

Uncertainty analysis in the simulation of effective seepage flow through earth dams with the Monte Carlo algorithm and machine learning

Farhoud Kalateh^{*1}, Milad Kheiry²

¹ Associate Professor, Water Civil Engineering Department, Faculty of Civil Engineering, University of Tabriz, Tabriz, Iran
² Ph.D., Water Civil Engineering Department, Faculty of Civil Engineering, University of Tabriz, Tabriz, Iran

Abstract

Introduction

The cost of building dams is very high and their failure can be hazardous. On the other hand, they are vital for every country as freshwater storage. Deterministic and traditional algorithms can not answer the multidimensional and complex problems of dam construction, and it is necessary to use hybrid methods based on probabilities. The problems of fluid movement in their nature have a complexity that modeling and finding requires using an advanced algorithm that can finally interpret its non-deterministic nature. Earth dams have a porous, multiphase, and complex medium, and the hydraulic and mechanical variables in different parts are associated with uncertainty. For this reason, in recent years, the regulations for the design of dams have been reforming in the direction of applying non-deterministic and probabilistic variables in the calculations. A probabilistic engineering view leads to a more realistic understanding of design than deterministic approaches. In the research, artificial intelligence (AI) methods have been used to analyze the data, which provides a predictive model of behavior for seepage discharge flow through the earth dam. In general, the present research has two purposes: a) to estimate the effect of uncertainty of the hydraulic conductivity dam on seepage discharge and b) to provide a model to estimate seepage discharge in a dimensionless way with the gene expression programming (GEP) and support vector machine (SVM) methods.

Materials and Methods

Monte Carlo simulation (MCS) with 2000 iterations was executed for stochastic analysis. The first step of the Monte Carlo simulation is the choice of the deterministic performance function. In the second step, the input variables were defined to the performance function and the probability distribution for variable/variables. By repeating the process n times, n random answers were extracted for the resulting problem, and finally, probability density function (PDF) and cumulative density function (CDF) graphs were drawn for the results. In the Fortran code of this research and to check the convergence, the hydraulic heads were compared to achieve the difference obtained in iteration n with the obtained value in iteration $n-1$, and if the difference is less than the tolerance error, then the program stops. In the next section of the algorithm, the obtained data (from the repeated execution of the MCS) are converted into a model for a description relationship between the effective seepage discharge (ESD) and the input variables by using the metaheuristic methods that include; gene expression programming (GEP) and support vector machine (SVM). After GEP and support vector regression (SVR) modeling the predicted and observed results were compared by statistical indexes such as MSE, RMSE, MAE, and Correlation coefficients.

Results and Discussion

The different models of earth dams were implemented in the Fortran program, and the average and standard deviation of the seepage discharge flow in the uncertainty state were obtained. To determine the relationship between the ESD value, indicators had been defined that these parameters used for the Gene Expression Programming model include; K_x/K_y , W/B , B_d/B , B_u/B , H_{dam}/B , H_u/H_{dam} , and H_d/H_u . These were the factors influencing the seepage discharge of the earth dam, and the discharge component is also defined as the effective seepage discharge (ESD) in a dimensionless manner. K_x and K_y are soil permeability in the direction of the horizontal and vertical axes respectively (m/s), W is the width of the crest, B is the width of the base of the earth

dam, B_d is the horizontal distance of the dam tip from the downstream side from the crest, B_u is the horizontal distance of the dam tip from the upstream side crest, H_{dam} height of the dam, H_u height of the reservoir level, H_d water height downstream of the dam, all the variables are in meters. By increasing the K_x/K_y ratio of horizontal to vertical hydraulic conductivity by 49%, the Effective Seepage Discharge increases by 14%. If the horizontal variable of permeability is increased by 25%, the ESD rate increases by 4.56%, similarly, if the vertical variable is increased by 25%, the ESD decreases by 4.72%.

Conclusion

After finite element analysis, and modeling with two methods of gene expression programming (GEP) and support vector regression (SVR), the statistical analysis of the methods showed that the two calculation models had a good prediction of the ESD with a correlation coefficient above 0.9. Vertical hydraulic conductivity (K_y) has a greater effect on the ESD rate than horizontal hydraulic conductivity (K_x). The results of the geometric investigation of the dam also show that the increase in the ratio H_{dam}/B has a direct impact on the ESD and also the lower the slope downstream of the dam leads to the lower the ESD. The statistical analysis was used to compare the results of the data obtained from Fortran output for SVR and GEP models. In general, the SVR model is closer to the model resulting from the Fortran code rather than the GEP model, and it has a low root mean square error (RMSE) and a high correlation coefficient.

Keywords: Fortran programming language, Porous medium, Probabilistic analysis, Probability density function (PDF), Soil hydraulic conductivity, Support vector machine (SVR).

Article Type: Research Article

Acknowledgment: This study was conducted with the support of the University of Tabriz which is acknowledged.

Conflicts of interest: The authors of this article declared no conflict of interest regarding the authorship or publication of this article.

Data availability statement: The datasets are available upon a reasonable request to the corresponding author.

Authors' contribution:

Farhoud Kalateh: Supervision, Software, Methodology, Results control; **Milad Kheiry:** Conceptualization, Resources, Statistical and software analysis, Original draft preparation, Manuscript writing and editing.

*Corresponding Author, E-mail: fkalateh@tabrizu.ac.ir

Citation: Kalateh, F., & Kheiry, M. (2024). Uncertainty analysis in the simulation of effective seepage flow through earth dams with the Monte Carlo algorithm and machine learning. *Water and Soil Management and Modeling*, 4(1), 151-170. DOI: 10.22098/mmws.2023.12184.1208

Received: 21 January 2023, Received in revised form: 14 February 2023, Accepted: 16 February 2023, Published online: 16 February 2023

Water and Soil Management and Modeling, Year 2024, Vol. 4, No. 1, pp. 151-170

Publisher: University of Mohaghegh Ardabili

© Author(s)





تحلیل عدم قطعیت در شبیه سازی دبی مؤثر نشت از سدهای خاکی با الگوریتم مونت کارلو و یادگیری ماشین

فرهود کالاته^{۱*}، میلاد خیری^۲

^۱ دانشیار، گروه مهندسی عمران آب، دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه تبریز، تبریز، ایران
^۲ دانش آموخته دکتری، گروه مهندسی عمران آب، دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه تبریز، تبریز، ایران

چکیده

عدم قطعیت‌های ناشی از ماهیت پیچیده خاک موجب گسترش استفاده از تحلیل‌های احتمالاتی در طراحی سازه‌های خاکی شده است و در برخی از کشورها آیین‌نامه‌های طراحی چنین سازه‌هایی را تغییر داده است. هدف پژوهش حاضر تحلیل تراوش با فرض عدم قطعیت در هدایت هیدرولیکی خاک است که در شرایط مختلف هندسی سد مورد بررسی قرار گرفته است. در این پژوهش ترکیب روش اجزای محدود به‌عنوان روش عددی محاسباتی در کنار یادگیری ماشینی (ML) برای بررسی مسأله تراوش از سد خاکی استفاده شده است که تحلیل عدم قطعیت در زبان برنامه‌نویسی فرترن با الگوریتم شبیه‌سازی مونت کارلو (MCS) پیاده‌سازی شده و با تعداد نمونه ۲۰۰۰ برای هر زیرمدل اجرا شده و تابع توزیع فراوانی برای هر مدل استخراج شد. سپس، نتایج احتمالاتی با رگرسیون بردار پشتیبان (SVR) و برنامه‌نویسی بیان ژن (GEP) تحلیل شدند که مدل درختی برای تراوش نیز ارائه شد. برای بررسی جریان نشت به‌صورت بی‌بعد از مؤلفه دبی مؤثر نشت (ESD) استفاده شد که بیان‌گر جریان دبی خروجی با در نظر گرفتن هندسه سد و ضریب هدایت هیدرولیکی آن است. مدل‌سازی داده‌های حاصل از کد فرترن به دو روش برنامه‌نویسی بیان ژن و رگرسیون بردار پشتیبان انجام شد. ضریب همبستگی مدل SVR و GEP به ترتیب ۰/۹۶ (در سه حالت داده‌های آزمون، آموزش و کل) و ۰/۹۱ و ریشه میانگین مربعات خطا (RMSE) در هر دو مدل نزدیک ۰/۰۱ به‌دست آمد که بیان‌گر این است که دو مدل مذکور با دقت مناسبی قادر به پیش‌بینی دبی مؤثر هستند و نتایج مدل SVR نسبت به مدل GEP به نتایج تحلیل ناشی از اجزای محدود، تطابق بیشتری دارد.

واژه‌های کلیدی: تابع چگالی احتمال، تحلیل احتمالاتی، زبان برنامه‌نویسی فرترن، ماشین بردار پشتیبان، محیط متخلخل، هدایت هیدرولیکی خاک.

نوع مقاله: پژوهشی

*مسئول مکاتبات، پست الکترونیکی: fkalateh@tabrizu.ac.ir

استناد: کالاته، فرهود و خیری، میلاد (۱۴۰۳). تحلیل عدم قطعیت در شبیه‌سازی دبی مؤثر نشت از سدهای خاکی با الگوریتم مونت کارلو و یادگیری ماشین. *مدل سازی و مدیریت آب و خاک*، ۴(۱)، ۱۵۱-۱۷۰.
DOI: 10.22098/mmws.2023.12184.1208

تاریخ دریافت: ۱۴۰۱/۱۱/۰۱، تاریخ بازنگری: ۱۴۰۱/۱۱/۲۵، تاریخ پذیرش: ۱۴۰۱/۱۱/۲۷، تاریخ انتشار: ۱۴۰۱/۱۱/۲۷



مدل سازی و مدیریت آب و خاک، سال ۱۴۰۳، دوره ۴، شماره ۱، صفحه ۱۵۱ تا ۱۷۰
ناشر: دانشگاه محقق اردبیلی © نویسندگان

۱- مقدمه

هزینه ساخت و اجرای سدها بسیار بالاست و شکست آن می‌تواند بسیار مخاطره‌آمیز باشد و از طرف دیگر با توجه به شرایط حاکم توجه و دقت در بهره‌برداری از منابع ذخیره آب برای هر کشور بسیار حیاتی است (Kheiry Ghojeh-biglou and Pilpayeh, 2019; Giglou et al., 2019; Kheiry and Pilpayeh, 2020). الگوریتم‌های تعیینی و سنتی پاسخ‌گوی مسائل چندبعدی و پیچیده سدسازی نیستند و لازم است که از روش‌های هیبریدی و الگوریتم‌های مبتنی بر احتمالات در پیش‌بینی و مدل‌سازی آن استفاده شود (Choopan et al., 2020; Kalateh and Kheiry, 2022a; Kalateh and Kheiry, 2022b; Akhavan et al., 2023). مسائل حرکت آب در ذات خود دارای پیچیدگی ساختاری هستند که مدل‌سازی و یافتن پاسخ بهینه نیازمند بهره‌گیری از الگوریتم تصادفی است که در نهایت بتوان ماهیت غیرقطعی آن را تفسیر کرد (Emami et al., 2020).

به‌طور کلی عدم قطعیت، از دو منبع کلی نشأت می‌گیرد که در حالت کلی به زیرمجموعه‌های عدم قطعیت اپیستیمیک^۱ و آلتوری^۲ تقسیم می‌شوند (Croisard et al., 2010). عدم قطعیت مربوط به تنوع طبیعی^۳ یا آلتوری، مرتبط با تصادفی بودن طبیعت است که ذات و ماهیت طبیعت را در نظر دارد و با عناوین عدم قطعیت بیرونی، عدم قطعیت ذاتی، عدم قطعیت هدف، عدم قطعیت تصادفی، عدم قطعیت بنیادی، عدم قطعیت دنیای واقعی شناخته می‌شود. در طرف دیگر عدم قطعیت دانش^۴ یا اپیستیمیک، وضعیت دانش و اطلاعات انسان از یک سیستم فیزیکی و توانایی در اندازه‌گیری و مدل‌سازی عدم قطعیت را بررسی می‌کند. این نوع عدم قطعیت با عنوان‌های عدم قطعیت تابعی، عدم قطعیت داخلی، عدم قطعیت ذهنی و ناتمامیت شناخته می‌شود (Helton, 1997; Pasha et al., 2013). در مقابل تحلیل عدم قطعیت، تحلیل تعیینی قرار دارد که بیش‌تر پژوهش‌های سنتی بر این شیوه استوار است. در این حالت خروجی، قادر به تبیین دقیقی از عدم قطعیت‌های ناشی از مؤلفه‌های ورودی و تنوع ذاتی آن‌ها نیست (Silva et al., 2016; Kalateh and Hosseinnejad., 2020; Kalateh, et al., 2022).

تاکنون دو روش اساسی برای برخورد ریاضی با عدم قطعیت‌ها توسعه داده شده است که عبارت‌اند از: الف) تئوری احتمالاتی^۵ مبتنی بر قضیه کالماگروف و ب) تئوری امکان^۶ بر

اساس تئوری فازی است. اغلب از تئوری احتمالاتی برای نمایش عدم قطعیت‌های آلتوری و اپیستیمیک استفاده می‌شود (Helton, 1997) و از تئوری امکان برای نمایش عدم قطعیت اپیستیمیک استفاده می‌شود البته از روش‌های مرسوم دیگری مانند تئوری دمپستر شافر، تحلیل بازه‌ها، مجموعه‌های فازی نیز برای تحلیل عدم قطعیت اپیستیمیک می‌توان استفاده کرد (Helton et al., 2011; Helton and Johnson, 2011; Smith and Freeze (1979a). در این راستا، (Helton, 2011 (1979b) تحلیل احتمالاتی جریان پایدار تراوش در خاک را با استفاده از روش مونت‌کارلو^۷ در هندسه یک‌بعدی بررسی کردند. هم‌چنین، آن‌ها در پژوهش دوم به بررسی دوبعدی نشت در آب زیر سد نفوذناپذیر و محصور در بلوک مربعی پرداختند. نتایج نشان داد که انحراف استاندارد برای بار هیدرولیکی در مدل یک‌بعدی نسبت به مدل دوبعدی تقریباً دو برابر است. این پژوهش‌گران بر اساس پژوهش قبلی (Dagan, 1976; Gelhar, 1976; Bekr, 1976) و مشاهدات، دریافتند که مدل احتمالاتی یک‌بعدی منجر به اغراق در برآورد پاسخ^۸ بار هیدرولیکی در پی سد می‌شود. در پژوهشی، Fenton and Grifitts (1996) با استفاده از شبیه‌سازی‌های مونت‌کارلو (MC) میانگین و واریانس نشت از طریق سد را تخمین زدند. آن‌ها یک روش عملیاتی برای پیش‌بینی میانگین و واریانس جریان تراوش کل از طریق سد خاکی ارائه دادند. در پژوهش دیگری، Cho (2012) با در نظر گرفتن تغییرات مکانی نفوذپذیری خاک و با روش اجزای محدود تصادفی (RFEM) برای تحلیل جریان نشت از بدنه سد استفاده کرد. ایشان فرض کرد که مقادیر نفوذپذیری هیدرولیکی از یک‌لایه خاک نسبت به لایه دیگر متفاوت است.

در سایر پژوهش‌ها، Calamak et al. (2012) با شبیه‌سازی مونت‌کارلو، اثر عدم قطعیت در تحلیل جریان دوبعدی نشت پایدار از خاک ناهمگن و ناهمسانگرد را بررسی کردند. هم‌چنین، Zhang et al. (2017) روش بدون مش کریجینگ متحرک را با انتگرال‌گیری مونت‌کارلو (MC) برای حل مسأله تراوش در سد خاکی با مواد ناهمگن پیشنهاد کردند. در ادامه، Tan et al. (2017) برای تعیین تأثیر ضریب تغییرات (COV) و تابع خودهمبستگی^۹ پارامترهای هیدرولیکی خاک روی میزان نشت (سد خاکی و فونداسیون) از ترکیب شبیه‌سازی مونت‌کارلو و Z میدان تصادفی^{۱۰} استفاده کردند. در پژوهش Mouyiaux et al.

⁶ Possibility

⁷ Monte Carlo

⁸ Overestimate

⁹ autocorrelation distance

¹⁰ random field theory

¹ Epistemic

² Aleatory

³ Natural variability

⁴ Knowledge uncertainty

⁵ Probability

بود که نشت غیرعادی آن عمدتاً در اطراف شانه چپ سد مشاهده می‌شود. سدهای خاکی دارای محیطی متخلخل، چندفازی و پیچیده هستند و متغیرهای هیدرولیکی و مکانیکی در بخش‌های مختلف متغیر و توأم با عدم قطعیت است. به همین جهت در سال‌های اخیر در بسیاری از کشورها آیین‌نامه‌های طراحی سدها در جهت اعمال متغیرهای غیرقطعی و احتمالاتی در محاسبات حرکت می‌کنند. دید مهندسی به صورت احتمالاتی منجر به درک واقع‌بینانه‌تری به طراحی نسبت روش‌های قطعی و سنتی می‌شود. به‌طور کلی در پژوهش حاضر دو هدف الف) تعیین اثر عدم قطعیت در هدایت هیدرولیکی بدنه خاکی روی دبی تراوش ب) ارائه مدلی برای برآورد دبی نشت به صورت بی‌بعد با روش برنامه‌نویسی بیان ژن و ماشین بردار پشتیبان. مورد نظر است.

۲- مواد و روش

برای حل عددی رابطه تراوش در محیط خاکی، Smith and Griffiths (2004) کدی را در زبان برنامه‌نویسی فرترن نگارش کرده‌اند که دبی نشت و بار فشاری (پیزومتر) را در بدنه سد خاکی همگن و ناهمگن محاسبه می‌کند. در این کد، با الهام از حل روابط تعادل استاتیکی و دینامیکی در مکانیک جامدات و با استفاده از روش اجزای محدود، رابطه دیفرانسیل لاپلاس حل می‌شود با این تفاوت که به جای مؤلفه‌های جابه‌جایی و نیرو در مسائل مکانیک جامدات از دبی نشت و بار هیدرولیکی استفاده می‌شود.

۲-۱- رابطه حاکم

رابطه لاپلاس برای توصیف پدیده جریان تراوش در سازه‌های متخلخل یکی از روابط اصلی است. شکلی از رابطه لاپلاس که در مسائل ژئومکانیک مطرح می‌شود، برای تحلیل جریان آب زیرزمینی (جریان تراوش آب) از ناحیه زیرین سازه نگه‌دارنده یا از بدنه لایه خاک مثل بدنه سد خاک‌ریز و سنگ‌ریز به کار می‌رود. در حالت کلی، رابطه حاکم بر جریان سیال رابطه پواسن است که شکل بسط یافته رابطه لاپلاس است:

$$k_x \frac{\partial^2 \varphi}{\partial x^2} + k_y \frac{\partial^2 \varphi}{\partial y^2} = q \quad (1)$$

در این رابطه، K_x و K_y به ترتیب هدایت هیدرولیکی خاک در دو جهت افقی و قائم (متر بر ثانیه)، h پتانسیل آب در خاک (متر) و q دبی جریان ورودی به خاک (مترمکعب بر ثانیه در واحد سطح) است. اگر دبی ورودی به توده خاک وجود داشته باشد علامت q مثبت و اگر دبی خروجی وجود نداشته باشد، علامت q منفی خواهد بود. رابطه (۱) برای جریان در شرایط دائمی و خاک همگن و رابطه (۲) برای شرایط غیردائمی برقرار است:

$$\frac{\partial}{\partial x} \left(k_x \frac{\partial h}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(k_y \frac{\partial h}{\partial y} \right) = q + \frac{\partial \theta}{\partial t} \quad (2)$$

(2019) از اجزای محدود تصادفی برای شبیه‌سازی تغییر مکانی فشار آب منافذی برای سد خاکی و برای شبیه‌سازی مونت کارلو از نرم‌افزار قابلیت اعتماد منبع باز OpenTURNS استفاده کردند. همچنین، استفاده از روش اجزای محدود تصادفی (RFEM) را می‌توان در پژوهش Liu et al. (2019) مشاهده کرد که برای تحلیل تراوش دوبعدی ماندگار در درون خاک‌ریز و تأثیر آن در پایداری داخلی خاک‌ریز استفاده کردند.

از روش خود پتانسیل^۱ نیز Ahmed et al. (2020) بر پایه مفهوم الکتریکی به نام «میدان پتانسیل جریان^۲» برای اندازه‌گیری جریان آب در محیط متخلخل از راه دور^۳ بهره گرفتند و سپس مسیر و سرعت نشت در سد خاکی را با استفاده از زنجیره‌های مارکوف مونت کارلو (McMC) بررسی کردند. در پژوهشی، Fukumoto et al. (2021) جریان تراوش و جوشش خاک ماسه‌ای اشباع به علت نشت را با کوپل شبکه بولتزمن و روش اجزای مجزا^۴ و در حالت دوبعدی حل کردند. در ادامه، Johari et al. (2021) پایگاه داده‌ای شامل ۱۰۰۰ مورد را با استفاده از روش المان محدود مرزی مقیاس شده (SBFEM) برای تراوش در زیرلایه‌های بتنی ایجاد کردند. سپس با برنامه‌نویسی بیان ژن (GEP) مدلی برای پیش‌بینی دبی تراوش در پی آن ایجاد شد. همچنین، Parsaie et al. (2021) از شش مدل محاسبات نرم شامل: برنامه‌نویسی ژنتیکی (GP)، ماشین بردار پشتیبان^۵ (SVM)، M5، خطوط رگرسیون تطبیقی چندمتغیره (MARS)، شبکه عصبی پرسپترون چندلایه (MLPNN) و روش گروهی پردازش داده‌ها (GMDH) برای تخمین نرخ جریان نشت از بدنه سد خاکی بهره بردند در پژوهش دیگری، Beiranvand and Rajaei (2022) تعداد ۴۶ مقاله را از سال ۲۰۰۵ تا ۲۰۲۲ در یک مقاله مروری بررسی کردند و سعی کردند بهترین مدل‌ها را در مدل‌های هوشمند برای پیش‌بینی تراوش و فشار آب منفذی شناسایی کنند. نتایج نشان داد که مدل‌های هیبریدی از محبوبیت بیش‌تری نسبت به مدل‌های تکی برخوردار هستند. برخی از مدل‌های منفرد مانند رگرسیون بردار پشتیبان (SVR)، شبکه‌های عصبی مصنوعی (ANN)، جنگل تصادفی (RF) و شبکه عصبی پیش‌خور (FF-NN) بیش از سایر مدل‌های هوش مصنوعی در پژوهش‌های اخیر استفاده شده‌اند. در نهایت، Yang et al. (2023) علل نشت غیرعادی را در سدهای خاکی - سنگی بررسی کردند که حجم تراوش و فشار تراوش را نیز برای سد هالیتینگ^۶ اندازه‌گیری کردند و نتایج حاکی از این

¹ Streaming potential field

² The self-potential method (SP)

³ Remote

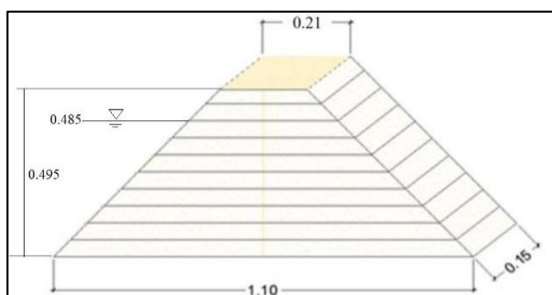
⁴ Discrete element method (DEM)

⁵ Support vector machine (SVM)

⁶ Hualiangting

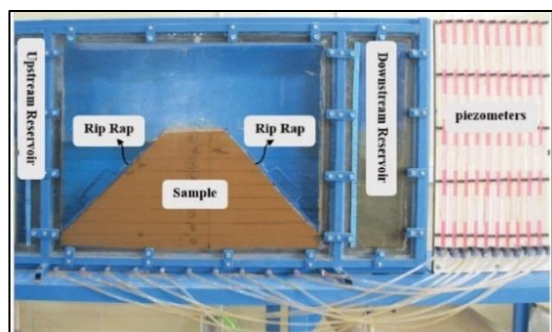
۲-۲- صحت‌سنجی مدل عددی

مدل‌های عددی برای کسب اطمینان از اعتبار خروجی نتایج حاصل، نیازمند مقایسه با مدل‌های آزمایشگاهی و یا صحرایی هستند. در پژوهش حاضر برای صحت‌سنجی از مدل آزمایشگاهی Kouhpeyma et al. (2022) استفاده شد که در یک فلوم به ابعاد ۱/۱، یک و ۰/۱۵ متر به ترتیب برای طول، ارتفاع و عرض تانک اجرا شده بود. ابعاد مدل‌سازی فیزیکی به صورت کوچک‌مقیاس ولی دانه‌بندی بر مبنای مصالح واقعی انتخاب شد. برای مدل‌سازی تراوش از مخزن آبی استفاده شد که مجهز به ۱۱ پیزومتر به فاصله‌های افقی ۱۰ سانتی‌متر از یکدیگر در کف و دو سر ریز لوله‌ای در مخزن‌های پایین دست و بالادست برای تنظیم تراز آب است (شکل‌های ۱ و ۲).



شکل ۱- نمای سه‌بعدی از مدل آزمایشگاهی Kouhpeyma et al. (2022)

Figure 1- 3D view of kouhpeyma et al. (2022) experimental model



شکل ۲- فلوم مورد بررسی در مدل آزمایشگاهی

Figure 2- Investigated Flume in the experimental model

میزان نشست در ارتفاع ۰/۴۹۵ متر از کف مخزن و برای بدنه سد با مشخصات شکل ۱ محاسبه و نتایج با مدل‌های به‌دست آمده از کد فرترن مقایسه شد. همچنین، بار فشاری (پیزومتری) مدل عددی و آزمایشگاهی مقایسه شد (شکل ۳). مطابق جدول ۱، اختلاف بین مقادیر عددی به‌دست آمده از برنامه فرترن و داده آزمایشگاهی برای مؤلفه نشست از سد بسیار جزئی و حدود ۰/۳۱ درصد است.

در جریان غیردائمی $\frac{\partial \theta}{\partial t}$ تغییرات حجمی رطوبت نسبت به زمان است. می‌توان رابطه لاپلاس را برای مسائل تراوش پایدار به صورت زیر بازنویسی کرد:

$$k_x \frac{\partial^2 \phi}{\partial x^2} + k_y \frac{\partial^2 \phi}{\partial y^2} = 0 \quad (3)$$

در رابطه (۳)، ϕ تابع پتانسیل جریان سیال و یا بار آبی کلی و K_x و K_y ضریب‌های هدایت هیدرولیکی یا نفوذپذیری در جهت‌های x و y هستند. با استفاده از روش اجزای محدود و گسسته‌سازی رابطه بالا، رابطه دیفرانسیل پاره‌ای فوق به دستگاه روابط جبری زیر تبدیل می‌شود:

$$[K_c]\{\phi\} = \{q\} \quad (4)$$

در رابطه (۴)، K_c ماتریس ضریب‌های متقارن و Φ بردار مقادیر گره‌ای مجهول بار آبی و q بردار جریان‌های ورودی یا خروجی از گره‌های مرزی قلمرو حل هستند. با استفاده از روش اجزای محدود گالرکین می‌توان نوشت:

$$\phi = [N]\{\phi\} \quad (5)$$

تابع وزن و تابع شکل یکسان است ($W_i = N_i$)، به همین دلیل فرم کلی ماتریس $[K_c]$ به صورت زیر نوشته می‌شود:

$$\iint (k_x \frac{\partial N_i}{\partial x} \frac{\partial N_i}{\partial x} + k_y \frac{\partial N_i}{\partial y} \frac{\partial N_i}{\partial y}) dx dy = 0 \quad (6)$$

در ادامه، می‌توان ماتریس ضریب‌ها را به صورت رابطه (۷) نوشت. در این رابطه، ماتریس خواص مصالح K مشابه ماتریس تنش-کرنش E در مسائل مکانیک جامدات است (رابطه ۸):

$$[K_c] = \iint ([T]^T [K] [T]) dx dy \quad (7)$$

$$K = \begin{bmatrix} k_x & 0 \\ 0 & k_y \end{bmatrix} \quad (8)$$

با این فرض که محورهای اصلی تانسور نفوذپذیری منطبق بر محورهای x و y هست، ماتریس $[T]$ نیز مشابه ماتریس $[B]$ در مکانیک جامدات است به طوری که برای یک المان چهارگره‌ای با رابطه (۹) مشخص می‌شود. همچنین، می‌توان ماتریس ضریب‌ها را با توجه به روش انرژی نیز به دست آورد. در این روش، عبارتی که معادل انرژی ذخیره شده در یک المان است با رابطه (۱۰) بیان می‌شود. در ادامه، با کمینه کردن عبارت فوق برای تمامی $\phi(x, y)$ ماتریس ضریب‌ها به دست می‌آید.

$$[T] = \begin{bmatrix} \frac{\partial N_1}{\partial x} & \frac{\partial N_2}{\partial x} & \frac{\partial N_3}{\partial x} & \frac{\partial N_4}{\partial x} \\ \frac{\partial N_1}{\partial y} & \frac{\partial N_2}{\partial y} & \frac{\partial N_3}{\partial y} & \frac{\partial N_4}{\partial y} \end{bmatrix} \quad (9)$$

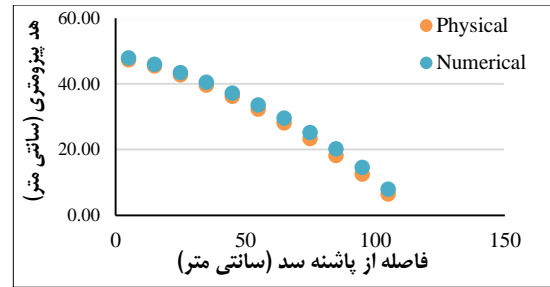
$$\iint \left[\frac{1}{2} k_x \left(\frac{\partial \phi}{\partial x} \right)^2 + \frac{1}{2} k_y \left(\frac{\partial \phi}{\partial y} \right)^2 \right] dx dy \quad (10)$$

۲-۴- ماشین بردار پشتیبان

محاسبات نرم با بهره‌گیری از الگوریتم‌های مبتنی بر هوش مصنوعی یکی از اصلی‌ترین روش‌های حل مسائل هیدرولیکی است (Momeneh, 2022; Merufinia et al., 2022). یکی از روش‌ها ماشین بردار پشتیبان است که در این پژوهش از نوع رگرسیون ماشین بردار پشتیبان (SVR) استفاده شد. ماشین بردار پشتیبان در چارچوب تئوری منظم‌سازی با به حداقل رساندن ریسک تجربی به روشی مناسب و سازگار عمل می‌کنند. به‌طور کلی در ماشین بردار پشتیبان مانند بسیاری از روش‌های یادگیری ماشینی، فرآیند ساخت مدل شامل دو مرحله آموزش و آزمایش است که در انتهای فاز آموزش قابلیت تعمیم‌یابی مدل آموزش داده شده با استفاده از داده‌های آزمایش مورد ارزیابی قرار می‌گیرد. در پژوهش حاضر نیز ۲۵ درصد داده‌ها برای آزمون و ۷۵ درصد برای آموزش اختصاص یافت. ماشین رگرسیون از نوع ۱ و نوع کرنل تابع شعاعی پایه است. برای ورودی ماشین بردار پشتیبان تعداد متغیرهای مستقل شش عدد و تعداد SV برابر ۲۰ عدد که ۱۱ عدد آن محدود شد و ماشین رگرسیون از نوع یک و نوع کرنل تابع شعاعی پایه است.

۲-۵- روش برنامه‌نویسی بیان ژن

به‌طور کلی فرآیند گام به گام مدل برنامه‌ریزی بیان ژن (GEP) به شرح زیر است: (۱) فرآیند با تولید تصادفی کروموزوم‌ها از تعداد معینی جمعیت اولیه آغاز می‌شود. (۲) کروموزوم‌ها به‌صورت بیان درختی اظهار می‌شوند. (۳) میزان مطلوبیت هر جواب بالقوه مسأله (کروموزوم) و درجه سازگاری آن ارزیابی می‌شود. (۴) اگر شرایط مطلوب حاصل شده باشد برنامه متوقف و جمعیت موجود جواب مطلوب را نشان می‌دهد در غیر این صورت (۵) بهترین افراد از جمعیت حاضر نگه‌داشته می‌شود. (۶) بقیه افراد جمعیت حاضر بر اساس عملکردشان انتخاب می‌شوند. (۷) اصلاحات و بهبودهایی (تکتیر و جهش) روی جمعیت انتخاب شده صورت می‌گیرد، در نتیجه فرزندان با ویژگی‌های جدید تولید می‌شوند. (۸) فرزندان جدید، در یک چرخه، تحت همان فرآیند توسعه قرار می‌گیرند و این فرآیند برای تعداد معینی از نسل‌ها تکرار می‌شود تا راه‌حل مناسبی پیدا شود. در برنامه‌نویسی بیان ژن برای اجرای مراحل بالا از عملگرهای الگوریتم ژنتیک استفاده می‌شود که در راستای جهش و ترکیب کروموزوم‌ها و ایجاد جمعیت با ویژگی‌های نو کار می‌کنند. این مقادیر مشخص توسط نرم‌افزار GeneXproTools در فرآیند معین می‌شود و بسته به مقادیر



شکل ۳- مقایسه نتایج مدل آزمایشگاهی با مدل عددی

Figure 3- Comparing the results of the experimental model with the numerical model

جدول ۱- مقایسه دبی نشت به‌دست آمده از مدل

آزمایشگاهی و مدل پژوهش حاضر

Table 1- Comparison of the seepage flow rate obtained from the laboratory model and the current research model

درصد خطا	مدل	دبی نشت (مدل آزمایشگاهی)	دبی نشت (مدل عددی پژوهش حاضر)
0.31	0.02	4.85	4.83

مترمکعب بر ثانیه 10^{-7}

۲-۳- شبیه‌سازی مونت کارلو

اولین مرحله برای شبیه‌سازی مونت کارلو (MCS)، انتخاب تابع عملکرد قطعی است. مرحله بعد، تعریف متغیرهای ورودی برای تابع عملکرد و انتخاب توزیع احتمال برای هر یک از متغیرهاست، مانند توابع توزیع احتمال بتا، گاما، نرمال، غیرنرمال، یکنواخت که با استفاده از تولیدکننده اعداد تصادفی برای هر یک از متغیرهای ورودی یک مقدار تصادفی انتخاب می‌شود. سپس از مقادیر تصادفی انتخاب شده برای هر یک از متغیرها در حل تابع عملکرد استفاده می‌شود. مجدداً عدد تصادفی دیگری برای ورودی انتخاب و دوباره سیستم بر اساس آن تحلیل می‌شود. با تکرار چندین باره این پروسه به تعداد n بار، n جواب تصادفی برای مسأله حاصل و در انتها برای پاسخ‌های حاصل نمودارهای تابع چگالی احتمال و تابع تجمعی احتمال رسم می‌شود و احتمال خرابی تعیین می‌شود (Jafarian and Nasri, 2016). در این پژوهش تعداد تکرار شبیه‌سازی برابر ۲۰۰۰ در نظر گرفته شد.

در کد فرترن پژوهش حاضر از حلقه‌های تکرار در شبیه‌سازی مونت کارلو استفاده شده است. به‌منظور بررسی همگرایی، یک زیربرنامه برای همه عناصر به‌طور پیوسته در یک حلقه ایجاد شده است که اختلاف بار هیدرولیکی به‌دست آمده در تکرار n را با مقدار به‌دست آمده آن در تکرار n-1 مقایسه می‌کند و اگر این اختلاف کم‌تر از خطای تلورانس باشد، برنامه متوقف می‌شود. در بخش بعدی الگوریتم، داده‌های به‌دست آمده از اجرای مکرر برنامه FORTRAN با الگوریتم هوش مصنوعی به مدل پیش‌بینی برای دبی مؤثر نشت (ESD) تبدیل می‌شوند.

است که اختلاف بار هیدرولیکی به‌دست آمده در تکرار n را با مقدار متناظر آن در تکرار $n-1$ مقایسه می‌کند و در صورتی که این اختلاف از خطای مجاز کم‌تر باشد برنامه متوقف می‌شود و خاتمه می‌یابد. در واقع این روند بررسی همگرایی، برای هر اجرای شبیه‌سازی مونت‌کارلو پردازش می‌شود که موجب افزایش زمان دستیابی به نتایج نسبت به حالت تعیینی می‌شود. در قسمت بعدی از الگوریتم پژوهش، داده‌های به‌دست آمده از اجراهای مکرر برنامه فرترن در قالب برنامه‌نویسی بیان ژن به روابط بین تنش مؤثر و مؤلفه‌های ورودی تبدیل می‌شوند. مطابق شکل ۴، الگوریتم تحقیق حاضر در سه فاز عملیاتی می‌شود که فاز اول تحلیل عدم قطعیت مبتنی بر الگوریتم شبیه‌سازی مونت‌کارلو است و پس از به‌دست آوردن میانگین و انحراف معیار دبی تراوش، تحلیل با کاربست مدل برنامه‌نویسی بیان ژن در فاز دوم ادامه می‌یابد و دبی مؤثر نشت محاسبه می‌شود. سپس در فاز سوم مدل ماشین بردار پشتیبان جهت محاسبه دبی مؤثر نشت استفاده می‌شود و در نهایت دو مدل فوق با تحلیل آماری انجام می‌شوند.

۲-۶- معیارهای تحلیل آماری

پس از این که مدل‌سازی در برنامه فرترن اجرا شد داده‌ها با روش برنامه‌نویسی بیان ژن و رگرسیون بردار پشتیبان تحلیل می‌شوند. حاصل این دو فرآیند، در قالب مدلی مشخص برای حالت احتمالاتی ارائه می‌شود و در این مرحله مقادیر خطای این روابط باید با سنج‌های آماری بررسی شود. برای ارزیابی مدل‌های مورد نظر از شاخص‌های آماری ضریب تبیین (R^2)، میانگین مربعات خطا (MSE)، جذر میانگین مربعات خطا (RMSE)، میانگین خطای مطلق (MAE)، استفاده می‌شوند (روابط ۱۱ الی ۱۴):

$$MAE = \frac{\sum_{i=1}^n |fm_i - gm_i|}{n}, \quad (11)$$

$$MSE = \frac{\sum_{i=1}^n (fm_i - gm_i)^2}{n}, \quad (12)$$

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (fm_i - gm_i)^2}{n}} \quad (13)$$

$$R^2 = \left(\frac{\sum_{i=1}^n (fm_i - \bar{fm})(gm_i - \bar{gm}_i)}{\sqrt{\sum_{i=1}^n (fm_i - \bar{fm})^2 \sum_{i=1}^n (gm_i - \bar{gm}_i)^2}} \right)^2 \quad (14)$$

در رابطه‌های (۱۱) تا (۱۴)، fm_i مقدار نمونه به‌دست آمده از تحلیل عددی در برنامه فرترن و gm_i مقدار نمونه به‌دست آمده با استفاده از برنامه‌نویسی بیان ژن یا رگرسیون بردار پشتیبان است. n تعداد کل نمونه‌ها، \bar{fm}_i مقدار میانگین نمونه به‌دست آمده از تحلیل عددی در فرترن و \bar{gm}_i مقدار میانگین نمونه به‌دست آمده از تحلیل عددی برنامه‌نویسی بیان ژن یا رگرسیون بردار پشتیبان است.

داده‌ها و محدودیت آن‌ها متغیر است. عملگر کراس‌اور^۱ و جهش^۲ به‌عنوان جزء اصلی عملگرهای برنامه‌نویسی بیان ژن در نرم‌افزار GeneXproTools استفاده می‌شود.

عملگرهای ژنتیک به شکل گسترده‌ای در برنامه‌نویسی بیان ژن استفاده می‌شوند که تعداد کروموزوم‌ها برابر ۳۰ و تعداد ژن‌ها برابر سه در نظر گرفته شدند و جهت مرتبط کردن توابع از عملگر جمع استفاده شد. برای نمونه‌های ورودی برنامه‌نویسی بیان ژن از ۱۳۸ نمونه استفاده شده است که این نمونه دارای تفاوت‌هایی در هندسه، ارتفاع مخزن، ارتفاع آب پایین‌دست و نفوذپذیری افقی و قائم خاک است. هدف از ترسیم و ایجاد این نمونه‌ها آشکارسازی تأثیر این تفاوت‌ها بر میزان تراوش از سد است. جهش (Mutation) و بازترکیب (Recombination) این پارامترهای ورودی منجر به ایجاد تابع هدف با برازش مناسب در دو حالت تعیینی و احتمالاتی شده است. در جدول ۲ زیر مقادیر عملگرهای ژنتیک ذکر شده است.

جدول ۲- مقادیر عملگرهای ژنتیک در برنامه‌نویسی بیان ژن
Table 2- Genetic operators in the gene expression programming of the present study

عملگر	مقدار	مؤلفه	مقدار
اندازه هد	8	رکوردهای آموزش	138
نوع ارتباط توابع	تجمیعی	رکوردهای آزمایش/صحت سنجی	138
تعداد ژن‌ها	3	تعداد کروموزوم‌ها	30
محدوده پایین	-10	ثابت‌های عددی	ثابت‌های هر ژن ^۳
محدوده بالا	10	نوع داده‌ها	Floating-Point
Tail Inversion	0.0055	عملگرهای ژنتیک	عملگرهای ژنتیک
Stumbling Mutation	0.0014	جهش	0.00138
بازترکیب یکپارچه ^۶	0.0076	جهش ریشه ثابت ^۴	0.00068
بازترکیب ژن ^۷	0.0028	تابع ورود ^۵	0.00206
کروموزوم تصادفی	0.0026	Conservative Mutation	0.00364
کلونینگ تصادفی ^۸	0.00102	Conservative Fixed-Root Mutation	0.00182
کلونینگ برتر ^۹	0.0026	انتقال IS	0.00546
		وارونگی ^{۱۰}	0.00546

در کد فرترن مربوط به پژوهش حاضر، در چند قسمت از حلقه‌های تکرار استفاده شده است که یکی از بخش‌های اساسی، حلقه تکرار اعمال شبیه‌سازی مونت‌کارلو است. همچنین، مطابق شکل ۴ برای بررسی همگرایی زیربرنامه‌ای برای همه اجزا (المان‌ها) به‌صورت پیوسته حلقه‌ای ایجاد شده

¹ Crossover

² Mutation

³ Constants per gene

⁴ Fixed-root mutation

⁵ Function insertion

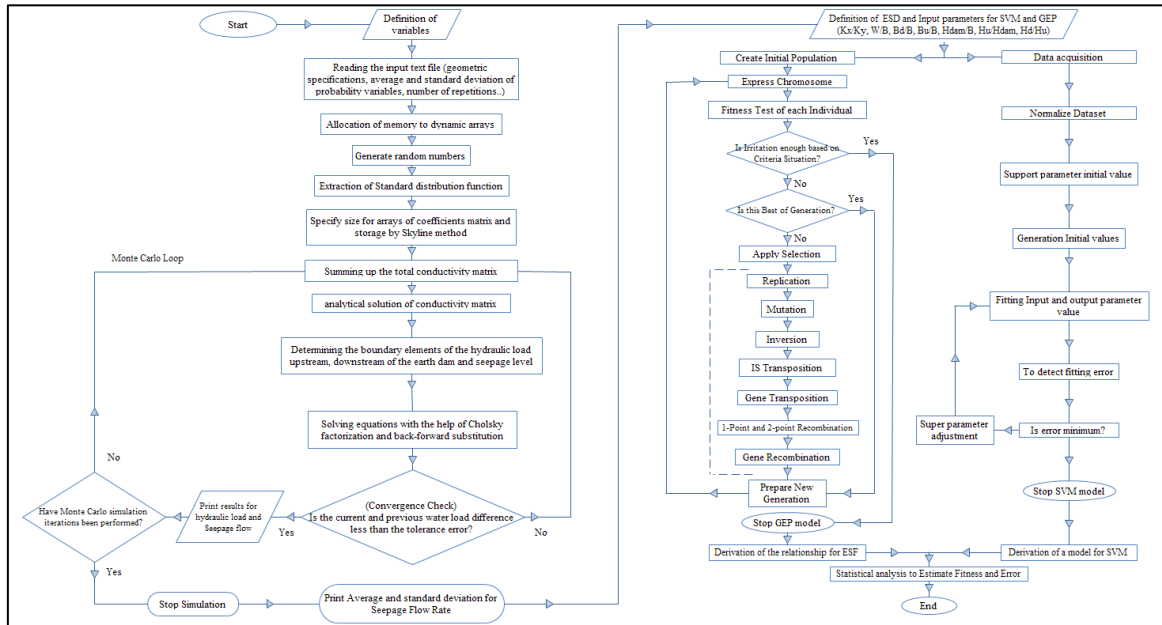
⁶ Uniform recombination

⁷ Gene recombination

⁸ Random cloning

⁹ Inversion

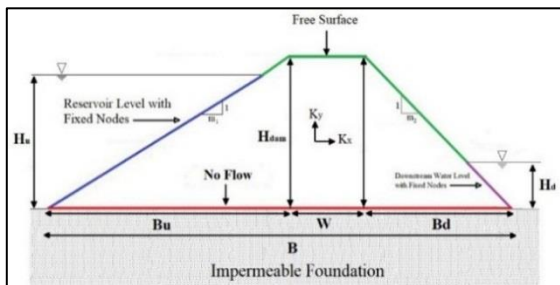
¹⁰ Best cloning



شکل ۴- الگوریتم پژوهش حاضر مبتنی بر ترکیب شبیه‌سازی احتمالاتی مونت کارلو (MCS) با الگوریتم برنامه‌نویسی بیان ژن (GEP) و ماشین بردار پشتیبان (SVR)

Figure 4- The present research algorithm is based on the combination of probabilistic Monte Carlo simulation (MCS) with Gene Expression Programming (GEP) and Support Vector Machine (SVR) methods

با ارتفاع آب با گره‌هایی ثابت در نظر گرفته شد. خطوط سبز رنگ در شکل ۵ نیز بیان‌گر سطوح در ارتباط با فشار هوای آزاد است. مرز بین پی و سد به صورت جریان دبی صفر فرض شده است.



شکل ۵- شرایط مرزی سد خاکی در مدل عددی اولیه
Figure 5- Boundary conditions of the earth dam in the initial numerical model

علاوه بر فازهای اشاره شده مطابق شکل ۴، پژوهش حاضر در سه مرحله انجام گرفت که در مرحله اول کد فرترن صرفاً جهت تحلیل احتمالاتی بوده و مطابق شکل ۵ ورودی شامل هندسه سد، مخزن و خصوصیات مصالح است. به دلیل چندفازی، ناهمگنی و پیچیدگی بافت خاک، ضریب هدایت هیدرولیکی به عنوان متغیر غیرقطعی در نظر گرفته شد که با شاخص K_x و K_y به ترتیب در راستای افقی و عمودی و برحسب متر بر ثانیه در مدل‌های عددی فرض شد. در کنار این، متغیرهای تعینی شامل W عرض تاج، B عرض پایه سد خاکی، B_d فاصله افقی نوک سد از طرف پایین دست با تاج، B_u فاصله افقی نوک سد از

۷-۲- مدل عددی پژوهش

در تحلیل عدم قطعیت لازم است پیش از اجرای کد میانگین و انحراف معیار، متغیر تصادفی تعیین شود که در این پژوهش، متغیر تصادفی ورودی ضریب هدایت‌پذیری خاک و بقیه متغیرهای ورودی تعینی هستند و متغیر خروجی تصادفی، دبی تراوش سد است. در همه تحلیل‌ها، شبیه‌سازی مونت کارلو با ۲۰۰۰ تکرار اجرا شده است و در واقع تعداد نمونه‌های شبیه‌سازی ۲۰۰۰ است. برخلاف تحلیل تعینی (یک مقدار برای خروجی منتج می‌شود) به اندازه تعداد تکرارها، مقادیر خروجی دبی تراوش به دست آمده است که برای نمایش این نتایج نیاز به استفاده از تابع توزیع فراوانی (PDF) است. پژوهش در سه مرحله بررسی هندسه، ارتفاع سطح آب مخزن و پایین دست، نفوذپذیری خاک مدل‌سازی شد. در مرحله هندسه ۱۵ مدل با هندسه متفاوت به منظور بررسی تأثیر مؤلفه‌های هندسی سد خاکی ایجاد شد. در بررسی ارتفاع سطح آب ۱۲ نسبت متفاوت از مخزن آب و پایین دست در نظر گرفته شد و در بررسی نفوذپذیری خاک نیز تعداد ۱۵ نسبت (برای نفوذپذیری افقی به عمودی بدنه سد) ایجاد شد و مدل هر یک در کد فرترن اجرا شد. در پژوهش حاضر، هندسه مدل پایه برای شبیه‌سازی سد خاکی، مطابق شکل ۵ است و جنس مصالح آن از نوع سنی-رسی (SC) است. در مش‌بندی اجزای محدود، همه مدل‌ها دارای المان‌های چهارگره‌ای هستند که برای شرایط مرزی بالادست از نقاط پتانسیل گرهی ثابت استفاده و سطح آب پایین دست نیز متناسب

ورود پیدا می‌کند. ابتدا سد به صورت هم‌روند در نظر گرفته $(K_x=K_y)$ و کد توسعه داده شده در حالت احتمالاتی اجرا شد.

۳-۲- تأثیر هندسه

برای بررسی تأثیر ابعاد^۱ بر روی تراوش، سدهای خاکی مختلفی مدل‌سازی شد و سپس این سدها در ورودی برنامه احتمالاتی به زبان فرترن قرار گرفت. پس از آن که نمودارهای PDF و CDF برای هر زیرمدل استخراج شدند (شکل ۶)، مطابق جدول ۴ به تعداد ۱۵ مدل از سد خاکی انتخاب شدند که هر مدل نسبت به مدل قبلی پنج درصد بزرگ‌تر است و فرض بر این است که همه ظرفیت مخزن پر بوده و ارتفاع آب پایین دست برابر ۰/۵ متر است. مطابق جدول ۵، با افزایش اندازه سد خاکی در صورتی که همه ظرفیت مخزن پر باشد، میانگین دبی تراوش (با ضریب همبستگی ۰/۸۶) رفتار خطی دارد، به این معنا که در اغلب حالات افزایش اندازه موجب افزایش میانگین دبی تراوش شده است، اما لزوماً با افزایش ابعاد سد، تابع توزیع فراوانی (PDF) دبی مقادیر بالاتری را شامل نمی‌شود. محور افقی نمودار، دبی نشت منتج از کد فرترن است که برای یک متر عرض از سد خاکی در نظر گرفته شده است و برای سدهای عریض‌تر باید مقدار دبی در عرض موردنظر ضرب شود. محور عمودی نیز تعداد تکرارهای هر مؤلفه است که بیان‌گر فراوانی در بین نمونه‌های (n) شبیه‌سازی مونت‌کارلو است. به بیان دیگر چون در پژوهش حاضر تعداد تکرارهای حلقه مونت‌کارلو برابر ۲۰۰۰ است، محور عمودی جایگاه هر مؤلفه را در بین این تعداد تکرار معین می‌کند. در این شکل نمودار $a=6$ مربوط به کوچک‌ترین و شکل $a=0$ بزرگ‌ترین اندازه از مدل عددی سد خاکی است به طوری که عرض پایین (B) و ارتفاع سد (H_{dam}) به ترتیب ۲۴ و شش متر در مدل a و برابر ۱۳۰۰ و ۱۴۳ متر در مدل 0 است.

طرف بالادست با تاج، H_{dam} ارتفاع سد، H_u ارتفاع سطح مخزن، H_d ارتفاع آب پایین دست سد که همه برحسب متر هستند. خروجی مدل نیز شامل سه دست داده است که عبارت‌اند از: شماره گره، بار آبی φ برحسب متر و دبی تخلیه گره Q برحسب مترمکعب بر ثانیه (مترمربع بر ثانیه در حالت دوبعدی) که در یک فایل متنی چاپ می‌شود؛ اما در حالت احتمالاتی دبی تراوش خروجی برابر با تعداد تکرارها است. به عبارت دیگر به تعداد تکرارها که برابر ۲۰۰۰ است مقادیر خروجی دبی تراوش منتج می‌شود.

در مرحله‌های دوم و سوم نتایج به دست آمده از مرحله اول به ترتیب با روش برنامه‌نویسی ژن و ماشین بردار پشتیبان تحلیل می‌شوند. در این دو مرحله ورودی‌ها به صورت بی‌بعد در نظر گرفته می‌شود و شامل متغیرهای جدول ۳ است. خروجی با عنوان جدید دبی مؤثر نشت (ESD) و به صورت بی‌بعد زیر محاسبه می‌شود:

$$ESD = \frac{2Q}{H_{dam} \times (K_x + K_y)} \quad (15)$$

در رابطه فوق دبی مؤثر نشت و بی‌بعد است و Q میانگین دبی تراوش از بدنه سد خاکی (مترمکعب بر ثانیه)، که در تحلیل احتمالاتی میانگین آن مطرح است. ضریب هدایت هیدرولیکی خاک در محور عمودی K_y و در محور افقی K_x (متر بر ثانیه) و H_{dam} نیز ارتفاع سد (متر) هست. در آخر، نتایج حاصل از دو روش GEP و SVR با روش‌های تحلیل آماری مقایسه و همبستگی بین داده‌های مشاهداتی و پیش‌بینی شده به دست می‌آید.

جدول ۳- محدوده تغییرات مؤلفه‌های دخیل در دبی مؤثر

نشت در مدل برنامه‌نویسی بیان ژن

Table 3- The limits of the changes of the components involved in the effective leakage flow in the gene expression programming model

مؤلفه	توصیف	محدوده تغییرات
K_x/K_y	نسبت هدایت هیدرولیکی افقی به عمودی	0.71-1.41
H_u/H_{dam}	نسبت ارتفاع مخزن به ارتفاع سد	0.56-1.00
W/B	نسبت عرض تاج به عرض پایه سد	0.01-0.25
B_d/B	فاصله نوک تا تاج سد به عرض پایه سد	0.33-0.56
B_u/B	فاصله پاشنه تا تاج سد به عرض پایه سد	0.33-0.56
H_{dam}/B	ارتفاع سد به عرض پایه	0.11-0.36

۳- بحث و نتایج

۳-۱- تحلیل خروجی مدل

در مدل‌سازی تعیینی نفوذپذیری مصالح سد در این حالت ثابت است و به وسیله سابروتین Seep_4 به صورت تحلیلی حل می‌شود، اما در مدل احتمالاتی و روش مونت‌کارلو به جای ثبات هدایت هیدرولیکی، میانگین و انحراف معیار آن در محاسبات

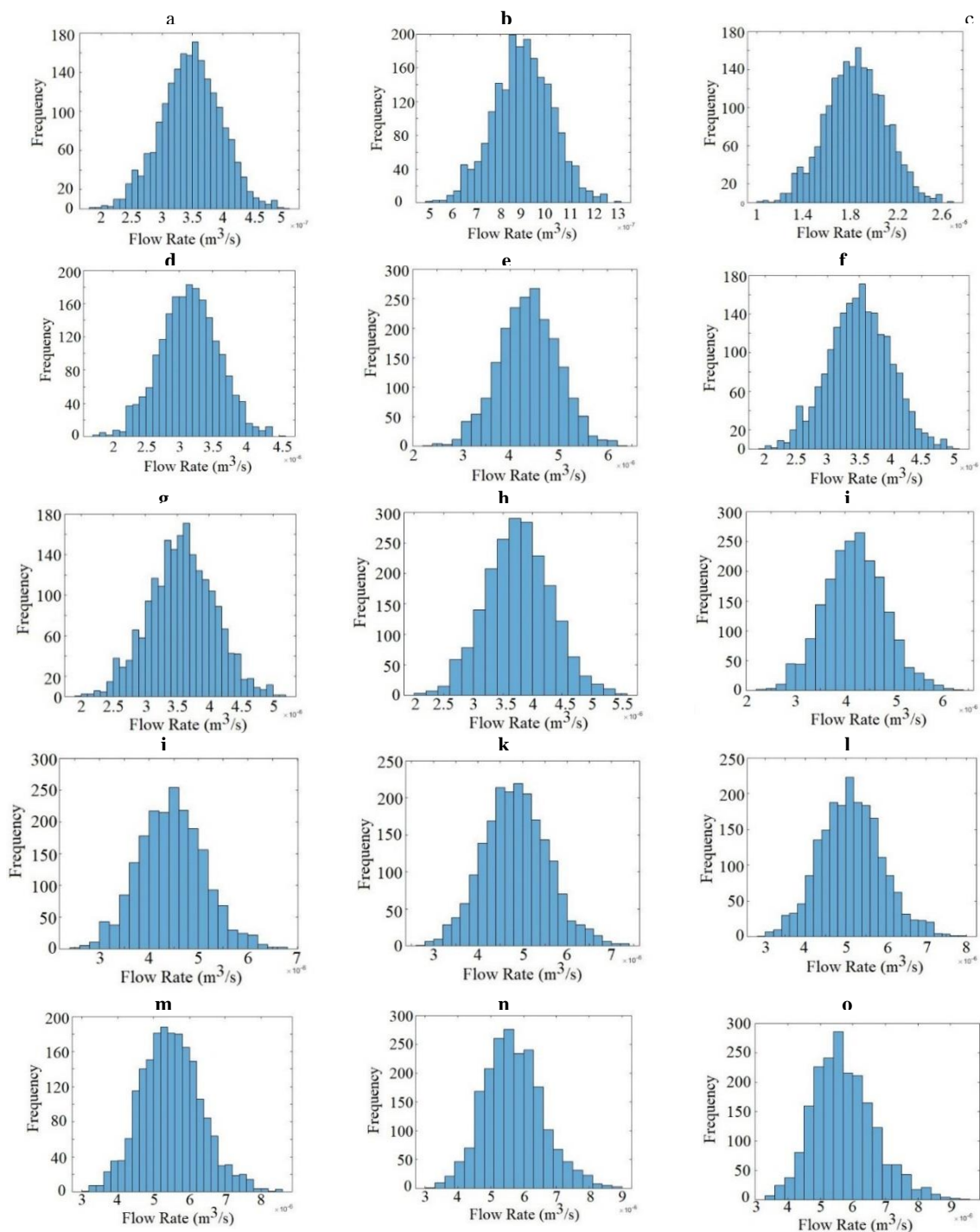
¹ Scale effect

جدول ۴- مشخصات مدل‌های هندسی سد خاکی برای تعیین اثر ابعاد
 Table 4- Specifications of geometric models of earth dam to determine the scale effect

مشخصه	هدایت هیدرولیکی افقی بر عمودی (K_x/K_y)	عرض تاج بر عرض پایه (W/B)	سطح مخزن بر ارتفاع سد (H_u/H_{da})	فاصله تاج از پایین دست بر عرض پایه (B_d/B)	ارتفاع سد بر عرض پایه (H_{dam}/B)	سطح آب پایین دست بر سطح بالادست (H_d/H_u)	مدل
a	1.00	0.17	1.00	0.42	0.25	0.08	
b	1.00	0.10	1.00	0.45	0.26	0.04	
c	1.00	0.08	1.00	0.46	0.29	0.02	
d	1.00	0.07	1.00	0.46	0.34	0.02	
e	1.00	0.07	1.00	0.47	0.36	0.01	
f	1.00	0.04	1.00	0.48	0.21	0.01	
g	1.00	0.03	1.00	0.49	0.18	0.01	
h	1.00	0.02	1.00	0.49	0.16	0.01	
i	1.00	0.02	1.00	0.49	0.15	0.01	
j	1.00	0.02	1.00	0.49	0.14	0.01	
k	1.00	0.02	1.00	0.49	0.14	0.00	
l	1.00	0.02	1.00	0.49	0.13	0.00	
m	1.00	0.02	1.00	0.49	0.13	0.00	
n	1.00	0.02	1.00	0.49	0.12	0.00	
o	1.00	0.01	1.00	0.49	0.11	0.00	

جدول ۵- برآورد احتمالاتی دبی تراوش از سد خاکی با در نظر گرفتن اثر ابعاد
 Table 5- Probability estimation of seepage discharge through the earth dams considering the scale effect

مشخصه	انحراف معیار ضریب هدایت هیدرولیکی خاک $SD_{K_x}=SD_{K_y}$	ضریب هدایت هیدرولیکی افقی و عمودی خاک $K_x=K_y$ (متر بر ثانیه)	میانگین دبی تراوش Q_{Mean} (مترمکعب بر ثانیه) $\times 10^{-7}$	انحراف معیار دبی تراوش SD_Q (مترمکعب بر ثانیه) $\times 10^{-7}$	مدل
a			3.47	0.50	
B			8.99	1.27	
c			18.5	2.60	
D			31.5	4.41	
e			43.7	6.09	
f			35.1	5.01	
g			35.7	5.16	
h	5×10^{-8}	3.33×10^{-7}	37.7	5.52	
i			41.9	6.18	
g			44.6	6.66	
k			48.4	7.29	
l			51.4	7.85	
m			54.9	8.47	
n			56.9	9.01	
o			57.3	9.62	



شکل ۶- تابع توزیع فراوانی (PDF) برای مدل‌ها بادر نظر گرفتن تأثیر ابعاد (Scale Effect)
 Figure 6- PDFs for models considering the impact of dimensions or Scale Effect

Lumb, 1966; Peck, 1967; Venmarcke, 1977;)
 (Degroot and Baecher, 1993)

در یک توده از خاک، ناهمگنی فضایی لایه‌های آن ناشی از تغییرپذیری ذاتی ساختار خاک و ناشی از فرآیندهایی مانند ته‌نشینی و هوازگی طبیعی خاک است. در روش‌های تحلیل قطعی تراوش، مقدار ثابت محافظه‌کارانه‌ای برای خصوصیات

۳-۳- هدایت هیدرولیکی خاک

فرض ثابت بودن مقدار نفوذپذیری در مدل‌های عددی موجب ایجاد خطای زیادی در محاسبات می‌شود، بافت و ساختار خاک در فضا خصوصیات متفاوتی نشان می‌دهند و در واقع ناهمگنی و تغییرپذیری فضایی از خواص ذاتی خاک طبیعی به‌شمار می‌رود

حاضر) ندارد. مطابق شکل ۷، در صورتی که نسبت هدایت هیدرولیکی افقی به عمودی یعنی K_x/K_y مدنظر باشد، رابطه مستقیم بین این نسبت و میانگین دبی تراوش (Q_{mean}) برقرار نیست و رفتار آن بعد از رسیدن به عدد یک یا حالت همسانگرد ($K_x=K_y$) تغییر می‌کند. نتایج اجرای کد نشست در حالت احتمالاتی و با تغییر هدایت هیدرولیکی در جدول ۶ و شکل ۷ مشاهده می‌شود.

یک لایه خاک در نظر گرفته و فرض می‌شود که لایه‌های خاک همگن هستند (Gui et al., 2000). در حالی که روش‌های احتمالاتی به جای مقادیر ثابت و یکسان، در هر تکرار مقادیر متفاوتی به مشخصات مصالح اختصاص می‌دهد. نتایج تحلیل احتمالاتی تراوش نشان می‌دهد که با افزایش ضریب هدایت هیدرولیکی افقی میزان میانگین نشست رشد پیدا می‌کند (با ضریب همبستگی ۰/۹۹) ولی ضریب هدایت هیدرولیکی در راستای عمودی تأثیر مستقیمی بر نشست (حداقل در بازه پژوهش

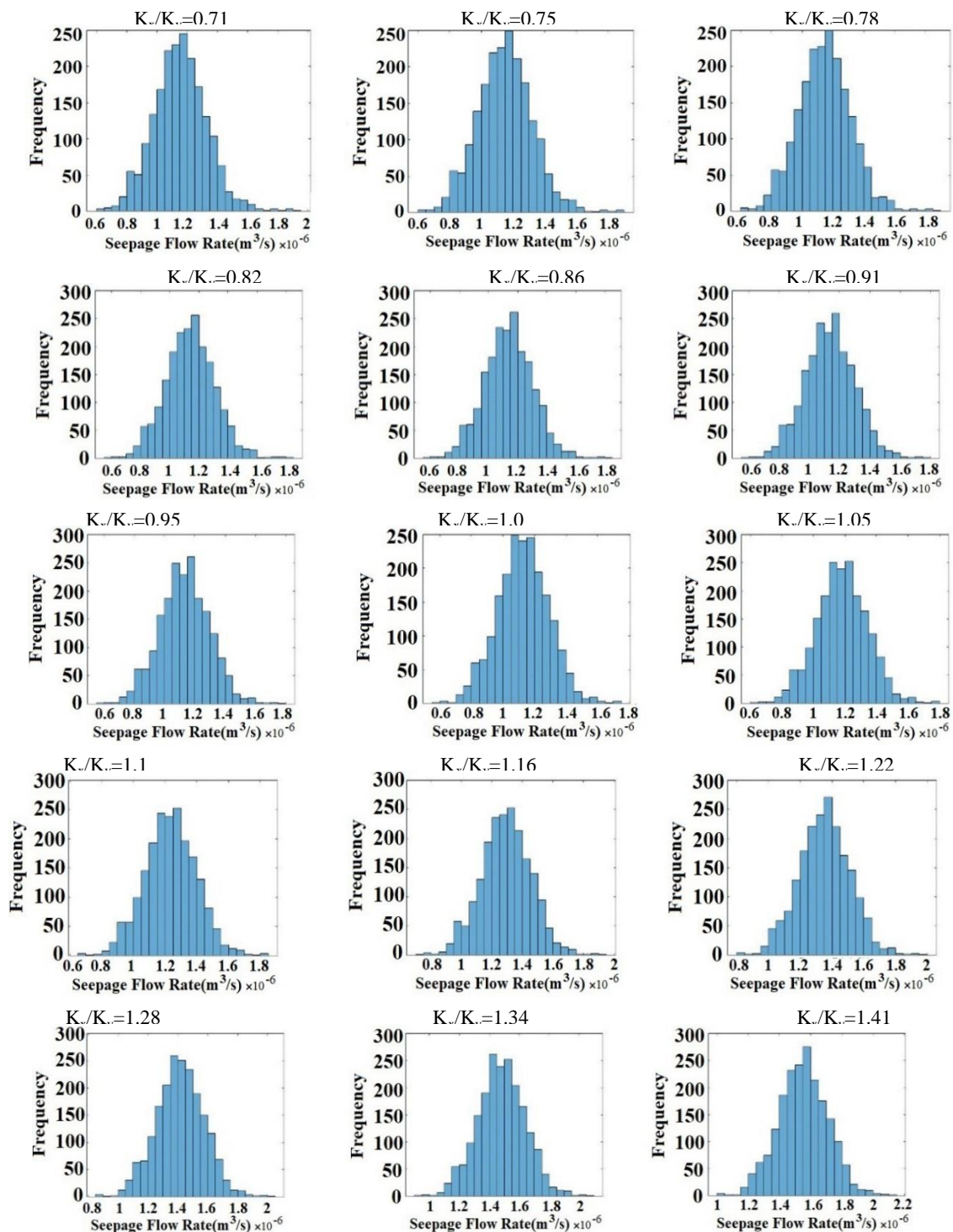
جدول ۶- برآورد احتمالاتی دبی تراوش از سد خاکی با در نظر گرفتن اثر ابعاد

Table 6- Probability estimation of seepage discharge through the earth dams considering the scale effect

مشخصه مدل	انحراف معیار ضریب هدایت هیدرولیکی خاک $SD_{K_x}=SD_{K_y}$	ضریب هدایت هیدرولیکی افقی و عمودی خاک $K_x=K_y$ (متر بر ثانیه)	میانگین دبی تراوش Q_{Mean} (مترمکعب بر ثانیه بر متر) $\times 10^{-7}$	انحراف معیار دبی تراوش SD_Q (مترمکعب بر ثانیه بر متر) $\times 10^{-7}$
a			3.47	0.50
b			8.99	1.27
c			18.5	2.60
d			31.5	4.41
e			43.7	6.09
f			35.1	5.01
g			35.7	5.16
h	5×10^{-8}	3.33×10^{-7}	37.7	5.52
i			41.9	6.18
g			44.6	6.66
k			48.4	7.29
l			51.4	7.85
m			54.9	8.47
n			56.9	9.01
o			57.3	9.62

جدول ۷- نتایج تحلیل احتمالاتی برای مقادیر تراوش در ازای تغییرات نفوذپذیری افقی به عمودی (K_x/K_y)Table 7- Probabilistic analysis results for seepage values during horizontal to vertical permeability (K_x/K_y) changes

نسبت ضریب هدایت هیدرولیکی افقی به عمودی K_x/K_y	ضریب هدایت هیدرولیکی افقی K_x (متر بر ثانیه) $\times 10^{-7}$	ضریب هدایت هیدرولیکی عمودی K_y (متر بر ثانیه) $\times 10^{-7}$	انحراف معیار ضریب هدایت افقی SD_{K_x}	انحراف معیار ضریب هدایت افقی SD_{K_y}	میانگین دبی تراوش Q (مترمکعب بر ثانیه بر متر) $\times 10^{-7}$	انحراف معیار دبی تراوش SD_Q (مترمکعب بر ثانیه بر متر) $\times 10^{-7}$
0.71	3.33	4.69			11.54	1.768
0.75	3.33	4.46			11.5	1.747
0.78	3.33	4.25			11.46	1.727
0.82	3.33	4.05			11.42	1.709
0.86	3.33	3.85			11.38	1.693
0.91	3.33	3.67			11.34	1.678
0.95	3.33	3.50			11.3	1.664
1.00	3.33	3.33	5×10^{-8}	5×10^{-8}	11.27	1.651
1.05	3.50	3.33			11.79	1.644
1.10	3.67	3.33			12.34	1.637
1.16	3.85	3.33			12.92	1.63
1.22	4.05	3.33			13.52	1.622
1.28	4.25	3.33			14.15	1.614
1.34	4.46	3.33			14.82	1.607
1.41	4.69	3.33			15.51	1.601



شکل ۷- تابع توزیع فراوانی (PDF) برآورد دبی نشت سد خاکی به ازای تغییرات نسبت نفوذپذیری افقی به عمودی (K_x/K_y)
 Figure 7- PDF of seepage discharge estimation for changes in horizontal to vertical permeability ratio (K_x/K_y) changes

پیدا نمی‌کند. رابطه نسبت ضریب هدایت هیدرولیکی افقی به عمودی (K_x/K_y) با میانگین دبی تراوش نیز خطی نیست، به طوری که مطابق با جدول ۷ در بازه ۰/۷۱ تا یک حالت نزولی و در بازه یک تا ۱/۴۱ رفتار صعودی نشان می‌دهد. اما آنچه در

نمودار تابع توزیع فراوانی در شکل‌های ۶ و ۷ بررسی هر دو بخش اثر تغییرات ابعاد و هدایت هیدرولیکی خاک را بر دبی تراوش نشان می‌دهد و گویای این نکته هستند که هندسه سد بر میزان تراوش از بدنه سد تأثیر مستقیمی ندارد و با فرض پر بودن مخزن و با افزایش ابعاد سد دبی میانگین لزوماً افزایش

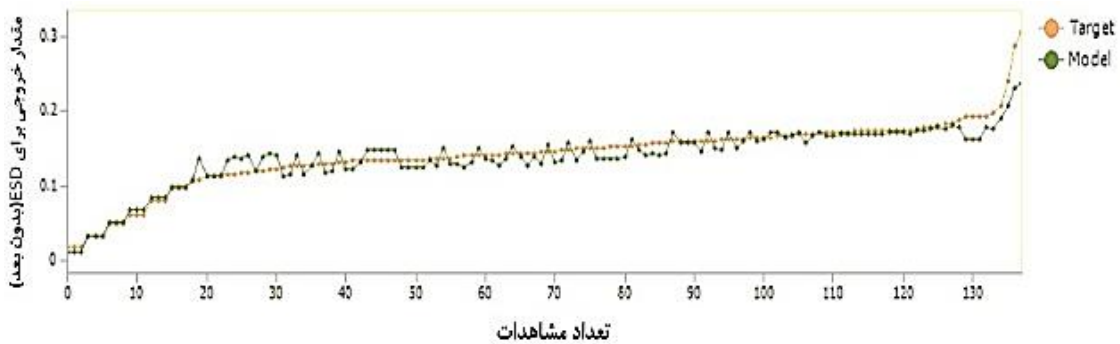
پایین‌دست سد که همه برحسب متر هستند. انتخاب عرض تاج سد (W) به عوامل مختلفی مانند، ارتفاع سد، اهمیت سد، نوع مصالح بدنه و حداقل فاصله لازم برای جلوگیری از ظاهر شدن خط نشست آب روی شیب پایین‌دست بستگی دارد. به‌طور معمول، کمینه عرض تاج حتی برای سدهای خاکی بسیار کوتاه نیز کم‌تر از سه متر انتخاب نمی‌شود. در بیش‌تر سدهای بزرگ این عرض اغلب بین شش تا ۱۲ متر متغیر است و عموماً با افزایش ارتفاع سد افزایش پیدا می‌کند (Mazaheri et al., 2020).

از تعیین میانگین و انحراف معیار تراوش در هر مدل منحصر به فرد، این داده‌ها در قالب یک دیتابیس تجمیع شدند. سپس در برنامه GeneXproTools مدلی بین مؤلفه‌های ورودی و دبی تراوش تعیین شد که مطابق شکل ۸ مطابقت مناسبی بین Target و Model مشاهده می‌شود و اختلاف کمی بین دو نمودار مذکور وجود دارد و نمودار درختی حاصل از مدل GEP نیز به‌صورت شکل ۹ حاصل شد.

شکل ۷ و جدول ۷ مشاهده می‌شود، با افزایش نسبت K_x/K_y انحراف معیار توابع توزیع فراوانی (PDF) کاهش می‌یابد.

۴-۳- تحلیل خروجی مدل برنامه‌نویسی بیان ژن

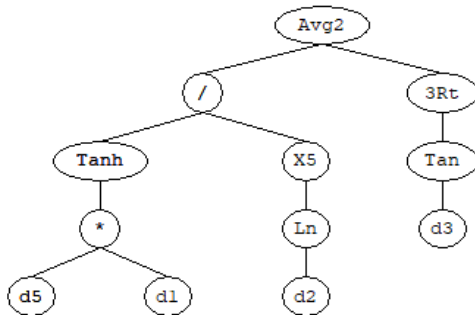
پس از این‌که مدل‌های مختلف از سد خاکی در برنامه فرترن اجرا شدند، میانگین و انحراف معیار دبی مؤثر نشست به‌دست می‌آیند. با هدف تعیین مدلی بین دبی نشست مؤثر و متغیرهای ورودی، شاخص‌هایی برای مدل برنامه‌نویسی بیان ژن شامل K_x/K_y ، B_d/B ، B_u/B ، H_{dam}/B ، H_u/H_{dam} و H_d/H_u تعریف شدند. این شاخص‌ها موارد تأثیرگذار در دبی تراوش سد خاکی می‌باشند. خروجی مدل به‌صورت بی‌بعد و با عنوان دبی مؤثر (ESD) در نظر گرفته شده است. در شاخص‌های بالا، K_x و K_y نفوذپذیری خاک به‌ترتیب در جهت محور افقی و عمودی برحسب متر بر ثانیه، W عرض تاج، B عرض پایه سد خاکی، B_d فاصله افقی نوک سد از طرف پایین‌دست با تاج، B_u فاصله افقی نوک سد از طرف بالادست با تاج، H_{dam} ارتفاع سد، H_u ارتفاع سطح مخزن، H_d ارتفاع آب



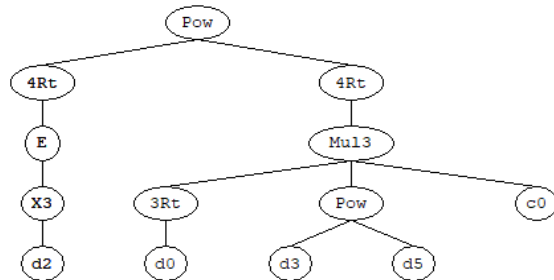
شکل ۸- تابع برازش برای مقایسه مدل عددی و تابع هدف در مدل GEP

Figure 8- The fitting function for comparing the numerical model and the objective function in the GEP model

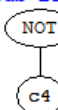
Sub-ET 1



Sub-ET 3



Sub-ET 2



شکل ۹- نمودار بیان درختی برای حالت احتمالاتی مدل GEP

Figure 9- Tree expression diagram for the probabilistic state of the GEP model

آن که کمینه خطا مشخص شد، ماشین بردار متوقف و خروجی چاپ می‌شود (شکل ۱۰).

Dataset Sheet1 in stochastic:
 Dependent: ESD
 Independents: K_x/K_y , W/B, B_d/B, H(dam)/B, H_u/H(Dam), H_d/H_u
 Sample size = 103 (Train), 35 (Test), 138 (Overall)
 Support Vector machine results:
 SVM type: Regression type 1 (capacity=10.000, epsilon=0.100)
 Kernel type: Radial Basis Function (gamma=0.167)
 Number of support vectors = 20 (11 bounded)
 Mean error squared = 0.000(Train), 0.000(Test), 0.000(Overall)
 S.D. ratio = 0.255(Train), 0.271(Test), 0.260(Overall)
 Correlation coefficient = 0.967(Train), 0.964(Test), 0.966(Overall)

شکل ۱۰ - خروجی متنی برای شاخصه‌های ماشین بردار پشتیبان (SVM)

Figure 10 - Text output for Support Vector Machine (SVM) indicators

برای ورودی ماشین بردار پشتیبان تعداد متغیرهای مستقل شش عدد و تعداد SV برابر ۲۰ عدد که ۱۱ عدد آن محدود شده است. نوع ماشین رگرسیون نوع ۱ و نوع کرنل تابع شعاعی پایه است. دیگر مشخصات به صورت خروجی کد در شکل مشاهده می‌شود. پس از تعیین مدل مطلوب در روش ماشین بردار پشتیبان برآورد خطا لازم است که با روش‌های آماری انجام شود. ضریب همبستگی مدل در سه حالت داده‌های آزمون، آموزش و کل بالای ۰/۹۶ است و میانگین خطای استاندارد برای هر سه حالت حدود ۰/۰۰۰۱ است که نمایان‌گر نزدیک مدل به هدف است. در ماشین بردار پشتیبان داده‌های خام (به دست آمده از تحلیل احتمالاتی) در قالب مدل ریاضی معرفی می‌شود که با عنوان داده‌های پیش‌بینی شده در پژوهش حاضر استفاده شده است و داده‌هایی که در تحلیل احتمالاتی به عنوان خروجی ESD بود، با عنوان داده مشاهده شده است. زمانی الگوریتم متوقف می‌شود که اختلافات دو خروجی مشاهده شده و پیش‌بینی شده کمینه باشد. در شکل ۱۱ نمودار پراکندگی بین داده مشاهده‌ای و پیش‌بینی در سه حالت داده‌های آزمون، آموزش و کل داده‌ها رسم شده است.

ESD مقدار خروجی با عنوان میانگین نشت مؤثر (بی‌بعد) است و در حالت کلی متغیرهای ورودی مدل GEP در حالت احتمالاتی مطابق شرایط ذیل روی ESD تأثیر می‌گذارند:

الف) با افزایش نسبت K_x/K_y به میزان ۴۹ درصد دبی مؤثر به میزان ۱۴ درصد افزایش پیدا می‌کند. در صورتی که مؤلفه افقی نفوذپذیری به میزان ۲۵ درصد افزوده شود مقدار میانگین دبی نشت مؤثر به میزان ۴/۵۶ درصد افزایش می‌یابد به همین ترتیب در صورتی که مؤلفه عمودی به میزان ۲۵ درصد افزوده شود مقدار دبی نشت مؤثر به میزان ۴/۷۲ درصد کاهش می‌یابد.

ب) در شرایط برابر، نسبت W/B با میانگین دبی نشت نسبت عکس دارد و مقدار آن تأثیر جزئی در نشت خواهد داشت، به طوری که اگر W/B به میزان ۲۴ برابر افزایش یابد، مقدار دبی مؤثر نشت ۴ درصد کاهش می‌یابد.

ج) با افزایش نسبت B_d/B میزان نشت به صورت سهموی کاهش می‌یابد. هرچه قدر نسبت B_d/B کم‌تر باشد در شرایط برابر نشت افزایش می‌یابد. به بیان دیگر، به طور مشخص هرچه قدر شیب پایین دست در سد خاکی سد ملایم‌تر باشد، مقدار دبی مؤثر کم‌تری را تجربه خواهد کرد.

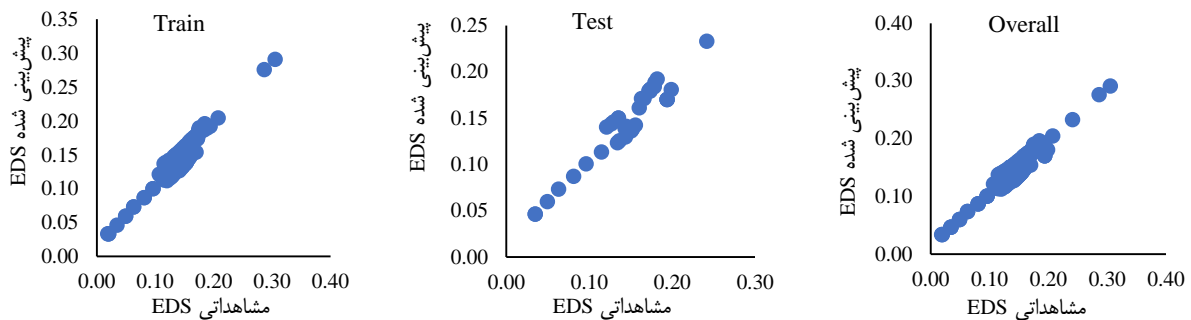
د) افزایش نسبت H_{dam}/B از ۰/۱۱ به ۰/۳۶ موجب شد که میزان نشت میانگین مؤثر ۱/۵۴ برابر شود.

ذ) نسبت سطح مخزن بر ارتفاع سد (H_u/H_{dam}) تأثیر خطی مستقیم بر مقدار نشت مؤثر نشان می‌دهد.

ر) رابطه خطی معکوس بین نسبت سطح آب پایین دست به بالادست H_d/H_u و دبی مؤثر نشت برقرار است به طوری که با افزایش این نسبت دبی مؤثر کاهش می‌یابد. افزایش نسبت فوق به میزان ۰/۰۸ واحد سبب کاهش نشت مؤثر به میزان ۰/۰۲ واحد می‌شود.

۵-۳- مدل رگرسیون ماشین بردار پشتیبان

در روش ماشین بردار پشتیبان همان‌طور که در نمودار جریان الگوریتم مشاهده می‌شود، ابتدا مقادیر اولیه تولید می‌شوند و سپس عملیات متناسب‌سازی رخ می‌دهد و بعد از این مراحل تعیین خطای برازش موجب ایجاد حلقه‌ای در داخل الگوریتم می‌شود که هدف آن کاهش میزان خطای مدل است و بعد از



شکل ۱۱- نمودار پراکندگی داده‌های مشاهده شده و پیش‌بینی شده با بهره‌گیری از SVR در سه حالت Train, Test, Overall
Figure 11- Scatter diagram of observed and predicted data using SVR in three modes of Test, Train, and Overall

مونت کارلو تابع توزیع فراوانی، میانگین و انحراف معیار هر مدل استخراج شد. در این مرحله، بررسی هدایت هیدرولیکی نشان می‌دهد که ضریب هدایت هیدرولیکی افقی خاک در اغلب مدل‌ها رابطه خطی و مستقیمی با میانگین دبی نشت نشان داده و ضریب هدایت قائم رابطه مشخصی را با دبی میانگین نمایش نمی‌دهد. در راستای هدف دوم پژوهش و پس از تحلیل اجزای محدود، مدل‌سازی با دو روش برنامه‌نویسی بیان ژن، ماشین بردار پشتیبان و در نهایت تحلیل آماری نشان داد که دو مدل هوش مصنوعی ماشین بردار پشتیبان (SVR) و برنامه‌نویسی بیان ژن (GEP) پیش‌بینی مناسبی از مقادیر دبی مؤثر تراوش در زیرمدلها داشتند. نتایج بررسی هندسی سد نیز بیان‌گر این است که با ضریب همبستگی 0.95 افزایش نسبت ارتفاع سد به عرض پایه آن (H_{dam}/B) تأثیر مستقیمی بر دبی مؤثر نشت دارد. به‌طور کلی پژوهش حاضر با توجه به بهره‌گیری از نمونه‌های الگوریتم احتمالاتی مونت کارلو قابلیت مناسبی در بررسی تأثیر متغیر غیرثابت هدایت هیدرولیکی در میزان تراوش نشان می‌دهد و با توجه به ماهیت تصادفی محیط متخلخل سد خاکی؛ روش واقع‌بینانه‌تری از جریان سیال در خاک نسبت به روش‌های سنتی ارائه می‌دهد.

سپاسگزاری

پژوهش حاضر با حمایت دانشگاه تبریز انجام شده است که مورد تقدیر قرار می‌گیرد.

تضاد منافع نویسندگان

نویسندگان این مقاله اعلام می‌دارند که هیچ‌گونه تضاد منافی در خصوص نگارش و انتشار مطالب و نتایج این پژوهش ندارند.

۷-۳- تحلیل آماری مدل‌های یادگیری ماشین

در برآزش داده‌ها به‌وسیله الگوریتم برنامه‌نویسی بیان ژن و ماشین بردار پشتیبان، داده‌های مشاهداتی همان نتایج حاصل از روش اجزای محدود است که با اجرای کد فرتن به‌دست آمده است. همچنین، داده پیش‌بینی شده نیز خروجی دبی نشت مؤثر (ESD) در مدل GEP و SVR است.

جهت مقایسه نتایج حاصل از تحلیل ماشین یادگیری، مقادیر خطای برآزش در جدول ۸ نشان داده شده است. در واقع این نتایج برای محاسبه دبی مؤثر نشت یا ESD است که از طریق دو روش رگرسیون ماشین بردار پشتیبان (SVR) برنامه‌نویسی بیان ژن (GEP) محاسبه شده‌اند. شاخص‌های برآزش مدل SVR نزدیکی بیشتری به مدل منتج از کد فرتن (اجزای محدود) نسبت به مدل GEP نشان می‌دهد و ریشه میانگین مربعات خطای (RMSE) پایین و ضریب همبستگی (R^2) بالاتری دارد. قابل‌ذکر است که در هر دو مدل میانگین مربعات خطا نیز تقریباً نزدیک به صفر و به‌عبارت دقیق، تا سه رقم اعشار صفر بوده است.

جدول ۸- شاخص‌های آماری برای مقایسه دقت مدل‌های یادگیری ماشین

Table 8- Statistical indicators to compare the accuracy of Machine Learning models		آماره
SVR (Overall)	GEP (Overall)	
0.966	0.914	ضریب همبستگی (R^2)
0.011	0.014	ریشه میانگین مربعات خطا (RMSE)
0.01	0.011	میانگین خطای مطلق (MAE)
0.000	0.000	میانگین مربعات خطا (MSE)

۴- نتیجه‌گیری

هدف اول پژوهش تحلیل احتمالاتی سد خاکی بود که به این منظور برنامه‌ای در زبان فرتن بر مبنای قانون داری و با روش اجزای محدود توسعه داده شد و سپس با الگوریتم شبیه‌سازی

دسترسی به داده‌ها

داده‌ها و نتایج استفاده شده در این پژوهش از طریق مکاتبه با نویسنده مسئول در اختیار قرار خواهد گرفت.

مشارکت نویسندگان

فرهود کلاته: راهنمایی، نرم‌افزار، روش‌شناسی، کنترل نتایج؛ **میلاذ خیری:** مفهوم‌سازی، انجام تحلیل‌های نرم‌افزاری/آماري، منابع، نگارش نسخه اولیه مقاله، بازبینی متن مقاله، نوشتن مقاله.

منابع

اخوان گیگلو، کرامت، خیری، میلاذ، احمدپری، هدیه، عباسی، سلیم، و کلاته، فرهود (۱۴۰۱). بررسی محتوای آب مجازی و شاخص‌های بهره‌وری فیزیکی و اقتصادی آب در محصولات زراعی (مطالعه موردی: شبکه آبیاری دشت مغان، استان اردبیل). مدل‌سازی و مدیریت آب و خاک، ۳(۳)، ۲۷۷-۲۹۵. doi: 10.22098/mmws.2023.11899.1186

امامی، سمیه، چوپان، یحیی، خیری قوجه بیگلو، میلاذ، حسام، موسی (۱۳۹۹). تخصیص بهینه و اقتصادی آب در شبکه آبیاری و زهکشی با استفاده از الگوریتم فراابتکاری ICA (مطالعه موردی: شبکه صوفی‌چای). مهندسی آبیاری و آب ایران، ۱۰(۳)، ۱۰۱-۱۱۰. doi: 10.22125/iwe.2020.107104

جعفریان، یاسر، و نصری، احسان. (۱۳۹۵). بررسی عدم قطعیت‌های موجود در روابط تجربی و پیش‌بینی احتمالاتی گسترش جانبی ناشی از روانگرایی. مهندسی عمران امیرکبیر، ۴۸(۳)، ۲۷۵-۲۹۰. doi: 10.22060/ceej.2016.674.290

چوپان، یحیی، امامی، سمیه، و خیری قوجه بیگلو، میلاذ (۱۳۹۹). ارزیابی الگوریتم‌های انتخابات، رقابت استعماری و روش شبکه

عصبی مصنوعی در بررسی روند افت تراز سطح ایستابی دشت رشتخوار. مهندسی عمران/امیرکبیر، ۵۲(۶)، ۱۳۳۳-۱۳۴۶. doi: 10.22060/ceej.2019.15344.5888

خیری قوجه بیگلو، میلاذ، و پیل پایه، علیرضا (۱۳۹۸). بهینه‌سازی طول و ارتفاع سرریز اوجی با تلفیق الگوریتم ژنتیک و مدل رگرسیون (مطالعه موردی سرریز سد بالارود). تحقیقات مهندسی سازه‌های آبیاری و زهکشی، ۲۰(۷۷)، ۳۹-۵۶. doi: 10.22092/idser.2019.124750.1368

معروفی‌نیا، ادریس، شرافتی، احمد، عبقری، هیراد، و حسن‌زاده، یوسف (۱۴۰۱). پیش‌بینی جریان رودخانه کورکورسر نوشهر با استفاده از مدل‌های هیبریدی هوش مصنوعی با رویکرد محاسبات نرم. مدل‌سازی و مدیریت آب و خاک، ۳(۱)، ۱۸۱-۱۹۹. doi: 10.22098/mmws.2022.11657.1150

کلاته، فرهود، و خیری قوجه بیگلو، میلاذ (۱۴۰۱). تحلیل احتمالاتی تراوش در سد خاکی با بهره‌گیری از روش مونت کارلو و با رویکردی بر نفوذپذیری مصالح و هندسه سد. تحقیقات مهندسی سازه‌های آبیاری و زهکشی، ۲۳(۸۶)، ۱۳۳-۱۶۲. doi: 10.22092/idser.2022.358681.1509

کلاته، فرهود، خیری قوجه بیگلو، میلاذ (۱۴۰۱). مدل‌سازی اجزای محدود نشت در سد خاکی در حالات همسانگرد و ناهمسانگردی با در نظر گرفتن تأثیر سطح آب پایین‌دست و مخزن. دومین کنفرانس بین‌المللی معماری، عمران، شهرسازی، محیط‌زیست و افق‌های هنر اسلامی در بیانیه گام دوم انقلاب، دانشگاه هنر اسلامی تبریز، تبریز.

مومنه، صادق (۱۴۰۱). مقایسه عملکرد مدل‌های هوش مصنوعی با مدل IHACRES در مدل‌سازی جریان حوضه آبریز رودخانه گاماسیاب. مدل‌سازی و مدیریت آب و خاک، ۲(۳)، ۱-۱۶. doi: 10.22098/mmws.2022.9972.1076

References

- Ahmed, S.A., Revil, A., Bolève, A., Steck, B., Vergnault, C., Courivaud, J.R., & Abbas, M. (2020). Determination of the permeability of seepage flow paths in dams from self-potential measurements. *Engineering Geology*, 268, 105514. doi: 10.1016/j.enggeo.2020.105514
- Akhavan Giglou, K., Kheiry, M., Ahmadpari, H., Abbasi, S., & Kalateh, F. (2023). Investigating virtual water content and physical and economic water productivity indicators in crops (Case study: Moghan irrigation network, Ardabil province). *Water and Soil Management and Modelling*, 3(3), 277-295. doi: 10.22098/mmws.2023.11899.1186. [In Persian]
- Bakr, A.A.M. (1976). Stochastic analysis of the effect of spatial variations of hydraulic conductivity on groundwater flow. New Mexico Institute of Mining and Technology.
- Beiranvand, B., & Rajaei, T. (2022). Application of artificial intelligence-based single and hybrid models in predicting seepage and pore water pressure of dams: A state-of-the-art review. *Advances in Engineering Software*, 173, 103268. doi:10.1016/j.advengsoft.2022.103268
- Calamak, M., Kentel, E., & Yanmaz, A.M. (2012). Seepage analysis through earth-fill dams having random fields. In 10th International Congress on Advances in Civil Engineering, Ankara, Turkey, Pp. 97.
- Cho, S.E. (2012). Probabilistic analysis of seepage that considers the spatial variability of permeability for an embankment on soil foundation. *Engineering Geology*, 133-134, 30-39. doi:10.1016/j.enggeo.2012.02.013
- Choopan, Y., Emami, S., & Kheiri Ghojje Bigloo, M. (2020). Evaluating election, imperialist competitive algorithms and artificial neural network method in investigating the groundwater level of Reshtkhar Plain. *Amirkabir Journal of Civil Engineering*, 52(6),

- 1333-1246. doi: 10.22060/ceej.2019.15344.5888. [In Persian]
- Croisard, N., Vasile, M., Kemble, S., & Radice, G. (2010). Preliminary space mission design under uncertainty. *Acta Astronautica*, 66(5), 654-664. doi: 10.1016/j.actaastro.2009.08.004.
- Dagan, G. (1976). Comment on 'Stochastic conceptual analysis of one-dimensional groundwater flow in nonuniform homogeneous media' by R. Allan Freeze. *Water Resources Research*, 12(3), 567-567.
- DeGroot, D.J., & Baecher, G.B. (1993). Estimating autocovariance of in-situ soil properties. *Journal of Geotechnical Engineering*, 119(1), 147-166. doi: 10.1061/(ASCE)0733-9410(1993)119:1(147)
- Emami, S., Choopan, Y., Kheiry goje biglo, M., & Hesam, M. (2020). Optimal and economic water allocation in irrigation and drainage network using ICA Algorithm (Case study: Sofi-Chay Network). *Irrigation and Water Engineering*, 10(3), doi: 10.22125/iwe.2020.107104. [In Persian]
- Fenton, G.A., & Griffiths, D.V. (1996). Statistics of free surface flow through stochastic Earth Dam. *Journal of Geotechnical Engineering*, 122(6), 427-436. doi:10.1061/(ASCE)0733-9410122:6(427).
- Fukumoto, Y., Yang, H., Hosoyamada, T., & Ohtsuka, S. (2021). 2-D coupled fluid-particle numerical analysis of seepage failure of saturated granular soils around an embedded sheet pile with no macroscopic assumptions. *Computers and Geotechnics*, 136, 104234. doi:10.1016/j.compgeo.2021.104234
- Gelhar, L.W. (1976). Effects of hydraulic conductivity variations on groundwater flows. <http://pascal-francis.inist.fr>.
- Giglou, K.A., Biglou, M.K.G., Mehrparvar, B., & Naghadeh, A. S. (2019). Investigating amount of leakage, sediment and durability in geosynthetic cover of pumping channel 3 at irrigation network of Moghan. *Revista Geoaraguaia*, 9(2). Recuperado de <https://periodicoscientificos.ufmt.br/ojs/index.php/geo/article/view/8979>
- Gui, S., Zhang, R., Turner, J.P., & Xue, X. (2000). Probabilistic slope stability analysis with stochastic soil hydraulic conductivity. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 126(1), 1-9. doi: 10.1061/(ASCE)1090-0241(2000)126:1(1).
- Helton, J.C. (1997). Uncertainty and sensitivity analysis in the presence of stochastic and subjective uncertainty. *Journal of Statistical Computation and Simulation*, 57(1-4), 3-76. doi:10.1080/00949659708811803.
- Helton, J.C., Johnson, J.D., & Sallaberry, C.J. (2011). Quantification of margins and uncertainties: example analyses from reactor safety and radioactive waste disposal involving the separation of aleatory and epistemic uncertainty. *Reliability Engineering & System Safety*, 96(9), 1014-1033. doi:10.1016/j.res.2011.02.012
- Helton, J.C., & Johnson, J.D. (2011). Quantification of margins and uncertainties: Alternative representations of epistemic uncertainty. *Reliability Engineering & System Safety*, 96(9), 1034-1052. doi:10.1016/j.res.2011.02.013
- Helton, J.C. (2011). Quantification of margins and uncertainties: Conceptual and computational basis. *Reliability Engineering & System Safety*, 96(9), 976-1013. doi:10.1016/j.res.2011.03.017
- Jafarian, Y., & Nasri, E. (2016). Evaluation of uncertainties in the existing empirical models and probabilistic prediction of liquefaction-induced lateral spreading. *Amirkabir Journal of Civil Engineering*, 48(3), 275-290. doi: 10.22060/ceej.2016.674
- Johari, A., Heydari, A., & Talebi, A. (2021). Prediction of discharge flow rate beneath sheet piles using scaled boundary finite element modeling database. *Scientia Iranica*, 28(2), 645-655. doi: 10.24200/SCI.2020.53281.3158
- Kalateh, F., & kheiry Ghoujeh-Biglou, M. (2022a). Probabilistic analysis of seepage in earthen dam using Monte Carlo method and with considering permeability of materials and dam geometry. *Irrigation and Drainage Structures Engineering Research*, 23(86), 133-162. doi: 10.22092/idser.2022.358681.1509. [In Persian]
- Kalateh, F., & Kheiry, M. (2022b). Finite elements modeling of the seepage through earth dam in isotropic and non-isotropic conditions and considering the of downstream and reservoir water level. 2nd International Conference on Architecture, Civil Engineering, Urban Development, Environment and Horizons of Islamic Art in the Second Step Statement of the RevolutionAt: Tabriz Islamic Art University, Tabriz, Iran. [In Persian]
- Kalateh, F., & Hosseinejad, F. (2020). Uncertainty assessment in hydro-mechanical-coupled analysis of saturated porous medium applying fuzzy finite element method. *Frontiers of Structural and Civil Engineering*, 14(2), 387-410. doi:10.1007/s11709-019-0601-z
- Kalateh, F., Hosseinejad, F., & Kheiry, M., (2022). Uncertainty quantification in the analysis of liquefied soil response through Fuzzy Finite Element method. *Acta Geodynamica et Geomaterialia*, 19(3), 177-199. doi: 10.13168/AGG.2022.0007.
- Kheiry Ghojeh-biglou, M., & Pilpayeh, A. (2019). Effect of geometric specifications of ogee spillway on the volume variation of concrete

- consumption using genetic algorithm. *Revista Ingeniería UC*, 26(2), 145-153.
- Kheiry Ghoghjeh Biglou, M., & Pilpayeh, A. (2020). Optimization of height and length of ogee-crested spillway by composing genetic algorithm and regression models (Case Study: Spillway of Balarood Dam). *Irrigation and Drainage Structures Engineering Research*, 20(77), 39-56. doi: 10.22092/idser.2019.124750.1368. [In Persian]
- Kouhpeyma, A., Kilanehei, F., Hassanlourad, M., & Ziaie-Moayed, R. (2022). Numerical and experimental modelling of seepage in homogeneous earth dam with combined drain. *ISH Journal of Hydraulic Engineering*, 28(3), 292-302. doi:10.1080/09715010.2021.1891469
- Liu, K., Vardon, P., & Hicks, M. (2019). Probabilistic analysis of seepage for internal stability of earth embankments. *Environmental Geotechnics*, 1-46. doi:10.1680/jenge.17.00040
- Lumb, P. (1966). The variability of natural soils. *Canadian geotechnical journal*, 3(2), 74-97. doi: 10.1139/t66-009
- Mazaheri, A., Komasi, M., Soraghi, M., & Nasiri, M. (2020). Studying the effect of geometric characteristics of dam on downstream saturation in earth dam. *Iranian Journal of Soil and Water Research*, 51(9), 2235-2246. doi: 10.22059/ijswr.2020.299195.668535
- Momeneh, S. (2022). Performance comparison of artificial intelligence models with IHACRES model in streamflow modeling of the Gamasiab River catchment. *Water and Soil Management and Modelling*, 2(3), 1-16. doi: 10.22098/mmws.2022.9972.1076. [In Persian]
- Mouyeaux, A., Carvajal, C., Bressolette, P., Peyras, L., Breul, P., & Bacconnet, C. (2019). Probabilistic analysis of pore water pressures of an earth dam using a random finite element approach based on field data. *Engineering Geology*, 259, 105190. doi: 10.1016/j.enggeo.2019.105190
- Parsaie, A., Haghiabi, A.H., Latif, S.D., & Tripathi, R.P. (2021). Predictive modelling of piezometric head and seepage discharge in earth dam using soft computational models. *Environmental Science and Pollution Research*, 28(43), 60842-60856. doi: 10.1007/s11356-021-15029-4
- Pasha, E., Mostafaei, H., Khalaj, M., & Khalaj, F. (2013). Calculate the uncertainty interval based on entropy and Dempster Shafer theory of evidence. *International Journal of Industrial Engineering & Production Management*, 24(2), 215-223. <http://ijiepm.iust.ac.ir/article-1-406-fa.html>.
- Peck, R. B. (1967). Stability of natural slopes. *Journal of the Soil Mechanics and Foundations Division*, 93(4), 403-417. doi: 10.1061/JSFEAQ.0000998
- Silva, A.V., Neto, S.A.D. and de Sousa Filho, F.D.A. (2016). A Simplified method for risk assessment in slope stability analysis of Earth Dams using fuzzy numbers. *Electronic Journal of Geotechnical Engineering*, 21(10), 3607-3624.
- Smith, L., & Freeze, R.A. (1979a). Stochastic analysis of steady state groundwater flow in a bounded domain: 1. one-dimensional simulations. *Water Resources Research*, 15(3), 521-528. doi: 10.1029/WR015i003p00521
- Smith, L., & Freeze, R.A. (1979b). Stochastic analysis of steady state groundwater flow in a bounded domain: 2. two-dimensional simulations. *Water Resources Research*, 15(6), 1543-1559. doi: 10.1029/WR015i006p01543
- Merufinia, E., Sharafati, A., Abghari, H., & Hassanzadeh, Y. (2022). The streamflow prediction of Kurkursar river using hybrid artificial intelligence models with soft computing approach. *Water and Soil Management and Modelling*, 3(1), 181-199. doi: 10.22098/mmws.2022.11657.1150. [In Persian]
- Smith, L., & Griffiths, D. (2004). Programming the finite element method. John Wiley & Sons.
- Tan, X., Wang, X., Khoshnevisan, S., Hou, X., & Zha, F. (2017). Seepage analysis of earth dams considering spatial variability of hydraulic parameters. *Engineering Geology*, 228, 260-269. doi: 10.1016/j.enggeo.2017.08.018
- Vanmarcke, E. H. (1977). Probabilistic modeling of soil profiles. *Journal of the Geotechnical Engineering Division*, 103(11), 1227-1246. doi:10.1061/AJGEB6.0000517
- Yang, D., Xu, C., & Wang, H. (2022). Analysis of the causes of abnormal seepage in Hualiangting reservoir. In *Advances in Measurement Technology, Disaster Prevention and Mitigation* (pp. 575-581). CRC Press.
- Zhang, W., Dai, B., Liu, Z., & Zhou, C. (2017). Unconfined seepage analysis using moving kriging mesh-free method with Monte Carlo Integration. *Transport in Porous Media*, 116(1), 163-180. doi:10.1007/s11242-016-0769-9