک، سال ۱۴۰۲، دوره ۳، شماره ۴، صفحه ۱ تا ۱۵

© نویسندگان

ناشر: دانشگاه محقق اردبیلی



۱- مقدمه

خاک در عین سادگی، یک ترکیب کاملاً پیچیده متشکل از اکوسیستم‌های طبیعی است که دارای ویژگی‌های فیزیکی و هیدرولیکی است که این ویژگی‌ها به‌طور سیستماتیک طی زمان و مکان تغییر می‌کنند. روابط بین ویژگی‌های خاک و فرآیندها کاملاً پیچیده و اغلب دربرگیرنده برخی روابط غیرخطی و وابسته به مقیاس است که به راحتی قابل پیش‌بینی نیستند (Brown and Heuvelink, 2006). به‌منظور درک بهتر روابط پیچیده موجود بین فرآیندهای درون خاک، محققین مختلف با استفاده از نرم‌افزارهای گوناگون به سمت مدل‌سازی این روابط پیچیده و وابسته به مقیاس روی آورده‌اند (Mannschatz et al., 2016). هر مدل برای اجرا، نیاز به یک سری داده‌های اولیه با کیفیت‌های متفاوت و شرایط اولیه و مرزی گوناگونی دارد. جمع‌آوری داده‌های اولیه و پیش‌بینی پارامترهای مدل همواره با خطاهایی همراه است که سبب کاهش اعتبار و صحت خروجی مدل می‌شود (Wainwright and Mulligan, 2013). کمی کردن خطاها دلالت بر وجود عدم قطعیت در خصوصیات و فرآیندهای خاک دارد (Brown and Heuvelink, 2006). عدم قطعیت مدل‌های هیدرولوژیکی خاک شامل عدم قطعیت ذاتی^۱ که حاصل تغییرپذیری داده و پارامترها است و همچنین عدم قطعیت شناختی^۲ که نتیجه نحوه اندازه‌گیری و جمع‌آوری اطلاعات موردنیاز داده‌های ورودی و پارامترهای مورد نیاز است. این دو نوع عدم قطعیت به‌عنوان عدم قطعیت پارامترهای مدل^۳ شناخته شده‌اند (Loosvelt et al., 2011). علاوه بر این، عدم قطعیت ساختار مدل نیز مطرح است که حاصل فرضیه‌ها و روابط ریاضی-فیزیکی اعمال شده در محیط مدل برای ارزیابی و شبیه‌سازی فرآیند موردنظر است (Liao et al., 2014). عدم قطعیت موجود در مدل‌ها سبب کاهش دقت و عملکرد مدل در بررسی فرآیندهای مختلف، تعیین دقیق پارامترهای مدل و داده‌های خروجی مدل در تفسیر رخدادها طی فرآیند شبیه‌سازی می‌شود. از این‌رو، مطالعه عدم قطعیت امری ضروری و اجتناب‌ناپذیر در هر نوع شبیه‌سازی است (Li et al., 2013). روش‌های مختلفی برای مطالعه عدم قطعیت ارائه شده است که از آن جمله می‌توان به روش‌های مونت‌کارلو اشاره نمود. روش‌های مونت‌کارلو، روش‌های تصادفی هستند که بر اساس تولید شمار زیادی داده تصادفی از داده‌های ورودی و پارامترهای موردنیاز مدل می‌توان به بیان توصیف احتمالی عدم قطعیت پرداخت

(Blasone, 2007). روش مونت‌کارلو زنجیره مارکف بیزین^۶ (MCMC) یکی از روش‌های مطرح در زمینه مطالعه عدم قطعیت مدل‌های هیدرولوژیکی است. این روش، یک شبیه‌ساز تصادفی است که به‌طور پی‌درپی در فضای پارامتریک جواب‌ها را بررسی و جستجو می‌کند و با یافتن دنباله‌ای از تکرارهای ثابت به توزیع احتمالاتی پسین پارامترهای همگرا می‌شود. از بین نمونه‌برداری‌های MCMC می‌توان روش نمونه‌برداری متروپولیس تطبیقی تکامل تفاضلی^۷ (DREAM) را نام برد که توسط Vrugt et al. (2009) معرفی شد. این روش برای برآورد مؤثر تابع چگالی احتمال پسین پارامترهای مدل در تکرارهای بالای اجرای مدل و با هدف افزایش راندمان نمونه‌برداری توسعه داده شده است (Vrugt et al., 2009). همچنین، Pan et al. (2020) به ارزیابی میزان آلودگی سطح آب زیرزمینی با استفاده از مدل DNAPL و میزان خطر آلودگی آب برای سلامتی انسان پرداختند. در این پژوهش میزان کارایی مدل با استفاده از روش مونت‌کارلو زنجیره مارکف مورد مطالعه قرار گرفت. نتایج مطالعه نشان داد که عدم قطعیت ساختار مدل در میزان عملکرد مدل نقش دارد. Alam et al. (2020) به مطالعه اثر عدم قطعیت پارامترهای هیدرولیکی خاک بر میزان نفوذپذیری آب در خاک و تعادل آب زیرزمینی پرداختند. نتایج ایشان بیان‌گر نقش پارامترهای اقلیمی، تغییرپذیری رطوبت خاک و پوشش گیاهی بر میزان عدم قطعیت پارامترهای هیدرولیکی خاک بود. Brunetti et al. (2019) نیز به‌منظور افزایش دقت مدل HYDRUS در برآورد رطوبت خاک و مقایسه عملکرد آن با روش حسگر نوترونی اشعه کیهانی^۸ با استفاده از روش مونت‌کارلو زنجیره مارکف، عدم قطعیت پارامترهای هیدرولیکی خاک را مطالعه نمودند. نتایج نشان‌دهنده وجود عدم قطعیت بالای مدل تحت شرایط حاکم در تعیین مقدار هدایت هیدرولیکی اشباع خاک بود. همچنین مطالعات Tu et al. (2019) نشان داد زنجیره مارکف روشی توانمند در بررسی عدم قطعیت روش مدیریتی حاکم در سطح مزرعه و نحوه توزیع جریان آب در خاک است. محققین دریافتند که در نظر گرفتن عدم قطعیت مدل و پارامترهای مورد نظر تحت شرایط حاکم، در میزان عملکرد و دقت مدل نقش به‌سزایی دارد. همچنین شبیه‌سازی حاصل بهتر توانست به تشریح مسائل بپردازد. از آنجایی‌که با مسأله تغییرپذیری مکانی و زمانی ویژگی‌های خاک در فرآیندهای مختلف خاک‌سازی و مدیریتی مواجه هستیم، مطالعات ذکرشده نشان‌دهنده نقش و اهمیت عدم قطعیت مدل و پارامترهای آن در شبیه‌سازی فرآیندهای آبی-

¹ Inherent Uncertainty

² Epistemic Uncertainty

³ Uncertainty of the Model Parameters

⁴ Uncertainty of the Model Structure

⁵ Stochastic Techniques

⁶ Bayesian Markov Chain Monte Carlo

⁷ Differential Evolution Adaptive Metropolis

⁸ Cosmic-ray neutron sensing (CRNS)

لومرسنی و لومرشنی تعیین شد. در هر یک از افق‌ها، ویژگی‌های فیزیکی-شیمیایی آن ارزیابی شدند (جدول ۱).

۲-۲- اندازه‌گیری رطوبت خاک

میزان رطوبت خاک در مزرعه مورد مطالعه به‌طور پیوسته طی چهار ماه، از تاریخ ۲۰ خرداد ۱۳۹۷ تا ۲۰ شهریور ۱۳۹۷ در هر دوره آبیاری، قبل و بعد از آبیاری با استفاده از دستگاه TDR (مدل IMKO) در هر افق اندازه‌گیری شد. در دستگاه TDR براساس درصد شن و وزن مخصوص ظاهری، ۱۵ منحنی کالیبراسیون ذخیره شده بود که برای واسنجی در هر کلاس بافتی استفاده شد. همچنین با کاربرد منحنی مناسب برای هر کلاس بافتی، رطوبت خاک در دو نقطه اشباع و خشک به روش وزنی اندازه‌گیری شد و با به‌کاربردن روش درون‌یابی ضرایب موردنظر برای هر کلاس بافتی تعیین و سپس معادله واسنجی به شرح زیر به‌دست آمد:

$$\theta_{TDR} = 8 \times 10^{-6} \varepsilon^3 - 6 \times 10^{-5} \varepsilon^2 + 0.996 \varepsilon + 0.012$$

$$\theta_{TDR} = 7 \times 10^{-5} \varepsilon^3 - 6 \times 10^{-3} \varepsilon^2 + 0.982 \varepsilon - 0.311$$

۳-۲- جریان آب در خاک

مدل هیدرولیکی HYDRUS با حل عددی معادله ریچاردز به بررسی جریان آب در خاک می‌پردازد:

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

θ درصد رطوبت حجمی خاک ($L^3 L^{-3}$), h بار فشاری آب خاک (L), $k(h)$ هدایت هیدرولیکی غیراشباع (LT^{-1}), t زمان (T), z عمق خاک (L) و S به‌عنوان 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 به‌طور 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 به‌منظور ارزیابی تغییرپذیری ویژگی‌های خاک در امتداد عمودی پروفیل خاک از مدل Mualem (1976) استفاده شده است:

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

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

خاکی هستند به نحوی که تأثیر قابل‌توجهی بر میزان تطبیق نتایج مدل با واقعیت دارد. بدین ترتیب برای قابل‌تعمیم‌بودن نتایج شبیه‌سازی مدل‌های حاکم، بایستی عدم قطعیت مدل تحت شرایط مدیریتی در نظر گرفته شود. علاوه بر شرایط غیرهمگنی حاکم بر امتداد پروفیل خاک، شرایط غیراشباع حاصل از روش آبیاری نیز موجب پیچیده‌تر شدن شبیه‌سازی فرآیندهای انتقال آب و املاح در طول پروفیل خاک می‌شود. از این رو، به‌منظور بررسی اثر تغییرپذیری مکانی خاک تحت شرایط آبیاری در میزان عملکرد مدل HYDRUS از الگوریتم DREAM بهره گرفته شد. این الگوریتم با استفاده از مفاهیم آماری امکان برآورد تابع چگالی پارامترهای مدل در تکرارهای بالا به‌منظور افزایش راندمان نمونه‌برداری را فراهم می‌سازد. بنابراین، با استفاده از این الگوریتم به‌طور هم‌زمان عدم قطعیت ساختار مدل و پارامترهای هیدرولیکی خاک در شرایط مزرعه با دامنه گسترده‌ای از نمونه‌برداری صورت گرفت و تأثیر عدم قطعیت در میزان کارایی مدل HYDRUS ارزیابی شد.

۲- مواد و روش‌ها

۱-۲- منطقه مورد مطالعه

این مطالعه در مزرعه تحقیقاتی دانشکده کشاورزی دانشگاه بیرجند صورت گرفت که در فاصله پنج کیلومتری غرب شهرستان بیرجند، با عرض جغرافیایی $32^{\circ}53'$ شمالی و طول جغرافیایی $55^{\circ}13'$ شرقی واقع است. شهرستان بیرجند با اقلیم خشک- نیمه‌خشک و با ارتفاع ۱۴۹۱ متر از سطح دریا، برطبق گزارش سالانه سازمان هواشناسی استان، شهرستان بیرجند دارای میانگین دمای سالانه برابر با $16/5$ درجه سانتی‌گراد، ۱۵۵ میلی‌متر میانگین بارش سالانه و ۷۲ روز یخبندان در طول سال است. با توجه به شرایط آب و هوایی منطقه، بیش‌ترین و کم‌ترین دما به‌ترتیب 40 و $-1/5$ درجه سانتی‌گراد است (Abedini et al., 2022). در این مزرعه زمینی به وسعت سه هکتار که تحت روش آبیاری بارانی به‌صورت متحرک دوار نوع سیستم عقربه‌ای یا سنتریوت قرار داشت با دوره آبیاری شش‌روزه به مدت هشت ساعت با دبی $0/5$ مترمکعب در ساعت برای مطالعه انتخاب شد. به‌منظور مطالعه فرآیند جریان آب تحت روش آبیاری، پروفیلی به عمق 120 سانتی‌متر حفاری شد. پروفیل حفاری شده به سه افق تفکیک شد و از نظر توزیع اندازه ذرات خاک، با استفاده از روش هیدرومتر در سه بازه زمانی؛ 40 ثانیه، یک و هشت ساعت هیدرومتر قرائت و توزیع اندازه ذرات در دو کلاس بافتی

جدول 1- ویژگی های فیزیکی-شیمیایی پروفیل خاک مورد مطالعه
Table 1- Physic-chemical properties of the studied soil profile

عمق خاک (cm)	بافت خاک	شن (%)	سیلت (%)	رس (%)	EC (dS/m)	pH	مواد آلی (%)	کربنات کلسیم (%)	مخصوص ظاهری (gr/cm ³)	تخلخل (%)	وزن
0-40	لوم رس شنی	61	18	21	1.25	7.6	0.5	5.25	1.5	40	
40-60	لوم شنی	65	18	17	2.34	7.7	0.48	5.4	1.6	35	
60-100	لوم شنی	73	8	19	2.12	7.4	0.4	8	1.7	34	

سمت تابع نهایی ایستاتنظیم می کند (Alam et al., 2020; Brunetti et al., 2019; Houska et al., 2014; Steenpass et al., 2010). در نهایت با ضرب یک عبارت تصادفی در اختلاف بین پارامترهای چند زنجیر دیگر، یا سری پیشنهادی مربوط به زنجیر i تولید شد. از الگوریتم تکامل تفاضلی ³DE برای تولید سری پیشنهادی استفاده شد:

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

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

$$\vec{v}^i = \vec{\theta}^i + (1 + e)\gamma(\delta, d_{eff}) \cdot \left(\sum_{j=1}^{\delta} \vec{\theta}^{r_1(j)} - \sum_{n=1}^{\delta} \vec{\theta}^{r_2(n)} \right) + \varepsilon \quad (6)$$

θ_r رطوبت باقی مانده $(L^3 \cdot L^{-3})$ ، θ_s : رطوبت اشباع خاک $(L^3 \cdot L^{-3})$ ، K_s : هدایت هیدرولیکی اشباع خاک (LT^{-1}) ، n مؤثر $(-)$ ، α (L^{-1}) : پارامترهای شیب منحنی رطوبتی خاک، S_e : اشباع مؤثر $(-)$ ، L : بیان گر اعوجاج و پیوستگی خلل و فرج خاک است که به طور معمول برابر با 0.5 فرض می شود (Mualem, 1976).

۲-۴- شرایط اولیه و مرزی

برای حل معادله ریچاردز و بررسی جریان آب در خاک نیاز به در نظر گرفتن شرایط اولیه و مرزی است. در این پژوهش مرز بالایی به علت این که در تماس با اتمسفر است و میزان تبخیر از سطح خاک، بارندگی، تفرق 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 مرزی پایینی انتخاب شد.

۲-۵- روش تحلیل عدم قطعیت^۱ MCMC

به فرآیند تصادفی که به برآوردهای قبل از خود بستگی دارد، فرآیند تصادفی با ویژگی \vec{v}^i مارکف گویند. بر این اساس فرآیند تصادفی که بر پایه ویژگی مارکف صدق کند، فرآیند یا زنجیره های مارکف گفته می شود. الگوریتم DREAM به عنوان یکی از پرکاربردترین روش های خانواده MCMC با استفاده از چندین زنجیر توأم به طور هم زمان به بررسی در فضای پارامتریک می پردازد و به صورت خودکار توزیع پیشنهادی نمونه گیری را به

۲-۵-۱- الگوریتم متروپولیس

بعد از تشکیل سری پارامترهای پیشنهادی با کمک رابطه (۶)، مناسب یا نامناسب بودن سری پیشنهادی و قابلیت اضافه شدن سری پیشنهادی به انتهای زنجیر بررسی شد:

$$\pi(x) = - \left(\sum_{t=1}^T |S_t - \hat{S}_t(x)|^2 \right)^{-1} \quad (7)$$

برای این کار با استفاده از الگوریتم متروپولیس خطای ناشی از به کارگیری سری پیشنهادی (رابطه ۷) با خطای ناشی از به کارگیری آخرین سری پارامتر گام قبلی مقایسه شد:

$$\alpha(\theta^i, v^i) = \begin{cases} \min \left(\frac{\pi(v^i)}{\pi(\theta^i)}, 1 \right) & \text{if } \pi(\theta^i) > 0 \\ 1 & \text{if } \pi(\theta^i) = 0 \end{cases} \quad (8)$$

که در آن $\pi(\theta)$ و $\pi(v)$ به ترتیب، مقادیر احتمال تابع وابستگی سری قبل و سری پیشنهادی است. در صورتی که $\alpha=1$ باشد (کارایی سری پیشنهادی بیش تر است)، سری پیشنهادی به زنجیره اضافه می شود. چنان چه $\alpha < 1$ باشد (عملکرد سری قبلی بهتر است). در این حالت الگوریتم متروپولیس بلافاصله سری پیشنهادی را نامناسب تلقی نمی کند. بلکه نسبت احتمال دو سری پارامتر پیشنهادی و قبلی را با یک عدد تصادفی u (توزیع یکنواخت استاندارد) می سنجد. پس از مقایسه نسبت $\frac{\pi(v^i)}{\pi(\theta^i)}$ با عدد تصادفی u ، چنان چه نسبت مذکور از u بیش تر شود، باز هم $\alpha=1$ فرض شده و سری پیشنهادی به عنوان سری جدید وارد زنجیره شد. در صورتی که $\frac{\pi(v^i)}{\pi(\theta^i)} < u$ باشد، $\alpha \neq 1$ بوده و سری پیشنهادی غیرقابل قبول تلقی شده و سری قبلی به عنوان سری

³ Stationary target distribution

⁴ Differential Evolution

¹ Markov Chain Monte Carlo

² roposal distribution

تجمعی پارامترهای قابل قبول به دست آمد. سرانجام شاخص‌های ارزیابی عدم قطعیت ارزیابی شد.

۲-۶- معیارهای ارزیابی عدم قطعیت

الف- معیار p -factor

درصد قرارگیری داده‌های اندازه‌گیری شده در محدوده فاصله اطمینان را نشان می‌دهد. مقادیر p -factor بیان‌گر میزان توانایی واسنجی مدل است که مقادیر کمتر از ۵۰ درصد نشان‌دهنده واسنجی ضعیف مدل و خطای زیاد در اندازه‌گیری داده‌ها است (Abbaspour et al., 2001). معیار p -factor: بیان‌گر درصد قرارگیری تعداد متغیر به دست آمده در فاصله اطمینان است که بر اساس رابطه (۱۱) تعیین می‌شود (Lu et al., 2009).

$$p_factor = \frac{NQ_{Observed}}{NQ_{All}} \times 10 \quad (11)$$

$NQ_{Observed}$ ، تعداد متغیر اندازه‌گیری شده که در فاصله اطمینان قرار گرفته‌اند و NQ_{All} ، تعداد کل متغیر به دست آمده است.

ب- معیار d -factor

پهنای نرمال شده محصور بین حد بالا و حد پایین متغیر شبیه‌سازی شده در سطح اطمینان است (Lu et al., 2009).

$$d_factor = \frac{1}{n} \sum \frac{Limit_{Upper,t} - Limit_{Lower,t}}{Q_{Obs,t}} \quad (12)$$

$Limit_{Lower,t}$ و $Limit_{Upper,t}$ به ترتیب حد بالا و حد پایین فاصله اطمینان محاسبه شده در t مین مقدار شبیه‌سازی است. n تعداد کل اندازه‌گیری شده و $Q_{Obs,t}$ مقداری که برای متغیر مورد نظر مشاهده شده‌اند.

ج- دو شاخص میانگین درجه عدم تقارن (S و T)

برای بررسی ساختار هندسی باندهای تشکیل شده بر اساس حد بالا و پایین مقدار برآورد شده، می‌توان از معیار S و T استفاده نمود. باندهای مطلوب برآورد شده باید درجه بالایی از تقارن را دارا باشند. باندهای برآورد شده نباید مقادیر اندازه‌گیری شده را پوشش دهند، اما اختلاف بین پایین‌ترین حد برآورد شده و مقدار اندازه‌گیری شده باید تقریباً برابر با اختلاف بین بالاترین باند برآورد شده و مقدار اندازه‌گیری شده باشد. با توجه به این که ساختار مدل‌های فیزیکی، غیرخطی است، فقط مورد انتظار است که باندهای برآورد شده با توجه به مقدار اندازه‌گیری شده نامتقارن باشند. هدف اصلی این است که باندهای برآورد شده نسبت به مقدار اندازه‌گیری شده کم‌ترین درجه نامتقارنی را داشته باشند. دو

جدید وارد زنجیره شد (Vrugt et al., 2009; Vrugt and Ter Braak, 2011).

۲-۵- انتخاب نمونه‌ها جهت ساختن توزیع پارامترها

جهت ساختن توزیع پارامترها، تنها از سری پارامترهایی استفاده می‌شود که به هم‌گرایی رسیده باشند. پارامتر Z در یک زنجیر زمانی به هم‌گرایی می‌رسد که معیار هم‌گرایی گلمن و رابین^۱ (R_j^2) برای آن از $1/2$ کوچک‌تر به دست آید (Vrugt et al., 2009). این معیار به واریانس میانگین زنجیره‌ها (B) و میانگین واریانس هر زنجیره (W) بستگی دارد. معمولاً ۲۰-۱۰ درصد انتهای هر زنجیره از پارامترها، دارای این ویژگی ($R_j^2 < 1/2$) بوده و بنابراین می‌توانند به عنوان پارامترهای مناسب جهت ساختن توزیع پارامترها به کار روند. همانند دامنه بین چارکی، محاسبه R_j^2 نیز با استفاده از ۵۰ درصد دوم زنجیره‌های پارامترها انجام شد:

$$R_j^2 = \sqrt{\left[\frac{\left[\frac{m+1}{m} \right] \cdot \delta^2}{W} \right]} - \sqrt{\left[\frac{n-1}{m \cdot n} \right]} \quad (9)$$

که در رابطه (۹) از رابطه (۱۰) محاسبه شد:

$$\delta^2 = \frac{n-1}{n} \cdot W + \frac{1}{n} \cdot B \quad (10)$$

در روابط (۹) و (۱۰) m تعداد زنجیره‌ها، n تعداد اجراهای انجام شده در هر زنجیره، \bar{B} بردار مقادیر واریانس میانگین زنجیره‌ها و \bar{W} بردار مقادیر میانگین واریانس زنجیره‌ها (تعداد پارامترها در هر دو برابر یکسان است) هستند (Vrugt et al., 2009; Vrugt and Ter Braak, 2011).

روند بررسی عدم قطعیت مدل HYDRUS در مطالعه فرآیندهای جریان آب در شکل ۱ ارائه شده است. در الگوریتم مورد نظر برای بررسی عدم قطعیت جریان آب در خاک نیاز به تعیین دامنه تغییرات پارامترهای مدل و ن‌گن‌وختن-معلم است. پس از تعیین دامنه تغییرات (حد بالا و پایین) پارامترها، با استفاده از روش LHS برای هر یک از پارامترها، ۱۰۰۰۰ داده تصادفی تولید شد. هر سری از این مجموعه داده تصادفی یک ورودی از پارامترهای هیدرولیکی خاک محسوب می‌شود که برای تعیین جریان آب در خاک در مدل HYDRUS به کار گرفته شد. خروجی حاصل از مدل HYDRUS طی کاربرد هرسری از مجموعه داده تصادفی ذخیره شد. بر اساس نتایج حاصل از HYDRUS در روش DREAM پارامترهای قابل قبول تعیین شد. روش تعیین پارامترهای قابل قبول در روش DREAM پس از رسیدن به حد هم‌گرایی حاصل شد. در نهایت تابع توزیع

² Confidence Level

² Two Indices of Average Asymmetry Degree

¹ Gelman and Rubin

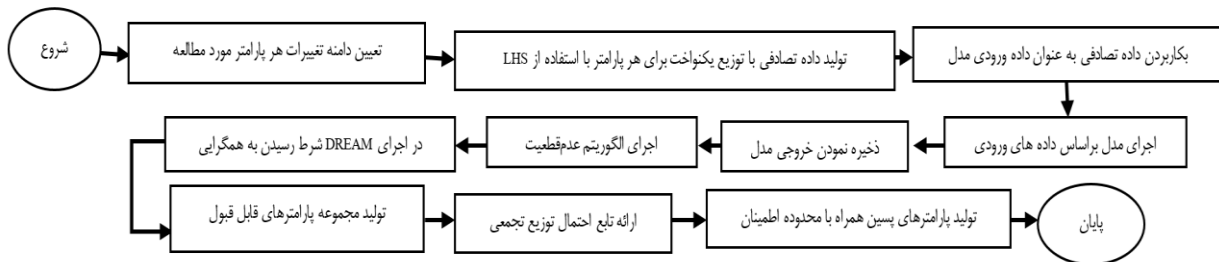
S_i بیانگر درجه نامتقارن باند های برآورد شده با توجه به روند مشاهداتی بوده که تابعی از h_i است. h_i به عنوان نسبت اختلاف بین حد بالا (q_i^u) و مقدار اندازه گیری شده (Q_i)، به عرض واقعی باند (b_i)، چنانچه مقدار s از طریق h تعیین شود، است. درک روند تغییرات h تحت سناریوهای مختلف از موقعیت نمودار اندازه گیری شده با توجه به باندهای برآورد شده، مهم است. سه سناریو میسر است که در ادامه تعریف شده اند (شکل ۲).

معیار برای ارزیابی درجه نامتقارن میانگین از باندهای برآورد شده با توجه به نمودار اندازه گیری شده پیشنهاد شده است.

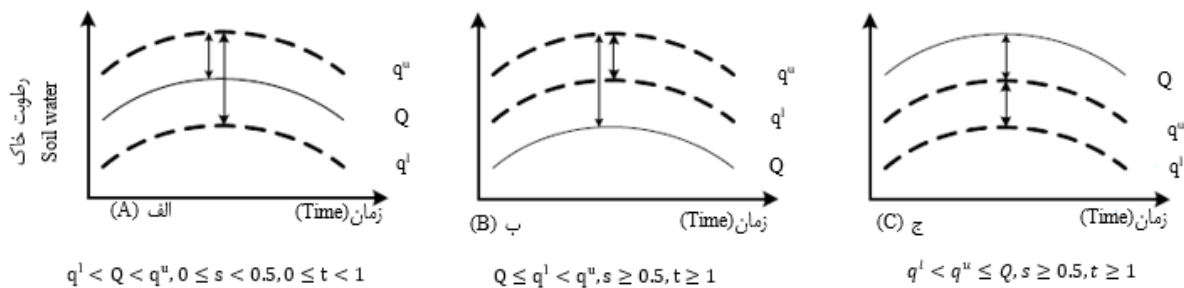
$$S = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N S_i \tag{13}$$

$$S_i = |h_i - 0.5| \tag{14}$$

$$h_i = \frac{q_i^u - Q_i}{q_i^u - q_i^l} = \frac{q_i^u - Q_i}{b_i} \tag{15}$$



شکل ۱- فلوجارت عدم قطعیت مدل HYDRUS-1D
Figure 1- Uncertainty flowchart of HYDRUS-1D model



شکل ۲- سناریوهای سه گانه توصیف کننده وضعیت قرارگیری مقادیر اندازه گیری شده نسبت به مقدار برآورد شده
Figure 2- Triple scenarios describing the position of the measured values compared to the estimated value

$$T = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N t_i \tag{16}$$

$$t_i = \left[\frac{|(q_i^u - Q_i)^3 + (q_i^l - Q_i)^3|}{(q_i^u - q_i^l)^3} \right]^{1/3} \tag{17}$$

مقدار t برابر با صفر است. در مورد شکل ۲ ب و ج مقدار t کم تر از ۱ نیست. بزرگ ترین مقدار T در رابطه (۱۶)، بیش ترین عدم تقارن باندهای برآورد شده در اطراف نمودار مقادیر اندازه گیری شده را نشان می دهد (Xiong et al., 2009).

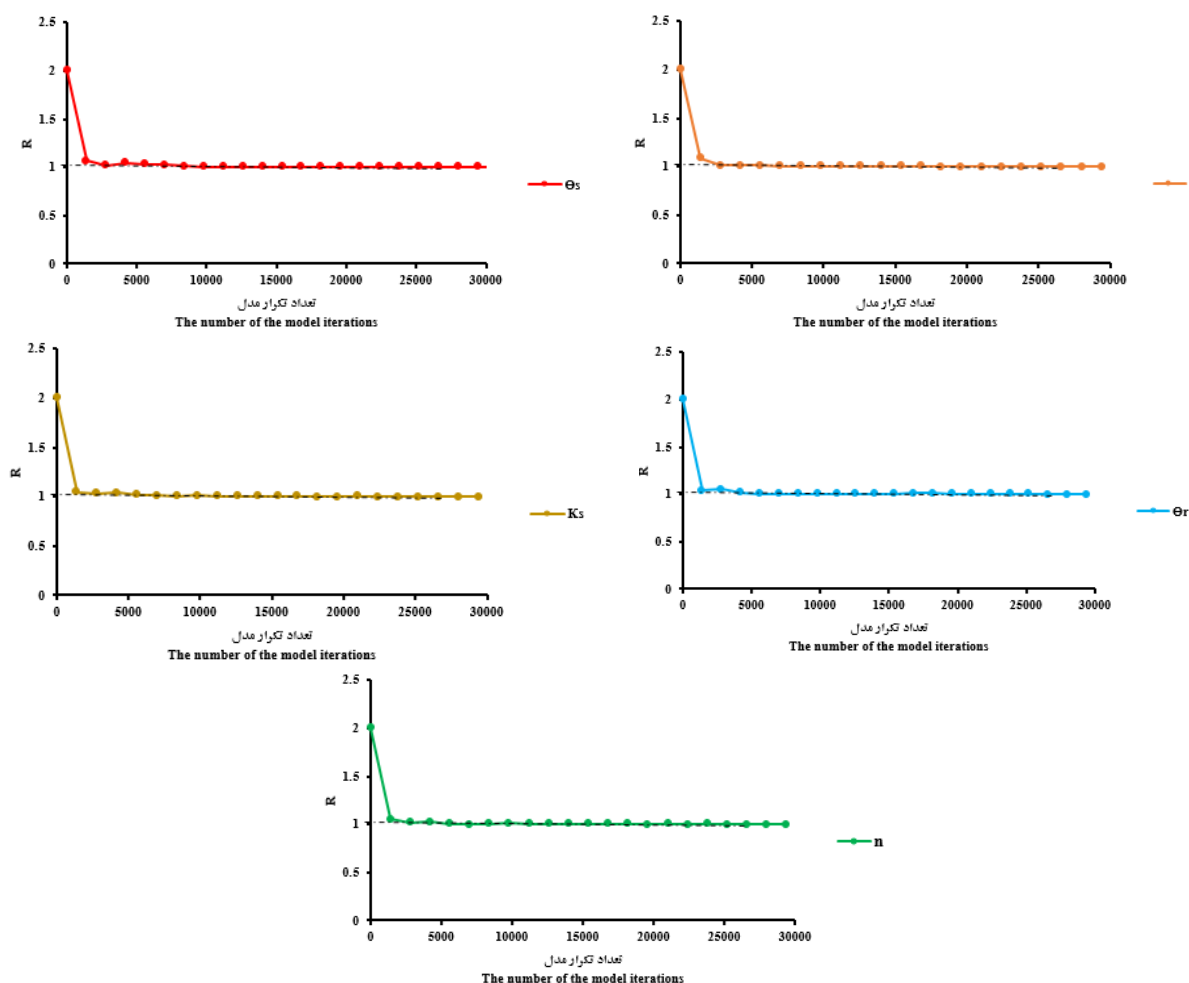
۳- نتایج و بحث

پروفیل حفاری شده در سطح مزرعه مورد ارزیابی و تفکیک قرار گرفت. از آنجایی که روند توزیع اندازه ذرات در عمق ۰-۲۰ و ۲۰-۴۰ سانتی متری در هر سه نقطه اندازه گیری یکسان بود، این دو عمق به عنوان یک لایه در نظر گرفته شد. سه عمق دیگر، ۴۰-۶۰، ۶۰-۸۰ و ۸۰-۱۰۰ سانتی متری، از نظر توزیع اندازه

همان طور که در شکل ۲ الف مشاهده می شود، مقادیر Q بین حد بالا q^u و حد پایین q^l قرار دارد ($q^l < Q < q^u$)، مقادیر h بین صفر و یک قرار دارد در حالی که مقدار s بین صفر و ۰/۵ است. در شکل ۲ ب، مقادیر Q زیر حد پایین q^l قرار دارند ($Q < q^l < q^u$)، مقادیر h بزرگ تر یا مساوی یک و متقابلاً مقدار s بزرگ تر یا مساوی با ۰/۵ است. در شکل ۲ ج، مقادیر Q بالای حد بالا q^u قرار دارند ($q^l < q^u < Q$)، مقدار h کوچک تر یا مساوی صفر و $s \geq 0.5$ است. معیار دیگری که برای بررسی درجه نامتقارن میانگین باندهای برآورد شده با توجه به نمودار اندازه گیری شده استفاده می شود، معیار T است. روند تغییرات t_i در رابطه (۱۷) تابع موقعیت نمودار مقادیر اندازه گیری شده نسبت به باندهای برآورد شده است. در شکل ۲ الف انتظار می رود که $0 \leq t < 1$ باشد و در زمانی که مقدار Q برابر با مقدار میانگین حد بالا و پایین باندهای برآورد شده است،

مجزا در نظر گرفته شود. برای بررسی عدم قطعیت مدل HYDRUS در مطالعه جریان آب در خاک، توزیع پسین پارامترهای هیدرولیکی خاک بر اساس معیار گلمن و رایبن (R) تعیین شد. پارامترهای هیدرولیکی مورد مطالعه در تکرار کم‌تر از ۲۰۰۰ به همگرایی رسیدند (شکل ۳).

ذرات دارای روند یکسانی هستند و در یک کلاس بافتی خاک قرار می‌گیرند. البته عمق ۴۰-۶۰ سانتی‌متر از نظر جرم مخصوص ظاهری خاک و همچنین وضعیت خاکدانه‌سازی نسبت به دو عمق ۶۰-۸۰ و ۸۰-۱۰۰ سانتی‌متر، دارای روند متفاوتی بود. از این‌رو، می‌توان بیان نمود که شرایط غیرهمگن در محدوده ۴۰-۶۰ سانتی‌متری وجود دارد. بنابراین برای مطالعه فرآیند مورد نظر نیاز است که عمق ۴۰-۶۰ سانتی‌متری به‌عنوان یک عمق



شکل ۳- نمودار همگرایی معیار گلمن و رایبن (R)

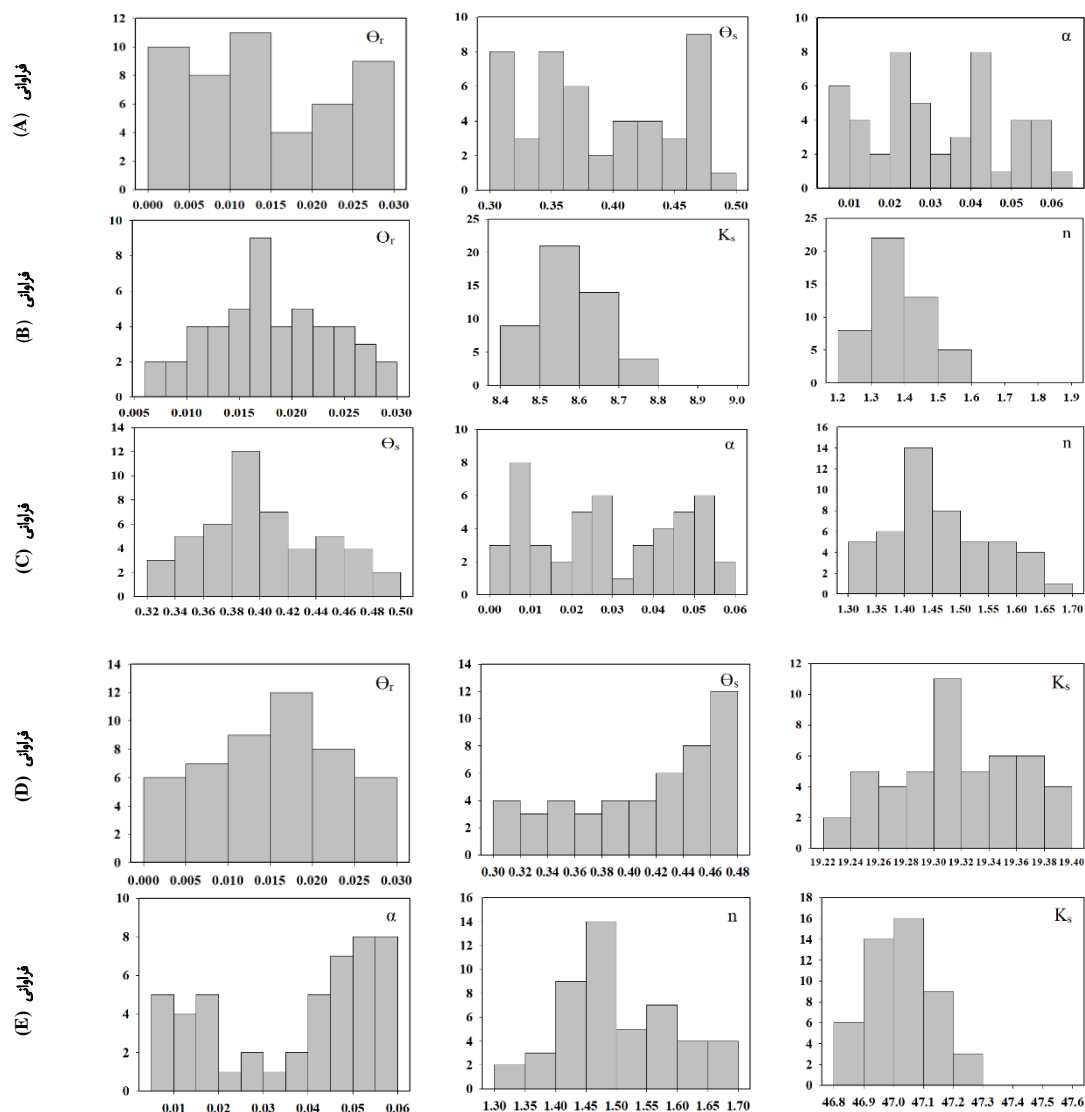
Figure 3- Golman and Robin's criterion convergence diagram

مطالعه هیستوگرام فراوانی پسین، توزیع‌های مسطح پارامتر بیان‌گر عدم توانایی مدل در شناسایی مقدار آن پارامتر است. به عبارت دیگر بیان‌گر عدم قطعیت پارامتر است. بر اساس نتایج حاصل از توزیع پسین پارامترها در عمق ۰-۴۰ سانتی‌متری، پارامتر n و K_s دارای توزیع نرمال بودند. در عمق ۴۰-۶۰ سانتی‌متری، برای پارامترهای n ، K_s ، θ_s و θ_r هیستوگرام‌های فراوانی دارای نقطه اوج هستند. اما از توزیع نرمالی برخوردار نیستند. روند تغییرات پارامترها در یک دامنه کوچک در حال

پارامترهای هیدرولیکی مورد مطالعه شامل رطوبت باقی‌مانده (θ_r) ، رطوبت اشباع خاک (θ_s) ، آلفا (α) ، و هدایت هیدرولیکی اشباع (K_s) بودند. مجموعه پارامترهای به‌دست‌آمده، پارامترهای قابل قبولی بودند که در تولید توزیع پسین پارامترها مورد استفاده قرار گرفتند. با بررسی هیستوگرام پسین پارامترها، علاوه بر این که میزان عدم قطعیت ذاتی هر پارامتر تعیین می‌شود. بر اساس نحوه توزیع پارامتر می‌توان اثر سایر عوامل، داده‌های ورودی و ساختار مدل، در میزان عدم قطعیت پارامتر مشاهده نمود. در

می‌دهد. توزیع پسین پارامترهای مورد مطالعه در عمق ۶۰-۱۰۰ سانتی‌متر بیان‌گر توزیع نرمال برای دو پارامتر θ_r و K_s بود. توزیع پسین پارامتر n نیز دارای نقطهٔ اوج است که نشان‌دهندهٔ توانایی مدل در برآورد تعیین مقدار مشخص این پارامتر است. هر چند که مانند عمق ۴۰-۶۰ سانتی‌متری دارای توزیع نرمالی نیست. در هر سه عمق مورد مطالعه، عدم قطعیت پارامتر α مشاهده شد. زیرا در هر سه عمق مورد مطالعه این پارامتر دارای توزیع غیریکنواخت است. پس در شرایط حاکم مدل نتوانسته مقدار دقیق و مطمئنی برای این پارامتر برآورد نماید.

نوسان است. در مقابل دارای یک توزیع غیریکنواخت هستند. هر چند که نقطهٔ اوج در نمودار توزیع پسین دیده می‌شود که این نقطهٔ اوج به معنای داشتن توزیع نرمال نیست. به‌ویژه برای دو پارامتر K_s و n . وجود نقطهٔ اوج در کنار توزیع غیریکنواخت نشان‌دهندهٔ وجود منابع خطا (اثر شرایط محیطی و مدیریتی در داده‌های ورودی) در تعیین پارامترهای مورد نظر است. در پارامترهایی که توزیع پسین دارای یک توزیع مسطح و غیریکنواخت باشد بیان‌گر عدم توانایی مدل در برآورد مقدر دقیق هر یک از پارامترها است و عدم قطعیت بالای پارامترها را نشان



شکل ۴- هیستوگرام توزیع پسین پارامترهای هیدرولیکی خاک به ترتیب در عمق ۰-۴۰ (A)، ۴۰-۶۰ (B) و ۶۰-۱۰۰ (C) سانتی‌متر

Figure 4- Histogram of the posterior distribution of soil hydraulic parameters in order of depth 0-40 (A), 40-60 (B), and 60-100 (C) cm

al. (2017) دلالت بر عدم قطعیت پارامترهای منحنی رطوبتی خاک و هدایت هیدرولیکی اشباع در دو کلاس بافتی شن‌لومی و لومرسی‌شنی دارد. نتایج حاصل بیان‌گر عدم قطعیت پارامترهای

در نهایت بر اساس نتایج حاصل از شکل ۴ می‌توان ذکر نمود که نوع مدیریت و شرایط غیرهمگنی خاک سبب عدم قطعیت پارامترهای هیدرولیکی خاک شده است. نتایج مطالعات Yan et

سنتریوت است. همچنین نتایج حاصل نشان‌دهنده عدم توانایی مدل کاربردی در برآورد دقیق پارامترها بر اساس روند نفوذ آب در خاک طی روش آبیاری است. از سوی دیگر با توجه به دبی آبیاری در پروفیل خاک شرایط غیراشباع حاکم می‌شود که نیاز به بررسی هدایت هیدرولیکی غیراشباع خاک است. همچنین میزان جذب آب توسط سیستم ریشه نیز از دیگر عوامل مؤثر تحت روش آبیاری سنتریوت است که در شبیه‌سازی رطوبت خاک تأثیرگذار است.

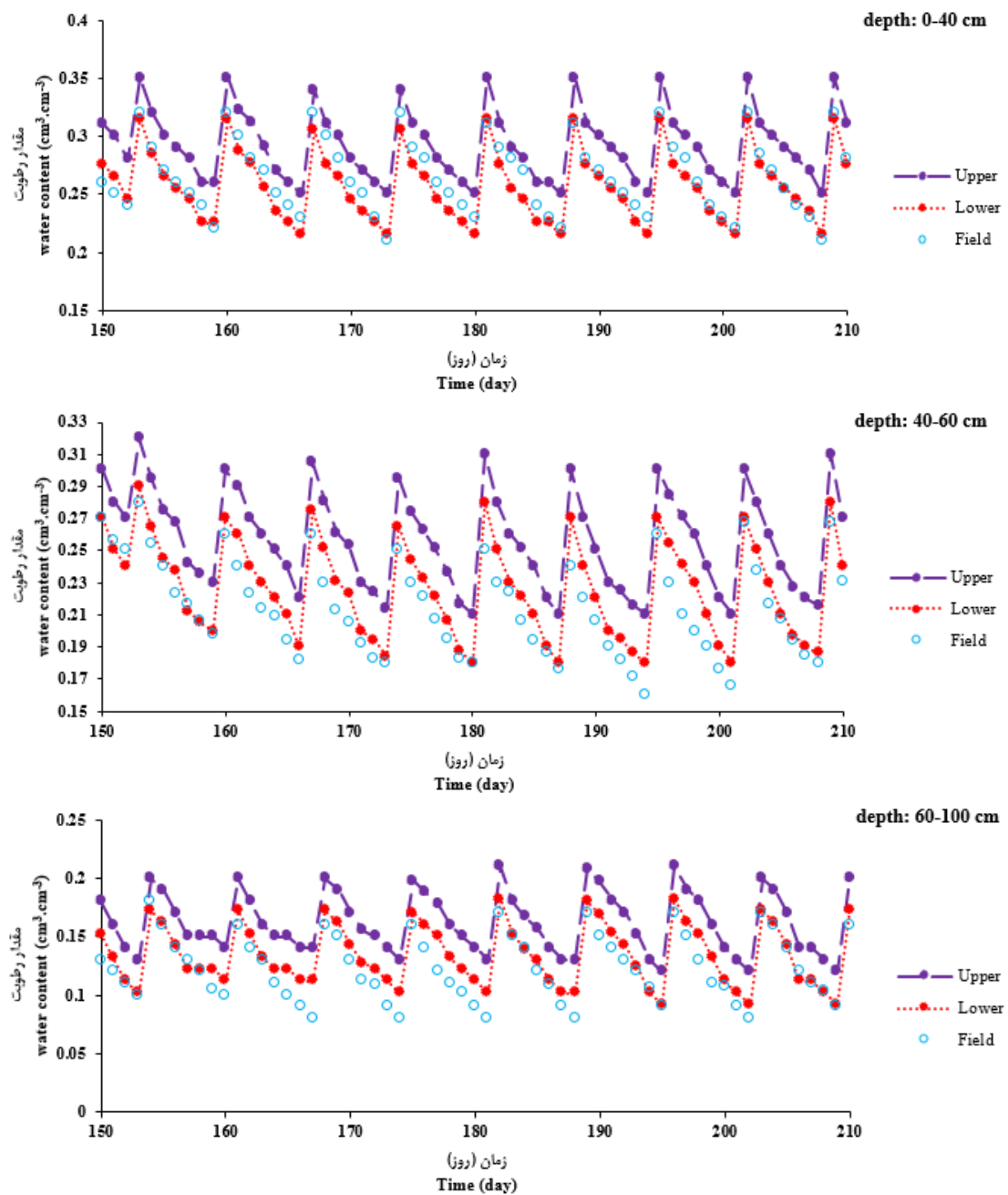
Kisekka et al. (2015) به مطالعه عدم قطعیت مدل هیدرولیکی در مزرعه تحت کشت و شرایط آبیاری شیاری پرداخت. نتایج نشان داد که با افزایش عمق نقاط اندازه‌گیری در خارج از محدوده اطمینان قرار می‌گیرند و پهنای محدوده اطمینان دارای روند افزایشی است. علاوه بر این، در عمق زیرین موقعیت قرارگیری حد پایین محدوده اطمینان بیان‌گر پیش‌برآورد مدل نسبت به عمق سطحی خاک بود. بنابراین، نقش سایر عوامل علاوه بر عدم قطعیت پارامترهای هیدرولیکی در هر روش مدیریت منابع آب در میزان عدم قطعیت جریان آب در خاک نیز تأثیرگذار است. همچنین کاهش دقت مدل بیان‌گر افزایش عدم قطعیت مدل در برآورد فرآیند نفوذ آب در خاک است. با این وجود، در عمق زیرین پروفیل خاک، نقاط اندازه‌گیری شده با حد پایین محدوده اطمینان مدل دارای هم‌پوشانی هستند که بیان‌گر میزان حداقل دقت مدل مورد مطالعه در شبیه‌سازی جریان آب در خاک با وجود عدم قطعیت پارامترهای هیدرولیکی و سایر عوامل مؤثر در عمق‌های مختلف مورد مطالعه است. به عبارت دیگر در عمق زیرین، در کنار عدم قطعیت پارامترها نقش غیرهمگنی خاک از دیگر عوامل مؤثر در تعیین میزان دقت مدل در برآورد رطوبت خاک بود که در نحوه قرار گرفتن نقاط اندازه‌گیری در محدوده اطمینان منعکس شد. نتایج پژوهش Salahou et al. (2022) نشان داد که میزان کارایی مدل HYDRUS در شبیه‌سازی جریان آب در خاک تحت سناریوهای مختلف با کاربرد مدل‌های مختلف منحنی رطوبتی خاک، با افزایش عمق خاک دارای روند کاهشی است. نتایج این پژوهش بیان‌گر نقش میزان اثرگذاری عوامل محیطی در دقت مدل‌ها در برآورد مقدار پارامترهای هیدرولیکی خاک است. Chen et al. (2019) نیز به مطالعه میزان کارایی مدل‌های هیدرولیکی از جمله مدل HYDRUS در برآورد رطوبت خاک در یک خاک لایه‌ای تحت آبیاری بارانی پرداختند. این محققین بیان نمودند شرایط حاکم سبب شد که با افزایش عمق خاک از میزان دقت مدل در برآورد روند تغییرات رطوبت خاک کاسته شود. کاهش کارایی مدل هیدرولیکی بیان‌گر عدم قطعیت داده‌های ورودی مدل است. به‌منظور بررسی دقیق‌تر میزان عملکرد مدل لینک‌شده HYDRUS با الگوریتم

مورد مطالعه است. نتایج پژوهش‌های Chen et al. (2016) نیز بیان‌گر روند تغییرات توزیع پسین پارامترهای منحنی رطوبتی خاک در بافت سیلتی‌لوم و میزان عدم قطعیت پارامترهای مورد مطالعه است. بر طبق نتایج ایشان پارامتر θ_r نسبت به سایر پارامترها از عدم قطعیت کم‌تری برخوردار بود. در مقابل دو پارامتر n و α دارای عدم قطعیت بالایی هستند. Liao et al. (2014) با مطالعه عدم قطعیت پارامترهای منحنی رطوبتی ون‌گنوختن بر پایه توابع انتقالی با استفاده از روش بوت‌استرپ نشان دادند که پارامتر α نسبت به پارامترهای θ_s و n از عدم قطعیت بیش‌تری برخوردار است. همچنین ذکر نمودند که عدم قطعیت داده‌های ورودی مدل ون‌گنوختن-معلم نسبت به عدم قطعیت ذاتی ساختار مدل نقش مؤثرتری در برآورد مکانی پارامترهای مدل ون‌گنوختن دارد. در عمق‌های مختلف با توجه به نوع کلاس بافتی، شرایط کشت‌وکار و نحوه توزیع ریشه در عمق‌های مختلف نیز در میزان عدم قطعیت پارامترهای خاک تأثیرگذار بودند. Shafiei et al. (2014) بیان نمودند تغییر در ساختار خاک و موقعیت آن در پروفیل خاک، وجود گیاه و یا عدم آن و در نهایت حضور ریشه و تجمع میکروبیوم‌های خاک از عوامل مؤثر در تعیین پارامترهای هیدرولیکی خاک هستند که نقش عمده در عدم قطعیت ذاتی پارامترهای هیدرولیکی خاک دارند. نتایج مطالعات Alam et al. (2020) نیز نشان‌دهنده روند تغییرات عدم قطعیت پارامترهای هیدرولیکی خاک طی شبیه‌سازی جریان آب در خاک با مدل HYDRUS با هدف بررسی تعادل آب در خاک تحت شرایط مدیریتی اعمال شده است. برای بررسی اثر عدم قطعیت پارامترهای هیدرولیکی خاک در فرآیند شبیه‌سازی رطوبت خاک در هر یک از عمق‌های مورد مطالعه، محدوده اطمینان ۹۵ درصد رطوبت خاک رسم شد (شکل ۵).

محدوده اطمینان ۹۵ درصد نشان‌دهنده نحوه قرار گرفتن نقاط اندازه‌گیری شده نسبت به نقاط برآورد شده توسط مدل است. شکل ۵ بیان‌گر قرار گرفتن نقاط رطوبتی اندازه‌گیری شده توسط TDR در محدوده اطمینان در هر سه عمق مورد مطالعه است. به‌طوری‌که در بیش‌تر نقاط با حد پایین محدوده اطمینان هم‌پوشانی دارند. در عمق ۴۰-۶۰ سانتی‌متری در بعضی از دامنه‌های زمانی، نقاط اندازه‌گیری شده در خارج از محدوده اطمینان قرار دارند. با این وجود اکثر داده‌های اندازه‌گیری شده در محدوده اطمینان قرار دارند که با حد پایین محدوده اطمینان هم‌پوشانی دارند. در آخرین عمق، قرار گرفتن نقاط اندازه‌گیری در خارج از محدوده اطمینان و یا در هم‌پوشانی با حد پایین محدوده اطمینان مدل به‌دست آمد. نتایج شکل ۵ نشان می‌دهد از بالا به پایین پروفیل خاک، از قرار گرفتن تعداد نقاط اندازه‌گیری در محدوده اطمینان کاهش یافته است که بیان‌گر عدم قطعیت بالایی پارامترهای هیدرولیکی مدل HYDRUS تحت روش آبیاری

به‌کارگرفته‌شده در مدل HYDRUS است. هر چقدر مقدار شاخص d -factor به صفر نزدیک‌تر به‌دست‌آید، بیان‌گر کاهش پهنای محدوده اطمینان و کاهش عدم‌قطعیت ساختار مدل است. همچنین برای مطالعه میزان عملکرد مدل HYDRUS با توجه به عدم‌قطعیت پارامترهای هیدرولیکی دو شاخص S و T استفاده شد. این دو شاخص بیان‌گر میزان تقارن محدوده اطمینان نسبت به نقاط اندازه‌گیری‌شده است.

DREAM به ارزیابی کمی نحوه قرار گرفتن نقاط اندازه‌گیری‌شده رطوبت خاک در محدوده اطمینان پرداخته شد (جدول ۲). مقدار شاخص p -factor بیان‌گر تعداد نقاط رطوبتی اندازه‌گیری‌شده در محدوده اطمینان است که هر چه مقدار این شاخص به ۱۰۰ نزدیک‌تر به‌دست‌آید، بیان‌گر کارایی الگوریتم DREAM در شناسایی و کنترل عدم‌قطعیت پارامترهای هیدرولیکی خاک است. مطالعه نتایج شاخص d -factor بیان‌گر میزان عدم‌قطعیت ساختار ریاضی و مفاهیم فیزیکی



شکل ۵- محدوده اطمینان شبیه‌سازی رطوبت خاک با مدل HYDRUS در مزرعه مورد مطالعه

Figure 5- Confidence interval of soil water simulation with HYDRUS model in the field under study

جدول ۲- ارزیابی کمی عدم قطعیت مدل HYDRUS لینک شده با DREAM
Table 2- Quantitative assessment of the uncertainty of the HYDRUS model linked to DREAM

<i>T</i>	<i>S</i>	<i>d-factor</i>	<i>P-factor</i>	عمق خاک (cm)
0.76	0.3	0.13	83.6	0-40
1.4	0.88	0.14	10	40-60
1.39	0.88	0.14	10	60-100

مدل، در عمق میانه (۴۰-۶۰ cm) اثر غیرهمگنی خاک نیز در برآورد پارامترهای هیدرولیکی و میزان عملکرد مدل تأثیرگذار بوده است. اثر غیرهمگنی خاک در نحوه توزیع آب در امتداد پروفیل و تشکیل جبهه رطوبتی تحت روش آبیاری سنتریپوت منعکس می‌شود که بر تشدید شرایط غیراشباع خاک و توزیع غیرهمگن آب در سرتاسر پروفیل می‌افزاید. بنابراین در این پژوهش ساختار غیرهمگنی خاک از دیگر عوامل مؤثر در میزان عدم قطعیت پارامترهای هیدرولیکی خاک و عدم قطعیت مدل HYDRUS است. Brunetti et al. (2019) نیز با بررسی جریان آب در خاک در عمق‌های مختلف بیان نمودند که با افزایش عمق اگرچه مدل قادر به شبیه‌سازی روند تغییرات رطوبت خاک است اما نقاط اندازه‌گیری شده در خارج از محدوده اطمینان قرار می‌گیرند که این روند با افزایش عمق خاک شدیدتر می‌شود. همچنین ایشان پیشنهاد نمودند به منظور کنترل نقش عوامل محیطی در میزان عدم قطعیت پارامترهای هیدرولیکی خاک از جمله هدایت هیدرولیکی اشباع، بهتر است از نتایج اندازه‌گیری مستقیم پارامتر در سطح مزرعه به جای روش حل معکوس در فرآیند شبیه‌سازی استفاده شود. ارزیابی کمی روند تغییرات پارامترها در جدول ۲ نیز بیان‌گر کاهش دقت عملکرد مدل هیدرولیکی-فیزیکی متأثر از شرایط حاکم (عوامل محیطی، روش مدیریت آبیاری، مفاهیم و ساختار ریاضی مدل) در جهت برآورد پارامترهای هیدرولیکی خاک است. در نهایت با بررسی شاخص‌های عدم قطعیت می‌توان بیان نمود که الگوریتم DREAM در روش آبیاری سنتریپوت توانسته به کارایی مدل HYDRUS در برآورد پارامترهای هیدرولیکی نقش مؤثری داشته باشد. همچنین این الگوریتم به خوبی توانسته است نشان دهد که کدامیک از پارامترهای هیدرولیکی خاک تحت شرایط حاکم در هر عمق دارای بالاترین درجه عدم قطعیت است. در این مطالعه الگوریتم DREAM توانست نقش غیرهمگنی خاک را نیز در میزان کارایی مدل HYDRUS در شبیه‌سازی فرآیند جریان آب در خاک نشان دهد. نتایج ارائه شده در جدول ۲ نیز تأییدی بر نتایج Houska et al. (2014) و Brunetti et al. (2018) در کارایی بالای الگوریتم DREAM در حل مسائل پیچیده چند پارامتری است.

هر چه مقدار شاخص *S* کم‌تر از ۰/۵ و شاخص *T* کم‌تر از یک باشد، بیان‌گر تقارن بالای نقاط اندازه‌گیری شده نسبت به محدوده اطمینان است. تقارن پایین نقاط اندازه‌گیری شده نسبت به محدوده اطمینان نشان‌دهنده پیش‌برآورد و یا کم‌برآورد مدل در مقدار رطوبت خاک نسبت به مقدار رطوبت اندازه‌گیری شده (TDR) است. با مطالعه جدول ۲ مشاهده شد که بیش‌ترین مقدار *p-factor* برابر با ۸۳/۶، کم‌ترین مقدار *d-factor* برابر با ۰/۱۳ و کم‌ترین مقدار دو شاخص *S* و *T* به ترتیب برابر با ۰/۳ و ۰/۷۶ در عمق ۰-۴۰ سانتی‌متری خاک به دست آمد. در حالی که با افزایش عمق خاک، مقدار شاخص *p-factor* برابر ۱۰ حاصل شده است که بیان‌گر کاهش تعداد نقاط اندازه‌گیری در محدوده اطمینان است. همچنین مقدار دو شاخص *S* و *T* نیز دارای روند افزایشی هستند. مقدار شاخص *S* برابر با ۰/۸۸ و مقدار شاخص *T* به ترتیب برابر با ۱/۴ و ۱/۳۹ در دو عمق ۴۰-۶۰ و ۶۰-۱۰۰ سانتی‌متری به دست آمد. افزایش مقدار دو شاخص *S* و *T* بیان‌گر پیش‌برآورد مقدار رطوبت خاک توسط مدل HYDRUS در لایه‌های زیرین خاک است. همچنین در دو عمق زیرین خاک شاخص *d-factor* برابر با ۰/۱۴ به دست آمد که بیان‌گر افزایش پهنای محدوده اطمینان است. بر اساس نتایج کمی حاصل از جدول ۲ می‌توان بیان نمود که الگوریتم DREAM در عمق ۰-۴۰ سانتی‌متری توانسته به کنترل عوامل محیطی و کاهش عدم قطعیت پارامترهای هیدرولیکی در جهت افزایش عملکرد مدل HYDRUS بپردازد. در حالی که با افزایش عمق خاک از دقت مدل HYDRUS لینک شده با الگوریتم DREAM در جهت برآورد رطوبت خاک کاسته شده است. کاهش عملکرد مدل لینک شده می‌تواند به دلیل ساختار طراحی شده مدل HYDRUS تحت شرایط همگن باشد. نتایج پژوهش‌های Skaggs et al. (2013) نیز نشان داد عملکرد مدل HYDRUS لینک شده با مفاهیم مونت کارلو در جهت برآورد نقاط رطوبتی و تغییرات غلظت نمک در امتداد پروفیل خاک روند کاهشی دارد. به طوری که در عمق ۱۲۰ و ۱۸۰ سانتی‌متری خاک نقاط اندازه‌گیری کاملاً در خارج از محدوده اطمینان قرار گرفتند و نتایج ارزیابی مدل بیان‌گر پیش‌برآورد مدل در مقدار رطوبت و نمک خاک است. در این مطالعه در کنار عدم قطعیت پارامترهای هیدرولیکی خاک و ساختار

۴- نتیجه‌گیری

در این پژوهش به بررسی نقش روش مدیریتی تحت شرایط غیرهمگن خاک در میزان کارایی مدل HYDRUS پرداخته شد. مطالعه هیستوگرام‌های توزیع پسین پارامترهای هیدرولیکی خاک بیان‌گر عدم قطعیت پارامترهای هیدرولیکی خاک و به عبارت دیگر نشان‌دهنده عدم توانایی مدل در برآورد مقدار دقیق پارامترها تحت شرایط حاکم بود. همچنین مطالعه نمودارهای محدوده اطمینان نشان داد که بهترین کارایی مدل HYDRUS در جهت شبیه‌سازی روند جریان آب در خاک، در لایه سطحی خاک حاصل شد و با افزایش عمق، نتایج بیان‌گر پیش‌برآورد مدل و کاهش عملکرد مدل است. بررسی شاخص p -factor تأکیدی بر بیش‌ترین عدم قطعیت پارامترهای هیدرولیکی خاک در امتداد پروفیل، در مرز بین دو لایه سطحی و زیرین خاک بود. در لایه سطحی بیش‌ترین مقدار شاخص p -factor برابر با $0/83$ و کم‌ترین درجه غیرمقارنی برابر $S = 0/33$ و $T = 0/77$ به دست آمد که بیان‌گر توانایی الگوریتم DREAM در کنترل عدم قطعیت پارامترهای هیدرولیکی و اثر شرایط محیطی (عملیات کشاورزی، شدت تبخیر و تعرق از سطح خاک) و مدیریتی بر کارایی مدل HYDRUS است. در حالی که با افزایش عمق، شاخص p -factor به 10 درصد کاسته شد، شاخص d -factor روند افزایشی نشان داد و از طرفی بر درجه نامقارنی محدوده اطمینان نیز افزوده شد که این روند اثر غیرهمگنی خاک در میزان عدم قطعیت

ساختار مدل و توانایی آن در برآورد پارامترهای مؤثر در شبیه‌سازی جریان آب در خاک را نشان می‌دهد. در نتیجه، در عمق زیرین از میزان دقت مدل در جهت شبیه‌سازی رطوبت خاک تحت روش مدیریتی کاسته شد و سبب هم‌پوشانی نقاط رطوبتی اندازه‌گیری‌شده با نقاط شبیه‌سازی‌شده در حد پایین محدوده اطمینان شد که نشان‌دهنده پیش‌برآورد مدل HYDRUS در لایه غیرهمگن خاک بود. در نهایت می‌توان بیان نمود که الگوریتم DREAM توانست به‌طور هم‌زمان به بررسی میزان عدم قطعیت پارامترها و ساختار مدل تحت روش مدیریتی حاکم بپردازد. بنابراین، این روش کارایی لازم برای بررسی میزان عدم قطعیت پارامترهای هیدرولیکی خاک تحت شرایط پیچیده، غیرهمگن و غیرقابل کنترل مزرعه دارد. همچنین این الگوریتم به خوبی می‌تواند میزان عدم قطعیت مفاهیم و ساختار ریاضی-فیزیکی طراحی‌شده در مدل HYDRUS را مورد ارزیابی قرار دهد. از این‌رو، می‌توان بیان نمود الگوریتم DREAM یک گزینه کاربردی و مدیریتی در جهت ارزیابی مدل HYDRUS طی اعمال روش آبیاری سنتریوت در سطح مزرعه است. همچنین این الگوریتم امکان بررسی عملکرد مدل‌های هیدرولیکی تحت اعمال روش‌های نوین مدیریتی در سطح مزرعه به‌منظور افزایش کارایی مدل‌ها را دارد.

References

- Abbaspour, K.C., Schulin, R., & Van Genuchten, M.T. (2001). Estimating unsaturated soil hydraulic parameters using ant colony optimization. *Advances in Water Resources*, 24(8), 827-841. doi:10.1016/S0309-1708(01)00018-5
- Abedini, E., Mousavi Bayegi, M., Khashei Siuki, A., & 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.
- Alam, M.S., Barbour, S.L., & Huang, M. (2020). Characterizing uncertainty in the hydraulic parameters of oil sands mine reclamation covers and its influence on water balance predictions. *Hydrology and Earth System Sciences*, 24(2), 735-759.
- Brunetti, G., Šimůnek, J., Bogen, H., Baatz, R., Huisman, J.A., Dahlke, H., & Vereecken, H. (2019). On the information content of cosmic-ray neutron data in the inverse estimation of soil hydraulic properties. *Vadose Zone Journal*, 18(1), 1-24. doi:10.2136/vzj2018.06.0123
- Brunetti, G., Porti, M., & 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. doi:10.1016/j.apenergy.2018.03.190
- Blasone, R.S. (2007). Parameter estimation and uncertainty assessment in hydrological modelling. Ph.D. Thesis, Technical University of Denmark, Denmark.
- Brown, J.D., & Heuvelink, G. (2006). Assessing uncertainty propagation through physically based models of soil water flow and solute transport. *Encyclopedia of hydrological sciences*. doi:10.1002/0470848944.hsa081
- Chen, S., Mao, X., Barry, D.A., & Yang, J. (2019). Model of crop growth, water flow, and solute transport in layered soil. *Agricultural Water Management*, 221, 160-174. doi:10.1016/j.agwat.2019.04.031
- Chen, G., Jiao, L., & Li, X. (2016). Sensitivity analysis and identification of parameters to the Van Genuchten equation. *Journal of Chemistry*. doi:10.1155/2016/9879537

- Houska, T., Multsch, S., Kraft, P., Frede, H.G., & Breuer, L. (2014). Monte Carlo-based calibration and uncertainty analysis of a coupled plant growth and hydrological model. *Biogeosciences*, 11(7), 2069-2082. doi:10.5194/bg-11-2069-2014
- Kisekka, I., Migliaccio, K.W., Muñoz-Carpena, R., Schaffer, B., & Khare, Y. (2015). Modelling soil water dynamics considering measurement uncertainty. *Hydrological Processes*, 29(5), 692-711. doi:10.1002/hyp.10173
- Li, X., Yang, P., Shi, H., Ren, S., Li, Y., Li, P., & Wang, C. (2013). The effect of transpiration uncertainty on root zone soil water by Bayesian analysis. *Mathematical and Computer Modelling*, 58(3-4), 691-700. doi:10.1016/j.mcm.2011.10.030
- Liao, K., Xu, S., Wu, J., & Zhu, Q. (2014). Uncertainty analysis for large-scale prediction of the van Genuchten soil-water retention parameters with pedotransfer functions. *Soil Research*, 52(5), 431-442. doi:10.1071/SR13230
- Loosvelt, L., Pauwels, V.R., Cornelis, W.M., De Lannoy, G.J., & Verhoest, N.E. (2011). Impact of soil hydraulic parameter uncertainty on soil moisture modeling. *Water Resources Research*, 47(3), 34-50. doi:10.1029/2010WR009204
- Lu, L., Jun, X., Chong-Yu, X., Jianjing, C., & Rui, W. (2009). Analysis of the sources of equifinality in hydrological models using GLUE methodology. *IAHS publication*, 331, 130-145.
- Mannschatz, T., Wolf, T., & Hülsmann, S. (2016). Nexus Tools Platform: Web-based comparison of modelling tools for analysis of water-soil-waste nexus. *Environmental Modelling & Software*, 76, 137-153. doi:10.1016/j.envsoft.2015.10.031
- Mualem, Y. (1976). A new model for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated porous media. *Water resources research*, 12(3), 513-522. doi:10.1029/WR012i003p00513
- Pan, Y., Zeng, X., Xu, H., Sun, Y., Wang, D., & Wu, J. (2020). Assessing human health risk of groundwater DNAPL contamination by quantifying the model structure uncertainty. *Journal of Hydrology*, 584, 124690. doi:10.1016/j.jhydrol.2020.124690
- Salahou, M.K., Chen, X., Zhang, Y., Jiao, X., & Lü, H. (2022). Inverse Modelling to Estimate Soil Hydraulic Properties at the Field Scale. *Mathematical Problems in Engineering*, 2022. doi:10.1155/2022/4544446
- Shafiei, M., Ghahraman, B., Saghafian, B., Davary, K., Pande, S., & Vazifedoust, M. (2014). Uncertainty assessment of the agro-hydrological SWAP model application at field scale: A case study in a dry region. *Agricultural Water Management*, 146, 324-334. doi:10.1016/j.agwat.2014.09.008
- Skaggs, T.H., Suarez, D.L., & Goldberg, S. (2013). Effects of soil hydraulic and transport parameter uncertainty on predictions of solute transport in large lysimeters. *Vadose Zone Journal*, 12(1), 1-12. doi:10.2136/vzj2012.0143
- Steenpass, C., Vanderborght, J., Herbst, M., Šimůnek, J., & Vereecken, H. (2010). Estimating soil hydraulic properties from infrared measurements of soil surface temperatures and TDR data. *Vadose zone journal*, 9(4), 910-924. doi:10.2136/vzj2009.0176
- Tu, T., Ercan, A., & Kavvas, M.L. (2019). One-dimensional solute transport in open channel flow from a stochastic systematic perspective. *Stochastic Environmental Research and Risk Assessment*, 33(7), 1403-1418. doi:10.1007/s00477-019-01699-7
- Vrugt, J.A., Ter Braak, C.J.F., Diks, C.G.H., Robinson, B.A., Hyman, J.M., & Higdon, D. (2009). Accelerating Markov Chain Monte Carlo simulation using self-adaptive differential evolution with randomized subspace sampling. *International Journal of Nonlinear Sciences and Numerical Simulation*, 10, 273-290. doi:10.1515/IJNSNS.2009.10.3.273
- Vrugt, J.A., & Ter Braak, C.J. (2011). DREAM (D): an adaptive Markov Chain Monte Carlo simulation algorithm to solve discrete, noncontinuous, and combinatorial posterior parameter estimation problems. *Hydrology and Earth System Sciences*, 15(12), 3701-3713. doi:10.5194/hess-15-3701-2011
- Wainwright, J., & Mulligan, M. (2013). *Environmental modelling: finding simplicity in complexity*. John Wiley & Sons.
- Xiong, L., Wan, M.I.N., Wei, X., & O'connor, K.M. (2009). Indices for assessing the prediction bounds of hydrological models and application by generalised likelihood uncertainty estimation/Indices pour évaluer les bornes de prévision de modèles hydrologiques ET mise en œuvre pour une estimation d'incertitude par vraisemblance généralisée. *Hydrological sciences journal*, 54(5), 852-871. doi:10.1623/hysj.54.5.852
- Yan, Y., Liu, J., Zhang, J., Li, X., & Zhao, Y. (2017). Quantifying soil hydraulic properties and their uncertainties by modified GLUE method. *International Agrophysics*, 31(3), 433-445. doi:10.1515/intag-2016-0056