

Sensitivity analysis and discharge coefficient estimation in semicircular weirs using machine learning methods

Amal Savaedi¹ , Mohammadreza Zayeri^{2*} , Mehdi Ghomeshi³ , and Mehdi Daryaei⁴ 

1. Department of Hydraulic Structures, Faculty of Water Engineering and Environmental Science, Shahid Chamran University of Ahvaz, Ahvaz, Iran. E-mail: amalsavaedi98@gmail.com

2. Corresponding author, Department of Hydraulic Structures, Faculty of Water Engineering and Environmental Science, Shahid Chamran University of Ahvaz, Ahvaz, Iran. E-mail: m.zayeri@scu.ac.ir

3. Department of Hydraulic Structures, Faculty of Water Engineering and Environmental Science, Shahid Chamran University of Ahvaz, Ahvaz, Iran. E-mail: ghomeshi@scu.ac.ir

4. Department of Hydraulic Structures, Faculty of Water Engineering and Environmental Science, Shahid Chamran University of Ahvaz, Ahvaz, Iran. E-mail: m.daryaei@scu.ac.ir

Article Info.

Article type:
Research Article

Article history:
Received 05 June 2025
Received in revised form 09
October 2025
Accepted 16 December 2025
Available online 22 June 2026

Keywords:
discharge coefficient,
extreme learning machine,
XGBoost,
sensitivity analysis,
Harmonic weir.

ABSTRACT

Objective: This study aims to develop and evaluate two machine learning models, namely Extreme Learning Machine (ELM) and eXtreme Gradient Boosting (XGBoost), incorporating Bayesian Optimization and cross-validation techniques, for the prediction of the discharge coefficient (C_d) of semicircular side weirs.

Method: The modeling process is based on a dataset comprising 133 experimental observations sourced from two independent studies, encompassing both geometric and hydraulic parameters. Bayesian Optimization was implemented using five-fold cross-validation on the training set. For each parameter combination, the root mean square error (RMSE) was computed, and once the objective function (RMSE) reached a satisfactory threshold, the corresponding parameter set was selected as the final model structure. The optimized model was subsequently validated using the test dataset, and its predictive performance was compared against baseline models.

Results: The results indicated that the XGBoost model achieved higher predictive accuracy with a coefficient of determination (R^2) of 0.99 for the training set and 0.92 for the test set, outperforming the ELM model, which yielded R^2 values of 0.91 and 0.879 for the respective datasets. Sensitivity analysis using Sobol, Morris, Entropy-based, and SHAP methods consistently identified the H/P ratio (hydraulic head to weir height) as the most influential input parameter in predicting C_d . Specifically, Sobol analysis revealed that nearly the entire variance in the model output could be attributed to this single parameter, with negligible interaction effects from other variables.

Conclusions: All sensitivity analysis techniques confirmed the robustness and reliability of the developed models. The integration of machine learning algorithms with Bayesian Optimization proves to be an effective and powerful framework for flow modeling in hydraulic systems.

Cite this article: Savaedi, A., Zayeri, M.R., Ghomeshi, M., & Daryaei, M. (2026). Sensitivity Analysis and Discharge Coefficient Estimation in Semicircular Weirs Using Machine Learning Methods. *Advanced Technologies in Water Efficiency*, 6(2), 1-23. <https://doi.org/10.22126/atwe.2025.12271.1170>



© The Author(s)
<https://doi.org/10.22126/atwe.2025.12271.1170>

Publisher: Razi University.

Introduction

Dams, as critical hydraulic structures, consist of key components including the dam body, drainage systems, and most notably, spillways, which serve as primary outlets for flood discharge. When the capacity to release floodwaters is limited, the choice of spillway type becomes essential to optimize both discharge efficiency and construction costs. Among the various options, labyrinth spillways—with non-linear crest geometries—have proven to be highly effective in enhancing discharge capacity while managing upstream water levels during flood events. By significantly increasing the effective crest length over a fixed width, these geometries, such as triangular, trapezoidal, semicircular, and polygonal plans, outperform traditional linear (rectangular) spillways.

Recent research efforts have focused on understanding the influence of hydraulic and geometric parameters on discharge coefficient (C_d) and velocity distribution in these structures. Numerous machine learning approaches have been employed to predict C_d , with Support Vector Machines (SVM), Artificial Neural Networks (ANN), and Extreme Learning Machines (ELM) demonstrating promising accuracy and adaptability. In particular, studies have shown the superior predictive performance of hybrid models such as SVR-ISADE, GASVM, and ANFIS-FFA compared to classical regression methods. The semicircular labyrinth weir (SCLW) is of particular interest due to its high energy dissipation and superior discharge capabilities—achieving up to 4.5 times the efficiency of linear weirs. Sensitivity analyses across multiple studies have highlighted the hydraulic head-to-weir height ratio (H/P) as the most influential parameter affecting C_d . Despite the complex physical behavior of SCLWs, data-driven and AI-based models have shown remarkable precision in C_d estimation.

This study develops novel predictive models for the discharge coefficient of harmonic semicircular labyrinth weirs using XGBoost and Extreme Learning Machines (ELM). It further quantifies the effect of non-dimensional variables on C_d and aims to bridge existing research gaps by integrating and analyzing experimental data from two previous investigations.

Method

In this study, a comprehensive modeling framework is developed to predict the discharge coefficient (C_d) of semicircular labyrinth weirs using advanced machine learning techniques and sensitivity analysis methods. The first stage involves dimensional analysis and data compilation. The discharge coefficient is calculated from physical experiments using dimensional parameters such as the number of weir cycles (N), radius of curvature (R), crest height (P), and channel width (B). The effects of fluid density, viscosity, and surface tension are deemed negligible due to turbulent flow and sufficient hydraulic head, following guidelines by Rao & Shakla (1971). Using dimensional analysis, the governing relationship is simplified to a functional form involving non-dimensional parameters: H/P , L/P , B/P , R/P , and N . A dataset of 233 experimental results was compiled from prior studies (Namazi & Mozaffari, 2023; Yildiz et al., 2024), covering multiple configurations of weir height and the number of cycles. 75% of the data was used for training and 25% for testing the machine learning models. Descriptive statistics and histograms of input variables confirm weak linear correlations with C_d , justifying the use of nonlinear models such as Extreme Learning

Machine (ELM) and XGBoost. The ELM model, comprising an input layer, hidden neurons with random weights, and a single output node for C_d , was trained with Bayesian Optimization to identify optimal structure (number of neurons and activation function). Conversely, XGBoost builds an ensemble of regression trees sequentially, where each tree reduces the residuals of the previous one. The model's objective function incorporates both prediction loss and a regularization term to avoid overfitting. For feature importance assessment, four global sensitivity analysis techniques were implemented. The Morris method computes mean absolute elementary effects to detect influential variables. Sobol's method decomposes output variance into first-order and total sensitivity indices. Entropy-based analysis calculates mutual information to evaluate nonlinear dependencies. Lastly, the SHAP method applies cooperative game theory to quantify each input's contribution to model prediction.

Results

Results consistently identify HT/P (relative total head to crest height) as the most influential parameter across all sensitivity methods. Sobol Indices indicate that nearly all output variance is explained by HT/P alone. The entropy method assigns HT/P a normalized importance of 0.87, and the Morris μ^* score further supports its dominant role. This multi-method framework demonstrates the potential of hybrid machine learning and dimensional analysis to model complex hydraulic behaviors in labyrinth weirs, offering reliable predictive tools for engineering design.

Conclusions

Accurate prediction of the discharge coefficient (C_d) in semicircular harmonic weirs is crucial for the optimal design and performance of hydraulic systems. Due to the complex relationship between C_d and its influencing parameters, empirical equations face limitations. In this study, two hybrid machine learning models—ELM and XGBoost—were developed and optimized using Bayesian Optimization to model C_d . Feature importance analysis was conducted using four sensitivity methods to determine the relative influence of input variables. Among the approaches, combining XGBoost with SHAP-based sampling demonstrated the most stable and precise C_d predictions, offering narrower uncertainty bands and greater resistance to noise. However, despite XGBoost's advanced structure and tunable parameters, ELM outperformed it in terms of accuracy. The Taylor diagram showed greater distance of XGBoost from the reference point compared to ELM in both training and testing sets, highlighting its lower prediction precision. These results can guide model selection and sensitivity analysis in future uncertainty-based studies.

Author Contributions

All authors contributed equally to the conceptualization of the article and writing of the original and subsequent drafts.

Data Availability Statement

Data available on request from the authors.

Acknowledgements

The authors would like to thank all participants in the present study.

Ethical Considerations

The authors avoided data fabrication, falsification, plagiarism, and misconduct.

Funding

The authors are grateful for the financial support of the Research Council of Shahid Chamran University of Ahvaz (GN: SCU.WH1403.43525).

Conflict of Interest

The authors declare no conflict of interest.



آنالیز حساسیت و برآورد ضریب دبی در سرریزهای نیم‌دایره با استفاده از روش‌های یادگیری ماشین

امل سواعدی^۱، محمدرضا زایری^۲، مهدی دریایی^۳، مهدی قمشی^۴

۱. گروه سازه های آبی، دانشکده مهندسی آب و محیط زیست، دانشگاه شهید چمران اهواز، اهواز، ایران، رایانامه: amalsavaedi98@gmail.com

۲. لیستده مسئول، گروه سازه های آبی، دانشکده مهندسی آب و محیط زیست، دانشگاه شهید چمران اهواز، اهواز، ایران، رایانامه: m.zayri@scu.ac.ir

۳. گروه سازه های آبی، دانشکده مهندسی آب و محیط زیست، دانشگاه شهید چمران اهواز، اهواز، ایران، رایانامه: ghomeshi@scu.ac.ir

۴. گروه سازه های آبی، دانشکده مهندسی آب و محیط زیست، دانشگاه شهید چمران اهواز، اهواز، ایران، رایانامه: m.daryaei@scu.ac.ir

درباره مقاله	چکیده
نوع مقاله: مقاله پژوهشی	هدف: در این پژوهش، دو مدل یادگیری ماشین شامل ELM و XGBoost با رویکرد بهینه‌سازی نیزی و اعتبارسنجی با هدف پیش‌بینی ضریب دبی سرریزهای نیم‌دایره‌ای توسعه داده شدند.
تاریخ دریافت: ۱۴۰۴/۰۳/۱۵ تاریخ بازنگری: ۱۴۰۴/۰۷/۱۷ تاریخ پذیرش: ۱۴۰۴/۰۹/۲۵ تاریخ انتشار: ۱۴۰۵/۰۴/۰۱	روش پژوهش: در پژوهش حاضر، با اتکا به مجموعه‌داده‌های مشکل از ۲۳۳ داده آزمایشگاهی از دو منبع پژوهشی، شامل پارامترهای هندسی تحت سه ارتفاع متفاوت برای سرریز (معادل ۱۵، ۲۰، ۳۰ و ۴۰ سانتی‌متر) و با چهار تعداد مختلف از سیکل هارمونیک و همچنین متغیرهای هیدرولیکی، به مدل‌سازی ضریب دبی پرداخته شده است. شش پارامتر کلیدی در مدل XGBoost و دو پارامتر کلیدی در مدل ELM با استفاده از روش نیزی بهینه‌سازی شده است.
کلیدواژه‌ها: ضریب دبی، مدل یادگیری افراطی (ELM)، الگوریتم XGBoost، تحلیل حساسیت، سرریز هارمونیک	یافته‌ها: نتایج نشان داد که مدل XGBoost با ضریب تعیین (R^2) برابر با ۰/۹۹ در آموزش و ۰/۹۲ در آزمون عملکرد دقیق‌تری نسبت به مدل ELM با R^2 معادل ۰/۹۱ و ۰/۸۷۹ در مجموعه‌های مشابه داشته است. همچنین تحلیل حساسیت یا بهره‌گیری از روش‌های سوپل، مورس، انتروپی و SHAP، پارامتر HT/P یعنی نسبت هد هیدرولیکی به ارتفاع سرریز را به‌عنوان مؤثرترین ورودی در پیش‌بینی ضریب دبی شناسایی کرد. همچنین تمام واریانس پاسخ مدل در روش آنالیز حساسیت سوپل را می‌توان تنها با تغییر در این پارامتر توجیه کرد و تأثیر متقابل آن با سایر پارامترها بسیار ناچیز است.
	نتیجه‌گیری: نتایج حاصل از تعامی روش‌های تحلیل حساسیت بر پایداری و دقت مدل‌های توسعه‌یافته تأکید داشته و نشان می‌دهند که رویکرد ترکیبی یادگیری ماشین و بهینه‌سازی نیزی می‌تواند ابزاری توانمند برای مدل‌سازی جریان در پیش‌بینی ضریب دبی سرریزهای نیم‌دایره‌ای محسوب شود.

استناد: سواعدی، امل؛ زایری، محمدرضا؛ قمشی، مهدی؛ و دریایی، مهدی. (۱۴۰۵). آنالیز حساسیت و برآورد ضریب دبی در سرریزهای نیم‌دایره با استفاده از

روش‌های یادگیری ماشین. فناوری‌های پیشرفته در بهره‌وری آب، ۶ (۴)، ۱-۲۳.

<http://doi.org/10.22126/atwe.2025.12271.1170>

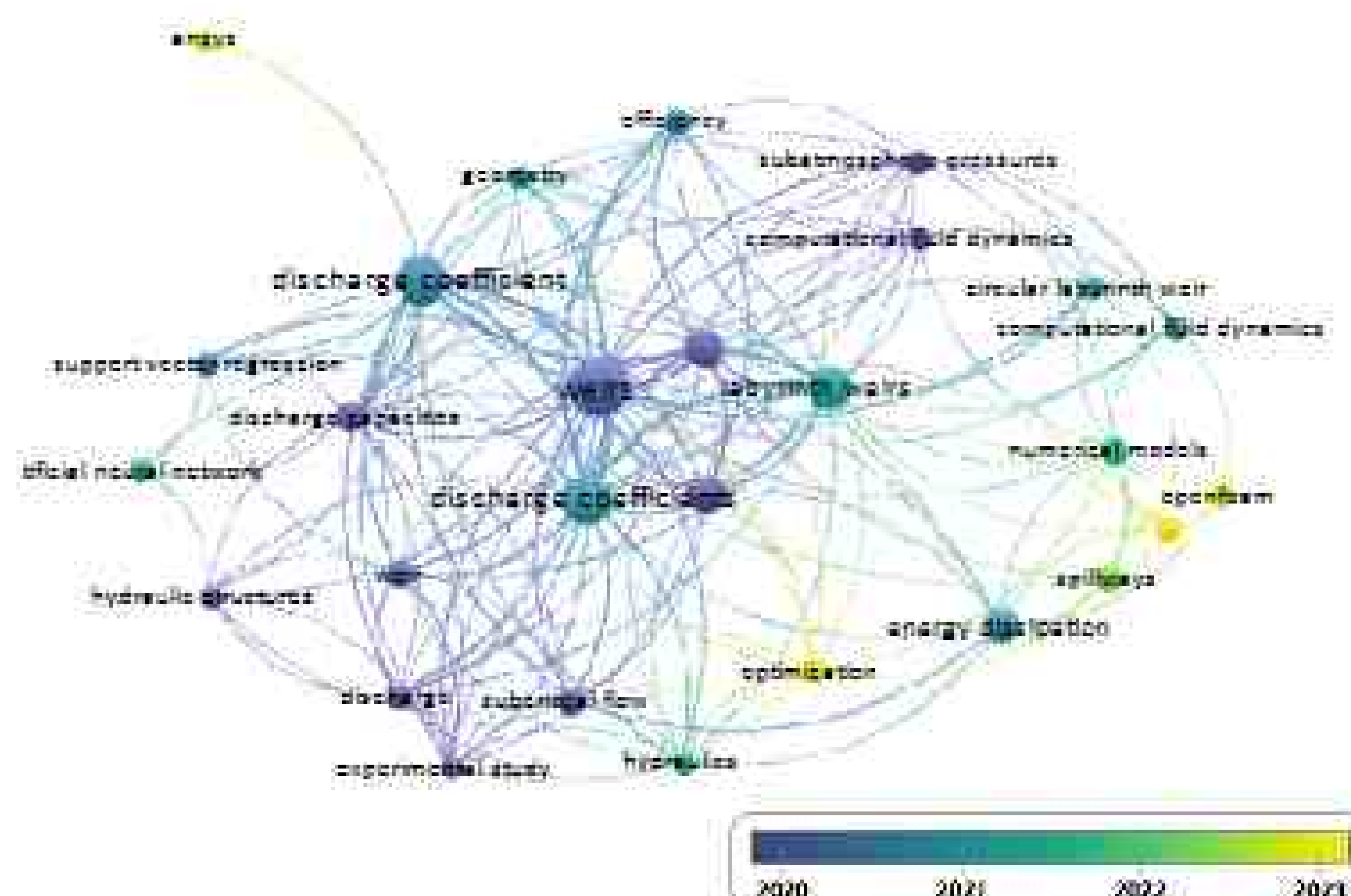


مقدمه

سدها از ارکان اصلی چون بدنه سد، سازه تخلیه‌کننده سیلاب یا همان سرریز، و سیستم‌های زهکشی تشکیل یافته‌اند. چنانچه توان رهاسازی سیلاب از مخزن سد محدود باشد، انتخاب نوع سرریز، در واقع، تلاشی است در راستای بهینه‌سازی فرآیندی که در آن، دستیابی به بیشترین ظرفیت عبور جریان از سرریز، توأم با حداقل هزینه‌های اجرایی، مد نظر قرار می‌گیرد. در این میان، طول و هندسه تاج سرریز دو پارامتر کلیدی، نقش تعیین‌کننده‌ای در میزان دبی قابل عبور از آن ایفا می‌کنند. برای مواجهه با این چالش و به‌منظور ارتقاء ظرفیت تخلیه، بهره‌گیری از سرریزهای با پلان غیرمستقیم، موسوم به سرریزهای کنگره‌ای، به‌غنوان یک راهکار مؤثر مطرح می‌گردد. این نوع خاص از سرریزها، تنها توان عبور جریان را به طرز چشمگیری بهبود می‌بخشند، بلکه در مهار افزایش سطح آب در مخزن به هنگام وقوع سیلاب نیز کارآمد ظاهر می‌شوند. افزون بر این، چنین ساختارهایی در نقش مستهلک‌کننده‌های کارآمد انرژی جنبشی جریان، بهبود فرایند هوادهی آب و به‌طور کلی، سازه‌هایی برای افت انرژی کاربردهای قابل توجهی می‌یابند (قادری و همکاران^۱، ۲۰۲۴؛ حسین و جلیل^۲، ۲۰۲۴؛ اکینگیولاری^۳، ۲۰۲۴). سرریزهای کنگره‌ای در اشکال و طرح‌های گوناگونی، نظیر پلان‌های مثلثی، دوزنقه‌ای، دایره‌ای و یا چندضلعی، موجود می‌باشند. ویژگی برجسته و امتیاز کلیدی این نوع از سرریزها، در مقایسه با سرریزهای خطی (مستطیلی)، در توانایی آن‌ها برای افزایش قابل ملاحظه طول مؤثر مسیر جریان بر روی عرض ثابت، می‌باشد. پژوهشگران، به طور پیوسته، در پی یافتن و شناسایی طرحی بهینه برای این سازه‌ها هستند؛ طرحی که در عین تضمین عملکردی در سطح بالا، بتواند هزینه‌های اجرایی را نیز به نحو محسوسی کاهش دهد.

ادبیات موضوع و پیشینه پژوهش

برای بررسی بیشتر در این حوزه، شکل (۱) به نمایش و تحلیل کلیدواژه‌هایی می‌پردازد که پژوهشگران پیشین در مطالعات مرتبط با ضریب دبی جریان در سرریزها، بر اساس داده‌های پایگاه استنادی اسکوپوس، بیشترین کاربرد را برای آن‌ها در نظر دارند. چنانکه از این بررسی استنباط می‌شود، پیوند روش‌های میان تکنیک‌های بهینه‌سازی و روش‌های دینامیک سیالات محاسباتی (CFD) با طراحی و تحلیل سرریزهای کنگره‌ای، خود گواهی بر تلاش‌های مستمر جهت بهبود و ارتقاء عملکرد این سازه‌ها در طول پنج سال اخیر است.



شکل ۱. واژگان کلیدی در تحقیقات گزارش شده در مدل‌سازی هیدرولیکی سرریزهای کنگره‌ای

^۱ Ghaderi et al

^۲ Hussein & Jalil

^۳ Ikinciogullari

تلاش‌های پژوهشی قابل‌توجهی در جهت چگونگی تأثیرگذاری پارامترهای هیدرولیکی و مشخصه‌های هندسی بر مؤلفه‌های کلیدی جریان، نظیر ضریب دبی و توزیع سرعت، در این دسته از سازه‌های هیدرولیکی انجام گردیده است (بوریسوا و بلیکوف^۱، ۲۰۲۳؛ سلیمانی^۲، ۲۰۲۲؛ زارع^۳، ۲۰۲۳). برقی و پروانه^۴ (۲۰۱۱) خاطرنشان کردند که عملکرد سرریز جانبی مایل، به لحاظ کارایی، برتری چشمگیری معادل ۲.۲۳ برابر نسبت به سرریز جانبی معمولی به نمایش می‌گذارد. کیسی و همکاران^۵ (۲۰۱۲) توانمندی شبکه‌های عصبی با توابع پایه شعاعی (RBNN) و شبکه‌های عصبی رگرسیون عمومی (GRNN) در پیش‌بینی دبی عبوری از سرریزهای جانبی با مقطع مثلثی، مورد ارزیابی قرار گرفت. نتایج حاصله، گواهی بر این است که این الگوهای محاسباتی، در بازنمایی و شناسایی روابط غیرخطی میان مشخصه‌های هندسی سازه و میزان جریان عبوری، از قابلیت و اثربخشی خوبی برخوردارند. سیمسک و همکاران^۶ (۲۰۲۳)، به‌منظور پیش‌بینی ضریب دبی (Cd) در سرریزهایی با مقطع دوزنقه‌ای، از شبکه‌های عصبی مصنوعی (ANN) مورد استفاده قرار دادند. یافته‌های پژوهش ایشان آشکار ساخت که پارامتری بعد فرود، نقشی تعیین‌کننده در بهبود چشمگیر عملکرد مدل‌ها جهت برآورد مقادیر Cd ایفا می‌کند؛ به‌گونه‌ای که می‌توان ادعا کرد که رویکرد مبتنی بر شبکه‌های عصبی مصنوعی، در مقایسه با سایر رویکردهای مرسوم، در تعیین ضریب دبی، از کارایی و دقت بهتری برخوردار است. بیلهان و همکاران^۷ (۲۰۱۸) به مقایسه و تطبیق داده‌های آزمایشگاهی به‌دست آمده از مطالعه بر روی سرریزهای نیم‌دایره‌ای با نتایج حاصل از شبیه‌سازی‌های عددی که با بهره‌گیری از نرم‌افزار Flow-3D انجام پذیرفته بود، مقایسه کردند. مدل‌های عددی توسعه‌یافته توسط ایشان، انطباق قابل ملاحظه‌ای، تا سطح ۹۶ درصد، با داده‌های تجربی به نمایش گذاشتند؛ که نشان از، کارآمدی رویکردهای مدل‌سازی عددی را در تخمین دقیق دبی عبوری از سرریز می‌باشد. افزون بر این، یافته‌های پژوهشان نشان از آن دارد که عملکرد ضریب جریان، در تابعیت از نسبت هد هیدرولیکی کل به ارتفاع سرریز (Ht/P)، برای سرریزهای با مقطع نیم‌دایره‌ای، از الگوی مشابهی با سرریزهای دوزنقه‌ای که دارای زوایای دیواره جانبی فراتر از ۳۵ درجه هستند، پیروی می‌کند. سنگ سفیدی و همکاران^۸ (۲۰۱۸)، ضمن انجام یک بررسی آزمایشگاهی بر سرریزهای کنگره‌ای با هندسه دایره‌ای شکل دندانه دار، به این یافته دست یافتند که توانایی تخلیه دبی در این نوع از سرریزها، در مقایسه با سازه‌های خطی، افزایشی معادل چهار و نیم برابر را به نمایش می‌گذارد. دووتا و همکاران^۹ (۲۰۲۰)، به‌منظور ارزیابی توانمندی مدل‌های رگرسیون خطی چندگانه (MLR)، ماشین‌های بردار پشتیبان (SVM) و شبکه‌های عصبی مصنوعی (ANN) در پیش‌بینی دبی برای گونه‌های مختلف سرریز (اعم از سرریزهای استاندارد و نیم‌دایره‌ای)، پژوهشی را به انجام رساندند. با استناد به معیارهای آماری چون R^2 ، APE و CE، به این جمع‌بندی دست یافتند که الگوریتم ماشین بردار پشتیبان (SVM)، در مقایسه با سایر رویکردها، عملکرد بهتری از خود نشان داده است. امری که گواهی بر قابلیت برتر آن در شناسایی و مدل‌سازی روابط پیچیده میان مؤلفه‌های جریان و میزان دبی عبوری، در خصوص این اشکال خاص از سازه‌های سرریز، است. شفیعی و همکاران^{۱۰} (۲۰۲۰)، با اتکا به یک رویکرد مبتنی بر هوش مصنوعی (AI)، به برآورد ضریب دبی در تاج سرریزها پرداختند. یافته‌های پژوهش ایشان نشانگر آن بود که مدل ORELM، حتی با وجود چالش‌هایی

¹ Borisova & Belikov

² Suleimany et al

³ Zare et al

⁴ Borghei & Parvaneh

⁵ Kisi et al

⁶ Simsek et al

⁷ Bilhan et al

⁸ Sangsefidi et al

⁹ Dutta et al

¹⁰ Shafiei et al

نظیر عدم وجود یک رابطه تجلیلی صریح، در شبیه‌سازی ضریب دبی، عملکردی مطلوب و قابل قبول از خود به نمایش گذاشته است. شفیعی و همکاران (۲۰۲۰) ایشان، با تلفیق سیستم استنتاج عصبی-فازی تطبیقی (ANFIS) و الگوریتم جلبک آتشین (FFA)، به برآورد ضریب دبی در تاج سرریزهای مثلثی پرداختند. یافته‌های این پژوهش، مبین آن بود که مدل ترکیبی ANFIS-FFA در عرصه پیش‌بینی ضریب دبی برای سرریزهای مثلثی شکل، عملکردی برتر و کارایی بهتری را در مقایسه با مدل استاندارد ANFIS به نمایش می‌گذارد. بنکداری و همکاران^۱ (۲۰۲۰)، با بهره‌گیری از تکنیک برنامه‌نویسی بیانی ژن (GEP)، به برآورد ضریب دبی در تاج سرریزهای مثلثی پرداختند؛ نتایج حاصل از این پژوهش، گواهی بر آن است که روش GEP در پیش‌بینی ضریب جریان برای این نوع از سرریزها، به نتایجی مطلوب انجام گردیده است. امامی و همکاران^۲ (۲۰۲۱)، در راستای برآورد ضریب تخلیه در تاج سرریزهایی با هندسه W-شکل، به توسعه یک الگوریتم تکامل تفاضلی خودتطبیق بهبودیافته (ISADE) در هم‌افزایی با رگرسیون بردار پشتیبان (SVR) که از آن با عنوان SVR_ISADE یاد می‌شود، پرداخته و نتایج حاصل، گواهی بر عملکرد بهتری رویکرد SVR_ISADE در پیش‌بینی ضریب دبی برای این دسته از سرریزها بود؛ چنانکه دستیابی به مقادیر R^2 برابر با ۰/۹۸۲، MAPE معادل ۰/۶۱۲، RMSE برابر با ۰/۰۰۶ و δ معادل ۰/۸۴۳ که نشان از عملکرد برتر این مدل است. صفررضوی زاده و همکاران^۳ (۲۰۲۱)، در یک بررسی آزمایشگاهی، به بررسی تأثیر پارامترهایی چون نسبت هد هیدرولیکی در بالادست به ارتفاع سازه (H_T/P)، نسبت طول سرریز به ارتفاع (L/P)، نسبت شعاع انحنا به ارتفاع (R/P) و تعداد سیکل‌های سرریز (N) بر ضریب دبی در سرریزهای کنگره‌ای با پلان تیم‌دایره و سینوسی پرداختند. نتایج ایشان نشان می‌دهد که در بازه نسبت‌های (H_T/P < ۰.۳۵)، ضریب دبی برای هر دو نوع سرریز کنگره‌ای ابتدا روندی صعودی و سپس نزولی را تجربه می‌کند. علاوه بر این، مشخص گردید که ظرفیت عبور جریان در این سرریزهای کنگره‌ای، در مقایسه با سرریزهای خطی، به میزان ۳۳ درصد بهتری دارد. سواعدی و همکاران^۴ (۲۰۲۴)، با استفاده از سری داده آزمایشگاهی، به بررسی تأثیر پارامترهای هندسی و هیدرولیکی بر ضریب دبی سرریز کنگره‌ای نیم‌دایره‌ای پرداختند. آن‌ها با به‌کارگیری سه مدل یادگیری ماشین شامل رگرسیون بردار پشتیبان (SVR)، مدل MARS و مدل جنگل تصادفی (RF)، مدل MARS را به‌عنوان دقیق‌ترین روش در پیش‌بینی ضریب دبی معرفی کردند و عمق نسبی (H_T/P) را مؤثرترین پارامتر دانستند. سلیمانی و همکاران^۵ (۲۰۲۲)، با به‌کارگیری روش‌های رگرسیون خطی چندگانه (MLR) و رگرسیون غیرخطی، در پی تدوین یک معادله تجربی برای تخمین دبی سرریزهای با مقطع نیم‌دایره‌ای برآمدند. مدل‌های ارائه شده توسط ایشان، با دستیابی به ضرایب تعیین (R^2) به مقادیر ۰/۸۴۹۸ و ۰/۸۵۸۴، انطباق قابل قبولی را با داده‌های آزمایشگاهی به اثبات رساندند. حق‌بین و همکاران^۶ (۲۰۱۸)، با ارائه یک رویکرد داده‌محور، به تخمین ضریب دبی (Cd) در سرریزهای پله‌ای پرداختند. مدل بهینه‌سازی شده توسط ایشان، بهبود چشمگیر ۸۶/۱۳ درصدی در شاخص عملکرد را به ارمغان آورد؛ این دستاورد، تأیید بر پتانسیل قابل توجه روش‌های مبتنی بر داده در افزایش دقت پیش‌بینی‌های مربوط به دبی است. لی و همکاران^۷ (۲۰۲۴)، با بهره‌گیری از ماشین‌های بردار پشتیبان (SVM) در تلفیق با سه الگوریتم بهینه‌سازی، به توسعه مدلی جهت پیش‌بینی ضریب دبی (Cd) در سرریزهای کناری با مقطع تیم‌دایره (SCSWs) پرداختند. یافته‌های ایشان تأکید بر آن است که رویکرد مبتنی بر ماشین بردار پشتیبان و الگوریتم ژنتیک (GASVM)، از دقت بهتری در پیش‌بینی و قابلیت

^۱ Bonakdari et al^۲ Emami et al^۳ Safarraravi et al^۴ Savaedi et al^۵ Suleimany et al^۶ Suleimany et al^۷ Li et al

تعمیم‌پذیری مطلوبی برخوردار است؛ به گونه‌ای که میزان خطای متوسط و بیشینه خطا به ترتیب بالغ بر ۰/۰۸ و ۰/۴۷ درصد گردید؛ این مقادیر در مقایسه با الگوهای تجربی رایج، به ترتیب کاهشی در حدود ۷۲/۹۵ و ۸۶/۶۰ درصد را به نمایش می‌گذارند. نظر به ماهیت فیزیکی پیچیده سازه‌های سرریز کنگره‌ای با پلان نیم‌دایره، استفاده از الگوهای مبتنی بر هوش مصنوعی که از دقت و پایداری بالایی در جهت تخمین ضریب دبی، با بررسی متون علمی برخوردار است می‌تواند الگویی دقیق و جامع برای پیش‌بینی ضریب تخلیه (Cd) در این گونه خاص از سازه‌ها توسعه دهد. از این‌رو، پژوهش حاضر به ارائه مدل‌هایی برای پیش‌بینی ضریب دبی (Cd) سرریزهای با پلان نیم‌دایره هارمونیک، با بهره‌گیری از شیوه‌هایی نظیر الگوریتم XGBoost و الگوی ماشین یادگیری افراطی^۱ (ELM)، می‌پردازد. افزون بر این، در این تحقیق، اثرگذاری متغیرهای بی‌بعد بر ضریب دبی به صورت کمی با استفاده از روش‌های آنالیز حساسیت سوبول، موریس، لتروپی و SHAP تبیین گردیده و با تجمیع و تحلیل داده‌های آزمایشگاهی حاصل از دو پژوهش پیشین، تلاش شده است تا خلأ مطالعاتی در زمینه مدل‌سازی ضریب دبی مرتفع گردد.

روش پژوهش

۱. آنالیز ابعادی و جمع آوری داده‌ها

ضریب دبی (Cd) برای سرریزهای کنگره‌ای با پلان نیم‌دایره، به واسطه معادله (۱) محاسبه می‌گردد. در این معادله، Q بیانگر دبی جریان، L معرف طول سرریز، g نماد شتاب ثقل، و H_T نشان‌دهنده هد هیدرولیکی کل است:

$$Q = \frac{2}{3} C_d L \sqrt{2gH_T^{1.5}} \quad (1)$$

پارامترهای مؤثر در تعیین ضریب دبی (Cd) برای سرریزهای کنگره‌ای با پلان نیم‌دایره را می‌توان به صورت زیر در نظر گرفت:

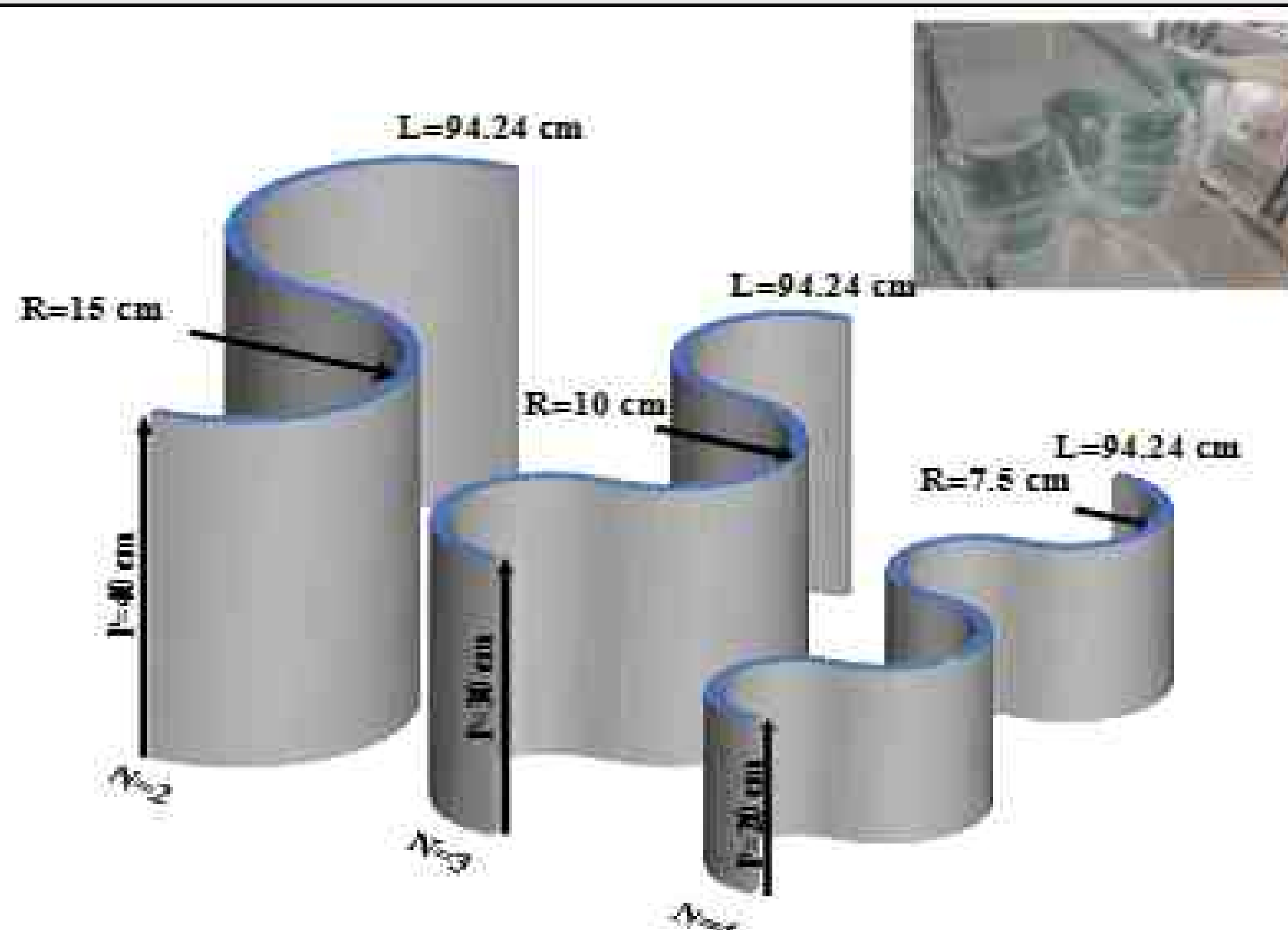
$$Cd = F_1(N, R, L, B, H_T, P, g, \rho, \mu, \delta) \quad (2)$$

در این رابطه، N معرف تعداد سیکل کنگره، R نشانگر شعاع انحنا، B بیانگر پهنای کانال، و P نماد ارتفاع سرریز است. همچنین، ρ ، μ و δ به ترتیب به چگالی سیال، ضریب لزجت دینامیکی و نیروی کشش سطحی دلالت دارند. به دلیل غیرقابل تراکم بودن جریان در سرریزها، اثر تغییرات جرم مخصوص (ρ) قابل صرف‌نظر است. افزون بر این، تأثیرات ناشی از لزجت و کشش سطحی، در وضعیتی که جریان ماهیت آشفته به خود گرفته و هد هیدرولیکی مستقر بر تاج سرریز، مطابق با رهنمود رو و شاکلا^۲ (۱۹۷۱)، از سه سانتی‌متر قزونی یابد، می‌توان از آن‌ها صرف‌نظر نمود. براین اساس، و با استفاده از تحلیل ابعادی، معادله (۲) به صورت زیر قابل بازنویسی خواهد بود:

$$Cd = F_2\left(N, \frac{R}{P}, \frac{L}{P}, \frac{B}{P}, \frac{H_T}{P}\right) \quad (3)$$

¹ Extreme Learning Machine

² Rao & Shukla



شکل ۲. پارامترهای موثر بر ضریب دبی سرریز کنگره‌های تیم‌دایره طرح هارمونیک

در پژوهش حاضر و در راستای توسعه مدل‌های محاسبات نرم، مجموعه داده‌های آزمایشگاهی به‌منظور برآورد ضریب تخلیه (Cd) در سرریزهای کنگره‌ای با پلان دایره‌ای مستخرج از پژوهش‌های اراهم‌نمازی و مظفری^۱ (۲۰۲۳) و یلدیز و همکاران^۲ (۲۰۲۴) استفاده شده است. این مجموعه داده‌ها، شامل بر ۲۱۵ آزمایش انجام‌شده در پژوهش تحت سه ارتفاع متفاوت برای سرریز (P به ترتیب معادل ۲۰، ۳۰ و ۴۰ سانتی‌متر) و با سه تعداد مختلف از سیکل (N برابر با ۲، ۳ و ۴)، و همچنین داده‌های تکمیلی حاصل از مطالعات نمازی و مظفری^۳ (۲۰۲۳)، برای ارتفاع ثابت سرریز $P=15$ سانتی‌متر که به‌صورت تک سیکل ($N=1$) به تعداد ۱۸ آزمایش مبنای تحلیل‌های این پژوهش را تشکیل داده‌اند. بدین ترتیب، مجموعه‌ای بالغ بر ۲۳۳ نتیجه آزمایشگاهی، به‌منظور توسعه و اعتبارسنجی مدل‌های مبتنی بر محاسبات نرم، گردآوری شد. از این مجموعه، ۱۷۵ نمونه (معادل ۷۵ درصد از کل داده‌ها) به فرایند آموزش مدل‌ها اختصاص یافته و ۵۸ نمونه باقیمانده (معادل ۲۵ درصد) جهت آزمون و ارزیابی کارایی مدل‌های توسعه‌یافته، مورد استفاده قرار گرفته است. در مرحله بعد، بهینه‌سازی بیزی با استفاده از پنج زیرمجموعه (fold) از داده‌های آموزش اجرا شده و برای هر ترکیب از پارامترها، مقدار RMSE محاسبه می‌شود. چنانچه مقدار تابع هدف (RMSE) به حد مطلوب برسد ترکیب پارامترها به‌عنوان ساختار نهایی مدل انتخاب می‌گردد. در نهایت، مدل بهینه‌شده با داده‌های آزمون ارزیابی شده و نتایج پیش‌بینی و عملکرد مدل با مدل‌های پایه مقایسه می‌شود. جدول (۱) شاخص‌های آماری تفکیک‌شده برای هر دو مجموعه داده (آموزش و آزمون) را نمایش می‌دهد. شکل (۳)، توزیع فراوانی (هیستوگرام) هر یک از متغیرهای مستقل و همچنین، ماتریس همبستگی میان این متغیرها و ضریب تخلیه (Cd) را ارائه می‌دهد. به‌طور کلی، این نمودار نشان می‌دهد همبستگی خطی ضعیفی بین متغیرها و Cd وجود دارد. بنابراین پیش‌بینی دقیق بر اساس روش‌های کلاسیک رگرسیون دشوار است.

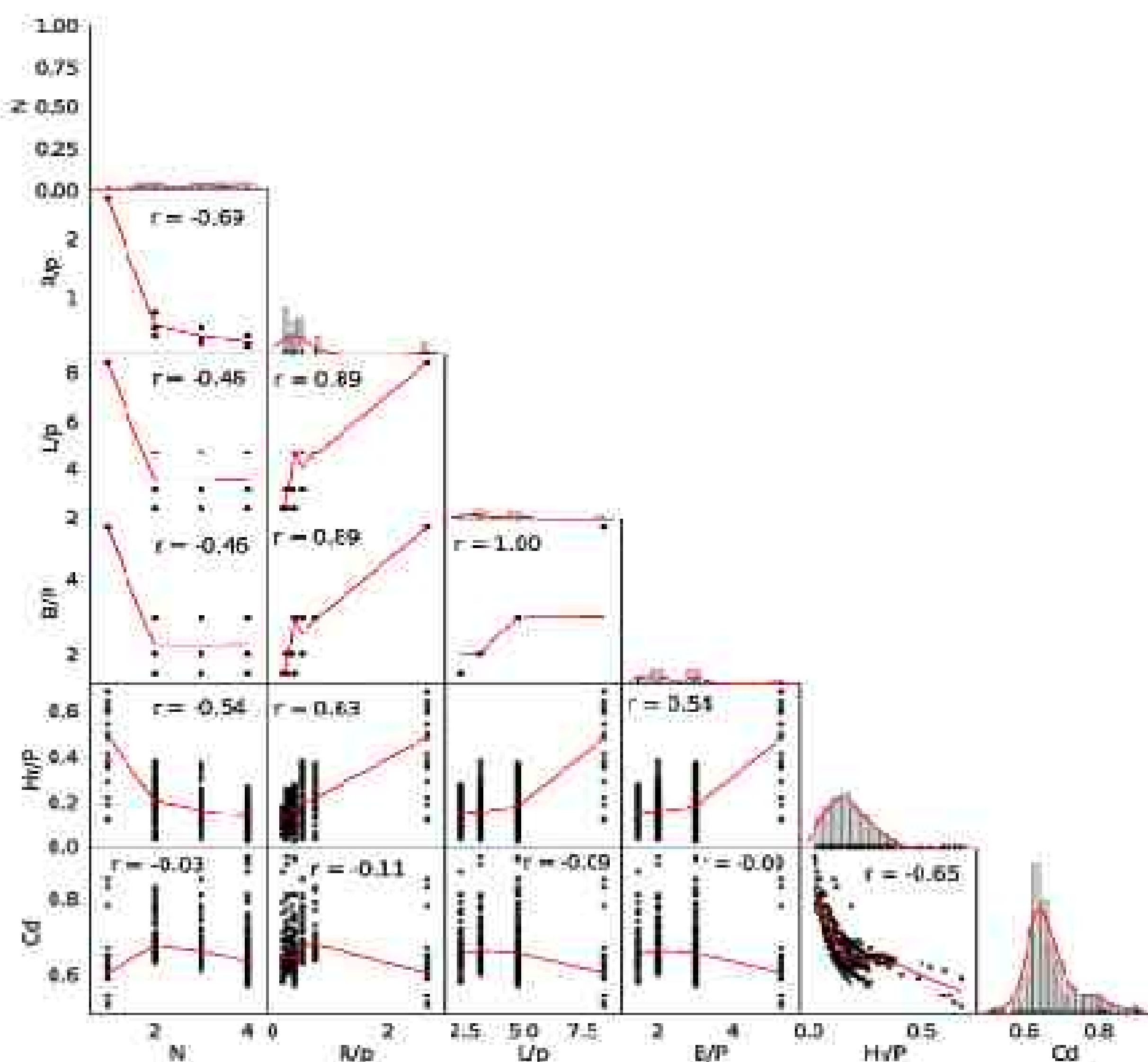
¹ Arham Namazi & Mozaffari

² Yildiz et al

³ Arham Namazi & Mozaffari

جدول ۱. آماره‌های توصیفی داده‌های تخصیص داده‌شده در مرحله آموزش و اعتبارسنجی مدل‌های یادگیری ماشین

مرحله	تأخیص	cd	N	R/p	L/p	B/p	H/p
آموزش	کمینه	۰/۵۱۰	۱	۰/۱۸۷	۲/۲۵۶	۱/۵۰۰	۰/۰۲۰
	بیشینه	۰/۹۱۰	۴	۲/۶۶۷	۸/۴۰۰	۵/۲۲۲	۰/۶۸۰
	عیانگین	۰/۶۷۲	۲/۹۰۳	۰/۵۴۶	۲/۷۹۴	۲/۴۱۴	۰/۱۸۷
	انحراف معیار	۰/۰۷۱	۰/۹۵۱	۰/۵۹۶	۱/۵۴۸	۰/۹۸۲	۰/۱۷۰
اعتبارسنجی	کمینه	۰/۵۴۰	۱	۰/۱۸۷	۲/۲۵۶	۱/۵	۰/۰۳۰
	بیشینه	۰/۸۹۰	۴	۲/۶۶۷	۸/۴۰۰	۵/۲۲۲	۰/۶۲۰
	عیانگین	۰/۶۷۲	۲/۷۵۹	۰/۶۶۵	۴/۱۷۳	۲/۶۵۵	۰/۱۹۳
	انحراف معیار	۰/۰۶۹	۰/۹۷۹	۰/۷۰۸	۱/۷۳۱	۱/۰۹۸	۰/۱۱۳

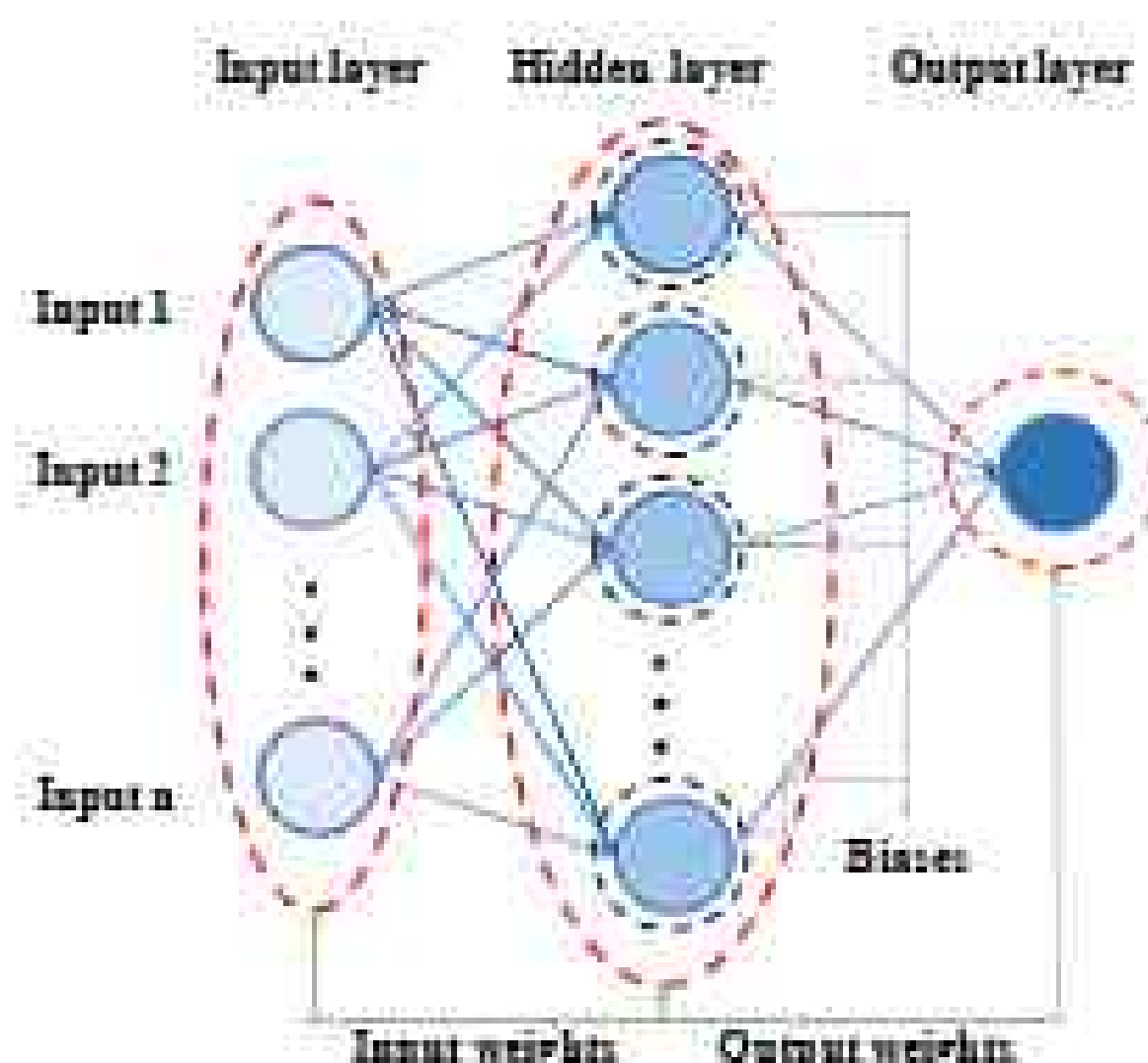


شکل ۲. نمودار هیستوگرام و ماتریس همبستگی بین همه متغیرها

۲. ماشین یادگیری افراطی (ELM)

شکل کلی ماشین یادگیری افراطی (ELM) در شکل (۴) نمایش داده شده است. این مدل شامل سه لایه ورودی، پنهان و خروجی است. همچنین، تعداد نورون‌های لایه ورودی با تعداد ورودی‌های مسئله مطابقت دارد و تعداد نورون‌های لایه خروجی نیز با تعداد خروجی‌های مسئله همخوانی دارد که در مسئله مدل‌سازی سرریز کنگره ای مطالعه حاضر ضریب دبی می باشد. همان‌طور که در شکل (۴) با یک خروجی واحد نشان داده شده است. لایه پنهان و لایه ورودی از طریق وزن‌های ورودی به یکدیگر متصل شده‌اند. علاوه بر این، خروجی لایه پنهان نیز با استفاده از وزن‌ها و بایاس‌های ورودی آن محاسبه می‌شود. این فرایند منجر به

تشکیل ماتریسی به نام «ماتریس خروجی لایه پنهان» می‌گردد که از مقادیر تصادفی این دو ماتریس و تابع فعال‌سازی مناسب حاصل می‌شود.



شکل ۴. معماری روش ELM

در هنگام آموزش مدل $\{(x_i, y_i)\}_{i=1}^N$ برای مسئله‌ای با یک خروجی و N نمونه، خروجی‌های متناظر به صورت $y_i \in \mathbb{R}$ و ورودی‌ها $x_i \in \mathbb{R}^n$ در نظر گرفته می‌شوند. با فرض اینکه شبکه عصبی چندلایه مخفی (HLNN) دارای L باشد و $g(x)$ به عنوان تابع فعال‌سازی (AF) به کار رود، شکل ریاضی روش ماشین یادگیری افراطی (ELM) برای برقراری رابطه میان پارامترهای ورودی و خروجی به شرح زیر ارائه می‌شود (عظیمی و شیرینی، ۲۰۲۱):

$$\sum_{i=1}^L \beta_i g(W_i x + b_i) = y_j, \quad j=1, 2, \dots, N \quad (4)$$

در این معادله، متغیرهای ورودی با نماد x_i نشان داده شده‌اند و خروجی متناظر با این ورودی‌ها با y_i نمایش داده می‌شود. همچنین، بایاس لایه پنهان در شاخص i با پارامتر b_i مشخص می‌گردد. لازم به ذکر است که تمامی بایاس‌های لایه‌های پنهان به صورت تصادفی مقداردهی اولیه می‌شوند.

در فرایند بهینه‌سازی مدل یادگیری افراطی ELM، دو ابرپارامتر اصلی شامل تعداد نرون‌های لایه پنهان^۲ و نوع تابع فعال‌سازی^۳ به منظور بهبود دقت پیش‌بینی مورد ارزیابی و تنظیم قرار گرفتند. پارامتر n_hidden بیانگر تعداد نرون‌ها در لایه میانی مدل است که نقش مهمی در ظرفیت یادگیری و پیچیدگی مدل ایفا می‌کند. درحالی‌که تابع فعال‌سازی نوع نگاشت غیرخطی بین لایه‌ها را مشخص می‌سازد و بر توان مدل در استخراج ویژگی‌های پنهان داده‌ها اثرگذار است. برای پارامتر تعداد نرون‌های لایه پنهان، بازه‌ای بین ۱۰ تا ۵۰۰ انتخاب شد که طیف گسترده‌ای از ظرفیت مدل را شامل می‌شود. در مورد تابع فعال‌سازی نیز سه تابع متداول و پرکاربرد شامل توابع سیگموئید (sigm)، تانژانت هیپربولیک (tanh) و خطی (lin) مدنظر قرار گرفتند.

۳. الگوریتم تقویت گرادیان شدید (XGBoost)

الگوریتم XGBoost نوعی روش یادگیری جمعی^۴ است که با ترکیب چندین درخت تصمیم ضعیف، یک مدل قدرتمند و دقیق می‌سازد. مطابق شکل (۵)، داده‌های ورودی (x_i, y_i) به مدل داده می‌شوند تا اولین درخت تصمیم $f_1(x)$ ساخته شود (چن و گسترین^۵، ۲۰۱۶؛ و همکاران^۶، ۲۰۲۲). خروجی این درخت معمولاً پیش‌بینی اولیه‌ای از مقادیر هدف است. در ادامه، خطای

¹ Azimi and Shiri

² n_hidden

³ activation function

⁴ Ensemble

⁵ Chen and Guestrin

⁶ Wu et al

باقی مانده^۱ بین مقدار واقعی y_i و پیش‌بینی شده محاسبه شده و در مرحله بعد به‌عنوان داده ورودی برای ساخت درخت بعدی $f_2(x)$ استفاده می‌شود. این روند به‌صورت تکراری ادامه می‌یابد و هر درخت جدید سعی می‌کند خطای باقی مانده از مدل قبلی را کاهش دهد. بنابراین مدل نهایی به شکل مجموع وزن دار تمام درخت‌های یادگیرنده ضعیف خواهد بود:

$$f_i^{(t)} = \sum_{k=1}^t f_k(x_i) = f_i^{(t-1)} + f_t(x_i) \quad (5)$$

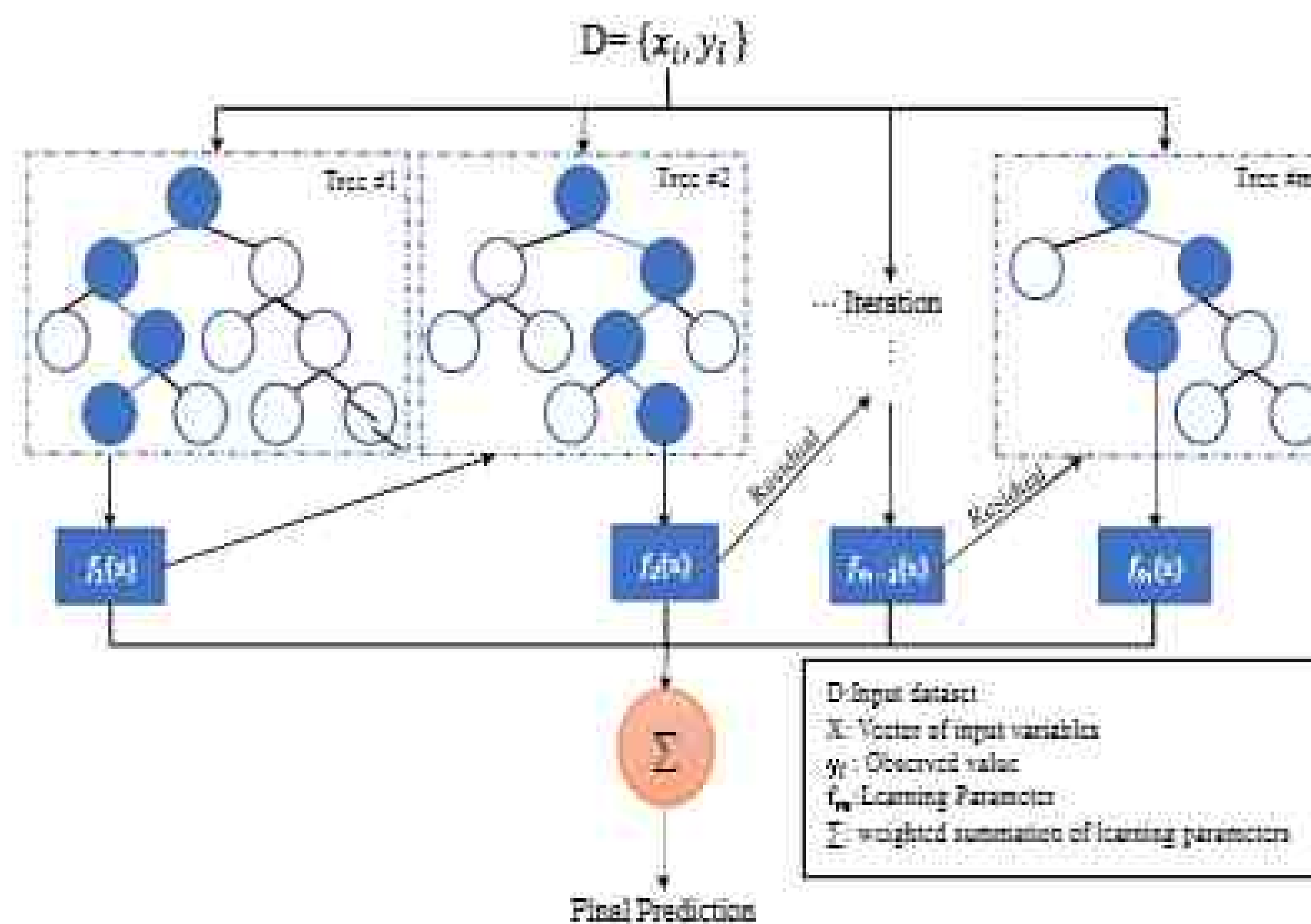
در این رابطه، $f_t(x_i)$ یادگیرنده جدید در مرحله t است. $f_i^{(t-1)}$ پیش‌بینی مرحله قبلی و x_i ورودی مدل است. همان‌طور که در نمودار ۵ دیده می‌شود، در هر مرحله تکرار، مدل جدید $f_t(x)$ براساس باقیمانده‌ی مدل قبلی ساخته می‌شود تا به بهبود پیش‌بینی کمک کند. تابع هدف مدل به شکل زیر تعریف می‌شود:

$$Obj^{(t)} = \sum_{k=1}^n l(y_i, \hat{y}_i) + \sum_{k=1}^t \Omega(f_i) \quad (6)$$

در اینجا l تابع هزینه است. n تعداد داده‌ها و Ω یک جمله منظم‌سازی برای جلوگیری از بیش‌برازش و کنترل پیچیدگی مدل است. جمله منظم‌سازی به‌صورت زیر است:

$$\Omega(f) = \gamma T + \frac{1}{2} \lambda \|\omega\|^2 \quad 2\Omega(f) = \gamma T + \frac{1}{2} \lambda \|\omega\|^2 \quad (7)$$

که در آن ω بردار امتیاز گره‌های برگه، λ ضریب منظم‌سازی و γ حداقل بهبود موردنیاز برای تقسیم بیشتر گره‌ها است. در نهایت، خروجی مدل به‌صورت ترکیب وزن دار تمامی درخت‌ها به‌دست آمده و به‌عنوان پیش‌بینی نهایی نمایش داده می‌شود.



شکل ۵. فلوجارت مدل *XGBoost* (پیرایی و همکاران، ۲۰۲۳)

¹ Residual

² Piraei et al

در فرایند بهینه‌سازی مدل **XGBoost** با استفاده از الگوریتم بهینه‌سازی بیزی^۱، شش ابرپارامتر کلیدی شامل عمق درخت‌ها^۲، نرخ یادگیری^۳، تعداد درخت‌ها^۴، درصد نمونه‌برداری^۵، نسبت انتخاب ویژگی‌ها^۶ و پارامتر جریمه تقسیم^۷ مورد ارزیابی و تنظیم قرار گرفتند. این ابرپارامترها به ترتیب نقش تعیین‌کننده‌ای در کنترل پیچیدگی مدل، جلوگیری از بیش‌برازش، و بهبود دقت پیش‌بینی ایفا می‌کنند. برای تعیین دامنه جستجوی هر یک از این ابرپارامترها، ابتدا با استناد به مطالعات پیشین (پیتروویک و همکاران^۸، ۲۰۲۲؛ کوک و همکاران^۹، ۲۰۲۱)، محدوده‌ای اولیه و نسبتاً وسیع برای هر ابرپارامتر در نظر گرفته شد. این محدوده به‌گونه‌ای انتخاب گردید که احتمال وجود مقدار بهینه در آن بالا باشد. سپس با ثابت نگه‌داشتن سایر ابرپارامترها در مقادیر پیش‌فرض، مقادیر مختلفی از هر ابرپارامتر هدف در فواصل منظم مورد ارزیابی قرار گرفت.

در هر آزمون، مدل **XGBoost** بر مبنای مقدار انتخابی از ابرپارامتر موردنظر آموزش داده شد و ضریب تعیین (R^2) میان خروجی مدل و داده‌های آزمایشگاهی محاسبه گردید. چنانچه مقدار R^2 از ۰/۷۵ بیشتر می‌بود، مقدار مربوطه به‌عنوان مقدار قابل قبول ذخیره می‌شد. در نهایت، بیشینه و کمینه مقادیر ذخیره‌شده برای هر ابرپارامتر، به ترتیب به‌عنوان کران بالایی و پایینی دامنه جستجو در فرایند بهینه‌سازی تعیین شدند.

جدول ۲. محدوده پارامترهای قابل تنظیم مدل **XGBoost**

مقدار	محدوده تغییرات
عمق درخت‌ها	۲۰ تا ۲
نرخ یادگیری	۰-۱ تا ۰-۵
تعداد درخت‌ها	۵۰ تا ۱۰۰۰
درصد نمونه‌برداری	۰/۲ تا یک
نسبت انتخاب ویژگی‌ها	۰/۲ تا یک
پارامتر جریمه تقسیم	صفر تا ۱۰

این دامنه‌ها به‌عنوان ورودی در الگوریتم بهینه‌سازی بیزی تعریف شده و موجب تسریع در همگرایی مدل به سمت ترکیب بهینه از ابرپارامترها گردیدند. روند دستیابی به توسعه مدل بهینه‌سازی‌شده **XGBoost** از کتابخانه **sklearn** و **bayes_opt** در زبان برنامه‌نویسی پایتون حاصل شد.

۴. آنالیز حساسیت

۴-۱. روش موریس

روش موریس که در سال ۱۹۹۱ معرفی شد، با هدف تحلیل حساسیت و شناسایی پارامترهای کلیدی مدل طراحی شده است (موریس^{۱۰}، ۱۹۹۱). اساس این روش بر نمونه‌گیری تصادفی و اجرای مکرر شبیه‌سازی است، به‌طوری‌که در هر تکرار تنها یکی از پارامترها تغییر می‌کند. اثر اولیه تغییر هر پارامتر به‌صورت رابطه (۸) محاسبه می‌شود.

¹ Bayesian Optimization

² Max_depth

³ learning_rate

⁴ N_estimators

⁵ Subsample

⁶ Colsample_bytree

⁷ Gamma

⁸ Petrovic et al

⁹ Koc et al

¹⁰ Morris

$$d_i(X) = \frac{f(x_1, \dots, x_{i-1}, x_i + \Delta, x_{i+1}, \dots, x_n) - f(x_1, \dots, x_{i-1}, x_i, \dots, x_n)}{\Delta} \quad (۸)$$

در اینجا، مقدار Δ از میان مجموعه‌ای شامل مقادیر $\left\{\frac{1}{p-1}, \frac{2}{p-1}, \dots, 1 - \frac{1}{p-1}\right\}$ انتخاب می‌شود که در آن p بیانگر تعداد سطوح هر پارامتر است. بردار $(X_1, \dots, X_{i-1}, X_i, \dots, X_n)$ یک نمونه تصادفی از فضای پارامترها به‌شمار می‌رود. دو شاخص آماری برای ارزیابی اهمیت پارامترها معرفی شده‌اند: میانگین اثر اولیه μ و انحراف معیار σ شاخص μ نمایانگر تأثیر کلی یک پارامتر است و اگر مقدار آن بالا باشد، پارامتر تأثیر زیادی دارد؛ و بالعکس، انحراف معیار بالا در σ نشان‌دهنده تعاملات پیچیده و رفتار غیرخطی در مدل است. برای بهبود تحلیل، نسخه‌ای اصلاح شده از میانگین اثر اولیه نیز با عنوان μ^* به‌صورت رابطه (۹) پیشنهاد شده است (کینگ و پررا^۱، ۲۰۱۳).

$$\mu_i^* = \frac{1}{R} \left| \sum_{j=1}^R d_i(X^{(j)}) \right| \quad (۹)$$

۲-۴. روش سوبول

روش سوبول یک تحلیل حساسیت سراسری^۲ است که بر پایه تجزیه واریانس خروجی مدل به اجزای نسبت داده‌شده به هر ورودی بنا شده است (سوبول^۳، ۱۹۹۳). واریانس کل خروجی مدل به‌صورت رابطه (۱۰) نمایش داده می‌شود:

$$V(y) = \sum_{i=1}^n V_i + \sum_{i < j} V_{ij} + \dots + \sum_{i < j} V_{1\dots n} \quad (۱۰)$$

در این رابطه، $V(y)$ نشانگر مجموع واریانس کل خروجی مدل است. همچنین n تعداد کل پارامترهای مدل را نشان می‌دهد. شاخص‌های تحلیل حساسیت در مرتبه اول، دوم و کل، از طریق روابط (۱۱) تا (۱۳) قابل تعیین هستند.

$$S_i = \frac{V_i}{V(y)} \quad (۱۱)$$

$$S_{ij} = \frac{V_{ij}}{V(y)} \quad (۱۲)$$

$$S_{Ti} = \frac{V_{\sim i}}{V(y)} \quad (۱۳)$$

در این معادلات، $V_{\sim i}$ نمایانگر سهم تمامی پارامترها به‌استثنای پارامتر i در واریانس خروجی مدل است. برای محاسبه این شاخصه از روش مونت کارلو استفاده می‌شود. شاخص S_i بالا نشان‌دهنده تأثیر مستقیم زیاد پارامتر، و S_{Ti} بالا نشان‌دهنده وابستگی گسترده خروجی به آن پارامتر (مستقیم یا غیرمستقیم) است.

۳-۴. روش آنروبی

این روش، از آنروبی و اطلاعات متقابل برای سنجش میزان وابستگی بین ورودی‌ها و خروجی مدل استفاده می‌شود (لی و همکاران^۴، ۲۰۱۳؛ زنگ و همکاران^۵، ۲۰۱۲). آنروبی هر متغیر x به‌صورت رابطه (۱۴) تعریف می‌شود:

$$H(x) = \sum_j P_j \ln P_j \quad (۱۴)$$

^۱ King and Perera

^۲ Global sensitivity analysis

^۳ Sobol

^۴ Li et al

^۵ Zeng et al

اطلاعات متقابل بین دو متغیر x و y نیز به صورت رابطه (۱۵) و شاخص نرمال شده وابستگی به صورت رابطه (۱۶) محاسبه می‌شود:

$$I(x,y)=H(x)+H(y)-H(x,y) \quad (15)$$

$$U(x,y)=2 \times \frac{I(x,y)}{H(x)+H(y)} \quad (16)$$

در شاخص U ، مقدار صفر نشان‌دهنده استقلال کامل و مقدار ۱ بیانگر وابستگی کامل است. این روش امکان تحلیل حساسیت را حتی در شرایط وجود عدم قطعیت و رفتارهای غیرخطی فراهم می‌کند (میشرا و همکاران^۱، ۲۰۰۳).

۴-۴. روش SHAP

روش SHAP یک رویکرد مستقل از مدل برای تفسیر پیش‌بینی‌های حاصل از هر مدل یادگیری ماشین است (لوندبرگ و لی^۲، ۲۰۱۷). این روش با بهره‌گیری از نظریه بازی‌ها و تبیین‌های محلی، سهم هر ویژگی را در پیش‌بینی نهایی بر اساس اثرات نهایی (حاشیه‌ای) آن توزیع می‌کند. به منظور اطمینان از توزیع منصفانه مشارکت ویژگی‌ها، مقادیر SHAP با استفاده از رابطه (۱۷) محاسبه می‌شوند.

$$\phi_i = \sum_{S \subseteq N \setminus \{i\}} \frac{|S|!(n-|S|-1)!}{n!} [v_x(S \cup \{i\}) - v_x(S)] \quad (17)$$

در اینجا، $\phi_i(v)$ نشان‌دهنده سهم یا مشارکت ویژگی i است. N مجموعه‌ای از تمام ویژگی‌های موجود در مدل بوده و n بیانگر تعداد کل ویژگی‌هاست. S زیرمجموعه‌ای از ویژگی‌ها بدون در نظر گرفتن i است. درحالی‌که $v_x(S)$ پیش‌بینی مورد انتظار برای زیرمجموعه‌ی S را نشان می‌دهد. عبارت $[v_x(S \cup \{i\}) - v_x(S)]$ تغییر در مقدار پیش‌بینی به واسطه‌ی حضور ویژگی i را نشان می‌دهد.

۵. معیارهای ارزیابی

به منظور ارزیابی مدل‌های مورد استفاده در این تحقیق از شش شاخص‌های آماری ضریب تعیین (R^2)، ریشه میانگین مربعات خطا (RMSE)، میانگین درصد خطای مطلق (MAPE)، خطای نسبی مطلق (RAE)، ضریب تعیین نش (NS) و شاخص توافق (IA) به شرح زیر استفاده گردید:

$$R^2 = \frac{[\sum_{i=1}^N (O_i - \bar{O})(P_i - \bar{P})]^2}{\sum_{i=1}^N (O_i - \bar{O})^2 \sum_{i=1}^N (P_i - \bar{P})^2} \quad (16)$$

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N (O_i - P_i)^2}{N}} \quad (17)$$

$$MAPE = \frac{100}{N} \sum_{i=1}^N \left| \frac{P_i - O_i}{O_i} \right| \quad (18)$$

¹ Mishra et al

² Lundberg and Lee

$$RAE = \frac{\sum_{i=1}^N |P_i - O_i|}{\sum_{i=1}^N |O_i - \bar{O}|} \quad (۱۹)$$

$$NS = 1 - \frac{\sum_{i=1}^N (P_i - O_i)^2}{\sum_{i=1}^N (O_i - \bar{O})^2} \quad (۲۰)$$

$$IA = 1 - \frac{\sum_{i=1}^N (P_i - O_i)^2}{\sum_{i=1}^N (|P_i - \bar{O}| + |O_i - \bar{O}|)^2} \quad (۲۱)$$

در رابطه‌های فوق O_i مقادیر ضریب دبی مشاهداتی (واقعی)، P_i مقادیر ضریب دبی پیش‌بینی شده، $\bar{O}$ میانگین مقادیر ضریب دبی مشاهداتی، $\bar{P}$ میانگین مقادیر ضریب دبی پیش‌بینی شده و N تعداد مشاهدات هستند. لازم به ذکر است مقادیر R^2 نزدیک یک و مقادیر RMSE، RAE و MAPE نزدیک به صفر نشان‌دهنده دقت بیشتر و عملکرد بهتر مدل هستند.

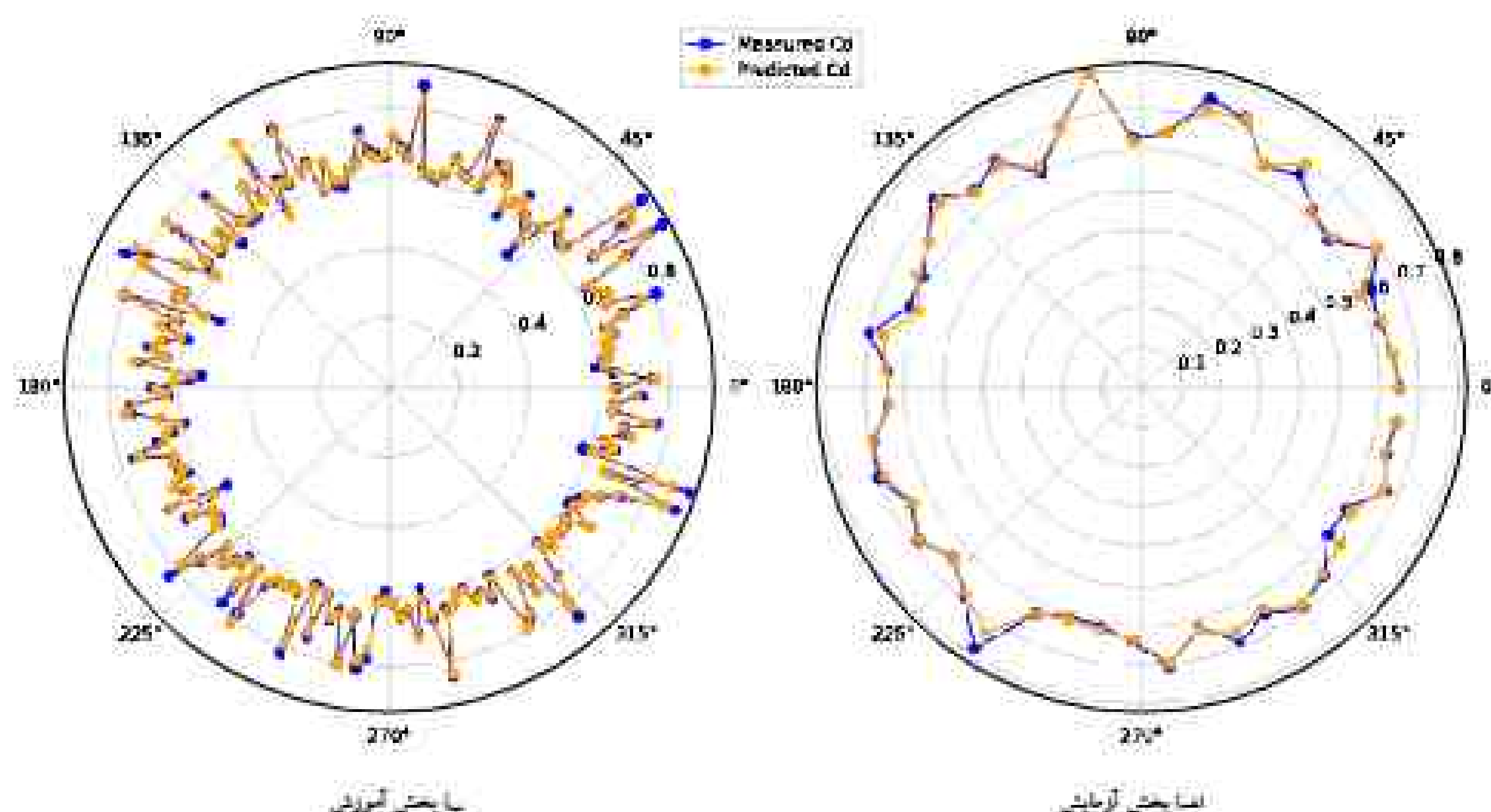
یافته‌های پژوهش

۱. نتایج مدل Xgboost

به منظور مدل‌سازی ضریب دبی (Cd)، همان‌گونه که بیان گردید، الگوریتم XGBoost با استفاده از رویکرد ترکیبی بهینه‌سازی بیزی و اعتبارسنجی متقابل^۱ پنج‌تایی بهینه‌سازی شد. در فرایند بهینه‌سازی، شش پارامتر کلیدی مدل شامل عمق درخت‌ها، نرخ یادگیری، تعداد درخت‌ها، درصد نمونه‌برداری، نسبت انتخاب ویژگی‌ها و پارامتر جریمه تقسیم تنظیم گردیدند. مقدار بهینه‌یافته این پارامترها در جدول (۳) آورده شده است. مطابق شکل (۶) ارزیابی عملکرد مدل نهایی نشان می‌دهد که الگوریتم XGBoost قادر است دقت بالایی در پیش‌بینی ضریب دبی در این نوع از سرریزها ارائه دهد. براین اساس، مقدار ضریب مقدار ضریب تعیین (R^2) برای مجموعه آموزش معادل ۰/۹۹۱۱ و برای مجموعه آزمون برابر با ۰/۹۲۳ به دست آمد. همچنین، مقدار ریشه میانگین مربعات خطا (RMSE) به ترتیب ۰/۰۰۷ برای داده‌های آموزش و ۰/۰۱۲۷ برای داده‌های آزمون گزارش شد. نتایج نشان‌دهنده انطباق مناسب بین مقادیر واقعی و پیش‌بینی‌شده‌ی Cd می‌باشند.

در نمودارهای قطبی شکل (۶)، ترسیم‌شده برای داده‌های آموزش و آزمون، روند هم‌راستای نقاط پیش‌بینی‌شده با مقادیر واقعی کاملاً مشهود است که گواهی بر دقت مدل در شناسایی الگوهای حاکم بر داده‌ها دارد. در مجموع، این مدل می‌تواند به عنوان ابزاری مؤثر و قابل اعتماد در برآورد ضریب دبی سرریزهای نیم‌دایره‌ای مورد استفاده قرار گیرد.

^۱ K Fold



شکل ۶. نمودارهای قطبی مربوط به مقادیر پیش‌بینی شده مدل *Xgboost* در برابر مقادیر واقعی ضریب دبی (*Cd*) برای سری‌های نیم‌دایره الف) بخش آزمایش و ب) بخش آموزش

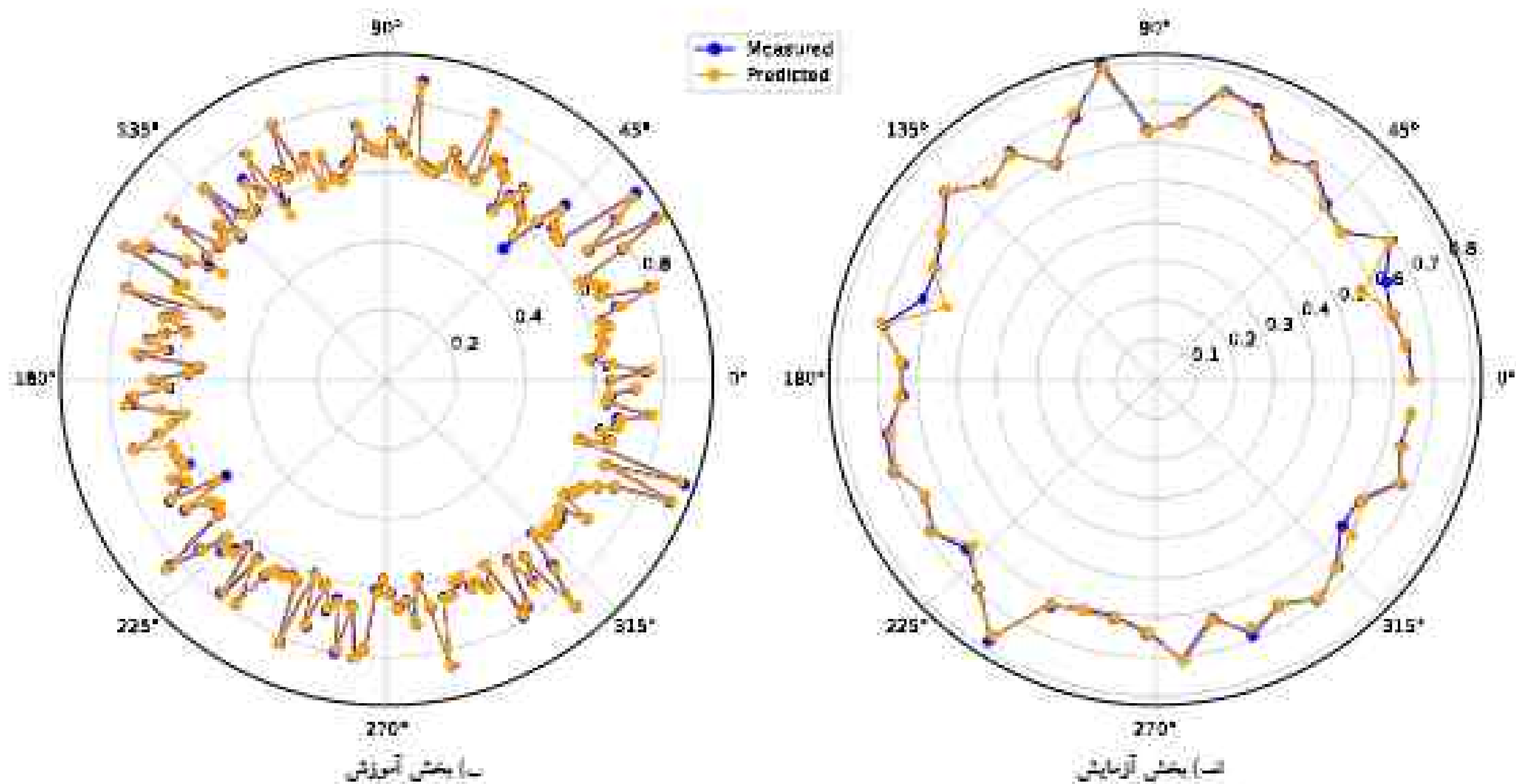
۲. نتایج مدل *ELM*

به منظور مدل‌سازی ضریب دبی (*Cd*)، مدل یادگیری افراطی با استفاده از رویکرد بهینه‌سازی بیزی و اعتبارسنجی متقابل پنج‌تایی بهینه‌سازی گردید. در این فرایند، دو پارامتر کلیدی شامل تعداد نورون‌های لایه پنهان و نوع تابع فعال‌سازی شبکه مورد ارزیابی قرار گرفت که در جدول (۳) مقادیر آنها نشان داده شده است. در شکل (۷) ارزیابی عملکرد مدل نهایی نشان داد که ساختار *ELM* با ترکیب پارامترهای بهینه‌شده، دقت قابل توجهی در پیش‌بینی مقادیر *Cd* دارد. به طور خاص، مقدار ضریب تعیین (R^2) برای مجموعه آموزش معادل ۰/۹۱ و برای مجموعه آزمون برابر با ۰/۸۷۹ محاسبه گردید. همچنین، مقادیر ریشه میانگین مربعات خطا (*RMSE*) برای داده‌های آموزش و آزمون به ترتیب برابر با ۰/۰۰۷ و ۰/۰۱۲۷ بوده است.

جدول ۳. پارامترهای بهینه شده مدل‌های یادگیری ماشین

مدل	پارامترهای بهینه شده
<i>XGBOOST</i>	۲ = عمق درخت‌ها
	۰/۱۶ = نرخ یادگیری
	۱۹۵ = تعداد درخت‌ها
	۸۸ = درصد نمونه‌برداری
	۰/۹۴ = نسبت انتخاب ویژگی‌ها
	۰/۰۰۵۷ = پارامتر جریمه تقسیم
<i>ELM</i>	<i>Sigm</i> = تابع فعال‌ساز
	۳۲ = تعداد نورون

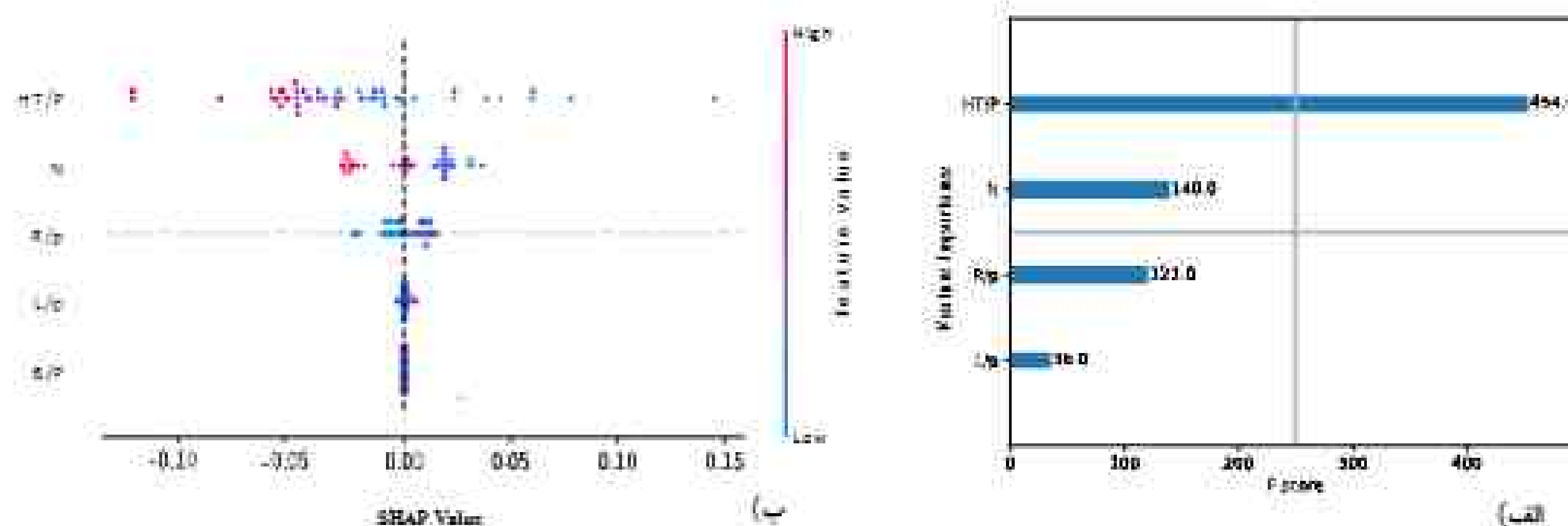
مقایسه نمودارهای قطبی در شکل (۷) حاصل از مقادیر واقعی و پیش‌بینی شده برای دو بخش آموزش و آزمون نیز بیانگر هم‌راستایی و انطباق بالای مدل با داده‌های واقعی است. الگوهای ترسیمی در این نمودارها نشان می‌دهند که مدل ELM با ساختار بهینه همانند مدل Xgboost توانسته است روند تغییرات Cd را با دقت بالا بازسازی کند.



شکل ۷: نمودارهای قطبی مربوط به مقادیر پیش‌بینی شده مدل ELM در برابر مقادیر واقعی ضریب دبی (Cd) برای سری‌های نیندایزه الف) بخش آموزش و ب) بخش آزمون

۳. نتایج تحلیل حساسیت

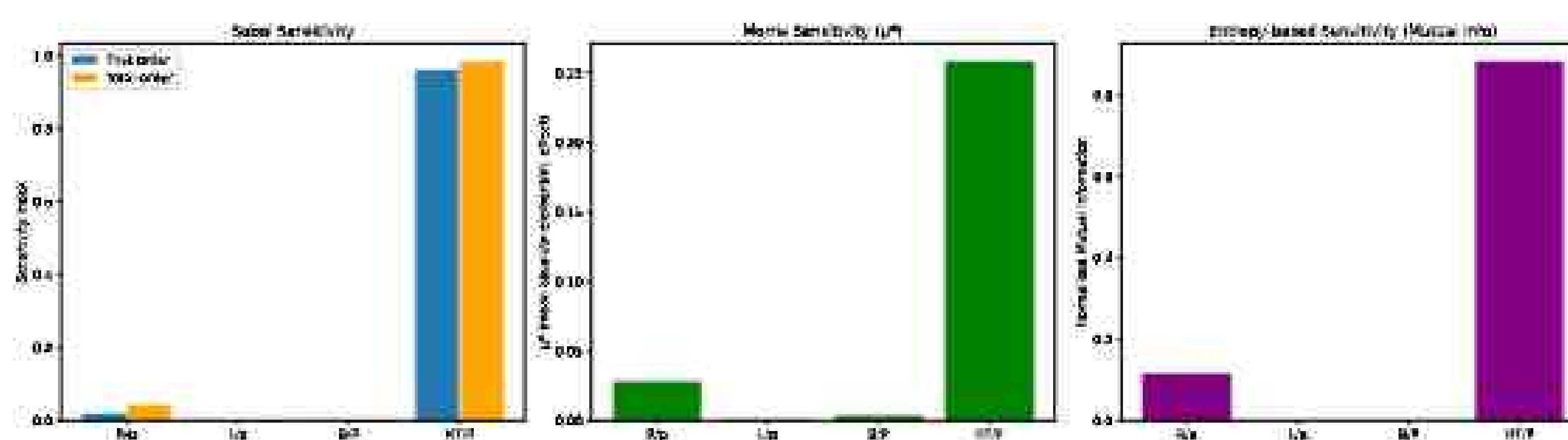
شکل (۸-الف) ارائه‌شده تحلیل دقیقی از اهمیت و تأثیر ویژگی‌ها در مدل XGBoost ارائه می‌دهند. بر اساس این نمودار که محور افقی تعداد دفعاتی که ویژگی در تقسیم‌گرهای درخت استفاده شده است، اهمیت متغیر H_T/P با امتیاز ۴۵۴ بالاترین نقش را در پیش‌بینی مدل ایفا کرده و مهم‌ترین عامل در تصمیم‌گیری مدل بوده است. پس از آن، متغیرهای N با امتیاز ۱۴۰ و R/P با امتیاز ۱۲۱ و در نهایت L/P با امتیاز ۳۶ قرار دارند. این مقادیر نشان می‌دهند که مدل به ترتیب بیشترین توجه را به H_T/P سپس N و R/P و کمترین توجه را به L/P داشته است. در شکل ۸ ب، نمودار SHAP نیز برای بررسی دقیق‌تر و تفسیرپذیری مدل به‌کار رفته است. در این نمودار مقدار SHAP برای هر ویژگی میزان تأثیر آن را بر خروجی مدل نشان می‌دهد. رنگ هر نقطه بر اساس مقدار واقعی ویژگی در داده‌ها تعیین شده است؛ رنگ آبی نشان‌دهنده مقادیر پایین و رنگ قرمز نشان‌دهنده مقادیر بالای ضریب دبی (Cd) است. همانند شکل (۸-ب)، ویژگی H_T/P بیشترین گستردگی در مقدار SHAP را دارد که بیانگر تأثیرگذاری بالای آن بر پیش‌بینی مدل است؛ به‌طوری که مقادیر پایین این ویژگی (آبی‌رنگ) عمدتاً تأثیر مثبت و مقادیر بالا (قرمز) تأثیر منفی بر خروجی مدل دارند. سایر ویژگی‌ها مانند N و R/P نیز اثراتی قابل توجه دارند؛ اما در مقایسه با H_T/P کمتر هستند. ویژگی B/P تقریباً تأثیر خاصی در خروجی مدل نداشته و مقدار SHAP آن حول صفر متمرکز است.



شکل ۸. آنالیز حساسیت با الف) روش درختی Xgboost و ب) روش SHAP

در ادامه برای شناسایی متغیرهای اثرگذار بر ضریب دبی (Cd)، از سه روش معتبر تحلیل حساسیت شامل سوپول (تحلیل واریانس جهانی)، روش موریس (اثر اولیه میانگین) و روش مبتنی بر آنتروپی (اطلاع متقابل) استفاده شد. نتایج هر سه روش نیز، برتری متغیر H_T/P را به‌عنوان مهم‌ترین پارامتر ورودی به‌وضوح نشان می‌دهند. مطابق شکل (۹) در روش سوپول، شاخص حساسیت مرتبه اول برای H_T/P برابر با حدود ۰/۹۹ و شاخص کل نیز بسیار نزدیک به همان مقدار بوده است. این موضوع بیانگر آن است که تقریباً تمام واریانس پاسخ مدل را می‌توان تنها با تغییر در این پارامتر توجیه کرد و تأثیر متقابل آن با سایر پارامترها ناچیز است. در مقابل، پارامترهای R/p و L/p تأثیر بسیار ناچیزی دارند به‌طوری که شاخص کل آن‌ها به‌سختی از مقدار ۰/۰۲ تجاوز می‌کند. در روش Morris نیز، مقدار میانگین اثر مطلق اولیه (μ^*) برای H_T/P برابر با حدود ۰/۲۶ گزارش شده که اختلاف چشمگیری با سایر پارامترها دارد. R/p با مقدار حدودی ۰/۰۳ دومین پارامتر مؤثر محسوب می‌شود، اما تأثیر آن در مقایسه با H_T/P بسیار پایین‌تر است. در نهایت، در روش اطلاع متقابل نیز بیشترین حساسیت به H_T/P اختصاص دارد به‌طوری که مقدار نرمال‌شده آن حدود ۰/۸۷ بوده و R/p بافاصله زیاد و مقدار حدودی ۰/۱۳ در رتبه دوم قرار می‌گیرد، درحالی که L/p و B/p تقریباً اثر قابل‌دکری ندارند.

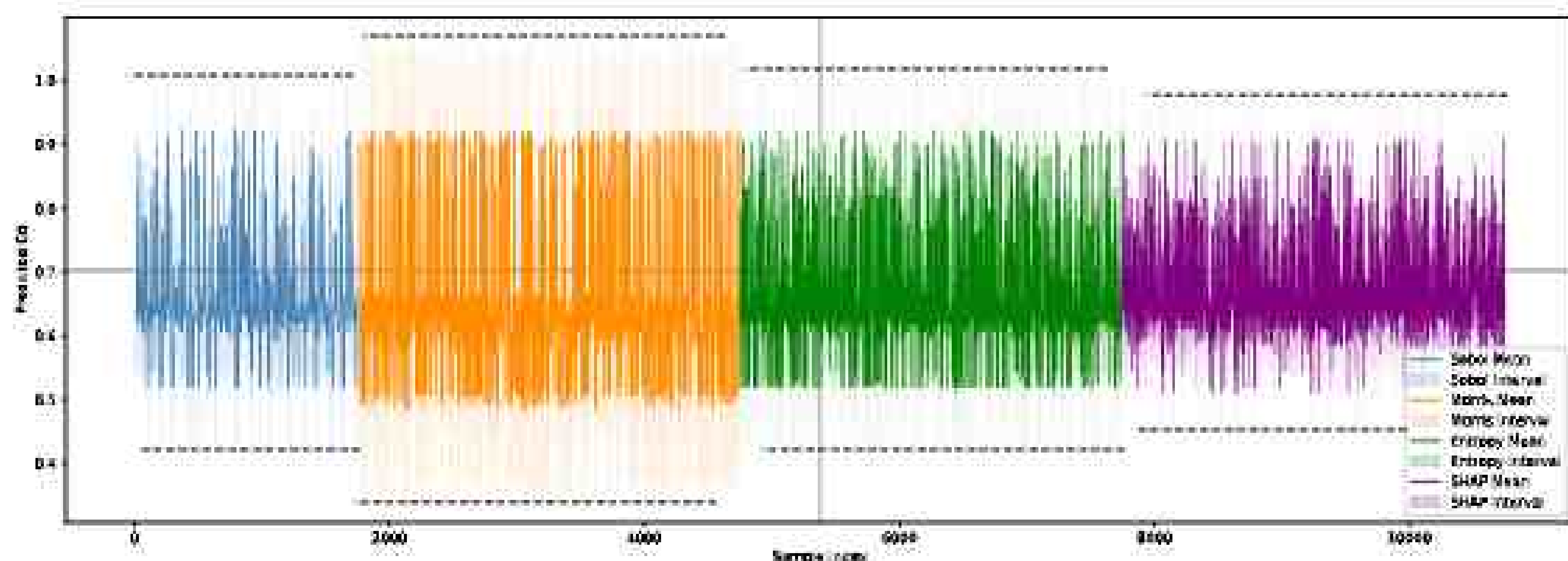
مقایسه کلی این پنج روش نشان می‌دهد که به‌طور هم‌راستا پارامتر H_T/P را به‌عنوان مؤثرترین ورودی شناسایی کرده‌اند که نشان از پایداری نتایج تحلیل حساسیت و اعتبار مدل مورد استفاده دارد. همچنین، اتفاق نظر این روش‌ها می‌تواند مبنای تصمیم‌گیری برای کاهش بعد مسئله و طراحی آزمایش‌های بعدی قرار گیرد.



شکل ۹. آنالیز حساسیت با استفاده از روش‌های آنتروپی، موریس و سوپول

در شکل (۱۰) نمودار چهار روش مختلف نمونه‌گیری برای تحلیل حساسیت مدل XGBoost را مقایسه می‌کند. محور افقی معرف ایندکس نمونه برداری است که برای هر چهار روش آنالیز حساسیت برابر ۳۰۰۰ در نظر گرفته شده است. محور عمودی مقدار پیش‌بینی‌شده برای متغیر هدف (Cd) است. برای هر روش، میانگین پیش‌بینی‌ها به‌صورت خط پررنگ و نوار بازه

(interval) که نمایانگر تغییرات ($\pm$ انحراف معیار) است با رنگی روشن‌تر ترسیم شده است. به طور کلی، توزیع خروجی مدل در همه روش‌ها تقریباً متمرکز در بازه $0/4$ تا یک قرار دارد، اما شدت نوسانات و پراکندگی در هر روش آنالیز حساسیت متفاوت است. در مقایسه بین روش‌ها، مشاهده می‌شود که روش سوبول (آبی) و آنتروپی (سبز) دارای بازه‌های نوسان متعادلی هستند که نشان از پایداری نسبی پیش‌بینی‌ها در این نمونه‌گیری‌ها دارد. روش موریس (نارنجی) دارای گستره نوسان بزرگ‌تری است که ممکن است ناشی از ماهیت تصادفی‌تر یا ساختار وابسته‌تری به پارامترهای ورودی باشد. در مقابل، آنالیز SHAP (بنفش) اگرچه مبتنی بر خروجی مدل است، اما بازه‌های نوسان آن محدودتر به نظر می‌رسد که نشان‌دهنده این است که ویژگی‌های انتخاب‌شده توسط SHAP در محدوده‌ای پایدار اثرگذار هستند. این نتیجه می‌تواند حاکی از این باشد که SHAP نه تنها ابزاری برای تفسیر مدل است؛ بلکه برای ارزیابی حساسیت نیز رفتار مدل را به شکلی هدفمند منعکس می‌کند. در نهایت، استفاده ترکیبی از این روش‌ها می‌تواند تحلیل جامع‌تری از پایداری و حساسیت مدل نسبت به ورودی‌ها فراهم کند.



شکل ۱۰. بررسی عملکرد چهار روش آنالیز حساسیت در پایداری و پیش‌بینی ضریب دبی

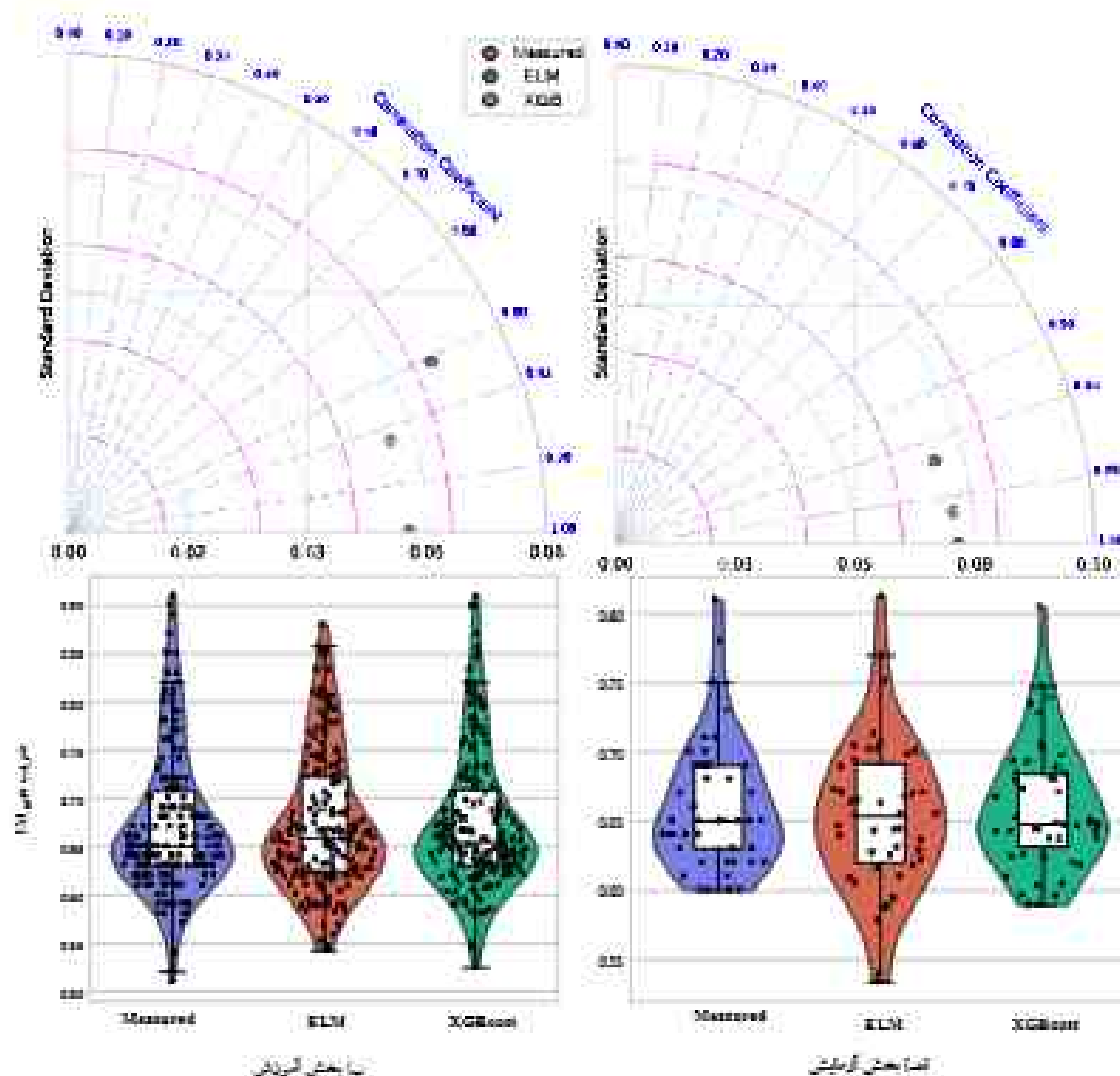
بحث

در این مطالعه، عملکرد دو مدل یادگیری ماشین XGBoost و ELM در پیش‌بینی مقادیر ضریب دبی (Cd) تحت نمونه‌گیری‌های حاصل از چهار روش آنالیز حساسیت سوبول، موریس، آنتروپی و SHAP مورد بررسی قرار گرفت. هر چهار روش مهم‌ترین پارامتر تأثیرگذار را متغیر H_T/P معرفی نمودند. برای ارزیابی عملکرد مدل‌های یادگیری ماشین، از نمودار تیلور و ویولن مطابق شکل (۱۱) استفاده شد. با تحلیل دقیق نمودارهای تیلور برای ارزیابی عملکرد مدل‌های پیش‌بینی ضریب دبی (Cd) در دو بخش آموزش و آزمایش، می‌توان تصویری جامع از دقت، همبستگی و پایداری هر مدل به دست آورد. در نمودار تیلور مربوط به بخش آموزش (نمودار سمت چپ)، داده‌های اندازه‌گیری‌شده (Measured) با انحراف معیار حدود $0/048$ و ضریب همبستگی یک به عنوان مرجع قرار گرفته‌اند. مدل XGBoost با قرارگیری بسیار نزدیک به نقطه مرجع و داشتن ضریب همبستگی بالا در حدود $0/97$ و انحراف معیار تقریباً برابر با داده‌های واقعی، عملکرد بسیار دقیقی در یادگیری از داده‌ها نشان داده است. در مقابل، مدل ELM که با نقطه آبی مشخص شده، ضریب همبستگی پایین‌تری در حدود $0/93$ دارد و موقعیت آن دورتر از داده‌های واقعی است که بیانگر دقت کمتر در بازتولید الگوهای آموزشی است.

در نمودار سمت راست که مربوط به بخش آزمایش است، مجدداً مدل XGBoost عملکرد بهتری از خود نشان داده است. نقطه نارنجی آن دارای ضریب همبستگی بسیار بالا (بیش از $0/95$) و انحراف معیار بسیار نزدیک به مقدار واقعی است. در حالی که

مدل ELM با انحراف معیار بالاتر و ضریب همبستگی پایین‌تر (تقریباً ۰/۹ یا کمتر)، فاصله بیشتری از نقطه مرجع دارد. این نشان می‌دهد که XGBoost نسبت به مدل‌های دیگر در مرحله آموزش دقت بالایی دارد و رفتار ضریب دبی را دقیق‌تر پیش‌بینی می‌کند.

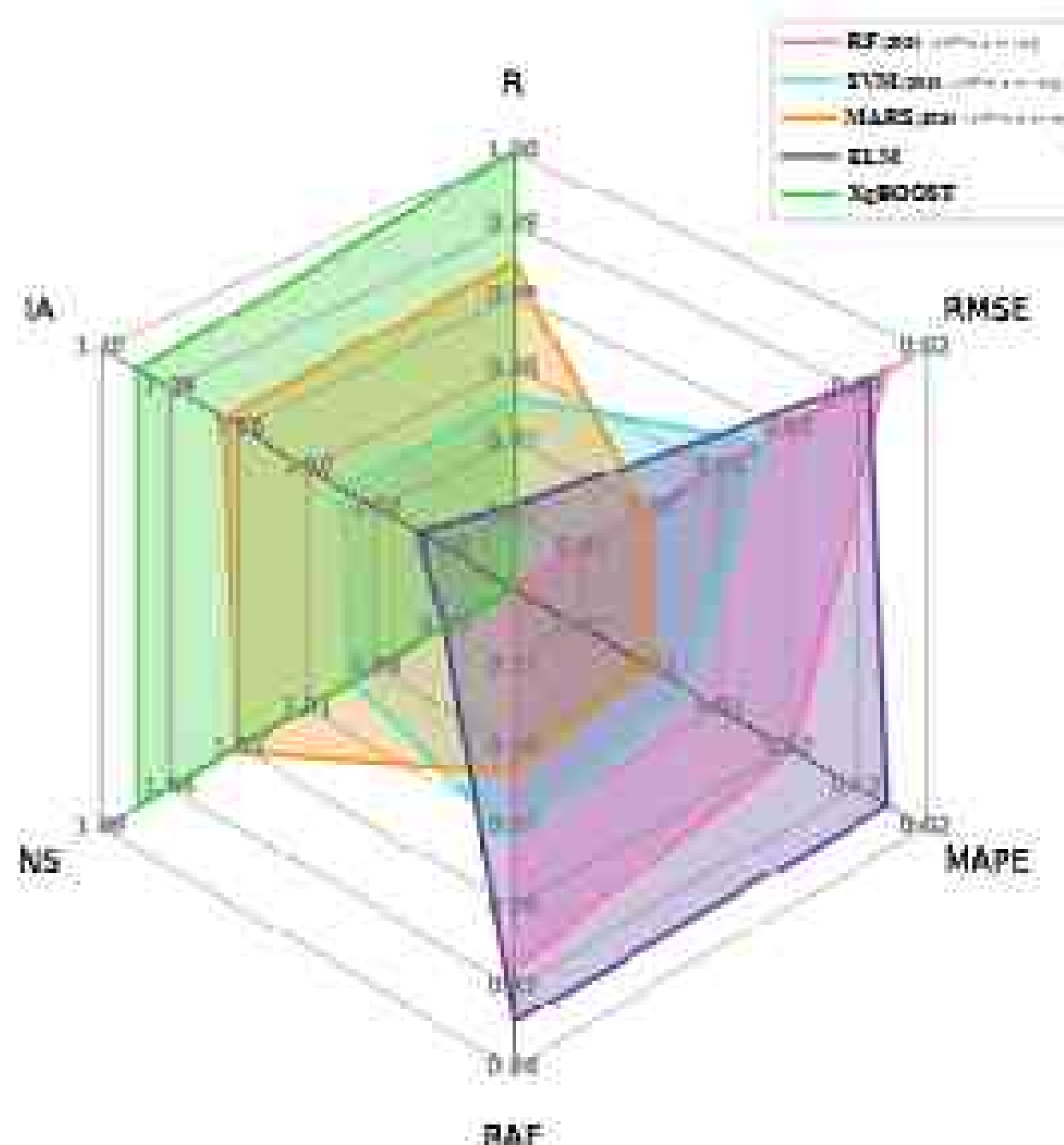
نمودارهای ویولن نمایش داده‌شده توزیع مقادیر ضریب دبی (Cd) را برای داده‌های اندازه‌گیری‌شده و دو مدل یادگیری ماشین ELM و XGBoost در دو بخش آزمایش (شکل ۱۱-الف) و آموزش (شکل ۱۱-ب) به تصویر می‌کشد. در بخش آموزش، مقدار میانه‌ی Cd برای داده‌های واقعی حدود ۰/۷ بوده و توزیع نسبتاً متراکمی در این محدوده دیده می‌شود. مدل ELM در این بخش میانه‌ای حدود ۰/۶۹ دارد و توزیع آن گرایش بیشتری به ناحیه پایین‌تر (حدود ۰/۶۵ تا ۰/۷) دارد. در حالی که مدل XGBoost با میانه‌ای تقریباً برابر با ۰/۷ و توزیعی متراکم در اطراف آن، بسیار نزدیک به داده‌های واقعی عمل کرده است. همچنین، دامنه‌ی تغییرات در XGBoost به نسبت متقارن‌تر و نرمال‌تر است که نشان‌دهنده دقت و ثبات بهتر این مدل در مرحله آموزش است. در بخش آزمایش، توزیع داده‌های واقعی در محدوده ۰/۶۵ تا ۰/۷ متمرکز است و میانه‌ی آن حدود ۰/۶۷ است. مدل ELM در این بخش با میانه‌ای در حدود ۰/۶۶ و دامنه‌ی نسبتاً پهن و کشیده‌ای که به سمت مقادیر بالاتر و پایین‌تر انحراف دارد، دقت کمتری نسبت به بخش آموزش نشان می‌دهد. از سوی دیگر، مدل XGBoost در بخش آزمایش نیز با میانه‌ای نزدیک به ۰/۶۷ و توزیعی متمرکزتر، تطابق بهتری با داده‌های واقعی دارد. پهنای کمتر نمودار ویولن برای XGBoost به‌ویژه در مرکز داده‌ها (۰/۶۵ تا ۰/۷) نشان‌دهنده همگرایی بهتر پیش‌بینی‌ها در اطراف مقدار واقعی است. به طور کلی، تحلیل این دو نمودار نشان می‌دهد که مدل XGBoost هم در مرحله آموزش و هم در مرحله آزمون، در بازتولید و پیش‌بینی ضریب دبی عملکرد بهتری نسبت به مدل ELM داشته و با پراکندگی کمتر، میانه نزدیک‌تر به داده‌های واقعی و توزیع متمرکزتر، گزینه‌ای دقیق‌تر و پایدارتر برای مدل‌سازی به شمار می‌رود.



شکل ۱۱. دیاگرام ویولن و ویولن عملکرد مدل ELM و XGBoost در الف) بخش آزمایش و ب) بخش آموزش

همچنین مقایسه روش‌های مختلف آنالیز حساسیت نیز نشان می‌دهد که روش‌های SHAP و Entropy در مدل XGBoost بازه‌های پیش‌بینی باریک‌تری تولید کرده‌اند که نشان‌دهنده اعتماد بالای مدل به ورودی‌های حاصل از این روش‌هاست. در مقابل، روش مورس بازه‌های تواسی‌تر و گسترده‌تری داشتند که ممکن است به دلیل ماهیت تصادفی‌تر یا وابستگی بیشتر به برهم‌کنش‌های متغیرها در این روش باشد. به طور خاص، SHAP به‌عنوان دقیق‌ترین روش از نظر محدودکردن عدم قطعیت شناخته شد و به نظر می‌رسد که هماهنگی بالایی با مدل XGBoost دارد. بر اساس نمودار رادار ارائه‌شده در شکل (۱۲)، عملکرد سه مدل هوش مصنوعی شامل جنگل تصادفی^۱، ماشین بردار پشتیبان^۲ و مدل رگرسیون غیرپارامتری چندمتغیره اسپایلین^۳ حاصل از نتایج مطالعات سواعدی و همکاران^۴ (۲۰۲۴) با نتایج حاصل از مدل‌های ELM و XgBoost مورد مقایسه قرار گرفت. نتایج با استفاده از شش شاخص آماری (R، MAPE، RMSE، IA، NS و RAE) ارزیابی شده‌اند. همان‌گونه که مشاهده می‌شود در بین مدل‌ها، مدل XgBOOST عملکرد بسیار بهتری در بیشتر شاخص‌ها از خود نشان داده است. به طور خاص، این مدل دارای مقادیر نزدیک به یک در شاخص‌های IA، NS و R بوده که نشان از دقت بسیار بالا در بازتولید داده‌های واقعی دارد.

در نتیجه، می‌توان نتیجه‌گیری کرد که مدل XgBOOST با اختلاف قابل‌توجهی بهترین عملکرد را در بین مدل‌های بررسی‌شده داشته و گزینه مناسبی برای پیش‌بینی ضریب دبی جریان در این مطالعه است. مدل‌های RF و ELM ضعیف‌ترین عملکرد را نشان داده‌اند. درحالی‌که مدل‌های MARS و SVM در جایگاه میانی قرار دارند. این تحلیل می‌تواند به‌عنوان مرجع تصمیم‌گیری در انتخاب مدل‌های پیش‌بینی در مطالعات آینده مورد استفاده قرار گیرد.



شکل ۱۲. بررسی عملکرد مدل‌های ELM و XGboost با سایر مدل‌های هوش مصنوعی انجام شده در پیش‌بینی ضریب دبی
سرریز نیم‌دایره

^۱ Random forest

^۲ Support Vector Machine

^۳ multivariate adaptive regression spline

^۴ Savaedi et al

نتیجه‌گیری

پیش‌بینی دقیق ضریب دبی در سرریزهای نیم‌دایره طرح هارمونیک، برای طراحی و عملکرد بهینه سیستم‌های هیدرولیکی از اهمیت بالایی برخوردار است. به دلیل ارتباط پیچیده بین ضریب دبی و پارامترهای مؤثر بر آن، معادلات تجربی در پیش‌بینی دقیق این ضریب با محدودیت‌هایی مواجه هستند. در مطالعه حاضر، دو مدل ترکیبی جدید یادگیری ماشین با عنوان ELM و XGBoost توسعه داده شده است که برای مدل‌سازی ضریب دبی در این نوع از سازه‌ها به کار گرفته شد. این دو مدل جدید، مزایای الگوریتم تجمعی تقویتی و افراطی را با الگوریتم بهینه‌سازی بیزی ترکیب می‌کند. به‌منظور کاهش خطای پیش‌بینی در مدل‌های یادگیری ماشین، ابتدا تحلیل اهمیت ویژگی‌ها با استفاده از روش چهار روش انجام شد تا میزان تأثیر نسبی هر پارامتر ورودی مشخص گردد.

در مجموع، ترکیب مدل XGBoost با روش‌های نمونه‌گیری SHAP می‌تواند بهترین گزینه برای پیش‌بینی دقیق و پایدار Cd باشد. این ترکیب نه تنها بازه‌های پیش‌بینی باریکی ارائه می‌دهد، بلکه نسبت به داده‌های نمونه‌برداری شده مقاومت بیشتری در برابر نویز و نوسانات دارد. این نتایج می‌تواند راهنمای مناسبی برای انتخاب مدل و روش نمونه‌گیری در مطالعات آبی مرتبط با تحلیل حساسیت و پیش‌بینی ویژگی‌های وابسته به عدم قطعیت باشد. همچنین نتایج نشان داد مدل XGBoost با وجود ساختار پیشرفته و قابلیت‌های تنظیم پارامتر، عملکرد نسبتاً ضعیف‌تری نسبت به ELM داشته است. در نمودار تیلور، فاصله مدل XGB از نقطه مرجع در هر دو بخش بیشتر از ELM است که این موضوع بر دقت کمتر آن در پیش‌بینی دلالت دارد.

ملاحظات اخلاقی

پیروی از اصول اخلاق پژوهش

نویسندگان اصول اخلاقی را در انجام و انتشار این پژوهش علمی رعایت نموده‌اند و این موضوع مورد تأیید همه آنهاست.

تعارض منافع

بنا بر اظهار نویسندگان این مقاله تعارض منافع ندارد.

سپاسگزاری

در پایان، از حمایت‌های مالی شورای پژوهشی دانشگاه شهید چمران اهواز کمال تشکر را داریم (GN: SCU.WH1403.43525).

References

- Arham Namazi, F. S., & Mozaffari, J. (2023). Investigation of labyrinth weirs discharge coefficient with the same length. *Flow Measurement and Instrumentation*, 94, 102468. <https://doi.org/10.1016/j.flowmeasinst.2023.102468>
- Azimi, H., & Shiri, H. (2021). Assessment of ice-seabed interaction process in clay using extreme learning machine. *International Journal of Offshore and Polar Engineering*, 31(04), 411–420. <https://doi.org/10.17736/ijope.2021.mt31>
- Bilhan, O., Emiroglu, M. E., Miller, C. J., & Ulas, M. (2018). The evaluation of the effect of nappe breakers on the discharge capacity of trapezoidal labyrinth weirs by ELM and SVR approaches. *Flow Measurement and Instrumentation*, 64, 71–82. <https://doi.org/10.1016/j.flowmeasinst.2018.10.009>
- Bonakdari, H., Gholami, A., Mosavi, A., Kazemian-Kale-Kale, A., Ebtehaj, I., & Azimi, A. H. (2020). A novel comprehensive evaluation method for estimating the bank profile shape and dimensions of stable channels using the maximum entropy principle. *Entropy*, 22(11), 1218. <https://doi.org/10.3390/e22111218>
- Borghei, S. M., & Parvaneh, A. (2011). Discharge characteristics of a modified oblique side weir in subcritical flow. *Flow Measurement and Instrumentation*, 22(5), 370–376. <https://doi.org/10.1016/j.flowmeasinst.2011.04.009>
- Borisova, N. M., & Belikov, V. V. (2023). Optimization of Spillway Design of Reconstructed Shavan Dam Using Numerical 2D-Modeling. *Power Technology and Engineering*, 57(1), 67–74. Scopus. <https://doi.org/10.1007/s10749-023-01624-7>
- Chen, T., & Guestrin, C. (2016). XGBoost: A Scalable Tree Boosting System. *Proceedings of the 22nd ACM SIGKDD International Conference on Knowledge Discovery and Data Mining*, 785–794. <https://doi.org/10.1145/2939672.2939785>
- Dutta, D., Mandal, A., & Afzal, M. S. (2020). Discharge performance of plan view of multi-cycle W-form and circular arc labyrinth weir using machine learning. *Flow Measurement and Instrumentation*, 73, 101740. <https://doi.org/10.1016/j.flowmeasinst.2020.101740>
- Emami, S., Parsa, J., Emami, H., & Abbaspour, A. (2021). Investigation of Discharge Coefficient of Triangular Duckbill Labyrinth Weirs Using Fluent Software and Gray Wolf and Elections Algorithms. *Civil Infrastructure Researches*, 6(2), 107–121. <https://doi.org/10.22091/cer.2021.6942.1250>
- Ghaderi, D., Ebrahimnezhadian, H., & Mollazadeh, M. (2024). Three-dimensional analysis of the performance of circular stepped spillways in the skimming flow regime. *Journal of the Brazilian Society of Mechanical Sciences and Engineering*, 46(7). <https://doi.org/10.1007/s40430-024-05004-8>
- Haghiabi, A. H., Parsaie, A., & Ememgholizadeh, S. (2018). Prediction of discharge coefficient of triangular labyrinth weirs using Adaptive Neuro Fuzzy Inference System. *Alexandria Engineering Journal*, 57(3), 1773–1782. <https://doi.org/10.1016/j.aej.2017.05.005>
- Hussein, B. S., & Jalil, S. A. (2024). Influence of Labyrinth Side Weir Shape Modification on the Hydrodynamic Performance: Experimental and Numerical Study. *Arabian Journal for Science and Engineering*, 50, 12881–12902. <https://doi.org/10.1007/s13369-024-09563-9>
- Ikinciogullari, E. (2024). Energy dissipation performance of labyrinth and harmonic stepped spillways. *Journal of Hydroinformatics*, 26(10), 2668–2682. <https://doi.org/10.2166/hydro.2024.221>
- Koc, K., Ekmekcioğlu, Ö., & Gurgun, A. P. (2021). Integrating feature engineering, genetic algorithm and tree-based machine learning methods to predict the post-accident disability

- status of construction workers. *Automation in Construction*, 131, 103896. <https://doi.org/10.1016/j.autcon.2021.103896>
- Kisi, O., Emin Emiroglu, M., Bilhan, O., & Guven, A. (2012). Prediction of lateral outflow over triangular labyrinth side weirs under subcritical conditions using soft computing approaches. *Expert Systems with Applications*, 39(3), 3454–3460. <https://doi.org/10.1016/j.eswa.2011.09.035>
- Li, J., Duan, Q. Y., Gong, W., Ye, A., Dai, Y., Miao, C., Di, Z., Tong, C., & Sun, Y. (2013). Assessing parameter importance of the Common Land Model based on qualitative and quantitative sensitivity analysis. *Hydrology and Earth System Sciences*, 17(8), 3279–3293.
- Li, S., Shen, G., Parsaie, A., Li, G., & Cao, D. (2024). Discharge modeling and characteristic analysis of semi-circular side weir based on the soft computing method. *Journal of Hydroinformatics*, 26(1), 175–188. <https://doi.org/10.5194/hessd-10-2243-2013>
- Lundberg, S. M., & Lee, S.-I. (2017). A unified approach to interpreting model predictions. *Advances in Neural Information Processing Systems*, 30. <https://proceedings.neurips.cc/paper/2017/hash/8a20a8621978632d76c43dfd28b67767-Abstract.html>
- Mishra, S., & Knowlton, R. G. (2003). Testing for input-output dependence in performance assessment models. *Proceedings of the 10th International High-Level Radioactive Waste Management Conference (IHLRW)*, March 30-April 2, 2003, Las Vegas, Nevada, 882–887. <https://doi.org/10.1023/a:1007058325258>
- Morris, M. D. (1991). Factorial Sampling Plans for Preliminary Computational Experiments. *Technometrics*, 33(2), 161–174. <https://doi.org/10.1080/00401706.1991.10484804>
- King, D. M., & Perera, B. J. C. (2013). Morris method of sensitivity analysis applied to assess the importance of input variables on urban water supply yield—A case study. *Journal of hydrology*, 477, 17–32. <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0022169412008918>
- Petrovic, A., Strumberger, I., Antonijevic, M., Jovanovic, D., Mladenovic, D., & Chhabra, A. (2022). Firefly-xgboost approach for pedestrian detection. *2022 IEEE Zooming Innovation in Consumer Technologies Conference (ZINC)*, 197–202. <https://ieeexplore.ieee.org/abstract/document/9840700/>
- Piraei, R., Afzali, S. H., & Niazkar, M. (2023). Assessment of XGBoost to Estimate Total Sediment Loads in Rivers. *Water Resources Management*, 37(13), 5289–5306. <https://doi.org/10.1007/s11269-023-03606-w>
- Rao, S. S., & Shukla, M. K. (1971). Characteristics of flow over weirs of finite crest width. *Journal of the Hydraulics Division*, 97(11), 1807–1816. <https://doi.org/10.1061/JYCEAJ.0003138>
- Safarrazavi Zadeh, M., Esmaeili Varaki, M., & Biabani, R. (2021). Experimental study on flow over sinusoidal and semicircular labyrinth weirs. *ISH Journal of Hydraulic Engineering*, 27(sup1), 304–313. <https://doi.org/10.1080/09715010.2019.1644679>
- Sangsefidi, Y., & Ghodsian, M. (2018). Investigation of effects of entrance channel walls on the hydraulic performance of arced labyrinth weirs. <https://www.sid.ir/paper/256636/en>
- Savaedi, A., Zayeri, M., Ghomeshi, M., & Daryaei, M. (2024b). Application of Artificial Intelligence in Predicting the Discharge Coefficient of Labyrinth Weirs with Harmonic Plans. *Irrigation and Drainage Structures Engineering Research*, 25(96), 82–61. <https://doi.org/10.22092/idser.2025.368037.1602>
- Shafiei, S., Najarchi, M., & Shabanlou, S. (2020). Simulation of labyrinth weir discharge coefficient by modern artificial intelligence models. *Modares Civil Engineering Journal*, 20(1), 204–218. https://mcej.modares.ac.ir/browse.php?a_id=35509&sid=16&slc_lang=en

- Simsek, O., Gumus, V., & Ozluk, A. (2023). Prediction of discharge coefficient of the trapezoidal broad-crested weir flow using soft computing techniques. *Neural Computing and Applications*, 35(24), 17485–17499. <https://doi.org/10.1007/s00521-023-08615-9>
- Sobol, I. M. (1993). Sensitivity estimates for nonlinear mathematical models. *Math. Model. Comput. Exp.*, 1(4), 407–414. <https://www.scirp.org/reference/referencespapers?referenceid=2692473>
- Suleimany, J. M. F. S., Aurahman, T. H., & Mamand, B. S. (2022). Flow simulation over semicircular labyrinth weir using ANSYS-fluent. *Tikrit Journal of Engineering Sciences*, 29(1), 83–98. <https://doi.org/10.25130/tjes.29.1.7>
- Wu, J., Ma, D., & Wang, W. (2022). Leakage Identification in Water Distribution Networks Based on XGBoost Algorithm. *Journal of Water Resources Planning and Management*, 148(3), 04021107. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)WR.1943-5452.0001523](https://doi.org/10.1061/(ASCE)WR.1943-5452.0001523)
- Yildiz, A., Marti, A. İ., & Göğüş, M. (2024). The hydraulic investigation of harmonic plan weirs. *Flow Measurement and Instrumentation*, 95, 102512. <https://doi.org/10.1016/j.flowmeasinst.2023.102512>
- Zare, H., Vaghefi, M., Mahmoudi, A., & Behrooz, A. M. (2023). Experimental Exploration of Flow Hydraulics and Discharge Coefficient for an Inclined Circular Labyrinth Weir. *Water Resources Management*, 37(11), 4521–4536. <https://doi.org/10.1007/s11269-023-03577-y>
- Zeng, X., Wang, D., & Wu, J. (2012). Sensitivity analysis of the probability distribution of groundwater level series based on information entropy. *Stochastic Environmental Research and Risk Assessment*, 26, 345–356. <https://doi.org/10.1007/s00477-012-0556-2>

Evaluation of performance of simulation models in predicting water movement in two-Layer soils with emphasis on infiltration and redistribution phases

Iraj Sohrabi¹, Peyman Tahmasebi², Bakhtiar Karimi³, and Arman Moghadamnia⁴

1. Department of Water Science and Engineering, Faculty of Agriculture, Kurdistan University, Sanandaj, Iran. Email: i.sohrabi994@gmail.com

2. Department of Water Science and Engineering, Faculty of Agriculture, Bu-Ali Sina University, Hamedan, Iran. Email: p.tahmasebi@agr.basu.ac.ir

3. Corresponding author, Department of Water Science and Engineering, Faculty of Agriculture, Kurdistan University, Kurdistan, Iran. Email: bakhtiar.karimi@uok.ac.ir.com

4. Department of Water Science and Engineering, Faculty of Agriculture, Kurdistan University, Kurdistan, Iran. Email: arman.moghadamnia@gmail.com

Article Info.

Article type:
Research Article

Article history:
Received 18 April 2025
Received in revised form 05
July 2025
Accepted 01 October 2025
Available online 22 June 2026

Keywords:
distribution Phase,
drip irrigation,
simulation,
soil profile,
wetted width.

ABSTRACT

Objective: This study develops and evaluates models to simulate moisture distribution in two-layer soils under surface drip irrigation to improve optimal irrigation system design.

Method: A transparent physical model made of plexiglass was used to conduct the experiments. Six two-layer soil profiles were tested: L1 (medium-heavy), L2 (medium-light), L3 (heavy-medium), L4 (heavy-light), L5 (light-medium), and L6 (light-heavy). Nonlinear regression models were developed considering the hydraulic properties of the soil and the operational characteristics of the emitters to simulate moisture movement in both horizontal and vertical directions.

Results: A comparison of statistical parameters between measured and simulated data showed that the proposed models performed with high accuracy in simulating the initial moisture distribution phase, with correlation coefficients of 0.85 and 0.88 for the horizontal and vertical directions, respectively. However, during the redistribution phase, particularly in the horizontal direction, model accuracy declined slightly (correlation coefficients of 0.52 and 0.79). The root-mean-square error (RMSE) for predicting moisture distribution was 5.93 cm (horizontal) and 4.66 cm (vertical), and for redistribution was estimated at 8.87 cm and 8.03 cm, respectively. Additionally, the models showed a tendency to overestimate values in the horizontal direction and underestimate them in the vertical direction.

Conclusions: The proposed models demonstrated acceptable accuracy in simulating moisture distribution patterns in two-layer soils under drip irrigation. However, reduced accuracy during the redistribution phase—particularly in the horizontal direction—and the observed tendencies toward overestimation and underestimation indicate the presence of systematic errors in the modeling approach. Identifying and correcting these errors can significantly enhance the predictive capability of the models.

Cite this article: Sohrabi, I., Tahmasebi, P., Karimi, B., & Moghadamnia, A. (2026). Evaluation of Performance of Simulation Models in Predicting Water Movement in Two-Layer Soils with Emphasis on Infiltration and Redistribution Phases. *Advanced Technologies in Water Efficiency*, 6(2), 24-43. <https://doi.org/10.22126/atwe.2025.12042.1163>



© The Author(s)
<https://doi.org/10.22126/atwe.2025.12042.1163>

Publisher: Razi University.

Introduction

Numerical modeling of water flow in dual-layered soils is a strategic tool for optimizing water resource management, especially in arid and semi-arid regions. This is crucial for enhancing irrigation efficiency and reducing water losses. The inherent heterogeneity of dual-layered soils, resulting from differences in texture, structure, and hydraulic properties, poses significant challenges in accurately simulating soil moisture behavior. This research aimed to evaluate the ability of various empirical models to precisely predict moisture distribution and redistribution phases in dual-layered soils under surface drip irrigation with continuous flow. The study also sought to determine the interactive effects of soil parameters and irrigation conditions on model prediction accuracy to improve irrigation system design and sustainable water management in areas with layered soils.

Method

Laboratory experiments were conducted in the summer of 2019 at the Water Sciences Research Group, Kurdistan University, to assess moisture distribution and redistribution phases under soil layering conditions. Experiments were performed on a transparent Plexiglas physical model (1m x 0.5m x 1m) to investigate the impact of soil layering and hydraulic parameters on water infiltration in drip-irrigated soils. Soil samples with different textures (medium, heavy, and light) were collected from specific locations and placed in the transparent models. Six dual-layered soil profiles were used: L1 (medium-heavy), L2 (medium-light), L3 (heavy-medium), L4 (heavy-light), L5 (light-medium), and L6 (light-heavy). A drip irrigation system was designed using standard emitters and a pump. Nonlinear regression models were developed to accurately simulate moisture distribution and redistribution in dual-layered soils under surface drip irrigation with continuous flow. The ability of these models to predict water movement in both horizontal and vertical directions in layered soils was evaluated using statistical indices (CRM, RMSE, MAE, and R^2).

Results

Calibration and validation results of the nonlinear regression models indicated their acceptable performance in simulating moisture distribution and redistribution in dual-layered soils under drip irrigation. Overall, the models demonstrated high accuracy in simulating the distribution phase (during irrigation) in both horizontal and vertical directions. The high correlation coefficients (R^2) of 0.85 and 0.88 for the horizontal and vertical directions, respectively, in the distribution phase support this claim. Additionally, the RMSE values of 5.93 cm and 6.64 cm for these directions indicated a relatively low model error in predicting the wetting front. However, in the redistribution phase (after irrigation cessation), especially in the horizontal direction, the accuracy of the models decreased slightly. The R^2 values of 0.52 and 0.79 for the horizontal and vertical directions, respectively, in the redistribution phase indicate a decrease in model accuracy. RMSE values in this phase were 8.87 cm and 0.3 cm for the horizontal and vertical directions, respectively. Furthermore, MAE values in the horizontal and vertical distribution phases were 4.8 and 3.5, and in the redistribution phase, they were 7.3 and 7 cm for horizontal and vertical directions, respectively. Therefore, the analysis of RMSE and MAE values also shows that the models had higher errors in the horizontal direction compared to the vertical direction. This indicates that

the models were less accurate in predicting the lateral spread of the wetting front. Analysis of the results shows that the models tend to overestimate values in the horizontal direction and underestimate values in the vertical direction in both the distribution and redistribution phases. This could be due to the complexity of lateral water movement processes in the soil, soil heterogeneity, limitations of the model in considering all relevant processes, and a lack of accurate data at soil depth.

Conclusions

This study aimed to enhance the efficiency of drip irrigation systems and optimize water resource management by conducting numerical modeling of moisture distribution in dual-layered soils. The results demonstrated that the developed nonlinear regression models exhibited satisfactory capability in predicting moisture distribution, particularly during the distribution phase. However, the models encountered limitations when simulating the redistribution phase, especially in the horizontal direction. Soil texture and layering had a significant impact on moisture distribution and model performance. The findings of this research can be applied to the optimal design of drip irrigation systems and the precise determination of crop water requirements. Nevertheless, further investigations are required to improve model accuracy by considering soil heterogeneity, the influence of environmental factors, and developing more complex models.

Author Contributions

All authors contributed equally to the conceptualization of the article and writing of the original and subsequent drafts.

Data Availability Statement

Data available on request from the authors.

Acknowledgements

The authors would like to thank all participants in the present study.

Ethical Considerations

The authors avoided data fabrication, falsification, plagiarism, and misconduct.

Funding

The authors are grateful for the financial support of the Research Council of Shahid Chamran University of Ahvaz (GN: SCU.WH1403.43525).

Conflict of Interest

The authors declare no conflict of interest.



بررسی عملکرد مدل‌های شبیه‌سازی در پیش‌بینی حرکت آب در خاک‌های دولایه با تأکید بر فازهای توزیع و توزیع مجدد

ایرج سهرابی^۱، پیمان طهماسبی^۲، بختیار کریمی^۳، و آرمان مقدم نیا^۴

۱. گروه آبیاری و زهکشی، دانشکده کشاورزی، دانشگاه کردستان، سنندج، ایران. رایانامه: a.sohrabi994@gmail.com

۲. گروه علوم و مهندسی آب، دانشکده کشاورزی، دانشگاه بوعلی سینا، همدان، ایران. رایانامه: p.tahmasebi@agr.basu.ac.ir

۳. نویسنده مسئول، گروه علوم و مهندسی آب، دانشکده کشاورزی، دانشگاه کردستان، سنندج، ایران. رایانامه: bakhtiar.karimi@uok.ac.ir

۴. گروه آبیاری و زهکشی، دانشکده کشاورزی، دانشگاه کردستان، سنندج، ایران. رایانامه: arman.moghadamnia@gmail.com

درباره مقاله	چکیده
نوع مقاله: مقاله پژوهشی تاریخ دریافت: ۱۴۰۴/۰۱/۲۹ تاریخ بازنگری: ۱۴۰۴/۰۴/۱۴ تاریخ پذیرش: ۱۴۰۴/۰۷/۰۹ تاریخ انتشار: ۱۴۰۵/۰۴/۰۱ کلیدواژه‌ها: آبیاری قطره‌ای، پروفیل خاک، شبیه‌سازی، عرض خیس‌شدگی، فاز توزیع.	هدف: هدف از این پژوهش، توسعه مدل‌هایی برای شبیه‌سازی دقیق توزیع و توزیع مجدد رطوبت در خاک‌های دولایه تحت آبیاری قطره‌ای سطحی بود. روش پژوهش: برای دستیابی به این هدف، آزمایش‌هایی بر روی یک مدل فیزیکی شفاف پلاستیکی گلاس و با استفاده از شش پروفیل مختلف از خاک‌های دولایه (با ترکیبات سبک تا سنگین) انجام شد و مدل‌های رگرسیون غیرخطی بر پایه ویژگی‌های هیدرولیکی خاک و قطره‌چکان توسعه یافتند. یافته‌ها: یافته‌ها نشان داد که مدل‌های پیشنهادی در فاز توزیع رطوبت دقت بسیار بالایی دارند (با ضرایب همبستگی ۸۵٪ و ۸۸٪)، اما در فاز توزیع مجدد، به‌ویژه در جهت افقی، دقت آن‌ها کاهش می‌یابد. همچنین مشخص شد که مدل‌ها در جهت افقی تمایل به بیش‌برآورد و در جهت عمودی تمایل به کم‌برآورد دارند. نتیجه‌گیری: با اعمال اصلاحات بر روی این خطاهای سیستماتیک می‌توان دقت پیش‌بینی مدل‌ها را برای طراحی بهینه سامانه‌های آبیاری بهبود بخشید.

استناد: سهرابی، ایرج؛ طهماسبی، پیمان؛ کریمی، بختیار؛ و مقدم نیا، آرمان. (۱۴۰۵). بررسی عملکرد مدل‌های شبیه‌سازی در پیش‌بینی حرکت آب در خاک‌های

دولایه با تأکید بر فازهای توزیع و توزیع مجدد. *فناوری‌های پیشرفته در بهره‌وری آب*، ۴(۲): ۲۴-۴۳.

atwe.2025.12042.1163/10.22126



مقدمه

باتوجه به مصرف بیش از ۶۰ درصد آب شیرین جهان در بخش کشاورزی (شو و همکاران^۱، ۲۰۲۴) و باتوجه به نیاز به پایداری منابع آب و خاک، لازم است تا روش‌های تولید در حوضه کشاورزی بهینه‌سازی شده و با مصرف کم‌تر آب، تولید مواد غذایی پایدار حاصل شود (اسکاگز و همکاران^۲، ۲۰۰۴؛ جامعی و همکاران^۳، ۲۰۲۲). در مناطق خشک، در راستای توسعه اقتصادی و اجتماعی، استفاده از سامانه‌های نوین آبیاری، با امکان افزایش راندمان مصرف آب، ضروری است (کریمی و همکاران^۴، ۲۰۱۳). در سامانه آبیاری قطره‌ای به دلیل مرطوب شدن محدوده توسعه ریشه گیاه، راندمان این سامانه بالا است بنابراین این سامانه مناسب بسیاری از مناطق کم‌آب جهان است. برای اطمینان از مرطوب شدن محدوده توسعه ریشه گیاه توسط قطره‌چکان‌ها، واجب است الگوی خیس‌شدگی (پیار رطوبتی) محدوده مورد نظر خاک تعیین گردد (کریمی و همکاران، ۱۳۹۴). برآورد الگوی توزیع رطوبت، از شاخص‌های حائز اهمیت در طراحی سامانه آبیاری قطره‌ای است که متناسب با آن فاصله بین قطره چکان‌ها و لوله‌های فرعی (لاترال‌ها) تعیین می‌شود تا از هدررفت آب به صورت رواناب سطحی و نفوذ عمقی جلوگیری کند (کیلج^۵، ۲۰۲۰؛ صولت و همکاران^۶، ۲۰۲۱). از عوامل مهم و تأثیرگذار در تعیین ابعاد خیس شده پیاز رطوبتی عبارتند از: آبدی قطره‌چکان‌ها، حالت آبیاری (پیوسته و پالسی)، خصوصیات فیزیکی خاک (هدایت هیدرولیکی، چگالی ظاهری، رطوبت اولیه خاک)، شیب زمین، عمق نصب قطره‌چکان‌ها (سطحی یا زیر سطحی) و وضعیت لایه‌بندی خاک.

ادبیات موضوع و پیشینه پژوهش

مطالعات زیادی در زمینه مدل‌سازی الگوی خیس‌شدگی پیاز رطوبتی به انجام رسیده است که به صورت مختصر در سه طبقه - بندی ارائه می‌گردد، مدل‌های رایج در زمینه مدل‌سازی الگوی پیاز رطوبتی شامل مدل‌های تجربی، تحلیلی و عددی است.

۱. مطالعات داخل کشور

کریمی و کریمی (۱۳۹۹) الگوی جبهه پیشروی رطوبت خاک در آبیاری قطره‌ای زیرسطحی با جریان پالسی و پیوسته را برای دبی‌ها و خاک‌های مختلف مورد بررسی قرار دادند. نتایج آنان نشان داد که در سامانه آبیاری قطره‌ای زیر سطحی با جریان پالسی متناسب با زیاد شدن زمان استراحت در چرخه، جبهه رطوبتی پهن‌تر و حرکت افقی آن بیش‌تر بود. بنابراین باتوجه به آن می‌توان قطره‌چکان‌ها را در فاصله‌ی دورتر از هم قرار داد. نوروزیان و همکاران (۱۳۹۵) در پژوهشی با انجام آزمایشات مزرعه‌ای تأثیر لایه‌ای بودن خاک و شیب دار بودن اراضی را بر الگوی توزیع رطوبت خاک در سامانه آبیاری قطره‌ای با کاربرد زیرسطحی بررسی کردند. آنان برای شبیه‌سازی از نرم‌افزار هایدروس دو بعدی (HYDRUS-2D) استفاده نمودند. نتایج نشان داد که نیمرخ رطوبتی به وجود آمده در اراضی شیب‌دار با نیمرخ به وجود آمده در خاک‌های مسطح با زیاد شدن مدت زمان آبیاری، مطابقت بیش‌تری داشت. همچنین نتایج حاصل از شبیه‌سازی با نرم‌افزار هایدروس قابلیت خوب این برنامه را نشان داد.

۲. مطالعات خارج از کشور

کریمی و همکاران^۷ (۲۰۲۲) به مدل‌سازی الگوی خیس‌شدگی در زمان توزیع مجدد تحت سامانه آبیاری قطره‌ای سطحی و زیرسطحی با کاربرد پالسی پرداختند و نتایج تحقیق نشان داد که مدل‌های تجربی (با در نظر گرفتن فاکتورهای مهم طراحی) عملکرد

^۱ Shu et al

^۲ Skaggs et al

^۳ Jamei et al

^۴ Karimi et al

^۵ Kilic

^۶ Solat et al

مناسبی در زمینه مدل‌سازی دارند. کریستول مونز و همکاران^۱ (۲۰۲۲) یک مدل تجربی برای تخمین عرض و عمق جبهه مرطوب در آبیاری قطره‌ای سطحی، بر اساس آزمایش‌های تجربی در ظرف مکعبی شکل با دیواره‌های شفاف در خاک‌هایی با بافت لومی رسی شنی، ارائه دادند. نتایج نشان‌دهنده این بود که مدل تولید شده کارآمد و ساده بوده و می‌تواند ابزار بسیار مفیدی برای طراحی و بهره‌برداری از سامانه‌های آبیاری قطره‌ای سطحی در خاک‌هایی با شرایط مشابه با این مطالعه باشد. آشر و همکاران^۲ (۲۰۲۲) طی پژوهشی به آزمایش یک مدل بسیار ساده بر اساس فرمول هندسی یک کره و مقایسه آن با حل‌های عددی دقیق و آزمایش‌های میدانی، جهت الگوی خیس شدن خاک در این سامانه، پرداختند. داده‌های تولید شده توسط این شبیه‌سازی با موفقیت با مدل‌های تحلیلی و نتایج عددی لوم رسی پانوش مقایسه شد. نتایج نشان دادند که نفوذ از یک منبع قطره‌ای چکه‌ای می‌تواند با تقارن شعاعی گروه ساده علاوه بر شبیه‌سازی‌های تحلیلی یا عددی توصیف شود. صولت و همکاران^۳ (۲۰۲۱) به ارزیابی الگوی جبهه پیشروی رطوبت در آبیاری قطره‌ای زیرسطحی با جریان پیوسته و پالسی پرداختند. نتایج بیان داشت که در سامانه آبیاری قطره‌ای زیرسطحی با جریان پالسی با افزایش زمان استراحت در هر چرخه، نیاز رطوبتی گسترده‌تر شده و جبهه پیشروی رطوبت به‌طور افقی بیش‌تر حرکت می‌کند. همچنین، مشخص شد که در سامانه آبیاری قطره‌ای با کاربردهای پیوسته و پالسی، با حجم آب مساوی، توزیع افقی جبهه پیشروی رطوبت در دبی‌های کم نسبت به دبی‌های زیاد بیش‌تر است. بیش‌ترین عمق خیس‌شدگی در خاک با بافت سبک مربوط به دبی‌های بالا و در خاک با بافت سنگین مربوط به دبی‌های پایین مشاهده شد. صولت و همکاران^۳ (۲۰۲۱) به بررسی و مدل‌سازی الگوی خیس‌شدگی در اراضی شیب‌دار پرداختند. در این تحقیق مدل‌های تجربی و مدل‌های عددی مورد ارزیابی قرار گرفتند و نتایج تحقیق نشان داد که هر دو مدل عملکرد قابل قبولی در تخمین الگوی خیس‌شدگی دارند. همچنین عملکرد مدل تجربی در مقایسه با مدل عددی هایدروس به نسبت بهتر بود. بن-کیسی و همکاران^۴ (۲۰۲۱) برای ارزیابی فرآیند توزیع مجدد رطوبت در سامانه‌های آبیاری قطره‌ای پیوسته و پالسی، در دو حالت جریان سطحی و زیرسطحی، آزمایش‌هایی با بهره‌گیری از یک روش نوین یادگیری ماشین انجام گرفت. در این مطالعه، مدل‌سازی توزیع مجدد جبهه رطوبتی بر اساس پارامترهای مربوط به خاک و سامانه آبیاری، به‌عنوان ورودی‌های مدل، مورد بررسی قرار گرفت. هدف اصلی، تحلیل رفتار جبهه رطوبتی تحت شرایط مختلف آبیاری (پیوسته و پالسی) در سامانه‌های سطحی و زیرسطحی به‌منظور بهبود دقت پیش‌بینی و مدیریت بهینه منابع آب بود. نتایج روش ارزیابی شده و با نتایج شبکه‌های عصبی رگرسیون تعمیم یافته و خطوط رگرسیون تطبیقی چند متغیره، مقایسه شد. یافته‌ها نشان داد که روش نوین به‌کاررفته، (یادگیری ماشین) دقت بالاتری در تخمین ابعاد جبهه مرطوب دارد و به‌عنوان یک ابزار کارآمد در مدل‌سازی سامانه‌های آبیاری قطره‌ای قابل توصیه است. با توجه به مطالب گفته شده در بالا مشخص می‌گردد، شیری و همکاران^۴ (۲۰۲۰) در تحقیقی به مدل‌سازی نیاز رطوبتی تحت سامانه آبیاری پیوسته و پالسی پرداختند و نتایج این تحقیق نشان داد که مدل‌های شبکه عصبی مصنوعی با در نظر گرفتن سناریوهای مختلف تخمین دقیقی از ابعاد خیس شده نیاز رطوبتی دارند. مطالعات متعددی که در زمینه مدل‌سازی نیاز رطوبتی به انجام رسیده است، جمع‌بندی کلی تحقیقات صورت گرفته نشان می‌دهد مدل‌های تجربی عملکرد مناسبی در زمینه مدل‌سازی نیاز رطوبتی دارند و همچنین کاربرد این مدل‌ها برای اهداف طراحی (در مقایسه با سایر مدل‌های موجود) بسیار آسان‌تر می‌باشند. همچنین از مطالعات صورت گرفته مشخص می‌گردد که تحقیقات بسیار اندکی در زمینه خاک‌های لایه ای به انجام رسیده است. از آنجائی که خاک‌های زراعی در اثر فعالیت‌های کشاورزی نظیر

^۱ Cristóbal-Muñoz et al^۲ Asher et al^۳ Ben- Kisi et al^۴ Shiri et al

خاک‌ورزی، افزودن خاک، فعالیت ریزجانداران و فعالیت ریشه گیاهان به دولایه با چگالی‌های مختلف تبدیل می‌گردند، به‌نجوی که لایه بالایی دارای بافت با خصوصیات فیزیکی متفاوت، در مقایسه با لایه پائینی است. بدین جهت مطالعه الگوی خیس‌شدن خاک توسط قطره‌چکان‌ها در خاک‌های دولایه می‌تواند موجب افزایش دقت تعیین ابعاد نیاز رطوبتی و بهبود عملکرد سامانه‌های آبیاری قطره‌ای گردد (جامعی و همکاران، ۲۰۲۵).

باتوجه به اهمیت مدیریت بهینه آب در کشاورزی و وجود خاک‌های دولایه در بسیاری از مناطق، این پژوهش باهدف شبیه‌سازی حرکت رطوبت در این نوع خاک‌ها تحت آبیاری قطره‌ای سطحی با جریان پیوسته انجام شد. برای این منظور، از مدل‌های رگرسیونی غیرخطی و داده‌های حاصل از آزمایش‌های آزمایشگاهی استفاده شد.

روش پژوهش

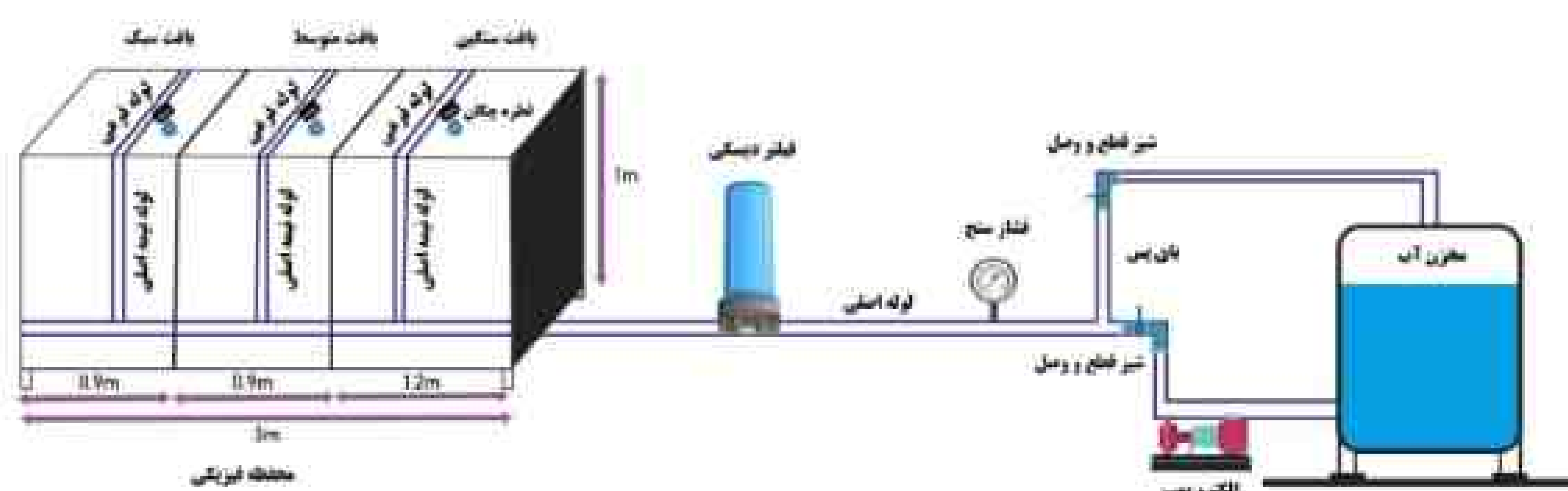
۱. مشاهدات آزمایشگاهی

به‌منظور ارزیابی توزیع و توزیع مجدد رطوبت و بررسی اثر لایه‌ای بودن خاک‌ها بر جبهه پیشروی رطوبتی آب در خاک در سامانه آبیاری قطره‌ای، پژوهشی، در تابستان سال ۱۳۹۸ در آزمایشگاه علوم تحقیقاتی گروه علوم و مهندسی آب دانشگاه کردستان اجرا گردید. بدین منظور یک مدل فیزیکی متشکل از شیشه شفاف به شکل مکعب مستطیل با طول ۳ متر، عرض ۰/۵ متر و ارتفاع ۱ متر باهدف شبیه‌سازی نیاز رطوبتی آبیاری قطره‌ای سطحی در مزرعه ساخته شد (شکل ۱). طراحی و ساخت مدل آزمایشگاهی به‌گونه‌ای بود که هر قسمت آن مربوط به یک نوع بافت خاک بود. بنا به این دلیل که توزیع افقی جبهه پیشروی آب در خاک‌های سنگین بافت بیش‌تر است. در نتیجه محفظه با بیش‌ترین طول (۱/۲ متر) به خاک سنگین بافت اختصاص داده شد و برای خاک‌های با بافت متوسط و سبک هر کدام محفظه با طول ۰/۹ متر در نظر گرفته شد (کریمی و صولتی، ۱۳۹۹). محفظه مدل شفاف است که به سه قسمت مجزای تفکیک‌شده بود تا امکان انجام هم‌زمان سه آزمایش برای هر سه بافت خاک فراهم باشد. همچنین با آغشته کردن دیوار داخلی مدل به چسب شفاف و پراکندن شن استاندارد زیر بر روی آن یک دیواره زیر ایجاد گردید تا بدین سبب از پیداشدن و ایجاد جریان‌های ترجیحی^۱ در زمان انجام آزمایش‌ها جلوگیری گردد. هدف از شفاف‌بودن محفظه جلویی برای دیدن فازهای پیشروی رطوبتی آب در خاک بود. این مطالعه و آزمایش‌ها به‌گونه‌ای برنامه‌ریزی و طراحی شد که تا حدود بسیار زیادی بتواند شرایط واقعی یک سامانه آبیاری قطره‌ای در مزارع را شبیه‌سازی کند. از این رو آب به‌وسیله یک پمپ افقی خشک (SQB-60, Stream, China) و از طریق لوله‌های پلی‌اتیلن (لوله اصلی با قطر ۳۲ میلی‌متر و همچنین لوله نیمه‌اصلی و فرعی به ترتیب با قطرهای ۲۰ و ۱۶ میلی‌متر) از یک مخزن پلاستیکی به حجم ۲۰۰ لیتری به قطره‌چکان‌ها منتقل گردید. همچنین به‌منظور ثابت نگه‌داشتن آب در مخزن یک شناور داخل آن تعبیه شد. به‌منظور جلوگیری از گرفتگی قطره‌چکان‌ها و عدم یکنواختی پخش، یک فیلتر دیسکی بعد از پمپ قرار داده شد. به‌منظور هدایت درست جریان آب در مسیر انتقال از یک شیرفلکه و یک شیر قطع و وصل جریان آب برای کنترل جریان آب به داخل هر محفظه استفاده گردید. به‌منظور ثابت نگه‌داشتن فشار به جهت ایجاد یکنواختی پخش آب یک فشارسنج قبل از فیلتر دیسکی روی سامانه تعبیه شد. همه آزمایش‌ها در فشار ثابت ۲۰ متر صورت گرفت و چون میزان دبی خروجی بسیار کمبود، جهت کاهش فشار وارد شده به سامانه از یک لوله کنارگذر استفاده شد. در این پژوهش، سه دبی اولیه قطره‌چکان شامل ۲، ۴ و ۶ لیتر در ساعت انتخاب گردید. دبی‌های ۲ و ۴ لیتر در ساعت به‌عنوان مقادیر رایج در سامانه آبیاری قطره‌ای در نظر گرفته شدند و دبی ۶ لیتر در ساعت از طریق قرار دادن دو قطره‌چکان (با دبی‌های ۲ و ۴ لیتر در ساعت) به‌صورت هم‌زمان و در کنار یکدیگر تأمین شد. با این حال، نتایج حاصل از اندازه‌گیری‌های میدانی نشان داد که دبی واقعی قطره‌چکان با برچسب ۲ لیتر در ساعت، برابر با ۲/۴ لیتر در ساعت است. براین اساس، دبی‌های نهایی مورد استفاده در آزمایش شامل ۲/۴، ۴ و

¹ Preferential Flows

۶/۴ لیتر در ساعت بودند. این دبی‌ها به‌عنوان تیمارهای اصلی در سامانه آبیاری قطره‌ای تحت جریان پیوسته سطحی در سه نوع بافت خاک (سبک، متوسط و سنگین) به کار گرفته شدند.

خصوصیات فیزیکی خاک مورد استفاده در آزمایش‌ها در جدول (۱) ارائه شده است. توضیح این که در مورد انتخاب بافت خاک و نوع قطره‌چکان سعی شد که با انتخاب سه بافت خاک (سبک، متوسط و سنگین) بتوان تا حد زیادی نتایج مطالعه را به همه بافت‌ها تا حد امکان ربط داد. در خصوص انتخاب نوع قطره‌چکان با توجه به این که قطره‌چکان‌هایی که کشاورزان در منطقه مورد استفاده قرار می‌دهند، قطره‌چکان‌های تنظیم‌شونده (تنظیم) است. در این مطالعه از این نوع قطره‌چکان مورد استفاده قرار گرفت. به‌منظور ارزیابی ضریب یکنواختی توزیع (CU) و ضریب تغییرات ساخت (CV) قطره‌چکان‌های موجود در سامانه آبیاری قطره‌ای مذکور، ابتدا تعدادی از این قطره‌چکان‌ها را به‌طور تصادفی انتخاب کرده و در شرایط آزمایشگاهی با فشار ثابت نصب شد. سپس، حجم آب خروجی هر قطره‌چکان را در بازه زمانی مشخص اندازه‌گیری کرده و با محاسبه دبی متوسط ($\bar{Q}$) و انحراف معیار (σ) دبی‌ها، ضریب تغییرات ساخت از رابطه $CV = (\sigma / \bar{Q}) \times 100$ محاسبه گردید. در نهایت، ضریب یکنواختی توزیع با استفاده از رابطه $CU = (1 - CV) \times 100$ محاسبه شد. جدول (۲) مشخصات فنی و هیدرولیکی قطره‌چکان مورد مطالعه را نشان می‌دهد.



شکل ۱. مدل آزمایشگاهی و تجهیزات به‌کاررفته

جدول ۱. مشخصات فیزیکی خاک مورد استفاده

نمونه خاک	درصد رس	درصد سیلت	درصد شن	بافت خاک	هدایت هیدرولیکی اشباع ($cm\ h^{-1}$)	چگالی ظاهری ($g\ cm^{-3}$)
سنگین	۵۰	۳۶/۴	۱۵/۶	شن - رس	۰/۵۴۶	۱/۲۵
متوسط	۱۴/۲	۲۵/۷	۶۰	شن - رس - لوم	۱/۲۹۰	۱/۴۵
سبک	۱۱/۲	۹/۶	۷۹/۲	شن - لوم	۳/۰۳۲	۱/۵۵

جدول ۲. مشخصات فنی و هیدرولیکی قطره‌چکان مورد استفاده

پارامتر	دبی ۲ (لیتر در ساعت)	دبی ۴ (لیتر در ساعت)
ضریب یکنواختی توزیع (درصد)	۹۸	۹۹
درصد ضریب تغییرات ساخت قطره‌چکان	۰/۰۳۲	۰/۰۱۲

۲. نحوه انجام آزمایش‌ها

نحوه انجام آزمایش‌ها بدین صورت بود که ابتدا برای تهیه خاک‌های موردنظر به‌منظور انجام آزمایش‌ها دو نوع خاک با بافت‌های متفاوت تهیه گردید و به‌منظور خشک کردن، در هوای آزاد و در معرض تور خورشید قرار داده شد سپس برای فراهم آوردن

سه نوع بافت خاک متفاوت خاک‌های تهیه شده برای ایجاد بافت‌های مختلف خاک، درصدهای معینی از ماسه‌بادی با سایر اجزا ترکیب گردید. این ترکیب‌ها بر اساس نسبت‌های رایج برای خاک‌های شنی، لومی و رسی تنظیم گردید. به طور دقیق، خاک سبک (شن-رسی) با نسبت ماسه‌بادی تقریباً سه برابر رس، خاک متوسط (شن-لومی) با نسبت ماسه‌بادی حدود دو برابر رس، و خاک سنگین (رسی) با نسبت ماسه‌بادی کم‌تر از یک سوم رس تهیه شدند. جهت دستیابی به یک توزیع تراکمی یکنواخت و برابر با تراکم طبیعی خاک (۱/۳ گرم در سانتی‌متر مکعب)، خاک آماده شده در مدل موردنظر، به صورت لایه‌های متوالی، لایه زیرین با ضخامت ۸۰ و لایه بالایی با ضخامت ۲۰ سانتی‌متری در مدل قرار گرفت. این روش، با توجه به تأثیر مستقیم تراکم بر حرکت آب در خاک و شکل‌گیری پیاز رطوبتی، برای شبیه‌سازی دقیق‌تر شرایط میدانی در آزمایش انتخاب شد. پس از اتمام هر آزمایش خاک داخل هر محفظه بیرون آورده شد و آن را جهت خشک کردن مثل حالت اول در معرض نور خورشید و هوای آزاد قرار داده تا برای آزمایش بعدی مهیا گردد. در نهایت پس از حصول اطمینان از خشک شدن کامل نمونه‌های خاک، مجدداً به صورت لایه‌های مجزا با رعایت تراکم مشابه شرایط پیشین، به محفظه‌های مربوطه منتقل گردید. در این آزمایش قطره‌چکان‌ها در روی سطح سه نوع بافت خاک در ۶ نیم‌رخ خاک دولایه قرار داده شدند در جدول (۳) نیم‌رخ‌های لایه‌بندی خاک ارائه شده است. مدت زمان آبیاری در همه تیمارها ۸ ساعت بود. همچنین مطابق شکل (۲) با مدرج نمودن مدل فیزیکی آزمایشگاهی و ترسیم جبهه پیشروی رطوبتی بر روی صفحه شفاف پلکسی‌گلاس^۱ (در این آزمایش، پلکسی‌گلاس که از یک ماده ترموپلاستیک شفاف و سخت است به عنوان واسطه بصری در مدل فیزیکی استفاده گردید تا امکان رصد و ثبت تغییرات جبهه پیشروی رطوبت در محیط خاک فراهم آید)، توزیع و توزیع مجدد جبهه پیشروی رطوبتی در دو راستای عمودی و افقی در زمان‌های مختلف آبیاری مورد بررسی قرار گرفت. در پایان هر آزمایش از جبهه پیشروی رطوبتی آب عکس‌هایی تنظیم می‌گردید که با استفاده از نرم‌افزار گرافر^۲ مختصات همه نقاط جبهه پیشروی رطوبتی برآورد می‌گردید و سپس با داشتن مختصات همه نقاط و استفاده از نرم‌افزار اکسل جبهه پیشروی پیاز رطوبتی در فاز توزیع و توزیع مجدد در زمان‌های مختلف برای آبیاری قطره‌ای با جریان پیوسته سطحی انجام شده محاسبه گردید.

جدول ۳. نیم‌رخ لایه‌بندی خاک

تیمار	L_1	L_2	L_3	L_4	L_5	L_6
لایه بالایی (بافت)	متوسط	متوسط	سنگین	سبک	سبک	سبک
لایه زیرین (بافت)	سنگین	سبک	متوسط	سبک	متوسط	سنگین



شکل ۲. نمایی از ترسیم جبهه پیشروی رطوبتی آب در خاک

¹ Plexiglass² Grapher

۳. الگوی رگرسیون غیرخطی

به‌منظور شبیه‌سازی و استفاده از داده‌های حاصل از ترم‌افزار گرافر جهت پیش‌بینی جبهه پیشروی رطوبت آب در زمان آبیاری، در سامانه آبیاری قطره‌ای سطحی با کاربرد آبیاری پیوسته در گام توزیع، مدل‌های تجربی جهت تخمین ابعاد پياز رطوبتی ارائه گردید. همچنین عوامل تأثیرگذار در این مدل‌ها وابسته به خصوصیات فیزیکی خاک و خصوصیات فنی و هیدرولیکی قطره‌چکان است. فرم معادلات ارائه شده به‌صورت روابط (۱) و (۲) ارائه می‌گردد (ویسمن^۱، ۲۰۰۳).

$$D_h = c_1 \cdot t^{c_2} \cdot Q^{c_3} \cdot \left(\frac{Ks_1}{Ks_2}\right)^{c_4} \cdot \left(\frac{\rho_{b1}}{\rho_{b2}}\right)^{c_5} \cdot \left(\frac{\theta_{01}}{\theta_{02}}\right)^{c_6} \cdot \left(\frac{S1_1}{S1_2}\right)^{c_7} \cdot \left(\frac{C_1}{C_2}\right)^{c_8} \cdot \left(\frac{S_1}{S_2}\right)^{c_9} \cdot \left(\frac{T_{on}}{T_{tot}}\right)^{c_{10}} \quad (1)$$

$$D_v = c_1 \cdot t^{c_2} \cdot Q^{c_3} \cdot \left(\frac{Ks_1}{Ks_2}\right)^{c_4} \cdot \left(\frac{\rho_{b1}}{\rho_{b2}}\right)^{c_5} \cdot \left(\frac{\theta_{01}}{\theta_{02}}\right)^{c_6} \cdot \left(\frac{S1_1}{S1_2}\right)^{c_7} \cdot \left(\frac{C_1}{C_2}\right)^{c_8} \cdot \left(\frac{S_1}{S_2}\right)^{c_9} \cdot \left(\frac{T_{on}}{T_{tot}}\right)^{c_{10}} \quad (2)$$

D_h و D_v به ترتیب توزیع جبهه رطوبتی افقی و عمودی پائین قطره‌چکان‌ها (بر حسب سانتی‌متر)، $c_1, c_2, \dots, c_{11}$ ضرایب تجربی معادلات، D_i قطره‌چکان Q (بر حسب لیتر در ساعت)، Ks_1 و Ks_2 به ترتیب هدایت هیدرولیکی اشباع لایه بالایی و لایه زیرین (بر حسب سانتی‌متر در ساعت)، t زمان کاربرد آبیاری و زمان توزیع مجدد رطوبت (بر حسب دقیقه)، $S1_i$ درصد سیلت، C درصد رس و S درصد شن، ρ_b چگالی ظاهری (گرم در سانتی‌مترمکعب) و θ_0 رطوبت اولیه خاک (بر حسب درصد جرمی) و $\left(\frac{T_{on}}{T_{tot}}\right)$ نسبت زمان آبیاری در یک چرخه به زمان کل چرخه در سامانه آبیاری است و از آن‌جا که در آبیاری پیوسته فرآیند آبیاری بدون وقفه انجام می‌شود، این نسبت برابر با ۱ است.

۴. الگوی پیشنهادی در گام توزیع مجدد جبهه پیشروی رطوبتی آب در خاک‌های دولایه

وضع پياز رطوبتی در گام توزیع مجدد رطوبتی که بعد از قطع جریان آب است دارای تفاوت کم با توزیع رطوبتی هنگام آبیاری است. تنها تفاوت این دو گام (فاز) رطوبتی به حجم آب کاربردی است که در زمان آبیاری به خاک انتقال داده می‌شود. در این قسمت نیز عوامل مؤثر از قبیل خصوصیات فیزیکی خاک و قطره‌چکان است (ویسمن^۱، ۲۰۰۳).

$$D_h = c_1 \cdot t^{c_2} \cdot Q^{c_3} \cdot \left(\frac{Ks_1}{Ks_2}\right)^{c_4} \cdot \left(\frac{\rho_{b1}}{\rho_{b2}}\right)^{c_5} \cdot \left(\frac{\theta_{01}}{\theta_{02}}\right)^{c_6} \cdot \left(\frac{S1_1}{S1_2}\right)^{c_7} \cdot \left(\frac{C_1}{C_2}\right)^{c_8} \cdot \left(\frac{S_1}{S_2}\right)^{c_9} \cdot \left(\frac{T_{on}}{T_{tot}}\right)^{c_{10}} \cdot V^{c_{11}} \quad (3)$$

$$D_v = c_1 \cdot t^{c_2} \cdot Q^{c_3} \cdot \left(\frac{Ks_1}{Ks_2}\right)^{c_4} \cdot \left(\frac{\rho_{b1}}{\rho_{b2}}\right)^{c_5} \cdot \left(\frac{\theta_{01}}{\theta_{02}}\right)^{c_6} \cdot \left(\frac{S1_1}{S1_2}\right)^{c_7} \cdot \left(\frac{C_1}{C_2}\right)^{c_8} \cdot \left(\frac{S_1}{S_2}\right)^{c_9} \cdot \left(\frac{T_{on}}{T_{tot}}\right)^{c_{10}} \cdot V^{c_{11}} \quad (4)$$

در این معادلات V حجم آب آبیاری (حجم آب کاربردی) بر حسب لیتر است.

۵. معیارهای ارزیابی

برای ارزیابی و اعتبارسنجی مدل‌ها، شاخص‌های آماری ریشه میانگین مربعات خطا ($RMSE$)، ضریب تبیین (R^2)، میانگین خطای مطلق (MAE) و ضریب جرم باقی‌مانده (CRM) به ترتیب از روابط (۵) تا (۸) مورد استفاده قرار گرفتند (جامعی و همکاران، ۲۰۲۲a).

$$R^2 = \frac{\sum_{i=1}^N (O_i - \bar{O})(P_i - \bar{P})}{\sqrt{\sum_{i=1}^N (O_i - \bar{O})^2 \sum_{i=1}^N (P_i - \bar{P})^2}} \quad (5)$$

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N (O_i - P_i)^2}{N}} \quad (6)$$

$$MAE = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N |O_i - P_i| \quad (7)$$

¹ Viessman

$$CRM = 1 - \left(\sum_{i=1}^N P_i / \sum_{i=1}^N O_i \right) \quad (8)$$

که در آن‌ها O_i و $\bar{O}$ به ترتیب مقادیر مشاهداتی و میانگین مقادیر مشاهداتی، P_i مقادیر پیش‌بینی شده، $\bar{P}$ میانگین مقادیر پیش‌بینی شده و N تعداد داده‌ها هستند.

آماره CRM کم برآوردی یا بیش‌آوردی مدل در مقایسه با داده‌های اندازه‌گیری شده را نشان می‌دهد که در این معادله مقادیر منفی نشان‌دهنده بیش‌برآوردی و مقادیر مثبت نشان‌دهنده کم برآوردی مدل بودند (وانگ و همکاران^۱، ۲۰۱۲).

یافته‌های پژوهش

در طراحی سامانه‌های آبیاری قطره‌ای، آگاهی از نحوه انتشار رطوبت در خاک نقش اساسی در تعیین فاصله و عمق بهینه لایرهای آبیاری می‌کند. این دانش نه تنها برای برآورد دقیق محل نصب لایرهای ضروری است، بلکه در برنامه‌ریزی و مدیریت مؤثر آبیاری نیز اهمیت بالایی دارد. این مطالعه الگوی گسترش رطوبت (پیرامون رطوبتی) در خاک‌های دارای لایه‌های مختلف، در دوفاز توزیع و توزیع مجدد رطوبتی، در دو جهت افقی و عمودی مورد مطالعه قرار گرفت. پارامترهای تجربی مدل‌های رگرسیون غیرخطی (۱) تا (۴) مطابق با فرمت آن‌ها ارزیابی شدند. به منظور شبیه‌سازی شکل کامل جبهه رطوبتی، در هر دوفاز توزیع و توزیع مجدد، در دو جهت افقی و عمودی با استفاده از داده‌های به دست آمده از مطالعات آزمایشگاهی و با استفاده از آنالیز رگرسیون غیرخطی (به کمک نرم‌افزار اکسل (*Toolbox Solver, 2010*) ضرایب تجربی معادلات بهینه شدند. نتایج حاصل از واسنجی مدل پیش‌روی جبهه رطوبتی و ضرایب تجربی برای مراحل توزیع و توزیع مجدد در هر دو جهت افقی و عمودی در جدول (۴) جهت آموزش مدل‌ها ارائه شده است. باتوجه به جدول (۴) نتایج مدل‌ها نشان داد که در زمان آبیاری (فاز توزیع) برای توزیع افقی (رابطه ۱)، ریشه میانگین مربعات خطا ($RMSE$) $5/934$ سانتی‌متر و خطای مطلق میانگین (MAE) آن $4/836$ سانتی‌متر بود. ضریب تعیین (R^2) نیز برابر با $0/856$ است. همچنین، خطای نسبت بندی شده (CRM) با مقدار $-0/0021$ نشان داد به‌طور کلی مدل در پیش‌بینی توزیع افقی، مقداری بیش از مقدار واقعی را برآورد کرد. در مقابل، برای توزیع عمودی (رابطه ۲)، $RMSE$ برابر با $4/669$ سانتی‌متر و MAE برابر با $3/522$ سانتی‌متر است. R^2 نیز برابر با $0/884$ است. مقدار مثبت CRM که برابر با $0/0034$ است نشان می‌دهد که مدل در پیش‌بینی توزیع عمودی، مقداری کم‌تر از مقدار واقعی را برآورد کرده است. بررسی‌های آماری نشان می‌دهد که مدل پیشنهادی در پیش‌بینی توزیع مجدد رطوبت خاک (قطع آبیاری)، باتوجه به جهت (افقی یا عمودی) (روابط ۳ و ۴)، و بافت خاک، عملکرد متفاوتی دارد. بر اساس نتایج تحلیل، ریشه میانگین مربعات خطا ($RMSE$) برای پیش‌بینی توزیع رطوبت در جهت افقی و عمودی به ترتیب $8/879$ و $8/031$ سانتی‌متر محاسبه شد. همچنین، خطای مطلق میانگین (MAE) نیز به ترتیب $7/309$ و $7/001$ سانتی‌متر تعیین گردید. ضریب تعیین (R^2) به دست آمده برای توزیع افقی و عمودی به ترتیب $0/524$ و $0/798$ بوده که نشان‌دهنده تطابق نسبی مدل با داده‌های مشاهده‌ای، به‌ویژه در جهت عمودی است. علاوه بر این، خطای نسبت بندی شده (CRM) نشان می‌دهد که مدل در پیش‌بینی توزیع مجدد افقی تمایل به بیش‌برآوردی و در پیش‌بینی توزیع مجدد عمودی تمایل به کم برآوردی دارد. بر اساس نتایج حاصله، مدل رگرسیون غیرخطی به کار رفته، در شبیه‌سازی توزیع رطوبت خاک در زمان آبیاری عملکرد مطلوب‌تری نسبت به مرحله توزیع مجدد (پس از قطع آبیاری) نشان داد. این اختلاف، به‌ویژه در خاک‌های دولایه به دلیل تفاوت در ویژگی‌های فیزیکی (مانند نفوذپذیری، چگالی ظاهری و رطوبت اولیه خاک) مشهودتر است. زیرا جایی که رطوبت به لایه دوم نفوذ کرده باشد، تغییراتی در سرعت حرکت جبهه رطوبتی و عمق نفوذ آب در محل اتصال دولایه ایجاد می‌کند. کاهش سرعت حرکت آب در لایه‌های با نفوذپذیری کم‌تر یا چگالی بیش‌تر، نشان‌دهنده تأثیر مستقیم ویژگی‌های خاک بر رفتار آب است. در نتیجه، برای شبیه‌سازی دقیق‌تر توزیع رطوبت در مرحله توزیع مجدد، به‌ویژه در خاک‌های دولایه، عوامل پیچیده‌تری در زمان توزیع مجدد رطوبت دخیل هستند که مدل فعلی قادر به پوشش کامل آن‌ها نیست. در این مطالعه، باتوجه به وجود روابط تجربی

¹ Wang et al

برای نحوه پیش‌بینی جبهه رطوبتی در خاک‌های ناهمگن، ابزار مناسبی در اختیار طراحان قرار گرفته تا بتوانند درک دقیق‌تری از رفتار رطوبت در خاک به دست آورده و سامانه آبیاری را متناسب با نیازهای آبی گیاه در مراحل مختلف رشد تنظیم کنند. این رویکرد موجب بهینه‌سازی مصرف آب و ارتقای عملکرد سامانه آبیاری می‌شود.

جدول ۴. ضرایب تجربی الگوی پیشروی رطوبتی و شاخص‌های آماری در فاز توزیع (روابط ۱ و ۲) و توزیع مجدد (روابط ۳ و ۴)

رطوبتی				
روابط تجربی مدل‌ها	رابطه (۱)	رابطه (۲)	رابطه (۳)	رابطه (۴)
$C1$	۷/۸۵۲	۱/۵۰۷	۲۰/۸۳۱	۴/۹۷۷
$C2$	-۰/۳۷۶	-۰/۳۹۶	-۰/۰۴۶	-۰/۰۴۲
$C3$	-۰/۲۱۸	-۰/۵۷۲	-۰/۰۰۱	-۰/۰۰۵
$C4$	-۰/۰۰۰	۲۶/۰۱۶	-۰/۰۰۰	۲۵/۰۶۱
$C5$	-۰/۰۰۰	۷/۷۵-۸	-۰/۱۵۷	-۰/۰۷۵
$C6$	۱/۳۷۴	۱۵/۰۷۸	-۰/۰۰۰	۱۴/۷۴۷
$C7$	۲/۸۵۲	۱۶/۸۷۲	-۰/۲۰۹	۱۶/۰۵۳
$C8$	۴۲/۷۰۰	-۰/۰۰۰	-۰/۰۰۱	-۰/۰۰۰
$C9$	-۰/۰۰۰	-۰/۵۵۲	-۰/۰۰۰	-۰/۳۷۲
$C10$	-۰/۴۴	۱۷/۲۲	-۰/۲۵۹	-۰/۶۱۵
$C11$	-	-	-۰/۰۵۴۱	۱/۴۲۲
R^2	-۰/۸۵۶	-۰/۸۸۴	-۰/۵۲۴	-۰/۷۹۸
$RMSE (cm)$	۵/۹۳۴	۴/۶۶۹	-۰/۸۷۹	۸/۰۳۱
$MAE (cm)$	۴/۸۲۶	۲/۵۲۲	۷/۳۰۹	۷/۰۰۱
CRM	-۰/۰۰۳۱	-۰/۰۰۲۴	-۰/۰۰۰۷	-۰/۰۰۲۸

در گام بعدی به‌منظور ارزیابی عملکرد مدل‌ها در شرایط مختلف (توزیع و توزیع مجدد) رطوبتی، با استفاده از داده‌های ورودی تمامی تیمارها، ضرایب معادلات مدل‌ها تعیین شد و سپس برای هر تیمار، شبیه‌سازی مستقل انجام گرفت.

۱. شبیه‌سازی توزیع افقی و عمودی تیمارهای مختلف در زمان آبیاری

جدول (۵)، شاخص‌های آماری محاسبه‌شده توزیع افقی و عمودی جبهه پیشروی رطوبتی با مدل رگرسیون غیرخطی خاک دولایه به ازای دبی‌های مختلف در زمان آبیاری را نشان می‌دهد. در مدل پیشنهادی مقادیر خطای MAE برای پیش‌بینی توزیع پیشروی افقی از ۲/۸۲ تا ۶/۸۰ سانتی‌متر متغیر است درحالی‌که این مقادیر جهت پیش‌بینی توزیع پیشروی عمودی بین بازه ۲/۰۱ تا ۵/۷۹ سانتی‌متر متغیر است. همچنین نتایج ارزیابی مدل پیشنهادی حاکی از آن است که خطای $RMSE$ در محورهای افقی و عمودی به ترتیب در محدوده‌ی ۳/۴۱ تا ۸/۴۸ و ۲/۵۶ تا ۷/۴۰ سانتی‌متر است. علاوه بر این مقادیر R^2 برای مدل پیشنهادی در راستای افقی بین ۰/۸۵۳ تا ۰/۹۹۱ و در راستای عمودی ۰/۸۵۱ تا ۰/۹۸۰ متغیر بود (ملک و پتر^۱، ۲۰۱۱). از طرفی دیگر در شکل (۳) مقایسه بین مقادیر اندازه‌گیری شده در مقایسه با مقادیر شبیه‌سازی شده (با خط نیم‌ساز ۱:۱) نشان می‌دهد که مدل پیشنهادی عملکرد مناسبی در تخمین جبهه پیشروی توزیع در دو راستای افقی و عمودی را برای سامانه آبیاری قطره‌ای سطحی با جریان پیوسته را دارد. از طرفی نتایج پژوهش نشان داد که تیمار $HL6$ (توزیع افقی رطوبت در خاک با لایه‌های بالایی سبک و پایینی سنگین) با مقدار $RMSE$ ۸/۴۸ و MAE ۶/۸۰ سانتی‌متر و تیمار $HL4$ (توزیع افقی رطوبت در خاک با لایه‌های بالایی سبک و پایینی سنگین) با مقدار $RMSE$ ۳/۴۱ و MAE ۲/۸۲ به ترتیب از بیش‌ترین و کم‌ترین دقت برخوردار بودند و تیمارهای $VL5$ (توزیع عمودی رطوبت در خاک با لایه‌های بالایی سبک و پایینی متوسط) با مقدار $RMSE$ ۷/۴۰ و MAE ۵/۷۹ سانتی‌متر و تیمار $VL2$ (توزیع عمودی رطوبت در خاک با لایه‌های بالایی متوسط و پایینی سبک) با مقدار $RMSE$ ۲/۵۶ و MAE ۲/۰۱ سانتی‌متر به ترتیب بیش‌ترین و کم‌ترین دقت را در راستای عمودی داشتند. همچنین نتایج مدل نشان داد که تیمارهای ($HL3$ ، $HL5$ ، $HL1$ ، $VL3$ و $VL6$) و ($HL2$ ، $HL4$ ، $HL6$ ، $VL2$ و $VL5$) به ترتیب در شرایط کم برآوردی و بیش‌برآوردی

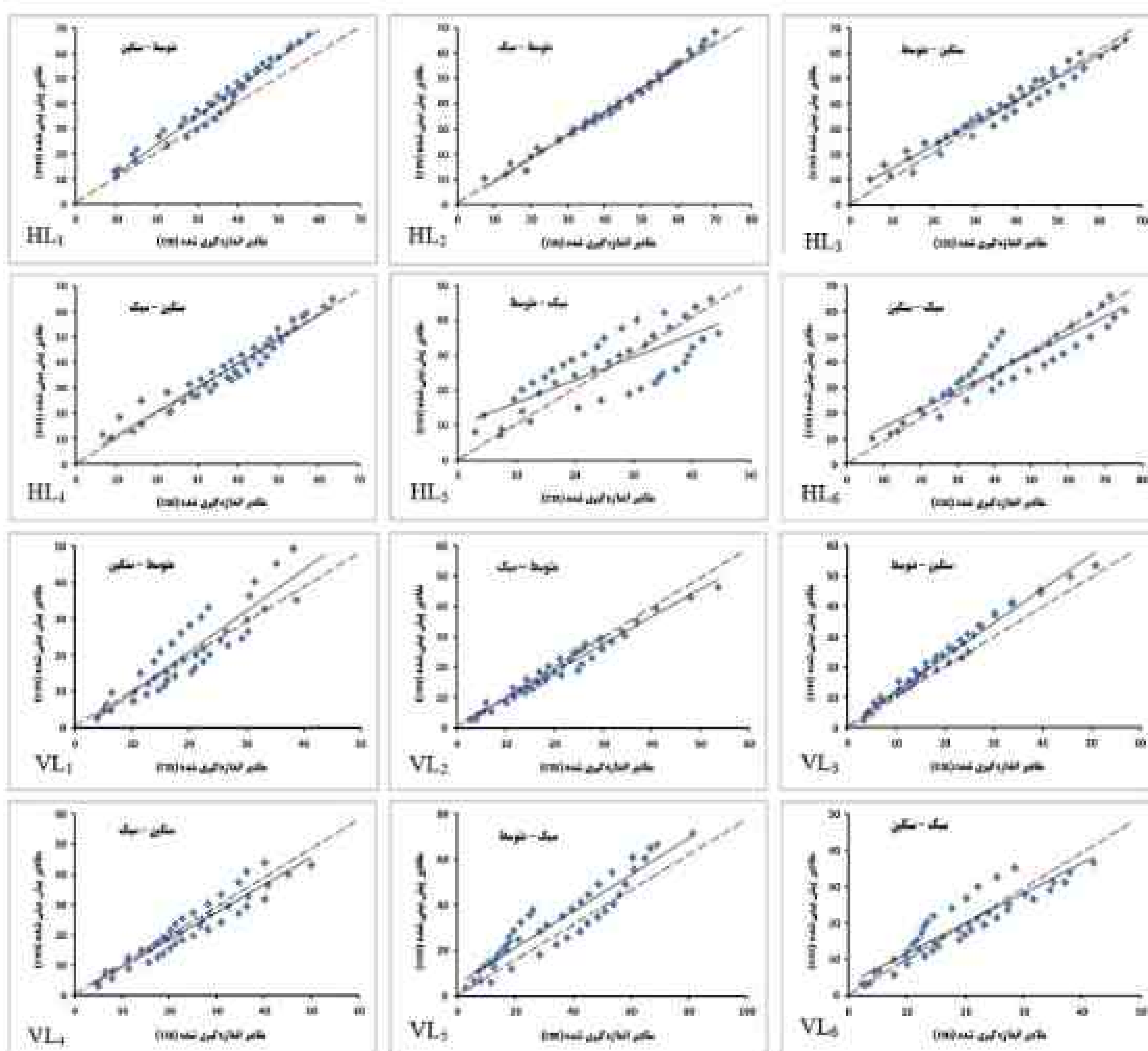
¹ Malek & Peters

قرار داشت. باتوجه‌به گزارش صمدیان‌فرد و همکاران (۲۰۱۲) نتایج حاصل از شاخص‌های آماری نشان‌دهنده عملکرد رضایت‌بخش مدل‌ها در پیش‌بینی رطوبت خاک در هر دو جهت افقی و عمودی، در مرحله توزیع آب، است (ملک و پتر، ۲۰۱۱). مقادیر شاخص‌های آماری به‌دست آمده در محدوده قابل قبولی قرار دارند با بهره‌گیری از این روابط، می‌توان شعاع مرطوب‌شدگی خاک دولایه را در هر لحظه زمانی پیش‌بینی کرده و از این طریق، بهینه‌سازی آبیاری گیاهانی با سامانه ریشه‌ای گسترده را امکان‌پذیر ساخت.

جدول ۵. شاخص‌های آماری محاسبه شده توزیع افقی و عمودی جبهه پیشروی رطوبتی برای تیمارهای مورد بررسی

تیمارها	R^2	RMSE (cm)	MAE (cm)	CRM
توزیع افقی رطوبت در نیمه‌های خاک (HL)				
HL ₁	۰/۹۶۵	۶/۵۳	۵/۷۵	-۰/۰۴۵۸
HL ₂	۰/۹۸۶	۲/۹۵	۲/۶۴	-۰/۰۶۹۱
HL ₃	۰/۹۹۱	۲/۷۵	۲/۴۲	-۰/۱۶۸۸
HL ₄	۰/۹۴۱	۲/۴۱	۲/۸۲	-۰/۰۷۴۸
HL ₅	۰/۹۳۱	۷/۴۴	۶/۵۹	-۰/۰۴۶۰
HL ₆	۰/۸۵۲	۸/۴۸	۶/۸۰	-۰/۳۴۰۷
توزیع عمودی رطوبت در نیمه‌های خاک (VL)				
VL ₁	۰/۸۵۱	۴/۸۴	۲/۷۰	-۰/۰۴۵۸
VL ₂	۰/۹۶۹	۲/۵۶	۲/۰۱	-۰/۰۶۹۱
VL ₃	۰/۹۷۷	۴/۰۰	۲/۲۹	-۰/۱۶۸۸
VL ₄	۰/۹۱۲	۲/۷۷	۲/۰۶	-۰/۰۷۴۸
VL ₅	۰/۸۷۷	۷/۴۰	۵/۷۹	-۰/۰۴۶۰
VL ₆	۰/۹۸۰	۵/۴۱	۵/۸۹	-۰/۳۴۰۷

HL₁ تا HL₆ به ترتیب نمایانگر توزیع افقی و VL₁ تا VL₆ توزیع عمودی رطوبت در نیمه‌های خاک لایه‌های بالایی و پایینی (شامل ترکیب‌های متوسط و سنگین، متوسط و سبک، سنگین و متوسط، سنگین و سبک، سبک و متوسط، سبک و سنگین) هستند.



شکل ۴. مقایسه مقادیر اندازه‌گیری و شبیه‌سازی توزیع پیشروی رطوبت در راستای افقی و عمودی و مقایسه با خط یک به یک (خط چین قرمز رنگ) برای تیمارهای مورد بررسی

۲. شبیه‌سازی توزیع افقی و عمودی تیمارهای مختلف پس از قطع جریان

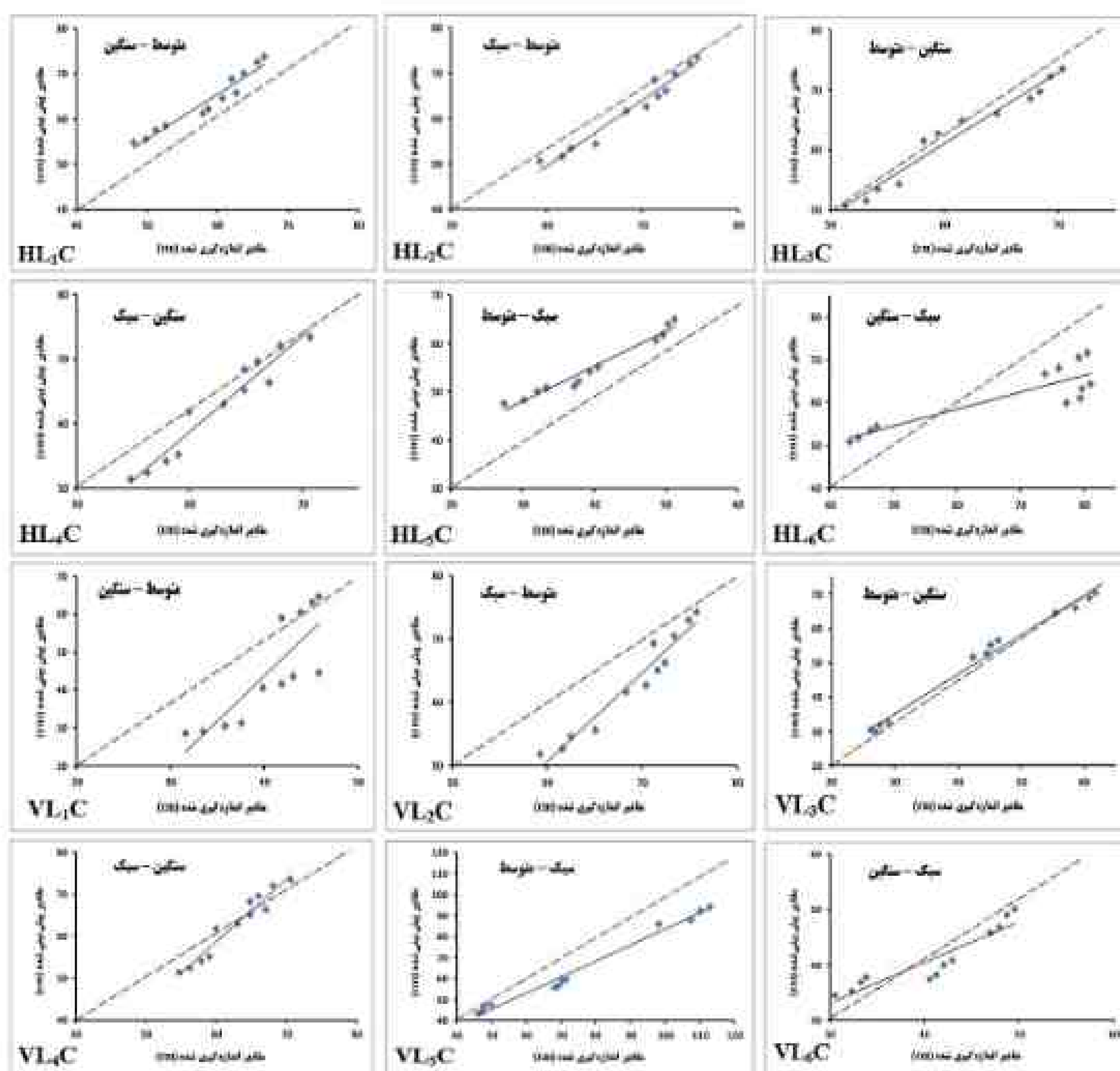
پس از انجام آبیاری و سپس قطع جریان، توزیع مجدد رطوبت اتفاق می‌افتد. در جدول (۶)، نتایج آنالیز آماری داده‌های مربوط به توزیع مجدد رطوبت در تیمارها در دو راستای افقی و عمودی ارائه گردیده است. عملکرد مدل‌ها در شبیه‌سازی توزیع مجدد افقی در تیمارهای مختلف با شاخص‌های آماری متفاوتی همراه بوده است. مقدار R^2 به‌دست‌آمده برای این مدل‌ها بین ۷۷/۴ تا ۹۶/۶ درصد بوده که نشان‌دهنده تطابق مناسب مدل‌ها با داده‌های مشاهده‌ای است. با این حال، مقادیر $RMSE$ و MAE که به ترتیب بین ۲/۳۱ تا ۱۱/۷۲ سانتی‌متر و ۲/۰۴ تا ۱۵/۳۰ سانتی‌متر متغیر بوده‌اند، نشان می‌دهد که مدل‌ها در برخی تیمارها با خطای بیش‌تری همراه بوده‌اند. همچنین، برخی مدل‌ها در برخی تیمارها (HL_1C و HL_3C و HL_4C) مقدار واقعی را بیش از حد برآورد کرده و در برخی دیگر کمتر از مقدار واقعی برآورد نموده‌اند (HL_2C و HL_5C و HL_6C). در میان تیمارها تیمار HL_3C (توزیع مجدد افقی رطوبت در خاک با لایه‌های بالایی سبک و پائینی متوسط) بیش‌ترین و تیمار HL_3C (توزیع مجدد افقی رطوبت در خاک با لایه‌های بالایی سنگین و پائینی متوسط) کم‌ترین شاخص خطاها را داشتند. ارزیابی مدل‌ها در فاز توزیع مجدد عمودی نشان داد که اگرچه مدل‌ها به‌طور کلی عملکرد خوبی داشته‌اند، اما میزان دقت آن‌ها در تیمارهای مختلف متفاوت بوده است. محدوده تغییرات خطای این مدل‌ها از نظر $RMSE$ بین ۳/۶۷ تا ۱۲/۱۸ سانتی‌متر و از نظر MAE بین ۳/۶۴ تا ۱۰/۳۶ سانتی‌متر بوده

است. همچنین مقدار R^2 برابر بازه ۰/۶۰ تا ۰/۹۸۷ بود. برخی مدل‌ها (VL_1C , VL_3C , VL_4C و VL_6C) در حالت بیش‌برآوردی و برخی دیگر (VL_2C و VL_5C) در حالت کم برآوردی قرار داشته‌اند. در تیمارهای توزیع مجدد عمودی تیمار VL_6C (توزیع مجدد عمودی رطوبت در خاک با لایه‌های بالایی سبک و پائینی سنگین) و VL_5C (توزیع مجدد افقی رطوبت در خاک با لایه‌های بالایی سبک و پائینی متوسط) به ترتیب کم‌ترین و بیش‌ترین پارامترهای آماری خطا را داشتند. همچنین نتایج شبیه‌سازی نشان می‌دهد که مدل پیشنهادی قادر است جبهه پیشروی آب در سامانه آبیاری قطره‌ای سطحی با جریان پیوسته را به خوبی تخمین بزند. همان‌طور که در شکل (۵) مشاهده می‌شود، مقادیر شبیه‌سازی شده توسط مدل با داده‌های اندازه‌گیری شده همخوانی بسیار خوبی بجز تیمار HL_6C و VL_4C دارد. مقایسه نتایج این پژوهش با مطالعات مشابه در جدول ۷ ارائه شده است.

جدول ۶. پارامترهای آماری محاسبه شده توزیع مجدد در دو راستای افقی و عمودی رطوبت در نیم‌رخ‌های مختلف خاک

تیمارها	R^2	$RMSE$ (cm)	MAE (cm)	CRM
توزیع مجدد افقی رطوبت (HLC)				
HL_1C	۰/۹۴۴	۵/۷۴	۵/۵۴	-۰/۰۹۵۲
HL_2C	۰/۹۴۵	۶/۲۶	۵/۷۲	-۰/۰۸۴۰
HL_3C	۰/۹۶۴	۲/۲۱	۲/۰۴	-۰/۰۴۱۸
HL_4C	۰/۹۴۱	۲/۹۷	۲/۶۲	-۰/۰۰۱۱
HL_5C	۰/۹۶۶	۱۵/۵۱	۱۵/۲۰	-۰/۲۸۶۶
HL_6C	۰/۷۷۴	۱۱/۷۲	۱۰/۸۴	-۰/۰۸۸۷
توزیع مجدد عمودی رطوبت (VLC)				
VL_1C	۰/۶۸۶	۱۰/۶۴	۷/۶۸	-۰/۱۰۷۸
VL_2C	۰/۹۴۵	۶/۲۶	۵/۷۲	-۰/۰۸۴۰
VL_3C	۰/۹۸۷	۷/۶۱	۷/۱۶	-۰/۱۶۳۹
VL_4C	۰/۶۰۰	۵/۸۶	۵/۴۷	-۰/۰۴۸۳
VL_5C	۰/۹۸۵	۱۲/۱۸	۱۰/۲۶	۰/۱۲۸۴
VL_6C	۰/۹۰۲	۲/۶۷	۲/۶۴	-۰/۱۱۲۲

HL_1C تا HL_6C به ترتیب نمایانگر توزیع مجدد افقی و VL_1C تا VL_6C توزیع مجدد عمودی رطوبت در نیم‌رخ‌های خاک لایه‌های بالایی و پائینی (شامل ترکیب‌های متوسط و سنگین، متوسط و سبک، سنگین و متوسط، سنگین و سبک و متوسط، سبک و سنگین) هستند.



شکل ۵. مقایسه مقادیر اندازه‌گیری و شبیه‌سازی توزیع مجدد رطوبت در راستای افقی و عمودی و مقایسه با خط یک به یک (خطچین قرمز رنگ) برای تیمارهای مورد بررسی

بحث

طراحی سامانه‌های آبیاری قطره‌ای بر اساس مدل‌های شبیه‌سازی انتقال رطوبت در خاک (فاز پیشروی و پسروی)، یکی از راهکارهای نوین برای افزایش راندمان سامانه‌های آبیاری است، در این پژوهش، با بهره‌گیری از مدل‌های رگرسیونی غیرخطی و شاخص‌های آماری و با در نظر گرفتن ویژگی‌های فیزیکی خاک و مشخصات هیدرولیکی قطره‌چکان، به مدل‌سازی و ارزیابی فرایند توزیع و توزیع مجدد آب در خاک‌های لایه‌ای در دو جهت افقی و عمودی پرداخته شد، جدول (۷) مقایسه مقادیر اندازه‌گیری و شبیه‌سازی توزیع مجدد رطوبت در راستای افقی و عمودی برای تیمارهای مورد بررسی را نشان می‌دهد.

جدول ۷. مقایسه مقادیر اندازه‌گیری و شبیه‌سازی توزیع مجدد رطوبت در راستای افقی و عمودی برای تیمارهای مورد بررسی

پژوهشگران	موضوع	روش	نتایج	مقایسه
خان محمدی و یشارت (۱۳۹۵)	شبیه‌سازی ابعاد پیاز رطوبتی یافت‌های مختلف خاکی	استفاده از نرم‌افزار HYDRUS-2D	الف) بیش‌ترین عمق و قطر پیاز رطوبتی دریافت‌شده و کم‌ترین آن در یافت‌سیلتی مشاهده شده است. ب) دقت مدل‌ها برای یافت‌های مختلف و دبی‌های متفاوت، متفاوت است. پ) مدل‌های توسعه‌یافته توانایی خوبی در پیش‌بینی ابعاد پیاز رطوبتی دارند.	الف) شبیه‌سازی با نرم‌افزار HYDRUS-2D درحالی‌که حالی که در مطالعه مذکور از مدل تجربی استفاده شد. ب) برخلاف شبیه‌سازی در خاک همگن در مطالعه خان محمدی و یشارت، در این پژوهش پیچیدگی بیش‌تری یا در نظر گرفتن خاکی دولا به ایجاد شده است.
محمدیگی و همکاران (۱۳۹۵)	بررسی و مقایسه توزیع مجدد رطوبت در آبیاری قطره‌ای با جریان پالسی و جریان پیوسته	مقایسه روش پالسی و پیوسته در سه نوع یافت خاک سبک، متوسط و سنگین با تأکید بر توزیع مجدد رطوبتی در راستای افقی و عمودی.	الف) بیش‌ترین توزیع مجدد رطوبت در جهت عمودی و در خاک رسی مشاهده شده است. ب) توزیع مجدد رطوبت در جهت افقی در خاک‌های سبک‌تر بیش‌تر است. پ) توزیع مجدد رطوبت در جهت عمودی در خاک‌های سنگین بیش‌تر از خاک‌های سبک است.	الف) شبیه‌سازی با نرم‌افزار HYDRUS-2D انجام شد درحالی‌که در مطالعه مذکور از مدل تجربی استفاده شد. ب) برخلاف شبیه‌سازی در خاک همگن در مطالعه قبلی، در این پژوهش پیچیدگی بیش‌تری با در نظر گرفتن خاک دولا به ایجاد شده است. پ) مدل توسعه‌یافته در مطالعه مذکور در شبیه‌سازی حرکت رطوبت در فاز توزیع مجدد در جهت افقی دقت بالایی داشت؛ اما در مطالعه خان محمدی و یشارت مدل توسعه‌یافته توانایی خوبی در شبیه‌سازی داشتند از دلایل اصلی پیچیدگی حرکت آب در فاز توزیع مجدد در خاک دولا به است.
گریبی و گریبی (۱۳۹۹)	شبیه‌سازی مساحت خیس - شده پیاز رطوبتی در سامانه آبیاری قطره‌ای پالسی	مقایسه و توسعه مدل‌های رگرسیونی غیرخطی برای پیش‌بینی سطح خیس شده.	الف) مدل‌های توسعه‌یافته می‌توانند در طراحی بهینه سیستم‌های آبیاری قطره‌ای مورد استفاده قرار گیرند. ب) عوامل مختلفی مانند دبی، یافت خاک، عمق نصب قطره‌چکان و نوع آبیاری بر سطح خیس شده تأثیرگذار هستند. پ) مدل‌های توسعه‌یافته توانایی خوبی در پیش‌بینی سطح خیس شده دارند.	الف) در پژوهش حاضر، از سیستم آبیاری قطره‌ای سطحی با جریان پیوسته استفاده شده است، درحالی‌که گریبی و گریبی از سیستم آبیاری قطره‌ای پالسی بهره برده‌اند. ب) در این مطالعه، شبیه‌سازی ابعاد پیاز رطوبتی در خاک‌های ناهمگن انجام شده است، درحالی‌که مطالعه گریبی و گریبی به بررسی خاک‌های همگن پرداخته است. پ) مدل‌های مورد استفاده در مطالعه گریبی و گریبی توانایی خوبی در شبیه‌سازی پیاز رطوبتی داشته‌اند، اما در این پژوهش به دلیل پیچیدگی حرکت آب در خاک‌های لایه‌ای، دقت شبیه‌سازی در فاز توزیع مجدد کاهش یافته است.

ادامه جدول ۷. مقایسه مقادیر اندازه‌گیری و شبیه‌سازی توزیع مجدد رطوبت در راستای افقی و عمودی برای تیمارهای مورد بررسی

پژوهشگران	موضوع	روش	نتایج	مقایسه
کریمی و صولت (۱۳۹۹)	شبیه‌سازی کامل پياز رطوبتی در لیاری قطره‌ای سطحی	توسعه و ارزیابی مدل‌های تجربی در پیش‌بینی توزیع و توزیع مجدد رطوبت	الف) مدل‌های توسعه‌یافته طولیایی خوبی در پیش‌بینی توزیع و توزیع مجدد رطوبت در خاک دارند. ب) مدل‌ها قادر به پیش‌بینی شکل پياز رطوبتی در فازهای توزیع و توزیع مجدد هستند	الف) مدل‌های توسعه‌یافته در شبیه‌سازی اولیه رطوبت عملکرد خوبی داشتند، اما پیچیدگی‌های ناشی از لایه لایه پیش خاک، به ویژه در پیش‌بینی حرکت افقی رطوبت پس از لیاری، باعث کاهش دقت مدل‌ها شد. ب) درحالی‌که مطالعه کریمی و صولت به بررسی رفتار رطوبت در خاک‌های همگن محدود شده بود، هدف پژوهش حاضر توسعه مدل‌هایی برای پیش‌بینی دقیق‌تر توزیع رطوبت در خاک‌های پیچیده‌تر بود.
کریمی و کریمی (۱۴۰۰)	ارزیابی الگوی خیزه یشروی رطوبت در لیاری قطره‌ای زیرسطحی با جریان پیوسته و پالسی	ارزیابی الگوی حرکت رطوبت در سامانه لیاری قطره‌ای زیر سطحی با جریان پیوسته و پالسی	الف) در لیاری پالسی، با افزایش زمان استراحت بین پالسی‌ها، رطوبت بیش‌تر در جهت افقی گسترش می‌یابد. ب) در دی‌های کم، رطوبت بیش‌تر در جهت افقی گسترش می‌یابد و در دی‌های زیاد، عمق نفوذ رطوبت بیش‌تر است. پ) بافت خاک تأثیر قابل‌توجهی بر عمق نفوذ رطوبت دارد.	
عرب و همکاران (۱۴۰۱)	بررسی آزمایشگاهی توزیع رطوبت در سامانه‌های لیاری قطره‌ای سطحی و زیرسطحی	اندازه‌گیری توزیع رطوبت در دو سامانه لیاری قطره‌ای سطحی و زیر سطحی	الف) افزایش دی در هر دو سامانه باعث افزایش مساحت خیس شده می‌شود، اما این افزایش در سامانه زیرسطحی بیش‌تر است. ب) تغییرات توزیع مجدد رطوبت در سامانه زیرسطحی بیش‌تر از سامانه سطحی است. پ) در سامانه سطحی، آب آزادانه‌تر در خاک حرکت می‌کند و تغییرات اصلی در جبهه رطوبت قبل از توزیع مجدد رخ می‌دهد.	الف) در این پژوهش، نتایج یافت خاک‌ها یا بررسی شش پروفیل مختلف موردتوجه قرار گرفته است، درحالی‌که مطالعه عرب و همکاران تنها به بررسی بافت شنی محدود شده است. ب) در مطالعه مذکور شبیه‌سازی حرکت آب در خاک‌های ناهمگن انجام گرفت؛ اما در مطالعه عرب و همکاران خاک تک لایه یا بافت شنی بود. پ) برخلاف مطالعه عرب و همکاران که بر روی تأثیر پارامترهای دی بر روی پياز رطوبتی در خاک شنی در سامانه‌های لیاری قطره‌ای زیر سطحی و سطحی صورت گرفته بود، این پژوهش به شبیه‌سازی کلی حرکت آب در خاک پرداخته است.

برخلاف مدل‌های پیشین که صرفاً به شبیه‌سازی حرکت آب در خاک‌های تک‌لایه محدود می‌شدند، مدل‌های پیشنهادی در این پژوهش قادر به شبیه‌سازی دقیق‌تر فرایند توزیع و توزیع مجدد رطوبت در خاک‌های دولایه، در دو جهت افقی و عمودی هستند.

نتیجه‌گیری

نتایج بررسی عملکرد مدل‌های پیشنهادی نشان داد مدل‌ها در شبیه‌سازی فاز توزیع رطوبت در هر دو جهت افقی و عمودی در تیمارها عملکرد بسیار خوبی از خود نشان دادند (ضریب همبستگی به ترتیب ۰/۸۵ و ۰/۸۸)، اما در فاز توزیع مجدد، به‌ویژه در جهت افقی، عملکرد مدل‌ها اندکی ضعیف‌تر بود (ضریب همبستگی به ترتیب ۰/۵۲ و ۰/۷۹). نتایج ارزیابی مدل‌ها نشان می‌دهد که ریشه میانگین مربعات خطا ($RMSE$) برای پیش‌بینی توزیع رطوبت در جهت افقی و عمودی به ترتیب ۵/۹۳ و ۴/۶۶ سانتی‌متر برآورد شده است. همچنین مقادیر آن در فاز توزیع مجدد در دو راستای افقی و عمودی به ترتیب ۸/۸۷ و ۸/۰۳ سانتی‌متر به‌دست آمد. مقادیر MAE در فاز توزیع افقی و عمودی به ترتیب ۴/۸ و ۳/۵۲ سانتی‌متر و همچنین در فاز توزیع مجدد در راستای افقی ۷/۳۰ و در فاز عمودی ۷ سانتی‌متر بود. مدل در هر دوفاز توزیع و توزیع مجدد، تمایل به بیش‌برآورد مقادیر در جهت افقی و کم‌برآورد مقادیر در جهت عمودی دارد. کاهش دقت مدل‌ها در شبیه‌سازی توزیع مجدد رطوبت به‌خصوص در جهت افقی، ناشی از عوامل متعددی از جمله پیچیدگی فرایند ناهمگنی خاک، محدودیت‌های مدل در نظر گرفتن تمام فرایندهای مرتبط و کمبود داده‌های دقیق در عمق خاک است. بنابراین برای بهبود دقت مدل در پیش‌بینی توزیع رطوبت، لازم است تا خطای سیستماتیک موجود در برآوردهای مدل در جهت‌های مختلف اصلاح شود. نتایج این مطالعه حاکی از آن است که مدل پیشنهادی می‌تواند به‌عنوان ابزاری برای پیش‌بینی توزیع و توزیع مجدد رطوبت در خاک با لایه‌های متفاوت گردد و در نتیجه، در بهبود مدیریت آبیاری در سامانه آبیاری قطره‌ای سطحی با جریان پیوسته به‌کار گرفته شوند.

ملاحظات اخلاقی

پیروی از اصول اخلاق پژوهش

نویسندگان اصول اخلاقی را در انجام و انتشار این پژوهش علمی رعایت نموده‌اند و این موضوع مورد تأیید همه آنهاست. سامانه آبیاری قطره‌ای سطحی با جریان پیوسته به‌کار گرفته شوند.

مشارکت نویسندگان

جمع‌آوری داده‌ها: ابرج سهرابی، آرمان مقدم‌نیار و بختیار کریمی؛ تهیه گزارش پژوهش: پیمان ظهماسبی؛ تحلیل داده‌ها: پیمان ظهماسبی و بختیار کریمی

مشارکت نویسندگان در مقاله مستخرج از پایان‌نامه تقریباً به شکل زیر باشد:

نویسنده اول: تهیه و آماده‌سازی نمونه‌ها، انجام آزمایش و گردآوری داده‌ها؛

نویسنده دوم: طراحی پژوهش، بررسی و کنترل نتایج، اصلاح، بازبینی و نهایی‌سازی مقاله؛

نویسنده سوم: استاد راهنمای پایان‌نامه، طراحی پژوهش، نظارت بر مراحل انجام پژوهش، بررسی و کنترل نتایج، جمع‌آوری داده‌ها و

اصلاح، بازبینی و نهایی‌سازی مقاله؛

نویسنده چهارم: گردآوری داده‌ها و نظارت بر مراحل انجام پژوهش

تعارض منافع

بنا بر اظهار نویسندگان این مقاله تعارض منافع ندارد.

حمایت مالی

حمایت مالی از این پژوهش از طرف دانشگاه کردستان، دانشکده کشاورزی در قالب پژوهانه پایان‌نامه دانشجویی نویسنده اول و همچنین پژوهانه برای سایر نویسندگان انجام شده است.

سپاسگزاری

در پایان، از حمایت‌های مالی شورای پژوهشی دانشگاه شهید چمران اهواز کمال تشکر را داریم (GN: SCU.WH1403.43525).

منابع

- خانمحمدی، ندا، و بشارت، سینا. (۱۳۹۵). شبیه‌سازی تجربی ابعاد پیاز رطوبتی بافتهای مختلف خاک. *مجله علوم آب و خاک*، ۲۰(۷۷)، ۱۳-۲۳. <http://dx.doi.org/10.18869/acadpub.jstnar.20.77.13>
- عرب، سوگند، مظفری، جواد، و نحوی نیا، محمد جواد. (۱۴۰۱). بررسی آزمایشگاهی توزیع رطوبت در سیستم‌های آبیاری قطره‌ای سطحی و زیرسطحی. *نشریه علمی پژوهشی مهندسی آبیاری و آب ایران*، ۱۳(۱)، ۱۲۴-۱۴۰. <https://doi.org/10.22125/iwe.2022.158511>
- کریمی، بختیار، میرزایی، فرهاد، و سهرابی، تیمور. (۱۳۹۴). بسط معادلاتی برای برآورد الگوی سطح خیس شده در سامانه‌های آبیاری قطره‌ای سطحی و زیر سطحی به روش تحلیل ابعادی. *مجله دانش آب و خاک (دانش کشاورزی)*، ۲۵(۳)، ۲۵۲-۲۴۱. https://water-soil.tabrizu.ac.ir/article_4034.html
- کریمی، بختیار، و صولت، شلیر. (۱۳۹۹). شبیه‌سازی شکل کامل پیاز رطوبتی در آبیاری قطره‌ای سطحی. *نشریه علمی پژوهشی مهندسی آبیاری و آب ایران*، ۱۰(۴)، ۳۱۶-۳۰۱. https://www.waterjournal.ir/article_110312.html
- کریمی، بختیار، و کریمی، نظیر. (۱۳۹۹). شبیه‌سازی مساحت خیس شده پیاز رطوبتی در سیستم آبیاری قطره‌ای پالسی. *مجله آب و خاک*، ۲۴(۲)، ۳۶۴-۳۴۹. <https://doi.org/10.22067/jsw.v34i2.82228>
- کریمی، بختیار، و کریمی، نظیر. (۱۴۰۰). ارزیابی الگوی جبهه پیشروی رطوبت در آبیاری قطره‌ای زیرسطحی با جریان پیوسته و پالسی. *فصلنامه علمی مهندسی منابع آب*، ۱۴(۵۱)، ۳۸-۲۱. <https://doi.org/10.30495/wej.2022.20462.2120>
- محمدبیگی، آرش، میرزایی، فرهاد، و اشرف، نگین. (۱۳۹۵). بررسی و مقایسه توزیع مجدد رطوبت در آبیاری قطره‌ای با جریان پالسی و جریان پیوسته. *مجله تحقیقات آب و خاک ایران (علوم کشاورزی ایران)*، ۴۷(۳)، ۴۷۳-۴۶۷. https://ijswr.ut.ac.ir/article_59317.html
- نوروزیان، زهرا، صدرالدینی، علی اشرف، ناظمی، امیرحسین، و دلیرحسین نیا، رضا. (۱۳۹۵). بررسی تجربی و عددی توزیع رطوبت خاک در آبیاری قطره‌ای زیر سطحی در خاک‌های لایه‌ای مسطح و شیب دار. *مجله دانش آب و خاک*، ۲۶(۴.۲)، ۲۷-۱۳. https://water-soil.tabrizu.ac.ir/article_5878.html

References

- Ben-Asher, J., Volynski, R., & Gulko, N. (2022). Spherical interpretation of infiltration from trickle irrigation. *Agronomy*, 12(10), 2469. <https://doi.org/10.3390/agronomy12102469>
- Cristóbal-Muñoz, I., Prado-Hernández, J. V., Martínez-Ruiz, A., Pascual-Ramírez, F., Cristóbal-Acevedo, D., & Cristóbal-Muñoz, D. (2022). An improved empirical model for estimating the geometry of the soil wetting front with surface drip irrigation. *Water*, 14(11), 1827. <https://doi.org/10.3390/w14111827>
- Jamei, M., Karimi, F., Ali, M., Karimi, B., Karbasi, M., & Aminpour, Y. (2022b). Experimental and computational assessment of wetting pattern for two-layered soil profiles in pulse drip irrigation: Designing a novel optimized bidirectional deep learning paradigm. *Journal of Hydrology*, 614, 128496. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2022.128496>
- Jamei, M., Maroufpoor, S., Aminpour, Y., Karbasi, M., Malik, A., & Karimi, B. (2022a). Developing hybrid data-intelligent method using Boruta-random forest optimizer for simulation of nitrate distribution pattern. *Agricultural Water Management*, 270, 107715. <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2022.107715>
- Karimi, B., & Alinazari, F. (2019). Simulation of Full Shape of Wetting Bulb in Subsurface Drip Irrigation System with Nonlinear Regression Model. *Journal of Water Research in Agriculture*, 33(2), 327-338. https://wra.areeo.ac.ir/article_119746.html [In Persian]
- Karimi, B., & Karimi, N. (2020). Simulation of Wetted Area of Moisture Bulb in Pulsed Drip Irrigation. *Water and Soil*, 34(2), 349-364. <https://doi.org/10.22067/jsw.v34i2.82228> [In Persian]
- Karimi, B., & Mohammadi, P. (2018). Evaluation of artificial neural network for estimating the advance velocity of the wetting front in drip irrigation. *Journal of Water Research in Agriculture*, 32(1), 79-92. https://wra.areeo.ac.ir/article_116602.html
- Karimi, B., & Solat, S. (2020). Full shape of moisture bulb simulating in surface drip irrigation. *Irrigation and Water Engineering*, 10(4), 301-316. https://www.waterjournal.ir/article_110312.html [In Persian]
- Karimi, B., Karimi, N., Shiri, J., & Sanikhani, H. (2022) Modeling moisture redistribution of drip irrigation systems by soil and system parameters: regression-based approaches. *Stochastic Environmental Research and Risk Assessment*, 36, 157-172. <https://doi.org/10.1007/s00477-021-02031-y021-02031-y>
- Karimi, B., Mirzaei, F., & Sohrabi, T. (2013). Evaluation of moisture front redistribution in surface and subsurface drip irrigation systems. *Water and Soil Science*, 23(3), 183-192. https://water-soil.tabrizu.ac.ir/article_4034.html [In Persian]
- Karimi, B., Mirzaei, F., & Sohrabi, T. (2015). Developing equations to estimate wetted area pattern for surface and subsurface drip irrigation systems by dimensional analysis. *Water and Soil Science*, 25(3), 241-252. https://wra.areeo.ac.ir/article_116602.html [In Persian]
- Khanmohamadi, N., & Besharat S. (2016). Empirical simulation of wetting pattern in different soil texture. *Jwss*, 20 (77) ,13-23. <http://dx.doi.org/10.18869/acadpub.jstnar.20.77.13> [In Persian]
- Kilic, M. (2020). A new analytical method for estimating the 3D volumetric wetting pattern under drip irrigation system. *Agricultural Water Management*, 228, 105898. <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2019.105898>
- Malek, K., & Peters, R. T. (2011). Wetting pattern models for drip irrigation: new empirical model. *Journal of Irrigation and Drainage Engineering*, 137(8), 530-536. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)IR.1943-4774.0000320](https://doi.org/10.1061/(ASCE)IR.1943-4774.0000320)
- Mohammad Beigi, A., Mirzaei, F., & Ashraf, N. (2016). Evaluation and comparing of redistribution of moisture in drip irrigation by pulsed flow and continuous flow. *Iranian*

- Journal of Soil and Water Research*, 47(3), 467-473. https://water-soil.tabrizu.ac.ir/article_4034.html
- Norouzian, Z., Sadraddini, A., Nazemi, A., & Delirhasannia, R. (2017). Experimental and Numerical Investigations of Soil Water Distribution under Subsurface Drip Irrigation in Level and Sloping Layered Soils. *Water and Soil Science*, 26(4.2), 13-27. https://water-soil.tabrizu.ac.ir/article_5878.html [In Persian]
- Samadianfard, S., Sadraddini, A. A., Nazemi, A. H., Provenzano, G., & Kisi O. (2012). Estimating soil wetting patterns for drip irrigation using genetic programming. *Spanish J. Agric. Res*, 10, 1155–1166. <http://dx.doi.org/10.5424/sjar/2012104-502-11>
- Shiri, J., Karimi, B., Karimi, N., Kazemi, M.H., & Karimi, S. (2020). Simulating wetting front dimensions of drip irrigation systems: Multi criteria assessment of soft computing models. *Journal of Hydrology*, 585, 124792. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2020.124792>
- Shu, J., Bai, Y., Chen, Q., Weng, C., & Zhang, F. (2024). Dynamic simulation of the water-land-food nexus for the sustainable agricultural development in the North China Plain. *Science of The Total Environment*, 912, 168771. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2023.168771>
- Skaggs, T. H., Trout, T. J., Šimůnek, J., & Shouse, P. J. (2004). Comparison of HYDRUS-2D simulations of drip irrigation with experimental observations. *Journal of irrigation and drainage engineering*, 130(4), 304-310. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)0733-9437\(2004\)130:4\(304\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)0733-9437(2004)130:4(304))
- Solat, S., Alinazari, F., Maroufpoor, E., Shiri, J., & Karimi, B. (2021). Modeling moisture bulb distribution on sloping lands: Numerical and regression-based approaches. *Journal of Hydrology*, 601, 126835. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2021.126835>
- Viessman, W., & Lewis, G. L. (2003). Introduction to Hydrology. 5th Edition, Pearson Education Inc, New York. <https://www.scirp.org/reference/referencespapers?referenceid=907712>
- Wang, H., Guan, R., & Wu, J. (2012). Linear regression of interval-valued data based on complete information in hypercubes. *Journal of Systems Science and Systems Engineering*, 21(4), 422-442. <https://doi.org/10.1007/s11518-012-5203-4>

Comparison of artificial intelligence and Markov chain-based methods in river discharge forecasting based on satellite signals

Afshin Kiani¹, Ahmad Rajabi², Saeid Shabanlou³, Mohammad Ali Izadbakhsh⁴, and Mohammad Ali Izadbakhsh⁵

1. Department of Water Engineering, Kermanshah Branch, Islamic Azad University, Kermanshah, Iran. Email: afshin.kiani.ac@gmail.com

2. Corresponding author, Department of Water Engineering, Kermanshah Branch, Islamic Azad University, Kermanshah, Iran. Email: ahmad.rajabi1974@gmail.com

3. Department of Water Engineering, Kermanshah Branch, Islamic Azad University, Kermanshah, Iran. Email: saeid.shabanlou@gmail.com

4. Department of Water Engineering, Kermanshah Branch, Islamic Azad University, Kermanshah, Iran. Email: izadbakhsh.mohammad.ali@gmail.com

5. Department of Water Engineering, Kermanshah Branch, Islamic Azad University, Kermanshah, Iran. Email: fariborzosefvand@gmail.com

Article Info.

Article type:
Research Article

Article history:

Received: 20 January 2025
Received in revised form: 19 May 2025
Accepted: 12 November 2025
Available online: 22 June 2026

Keywords:

river discharge,
Markov chain,
Maroon dam,
ORELM,
hybrid Models.

ABSTRACT

Objective: To predict inflow into the Maroon Dam in Khuzestan using low-cost global satellite data as an alternative to expensive in-situ measurements and to compare the performance of AI-based models with the conventional Markov chain method.

Method: Available global satellite data were employed to estimate dam inflow. The performance of three artificial intelligence-based models (GA-ANN, ICA-ANN, and ORELM) was evaluated and compared with the conventional Markov chain method. These approaches required substantially less data than complex numerical models.

Results: The ORELM model showed the best agreement with observational data, achieving a correlation coefficient of 0.874 during the test phase. It also exhibited the closest distribution of points around the 45-degree line, indicating superior accuracy compared to the other models.

Conclusions: The ORELM method based on satellite signals can reliably predict inflow into dam reservoirs, eliminating the need for complex numerical models with large data requirements and time-consuming calibration and validation processes. This approach provides water resources researchers and planners with an accurate and efficient tool for forecasting inflow variations during dry and wet years.

Cite this article: Kiani, A., Rajabi, A., Shabanlou, S., Izadbakhsh, M.A., & Yosefvand, F. (2026). Comparison of Artificial Intelligence and Markov Chain-Based Methods in River Discharge Forecasting Based on Satellite Signals. *Advanced Technologies in Water Efficiency*, 6(2), 44-64. <https://doi.org/10.22126/atwe.2025.11669.1151>



© The Author(s)

<https://doi.org/10.22126/atwe.2025.11669.1151>

Publisher: Razi University.

Introduction

The inflow of dams is one of the main components of the hydrogeological cycle and one of the required methods of water resources exploitation models. Reliable and complete data is one of the most important challenges in analyzing the change in inflow to dams in water resources management. In recent years, different numerical models have been used, which are a reliable solution to be considered. These models are able to estimate the inflow to dams in each region based on data and information, maps, various ground measurements, boundary conditions, and the use of complex equations. In the present study, global satellite data was used in a cheap and affordable way as an alternative to expensive on-site measurements to predict the inflow to Maroon Dam in Khuzestan.

Method

The study area is the Marun River in Khuzestan Province in southwestern Iran. The Marun River originates from the Nil and Sefid Kooch Mountains and flows into the Maroon Dam Lake after a distance of 120 km. Forecasting the inflow to the Marun Dam is very important due to the role of this dam in meeting agricultural, drinking, and industrial demands, as well as meeting the environmental demands of the Shadegan Wetland downstream. In this study, the Markov Chain (MC) method, developed in MATLAB, was used to predict the flow of the Maru River based on short-term satellite signals. MC is a simple prediction and modeling method that works based on a stochastic method to describe a sequence of possible events. Then, considering the much lower computational complexity and limited data required and very low processing time in artificial intelligence-based methods, the performance of the combined GA-ANN, ICA-ANN, and ORELM methods was tested in comparison with the conventional Markov Chain method.

Results

The results showed that the output of the ORELM model had the best fit to the observational data with a correlation coefficient of 0.874 in the test phase compared to models GA-ANN, ICA-ANN and MC. Also had the best and closest scatter points around the 45-degree line, making it the most accurate model. Instead of using complex models with a very large data volume and also very time-consuming evaluation and accuracy of the evaluation in it, ORELM methods based on satellite information can be used with confidence. This greatly helps water researchers and planners to use numerical models with a complex and time-consuming structure using a combination of artificial intelligence and satellite systems to predict the inflows to dam reservoirs with high accuracy in dry and wet years.

Conclusions

Regarding the amount of inflow into dam reservoirs as one of the most important sources of water resources balance, artificial intelligence models can be used in this study for specific areas of basic statistics or in situations where it is not possible to use mathematical models. By using satellite data, it is recommended. Based on the results obtained, the models developed in this study can also be recommended for studies of other areas using the selection of dams and rivers. In this case, without the need for complex and time-consuming relationships and equations, and only based on satellite maps and at a very low cost, the river discharge in the study area can be predicted with great accuracy during dry periods.

Author Contributions

All authors contributed equally to the conceptualization of the article and writing of the original and subsequent drafts.

Data Availability Statement

Data available on request from the authors.

Acknowledgements

The authors would like to thank all participants in the present study.

Ethical Considerations

The authors avoided data fabrication, falsification, plagiarism, and misconduct.

Funding

This research did not receive any specific grant from funding agencies in the public, commercial, or not-for-profit sectors .

Conflict of Interest

The authors declare no conflict of interest.



مقایسه روش‌های مبتنی بر هوش مصنوعی و زنجیره مارکوف در پیش‌بینی دبی رودخانه بر اساس سیگنال‌های ماهواره‌ای

افشین کیانی^۱، احمد رجبی^۲، سعید شعبانلو^۳، محمدعلی ایزدبخش^۴، و فریبرز یوسفوند^۵

۱. گروه مهندسی آب، واحد کرمانشاه، دانشگاه آزاد اسلامی، کرمانشاه، ایران، رایانامه: afshin.kiani.ac@gmail.com

۲. لیستده مسئول، گروه مهندسی آب، واحد کرمانشاه، دانشگاه آزاد اسلامی، کرمانشاه، ایران، رایانامه: ahmad.rajabi1974@gmail.com

۳. گروه مهندسی آب، واحد کرمانشاه، دانشگاه آزاد اسلامی، کرمانشاه، ایران، رایانامه: saeid.shabanlou@gmail.com

۴. گروه مهندسی آب، واحد کرمانشاه، دانشگاه آزاد اسلامی، کرمانشاه، ایران، رایانامه: izadbakhsh.mohammad.ali@gmail.com

۵. گروه مهندسی آب، واحد کرمانشاه، دانشگاه آزاد اسلامی، کرمانشاه، ایران، رایانامه: fariborz.yosefvand@gmail.com

چکیده	درباره مقاله
هدف: هدف از این پژوهش، توسعه مدل‌هایی برای شبیه‌سازی دقیق توزیع و توزیع مجدد رطوبت در خاک‌های دولایه تحت آبیاری قطره‌ای سطحی بود. روش پژوهش: برای دستیابی به این هدف، آزمایش‌هایی بر روی یک مدل فیزیکی شفاف پلاستیکی گلاس و با استفاده از شش پروفیل مختلف از خاک‌های دولایه (با ترکیبات سبک تا سنگین) انجام شد و مدل‌های رگرسیون غیرخطی بر پایه ویژگی‌های هیدرولیکی خاک و قطره‌چکان توسعه یافتند. یافته‌ها: افت‌ها نشان داد که مدل‌های پیشنهادی در فاز توزیع رطوبت دقت بسیار بالایی دارند (با ضرایب همبستگی ۸۵٪ و ۸۸٪)، اما در فاز توزیع مجدد، به‌ویژه در جهت افقی، دقت آن‌ها کاهش می‌یابد. همچنین مشخص شد که مدل‌ها در جهت افقی تمایل به بیش‌برآورد و در جهت عمودی تمایل به کم‌برآورد دارند. نتیجه گیری: با اعمال اصلاحات بر روی این خطاهای سیستماتیک، می‌توان دقت پیش‌بینی مدل‌ها را برای طراحی بهینه سامانه‌های آبیاری بهبود بخشید.	نوع مقاله: مقاله پژوهشی تاریخ دریافت: ۱۴۰۲/۱۱/۰۱ تاریخ بازنگری: ۱۴۰۴/۰۲/۲۹ تاریخ پذیرش: ۱۴۰۴/۰۸/۲۱ تاریخ انتشار: ۱۴۰۵/۰۴/۰۱ کلیدواژه‌ها: دبی رودخانه، زنجیره مارکوف، مدل مارکوف، ORELM Hybrid Models

استناد: کیانی، افشین؛ رجبی، احمد؛ شعبانلو، سعید؛ ایزدبخش، محمدعلی؛ و یوسفوند، فریبرز. (۱۴۰۵). مقایسه روش‌های مبتنی بر هوش مصنوعی و زنجیره مارکوف در پیش‌بینی دبی رودخانه بر اساس سیگنال‌های ماهواره‌ای. فناوری‌های پیشرفته در بهره‌وری آب، ۶(۲)، ۴۴-۶۴.

<https://doi.org/10.22126/atwe.2025.11669.1151>



مقدمه

افزایش بی‌رویه جمعیت، محدودیت منابع آب‌های سطحی و بهره‌برداری بیش از منابع آب بدون توجه به کاهش جریان‌ات ورودی به سدها و عدم پیش‌بینی دقیق آن باعث وارد آمدن خسارات جبران‌ناپذیری به منابع طبیعی ایران در سال‌های گذشته شده است. علاوه بر کاهش شدید جریان رودخانه‌ها در اثر کاهش بارندگی، گسترش بی‌رویه فعالیت‌های کشاورزی، صنعتی و شهری برداشت مازادی را به منابع آب در دسترس تحمیل می‌کند که لزوم پیش‌بینی جریان‌ات رودخانه‌ها برای مدیریت بهره‌برداری و حفاظت از منابع آب به‌عنوان یک اصل و پایه در برنامه‌ریزی‌های کشور را گوشزد می‌کند؛ لذا برای برنامه‌ریزی بهتر و استفاده بهینه از منابع آب باید راهکارهایی برای پیش‌بینی دقیق نوسانات جریان رودخانه‌ها بخصوص در سال‌های خشک و کم آب بکار گرفته شود. به‌منظور ارزیابی اثرات ناشی از توسعه، بر روی منابع آب چه از نقطه‌نظر کمی و چه کیفی، شبیه‌سازی ریاضی و کامپیوتری این منابع ابزاری قوی در بهره‌برداری بهینه از این منابع محسوب می‌گردد. در سال‌های اخیر مدل‌های ریاضی و کامپیوتری متعددی به‌منظور شبیه‌سازی رفتار هیدرولیکی منابع آب و پیش‌بینی دبی رودخانه‌ها مورد توجه قرار گرفته است. بررسی روند پیشرفت مدل‌های عددی نشان می‌دهد مجموعه‌ای از عوامل مختلف مانند شرایط مرزی و محیطی، خصوصیات فیزیکی و هیدرولیکی رودخانه‌ها، مقاطع رودخانه و سطح خیس شده، کاربری اراضی و پوشش گیاهی حوضه، نحوه پراکنش آبراهه‌ها و جریان آب در حوضه، پارامترهای مربوط به زمان پیمایش، عوامل توپوگرافی و زمین‌شناسی و غیره در شبیه‌سازی تغییرات رواتاب تولیدی در حوضه‌ها مؤثر هستند (زامپیری و همکاران^۱، ۲۰۱۲). در چنین ساختارهایی بررسی پارامترهای اقلیمی مانند دما و بارش بر کل سیستم و پیش‌بینی تغییرات رواتاب در سال‌های آتی تحت‌تأثیر این پارامترها با استفاده از مدل‌سازی ریاضی موضوع را پیچیده‌تر می‌کند و استخراج نتایج معتبر در این زمینه نیاز به زمان و هزینه زیادی دارد (کلوو و همکاران^۲، ۲۰۱۴؛ عزیزی و همکاران^۳، ۲۰۲۳؛ امیری و همکاران^۴، ۲۰۲۱؛ شعبانلو^۵، ۲۰۱۸؛ شریستا و همکاران^۶، ۲۰۱۶؛ لمیوکس و همکاران^۷، ۲۰۱۵؛ پاندا و همکاران^۸، ۲۰۱۲).

در برخی تحقیقات، برای پیش‌بینی دبی جریان در حوضه، اتصال مدل‌های آب سطحی و زیرزمینی بر اساس شبیه‌سازی ناحیه اشباع و غیراشباع صورت گرفته است. مزیت شبیه‌سازی هم‌زمان منطقه اشباع و غیراشباع خاک در مدل لینک شده آب سطحی و زیرزمینی این است که می‌تواند تبادل بین آب‌های سطحی و زیرزمینی را در فواصل زمانی و مکانی مختلف بر اساس بیان کامل هیدروکلیماتولوژی در هر منطقه محاسبه نماید، اما به دلیل نیاز به طیف وسیعی از داده‌ها و نقشه‌های پیچیده، اجرای این روش در بسیاری از مناطق امکان‌پذیر نیست (زینعلی و همکاران^۹، ۲۰۲۰؛ زینعلی و همکاران^۹، ۲۰۲۰). از طرفی جزئیات سیستم واقعی و رفتار آن ممکن است بسیار پیچیده‌تر از آن چیزی باشد که در مدل در نظر گرفته شده است. اگر سیستم مورد مطالعه بیشتر از حد مورد نیاز ساده‌سازی گردد ممکن است نتوانیم اطلاعات مورد نیاز را از مدل به دست آوریم. با این حال، مشکل این است که در همه این روش‌ها از اطلاعات در محل استفاده می‌شود. به‌طوری که روش‌های پیشنهادی را نمی‌توان در مناطق بدون سنجش در محل (بدون داده تاریخی) استفاده کرد. باید این واقعیت را در نظر گرفت که تعداد ایستگاه‌های هیدرومتری موجود در برخی از کشورها از جمله ایران کم است و دارای پراکنش مناسب نیست. روش‌های شبیه‌سازی برای حل مسائل مربوط به سیستم‌های آب سطحی دارای روابط و معادلات پیچیده هستند؛ لذا مدل‌های ریاضی که بتواند سیستم‌های پیچیده را بر اساس واقعیت موجود شبیه‌سازی کرده و امکان توسعه و به‌روزرسانی آنها به‌منظور افزایش دقت وجود داشته باشد معمولاً گران هستند (هوو و همکاران^{۱۰}، ۲۰۱۶؛

¹ Zampieri et al² Klove et al³ Azizi et al⁴ Amiri et al⁵ Shabanlou⁶ Shrestha et al⁷ Lemieux et al⁸ Panda et al⁹ Zeinali et al¹⁰ Hu et al

ایوگوویچ^۱، ۲۰۰۹؛ فلاحی و همکاران^۲، ۲۰۲۳؛ پناهی و همکاران^۳، ۲۰۲۲؛ جلیلیان و همکاران^۴، ۲۰۲۲؛ و امان جلیلی^۵ و همکاران^۶، ۲۰۲۳؛ پاهار و دهار^۷، ۲۰۱۴؛ بایسته و آذری^۸، ۲۰۲۱).

از این رو جایگزینی روش‌های ساده و قابل اعتمادی که نیاز به حجم اطلاعات کمی داشته و در عین حال با صرف وقت و هزینه بسیار کم نتایج دقیقی را در مقایسه با روش‌های عددی و مدل‌های ریاضی داشته باشند بسیار پر اهمیت است (نورمحمدی دهبالایی و همکاران^۹، ۲۰۲۳). در اکثر این روش‌ها پیش‌بینی وقایع هیدرولوژیکی بدون استفاده از مدل‌های شبیه‌سازی بر اساس تجزیه و تحلیل سری‌های زمانی، روش‌های مبتنی بر زنجیره مارکوف و یا ابزار هوش مصنوعی است و در زمان کمتر، یا صرف هزینه کمتر و با دقت بالا قادر به پیش‌بینی این وقایع هستند (سلطانی و آذری^{۱۰}، ۲۰۲۲؛ گوزمان و همکاران^{۱۱}، ۲۰۱۹؛ ندیری و همکاران^{۱۲}، ۲۰۱۹). در سال‌های اخیر در کنار روش‌های استوکاستیک (ابتهج و همکاران^{۱۳}، ۲۰۲۰؛ زین‌الدین و همکاران^{۱۴}، ۲۰۲۰؛ مزرعه و همکاران^{۱۵}، ۲۰۲۳ و ۲۰۲۴؛ آذری و همکاران^{۱۶}، ۲۰۲۱) به صورت گسترده از روش‌های مبتنی بر هوش مصنوعی مانند ORELM LS-SVM ELM GMDH و روش‌های هیبرید برای پیش‌بینی پارامترهای هیدروکلیماتولوژی مانند دما، بارندگی، جریان رودخانه‌ها و تغییرات تراز آب مخازن سطحی و آب زیرزمینی استفاده شده است (ابتهج و همکاران^{۱۷}، ۲۰۱۶؛ زین‌الدین و همکاران^{۱۸}، ۲۰۱۸؛ سلطانی و همکاران^{۱۹}، ۲۰۲۱؛ اسماعیلی و همکاران^{۲۰}، ۲۰۲۱).

نکته مهم دیگر برای استفاده جامع از این روش‌ها بخصوص در مناطق فاقد داده‌های زمینی، امکان استفاده از داده‌ها و اطلاعات ماهواره‌ای مربوط به سری زمانی داده‌های هیدرولوژیکی مانند دبی، بارندگی و دما است. این داده‌ها توسط برخی از ماهواره‌ها برای اکثر نقاط کره زمین ارائه می‌شوند و کاملاً رایگان و در دسترس محققان قرار دارد. بر این اساس موضوع جدیدی بر اساس تحلیل اطلاعات ماهواره‌ای اخیراً ظهور یافته است. علاقه‌مندی اصلی محققان این زمینه استفاده از اطلاعات ماهواره‌ای برای مدل‌سازی و پیش‌بینی وقایع هیدرولوژیکی است. دبی رودخانه‌ها می‌تواند توسط سیگنال‌های ماهواره‌ای پیش‌بینی شود. برای پیش‌بینی دبی رودخانه‌ها برای آینده با استفاده از اطلاعات ماهواره‌ای به منظور نظارت بر سیل یا طراحی درست سازه‌های هیدرولیکی لازم است سیگنال‌های ماهواره‌ای به طور دقیق‌تری مورد ارزیابی قرار گیرد. استفاده از اطلاعات موجود ماهواره‌ای در دسترس و ارزان برای پیش‌بینی ویژگی‌های هیدرولوژیکی رودخانه‌ها، به عنوان جایگزینی برای اندازه‌گیری‌های گران‌قیمت در محل، یکی از جالب‌ترین زمینه‌های تحقیقاتی در هیدرولوژی است. تحقیقات نشان داده‌اند که با استفاده از اطلاعات مبتنی بر ماهواره، دبی رودخانه‌ها را می‌توان با دقت زیاد پیش‌بینی کرد. پیش‌بینی ویژگی‌های آینده رودخانه‌ها با استفاده از اطلاعات ماهواره‌ای تنها زمانی امکان‌پذیر است که سیگنال‌های مبتنی بر فضا با دقت قابل پیش‌بینی شده باشد.

¹ Ivkovic

² Fallahi et al

³ Panahi et al

⁴ Jalilian et al

⁵ Aman Jalili et al

⁶ Pahar & Dhar

⁷ Bayesteh & Azari

⁸ Nourmohammadi Dehbalaei et al

⁹ Soltani & Azari

¹⁰ Guzman et al

¹¹ Nadiri et al

¹² Ebtehaj et al

¹³ Zeynoddin et al

¹⁴ Masraeh et al

¹⁵ Azari et al

¹⁶ Esmaeili et al

ادبیات موضوع و پیشینه پژوهش

برینریدج و همکاران^۱ (۲۰۱۲) اطلاعات ارائه شده توسط ماهواره *AMSR* را با دبی ثبت شده در رودخانه‌ها مقایسه کرده و میزان دقت آن را مورد ارزیابی قرار دادند. کوهن و همکاران^۲ (۲۰۱۲) یک مدل هیدرولوژیکی برای محاسبه دبی رودخانه‌ها با استفاده از اطلاعات ماهواره‌ای به صورت *real time* ایجاد کردند و نتیجه گرفتند که سیگنال‌های ماهواره‌ای *AMSR* توانایی مدل‌سازی دقیق در جریان رودخانه‌ها در محل را دارد.

بنکداری و همکاران^۳ (۲۰۱۹) به منظور بررسی کارایی مدل زنجیره مارکوف استاندارد (*MC*)، تغییرات تنش رودخانه را بررسی کردند و نتایج مدل‌سازی را با روش *LR* و سه روش *ELM*، *MLP* و *RBF* مقایسه کردند و دریافتند که توانایی *MC* برای تولید چند روزه بدون نیاز به اطلاعات روز گذشته خود برای استفاده به عنوان متغیر ورودی مدل است. براین اساس باتوجه به تاریخچه دبی رودخانه‌ها را می‌توان با سیگنال‌های ماهواره‌ای پیش‌بینی کرد. روش *MC* به صورت گسترده برای پیش‌بینی تغییرات کیفی آب زیرزمینی (سو و همکاران^۴، ۲۰۱۹)، مدل‌سازی الگوی خطر خشکسالی کشاورزی (کامروززمان و همکاران^۵، ۲۰۱۸) و پیش‌بینی اثر فرایندهای هیدرولوژیکی بر حوضه آبریز سریع شهری (کاویان و همکاران^۶، ۲۰۲۰) مورد استفاده قرار گرفته است. بارندگی یکی از پارامترهای مهم سیکل هیدروکلیماتولوژی است که به صورت مستقیم بر دبی رودخانه‌ها و وقوع سیلاب تأثیر می‌گذارد؛ لذا محققان زیادی با استفاده از روش *MC* به پیش‌بینی این پارامتر در مناطق مختلف جهان پرداخته‌اند (دهامشه و همکاران^۷، ۲۰۱۴؛ گوویی و همکاران^۸، ۲۰۱۷؛ زوو و همکاران^۹، ۲۰۱۷؛ آکسوی و همکاران^{۱۰}، ۲۰۱۸؛ لیو و همکاران^{۱۱}، ۲۰۲۰). یکی از مباحث مهم در پیش‌بینی وقایع هیدرولوژیکی مانند بارندگی و سیلاب در نظر گرفتن عدم قطعیت‌های ناشی از مدل‌سازی است و روش ترکیبی زنجیره مارکوف-مونت کارلو (*MCMC*) یکی از راهکارهای پرکاربرد در این زمینه است (ونگ و ونگ^{۱۲}، ۲۰۱۹؛ ونگ و همکاران^{۱۳}، ۲۰۲۱؛ نگووین-هوی و همکاران^{۱۴}، ۲۰۲۱).

بررسی تحقیقات انجام شده نشان می‌دهد اکثریت مدل‌های ریاضی بکار گرفته شده برای شبیه‌سازی دبی جریان نیازمند تعریف شرایط مرزی جدید و اطلاعات پایه زیاد و نقشه‌های مربوط به آن منطقه است. کاربردی نمودن این مدل مستلزم انطباق آن با شرایط خاص منطقه مورد مطالعه است. به دلیل حجم زیاد آمار و اطلاعات مورد نیاز و همچنین لزوم انجام فرایند واسنجی و صحت‌سنجی در این مدل‌ها که فرایندی بسیار وقت‌گیر و پیچیده است، استفاده از یک روش جایگزین مانند روش‌های استوکاستیک (زنجیره مارکوف یا روش‌های مبتنی بر هوش مصنوعی) که در مقایسه با مدل‌های ریاضی بتواند با همان دقت و در زمان کمتر و با استفاده از داده‌ها و اطلاعات ناچیز، ویژگی‌های هیدرولوژیکی رودخانه را پیش‌بینی نماید بسیار حائز اهمیت است. از طرفی در بسیاری از رودخانه‌ها اطلاعات کافی برای تحلیل هیدرولیکی و شبیه‌سازی سیستمی منابع آب سطحی برای پیش‌بینی دبی وجود ندارد یا از دقت کافی برخوردار نیست. در چنین حوضه‌هایی استفاده از اطلاعات و سیگنال‌های ماهواره‌ای برای پیش‌بینی دبی رودخانه‌ها می‌تواند راهگشا باشد.

بررسی منابع نشان داد در بسیاری از تحقیقات از روش زنجیره مارکوف که فقط از آخرین وضعیت مجموعه داده‌های آموزشی برای توسعه مجموعه داده‌های غیر مشاهداتی استفاده می‌کند، برای پیش‌بینی جریان بر اساس سیگنال‌های ماهواره‌ای کوتاه‌مدت

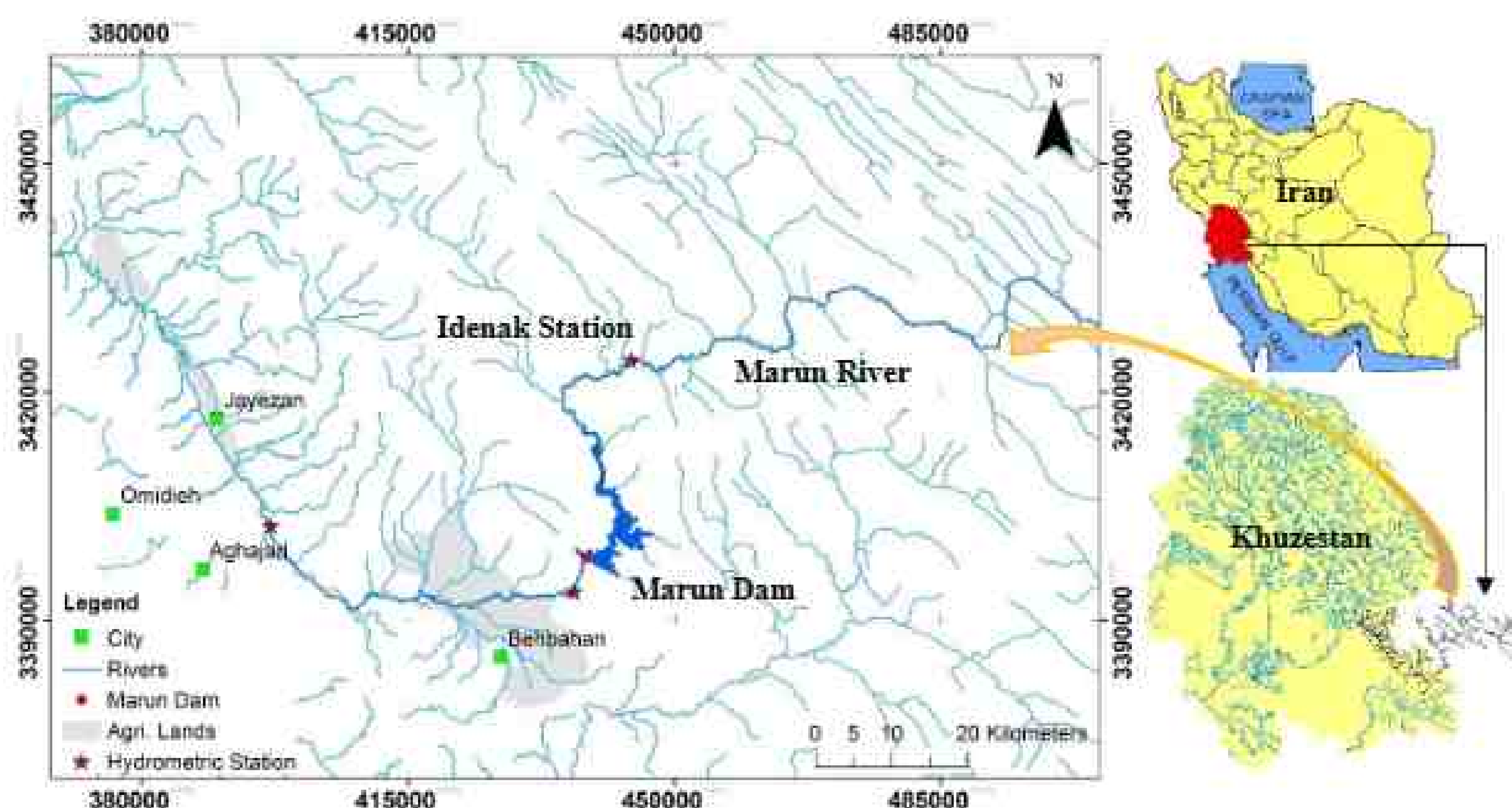
¹ Brainerridge et al² Cohen et al³ Bonakdari et al⁴ Su et al⁵ Kamruzzaman et al⁶ Kaviani et al⁷ Dahamsheh et al⁸ Gui et al⁹ Zhou et al¹⁰ Aksoy et al¹¹ Liu et al¹² Wang & Wang¹³ Wang et al¹⁴ Nguyen-Huy et al

استفاده شده است. هدف از این تحقیق مقایسه عملکرد روش‌های هیبرید GA-ANN و ICA-ANN و ORELM در مقایسه با روش معمول زنجیره مارکوف (MC) در ترکیب با سیگنال‌های ماهواره‌ای برای پیش‌بینی جریان ورودی به مخزن سد مارون است تا بتوان از آن به‌عنوان راهکاری ارزان و بدون نیاز به مدل‌ها و معادلات پیچیده که غالباً نیاز به حجم داده‌ها و اطلاعات زیادی دارند استفاده کرد. در این صورت می‌توان به نتایج این مدل‌ها در رودخانه‌های با تعداد داده بسیار کم اعتماد کرد.

روش پژوهش

۱. منطقه مورد مطالعه

منطقه مورد مطالعه رودخانه مارون در استان خوزستان در جنوب غربی ایران است. رودخانه مارون از کوه‌های نیل و سفید کوه سرچشمه گرفته و پس از طی مسافت ۱۲۰ کیلومتر به دریاچه سد مارون وارد می‌شود. سد مخزنی مارون بر روی رودخانه مارون در فاصله ۱۹ کیلومتری شمال شرق بهبهان در استان خوزستان و قسمت جنوبی ایران است. جاذمایی رودخانه‌ها و مصارف موجود در منطقه در شکل (۱) آمده است.



شکل ۱. موقعیت محدوده مطالعاتی در ایران، رودخانه مارون و سد مارون

۲. داده‌های ماهواره^۱ (AMSR)

رادیومتر اسکن مایکروویو پیشرفته (AMSR) سیگنال‌های ضعیف مایکروویو ساطع شده از منابع طبیعی مانند سطح زمین و جو را اندازه‌گیری می‌کند. توسعه رادیومترهای مایکروویو در ژاپن در دهه ۱۹۷۰ آغاز شد. اولین رادیومتر مایکروویو رادیومتر اسکن مایکروویو (MSR) بود. در فوریه ۱۹۸۷ بر روی ماهواره رصد دریایی (MOS-1) پرتاب شد. MOS-1 در نوامبر ۱۹۹۵ پس از به‌دست‌آوردن اطلاعات در نزدیکی ژاپن و تأیید عملکرد منسوره کار خود را متوقف کرد. در فوریه ۱۹۹۰، جانشین آن، MOS-1b که عملکردی مشابه MOS-1 داشت، نیز به فضا پرتاب شد. بعداً در سال ۲۰۰۲، NASDA (در حال حاضر JAXA) دو

^۱ Advanced Microwave Scanning Radiometer

رادیومتر پیشرفته اسکن مایکروویو (AMSR: Advanced MSR) را توسعه داد. یکی AMSR-E در ماهواره NASA Aqua (پرتاب شده در می ۲۰۰۲) و دیگری AMSR در ماهواره ADEOS-II JAXA (پرتاب شده در دسامبر ۲۰۰۲). رادیومتر اسکن مایکروویو پیشرفته ۲ (AMSR2) روی برد GCOM-W در حال حاضر در حال کار است. AMSR3 در سال عالی ۲۰۲۳ راه اندازی شد.

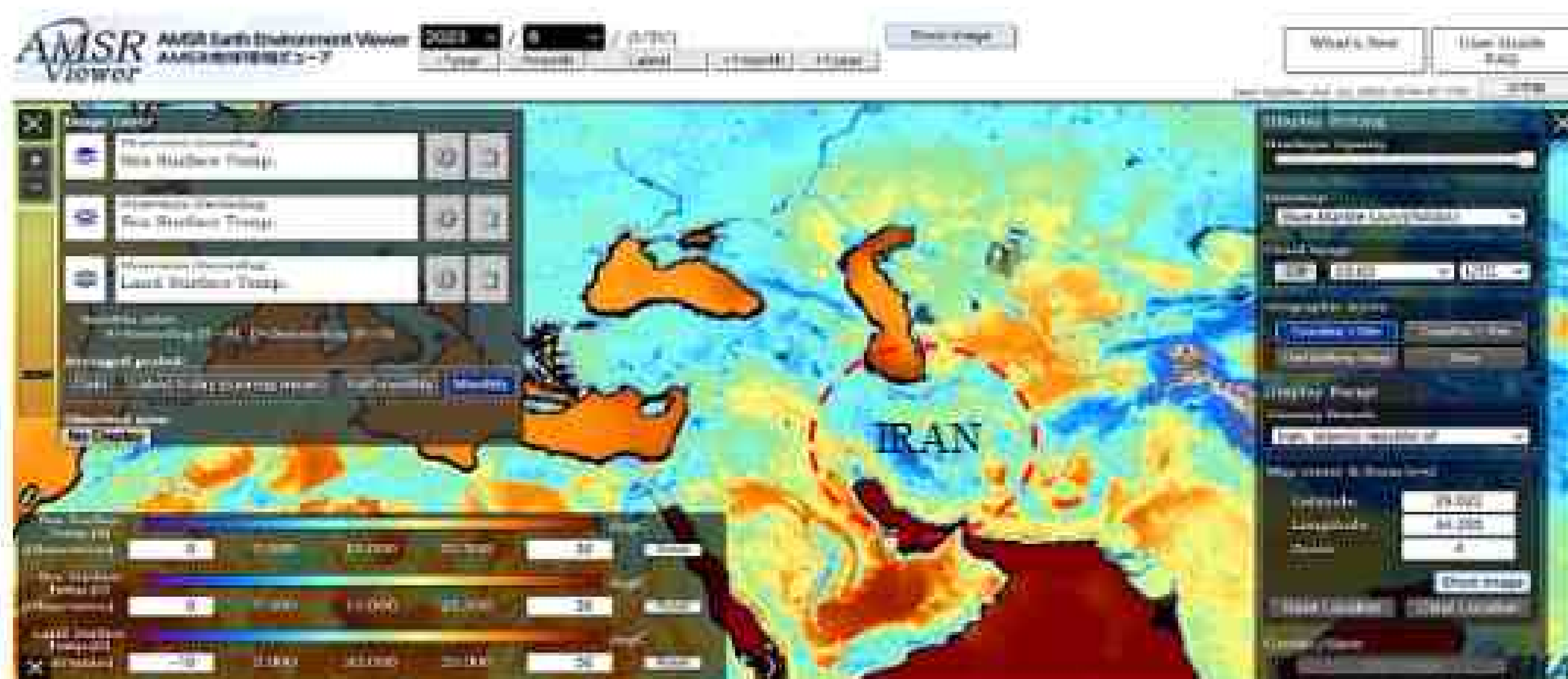
رادیومتر اسکن مایکروویو پیشرفته (AMSR) روی سه ماهواره کار می‌کند.

۱. AMSR در فضاپیماي ADEOS-II JAXA که در ۱۴ دسامبر ۲۰۰۲ پرتاب شد، پانل های خورشیدی ماهواره‌ای در ۲۵ اکتبر ۲۰۰۳ از کار افتادند.

۲. AMSR-E در فضاپیماي آبی سیستم مشاهده زمین (EOS) ناسا که در ۴ می ۲۰۰۲ پرتاب شد چرخش این ابزار در ۴ اکتبر ۲۰۱۱ متوقف شد.

۳. AMSR-2 در فضاپیماي GCOM-W1 JAXA که در ۱۸ می ۲۰۱۲ پرتاب شد، این ابزار در حال حاضر در حال کار است.

AMSR-E پارامترهای ژئوفیزیکی را اندازه‌گیری می‌کند که از چندین علم تغییر جهانی و تلاش‌های نظارتی پشتیبانی می‌کند. از جمله بارش، بخار آب اقیانوسی، آب ابر، سرعت باد نزدیک به سطح، دمای سطح دریا، رطوبت خاک، پوشش برف و پارامترهای یخ دریا. همه این اندازه‌گیری‌ها برای درک آب‌وهوای زمین حیاتی هستند. AMSR-2 انتشار مایکروویو ضعیف از سطح و جو زمین را اندازه‌گیری می‌کند. از ارتفاع حدود ۷۰۰ کیلومتری زمین، AMSR-2 اندازه‌گیری‌های بسیار دقیقی از شدت انتشار و پراکندگی امواج مایکروویو ارائه می‌دهد. آتن AMSR-2 یکبار در ۱/۵ ثانیه می‌چرخد و داده‌ها را در طول ۱۴۵۰ کیلومتر به دست می‌آورد. این امر AMSR-2 را قادر می‌سازد تا مجموعه‌ای از داده‌های روز و شب را با بیش از ۹۹ درصد پوشش زمین هر روز به دست آورد (شکل (۲)). داده‌های این ماهواره به‌صورت روزانه و ماهیانه ارائه شده است که در این تحقیق از داده‌های روزانه استفاده شده است.



شکل ۲. نمونه تصویر ماهواره AMSR مربوط به ایران و جهان در سال ۲۰۲۲

باتوجه‌به اینکه اندازه مساحتی که AMSR تحت پوشش قرار می‌دهد $8 \times 12 \text{ km}^2$ است به دلیل پوشش کلی زمین، کل زمین را به 4000×2000 پیکسل تقسیم می‌کند به این دلیل که یک رویکرد جهانی داشته باشد. سیگنال‌های ماهواره‌ای با استفاده از دمای روشنایی (T_b) محاسبه می‌شود که با استفاده از معادله (۱) محاسبه می‌شود.

$$T_b = \varepsilon \times T \quad (۱)$$

ε ضریب اشباع است و T دما فیزیکی منطقه موردنظر است. مقدار آب موجود در زمین با استفاده از تفاوت ε به دست می‌آید که ε حدود ۰.۵ برای سطوح مرطوب است و ε بین ۰.۷۵ تا ۰.۹۵ برای سطوح خشک است. با فرض داشتن ۲ پیکسل خشک و مرطوب که دارای دمای فیزیکی یکسان هستند تنها راه شناخت آن‌ها بررسی T_b هر دو است. پیکسل‌های خشک و مرطوب دارای دمای فیزیکی مشابه T_b های متفاوتی دارند به این صورت که T_b پیکسلی که دارای آب است به طور قابل توجهی از T_b پیکسلی که خشک است کمتر است. همان‌طور که قبلاً بیان شد پیکسل‌های سنسور *AMSR* مساحت نسبتاً بزرگی را پوشش می‌دهند و زمانی که ما بخواهیم خصوصیات یک رودخانه بررسی و اندازه‌گیری کنیم این پیکسل‌ها به دلیل بزرگ بودن ابعادشان تقریباً در هر زمانی بر روی سطوح آبی و سطوح خشکی قرار می‌گیرند. به این صورت که قسمتی از پیکسل که بر روی رودخانه افتاده باشد را با (W) و منطقه باقی مانده از پیکسل که بر روی خشکی افتاده باشد را با $(I-W)$ نشان داده می‌شود. دمای روشنایی هر پیکسل با استفاده از معادله (۲) محاسبه می‌شود.

$$T_b = (1-w)T_{b,I} + wT_{b,W} \quad (۲)$$

در معادله مزبور $T_{b,W}$ درجه‌حرارت روشنایی قسمت‌های زمین از پیکسل در نظر گرفته شده است و همچنین $T_{b,I}$ درجه‌حرارت روشنایی قسمت‌های آب از پیکسل در نظر گرفته شده است. به دلیل اینکه مناطق خشک و مرطوب از یک پیکسل به هم نزدیک هستند می‌توان درجه‌حرارت فیزیکی را برای هر دو ناحیه ثابت در نظر گرفت و در معادله (۲) ضرایب انتشار را جای داد تا معادله (۳) حاصل شود.

$$T_b = T((1-w)\varepsilon_I + w\varepsilon_W) \quad (۳)$$

در معادله بالا ε_I ضریب انتشار مناطق خشک است و ε_W ضریب انتشار مناطق مرطوب است. همچنین به‌منظور از بین بردن اثر دمای مختلف فیزیکی در زمین‌های مختلف سال و حذف اصطلاح T ، معادله روشنایی رودخانه (معادله ۳) را به دلیل اینکه هر دو پیکسل دارای دمای فیزیکی مشابه هستند بر یک پیکسل کاملاً خشک مجاورش ($T_{b,c}$) به‌عنوان یک پیکسل کالیبراسیون تقسیم می‌شود؛ بنابراین شرایط T در آخرین معادله برابر در نظر گرفته می‌شود و معادله سیگنال ماهواره‌ای نهایی که برای محاسبه مشخصات رودخانه‌ها استفاده می‌شود، به شرح زیر به دست می‌آید.

$$S = \frac{T_{b,c}}{T_{b,m}} = \frac{T((1-0)\varepsilon_I + 0\varepsilon_W)}{T((1-w)\varepsilon_I + w\varepsilon_W)} = \frac{\varepsilon_I}{(1-w)\varepsilon_I + w\varepsilon_W} \quad (۴)$$

در این معادله ε_I و ε_W ثابت و w یک متغیر است؛ بنابراین تمام تغییرات سیگنال به مقدار w مربوط است. با توجه به معادله S مشخص است که تغییرات در سیگنال‌های ماهواره‌ای می‌تواند به‌عنوان نشانه‌ای از تغییرات در دبی رودخانه‌ها در نظر گرفته شود. چون همان‌گونه که معلوم است با افزایش بخش آب پیکسل مقدار S افزایش می‌یابد و بالعکس. پس همان‌طور که معلوم است سیگنال‌های ماهواره‌ای متناسب با آب موجود در پیکسل تغییر می‌کنند. دبی رودخانه با استفاده از مفهوم تناوب و کمیت‌های عرض (b) و عمق (d) رودخانه و سرعت جریان (v) به‌صورت معادله (۵) زیر نشان داده می‌شود.

$$Q = b \times d \times v \quad (۵)$$

در یک رودخانه کانال غیر عمودی، اثرات تغییر w و d روی دبی تقریباً مشابه هم هستند و هر دوی آن‌ها پیش‌بینی‌های بهتری نسبت به v دارند؛ بنابراین با در نظر گرفتن عرض یک رودخانه به‌عنوان محل ساکن خود در پیکسل در نظر گرفته‌شده، مشخص است که تخلیه رودخانه‌ها را می‌توان با دقت به سیگنال‌های ماهواره‌ای تنظیم نمود.

۳. زنجیره مارکوف

زنجیره مارکوف مدلی تصادفی برای توصیف یک توالی از رویدادهای احتمالی است که در آن احتمال هر رویداد فقط به حالت رویداد قبلی بستگی دارد. در واقع MC یک روش پیش‌بینی و مدل‌سازی ساده است که بر اساس روش تصادفی به‌منظور توصیف توالی وقایع احتمالی کار می‌کند. این روش به نام آندری مارکوف که یک ریاضی‌دان روسی بود، نام‌گذاری شد. در این روش تصادفی، ویژگی مارکوف باید ارضا شود. اگر پیش‌بینی آینده فرایندی مستقل از تاریخچه آن فرایند باشد، خاصیت مارکوف ارضا می‌شود.

$$X_n, \quad n = 0, 1, 2, \dots \quad (6)$$

در اینجا، X_n یک رویه تصادفی است که تعداد محدودی از مقادیر ممکن را دارد. عبارت $X_n = i$ می‌گوید که در زمان n ، رویه i در حالت i است. در اینجا یک فرض وجود دارد که وقتی رویه در حالت i است، پس یک احتمال ثابت برای P_{ij} وجود دارد که حالت رویه بعدی j باشد.

$$P_{ij} = P\{X_{n+1} = j | X_n = i, X_{n-1} = i_{n-1}, \dots, X_1 = i_1, X_0 = i_0\} \quad (7)$$

لازم به ذکر است که تمام مقادیر n و $i, j, i_{n-1}, \dots, i_0$ مقادیر غیرمنفی هستند. معادله ذکر شده نشان‌دهنده روش پایه MC است. P_{ij} می‌گوید اگر موقعیت فعلی یک فرایند در حالت i باشد، احتمال P_{ij} وجود دارد که حالت بعدی آن j باشد و از معادله ۸ پیروی کند.

$$\sum_{j=0}^{\infty} P_{ij} = 1 \quad \begin{cases} i=0, 1, \dots \\ j \geq 0 \\ P_{ij} \geq 0 \end{cases} \quad (8)$$

با داشتن تمام شاخص‌های P ماتریس MM به‌صورت زیر توسعه می‌یابد که اولین ماتریس انتقال یک مرحله‌ای است.

$$MM = \begin{bmatrix} P_{00} & P_{01} & P_{02} & \dots \\ P_{10} & P_{11} & P_{12} & \dots \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ P_{i0} & P_{i1} & P_{i2} & \dots \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \end{bmatrix} \quad (9)$$

روش‌هایی که مبتنی بر مدل زنجیره مارکوف (MC) هستند برای توسعه و گسترش ماتریس مارکوف (MM) از مجموعه داده‌های **Train** استفاده می‌کنند. سپس با استفاده از ماتریس به‌دست‌آمده نمونه‌های **Test** پیش‌بینی می‌شود.

۴. ارزیابی دقت پیش‌بینی‌ها

در مرحله اولیه این تحقیق برای بررسی عملکرد مدل‌ها، انتخاب رودخانه با اندازه‌گیری دقیق دبی در محل انجام شد. به همین دلیل رودخانه مارون واقع در جنوب ایران انتخاب شد زیرا دارای داده‌های اندازه‌گیری مداوم و طولانی‌مدت بود. همچنین داشتن پیکسل اندازه‌گیری به همراه پیکسل کالیبراسیون باتوجه به معادله (۴) که با استفاده از آن سیگنال ماهواره‌ای محاسبه می‌شود مورد نیاز است. باتوجه به موقعیت ایستگاه اندازه‌گیری رودخانه، نزدیک‌ترین پیکسل به عنوان پیکسل اندازه‌گیری آن رودخانه انتخاب شد. هنگامی که تعداد زیادی از پیکسل‌های اندازه‌گیری برای مطالعه در نظر گرفته می‌شود انتخاب یک پیکسل خشک نزدیک به

پیکسل اندازه‌گیری چندان آسان به نظر نمی‌رسد، به همین دلیل است که در مطالعه حاضر از روش دی گرو^۱ و همکاران استفاده شده است. باتوجه به این روش، بدیهی است که پیکسل انتخاب شده باید داغ‌ترین، نزدیک‌ترین و خشک‌ترین پیکسل باشد. این فرض در معادله ۱۰ نشان داده شده است.

$$T_{b,max} = T_b(w = 0) \approx T_b(\min(w)) \quad (10)$$

باتوجه به معادله (۱) با کاهش سهم آب از یک پیکسل دمای روشنایی افزایش می‌یابد؛ زیرا ضریب انتشار مناطق خشک بیشتر از ضریب انتشار مناطق مرطوب است؛ بنابراین طبق معادله (۲) خشک‌ترین پیکسل، داغ‌ترین پیکسل نیز است پس این پیکسل به‌عنوان پیکسل کالیبراسیون انتخاب می‌شود.

$$T_{b,c} = \max(T_b) \quad (11)$$

طبق مطالعات *De Groeve* و همکاران به دلیل دقت کم یک پیکسل به‌عنوان داغ‌ترین پیکسل برای جلوگیری از مشکلات غیرمنتظره یک صفحه پیکسل 9×9 به‌جای در نظر گرفتن مقدار یک پیکسل به‌عنوان داغ‌ترین پیکسل در اطراف هر پیکسل اندازه‌گیری در نظر گرفته شده و ۹۵ درصد دمای روشنایی آن‌ها به‌عنوان دمای روشنایی پیکسل کالیبراسیون برای استفاده در معادله (۴) در روش اندازه‌گیری سیگنال ماهواره در نظر گرفته شد.

تحقیق حاضر به‌جای پیش‌بینی دبی آینده رودخانه‌ها، بر روی پیش‌بینی سیگنال‌های ماهواره‌ای با استفاده از اطلاعات گذشته خود متمرکز است. این تحقیق بر اساس سیگنال‌های ماهواره‌ای، تغییرات دبی رودخانه مارون را با روش زنجیره مارکوف استاندارد (MC) که توسط نویسندگان این تحقیق توسعه داده شده پیش‌بینی می‌کند و نتایج را با خروجی مدل‌های مبتنی بر هوش مصنوعی مقایسه می‌نماید. برای انتخاب بهترین مدل از شاخص‌های آماری $RMSE$ ، $NRMSE$ و R استفاده شد که در معادلات (۱۲) تا (۱۵) نشان داده شده‌اند. در نهایت برای اطمینان از انتخاب درست مدل برتر از دیاگرام تیلور استفاده شد. این دیاگرام بر اساس سه شاخص انحراف معیار، ضریب همبستگی و مقدار $RMSE$ بهترین مدل که دارای کمترین خطای شبیه‌سازی است را معرفی می‌کند.

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (X_i^{obs} - X_i^{sim})^2} \quad (12)$$

$$NRMSE = \frac{RMSE}{(X_{Max}^{obs} - X_{Min}^{obs})} \quad (13)$$

$$NSE = 1 - \left[\frac{\sum_{i=1}^n (X_i^{obs} - X_i^{sim})^2}{\sum_{i=1}^n (X_i^{obs} - X_{Mean}^{obs})^2} \right] \quad (14)$$

$$R = \left(\frac{\sum_{i=1}^n (X_i^{obs} - X_{Mean}^{obs})(X_i^{sim} - X_{Mean}^{sim})}{\sqrt{\sum_{i=1}^n (X_i^{obs} - X_{Mean}^{obs})^2 \sum_{i=1}^n (X_i^{sim} - X_{Mean}^{sim})^2}} \right) \quad (15)$$

¹ De Groeve

در روابط فوق X_i^{obs} داده مشاهده ای، X_i^{sim} داده شبیه سازی شده، X_{Mean}^{obs} و X_{Mean}^{sim} به ترتیب میانگین داده‌های مشاهده شده و شبیه‌سازی شده، و n تعداد کل مشاهدات است.

۵. ماشین آموزش نیرومند^۱

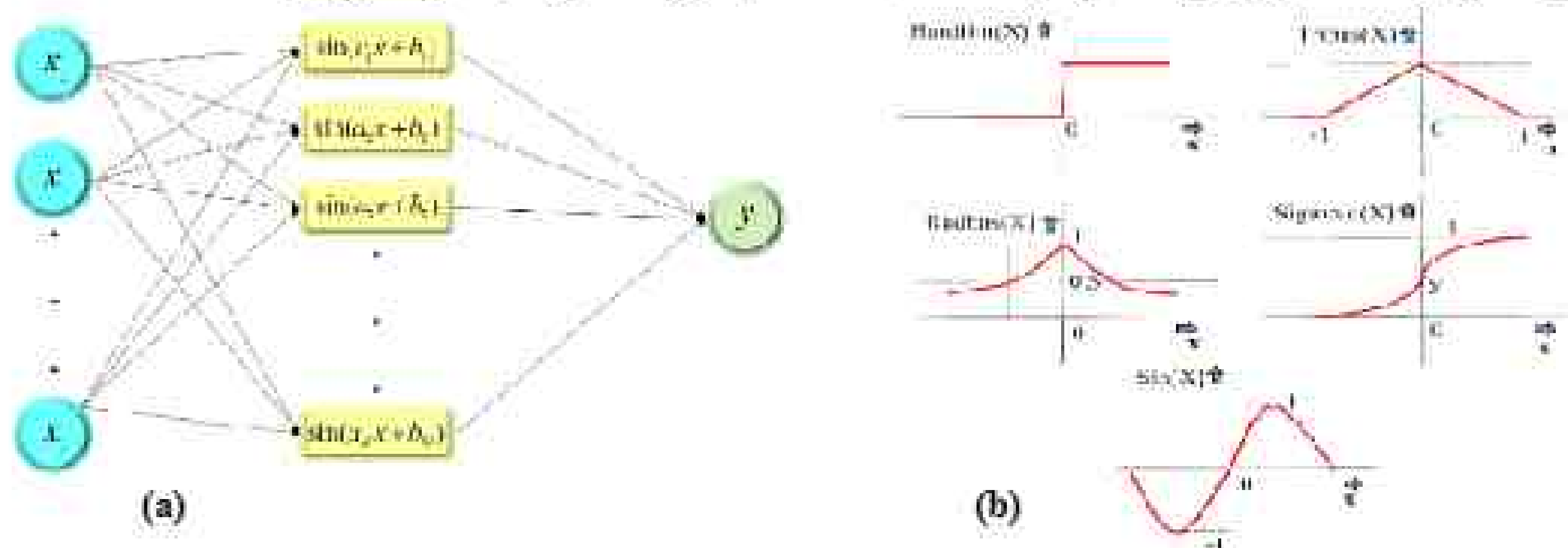
ماشین آموزش نیرومند (ELM) یک شبکه عصبی پیشخور^۲ تک‌لایه بوده و توسط هوآنگ^۳ و همکاران (۲۰۰۴، ۲۰۰۶) ارائه شده است. ELM وزن‌های ورودی را به‌صورت تصادفی و وزن‌های خروجی را به‌صورت تحلیلی^۴ تعیین می‌کند. ساختار کلی این الگوریتم در شکل (۳، الف) ارائه شده است. تنها تفاوت ELM با شبکه عصبی پیشخور تک‌لایه^۵ (SLFFNN)، عدم استفاده از بایاس^۶ برای نرون خروجی است. نرون‌های لایه ورودی با همه نرون‌های لایه مخفی در ارتباط است. تابع فعال‌سازی نرون‌های مخفی می‌تواند به‌صورت تابع پیوسته تکه‌ای^۷ باشد درحالی‌که برای نرون لایه خروجی به‌صورت خطی است. مدل ELM از الگوریتم‌های مختلفی جهت محاسبه وزن‌ها و بایاس‌ها استفاده می‌کند که در نتیجه کاهش قابل‌توجه زمان آموزش شبکه را به همراه دارد. توصیف ریاضی شبکه عصبی پیشخور تک‌لایه با تعداد n گره مخفی، به‌صورت زیر بیان می‌شود:

$$f_n(x) = \sum_{i=1}^n B_i G(a_i, b_i, x) \quad (۱۶)$$

که β_i وزن بین گره مخفی i ام و گره خروجی، a_i و b_i فاکتورهای آموزش گره‌های مخفی و $G(a_i, b_i, x)$ خروجی گره i ام برای ورودی x است. تابع فعال‌سازی $g(x)$ (که دارای انواع مختلفی می‌باشند) برای گره مخفی افزاینده^۸ $G(a_i, b_i, x)$ را می‌توان به شکل زیر بازنویسی کرد:

$$G(a_i, b_i, x) = G(a_i x + b_i) \quad (۱۷)$$

از توابع فعال‌سازی به‌منظور محاسبه خروجی پاسخ نرون‌ها استفاده می‌شود. زمانی که مجموعه‌ای از سیگنال ورودی وزن‌دار اعمال می‌شود، برای به‌دست‌آوردن پاسخ از توابع فعال‌سازی استفاده می‌شود (پندی^۹ و گوویند^{۱۰} ۲۰۱۶). توابع فعال‌سازی غیرخطی ELM که در این مطالعه مورد بررسی قرار گرفته است شامل تابع پله‌ای ($hardlim$)، سیگموئید^{۱۱} (sig)، سینوسی (sin)، بایاس مثلثی ($tribas$) و بایاس شعاعی ($radbas$) است که به‌صورت شکل ۳، ب تعریف می‌شوند.



شکل ۳، الف- ساختار شبکه ELM ب- توابع فعال‌سازی مختلف در مدل ELM

^۱ Extreme Learning Machine (ELM)

^۲ Feed-forward

^۳ Huang

^۴ Analytical

^۵ Single layer feed forward neural network

^۶ Bias

^۷ Piecewise continuous function

^۸ Additive

^۹ Pandey

^{۱۰} Govind

^{۱۱} Sigmoid

فعال‌سازی نرون‌های لایه مخفی برای هر نمونه آموزشی در یک شبکه ELM با تعداد " j " نرون در لایه مخفی، " i " نرون ورودی و تعداد " k " نمونه آموزشی، از رابطه زیر محاسبه می‌شود:

$$H_{jk} = g(\sum(w_{ji}X_{ik}) + B_j) \quad (18)$$

که $g(.)$ می‌تواند هر تابع فعال‌سازی غیرخطی پیوسته باشد، W_{ji} وزن نرون ورودی i ام و نرون لایه مخفی j ام، B_j بایاس نرون لایه مخفی j ام، X_{ik} ورودی نرون ورودی برای k امین نمونه آموزشی و H_{ik} ماتریس فعال‌سازی j امین نرون لایه مخفی برای k امین نمونه آموزشی است به‌طوری که فعال‌سازی همه نرون‌های لایه مخفی برای نمونه‌های مورد استفاده در آموزش توسط این ماتریس ارائه می‌شود. در این ماتریس j ستون و k ردیف است. ماتریس H به‌عنوان ماتریس لایه مخفی خروجی شبکه عصبی بیان می‌شود. وزن‌های بین نرون‌های لایه مخفی و خروجی با استفاده از برازش حداقل مربعات برای مقادیر هدف در حالت آموزش در برابر خروجی‌های نرون‌های لایه مخفی برای هر نمونه آموزشی، بکار برده می‌شود که معادل ریاضی آن را می‌توان به شکل زیر بیان کرد:

$$H\beta = T \quad (19)$$

$$\beta = (\beta_1, \dots, \beta_j)_{j \times 1} \quad (20)$$

که β نشان‌دهنده وزن بین نرون لایه خروجی و نرون‌های لایه مخفی است و T بردار نشان‌دهنده مقادیر هدف برای نمونه‌های آموزش است که به‌صورت معادله (۲۱) بیان می‌شود:

$$T = (T_1, \dots, T_K)_{K \times 1} \quad (21)$$

نهایتاً وزن‌ها را می‌توان از معادله (۲۲) محاسبه کرد:

$$\beta = H^T T \quad (22)$$

که در آن:

$$H(\tilde{a}, \tilde{b}, \tilde{x}) = \begin{bmatrix} G(a_1, b_1, x_1) & \dots & G(a_L, b_L, x_L) \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ G(a_1, b_1, x_N) & \dots & G(a_L, b_L, x_N) \end{bmatrix}_{N \times L} \quad (23)$$

$$\beta = \begin{bmatrix} \beta_1^T \\ \vdots \\ \beta_L^T \end{bmatrix}_{L \times m} \quad \text{and} \quad T = \begin{bmatrix} T_1^T \\ \vdots \\ T_L^T \end{bmatrix}_{L \times m} \quad (24)$$

که $\tilde{a} = a_1, \dots, a_L$; $\tilde{b} = b_1, \dots, b_L$; $\tilde{x} = x_1, \dots, x_L$ بردار وزن بین نرون‌های لایه‌های مخفی و لایه پنهان و H^T شبه معکوس $Moore-Penrose$ ماتریس H است. T بردار بین وزن‌های نمونه‌های آموزشی است. باتوجه به توضیحات ارائه شده می‌توان گفت که آموزش ELM شامل دو مرحله است: مرحله اول، اختصاص تصادفی وزن‌ها و بایاس‌ها به نرون‌های لایه پنهان و محاسبه خروجی لایه پنهان ماتریس H و مرحله دوم، محاسبه وزن‌های خروجی با استفاده از شبه معکوس $Moore-Penrose$ ماتریس H و مقادیر هدف برای نمونه‌های آموزشی مختلف. روند آموزش جهت پیدا کردن ماتریس لایه پنهان (H)، سریع است به‌طوری که از سرعت بالاتری نسبت به الگوریتم‌های مبتنی بر تکرار رایج مانند لوببرگ-مارکوآردت^۱ که در آن هیچ نوع روانی از بهینه‌سازی غیرخطی را در بر نمی‌گیرد، برخوردار است؛ بنابراین زمان آموزش شبکه به طور قابل توجهی کاهش می‌یابد (هوآنگ، ۲۰۰۶).

¹ Levenberg-Marquardt

۶. آموزش نیرومند با داده‌های پرت^۱

به‌منظور مدل‌سازی با استفاده از مدل‌های مبتنی بر هوش مصنوعی همیشه داده‌های به‌صورت outlier وجود دارند و به دلیل اینکه عموماً وجود چنین نمونه‌هایی در بسیاری از موارد به طبیعت موجود در مسئله برمی‌گردد، امکان حذف آنها وجود ندارد؛ بنابراین، درصدی از کل خطای آموزش (e) را شامل می‌شود. به‌منظور برخورد با چنین داده‌هایی، وجود outliers با sparsity تعریف می‌شود. ژانگ^۲ و لو^۳ (۲۰۱۵) با دانش اینکه استفاده از 10-norm sparsity را نسبت به 12-norm بهتر منعکس می‌کند، جهت محاسبه ماتریس وزن خروجی (β)، به جای استفاده از 12-norm خطای آموزش (e) را به گونه‌ای در نظر می‌گیرند که sparse باشد.

$$\min_{\beta} C\|e\|_0 + \|\beta\|_2^2 \text{ subject to } y - H\beta = e \quad (25)$$

$$\beta = [\beta_1, \dots, \beta_N]^T$$

(β): ماتریس وزن‌های خروجی است (w_0 یا همان w_{output} است).

(یا در برخی منابع به این شکل نوشته می‌شود (w_0) ماتریس وزن‌های خروجی است):

$$\min_{w_0} C\|e\|_0 + \|w_0\|_2^2 \text{ subject to } T - Hw_0$$

رابطه فوق یک مسئله برنامه‌نویسی غیرمحدب^۴ است، یکی از ساده‌ترین راه‌ها جهت حل این مسئله، نوشتن آن به‌صورت یک مسئله محدب قابل کنترل بدون از بین رفتن ویژگی پراکندگی^۵ است، ترم پراکنده یا sparse با استفاده از 11-norm به دست می‌آید، جای‌گذاری 10-norm با 11-norm، نه تنها منجر به حداقل‌سازی تحدب^۶ (کم شدن تابع خطا) می‌شود بلکه وجود مشخصات پراکندگی یا وجود وقایع حدی (داده‌های نادر) را نیز تضمین می‌کند.

$$\min_{\beta} \|e\|_1 + \frac{1}{c} \|\beta\|_2^2 \text{ subject to } y - H\beta = e \quad (26)$$

رابط فوق یک مسئله بهینه‌سازی محدب مقید^۷ است به‌طوری که به طور کامل دامنه مناسب رویکرد تکمیل شده ضرب لاگرانژی^۸ را تطبیق می‌کند.

$$L_{\mu}(e, \beta, \lambda) = \|e\|_1 + \frac{1}{c} \|\beta\|_2^2 + \lambda^2 (y - H\beta - e) + \frac{\mu}{2} \|y - H\beta - e\|_2^2 \quad (27)$$

که $\mu = 2N/\|y\|_1$ (یانگ^۹ و ژانگ^{۱۰}، ۲۰۱۱) بر پارامتر جریمه^{۱۱} دلالت دارد و $\lambda \in R^n$ بردار ضرب لاگرانژی است. جواب بهینه (e, β) و بردار ضرب لاگرانژی (λ) با استفاده از حداقل‌سازی تابع زیر طی فرایند تکراری، به دست می‌آید.

$$\begin{cases} (e_{k+1}, \beta_{k+1}) = \arg \min_{e, \beta} L_{\mu}(e, \beta, \lambda) & (a) \\ \lambda_{k+1} = \lambda_k + \mu(y - H\beta_{k+1} - e_{k+1}) & (b) \end{cases} \quad (28)$$

۷. مدل‌های هیبرید GA-ANN و ICA-ANN

یکی از ساده‌ترین و کارآمدترین روش‌های پیشنهادی برای استفاده در طراحی شبکه‌های عصبی، مدل (Multi layer perceptron/MLP) است که از یک لایه ورودی، یک یا چند لایه پنهان و یک لایه خروجی تشکیل یافته است. در این ساختار،

¹ Outlier Robust Extreme Learning Machine (GMDH)

² Zhang

³ Luo

⁴ Non-convex programming

⁵ Tractable convex relaxation form without loss of the sparsity characteristic

⁶ Minimization convex

⁷ Constrained convex

⁸ Augmented Lagrangian (AL) multiplier

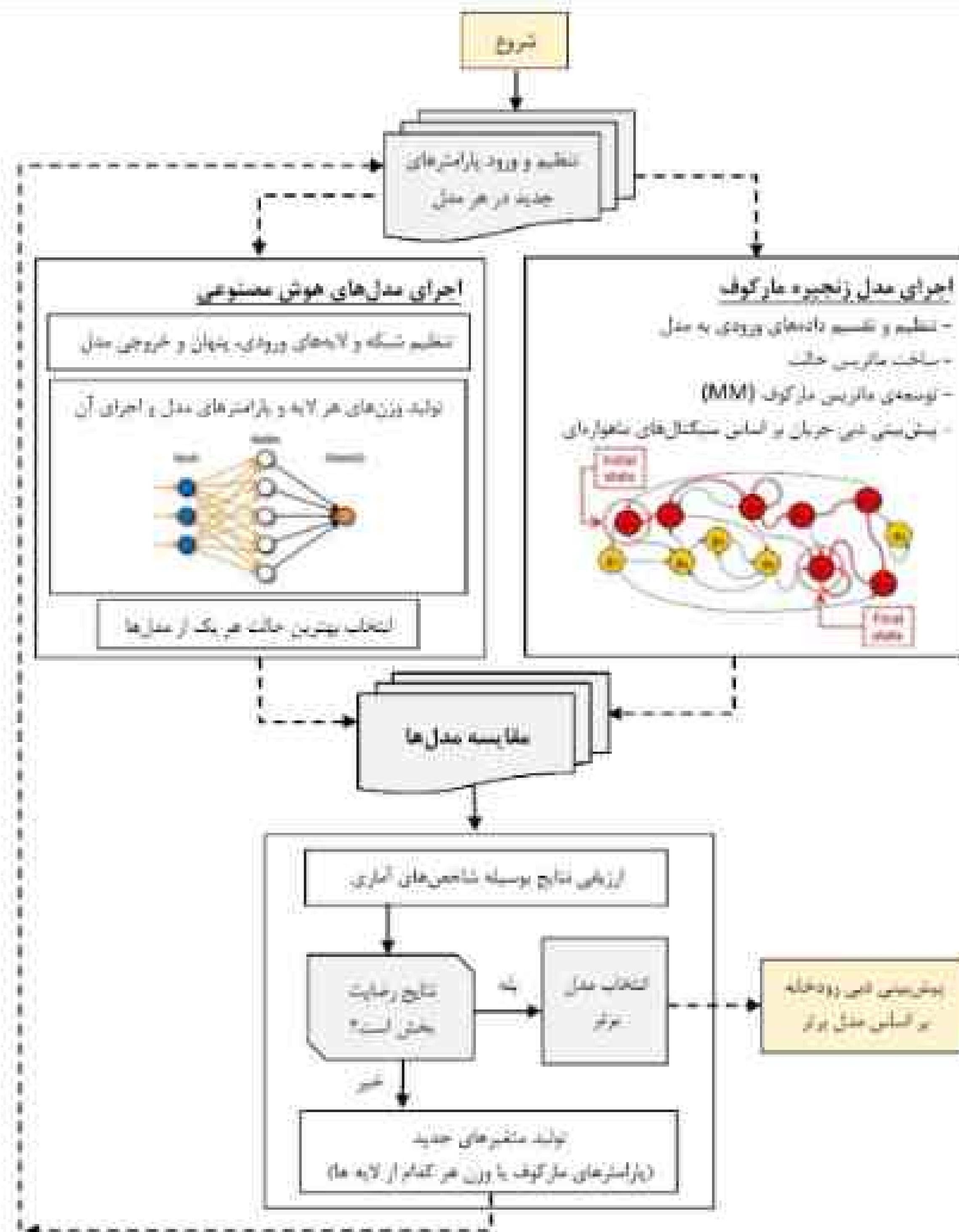
⁹ Yang

¹⁰ Zhang

¹¹ Penalty

تمام نرون‌های یک لایه به تمام نرون‌های لایه بعد متصل هستند. این چیدمان اصطلاحاً یک شبکه با اتصالات کامل را تشکیل می‌دهد. برخلاف شبکه‌های عصبی پرسپترون تک‌لایه، شبکه‌های چندلایه می‌توانند برای یادگیری مسائل غیرخطی و همچنین مسائلی با تصمیم‌گیری‌های متعدد بکار روند. اگر مجموعه داده دارای m ویژگی باشد؛ بنابراین در شبکه‌های عصبی لایه ورودی نیز دارای m نرون است و از این رو نیاز به n تا وزن W نیز هست که در ورودی‌ها ضرب شوند. ویژگی‌های مجموعه داده‌ها، متغیرهای مستقلی هستند که بر خروجی یا متغیر وابسته تأثیر می‌گذارند. همچنین با داشتن n نرون درون لایه پنهان، به n عدد مجموعه وزن‌ها $(W_1, W_2, \dots, W_n)$ نیاز است تا بتوان عملیات ضرب وزن‌ها در ورودی‌های X انجام شود. برای پیش‌بینی دقیق خروجی مدل، باید وزن‌های شبکه در تمام لایه‌ها اصلاح شده و مقادیر بهینه آنها به دست آید. به منظور آموزش شبکه و اصلاح وزن‌ها تا رسیدن به یک خطای معنادار، روش‌های بسیار زیادی وجود دارد. یکی از روش‌های مؤثر در این زمینه ترکیب مدل $MILP$ با الگوریتم بهینه‌سازی در قالب یک مدل هیبرید است. در این تحقیق از دو مدل هیبرید $GA-ANN$ و $ICA-ANN$ استفاده شد. در ساختار این مدل‌ها، وزن‌های بهینه توسط الگوریتم‌های بهینه‌سازی ژنتیک و رقابت استعماری به دست می‌آیند. تابع هدف در این مدل‌ها کمینه‌سازی مقدار $RMSE$ است. تولید و اصلاح وزن‌ها در ساختار مدل تا رسیدن به کمترین خطا ادامه می‌یابد و تعداد تکرار الگوریتم بر این اساس تنظیم می‌شود. در هر یک از این مدل‌ها ۸۰ درصد از داده‌های موجود به صورت تصادفی به عنوان داده‌های مرحله آموزش در نظر گرفته شد و داده‌های باقیمانده (۲۰ درصد) به عنوان داده‌های مرحله آزمون بکار گرفته شد.

برای درک بهتر روش تحقیق، مراحل انجام کار به صورت یک روندنما در شکل (۴) نشان داده شده است.



شکل ۴. روندنمای مراحل انجام تحقیق

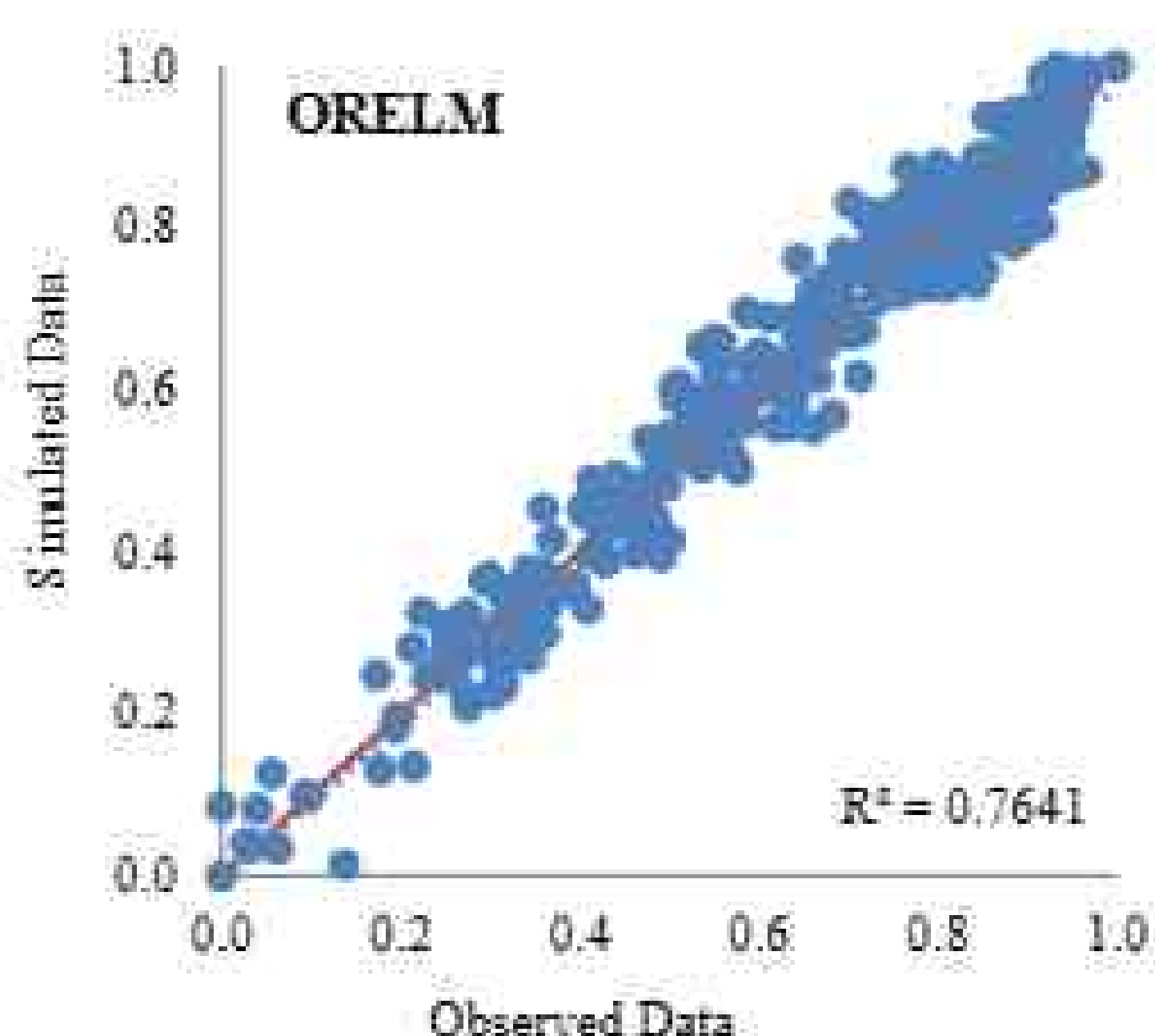
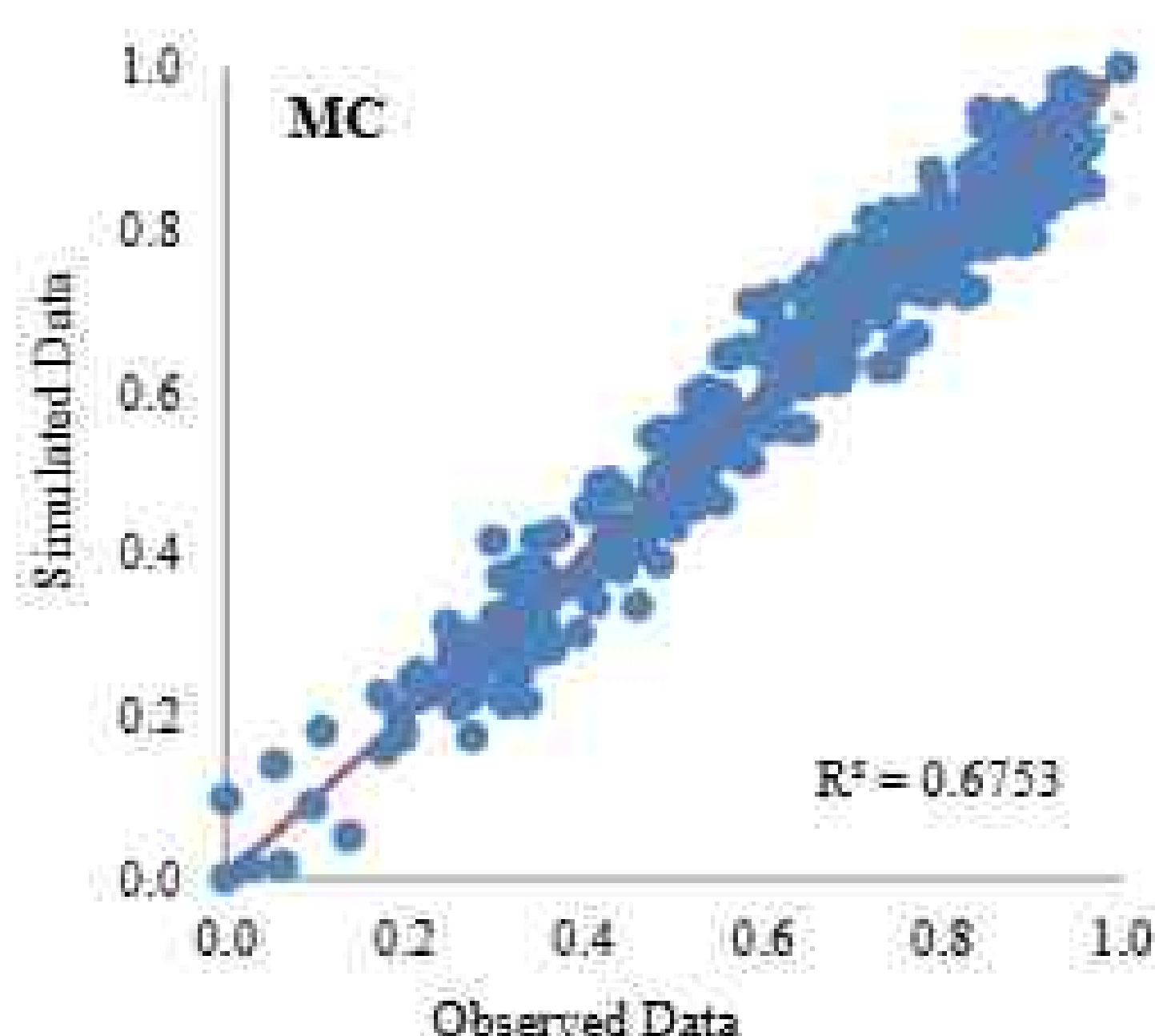
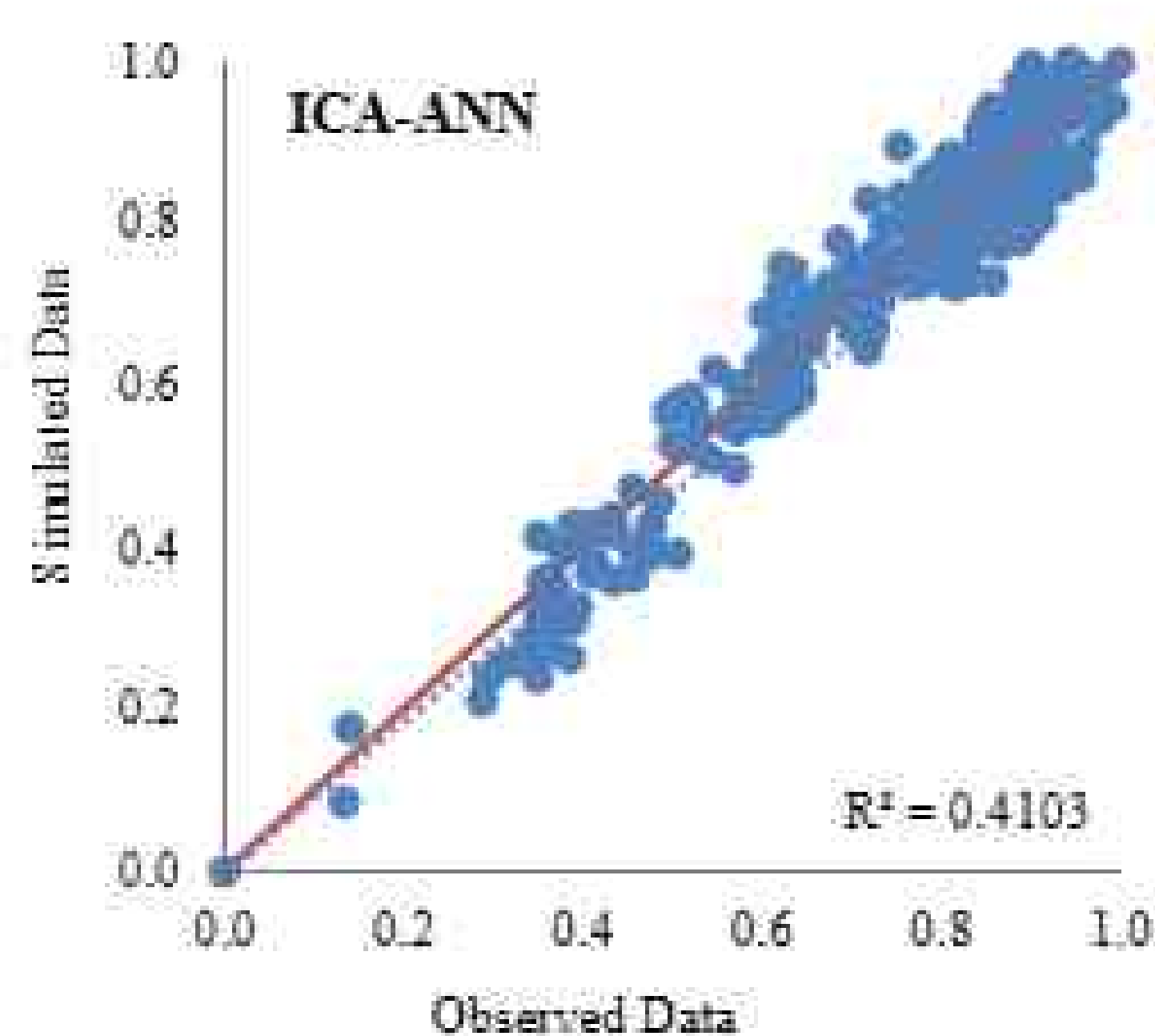
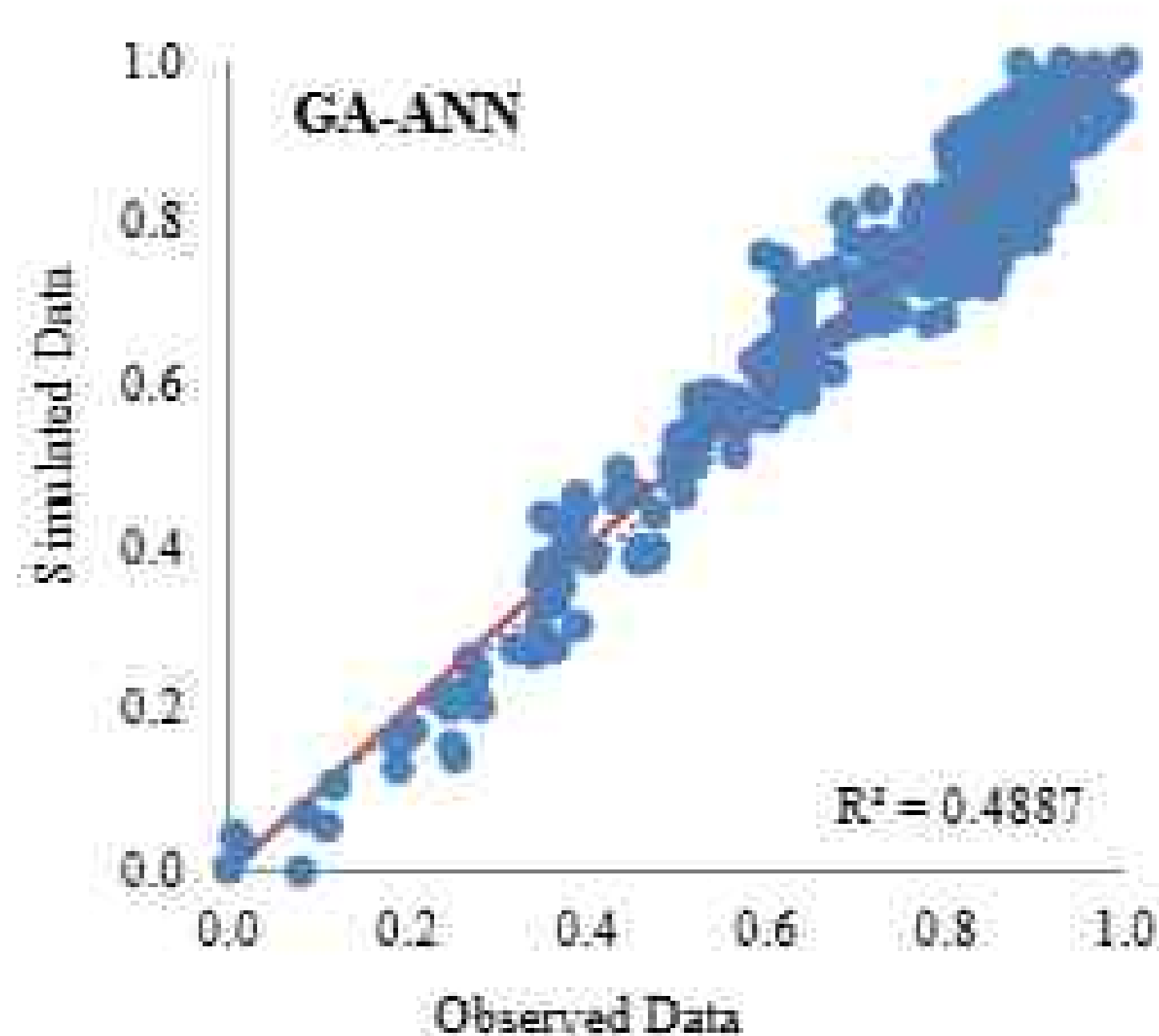
یافته‌های پژوهش

۱. پیش‌بینی دبی رودخانه بر اساس مدل‌های هوش مصنوعی و سیگنال‌های ماهواره‌ای

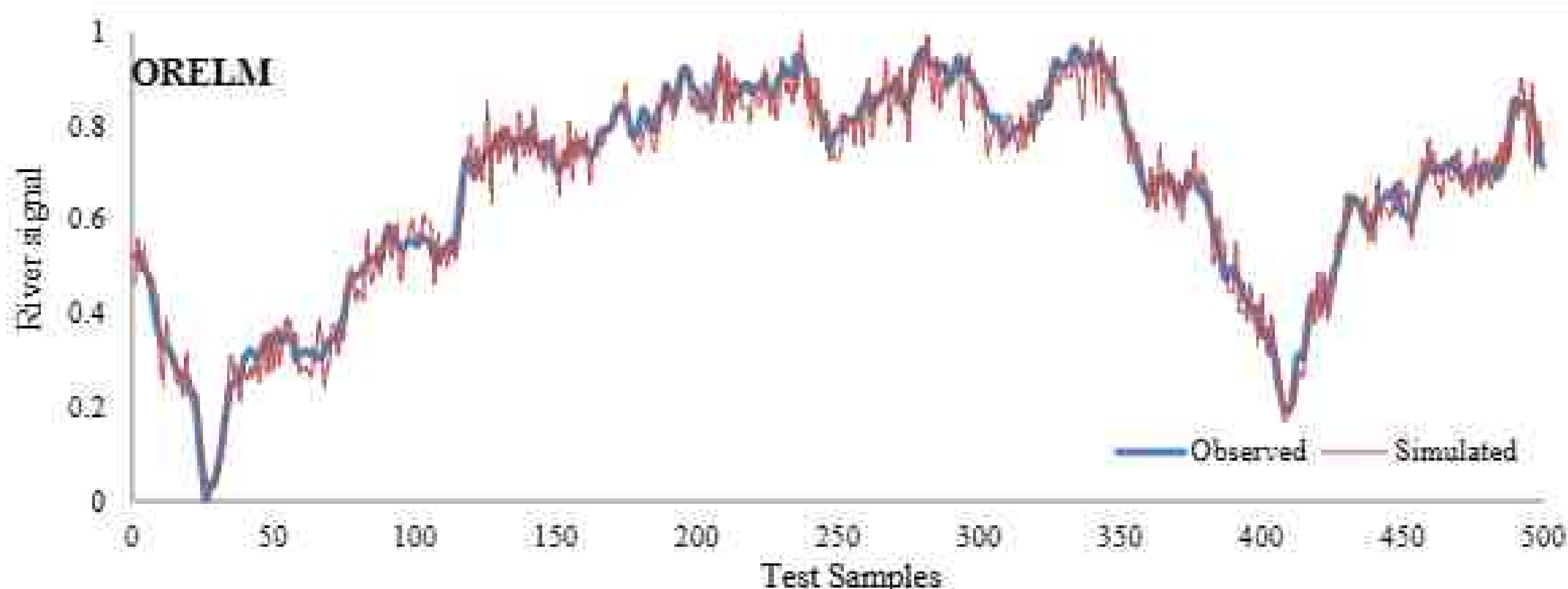
بهترین نتایج حاصل از اجرای هر کدام از این مدل‌ها در جدول (۱) ارائه شده است. بر اساس این جدول مدل ORELM باتوجه به تمامی شاخص‌ها دارای دقت بیشتری نسبت به سایر مدل‌ها در مراحل **train** و **test** می‌باشد. پس از آن مدل MC در رده دوم از نظر دقت پیش‌بینی قرار دارد. شکل (۵) پراکندگی نقاط در اطراف خط $Y=X$ و مقدار مجذور ضریب همبستگی برای انتخاب بهترین مدل هوش مصنوعی در مرحله تست مدل‌سازی برای هر یک از مدل‌های MC, ICA-ANN, GA-ANN و ORELM نشان می‌دهد. پراکشتن منظم‌تر و نزدیک‌تر نقاط در اطراف خط $Y=X$ در مدل ORELM نیز حاکی از دقت بیشتر این مدل در مقایسه با سایر مدل‌ها است. براین اساس سری زمانی مقادیر پیش‌بینی شده دبی رودخانه مارون بر اساس مدل برتر (ORELM) در مقایسه با داده‌های مشاهده‌ای در مرحله تست در شکل (۶) نشان داده شده است.

جدول ۱. ارزیابی عملکرد مدل‌های *GA-ANN*، *MC ICA-ANN* و *ORELM* در پیش‌بینی دبی رودخانه پراساس سیگنال‌های ماهواره‌ای با استفاده از شاخص‌های آماری در مراحل *test* و *train*

Model Type	Input combination		Train				Test		
	Signal Data	RM SE	NR MSE	NA SH	R	RM SE	NR MSE	NA SH	R
GA-ANN	t-1	0.6966	0.0566	0.7748	0.7880	0.5984	0.0563	0.6874	0.6991
ICA-ANN	t-1	0.6178	0.0502	0.7799	0.7898	0.6185	0.0582	0.6325	0.6405
MC	t-1	0.1580	0.0128	0.8488	0.8495	0.1000	0.0260	0.8211	0.8218
ORELM	t-1	0.1333	0.0108	0.8891	0.8899	0.0623	0.0162	0.8733	0.8741



شکل ۵. پراکندگی نقاط در اطراف خط $Y=X$ و مقدار مجذور ضریب همبستگی برای انتخاب بهترین مدل در مرحله تست مدل سازی

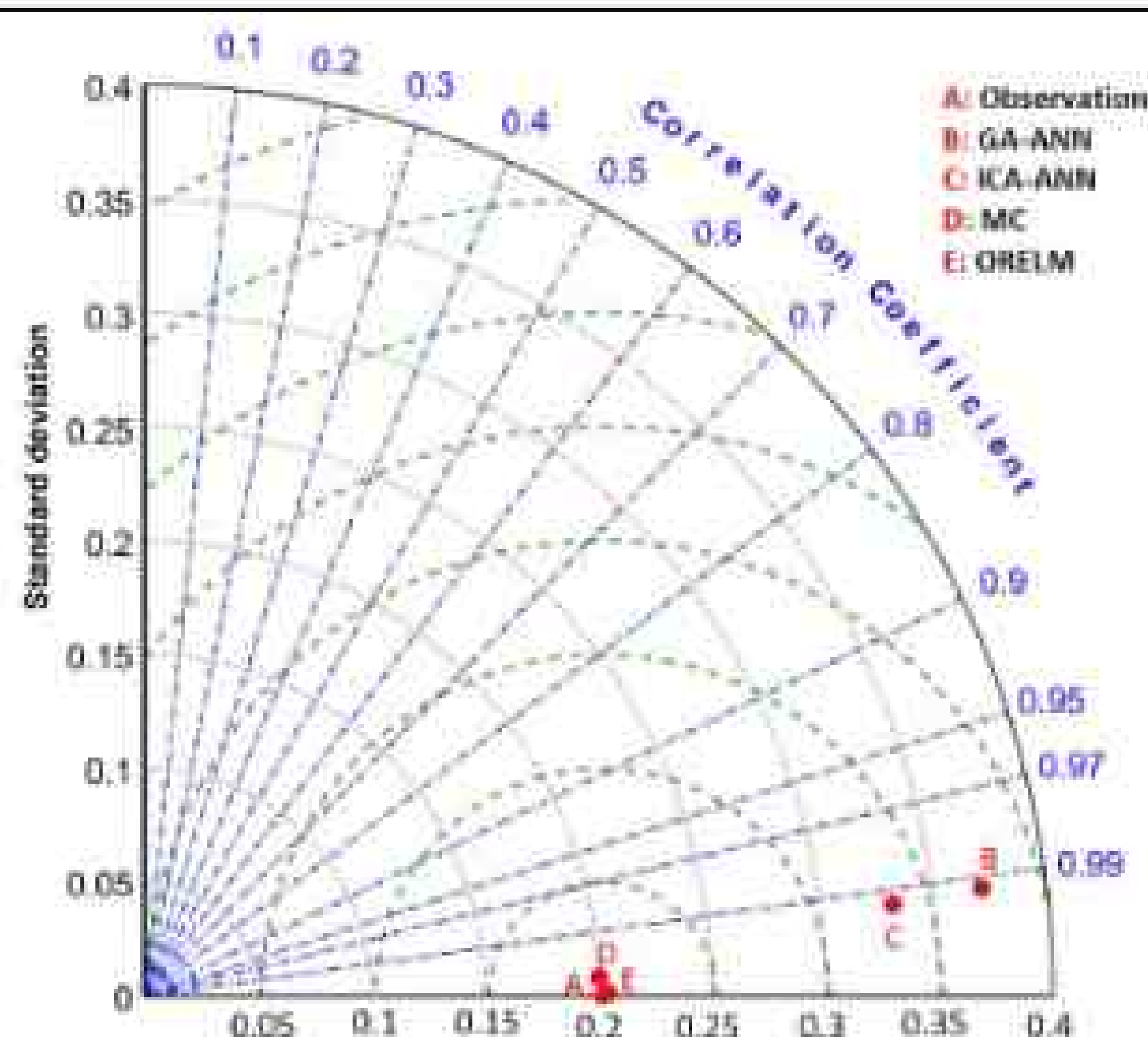


شکل ۶. سری زمانی مقادیر پیش‌بینی شده دبی رودخانه بر اساس مدل برتر (ORELM) در مقایسه با داده‌های مشاهده‌ای در مرحله تست

۲. انتخاب مدل برتر بر اساس دیاگرام تیلور

برای اطمینان از انتخاب درست مدل برتر از دیاگرام تیلور استفاده شد. شکل ۷ نمودار تیلور (تیلور، ۲۰۰۱) برای انتخاب روش برتر بین روش‌های GA-ANN، MC ICA-ANN و ORELM برای پیش‌بینی دبی رودخانه بر اساس سیگنال‌های ماهواره‌ای را نشان می‌دهد. فاصله نقاط ایجاد شده برای هر روش از نقطه مشاهده شده برابر است با RMSE در مرکز؛ بنابراین، مدلی که با مقادیر مشاهده‌شده سازگار است، مجموعه‌ای از مقادیر شبیه‌سازی شده است که دارای ضریب تعیین ۱ و دارای انحراف معیار مشابه با مقادیر مشاهده شده هستند (زین‌الدین و همکاران، ۲۰۱۸). در این دیاگرام نقطه A نشان‌دهنده داده‌های مشاهده‌ای دبی رودخانه و نتایج ارزیابی مدل‌های فوق به ترتیب با نقاط B ، C ، D و E نشان داده شده‌اند. این نمودار با استفاده از شاخص‌های ضریب همبستگی و انحراف معیار، صحت روش‌های مختلف را ارزیابی می‌کند. این شکل عملکرد روش‌های GA-ANN، MC ICA-ANN و ORELM را با روش پیشنهادی برای ارزیابی صحت پیش‌بینی‌های انجام شده مقایسه می‌کند. فاصله هر نقطه ایجاد شده برای مدل‌های مختلف (B ، C ، D ، E) از نقطه مشاهده شده (A) به‌عنوان یک مرجع مقایسه در نظر گرفته می‌شود؛ بنابراین، یک مدل سازگار با مقادیر مشاهده شده، مجموعه‌ای از نقاطی است که ضریب همبستگی نزدیک به ۱ دارند و انحراف استاندارد مشابهی با مقادیر مشاهده شده دارند (زین‌الدین و همکاران، ۲۰۱۸). نتایج حاصل از ارزیابی روش‌ها با استفاده از دیاگرام تیلور نشان می‌دهد روش‌های GA-ANN، ICA-ANN و MC (نقاط B ، C ، D) دقت کمتری در پیش‌بینی دبی رودخانه بر اساس سیگنال‌های ماهواره‌ای دارند، درحالی‌که روش ORELM (نقطه E) تفاوت نسبتاً کمی با مقادیر مشاهده شده دارد؛ بنابراین نزدیک‌ترین نقطه به نقطه مرجع مربوط به روش ORELM (نقطه E) می‌باشد؛ لذا براین اساس روش ORELM دقت بالاتری نسبت به سایر روش‌ها برای پیش‌بینی دبی رودخانه دارد.

نتایج حاصل از کاربرد مدل هوش مصنوعی ORELM نشان می‌دهد این روش توانسته است در دوره آماری منتخب با کمترین میزان خطا دبی ورودی به مخزن سد مارون را پیش‌بینی نماید، به‌طوری که مقدار RMSE در این روش در مرحله test حدود ۰/۰۶۲ بود که نسبت به سایر مدل‌ها کمترین بود. نتایج نشان می‌دهد مدل ORELM بدون نیاز به اطلاعات و داده‌های فراوان و بدون بهره‌گیری از فرایند پیچیده مدل‌سازی بر اساس معادلات حاکم و با صرف زمان بسیار کمتر دبی رودخانه را بر اساس سیگنال‌های ماهواره‌ای به درستی و با دقت زیاد پیش‌بینی نماید.



شکل ۷. نمودار همبستگی تیلور برای انتخاب بهترین مدل هوش مصنوعی در مرحله تست مدل سازی

بحث

در این مطالعه از روش‌های مبتنی بر شبکه‌های عصبی مصنوعی برای پیش‌بینی سری زمانی جریان رودخانه بر اساس سیگنال‌های ماهواره‌ای در مقایسه با روش زنجیره مارکوف معمولی استفاده شده است تا بتوان قابلیت جایگزینی این روش‌ها با مدل‌های پیچیده و همچنین استفاده از اطلاعات ماهواره‌ای بجای داده‌های گران‌قیمت زمینی را بررسی کرد. این امر برای جایی که شرایط مطلوب برای به‌کارگیری مدل‌های عددی پیچیده برقرار نیست و یا اینکه اطلاعات کافی زمینی در دست نیست بسیار حائز اهمیت است. طوری که بتوان بر اساس تعداد ورودی‌های بسیار اندک و سیگنال‌های ماهواره‌ای، دبی رودخانه‌ها را با دقت زیاد پیش‌بینی نمود. با توجه به اهداف این تحقیق در تمامی روش‌های هوش مصنوعی و روش زنجیره مارکوف از سیگنال‌های ماهواره‌ای در روزهای قبل به‌عنوان داده‌های ورودی به مدل استفاده شد. خروجی مدل نیز داده‌های مشاهداتی ثبت شده در ایستگاه هیدرومتری در نزدیکی ورودی به سد مارون در ماه خاخر (t) است که بر اساس داده‌برداری زمینی استخراج شده است. برای پیش‌بینی جریان ورودی به مخزن سد مارون، عملکرد این مدل‌ها بر اساس شاخص‌های $NASH$, $NRMSE$, $RMSE$ و R مورد ارزیابی قرار گرفت.

نتیجه‌گیری

امکان پیش‌بینی دبی رودخانه مارون در محل ورودی به سد بر اساس حجم اطلاعات بسیار کم نسبت به مدل‌های عددی و تنها با استفاده از سیگنال‌های ماهواره‌ای یکی از مهم‌ترین دستاوردهای این تحقیق است. در این حالت بدون نیاز به پارامترهای هواشناسی، خاک، زمین‌شناسی، اطلاعات توپوگرافی و شیب حوضه، پوشش گیاهی، اطلاعات برداشت آب از رودخانه‌ها، داده‌های اترکنش آب سطحی و زیرزمینی و بدون نیاز به نقشه‌ها و نرم‌افزارهای پیچیده و بدون صرف زمان و هزینه زیاد برای کالیبراسیون و صحت سنجی مدل‌های ریاضی، دبی رودخانه بر اساس روش‌های هوش مصنوعی و سیگنال‌های ماهواره‌ای پیش‌بینی می‌گردد. این امر کمک بزرگی به متخصصین بخش منابع آب در حوضه‌های فاقد آمار یا حوضه‌هایی که فاقد اطلاعات پایهای و نقشه‌های دقیق بوده و یا مناطقی که با نقص آمار گسترده مواجه هستند می‌کند. زیرا با استفاده از مدل‌های هوش مصنوعی با صرف زمان و هزینه بسیار کم اطلاعات مدیریتی بسیار ارزشمندی در خصوص پیش‌بینی توانانات جریان ورودی به مخازن سدها در سال‌های

خشک و تر به دست می‌آید، ارزیابی عملکرد مدل‌های هوش مصنوعی (ORELM, MC ICA-ANN, GA-ANN) در رودخانه مارون نشان داد این مدل‌ها دقت بسیار خوبی در پیش‌بینی نوسانات دبی رودخانه بر اساس سیگنال‌های ماهواره‌ای دارند. از بین این مدل‌ها، مدل ORELM با مقدار RMSE در حدود ۰/۱۳۳ و ۰/۰۶۲ در دو مرحله train و test دارای بیشترین دقت بود. دیاگرام تیلور نیز با بهره‌گیری از معیارهای خطای بیشتر این نتیجه را تأیید کرد تا مدل ORELM با اطمینان زیاد به‌عنوان بهترین مدل هوش مصنوعی برای پیش‌بینی دبی رودخانه در محل ورودی به مخزن سد مارون معرفی گردد. با توجه به اهمیت آگاهی از مقدار جریان ورودی به مخازن سدها به‌عنوان یکی از مهم‌ترین پارامترهای بیابان منابع آب می‌توان مدل‌های هوش مصنوعی مورد استفاده در این تحقیق را بخصوص برای مناطق فاقد آمار پایه و یا در شرایطی که امکان استفاده از مدل‌های ریاضی وجود ندارد با به‌کارگیری اطلاعات ماهواره‌ای توصیه نمود. بر اساس نتایج به‌دست آمده می‌توان مدل‌های توسعه داده شده در این تحقیق را برای سایر مناطق مطالعاتی با رویکرد بهره‌برداری از سد و رودخانه نیز پیشنهاد داد. در این صورت بدون نیاز به روابط و معادلات پیچیده و زمان‌بر و تنها بر اساس سیگنال‌های ماهواره‌ای و یا هزینه بسیار کم می‌توان دبی رودخانه را در منطقه مورد مطالعه در دوره‌های خشک و تر با دقت زیاد پیش‌بینی نمود.

ملاحظات اخلاقی

پیروی از اصول اخلاق پژوهش

نویسندگان اصول اخلاقی را در انجام و انتشار این پژوهش علمی رعایت نموده‌اند و این موضوع مورد تأیید همه آنهاست. سامانه آبیاری قطره‌ای سطحی با جریان پیوسته به کار گرفته شوند.

تعارض منافع

بنا بر اظهار نویسندگان این مقاله تعارض منافع ندارد.

References

- Aman Jalili, A., Najarchi, M., Shabanlou, S., & Jafarinia, R. (2023) Multiobjective optimization of water resources in real time based on integration of NSGA-II and support vector machines. *Environ Sci Pollut Res*, 30, 16464–16475. <https://doi.org/10.1007/s11356-022-22723-4>
- Amiri, S., Rajabi, A., Shabanlou, S., Yosefvand, F., & Izadbakhsh, M.A. (2023). Prediction of groundwater level variations using deep learning methods and GMS numerical model. *Earth Sci Inform*, 16, 3227–3241. <https://doi.org/10.1007/s12145-023-01052-1>
- Azari, A., Zeynoddin, M., Ebtehaj, I., Sattar, A. M. A., Gharabaghi, B., & Bonakdari, H. (2021). Integrated preprocessing techniques with linear stochastic approaches in groundwater level forecasting. *Acta Geophysica*, 69, 1395–1411. <https://doi.org/10.1007/s11600-021-00617-2>
- Azizi, E., Yosefvand, F., Yaghoubi, B., Izadbakhsh, M.A., & Shabanlou, S. (2023). Modelling and prediction of groundwater level using wavelet transform and machine learning methods: A case study for the Sahneh Plain, Iran. *Irrigation and Drainage*, 72(3), 747–762. <https://doi.org/10.1002/ird.2794>
- Bayesteh, M., & Azari, A. (2021). Stochastic Optimization of Reservoir Operation by Applying Hedging Rules. *Journal of Water Resources. Planning. And Management*, 147(2), 04020099. [http://dx.doi.org/10.1061/\(ASCE\)WR.1943-5452.0001312](http://dx.doi.org/10.1061/(ASCE)WR.1943-5452.0001312)
- Ebtehaj, I., Bonakdari, H., & Shamshirband, S. (2016). Extreme learning machine assessment for estimating sediment transport in open channels. *Eng. Comput.* 32, 691–704. <https://doi.org/10.1007/s00366-016-0446-1>
- Ebtehaj, I., Bonakdari, H., Zeynoddin, M., Gharabaghi, B., & Azari, A. (2020). Evaluation of preprocessing techniques for improving the accuracy of stochastic rainfall forecast models. *International Journal of Environmental Science and Technology*, 17, 505–524. <https://doi.org/10.1007/s13762-019-02361-z>
- Esmaili, F., Shabanlou, S., & Saadat, M. A. (2021). Wavelet-outlier robust extreme learning machine for rainfall forecasting in Ardabil City, Iran. *Earth Sci Inform*. <https://doi.org/10.1007/s12145-021-00681-8>
- Fallahi, M.M., Shabanlou, S., Rajabi, A., Yosefvand, F., & IzadBakhsh, M.A. (2023). Effects of climate change on groundwater level variations affected by uncertainty (case study: Razan aquifer). *Appl Water Sci*, 13(143), 1-16. <https://doi.org/10.1007/s13201-023-01949-8>
- Graham, P W., Andersen, M S., McCabe, M F., Ajami, H., Baker, A., & Acworth, I. (2015). To what extent do long-duration high-volume dam releases influence river-aquifer interactions? A case study in New South Wales, Australia. *Hydrogeology Journal*, 23, 319–334. <http://dx.doi.org/10.1007/s10040-014-1212-3>
- Guzman, S. M., Paz, J. O., Tagert, M. L. M., & Mercer, A. E. (2019). Evaluation of Seasonally Classified Inputs for the Prediction of Daily Groundwater Levels: NARX Networks Vs Support Vector Machines. *Environmental Modeling & Assessment*, 24(2), 223-234. <https://link.springer.com/article/10.1007/s10666-018-9639-x>
- Huang, G. B., & Siew, C. K. (2004). Extreme learning machine: RBF network case. *Proceedings of the Eighth International Conference on Control, Automation, Robotics and Vision (ICARCV 2004)*, Kunming, China. <http://dx.doi.org/10.1109/ICARCV.2004.1468985>
- Huang, G. B., Zhu, Q. Y., & Siew, C. K. (2006). Extreme learning machine: theory and applications. *Neurocomputing*, 70(1-3), 489-501. <https://doi.org/10.1016/j.neucom.2005.12.126>
- Hu, L., Xu, Z., & Huang, W. (2016). Development of a river-groundwater interaction model and its application to a catchment in Northwestern China. *Journal of Hydrology*, 543, 483–500. <http://dx.doi.org/10.1016/j.jhydrol.2016.10.028>
- Irawan, D., Puradimaja, D., & Silaen, H. (2011). Hydrodynamic Relationship between ManMade Lake and Surrounding Aquifer, Cimahi, Bandung, Indonesia. *Journal of World Academy of Science, Engineering and Technology*, 58, 100-103. <http://dx.doi.org/10.13140/2.1.1711.3284>

- Ivkovic, K. M. (2009). A top-down approach to characterise aquifer-river interaction processes. *Journal of Hydrology*, 365, 145–155. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2008.11.021>
- Jalilian, A., Heydari, M., Azari, A., & Shabanlou, S. (2022). Extracting optimal rule curve of dam reservoir base on stochastic inflow. *Water Resour Manage*, 36, 1763–1782. <https://doi.org/10.1007/s11269-022-03087-3>
- Klove, B., Ala-Aho, P., Bertrand, G., Gurdak, J. J., Kupfersberger, H., Kværner, J., & PulidoVelazquez, M. (2014). Climate change impacts on groundwater and dependent ecosystems. *Journal of Hydrology*, 518, 250–266. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2013.06.037>
- Lachaal, F., Mlayah, A., Bedir, M., Tarhouni, J., & Leduc, Ch. (2012). Implementation of a 3-D and GIS tools: The Zeramidine-Beni Hassen Miocene aquifer system (east-central Tunisia). *Journal of Computers & Geosciences*, 48, 187–198. <https://doi.org/10.1016/j.cageo.2012.05.007>
- Lemieux, J., Hassaoui, J., Molson, J., Therrien, R., Therrien, P., Chouteau, M., & Ouellet, M. (2015). Simulating the impact of climate change on the groundwater resources of the Magdalen Islands. *Journal of Hydrology*, 3, 400–423. <https://doi.org/10.1016/j.ejrh.2015.02.011>
- Mazraeh, A., Bagherifar, M., Shabanlou, S., & Ekhlasmad, R. (2023). A Hybrid Machine Learning Model for Modeling Nitrate Concentration in Water Sources. *Water, Air, & Soil Pollution*, 234(11), 1–22. <http://dx.doi.org/10.1007/s11270-023-06745-3>
- Mazraeh, A., Bagherifar, M., Shabanlou, S., & Ekhlasmad, R. (2024). A novel committee-based framework for modeling groundwater level fluctuations: A combination of mathematical and machine learning models using the weighted multi-model ensemble mean algorithm. *Groundwater for Sustainable Development*, 24, 101062. <http://dx.doi.org/10.1016/j.gsd.2023.101062>
- Nadiri, A. A., Naderi, K., Khatibi, R., & Gharekhani, M. (2019). Modelling groundwater level variations by learning from multiple models using fuzzy logic. *Hydrological sciences journal*, 64(2), 210–226. <https://doi.org/10.1080/02626667.2018.1554940>
- Pahar, G., & Dhar, A. (2014). A Dry Zone-Wet Zone Based Modeling of Surface Water and Groundwater Interaction for Generalized Ground Profile. *Journal of Hydrology*, 519(27), 2215–2223. <http://dx.doi.org/10.1016/j.jhydrol.2014.09.088>
- Panahi, J., Mastouri, R., & Shabanlou, S. (2022). Insights into enhanced machine learning techniques for surface water quantity and quality prediction based on data pre-processing algorithms. *J Hydroinf*, 24(4), 875–897. <https://doi.org/10.2166/hydro.2022.022>
- Panda, D.K., Mishra, A., Kumar, A., (2012). Quantification of trends in groundwater levels of Gujarat in western India. *Hydrological Sciences Journal*, 57 (7), 1325–1336. <https://doi.org/10.1080/02626667.2012.705845>
- Pandey, P., & Govind, R. (2016). Analysis of Randomized Performance of Bias Parameters and Activation Function of Extreme Learning Machine. *International Journal of Computer Applications*, 135(1), 23–28. <https://doi.org/10.5120/ijca2016908274>
- Ramírez-Hernández, J., Hinojosa-Huerta, O., Peregrina-Llanes, M., Calvo-Fonseca, A., & Carrera-Villa, E. (2013). Groundwater responses to controlled water releases in the limitrophe region of the Colorado River: Implications for management and restoration. *J. of Ecological Engineering*, 59, 93–103. https://ui.adsabs.harvard.edu/link_gateway/2013EcEng.59..93R/doi:10.1016/j.ecoleng.2013.02.016
- Rayegani, F., Onwubolu, G. C., (2014). Fused deposition modelling (FDM) process parameter prediction and optimization using group method for data handling (GMDH) and differential evolution (DE). *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 73, 509–519. <https://doi.org/10.1007/s00170-014-5835-2>
- Shabanlou, S. (2018). Improvement of extreme learning machine using self-adaptive evolutionary algorithm for estimating discharge capacity of sharp-crested weirs located on

- the end of circular channels. *Flow Measurement and Instrumentation*, 59, 63-71. <https://doi.org/10.1016/j.flowmeasinst.2017.11.003>
- Shrestha, S., Bach, T. V., & Pandey, V. P. (2016). Climate change impacts on groundwater resources in Mekong Delta under representative concentration pathways (RCPs) scenarios. *Environmental Science and Policy*, 61, 1–13. <http://dx.doi.org/10.1016/j.envsci.2016.03.010>
- Soltani, K., Ebtehaj, I., Amiri, A., Azari, A., Gharabaghi, B., & Bonakdari, H. (2021). Mapping the spatial and temporal variability of flood susceptibility using remotely sensed normalized difference vegetation index and the forecasted changes in the future. *Science of The Total Environment*, 770, 145288. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2021.145288>
- Taylor, K.E. (2001). Summarizing multiple aspects of model performance in a single diagram. *J. Geophys. Res. Atmos.* 106, 7183–7192. <https://doi.org/10.1029/2000JD900719>
- Todd, W.R., & Kenneth, R.B. (2001). Report: Delineation of capture zones for municipal wells in fractured dolomite. Sturgeon Bay, Wisconsin, USA. *Hydrogeology Journal*, 9, 432–450. <http://dx.doi.org/10.1007/s100400100154>
- Xie, Y., Cook, P.G., Shanafield, M., Simmons, C.T., & Zheng, C. (2016). Uncertainty of natural tracer methods for quantifying river–aquifer interaction in a large river. *Journal of Hydrology*, 535, 135–147. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2016.01.071>
- Yang, J., & Zhang, Y. (2011). Alternating approximation algorithms for l1-problems in compress sensing. *SIAM J. Sci. Comput.*, 33(1), 250-278. <https://doi.org/10.1137/090777761>
- Yanxun, S., Yuan, F., Hui, Q., & Xuedi, Zh. (2011). Research and Application of Groundwater Numerical Simulation-A Case Study in Balasu Water Source. *Procedia Environmental Sciences*, 8, 146-152. <http://dx.doi.org/10.1016/j.proenv.2011.10.024>
- Zampieri, M., Serpetzoglou, E., Anagnostou, E. N., Nikolopoulos, E. I. and Papadopoulos, A. 2012. Improving the representation of river–groundwater interactions in land surface modeling at the regional scale: Observational evidence and parameterization applied in the Community Land Model. *Journal of Hydrology*, 420(421), 72–86. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2011.11.041>
- Zeinali, M., Azari, A., & Heidari, M. (2020a). Simulating Unsaturated Zone of Soil for Estimating the Recharge Rate and Flow Exchange Between a River and an Aquifer. *Water Resources Management*, 34, 425–443. <https://link.springer.com/article/10.1007/s11269-019-02458-7>
- Zeinali, M., Azari, A., & Heidari, M. (2020b). Multiobjective Optimization for Water Resource Management in Low-Flow Areas Based on a Coupled Surface Water–Groundwater Model. American Society of Civil Engineers. *J. Water Resour. Plann. Manage.* 146(5), 04020020. [http://dx.doi.org/10.1061/\(ASCE\)WR.1943-5452.0001189](http://dx.doi.org/10.1061/(ASCE)WR.1943-5452.0001189)
- Zeynoddin, M., Bonakdari, H., Azari, A., Ebtehaj, I., Gharabaghi, B., & Madavar, H.R. (2018). Novel hybrid linear stochastic with non-linear extreme learning machine methods for forecasting monthly rainfall a tropical climate. *Journal of environmental management*, 222, 190-206. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2018.05.072>
- Zeynoddin, M., Bonakdari, H., Ebtehaj, I., Azari, A., & Gharabaghi, B. (2020). A generalized linear stochastic model for lake level prediction. *Science of The Total Environment*, 723, 138015. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.138015>
- Zhang, K., & Luo, M. (2015). Outlier-robust extreme learning machine for regression problems. *Neurocomputing*, 151, 1519-1527. <https://doi.org/10.1016/j.neucom.2014.09.022>

Estimation of maximum flood discharge in ungauged basins (Case study: rivers of Shahrud county)

Masoume Hasan Barani ¹, Samad Emamgholizadeh ², and Khalil Azhdari ³

1. Department of Water and Soil, Faculty of Agriculture, Shahrood University of Technology, Shahrood, Iran. Email: Massi.barango@gmail.com

2. Corresponding author, Department of Water and Environmental, Civil Engineering Faculty, Shahrood University of Technology, Shahrood, Iran. Email: s_gholizadeh517@Shahroodut.ac.ir

3. Department of Water and Soil, Faculty of Agriculture, Shahrood University of Technology, Shahrood, Iran. Email: Azhdari2055@yahoo.com

Article Info.

Article type:
Research Article

Article history:

Received 30 November 2024

Received in revised form 10
March 2025

Accepted 25 July 2025

Available online 22 June 2026

Keywords:

empirical relations,

floods,

river,

watershed.

ABSTRACT

Objective: This study evaluates the accuracy of several empirical methods (Deacon, Fuller, Specific Flood, and Franco-Rodier) for estimating flood discharge in ungauged rivers of Semnan Province and identifies the most suitable method and its error for each river.

Method: Annual flood statistics from water gauge stations were collected and rigorously validated through visual inspection, statistical analysis (including mean and standard deviation), and outlier tests. Data independence was assessed via the run test, while homogeneity was verified using double mass curves. Four empirical methods were applied to estimate flood discharge based on physiographic watershed characteristics. Performance was evaluated by comparing results against statistical benchmarks and calculating relative errors for each river. The study focused on rivers originating from the Alborz Mountains, which are characterized by their short lengths and variable salinity.

Results: The results showed that the Specific Flood method achieved the highest accuracy for the Tash Sofia River, with an error of 35.63%. Fuller's method performed best for the Farahzad River, having only a 3.71% error. Deacon's method proved to be the most effective for the Majan River, with an 18.83% error, while Franco-Rodier delivered the best results for the Abersaj River, with a 38.91% error. Data homogeneity and randomness were confirmed across all stations. The run test validated the randomness of the flow, and the double mass curves indicated consistent hydrological behavior. Notably, accuracy varied significantly among the rivers, highlighting the importance of context in determining effectiveness.

Conclusions: Empirical methods can provide acceptable flood estimates in ungauged basins but require careful selection based on river-specific characteristics. Fuller's method achieved exceptional precision (3.71% error) for the Farahzad River, demonstrating its potential for targeted applications. However, no universal method emerged, as performance depended on watershed properties, such as terrain and flow regime. Practitioners should prioritize localized validation to minimize errors and ensure accuracy. These findings support the use of empirical approaches when traditional data are unavailable, thereby enhancing flood resilience in vulnerable regions.

Cite this article: Hasan Barani, M., Emamgholizadeh, S., & Azhdari, K. (2025). Estimation of Maximum Flood Discharge in Ungauged Basins (Case Study: Rivers of Shahrud County). *Advanced Technologies in Water Efficiency*, 6(2), 65-83. <https://doi.org/10.22126/atwe.2025.11381.1145>



© The Author(s)

<https://doi.org/10.22126/atwe.2025.11381.1145>

Publisher: Razi University.

Introduction

Floods are among the most significant natural disasters, affecting numerous regions worldwide, including developed countries. Among all natural disasters, floods cause the most damage to human populations. Approximately one-third of the damages caused by natural disasters are attributed to floods, and their consequences can directly or indirectly impact two-thirds of the global population. Floods also result in significant loss of life annually. As one of the most critical climate crises, floods claim thousands of lives each year, inflict substantial damage on human societies and the environment, and have instilled fear in populations since ancient times. Consequently, effective flood management and control are of paramount importance. Available evidence and reports indicate that flood-related damages exceed those caused by other natural disasters.

Arab Khodri (1989) utilized data from 42 hydrometric stations to develop empirical relationships for estimating maximum floods in areas lacking statistical data. These relationships were based on factors such as basin area, average annual precipitation, basin diameter, and shape factor, derived from flood investigations in the northern Alborz watershed. His findings identified the Log Pearson type 3 distribution as the most suitable regional distribution for the data.

Selajeh (1994) investigated floods in 38 watersheds, each covering less than 10,000 hectares. Using the results, he derived coefficients for empirical relationships to predict floods with return periods of 5, 10, 25, 50, and 100 years.

Nazari (2006) calibrated Fuller's empirical relationship for watersheds in Fars Province and classified the studied watersheds based on their flood potential.

Dasturani et al. (2009) emphasized the importance of studying floods and mudslides in watersheds, particularly the maximum discharge of river regimes. Their research analyzed the sensitivity of parameters in empirical relationships used to estimate instantaneous maximum flow rates. They evaluated ten methods, including Deacon, Krieger, Fuller, English, Kutun, Meyer, Fanning, Horton, and the United States Geological Survey (USGS) method. The results revealed that all methods were highly sensitive to the basin area parameter, especially in smaller areas. Among the methods, Fuller's approach showed greater sensitivity to changes in return periods during low-return intervals.

Method

This study focused on rivers in Semnan Province, including Tash Sefali, Farahzad, Majen, Abrasaj, and Cheshme Ali Damghan. These rivers originate from the southern slopes of the Alborz Mountain range and flow north to south into the desert plains. While the rivers have clear, fresh water at their sources, they become saline after passing through salt fields and chalky lands. Due to the short distance between the mountains and plains, these rivers are typically short in length. To estimate flood magnitudes, empirical methods such as Deacon's, Fuller's, special flood, and Franco-Rodier's were employed.

Results

Annual flood statistics from water gauge stations in the study area were collected and evaluated for accuracy. Initially, the data were visually inspected by comparing flood records across stations on a year-by-year basis. Subsequently, statistical methods, including calculations of mean and standard deviation, were used to verify the accuracy of annual flood

values. Additionally, outlier data tests were applied to assess the reliability of rainfall records from a hydrological perspective.

The independence (randomness) and homogeneity of the data were also examined. The run test method was used to evaluate data independence, while the double mass curve test was applied to assess homogeneity. Table 3 presents the results of the independence test for annual flood data at selected stations, confirming that the flow patterns are random.

Traditional empirical methods (Deacon, Fuller, special flood, and Franco-Rodier) were used to estimate flood values. The results indicated that:

- The specific flood method was the most accurate for the Tash Sofla River, with a relative error of 35.63%.
- Fuller's method provided the best estimate for the Farahzad River, with a relative error of 3.71%.
- Deacon's method was most suitable for the Majan River, with a relative error of 18.83%.
- Franco-Rodier's method yielded the best results for the Abersaj River, with a relative error of 38.91%.

Conclusions

This study evaluated the effectiveness of empirical methods in estimating floods with varying return periods. The findings revealed that:

- The specific flood method was the most accurate for the Tash Sofla River, despite its relatively high error rate of 35.63%.
- Fuller's empirical method provided the best estimate for the Farahzad River, with a minimal error of 3.71%.
- Deacon's method was most suitable for the Majan River, with an error of 18.83%.
- Franco-Rodier's method yielded the best results for the Abersaj River, albeit with a higher error rate of 38.91%.

The results demonstrate that the accuracy of empirical methods varies significantly across different rivers. Therefore, no single method can be universally recommended for flood estimation in the study area. Careful consideration of the appropriate method is essential to minimize errors and ensure accurate flood predictions. For instance, Fuller's method, with an error rate of 3.71% for the Farahzad River, proved highly effective in estimating maximum flood magnitudes.

Author Contributions

All authors contributed equally to the conceptualization of the article and writing of the original and subsequent drafts.

Data Availability Statement

Data available on request from the authors.

Acknowledgements

The authors would like to thank the Meteorological Organization and the Regional Water Company of Semnan Province for providing the necessary information for this research and for sharing the data used in this paper.

Ethical Considerations

The authors avoided data fabrication, falsification, plagiarism, and misconduct.

Funding

Not applicable

Conflict of Interest

The authors declare no conflict of interest.



برآورد دبی حداکثر سیلاب در حوضه‌های فاقد آمار (مطالعه موردی: رودخانه‌های شهرستان شاهرود)

معصومه حسن بارانی^۱، صمد امامقلی زاده^{۲*}، و خلیل اژدری^۳

۱. گروه آب و خاک، دانشکده کشاورزی، دانشگاه صنعتی شاهرود، ایران. رایانامه: Massi.baran90@gmail.com

۲. لیستده مسئول، گروه آب و محیط زیست، دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه صنعتی شاهرود، ایران. رایانامه: gholizadeh517@shahroodut.ac.ir

۳. گروه آب و خاک، دانشکده کشاورزی، دانشگاه صنعتی شاهرود، ایران. رایانامه: Arzhdari2055@yahoo.com

درباره مقاله	چکیده
نوع مقاله: مقاله پژوهشی	هدف: ارزیابی دقت روش‌های تجربی (دیکن، فولر، سیلاب ویژه و فرانکو-رودیر) در برآورد دبی سیلاب رودخانه‌های فاقد آمار هیدرومتری شهرستان شاهرود و تعیین مناسب‌ترین روش برای هر رودخانه.
تاریخ دریافت: ۱۴۰۳/۰۹/۱۰ تاریخ بازنگری: ۱۴۰۳/۱۲/۲۰ تاریخ پذیرش: ۱۴۰۴/۰۵/۰۳ تاریخ انتشار: ۱۴۰۵/۰۴/۰۱	روش پژوهش: با استفاده از داده‌های رودخانه‌های تاش سفلی، فرخزاد، مین و مین، دبی سیلاب به کمک روش‌های تجربی و روش آماری محاسبه شد و سپس دقت روش‌های تجربی از طریق مقایسه با نتایج روش آماری و بررسی خطای نسبی ارزیابی گردید.
کلیدواژه‌ها: حوضه آبخیز، روابط تجربی، رودخانه، سیلاب	یافته‌ها: بهترین روش تجربی برای رودخانه‌های تاش سفلی، فرخزاد، مین و مین (بند انحرافی-جوراهی) و آیزنج به ترتیب روش‌های سیلاب ویژه، فولر، دیکن و فرانکو-رودیر بود. همچنین خطای نسبی این روش‌ها به ترتیب 35.6، ۳۰.۲، ۱۴.۸ و ۳۸.۹ درصد به دست آمد.
	نتیجه گیری: روش‌های تجربی، با وجود تفاوت در میزان دقت، می‌توانند در حوضه‌های فاقد آمار هیدرومتری برای برآورد سیلاب مورد استفاده قرار گیرند و انتخاب روش مناسب برای هر حوضه، دقت برآورد را بهبود می‌بخشد.

استناد: حسن بارانی، معصومه امامقلی زاده، صمد و اژدری، خلیل. (۱۴۰۵). برآورد دبی حداکثر سیلاب در حوضه‌های فاقد آمار (مطالعه موردی: رودخانه‌های

شهرستان شاهرود). فناوری‌های پیشرفته در بهره‌وری آب، ۶ (۲)، ۶۵-۸۲.

10.22126/atwe.2025.11381.1145



مقدمه

سیل یکی از مهم‌ترین بلایای طبیعی است که بسیاری از نقاط جهان از جمله کشورهای توسعه‌یافته را تحت‌تأثیر قرار می‌دهد. در بین بلایای طبیعی، بیشترین آسیب را سیل به انسان وارد می‌کند، و یک‌سوم خسارات ناشی از بلایای طبیعی مربوط به سیل است. و پیامدهای آن می‌تواند به طور مستقیم و غیرمستقیم بر دو سوم جمعیت زمین تأثیر بگذارد. جدا از آسیب‌های فیزیکی، سالانه بخش زیادی از مردم جهان در اثر سیل جان خود را از دست می‌دهند (سلیمانی و درویشی، ۱۳۹۹؛ یوانگ^۱، ۲۰۲۳).

باتوجه‌به اینکه سیل بزرگ‌ترین و مهم‌ترین بحران اقلیمی است که همه ساله جان هزاران نفر را می‌گیرد و خسارات فراوانی را به جامعه انسانی و محیط‌زیست وارد می‌آورد و از گذشته‌های بسیار دور همواره انسان را به هراس انداخته است، مدیریت و کنترل آن بسیار مهم است. شواهد و گزارش‌های موجود نشان می‌دهد که خسارات ناشی از سیل بیش از سایر سوانح طبیعی است (استعالاجی و همکاران^۲، ۲۰۲۳).

مخاطرات و بلایای طبیعی یکی از مهم‌ترین نگرانی‌های جهانی است که به‌دفعات زیاد در تمام دنیا اتفاق می‌افتد و از آن جایی که ارتباط نزدیکی با وضعیت رشد و توسعه کشورها دارد آسیب‌های جبران‌ناپذیر اقتصادی و اجتماعی در زندگی مردم ایجاد می‌کند (پکار^۳، ۲۰۲۴).

سیل می‌تواند ناشی از پدیده‌های طبیعی مانند طغیان رودخانه‌ها، طوفان‌های ساحلی، جزرومد یا بارندگی شدید در مناطق شهری باشد و یا می‌تواند به واسطه عوامل انسانی مانند عملکرد نادرست سازه‌های هیدرولیکی یا رهاسازی بی‌رویه آب ناشی از یک حادثه، یا ریزش جزئی یا کلی یک سد رخ دهد. طی ۲۰ سال گذشته، سیل تکراری‌ترین نوع بلایای طبیعی بوده است. ویژگی‌های بارندگی به‌عنوان مهم‌ترین عوامل اقلیمی مؤثر بر وقوع سیل در نظر گرفته می‌شود (کرد و یواندی^۴، ۲۰۲۰).

تشدید سیر صعودی خسارت سیل در دو دهه گذشته سبب شده که آرزوی دیرینه درباره حل قطعی مسئله سیل و رواناب‌ها جای خود را به واقع‌گرایی و درک این واقعیت دهد که همیشه نمی‌توان در مهار سیلاب‌ها موفق بود، بلکه باید کوشید تا پیامدهای مخرب و زیان‌بار آن را کاهش داد. مدیریت سیلاب از اقدامات اساسی در برنامه‌ریزی منابع آب است که برای به‌حداقل رساندن خسارات و دستیابی به توسعه پایدار جوامع به کار می‌رود. اولین قدم جهت مدیریت سیل، داشتن اطلاعات و داده‌های کافی درباره رفتار هیدرولوژی حوضه و رودخانه و همچنین تشخیص مناطق دارای پتانسیل سیل خیزی و تهیه نقشه سیلاب است (بولتی و آبه^۵، ۲۰۲۰).

در ایران نیز وجود بارندگی با شدت زیاد موجب ایجاد سیل‌های ویرانگر و خسارت‌های فاجعه‌باری شده است. علاوه‌بر آن عوامل انسانی نیز مانند تخریب حوضه‌های آبخیز می‌توانند موجب بدتر شدن خسارت سیل شوند. بنابراین در جهت کاهش خسارات مالی و جانی مدیریت سیل، بسیار مهم است، این امر جایگاه ویژه‌ای به مدیریت غیرساختاری در مدیریت کلی سیل داده است. سیستم‌های هشدار و پیش‌بینی سیل از جمله روش‌های غیرسازه‌ای هستند که نقش عمده‌ای در کاهش خسارات سیل دارند (پناهی و همکاران، ۱۴۰۱).

ادبیات موضوع و پیشینه پژوهش

باتوجه‌به اهمیت برآورد سیل در پروژه‌های مختلف، پژوهشگران متعددی در این زمینه تحقیق نمودند که برای مثال می‌توان به موارد زیر اشاره نمود.

^۱ Young^۲ Estelaji et al^۳ Peker et al^۴ Cred- UNDRR^۵ Bulti & Abebe

۱. مطالعات داخل کشور

خدمتی و همکاران (۱۳۸۹) با استفاده از روش منطقه‌بندی، ترکیب روش شاخص سیلاب و رگرسیون چندمتغیره به برآورد سیلاب استان‌های یزد، کرمان، هرمزگان و سیستان و بلوچستان پرداختند. آن‌ها دلیل اصلی انتخاب این مناطق را به‌خاطر کمبودن تعداد ایستگاه‌های هیدرومتری، عدم توزیع یکنواختی در منطقه مورد مطالعه و از طرفی عدم وجود آمار در حوضه‌های آبخیز مورد مطالعه بیان کردند. آن‌ها به کمک روش‌هایی نظیر شاخص سیلاب، تحلیل خوشه‌ای و رگرسیون چندمتغیره، با استفاده از ویژگی‌های فیزیوگرافی و گشتاورهای معارف و خطی، گروه زیر حوضه‌های همگن را تعیین کردند. برای مناطق مذکور، توزیع احتمالاتی غالب منطقه توزیع لوگ پیرسون تیپ ۳ تعیین گردید و براساس آن دبی اوج با دوره‌های بازگشت مختلف برآورد گردید. در نهایت برای برآورد دبی سیلابی در دوره‌های بازگشت مختلف، مناسب‌ترین روابط ریاضی در حوضه‌های آبخیز فاقد آمار در منطقه جنوب شرق ایران را ارائه دادند.

فرسادنیا و همکاران (۱۳۹۱) با استفاده از تحلیل خوشه‌بندی فازی در استان مازندران به پیش‌بینی سیلاب پرداختند. نتایج تحقیق آن‌ها بیانگر آن بود که با استفاده از خوشه‌بندی فازی می‌توان راندمان پیش‌بینی سیلاب را افزایش داد. جهانگیری و همکاران (۱۳۹۴) با استفاده از روش گشتاورهای خطی تحلیل فراوانی جریان کمینه حوضه آبریز رودخانه کرخه را مورد مطالعه قرار دادند. نتایج تحقیق آن‌ها بیانگر آن بود که استفاده از روابط منطقه‌ای می‌تواند با خطای کمتر برآورد سیل را میسر سازد و راندمان پیش‌بینی را افزایش دهد.

عزین‌خدوی (۱۳۶۸) با استفاده از آمار و اطلاعات ۴۲ ایستگاه هیدرومتری، روابط تجربی را برای برآورد سیلاب‌های حداکثر حوضه‌های فاقد آمار با بررسی نقطه‌ای سیلاب‌های حوضه‌های آبخیز البرز شمالی ارائه نمود. در روابط تجربی ارائه شده، عوامل مساحت، بارش متوسط سالیانه، قطر حوضه و عامل شکل مورد استفاده قرار گرفت. نتایج تحقیق ایشان نشان داد لوگ پیرسون نوع سوم به‌عنوان بهترین توزیع منطقه‌ای برای داده‌های مورد استفاده بوده است.

سلاجقه (۱۳۷۳) نیز به بررسی سیلاب‌های ۲۸ حوضه آبخیز، که مساحتی کمتر از ۱۰۰۰۰ هکتار داشتند، مورد بررسی قرارداد و با استفاده از نتایج به‌دست‌آمده ضرایب را جهت استفاده از روابط تجربی برای پیش‌بینی سیلاب با دوره‌های بازگشت ۵، ۱۰، ۲۵، ۵۰ و ۱۰۰ سال ارائه نمود.

قضاوی و سمیعی (۱۳۹۵)، کالیبراسیون و اعتبارسنجی روش‌های تجربی برآورد رواناب در حوضه‌های آبخیز بادامک استان فارس را به‌صورت مطالعه موردی مورد بررسی قرار دادند. همچنین بنی صفار (۱۳۹۲) برآورد سیلاب حوضه آبریز یا به‌کارگیری روش‌های تجربی کریگر، رابطه تجربی فولر^۱ و SCS در حوضه آبریز زرین گل استان گلستان مورد بررسی و واسنجی قرارداد و با استفاده از نتایج حاصله حوضه آبخیز مورد مطالعه را از نقطه‌نظر پتانسیل ایجاد سیلاب طبقه‌بندی نمود.

دستورانی و همکاران (۱۳۸۹) با بیان اینکه بررسی سیل و سیل‌خیزی حوضه‌های آبخیز و به تبع آن اهمیت و ضرورت بررسی دبی حداکثر لحظه‌ای رژیم رودخانه بسیار مهم است، در تحقیقی با استفاده از روش‌های تجربی به برآورد سیل پرداختند. هدف از انجام تحقیق آن‌ها آنالیز حساسیت پارامترهای به‌کاررفته شده در روابط تجربی جهت تخمین دبی حداکثر لحظه‌ای بوده است تا

^۱ Fuller

بتوانند نقش هر یک از پارامترها را مشخص کنند. بدین منظور آن‌ها در این تحقیق خود ده رابطه تجربی مانند روش دیکن^۱، کریگر^۲، فولر^۳، انگلیز^۴، کوتان^۵، مایر^۶، فانیگ^۷، هورتون^۸، روش سازمان زمین‌شناسی آمریکا^۹ را مورد آنالیز حساسیت قرار دادند. نتایج به‌دست آمده بیانگر حساسیت نسبتاً بالای تمامی روابط مورد استفاده به پارامتر مساحت بخصوص در مساحت‌های کم است. به‌نحوی که تغییرات کم در مساحت پایین، تأثیر قابل‌ملاحظه‌ای زیادی در مقدار دبی سیلاب داشته است. همچنین از میان روش‌های تجربی مذکور، برخی از روابط مانند روش فولر نسبت به تغییرات دوره بازگشت در دوره بازگشت‌های پایین بسیار حساس‌تر هستند. همچنین نتایج تحقیق آن‌ها نشان داد که دو پارامتر ضریب منطقه‌ای (C) و مساحت (A) تقریباً در تمامی روش‌های مذکور مورد استفاده قرار گرفت و در همه این روابط تجربی این پارامترها تا حدی از یک قالب مشترک تبعیت می‌کنند. البته در روش‌هایی مثل روش جرمن و روش فولر عامل دیگری مثل دوره بازگشت (T) و همچنین در روش فولر عامل دیگری با نام ضریب طغیانی (β)، نقش مهمی را در مقدار تغییرات دبی لحظه‌ای دارد. همچنین نتایج تحقیق آن‌ها نشان داد در رابطه تجربی کریگر، تأثیر تغییرات مساحت در مساحت‌های خیلی پایین، از عامل ضریب منطقه‌ای در مقدار دبی لحظه‌ای بیشتر است. در صورتی که این اختلاف تأثیر در مساحت‌های بالا به نفع ضریب منطقه‌ای و مقدار آن نیز قابل توجه بوده است. به عبارتی با افزایش ضریب منطقه‌ای به صورت خطی و مستقیم، مقدار دبی لحظه‌ای نیز افزایش یافته است که این ضریب نیز خود متأثر از خصوصیات فیزیکی و اقلیمی حوضه است. در رابطه دیکن نتایج نشان داد در مقایسه با عامل مساحت، تأثیر تغییرات ضریب منطقه‌ای در مقایسه با رابطه قبلی کمتر شده است ولی در مساحت‌های زیاد مقدار این تأثیر در تغییر دبی لحظه‌ای از عامل مساحت، بیشتر است.

رابطه فولر در مقایسه با سایر روابط تجربی به لحاظ فرمولی، و همچنین استفاده از ضرایب و فاکتورهای بیشتر، کمی پیچیده‌تر است.

در رابطه هورتون دو عامل مساحت و دوره بازگشت، عوامل اثرگذار در تغییرات دبی لحظه‌ای هستند. به طوری که در مساحت‌های کوچک، نه تنها تغییرات مساحت موجب تأثیر زیادی در مقدار دبی لحظه‌ای می‌گردد، بلکه در این مساحت‌ها تأثیر دوره بازگشت در خروجی بیشتر از عامل مساحت است ولی در مساحت‌های زیاد، عامل مهم مساحت است. شهریار و همکاران (۱۳۹۵) بهینه‌سازی تجربی برآورد رواناب سالیانه را در حوضه‌های بدون ایستگاه هیدرومتری در حوضه رودخانه سرخاب مورد بررسی قرار دادند. نتایج نشان داد برای حوضه مطالعه شده روش تورک^{۱۰} با سطوح اطمینان ۹۵ و ۹۹ درصد، حجم رواناب سالیانه را در مقایسه با سایر روش‌ها دقیق‌تر محاسبه می‌کند.

عبادی‌فر و نادری دیزگاه (۱۳۹۶) کاربرد روش‌های تجربی را برای برآورد رواناب سالیانه در حوضه حویق در استان گیلان ارزیابی کردند. نتایج حاکی از برتری عملکرد روش‌های خوزلا از نظر دقت برآورد رواناب بوده است.

¹ Dicken² Kreiger³ Fuller⁴ English⁵ Koutan⁶ Meyer⁷ Fanning⁸ Horton⁹ USGS¹⁰ Turk

عزیزتیا کشتلی و بیات ورکشی (۱۳۹۷) کارایی معادلات تجربی برآورد رواناب را در حوضه بابلرود ارزیابی کردند. نتایج بیان کننده برتری دو مدل جاستین و دی سوزا برای حوضه پژوهش و معادله جاستین برای حوضه کشتارگاه بوده است. همچنین مشخص شد روابط برای حوضه های کوچک کاربرد داشته است و با افزایش سطح حوضه، ضریب همبستگی روابط کاهش می یابد. شعبانلو و همکاران (۱۳۹۱) اظهار داشتند تخمین دبی اوج لحظه ای یکی از پارامترهای اساسی در طراحی پروژه های آبی است. آن ها در تحقیقی به ارزیابی روابط تجربی برآورد دبی اوج لحظه ای سیلاب در حوضه های آبریز غرب ایران پرداختند. بدین منظور ۲۰ رابطه تجربی را که در نقاط مختلف دنیا مورد استفاده قرار گرفته است، مورد بررسی قرار دادند. بدین منظور از آمار و اطلاعات ۲۶ ایستگاه هیدرومتری در حوضه های آبریز غرب ایران استفاده گردید. حوضه های مورد مطالعه در استان های همدان، کرمانشاه و لرستان واقع شده اند. در این ایستگاه ها آمار دبی اوج لحظه ای در یک دوره آماری ۴۲ ساله (۱۳۴۴-۴۵ تا ۱۳۸۶-۸۷) مورد بررسی قرار گرفت. رودخانه های این حوضه شامل رودخانه های قره سو، گاماسیاب، کشکان، سیمره، رودخانه کرخه، رودخانه سزار و رودخانه آفرینه می شود. آن ها برای تحلیل فراوانی از ۸ تابع توزیع احتمالی بر روی دبی های اوج لحظه ای استفاده کردند و بعد از انجام آزمون های تکوینی برازش، دبی های اوج لحظه ای با دوره های برگشت، ۲، ۵، ۱۰، ۲۵، ۵۰، ۱۰۰، ۵۰۰ و ۱۰۰۰ ساله را در نهایت با استفاده از تابع توزیع لوگ پیرسون نوع ۳ محاسبه کردند. آن ها ضمن ارائه روابط تجربی برای برآورد مقدار دبی سیلاب برای هر کدام از حوضه های مورد مطالعه، اظهار داشتند از میان روش های تجربی مورد استفاده، رابطه تجربی فولر دارای کارایی مناسب در برآورد دبی اوج لحظه ای در حوضه های غرب کشور نبوده است.

۲. مطالعات خارج از کشور

کمپبل و ساید^۱ (۱۹۸۴) از عوامل فیزیکی و اقلیمی حوضه مانند مساحت حوضه، ارتفاع متوسط و بارتندگی متوسط سالیانه به عنوان عوامل مستقلی برای تخمین مقدار سیلاب حداکثر در منطقه اورگان استفاده کردند و ضمن ارائه روابط تجربی، بیان داشتند که می توان دبی سیلاب منطقه را با دقت نسبتاً مناسب پیش بینی کرد.

روش پژوهش

۱. منطقه مورد مطالعه

در این تحقیق رودخانه های شهرستان شاهرود واقع در استان سمنان (تاش سفلی، فرخزاد، مجن، ابرسج) مورد بررسی قرار گرفت. رودهای مورد مطالعه از دامنه های جنوبی رشته کوه البرز سرچشمه گرفته و اغلب به دشت کویر می ریزند. جهت جریان این رودها از شمال به جنوب است. این رودها در سرچشمه معمولاً آب شیرین و گوارا دارند ولی با عبور از نمکزارها و زمین های گچی، شور شده و دارای املاح زیادی می شوند. طول این رودها معمولاً کوتاه است زیرا که فاصله میان کوهستان تا دشت کم است. در شکل (۱) موقعیت مکانی رودخانه های مورد مطالعه را در محیط گوگل ارث نشان می دهد. همچنین در جدول (۱) مشخصات ایستگاه های هیدرومتری که بر روی رودخانه های مورد مطالعه وجود دارد، ارائه گردیده است.

¹ Campbell & Side



رودخانه تاش



رودخانه فرحزاد-تاش



رودخانه مچن بند الجغرافیایی حوړاهی



رودخانه ایرسج

شکل ۱. موقعیت مکانی رودخانه‌های مورد مطالعه در محیط گوگل ارث

جدول ۱. موقعیت مکانی ایستگاه‌های هیدرومتری در رودخانه‌های مورد مطالعه

ردیف	نام ایستگاه	نام رودخانه	طول جغرافیایی	عرض جغرافیایی	ارتفاع (متر)	مساحت حوضه (کیلومتر مربع)
۱	مچن بند الجغرافیایی حوړاهی	مچن	۵۹-۲۸-۵۴	۳۴-۲۸-۳۶	۲۰۵۵	۱۴۷۹
۲	فرحزاد-تاش	تاش	۱۲-۴۲-۵۴	۴۱-۳۰-۳۶	۱۹۰۷	۱۲۲
۳	تاش سقی	تاش	۳۳-۴۰-۵۴	۳۳-۳۲-۳۶	۲۲۲۷	۲۵۷
۴	ایرسج	ایرسج	۲۰-۵۵-۵۴	۵۹-۳۴-۳۶	۱۷۵۰	۱۹۲

۲. معرفی روابط تجربی

روابطه‌ی تجربی بر پایه همبستگی بین مقادیر سیلاب و پارامترهای فیزیکی و پارتندگی در بسیاری از کشورها ارائه شده است. در حقیقت این روابط تنها برای منطقه‌ای که داده‌های آن در رابطه همبستگی بکار برده شده‌اند، اعتبار دارد و در دیگر حوضه‌ها باید پارامترهای آن بومی‌سازی شوند. برای به دست آوردن یک سیلاب در محل خروجی زیرحوضه‌های حوضه آبریز، نیاز به تحلیل منطقه‌ای و انتقال مقادیر سیلاب به موقعیت خروجی این زیرحوضه‌ها است. از روش‌های تجربی ذیل برای تحلیل منطقه‌ای سیلاب استفاده شده است:

روش دیکن (Diken)

رابطه تجربی دیکن (به نقل از سابرامانیا، ۲۰۱۳)^۱ به صورت رابطه (۱) ارائه شده است:

$$Q=CA^X \quad (1)$$

که در آن: A : سطح حوضه آبریز بر حسب کیلومتر مربع، C : ضریب ثابت دیکن و Q : دبی حداکثر سیلاب بر حسب مترمکعب بر ثانیه است. مقدار X بر اساس جدول (۲) نسبت به مساحت حوضه آبریز مورد مطالعه، انتخاب می گردد.

جدول ۲. نسبت پارامتر X فرمول دیکن با مساحت حوضه آبریز

X	مساحت حوضه (کیلومتر مربع)
۱	۲۵ تا
۰/۵	۲۵۰۰ تا ۲۵
۰/۲۲	۲۵۰۰۰ تا ۲۵۰۰
۰/۲۵	۲۵۰۰۰۰ تا ۲۵۰۰۰۰
۰/۱۵	بزرگتر از ۲۵۰۰۰۰

روش تجربی فولر (Fuller)

فولر (۱۹۱۴)^۲ رابطه های تجربی خود را به صورت رابطه (۲) و رابطه (۳) بر حسب دوره برگشت T ارائه نموده است.

$$Q_{MAXd}=CA^{0.8}(1+\beta \log T) \quad (2)$$

$$Q_T=Q_{MAXd}(1+2.66A^{-0.3}) \quad (3)$$

که در آن Q_{MAXd} : دبی حداکثر یک روزه سیلاب بر حسب مترمکعب بر ثانیه و Q_T : دبی حداکثر لحظه ای سیلاب با دوره برگشت T است.

با داشتن C و β برای یک منطقه مقادیر پیک سیلاب با دوره برگشت مختلف به دست می آید. برای حوضه های معمول مقدار β حدود ۰/۸ بوده که برای تحلیل سیلاب در محل خروجی زیرحوضه های حوضه آبریز مورد مطالعه از همین مقدار استفاده شده است که این فرض به نوبه خود برآورد سیلاب را با استفاده از این روش تجربی تحت الشعاع قرار می دهد. با استفاده از مقادیر دبی حداکثر مالیانه، مقادیر C برای هر دوره برگشت محاسبه شده است. سپس با استفاده از مقادیر محاسبه شده C و β برای ایستگاه های آب سنجی منطقه مطالعاتی، مقادیر دبی پیک سیلاب با دوره برگشت مختلف در محل های خروجی زیرحوضه های حوضه آبریز مورد مطالعه به دست آمده است (چاو و همکاران^۳، ۱۹۹۸).

^۱ Subramanya

^۲ Fuller

^۳ Chow et al

روش سیلاب ویژه

در این روش از نسبت سیلاب‌های مشاهده شده با دوره بازگشت مختلف به مساحت حوضه آبریز استفاده می‌گردد. با استفاده از این روش سیلاب ویژه ایستگاه‌های آب‌سنجی منطقه مطالعاتی محاسبه، سپس سیلاب ویژه منطقه طرح برای دوره بازگشت مختلف به دست آمده و مبنای محاسبه سیلاب خروجی زیرحوضه‌های حوضه آبریز مورد مطالعه قرار می‌گیرد (چاو و همکاران، ۱۹۹۸).

روش فرانکو-رودیر

روش تجربی فرانکو-رودیر^۱ نیز یک روش تجربی نظیر دیگر است که در رابطه آن علاوه بر ضریب مساحت، توان نیز تغییر می‌کند. رابطه عمومی مورد استفاده به صورت رابطه (۴) است.

$$Q = 10^6 \left(\frac{A}{10^8} \right)^{1-0.1k} \quad (4)$$

A : سطح حوضه آبریز بر حسب کیلومتر مربع، K : ضریب ثابت و Q : دبی سیلاب بر حسب مترمکعب بر ثانیه است.
با استفاده از رابطه یادشده، مقادیر ضریب فرانکو - رودیر ایستگاه‌های آب‌سنجی منطقه مطالعاتی و رابطه مساحت با دوره بازگشت مختلف به دست آمده است.

یافته‌های پژوهش

۱. بررسی صحت داده‌ها

پس از جمع‌آوری آمار آبدی سالانه ایستگاه‌های آب‌سنجی موجود در منطقه مطالعاتی، صحت این آمار به روش‌های مختلف مورد بررسی قرار گرفته است. نخست با بررسی و مقایسه سال به سال آبدی ایستگاه‌های مختلف، صحت آنها به روش چشمی و سپس با محاسبه میانگین و انحراف استاندارد آنها، صحت مقادیر آبدی سالانه به روش آماری کنترل شده است.
برای تشخیص داده‌های پرت (*Outliers*) یا روش چشمی معمولاً با استفاده از نمودارهای گرافیکی (نمودار پراکنش^۲) انجام می‌شود. این روش به ما کمک می‌کند تا داده‌هایی که به طور غیرعادی از الگوی کلی داده‌ها فاصله دارند را شناسایی کرد. همچنین جهت بررسی صحت ثبت مقادیر آبدی (از دیدگاه سری هیدرولوژیکی) از آزمون داده پرت یا داده دورافتاده^۳ استفاده گردیده است.

در بررسی آمار موجود همچنین استقلال (تصادفی بودن) و همگنی آمار نیز مورد بررسی قرار گرفته است. برای انجام آزمون استقلال داده‌ها، از روش ران تست^۴ استفاده شده است. برای انجام آزمون همگنی نیز از روش آزمون منحنی جرم مضاعف^۵ استفاده شده است.

در جدول (۳) نتایج آزمون استقلال داده‌های آبدی سالانه ایستگاه‌های منتخب ارائه شده است. در این جدول، چهار ایستگاه مختلف بررسی شده‌اند: فرحزاد، تاش سفلی، مچن بند انحرافی - دوراهی و ابرسج. هر ایستگاه دارای مقادیر متفاوتی برای حدود مجاز (U)، U محاسبه شده، Nb تعداد نمونه‌های دنباله b و Na تعداد نمونه‌های دنباله a است. همان گونه که نتایج این جدول نشان می‌دهد، بر اساس آزمون مذکور این ایستگاه‌ها دارای داده‌های تصادفی هستند.

¹ Franco, Rodier

² Scatter Plot

³ Outlier data

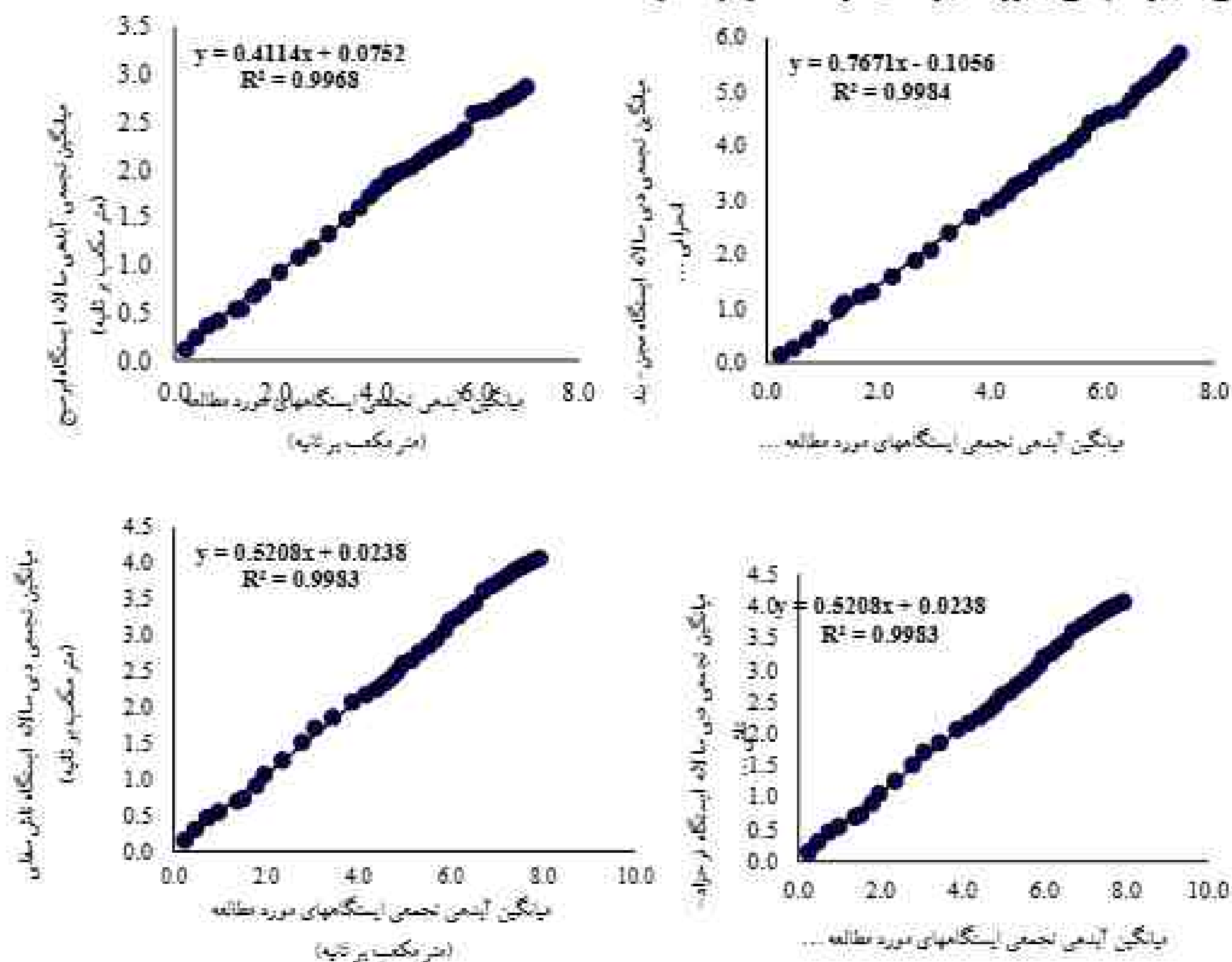
⁴ Run-Test

⁵ Double Mass Curve test

جدول ۲. نتایج آزمون ران تست بر روی آمار آبدهی سالانه ایستگاه‌های منتخب در منطقه طرح

نام ایستگاه‌ها	Na	Nb	U محاسبه شده	حدود مجاز (U)	سطح معنی دار بودن
فرحزاد	۲۰	۲۱	۱۴	۲۷-۱۴	۵
ناش سفلی	۱۱	۱۹	۱۱	۲۰-۹	۵
مجن بند انحرافی دوراهی	۱۳	۱۸	۱۱	۲۴-۱۰	۵
ایرج	۷	۱۲	۸	۱۵-۵	۵

منحنی‌های جرم مضاعف (Double Mass Curve) یک ابزار گرافیکی قدرتمند برای بررسی سازگاری و همگنی داده‌های هیدرولوژیکی، مانند آبدهی سالانه، است. این منحنی‌ها معمولاً برای تشخیص تغییرات ناگهانی یا روندهای غیرعادی در داده‌ها استفاده می‌شوند. در این منحنی محور افقی (X) مجموع تجمعی آبدهی سالانه یک ایستگاه مرجع (یا میانگین چند ایستگاه و محور عمودی (Y) مجموع تجمعی آبدهی سالانه ایستگاه مورد بررسی است و هر نقطه روی نمودار نشان‌دهنده مجموع تجمعی آبدهی تا آن سال است. در شکل (۲) منحنی‌های جرم مضاعف آمار آبدهی سالانه ایستگاه‌های منتخب ارائه شده است. بر اساس نتایج به‌دست آمده از این آزمون آمار آبدهی سالانه ایستگاه‌های منتخب همگی همگن هستند چرا که منحنی ترسیم شده به‌صورت یک خط مستقیم یا شیب ثابت است. لذا نشان‌دهنده همگنی و سازگاری داده‌ها است. به عبارتی دیگر، این حالت بیانگر آن است که هیچ تغییر ناگهانی یا روند غیرعادی در داده‌ها وجود ندارد.



شکل ۲. نمودارهای همگنی ایستگاه‌های هیدرومتری مورد مطالعه

۲. نتایج برآورد سیلاب با استفاده از توابع توزیع آماری

برای برآورد سیلاب با استفاده از توابع توزیع آماری از نرم‌افزار Easy fit استفاده شد که نتایج حاصل از برآورد سیلاب در جدول (۴) ارائه شده است.

جدول ۴. برآورد حداکثر سیلاب (متر مکعب بر ثانیه) رودخانه‌های مورد مطالعه با استفاده از توابع توزیع آماری

تایم توزیع انتخاب شده	۵۰۰	۱۰۰	۵۰	۲۵	۱۰	۵	۲	دوره بازگشت (سال)	ایستگاه
<i>Log_pearson3</i>	۵۲/۲۱	۴۶/۰۶	۴۰/۲۱	۳۴/۰۳	۲۷/۵۹	۱۸/۸۹	۱۲/۴۱	۴/۵۹	ایرج
<i>Gumbel Max</i>	۵۲/۶۱	۴۶/۶۲	۴۱/۳۴	۳۶/۰۳	۳۰/۶۹	۲۲/۴۸	۱۷/۷۷	۹/۱۶	مجن بند الجرفی-دوراهی
<i>Log_pearson3</i>	۴۲/۱۱	۳۸/۲۲	۳۴/۹۲	۳۱/۲۶	۲۷/۳۲	۲۱/۲۳	۱۶/۱۴	۸/۴۷	فرحزاد
<i>Pearson 6</i>	۶۹/۷۳	۵۴/۲۲	۴۴/۰۱	۳۴/۹۵	۲۶/۹۰	۱۷/۶۴	۱۱/۵۵	۴/۵۵	تاش سفلی

۲. نتایج برآورد سیلاب با استفاده از روابط تجربی

رودخانه تاش

باتوجه به این که هدف از انجام این تحقیق ارزیابی روابط تجربی در برآورد سیلاب حوضه رودخانه‌های مورد مطالعه (تاش سفلی، مجن، ایرج، فرحزاد) در شهرستان شاهرود واقع در استان سمنان بوده است، با فرض اینکه در این رودخانه‌ها اندازه‌گیری دبی وجود ندارد از داده‌های ایستگاه‌های هیدرومتری موجود در اطراف رودخانه‌های مورد مطالعه جهت برآورد سیلاب استفاده گردید و سپس نتایج به‌دست‌آمده برای سیلاب با دوره‌های بازگشت متفاوت با مقادیر سیلاب برآورد شده با استفاده از توابع توزیع آماری به‌دست‌آمده مورد مقایسه قرار گرفت. در جداول (۵) نتایج حاصل از برآورد سیلاب با روش‌های تجربی برای رودخانه تاش سفلی ارائه شده است.

برای بررسی دقت مدل‌های تجربی در برآورد سیلاب رودخانه‌های مورد مطالعه از معیار خطای نسبی^۱ که یک معیار مهم در ارزیابی دقت و صحت اندازه‌گیری‌ها یا محاسبات است (رابطه ۵) استفاده شد. این خطا نشان‌دهنده میزان اختلاف بین مقدار دبی سیلاب اندازه‌گیری‌شده و مقدار دبی سیلاب محاسبه‌شده است و به‌صورت نسبی بیان می‌شود. خطای نسبی معمولاً به‌صورت درصد یا نسبت بیان می‌شود و به شکل زیر محاسبه می‌شود:

$$RE = \frac{|O-P|}{O} \times 100 \quad (5)$$

RE = خطای نسبی، O مقدار دبی سیلاب اندازه‌گیری‌شده و P مقدار دبی سیلاب محاسبه‌شده است.

همان‌طور که نتایج به‌دست‌آمده در جدول (۶) نشان می‌دهد کمترین خطای برآورد سیلاب رودخانه تاش سفلی مربوط به روش سیلاب ویژه بوده است که مقدار آن ۳۵/۶۳ درصد بوده است. بعد از آن روش فرانکو-رودیر با خطای ۴۴/۸۵ درصد و نهایتاً بیشترین خطا مربوط به روش تجربی فولر با ۶۴/۰۳ درصد می‌باشد.

¹ Relative Error

جدول ۵. برآورد حداکثر سیلاب (متر مکعب بر ثانیه) رودخانه تاش سفلی با روش‌های تجربی

دوره بازگشت (سال)	روش دیکن	روش سیلاب ویژه	روش فراتکو-رودیر	روش تجربی فولر	متوسط
۲	۲/۳۷	۲/۶۲	۲/۳۶	۲/۱۵	۲/۱۳
۵	۷/۰۹	۸/۶۹	۷/۶۸	۴/۹۴	۷/۱
۱۰	۹/۷۶	۱۲/۶۸	۱۰/۹۱	۷/۰۹	۱۰/۱۱
۲۵	۱۳/۲۳	۱۷/۹۸	۱۵/۱۶	۹/۹۴	۱۴/۰۸
۵۰	۱۴/۸۴	۲۱/۲۶	۱۷/۲۶	۱۱/۵۸	۱۶/۲۴
۱۰۰	۱۸/۱۶	۲۵/۶۱	۲۱/۲۵	۱۳/۹۹	۱۹/۷۵
۲۰۰	۲۰/۵۶	۲۹/۲۲	۲۴/۲۱	۱۵/۹۳	۲۲/۴۸
۵۰۰	۲۲/۶۵	۳۲/۷۳	۲۷/۹۹	۱۸/۲۶	۲۵/۹۳

جدول ۶. خطای محاسبه شده (درصد) با روش‌های تجربی برای رودخانه تاش سفلی

دوره بازگشت (سال)	تاش سفلی	روش دیکن	روش سیلاب ویژه	روش فراتکو-رودیر	روش تجربی فولر	متوسط
۲	۴/۵۵	۲۵/۷۸	۲۰/۲۵	۲۶/۰۷	۵۲/۷۸	۳۱/۲۵
۵	۱۱/۵۵	۲۸/۶۲	۲۴/۷۲	۲۳/۴۵	۵۷/۲	۲۸/۵
۱۰	۱۷/۶۴	۴۴/۶۸	۲۸/۱۴	۲۸/۱۴	۵۹/۸۲	۴۴/۶۹
۲۵	۲۶/۹	۵۰/۸۱	۳۲/۱۶	۴۳/۶۳	۶۳/۱۱	۴۷/۶۸
۵۰	۳۴/۹۵	۵۷/۵۴	۳۹/۱۶	۵۰/۶۱	۶۶/۸۶	۵۳/۵۴
۱۰۰	۴۴/۰۱	۵۸/۷۴	۴۱/۸۱	۵۱/۷۱	۶۸/۲۱	۵۵/۱۲
۲۰۰	۵۴/۲۲	۶۲/۰۸	۴۶/۱۱	۵۵/۲۵	۷۰/۶۳	۵۸/۵۴
۵۰۰	۶۹/۷۳	۶۶/۰۹	۵۱/۶۳	۵۹/۸۶	۷۳/۶۶	۶۴/۸۱
	متوسط خطا	۵۰/۵۴	۲۵/۶۲	۴۴/۸۵	۶۴/۰۳	۴۸/۷۷

رودخانه فرحزاد

باتوجه به اینکه در اطراف حوضه فرحزاد ایستگاه‌های هیدرومتری مجن، اهرسج، تاش سفلی هستند از داده‌های این ایستگاه جهت برآورد ضرایب تجربی استفاده شد سپس برآورد سیلاب با استفاده از هرکدام از روش‌های تجربی انجام شد که نتایج به‌دست‌آمده در جدول (۷) نشان داده شده است.

همان‌طور که نتایج به‌دست‌آمده در جدول (۸) نشان می‌دهد کمترین خطای برآورد سیلاب رودخانه فرحزاد مربوط به روش تجربی فولر بوده است که مقدار آن ۳/۷۱ درصد بوده است. بعد از آن روش دیکن با خطای ۱۰/۴۰ درصد و نهایتاً بیشترین خطا مربوط به روش سیلاب ویژه با ۱۲۲/۳۴ درصد می‌باشد.

جدول ۷. برآورد حداکثر سیلاب (متر مکعب بر ثانیه) رودخانه قره‌زاد با روش‌های تجربی

دوره بازگشت (سال)	روش دیکن	روش سیلاب ویژه	روش قرانکو-رودیر	روش تجربی فولر	متوسط
۲	۶/۲۴	۱۲/۲۸	۹/۵۴	۵/۷۴	۸/۴۷
۵	۱۳/۱	۲۹/۷۱	۲۰/۳۷	۱۲/۲۱	۱۹/۱
۱۰	۱۸/۰۴	۴۲/۳۳	۲۸/۱	۱۸/۹۴	۲۷/۱
۲۵	۲۴/۴۶	۶۱/۴۵	۳۸	۲۶/۵۳	۳۷/۶۱
۵۰	۲۷/۴۲	۷۲/۶۷	۴۲/۷۹	۳۰/۹۶	۴۲/۴۶
۱۰۰	۳۲/۵۷	۸۷/۵۲	۵۱/۷۹	۳۷/۲۹	۵۲/۵۷
۲۰۰	۳۸/۰۱	۹۹/۸۵	۵۸/۳۶	۴۲/۵۷	۵۹/۷
۵۰۰	۴۲/۷۱	۱۱۵/۲۶	۶۶/۶۶	۴۹/۰۸	۶۸/۶۸

جدول ۸. خطای محاسبه شده (درصد) با روش‌های تجربی برای رودخانه قره‌زاد

دوره بازگشت (سال)	قره‌زاد	روش دیکن	روش سیلاب ویژه	روش قرانکو-رودیر	روش تجربی فولر	متوسط
۲	۸/۴۷	۲۶/۲۸	۴۶/۰۵	۱۲/۵۹	۲۲/۲۸	۲/۲
۵	۱۶/۱۴	۱۸/۸۱	۸۴/۰۹	۲۶/۲۲	۱۸/۱۴	۱۸/۲۴
۱۰	۲۱/۲۳	۱۵	۱۰۴/۱۲	۳۲/۲۹	۱۰/۷۵	۲۷/۶۹
۲۵	۳۷/۲۲	۱۰/۱۲	۱۲۵/۷۳	۳۹/۵۸	۲/۵۶	۴۸/۱۶
۵۰	۳۱/۲۶	۱۲/۲۶	۱۳۲/۴۲	۴۶/۸۵	۰/۹۸	۳۹/۰۱
۱۰۰	۳۴/۹۲	۳/۸۷	۱۵۰/۶	۴۸/۲۹	۷/۰۲	۵۰/۵۲
۲۰۰	۳۸/۲۳	۰/۵۸	۱۶۱/۲	۵۲/۶۵	۱۱/۲۵	۵۶/۱۶
۵۰۰	۴۲/۱۱	۲/۸۱	۱۷۲/۷۲	۵۸/۲۱	۱۶/۵۵	۶۲/۱
	متوسط خطا	۱۰/۴	۱۳۲/۲۴	۲۸/۲۶	۲/۷۱	۲۶/۶۲

رودخانه مجن بند انحرافی-دوراهی

برای رودخانه مجن بند انحرافی-دوراهی، باتوجه به اینکه در اطراف حوضه آن رودخانه حوضه‌های تاش سفلی، ابرسیج، قره‌زاد وجود دارد و دارای شرایط مشابه با آن حوضه است. از داده‌های ایستگاه‌های هیدرومتری آن‌ها جهت برآورد ضرایب تجربی استفاده شد و در نهایت مقادیر دبی سیلاب با استفاده از هرکدام از روش‌های تجربی (دیکن، فولر، سیلاب ویژه، قرانکو-رودیر) برآورد گردید که نتایج به‌دست‌آمده در جدول (۹) ارائه شده است.

همان‌طور که نتایج به‌دست‌آمده در جدول (۱۰) نشان می‌دهد کمترین خطا برآورد سیلاب رودخانه مجن بند انحرافی-دوراهی مربوط به روش دیکن بوده است که مقدار آن ۱۴/۸۳ درصد بوده است. بعد از آن روش تجربی فولر با خطای ۱۷/۰۸ درصد و نهایتاً بیشترین خطا مربوط به روش سیلاب ویژه با ۱۳۱/۷۹ درصد می‌باشد.

جدول ۹. برآورد حداکثر سیلاب (متر مکعب بر ثانیه) رودخانه مجن بند انحرافی-دوراهی با روش‌های تجربی

دوره بازگشت (سال)	روش دیکن	روش سیلاب ویژه	روش فرانتکو-رودیر	روش تجربی فولر	متوسط
۲	۶/۸۷	۱۵	۱۱/۲۲	۶/۶۹	۹/۹۵
۵	۱۴/۴۲	۲۶/۰۲	۲۲/۷۲	۱۵/۴۱	۲۲/۴
۱۰	۱۹/۸۶	۵۲/۵۲	۲۲/۵۹	۲۲/۱	۳۱/۷۷
۲۵	۲۶/۹۴	۷۴/۴۹	۴۲/۸۸	۲۰/۹۴	۴۴/۰۶
۵۰	۳۰/۲	۸۸/۰۹	۴۹/۳۲	۲۶/۱۱	۵۰/۹۳
۱۰۰	۳۶/۹۶	۱۰۶/۱	۵۹/۵۴	۴۲/۶۲	۶۱/۵۶
۲۰۰	۴۱/۸۵	۱۲۱/۰۵	۶۶/۹۸	۴۹/۶۶	۶۹/۸۸
۵۰۰	۴۸/۱۲	۱۳۶/۷۲	۷۶/۳۷	۵۷/۲۵	۸۰/۳۷

جدول ۱۰. خطای محاسبه شده (درصد) با روش‌های تجربی برای رودخانه مجن بند انحرافی-دوراهی

دوره بازگشت (سال)	مجن بند انحرافی - دوراهی	روش دیکن	روش سیلاب ویژه	روش فرانتکو-رودیر	روش تجربی فولر	متوسط
۲	۹/۱۶	۲۴/۹۹	۶۲/۸۵	۲۲/۷	۳۷/۲۲	۶/۰۶
۵	۱۷/۷۷	۱۸/۸۲	۱۰۲/۶۵	۳۲/۵۲	۲۵/۶۷	۲۲/۹۲
۱۰	۲۲/۴۸	۱۵/۴۹	۱۷۲/۷۲	۲۸/۸	۱۹/۴۱	۳۱/۹۵
۲۵	۳۰/۶۹	۱۲/۲۲	۱۴۲/۷۵	۴۲/۹۹	۱۳/۵۶	۳۹/۹۹
۵۰	۳۶/۰۳	۱۶/۱۸	۱۴۴/۴۸	۳۶/۸۹	۱۴/۰۹	۳۷/۷۸
۱۰۰	۴۱/۲۴	۱۰/۵۹	۱۵۶/۶۴	۴۴/۰۲	۹/۵۵	۴۵/۱۲
۲۰۰	۴۶/۶۲	۱۰/۲۵	۱۵۹/۶	۴۲/۶۴	۸/۷۱	۴۶/۰۷
۵۰۰	۵۳/۶۱	۱۰/۲۲	۱۶۰/۶۴	۴۲/۴۶	۸/۴۵	۴۶/۱۱
	متوسط خطا	۱۴/۸۲	۱۳۱/۷۹	۲۸/۱۲	۱۷/۰۸	۳۴/۵

رودخانه ابرسج

باتوجه به اینکه در اطراف حوضه ابرسج ایستگاه‌های هیدرومتری تاش سفلی، مجن و قرحزاد هستند از داده‌های این ایستگاه جهت برآورد ضرایب تجربی استفاده شد. برآورد سیلاب با استفاده از روش‌های تجربی دیکن، فولر، سیلاب ویژه، فرانتکو-رودیر در جدول (۱۱) ارائه گردید.

همان‌طور که نتایج به‌دست‌آمده در جدول (۱۱) نشان می‌دهد، علیرغم اینکه روش دیکن خطای زیادی دارد اما به روش سیلاب ویژه، روش فرانتکو-رودیر و روش تجربی فولر دارای دقت بهتری نسبت به روش دیکن بوده‌اند. کمترین خطا برآورد سیلاب رودخانه ابرسج مربوط به روش روش فرانتکو-رودیر بوده است که مقدار آن ۳۸/۹۱ درصد بوده است. بعد از آن سیلاب ویژه با خطای ۵۶/۸۹ درصد می‌باشد.

جدول ۱۱. برآورد حداکثر سیلاب (متر مکعب بر ثانیه) رودخانه ابرسج با روش‌های تجربی

دوره بازگشت (سال)	روش دیکن	روش سیلاب ویژه	روش فرانتکور-رودیر	روش تجربی فولر	متوسط
۲	۱۱/۱۵	۱/۲۵	۱/۶۹	۱/۱۵	۲/۸۲
۵	۲۶/۴۲	۲/۷۸	۲/۷۹	۲/۲۶	۸/۸۴
۱۰	۲۸/۲۴	۲/۸	۵/۲۵	۲/۲	۱۲/۶۵
۲۵	۵۴/۸۹	۵/۱۱	۷/۴۲	۴/۲	۱۷/۹۲
۵۰	۵۴/۱۹	۵/۵۸	۸/۲۸	۴/۷۲	۱۸/۱۹
۱۰۰	۷۹/۰۲	۶/۹۸	۱۰/۴۲	۵/۸۵	۲۵/۵۷
۲۰۰	۹۱/۷۵	۷/۹	۱۱/۹۴	۶/۶۱	۲۹/۵۵
۵۰۰	۱۰۸/۹۷	۹/۱۱	۱۲/۸۹	۷/۶	۳۴/۸۸

جدول ۱۲. خطای محاسبه شده (درصد) با روش‌های تجربی برای رودخانه ابرسج

دوره بازگشت (سال)	ابرسج	روش دیکن	روش سیلاب ویژه	روش فرانتکور-رودیر	روش تجربی فولر	متوسط
۲	۲/۷۷	۲۰۲/۰۵	۵۱/۱۷	۲۸/۹۶	۵۸/۲۶	۱۱۲/۸۹
۵	۴/۴۷	۴۹۰/۸۶	۳۷/۷۷	۱۵/۱۵	۴۷/۲۲	۱۴۷/۷۷
۱۰	۶/۲۲	۵۰۴/۵۷	۳۹/۹۹	۱۵/۲۸	۴۹/۲۸	۱۵۲/۳۳
۲۵	۱۰	۴۴۸/۸۸	۴۸/۸۶	۲۵/۷۵	۵۷/۰۲	۱۴۵/۱۳
۵۰	۱۴/۱۴	۲۸۳/۱۶	۶۰/۵۴	۴۱/۴۷	۶۶/۶۲	۱۱۲/۹۵
۱۰۰	۲۰	۲۹۵/۰۸	۶۵/۱۱	۴۷/۸۲	۷۰/۷۷	۱۱۹/۷
۲۰۰	۲۸/۲۸	۳۴۴/۳۹	۷۲/۰۶	۵۷/۸	۷۶/۶۲	۱۰۷/۷۲
۵۰۰	۴۴/۷۷	۱۴۲/۵۵	۷۹/۶۴	۶۸/۹۲	۸۲	۹۳/۷۸
	متوسط خطا	۳۳۶/۶۹	۵۶/۸۹	۲۸/۹۱	۶۲/۶۴	۱۲۴/۰۲

بحث

برای انجام این پژوهش رودخانه‌های تاش سقلی، فرحزاده مجن بند انحرافی - دوراهی و ابرسج در نظر گرفته شد. این رودخانه‌ها در استان سمنان شهرستان شاهرود قرار گرفته‌اند. به منظور برآورد مقادیر سیلاب از روش‌های تجربی مرسوم برآورد سیلاب (دیکن، فولر، سیلاب ویژه، فرانتکور-رودیر) استفاده گردید. نتایج به دست آمده به شرح ذیل است:

- برای رودخانه تاش سقلی، بهترین برآورد سیلاب روش سیلاب ویژه بوده است که مقدار خطای آن ۳۵/۶۳ درصد بوده است.
- برای رودخانه فرحزاده بهترین برآورد سیلاب روش تجربی فولر که مقدار خطای آن ۳/۷۱ درصد بوده است.
- برای رودخانه مجن بند انحرافی - دوراهی بهترین برآورد سیلاب روش دیکن که مقدار خطای آن ۱۸/۸۳ درصد بوده است.

برای رودخانه ابرسج بهترین برآورد سیلاب روش فرانتکورودیر که مقدار خطای آن ۳۸/۹۱ درصد بوده است.

نتیجه‌گیری

همان‌طوری که نتایج به‌دست‌آمده برای رودخانه‌های مختلف مورد تحقیق نشان می‌دهد، مقادیر خطا در رودخانه‌های مختلف متفاوت بوده است و همچنین یک روش خاص را نمی‌توان به‌صورت کلی برای منطقه مورد مطالعه پیشنهاد داد؛ لذا در انتخاب روش تجربی برای برآورد سیلاب باید دقت لازم را مدنظر قرارداد، چراکه در غیر این صورت محاسبات و برآورد سیلاب با خطا مواجه خواهد شد و از دقت لازم برخوردار نخواهد بود. در صورتی که روش مناسب انتخاب گردد، مقدار خطا قابل قبول خواهد بود. برای مثال برای رودخانه فرحزاد که بهترین برآورد سیلاب روش تجربی فولر بوده است مقدار خطای آن ۳/۷۱ درصد است که نشان می‌دهد این روش یمخوبی توانسته است مقدار حداکثر سیلاب را تخمین بزند.

به عبارت بهتر نتایج این پژوهش نشان می‌دهد که روش‌های تجربی مختلف برای برآورد سیلاب در رودخانه‌های مختلف، دقت متفاوتی دارند. این تفاوت در دقت ناشی از ویژگی‌های هیدرولوژیکی و هیدرولیکی خاص هر رودخانه است. مانند شیب، مساحت حوضه، نوع خاک، و شرایط اقلیمی. در نهایت، این پژوهش نشان می‌دهد که عدم توجه به انتخاب روش مناسب می‌تواند منجر به برآوردهای نادرست و پیامدهای نامطلوب در مدیریت سیلاب شود.

ملاحظات اخلاقی

پیروی از اصول اخلاق پژوهش

نویسندگان اصول اخلاقی را در انجام و انتشار این پژوهش علمی رعایت نموده‌اند و این موضوع مورد تأیید همه آنهاست.

تعارض منافع

بنا بر اظهار نویسندگان این مقاله تعارض منافع ندارد.

سپاسگزاری

در پایان از سازمان هواشناسی و شرکت آب منطقه‌ای استان سمنان که اطلاعات مورد نیاز این پژوهش را در اختیار نویسندگان قرار دادند، سپاسگزاری می‌گردد.

منابع

- عزیزنیا کشتلی، علی اصغر، و بیات ورکشی، مریم. (۱۳۹۷). ارزیابی معادلات تجربی برآورد رواناب در حوضه بابلرود. هفتمین کنفرانس ملی مدیریت منابع آب ایران، یزد، ایران. <https://civilica.com/doc/845685>
- عرب خدري، مهدی. (۱۳۶۸). بررسی سیلاب‌های حداکثر در حوضه‌های آبخیز شمال البرز، پایان نامه کارشناسی ارشد، دانشگاه تهران، تهران، ایران.
- ینی صفار، محمد. (۱۳۹۲). برآورد سیل حوضه آبخیز با استفاده از روش‌های تجربی کریگر، فولر و SCS (مطالعه موردی: حوضه زوین گل، استان گلستان). کنفرانس ملی انجمن ایرانی ژئوهیدرولوژی، دانشگاه تهران، تهران، ایران. <https://sid.ir/paper/845165/fa>
- دستورانی، محمدتقی، و حیات‌زاده، محمد. (۱۳۸۹). بررسی مهم‌ترین عوامل مؤثر بر دبی سیلاب اوج از طریق تحلیل حساسیت روابط تجربی نشریه علمی پژوهشی مربع و آبخیزداری، ۱ (۱)، ۲۱-۱۰. <https://doi.org/20.1001.1.2008790.1389.1.1.1.3>
- عبادی فر، محسن، و نادری دزگانه، محمد فرید. (۱۳۹۶). ارزیابی روش‌های تجربی برآورد رواناب سالانه (مطالعه موردی: حوضه هویر استان گیلان). دومین کنفرانس ملی هیدرولوژی ایران، شهرکرد، ایران. <https://civilica.com/doc/661724>
- فرسادنیا، فاطمه، حقیقت جو، پیمان، شاه‌محمدی هیدی، زهراء، و مقدادی نیا، علیرضا. (۱۳۹۱). تحلیل منطقه‌ای سیلاب در حوضه‌های آبخیز استان مازندران با استفاده از تحلیل خوشه‌ای فازی. نشریه علوم و مهندسی آبخیزداری ایران، ۸ (۴۰)، ۲۱-۳۶. <http://jwmsei.ir/article-1-363-fa.html>
- قضاوی، رضا، و سمیعی، مهدی. (۱۳۹۵). واسنجی و اعتبارسنجی روش‌های تجربی برآورد رواناب در حوضه‌های آبخیز (مطالعه موردی: بادامک استان فارس). کنفرانس ملی علوم و مهندسی آبخیزداری ایران (توسعه مشارکتی در مدیریت آبخیز)، دانشگاه یاسوج، یاسوج، ایران. <https://sid.ir/paper/886398/fa>
- جهانگیری، سحر، ملک‌زاده حسین، و اسلامیان، سعید. (۱۳۹۴). انتخاب بهترین تابع توزیع منطقه‌ای دبی‌های کمینه با استفاده از روش گشتاورهای خطی (حوضه کرخه). دهمین سمینار بین‌المللی مهندسی رودخانه، دانشگاه شهید چمران اهواز، اهواز، ایران. <https://civilica.com/doc/677152>
- خدمتی، حمید، منشوری، محمدرضا، حیدری‌زاده، مجید، و صدقی، حسین. (۱۳۸۹). منطقه‌بندی و برآورد دبی سیلاب در حوضه‌های فاقد آمار جنوب شرقی ایران با تلفیق روش شاخص سیل و رگرسیون چندمتغیره (استان‌های کرمان، یزد، سیستان و بلوچستان و هرمزگان). مجله آب و خاک، ۲۴ (۳)، ۶۰۹-۵۹۳. https://jneh.usb.ac.ir/?_action=export&rf=idc&issue=665
- پناهی، آرش، جان‌باز قبادی، غلامرضا، معتضدی صدر، سیدحمید، و خلیلی، سعید. (۱۴۰۱). مدل‌سازی و پیش‌بینی خطر منطقه‌ای سیل‌های ناشی از بارش تحت شرایط تغییر اقلیم (مطالعه موردی: حوضه گرگانرود). نشریه جغرافیای طبیعی، ۱۴ (۵)، ۳۸-۱۷. <https://doi.org/20.1001.1.20085656.1401.15.56.2.6>
- سلاجقه، علی. (۱۳۷۳). برآورد دبی اوج سیلاب در حوضه‌های کوچک ایران. پایان نامه کارشناسی ارشد، دانشگاه تهران، تهران، ایران.
- شعبانلو، سعید، رجبی، احمد، اسلامیان، سیدسعید، و موسوی، سیدفتح‌الله. (۱۳۹۱). ارزیابی روابط تجربی برآورد دبی اوج سیل در حوضه‌های آبخیز غرب ایران. نشریه پژوهش‌های آب ایران، ۸ (۱۰)، ۶۲-۴۵. https://iwrj.sku.ac.ir/article_10894.html

شهریاری، مهدی، محسن زاده، حسین، و محسن زاده، امیر. (۱۳۹۵). بهینه‌سازی تجربی برآورد رواناب سالانه در حوضه‌های فاقد ایستگاه هیدرومتری (مطالعه موردی: حوضه سوزخاب). پنجمین کنفرانس ملی توسعه پایدار در جغرافیا و برنامه‌ریزی، معماری و شهرسازی، تهران، ایران. <https://civilica.com/doc/647854>

سلیمانی، کیوان، و درویشی، سحر. (۱۳۹۹). پهنه‌بندی و پایش خطر سیل در خوزستان طی بهار ۱۳۹۸ با استفاده از داده‌های لندست-۸. مجله آکوهیدرومتری، ۷ (۳)، ۶۶۲-۶۴۷. <https://doi.org/10.22059/ije.2020.302703.1333>

References

- Arab Khodari, M. (1999). Investigation of maximum floods in the northern Alborz atersheds. Master's thesis, *University of Tehran*, Tehran, Iran. [In Persian]
- Bani Safar, M. (2013). Estimating watershed floods using Krieger, Fuller, and SCS empirical methods (Case study: Zarringol basin, Golestan province). *National Conference of the Iranian Society of Geomorphology*. Tehran university, Tehran, Iran. <https://sid.ir/paper/845165/fa> [In Persian]
- Bulti, D. T., & Abebe, B. G. (2020). A review of flood modeling methods for urban pluvial flood application. *Modeling Earth Systems and Environment*, 6, 1293 - 1302. <https://doi.org/10.1007/s40808-020-00773-2>
- Campbell, A. I., & Side, R. C. (1984). Prediction of peak flows on small watersheds in Oregon for use in culvert design. *Water Resources Bulletin*, 20(1), 9–14. <https://doi.org/10.1111/j.1752-1688.1984.tb04652.x>
- Chow, V.T., Maidment, D.R., & Mays, L.W. (1988) *Applied Hydrology*. International Edition, McGraw-Hill Book Company, New York. <https://www.scirp.org/reference/referencespapers?referenceid=1165939>
- CRED & UNDRR. (2020). *Human cost of disasters: An overview of the last 20 years (2000–2019)*. Centre for Research on the Epidemiology of Disasters. UNDRR Publications, Switzerland. <https://www.undrr.org/publication/human-cost-disasters-overview-last-20-years-2000-2019>
- Dasturani, M. T., & Hayatzadeh, M. (2009). Investigating the most significant factors influencing peak flood discharge through a sensitivity analysis of empirical relationships. *Scientific-Research Journal of Rangeland and Watershed Management*, 1(1), 10–21. <https://doi.org/20.1001.1.2008790.1389.1.1.1.5> [In Persian]
- Ebadifar, M., & Naderi Dejjah, M. F. (2017). Evaluation of empirical methods for estimating annual runoff (Case study: Hoyir basin, Gilan province). *The Second National Conference of Iranian Hydrology*, Shahre kord, Iran. <https://civilica.com/doc/661724> [In Persian]
- Estelaji, F., Afshari Aghajari, A., & Zahedi, R. (2023). Flood zoning and developing strategies to increase resilience against floods with a crisis management approach. *Asian Review of Environmental and Earth Sciences*, 10(1), 14–27. <https://doi.org/10.20448/arees.v10i1.4567>
- Farsadnia, F., Haghighatjo, P., Shahmohammadi-Heidi, Z., & Moqaddani, A. (2012). Regional analysis of floods in watersheds of Mazandaran province using fuzzy cluster analysis. *Iranian Journal of Watershed Science and Engineering*, 8(20), 21–36. <http://jwmsei.ir/article-1-363-fa.html> [In Persian]
- Franco, J., & Rodier, J. A. (1969). Flood frequency analysis in small catchments. *Journal of Hydrology*, 8(1), 1–15. [https://doi.org/10.1016/0022-1694\(69\)90002-4](https://doi.org/10.1016/0022-1694(69)90002-4)
- Fuller, W. E. (1914). Flood flows. *Transactions of the American Society of Civil Engineers*, 77(1), 564–617. <https://doi.org/10.1061/taceat.0002552>
- Ghazavi, R., & Samii, M. (2016). Calibration and validation of empirical methods for estimating runoff in watersheds (Case study: Badamak, Fars Province). *National Conference on Watershed Science and Engineering of Iran*, Yasooj university, Yasooj, Iran. <https://sid.ir/paper/886398/fa> [In Persian]
- Jahangiri, S., Maleknejad, H., & Eslamian, S. (2015). Selection of the best regional distribution function of minimum discharges using the linear moments method (Karkhe Basin). *10th International Seminar on River Engineering*. Shahid Chamran University of Ahwaz, Ahwaz, Iran. <https://civilica.com/doc/677152> [In Persian]
- Khadimati, H., Manshuri, M. R., Heydarizadeh, M., & Sedghi, H. (2009). Zoning and estimation of flood discharge in unstatistical basins of southeast Iran by combining flood

- index method and multivariate regression (Kerman, Yazd, Sistan and Baluchestan and Hormozgan Provinces). *Journal of Water and Soil*, 24(3), 593–609. https://jneh.usb.ac.ir/?_action=export&rf=idc&issue=665 [In Persian]
- Panahi, A., Janbaz Ghobadi, G., Moatazedi Sadr, S. H., & Khalili, S. (2001). Modeling and forecasting regional flood risk due to precipitation under climate change conditions (case study: Gorganrood basin). *Journal of Natural Geography*, 14(5), 17–38. <https://doi.org/20.1001.1.20085656.1401.15.56.2.6> [In Persian]
- Peker, I. B., Gulbaz, S., Demir, V., Orhan, O., & Beden, N. (2024). Integration of HEC-RAS and HEC-HMS with GIS in flood modeling and flood hazard mapping. *Sustainability*, 16(3), 1226. <https://doi.org/10.3390/su16031226>
- Salajqeh, A. (2008). Estimation of peak flood discharge in small basins of Iran Master's thesis, *University of Tehran*, Tehran, Iran. [In Persian]
- Shabanloo, S., Rajabi, A., Islamian, S. S., & Mousavi, S. F. (2012). Evaluation of empirical relationships for estimating peak flood discharge in watersheds of western Iran. *Journal of Iranian Water Research*, 8(10), 45–62. https://iwrij.sku.ac.ir/article_10894.html [In Persian]
- Shahriari, M., Mohsenzadeh, H., & Mohsenzadeh, A. (2016). Experimental optimization of annual runoff estimation in basins without hydrometric stations (case study: Sorkhab basin). *Fifth National Conference on Sustainable Development in Geography and Planning, Architecture and Urbanism*, Tehran, Iran. <https://civilica.com/doc/647854> [In Persian]
- Soleimani, K., & Darvishi, S. (2019). Zoning and monitoring of flood risk in Khuzestan during the spring of 2019 using Landsat-8 data. *Ecohydrology*, 7(3), 647–662. <https://doi.org/10.22059/ije.2020.302703.1333> [In Persian]
- Turk, G. (1961). A method for estimating flood discharges in small catchments. *Journal of Hydrology*, 3(1), 1–14. [https://doi.org/10.1016/0022-1694\(61\)90002-6](https://doi.org/10.1016/0022-1694(61)90002-6)
- Young, A. R. (2013). Stream flow simulation within UK ungauged catchments using a daily rainfall-runoff model. *Journal of Hydrology*, 320(1–2), 155–172. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2013.01.003>

The effect of asphalt concrete core location in a rockfill dam on probabilistic analysis of downstream slope stability under steady-state flow conditions

Seyed Ali Asghari-Pari¹ , and Seyed Amin Asghari-Pari² 

1. Corresponding author, Department of Civil Engineering, Faculty of Engineering, Behbahan Khatam Alanbia University of Technology, Behbahan, Iran. Email: asghari-pari@bkatu.ac.ir

2. Department of Civil Engineering, Faculty of Engineering, Behbahan Khatam Alanbia University of Technology, Behbahan, Iran. Email: asghari_amin@bkatu.ac.ir

Article Info.

Article type:
Research Article

Article history:
Received: 28 May 2025
Received in revised form: 30 September 2025
Accepted: 06 December 2025
Available online: 22 June 2026

Keywords:
asphalt concrete core,
rockfill dam,
probabilistic analysis,
steady-state flow,
sensitivity analysis.

ABSTRACT

Objective: This study investigates the influence of asphalt concrete core positioning in rockfill dams on seepage discharge rates and downstream slope stability under steady-state flow conditions. Additionally, it performs sensitivity analysis to identify key parameters affecting dam stability, particularly focusing on the friction angle of the shell materials.

Method: The research employs numerical modeling and hydraulic-mechanical analyses to assess the effects of core placement. The study evaluates how shifting the asphalt core from the upstream to the downstream side impacts seepage flow, safety factors, and the reliability index of the downstream slope under static and pseudo-static conditions. A sensitivity analysis is conducted to determine the most critical parameters influencing dam stability.

Results: Relocating the asphalt core toward the downstream side increases seepage discharge through the dam. This shift reduces the safety factor and reliability index of the downstream slope under both static and pseudo-static conditions. Sensitivity analysis reveals that the friction angle of the shell materials has the most significant impact on downstream slope stability.

Conclusions: The placement of the asphalt concrete core plays a crucial role in the hydraulic performance and structural stability of rockfill dams. Positioning the core on the upstream side not only minimizes seepage but also enhances downstream slope stability. Moreover, the friction angle of the shell materials is identified as a key parameter in dam design. These findings provide valuable insights for optimizing the design of rockfill dams with asphalt concrete cores.

Cite this article: Asghari-Pari, Seyed Ali., Asghari-Pari, Seyed Amin., (2025). The effect of asphalt concrete core location in a rockfill dam on probabilistic analysis of downstream slope stability under steady-state flow conditions. *Advanced Technologies in Water Efficiency*, 6(1), 84-101. <https://doi.org/10.22126/atwe.2025.12240.1169>



© The Author(s)
<https://doi.org/10.22126/atwe.2025.12240.1169>

Publisher: Razi University.

Introduction

The use of asphalt concrete cores for sealing embankments and rockfill dams is an optimal method in the construction of such structures. The self-healing properties of bitumen, ease of construction in cold and rainy conditions compared to clay cores, flexibility, and effective bonding with embankment materials are key advantages of asphalt concrete, promoting its increasing global adoption. A critical aspect of using asphalt concrete cores is their placement within the dam. This study investigates the probabilistic impact of the asphalt core's location in rockfill dams on the reliability of upstream slope stability under rapid reservoir drawdown conditions. Findings reveal that shifting the core from the upstream to the downstream side reduces seepage flow, the safety factor, and the reliability of the downstream slope under both static and pseudo-static conditions. Sensitivity analysis further highlights that the friction angle of the shell materials most significantly influences downstream slope stability.

Method

The study focuses on the Seydon rockfill dam in Iran, featuring an asphalt concrete core. Five core placement scenarios were analyzed using the probabilistic slope stability software Slide2. The dam's materials were modeled with unsaturated soil properties to enhance seepage and stability analysis accuracy. Key parameters, including unit weight, shear strength, and permeability, were derived from laboratory tests. The analysis incorporated both steady-state and transient conditions, with a drawdown rate of 3 meters per day. The Latin Hypercube sampling method was employed for probabilistic analysis, generating 1000 samples to ensure convergence. The reliability index (RI) and probability of failure (PF) were calculated to assess stability under static and pseudo-static conditions, including seismic effects with a horizontal coefficient of 0.15.

Results

1. Seepage Analysis: Moving the asphalt core from upstream to downstream reduced seepage flow, with the most notable decrease observed in Cases 1 to 3.
2. Overall Slope Stability: The safety factor (F.S) for the downstream slope remained stable when the core was upstream but decreased when shifted downstream. The reliability index (RI) exceeded 3 in all cases, confirming high stability.
3. Minimum Reliability Analysis: This method identified deeper critical slip surfaces with higher F.S but lower RI compared to the overall slope method, emphasizing the need for comprehensive probabilistic assessment.
4. Sensitivity Analysis: The friction angle of the shell materials had the most significant linear correlation with slope stability, while other parameters showed negligible effects.

Conclusions

The study underscores the importance of asphalt core placement in rockfill dams, demonstrating that upstream positioning enhances stability and reliability. The friction angle of shell materials is the dominant factor influencing slope stability. Probabilistic analyses, including minimum reliability assessment, provide a robust framework for evaluating dam safety under uncertainty. These findings offer valuable insights for engineers and policymakers in dam design, construction, and maintenance, ensuring safer and more reliable infrastructure.

Author Contributions

All authors contributed equally to the conceptualization of the article and writing of the original and subsequent drafts.

Data Availability Statement

Data available on request from the authors.

Acknowledgements

We are very grateful to Khuzestan Province Water and Electricity Organization for their sincere cooperation and providing the Seydón Dam reports.

Ethical Considerations

The authors avoided data fabrication, falsification, plagiarism, and misconduct.

Funding

This research did not receive any specific grant from funding agencies in the public, commercial, or not-for-profit sectors

Conflict of Interest

The authors declare no conflict of interest



تأثیر مکان هسته بتن آسفالتی در سد سنگریزه‌ای بر تحلیل احتمالاتی پایداری شیب پایین دست در شرایط جریان پایدار

سید علی اصغری پری^۱ و سید امین اصغری پری^۲

۱. نویسنده مسئول، گروه مهندسی عمران، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه صنعتی خاتم الانبیاء بهبهان، بهبهان، ایران. رایانامه: asgharipari@bkstu.ac.ir

۲. گروه مهندسی عمران، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه صنعتی خاتم الانبیاء بهبهان، بهبهان، ایران. رایانامه: asghari_amin@bkstu.ac.ir

درباره مقاله	چکیده
نوع مقاله: مقاله پژوهشی تاریخ دریافت: ۱۴۰۴/۰۳/۰۷ تاریخ بازنگری: ۱۴۰۴/۰۷/۰۸ تاریخ پذیرش: ۱۴۰۴/۰۹/۱۵ تاریخ انتشار: ۱۴۰۵/۰۴/۰۱	هدف: هدف این مقاله، بررسی تأثیر موقعیت هسته آسفالتی در سدهای سنگریزه‌ای بر میزان ریسک عبوری و پایداری شیب پایین دست در شرایط جریان پایدار است. همچنین، تحلیل حساسیت پارامترهای مؤثر بر پایداری سد به ویژه زاویه اصطکاک مصالح پوسته سد مورد توجه قرار گرفته است. روش پژوهش: این مطالعه با استفاده از تحلیل‌های عددی و مدل سازی شرایط هیدرولیکی و مکانیکی سد انجام شده است. تأثیر جایگذاری هسته آسفالتی از سمت بالادست به پایین دست بر روی ریسک ضربه ایمنی و قابلیت اطمینان شیب پایین دست در شرایط استاتیکی و شبه استاتیکی بررسی شده است. همچنین، تحلیل حساسیت برای تعیین پارامترهای کلیدی مؤثر بر پایداری سد انجام گرفته است. یافته‌ها: جایگذاری هسته آسفالتی به سمت پایین دست باعث افزایش ریسک عبوری از سد می‌شود. این جایگذاری، ضربه ایمنی و قابلیت اطمینان شیب پایین دست را در شرایط استاتیکی و شبه استاتیکی کاهش می‌دهد. بر اساس تحلیل حساسیت، زاویه اصطکاک مصالح پوسته سد بیشترین تأثیر را بر پایداری شیب پایین دست دارد. نتیجه گیری: موقعیت هسته آسفالتی در سدهای سنگریزه‌ای نقش تعیین کننده‌ای در عملکرد هیدرولیکی و پایداری سد دارد. قرارگیری هسته در سمت بالادست، تعینات ریسک آب را کاهش می‌دهد بلکه پایداری شیب پایین دست را نیز بهبود می‌بخشد. همچنین، زاویه اصطکاک مصالح پوسته سد به عنوان پارامتر کلیدی در طراحی این نوع سدها باید مورد توجه ویژه قرار گیرد. این یافته‌ها می‌تواند در بهینه سازی طراحی سدهای سنگریزه‌ای با هسته آسفالتی مؤثر باشند.

استناد: اصغری پری، سید علی؛ اصغری پری، سید امین (۱۴۰۴). تأثیر مکان هسته بتن آسفالتی در سد سنگریزه‌ای بر تحلیل احتمالاتی پایداری شیب پایین دست در شرایط جریان پایدار. فناوری‌های پیشرفته در بهره‌وری آب، ۶ (۴)، ۸۴-۱۰۱.

10.22126/atwe.2025.12240.1169



نویسندگان

شماره دانشگاه رازی

مقدمه

برای مدت طولانی، هسته‌های رسی معمولاً در سدهای خاکی به‌عنوان یک جزء آب‌بندی در ساختار سد استفاده می‌شوند. سدهای با هسته بتنی آسفالتی یکی از گزینه‌های مهم در طراحی سدهای خاکی و سنگریزه‌ای به‌ویژه در مناطقی است که با مسائل مانند تهیه مصالح غیرقابل نفوذ برای هسته، الزامات کنترلی دقیق، حساسیت بالا به شرایط آب‌وهوایی و وقوع پدیده‌هایی مانند شکستگی هیدرولیکی رنج می‌برند. است (کمیته سدهای بزرگ ایران^۱، ۱۹۸۲). از مزایای این نوع سدها می‌توان به نداشتن ترک، حساس نبودن به شرایط آب‌وهوایی مختلف، قابلیت خودترمیم شدن مصالح هسته، انعطاف‌پذیری و تغییرشکل‌پذیری، دوام و مقاومت در برابر نشست، مقاومت نسبی در برابر زلزله و اتصال رضایت‌بخش با مصالح خاکریز و امنیت بالا در شرایط جنگی اشاره کرد (هوگ^۲، ۱۹۹۳). در این تحقیق اثر مکان (یا شیب) هسته آسفالتی در سد سنگریزه‌ای، با تمرکز بر نرخ نشست در حالت جریان پایدار، تأثیر تغییرات پارامترهای مقاومتی سد بر نتایج آنالیز پایداری شیب و تأثیر زلزله بر نتایج تحلیل پایداری مورد بررسی قرار گرفته است. همچنین در این مطالعه پارامترهای خاک سد به‌صورت غیراشباع در نظر گرفته شده تا بیش دقیق‌تری نسبت به آنالیز نشست و پایداری ایجاد شود. از طرفی با استفاده از آنالیز تغییرات مکانی و تجزیه و تحلیل حساسیت پایداری تحت شرایط مختلف بررسی و اثر تغییرات در پارامترهای مصالح سد در نتایج آنالیز پایداری بررسی می‌شود.

ادبیات موضوع و پیشینه پژوهش

تا کنون، آنالیزهای عددی زیادی برای ارزیابی رفتار استاتیکی و دینامیکی سدهای سنگریزه‌ای با هسته‌های بتنی آسفالتی انجام شده است.

والستاد و همکاران^۳ (۱۹۹۱) سد استوارتن در تروژ را بررسی نمود. آنها تغییر شکل دائمی سد با استفاده از روش تیومارک را محاسبه کردند که نتایج نشان می‌دهد که رفتار سد در برابر زلزله خوب است. گوردیل^۴ (۱۹۹۹) سد کویرا را برای هر دو حالت سطوح زمین‌لرزه OBE و MCE مورد تحلیل قرار داد. در این تحلیل‌ها از روش اجزا محدود و مدل هاپرپولیک برای محاسبه تنش‌ها استفاده کردند. نتایج این مطالعه حاکی از آن بود که باوجود اینکه ترک‌هایی در هسته سد به وجود آمد؛ اما باتوجه به قابلیت خودترمیمی قیر، نشست در مدت‌زمان کوتاهی متوقف شد. منیتز و جوتزه^۵ (۱۹۹۹) سد سرس در آفریقای جنوبی را با شبه‌استاتیکی و دینامیکی تحلیل کردند. هر دو نتایج شبه‌استاتیکی و دینامیکی نشان می‌دهد که یک سد با شیب بالادست ۱ تا ۱٫۶ و شیب پایین‌دست ۱ تا ۱٫۵ و تاج با عرض ۷ متر تمام استانداردهای ایمنی را برآورده می‌کند. مهابادی و روستا^۶ (۲۰۰۲) به بررسی جنبه‌های دینامیکی یک سد سنگریزه به ارتفاع ۱۱۵ متر پرداختند. نتایج نشان می‌دهد که تنوع زیادی در رفتار نشست بین مصالح هسته و منطقه انتقالی وجود دارد. بررسی اثرات هندسه سد بر تحلیل‌های دینامیکی یک سد خاکی با هسته بتن آسفالتی توسط گاتمیری و مکرم^۷ (۲۰۰۳) نشان داد که پارامترهای هندسی برای سدها باید بر اساس رفتار لرزه‌ای یک سد انتخاب شوند. آنالیز عددی و آزمایش‌ها تجربی دیگری توسط بازاریار و همکاران (۲۰۰۶) برای بررسی ایمنی یک سد سنگریزه‌ای با هسته آسفالتی انجام شد. مطالعات آنها نشان می‌دهد که یک سد سنگریزه در برابر زلزله‌های بزرگ یا حتی چندین زلزله عملکرد رضایت‌بخشی دارد. فیضی و همکاران (۲۰۰۸) رفتار لرزه‌ای بتن آسفالتی در سدهای خاکی تحت بارگذاری زلزله را مورد مطالعه قرار داد. تست‌های پکنواخت و چرخه‌ای متعدد برای ارزیابی نمونه‌های بتن آسفالتی مورد استفاده در سازه‌های هیدرولیکی استفاده شد. رفتار سد گرمروود توسط

^۱ ICOLD

^۲ Hoeg

^۳ Walstad et al

^۴ Gurdel

^۵ Maintjes & Jones

^۶ Mahabadi & Roosta

^۷ Gatmiri & Mokarrem

فیضی و همکاران (۲۰۰۹) با استفاده از روش اجزا محدود، تحلیل‌های عددی و آزمون میز لرزه مورد ارزیابی قرار گرفت. نتایج نشان داد که مصالح بتن آسفالتی بادوام بوده و تنها در اثر زلزله‌های قوی در آن ترک ایجاد می‌شود. نتایج عددی و تجربی بر این نکته تأکید دارد که سد گرمزود عملکرد خوبی در برابر زلزله دارد. قهرمان نژاد و همکاران (۲۰۱۰) تغییر شکل لرزه‌ای سد رودخانه شور با هسته بتنی قبری را بررسی کرد. به‌عنوان مطالعه موردی آنها حداکثر نشست تاج سد را تحت حالات بارگذاری زلزله با روش‌های ساده و تحلیل‌های عددی مورد ارزیابی قرار دادند. نتایج نشان داد که شکست هسته آسفالتی بعید است رخ دهد. اختریور و خدایی (۲۰۱۳) رفتار بتن آسفالتی مورد استفاده به‌عنوان یک هسته غیرقابل نفوذ یک سد سنگ‌ریزه‌ای را بررسی کردند. آنها مجموعه گسترده‌ای از تست‌های سه محوری یکنواخت و چرخه‌ای را برای ارزیابی رفتار دینامیکی انجام دادند. نتایج نشان می‌دهد که برش دینامیکی کرنش‌ها برای همه آزمایش‌ها کمتر از ۰/۴ درصد هستند و هیچ ترکی روی سطوح نمونه رخ نداده است. لیو و همکاران^۱ (۲۰۱۵) مکانیسم شکست در سدهای سنگ‌ریزه‌ای را با تست میز لرزه‌ای در مقیاس بزرگ مورد بررسی قرار داد. نتایج آزمایش‌های میز لرزه‌ای با نتایج عددی مطابق بود. تایلان و همکاران^۲ (۲۰۱۷) رفتار سد دریدرسی را تحت بارهای مختلف زلزله تحلیل کرد. روش اجزای محدود و نرم‌افزار اتسیس برای انعکاس واقعی‌تر رفتار سد استفاده شد. علاوه بر این، برخی از محققان اخیراً از اجزا محدود برای ارزیابی استاتیکی و رفتار دینامیکی یک سد سنگ‌ریزه بتنی آسفالتی استفاده کردند. وو و همکاران^۳ (۲۰۱۸) دریافتند که توزیع تنش و تغییر شکل هسته آسفالتی در طول دوره ساخت و بهره‌برداری مناسب بوده و عدم ایجاد شکست برشی در هسته آسفالتی یا خرابی هیدرولیک قابل تأیید توسط آنالیز عددی است. علاوه بر این، پس از اعمال بار لرزه‌ای، اثر نشست قابل توجهی در تاج سد وجود ندارد. فنگ و همکاران^۴ (۲۰۲۰) روش‌های طراحی و بهره‌برداری از سد سنگی آسفالتی اوکسی به ارتفاع ۱۷۴ متر را مورد بررسی قرار دادند. عملکرد سد نشان داد که سد سنگ‌ریزه‌ای با هسته بتن آسفالتی در دره‌های باریک با تکیه‌گاه‌های شیب‌دار ایمن است. همچنین هسته انعطاف‌پذیر بوده و در آن هیچ شکافی رخ نداده و فرسایش داخلی مشکلی ایجاد نکرد. دارماز و همکاران^۵ (۲۰۲۰) توسعه یک روش طراحی اولیه با در نظر گرفتن جابه‌جایی دائمی ناشی از زلزله و پاسخ لرزه‌ای سدهای سنگ‌ریزه‌ای را مورد بررسی قرار دادند. برای این منظور، مدل‌های عددی با خواص هندسی و مواد مختلف تهیه شد و تحلیل دینامیکی با نرم‌افزار بر اساس روش اجزای محدود انجام شده است. کیو و همکاران^۶ (۲۰۲۱) رفتار سد اوکسی در چین که بلندترین سد با هسته بتنی آسفالتی در جهان است را به‌صورت موردی مورد مطالعه قرار دادند. آنالیز اجزا محدود غیرخطی سه‌بعدی برای سد انجام شد و نتایج با نتایج محاسبه شده توسط تجزیه و تحلیل دوبعدی مقایسه شد. در نهایت، نتایج محاسبه شده با داده‌های پایش از ساخت سد مقایسه شد. نتایج نشان داد که نگرانی‌های ابراز شده در مورد ایمنی و رفتار هسته آسفالتی درست نیست و این نوع هسته ایمن است. در مطالعه خلج و همکاران (۲۰۲۲)، سد میجران در ایران به‌عنوان مطالعه موردی برای سدهای سنگ‌ریزه دارای هسته بتنی آسفالتی مورد بررسی قرار گرفت. این تحقیق تأثیر سه زاویه هسته مختلف ۹۰ درجه، ۶۰ درجه و ۴۵ درجه را بر روی رفتارهای استاتیکی و دینامیکی سد بررسی می‌کند. هدف این مطالعه این بود که چگونه تغییرات در زوایای هسته بر عملکرد سد تحت شرایط بارگذاری مختلف تأثیر می‌گذارد.

¹ Liu et al² Taylan et al.³ Wu et al.⁴ Feng et al.⁵ Dharmaz et al.⁶ Qiu et al.

روش پژوهش

۱. مشخصات و موقعیت پروژه مورد بررسی

سد مخزنی صیدون که یک پروژه مهندسی مهم است، هم اکنون در حدود ۴۰ کیلومتری جنوب شرقی باغملک و بر روی یکی از شاخه‌های اصلی رودخانه علا در استان خوزستان در حال ساخت است. حوضه آبریز این سد که در یک منطقه کوهستانی قرار دارد، به مساحت چشمگیر ۴۹۶،۵ کیلومترمربع است. محل ساخت سد مخزنی صیدون در دره‌ای V شکل با بازوی ناقص نسبتاً متقارن، همان‌طور که در شکل (۱) نشان داده شده است، قرار دارد. خلاصه ویژگی‌های سد مخزنی صیدون در جدول (۱) ارائه شده است.



شکل ۱. محل دره‌ای که سد صیدون در آن قرار دارد

سد صیدون از نوع سنگریزه‌ای یا هسته آسفالتی در نظر گرفته شده است. هسته بتن آسفالتی به‌عنوان یک عنصر آب‌بندی در مرکز سد قرار دارد و ضخامت آن ۱ متر است و دو فیلتر در پایین و بالای هسته قرار دارد. مصالح فیلتر و زهکش از جنس SM بوده و در دو طرف هسته قرار می‌گیرند. مصالح بدنه سد بیشتر از نوع GP-GM بوده و دارای شیب ۱ تا ۲/۵ در بالادست و ۱ به ۲ در پایین‌دست است. نکته اینکه دره‌های V شکل به دلیل هندسه تنگ و دیواره‌های شیب‌دار، اثر قوس زدگی را در هسته آسفالتی سدها تشدید می‌کنند. این موضوع منجر به کاهش تنش عمودی مؤثر و افزایش خطر ترک‌خوردگی می‌شود؛ بنابراین، در طراحی سدهای با هسته آسفالتی در چنین دره‌هایی، باید تمهیدات ویژه‌ای برای کنترل تنش‌ها و تغییر شکل‌ها در نظر گرفته شود.

جدول ۱. ویژگی‌های سد مخزنی صیدون

مقدار	خصوصیات سد
۶۵/۹ میلیون متر مکعب	حجم کل مخزن
۵۰/۵ میلیون متر مکعب	حجم مفید
۱۲۹۰ متر بالاتر از سطح دریا	سطح نرمال آب مخزن
۱۲۴۵ متر از سطح دریای آزاد	حد اقل سطح بهره‌برداری
۱۵۶۶۸ هکتار	مساحت کل زمین شبکه صیدون
۶/۷۷ میلیون متر مکعب	حجم آب تنظیمی سد صیدون

۲. آنالیز پایداری شیب و نشست

آنالیز نشست یک بخش حیاتی در تضمین پایداری طولانی مدت سدهای سنگ‌ریزه‌ای است. این آنالیز، فشار آب منفذی را که به طور قابل توجهی بر پایداری کلی سد تأثیر می‌گذارد در نقاط مختلف سد تعیین می‌کند. فشار آب منفذی، از تجزیه و تحلیل المان محدود جریان آب زیرزمینی با استفاده از نرم‌افزار تخصصی Slide2 به دست می‌آید. Slide2 یک نرم‌افزار کاربردی است که برای ارزیابی پایداری شیب‌ها در خاک یا سنگ استفاده می‌شود. ضریب ایمنی یا احتمال شکست را برای سطوح شکست دایره‌ای یا غیر دایره‌ای محاسبه می‌کند. این برنامه از روش‌های تعادل حدى دویعدی برای بررسی پایداری سطوح لغزش استفاده می‌کند که شامل برش‌های عمودی و غیر عمودی می‌شود. علاوه بر این، Slide2 امکان تجزیه و تحلیل نشست آب زیرزمینی با استفاده از روش‌های المان محدود تحت شرایط حالت پایدار و گذرا را فراهم می‌کند.

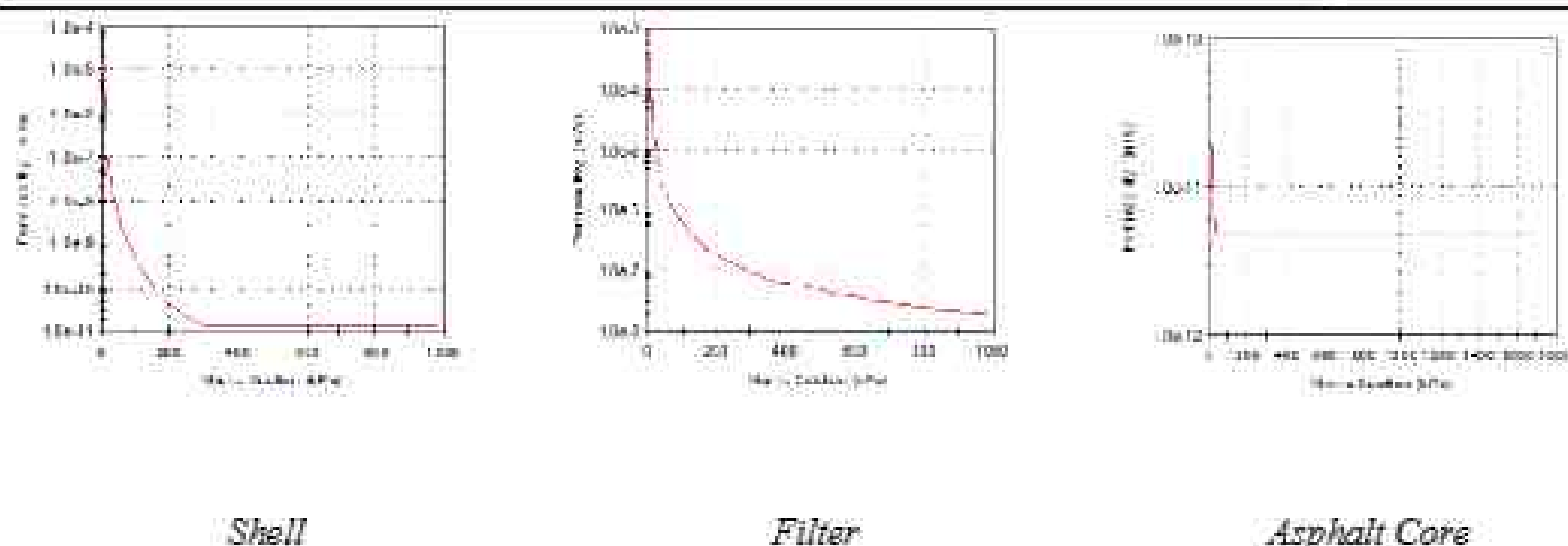
۳. داده‌های ورودی برای تجزیه و تحلیل سد

در این مقاله از پارامترهای خاکی استفاده شده است که با پارامترهای خاک مورد استفاده در سد سنگ‌ریزه‌ای صیدون مطابقت دارد. آزمایش دقیق آزمایشگاهی در منطقه مورد مطالعه، اطلاعات جامعی را در مورد مقادیر میانگین خواص مختلف خاک، از جمله وزن واحد، پارامترهای مقاومت برشی، نفوذپذیری و پارامترهای خاک غیراشباع ارائه کرده است. نتایج این آزمایش‌ها دقیق به تحلیل و ارزیابی پایداری شیب و ملاحظات ژئوتکنیکی مربوط به سد کمک فراوانی می‌کند. مدل خاک اشباع-غیراشباع برای تجزیه و تحلیل دقیق تر نشست و تجزیه و تحلیل پایداری شیب استفاده شده است. خواص مصالح بخش‌های مختلف سد در جدول (۲) آورده شده است. ضریب نفوذپذیری بر حسب مکش خاک برای مصالح مختلف در شکل (۲) آورده شده است. مقدار ورودی هوا (AEV) که توسط فردلوند^۱ (۲۰۰۰) تعریف شده است، آستانه مکش ماتریکی مورد نیاز را نشان می‌دهد. هنگامی که مکش ماتریک از مقدار ورودی هوا (AEV) فراتر می‌رود، خاک به دلیل وجود فشار آب منفذی منفی شروع به افزایش مقاومت می‌کند. پوش خطی با زاویه اصطکاک به نام Φb نشان می‌دهد که مقاومت برشی خاک را می‌توان با استفاده از یک رابطه خطی توصیف کرد تا زمانی که خاک اشباع شود (فردلوند، ۲۰۰۰). شکل (۳) تأثیر مقدار ورودی هوا را بر استحکام خاک‌های غیراشباع نشان می‌دهد و نشان می‌دهد که چگونه مقاومت با تغییر مکش ماتریکی تغییر می‌کند.

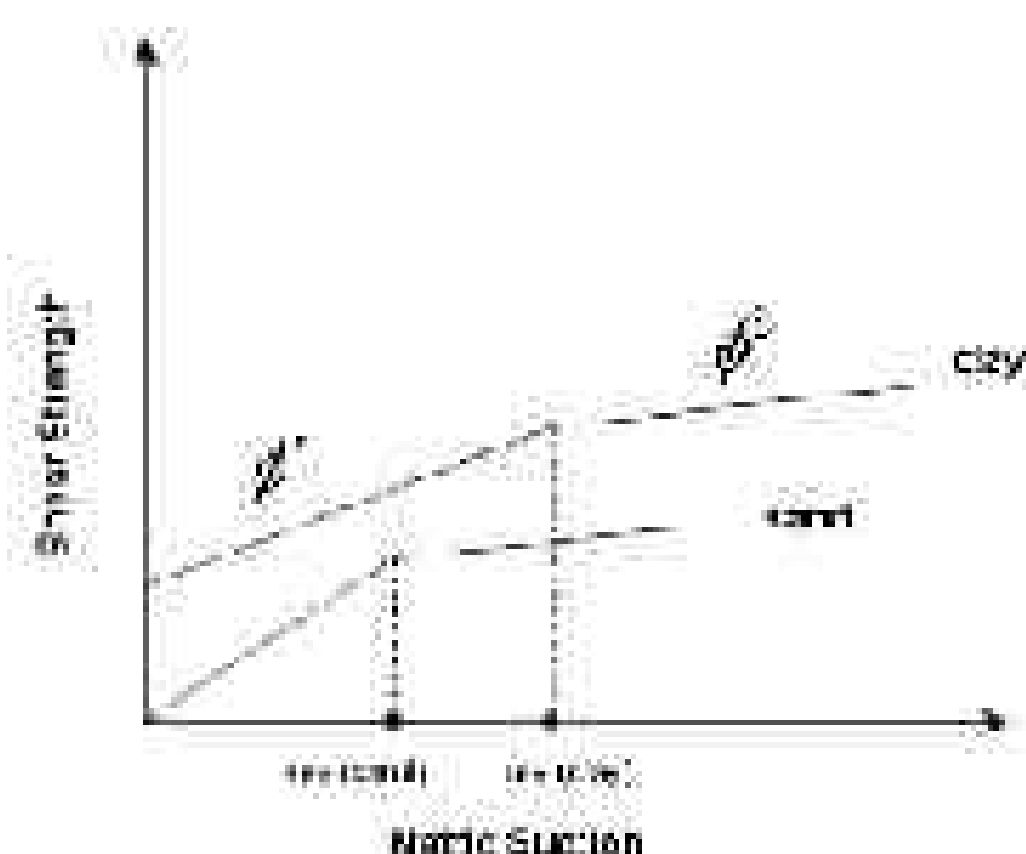
جدول ۲. خواص مصالح بخش‌های مختلف سد

Material Name	Unit Weight (kN/m ³)	Strength Type	Cohesion (kPa)	Phi (deg)	Phi b (deg)	Air Entry (kPa)	K _s (m/s)
Asphalt Core	23.5	Mohr-Coulomb	120	24	-	-	1e-10
Filter	20	Mohr-Coulomb	0	35	20	1.5	0.001
Shell	21.9	Mohr-Coulomb	0	44	22	5	1.25e-05

¹ Fredlund



شکل ۲. ضریب نفوذپذیری بر حسب مکش خاک برای مصالح مختلف سد



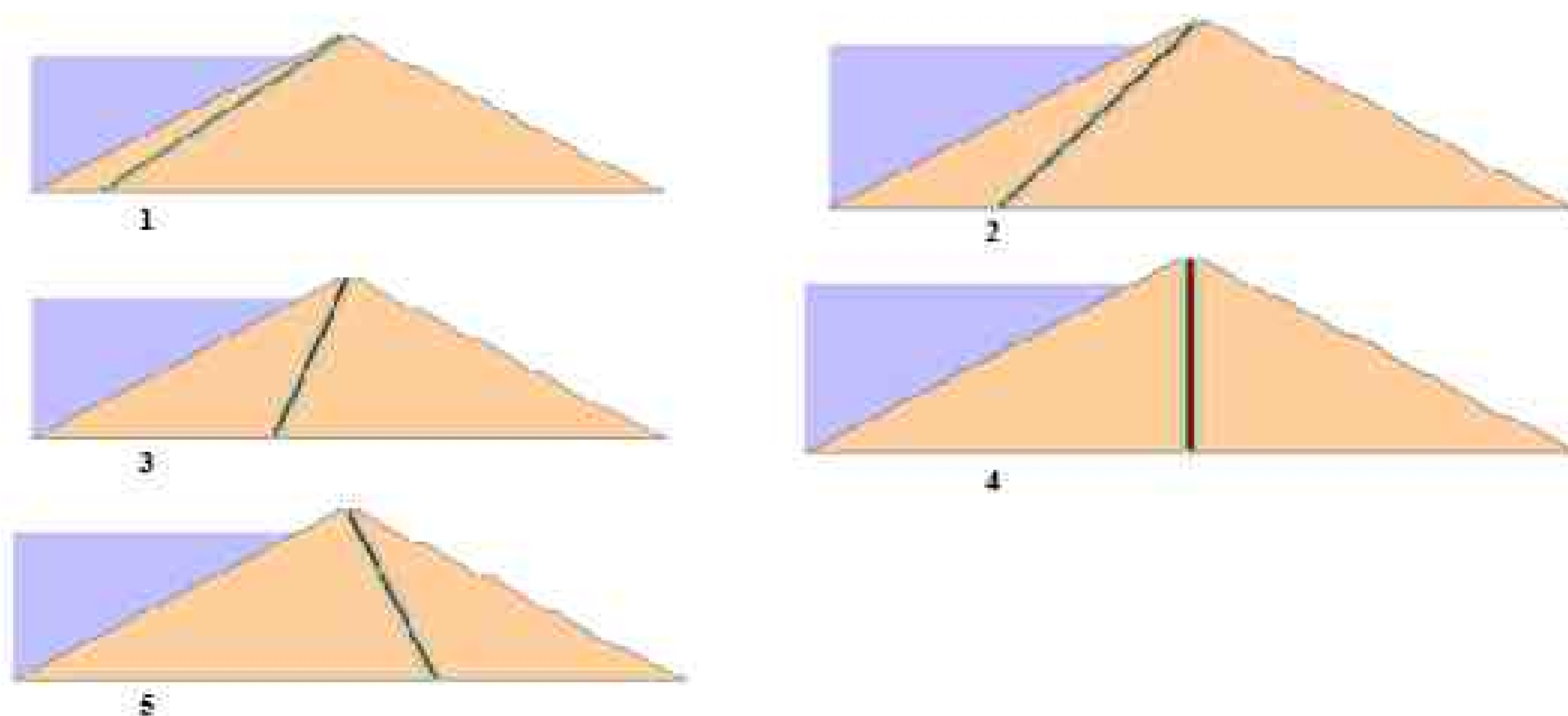
شکل ۳. اثر مقدار ورودی هوا (AEV) بر روی پوشش مقاومت برشی اشباع نشده (فردلان، ۲۰۰۰)

۴. محل قرارگیری هسته بتن آسفالتی

برای بررسی تأثیر محل هسته بتن آسفالتی بر نتایج تحلیل احتمالی پایداری شیب پنج حالت برای قرارگیری هسته در نظر گرفته شده است که شکل و مشخصات آنها در شکل (۴) و جدول (۳) آورده شده است.

جدول ۳. شیب هسته آسفالتی

Case	slope of core(H:V)
1	1.75:1
2	1:1
3	1.25:1
4	vertical
5	1:1.9



شکل ۴. تمام حالات قرارگیری محل هسته آسفالتی

۵. قابلیت اطمینان شیب

ارزیابی قابلیت اطمینان شیب شامل بررسی اثرات تجمعی عدم قطعیت‌ها و تمایز بین سناریوهایی است که با سطوح عدم قطعیت به طور قابل توجهی بالا یا پایین مشخص می‌شوند (وارد و پچت^۱، ۲۰۱۸). قابلیت اطمینان (R) به عنوان قابلیت عملکرد بدون تجربه شکست تعریف می‌شود که می‌تواند به عنوان احتمال موفقیت نیز تعبیر شود که با رابطه (۱) نشان داده می‌شود:

$$R(t) = P(T \geq t) \quad (1)$$

برعکس، احتمال شکست (PF) به احتمال وقوع شکست قبل از یک زمان مشخص (t) اشاره دارد و می‌تواند به صورت ریاضی همان طور که در رابطه (۲) نشان داده شده است بیان شود:

$$P_f(t) = P(T \leq t) \quad (2)$$

شاخص قابلیت اطمینان (RI) که اغلب با β نشان داده می‌شود، نسبت میانگین حاشیه ایمنی (که میانگین ضریب ایمنی منتهای یک است) به انحراف استاندارد حاشیه ایمنی است. این مفهوم برای اولین بار توسط کرنل^۲ در سال ۱۹۶۹ معرفی شد و به صورت ریاضی در معادله (۳) بیان می‌شود:

$$RI = \beta = \frac{(\text{mean of FS} - 1)}{SD \text{ of FS}} \quad (3)$$

یک ضریب ایمنی قطعی، حاشیه ایمنی در یک سیستم را بر اساس مقادیر ورودی متوسط یا مورد انتظار نشان می‌دهد. با این حال، مقادیر ورودی واقعی به ندرت دقیقاً با میانگین مطابقت دارند و این معیار را برای پرداختن مؤثر به خطرات و عدم قطعیت‌ها ناکافی می‌کند؛ بنابراین، روش‌های احتمالی یا تصادفی برای محاسبه تغییرپذیری و عدم قطعیت ضروری هستند و بیش مهمی در مورد ریسک ارائه می‌دهند. شاخص قابلیت اطمینان نقش کلیدی در ارزیابی پایداری شیب به دنبال تحلیل احتمالی، اندازه‌گیری حاشیه ایمنی با ارزیابی فاصله بین میانگین ضریب ایمنی و آستانه بحرانی دارد. شاخص قابلیت اطمینان بالاتر نشان دهنده افزایش ایمنی و قابلیت اطمینان است. در حالی که مقدار پایین‌تر نشان دهنده افزایش خطرات است. روابط بین احتمال شکست و شاخص قابلیت اطمینان در جدول (۴) خلاصه شده است.

شکل ۴. روابط بین احتمال شکست و شاخص قابلیت اطمینان (قون و کولهوی^۳، ۲۰۰۸)

Reliability Index	Probability of failure	Performance level
1	0.16	Hazardous
1.5	0.023	Unsatisfactory
2	0.0027	Poor
2.5	0.0006	Below average
3	0.0001	Above average
4	3×10^{-5}	Good
5	3×10^{-7}	High

شاخص قابلیت اطمینان هدف حداقل ۳ معمولاً برای اطمینان از طراحی شیب ایمن توصیه می‌شود که نشان دهنده یک حاشیه ایمنی قابل توجه بین ضریب ایمنی متوسط و ضریب ایمنی بحرانی است. این سطح جداسازی برای به حداقل رساندن خطر شکست شیب و تضمین سطح بالایی از قابلیت اطمینان در کاربردهای مهندسی و ژئوتکنیکی بسیار مهم است. تغییرپذیری خاک را می‌توان با استفاده از ضریب تغییرات (COV) که نسبت انحراف استاندارد به محتمل‌ترین مقدار پارامتر است، کمی‌سازی کرد. این اندازه‌گیری به عنوان یک شاخص تغییرپذیری پارامتر عمل می‌کند و همان طور که در رابطه (۴) نشان داده شده است، می‌تواند به صورت ریاضی بیان شود.

$$COV = \frac{\sigma}{\mu} \quad (4)$$

¹ Varde & Pecht

² Kernel

³ Phoon & Kulhawy

محققین بسیاری ضریب تغییرات را به عنوان شاخص تغییرپذیری در پارامترهای خاک برجسته کرده‌اند. ضریب تغییرات وزن واحد در انواع مختلف خاک طبق مطالعات متعددی از جمله مطالعات برینوسکی^۱ (۱۹۸۵) و دانکن^۲ (۲۰۰۰) از ۳٪ تا ۱۲٪ گزارش شده است. تحقیقات دیگر نشان می‌دهد که محدوده ضریب تغییرات گسترده‌تر از ۱٪ تا ۱۵٪، همان‌طور که توسط استاماتوپلوس و کوتزیاس^۳ (۱۹۷۵) ذکر شده است، علاوه بر این، لومب^۴ (۱۹۷۴) و لاکاس و نادیم^۵ (۱۹۹۶) ضریب تغییرات را بین ۵ تا ۱۳ درصد گزارش کردند. همان‌طور که سینگ^۶ (۱۹۷۱)، هوگ و مورارکا^۷ (۱۹۷۴) و لومب (۱۹۷۴) گزارش کردند، ضریب تغییرات (COV) زاویه اصطکاک برای انواع مختلف خاک از ۵٪ تا ۱۵٪ متغیر است. این بینش‌ها بر اهمیت در نظر گرفتن تنوع در پارامترهای خاک هنگام ارزیابی پایداری شیب و ویژگی‌های ژئوتکنیکی تأکید می‌کند. براین اساس، در این تحقیق مقدار ضریب تغییرات برای وزن واحد و زاویه اصطکاک مصالح سد برابر ۱۰ درصد در نظر گرفته شده است که در جدول ۵ به تفصیل شرح داده شده است. همچنین، توزیع نرمال با فاصله ۳ انحراف استاندارد در دو طرف میانگین برای همه متغیرهای تصادفی در نظر گرفته شده است.

جدول ۵. پارامترهای آماری مصالح سد

Name	Property	Distribution	Mean	Std. Dev.	Rel. Min	Rel. Max
Asphalt concrete Core	Cohesion	normal	120	12	36	36
	Phi	normal	24	2.4	7.2	7.2
	Unit Weight	normal	23.5	2.35	7.05	7.05
Filter	Phi	normal	35	3.5	10.5	10.5
	Unit Weight	normal	20	2	6	6
Shell	Phi	normal	44	4.4	13.2	13.2
	Unit Weight	normal	21.9	2.2	6.6	6.6

یافته‌های پژوهش

۱. نتایج آنالیز نشت

برای تحلیل نشت سد صیدون در شرایط جریان پایدار، از نرم‌افزار Slide2 استفاده شده است. نتایج حاصل از این تجزیه و تحلیل که در شکل (۵) و (۶) ارائه شده است، نشان می‌دهد که جابجایی هسته سد از سمت پوسته بالادست به سمت پایین دست می‌تواند منجر به کاهش نرخ جریان سد گردد. این تغییر به دلیل افزایش مقاومت در برابر جریان، شیب‌های هیدرولیکی تغییر یافته، تجمع بالقوه آب و تغییرات ساختاری به وجود می‌آید. ثبات و هماهنگی این عوامل می‌توانند بی‌نظمی و اتلاف انرژی بیشتری به همراه داشته باشند و در نهایت جریان کلی در سد را کاهش دهند. همان‌طور که در شکل (۵) مشاهده می‌شود، بیشترین میزان جریان در حالت ۱ ثبت شده است که مقدار آن ۰/۰۶۵ مترمکعب در روز است و کم‌ترین دبی در حالت (۵) مشاهده گردیده که مقدار آن برابر ۰/۰۱۶۱ مترمکعب در روز است. از طرفی نتایج نشان می‌دهد که نتایج دبی عبوری در حالت هسته قائم (حالت ۴) و شیب هسته به سمت پایین دست (حالت ۵) و حالت ۳: بسیار به هم نزدیک است. این یافته‌ها نشان می‌دهند که موقعیت هسته سد تأثیر قابل توجهی بر رفتار جریان درون سد دارد و اهمیت طراحی دقیق در این زمینه را مورد تأکید قرار می‌دهد. بنابراین، توجه به جنبه‌های مهندسی هیدرولیک در طراحی سدها و پروژه‌های زیرساختی از اهمیت بالایی برخوردار است.

¹ Brainosky

² Duncan

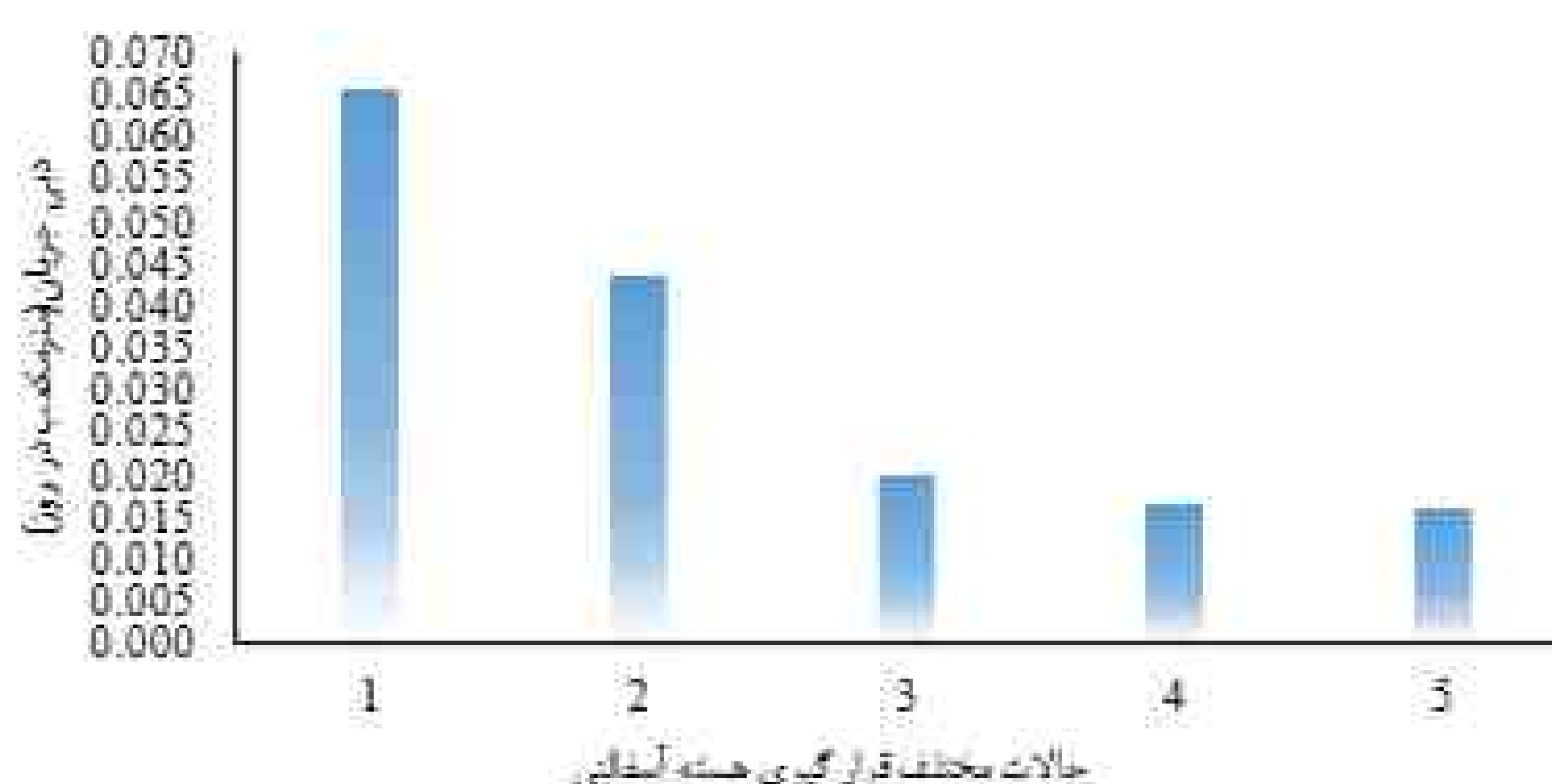
³ Stamatopoulous & Cottzias

⁴ Lumb

⁵ Lacasse & Nadim

⁶ Singh

⁷ Høeg & Murarka



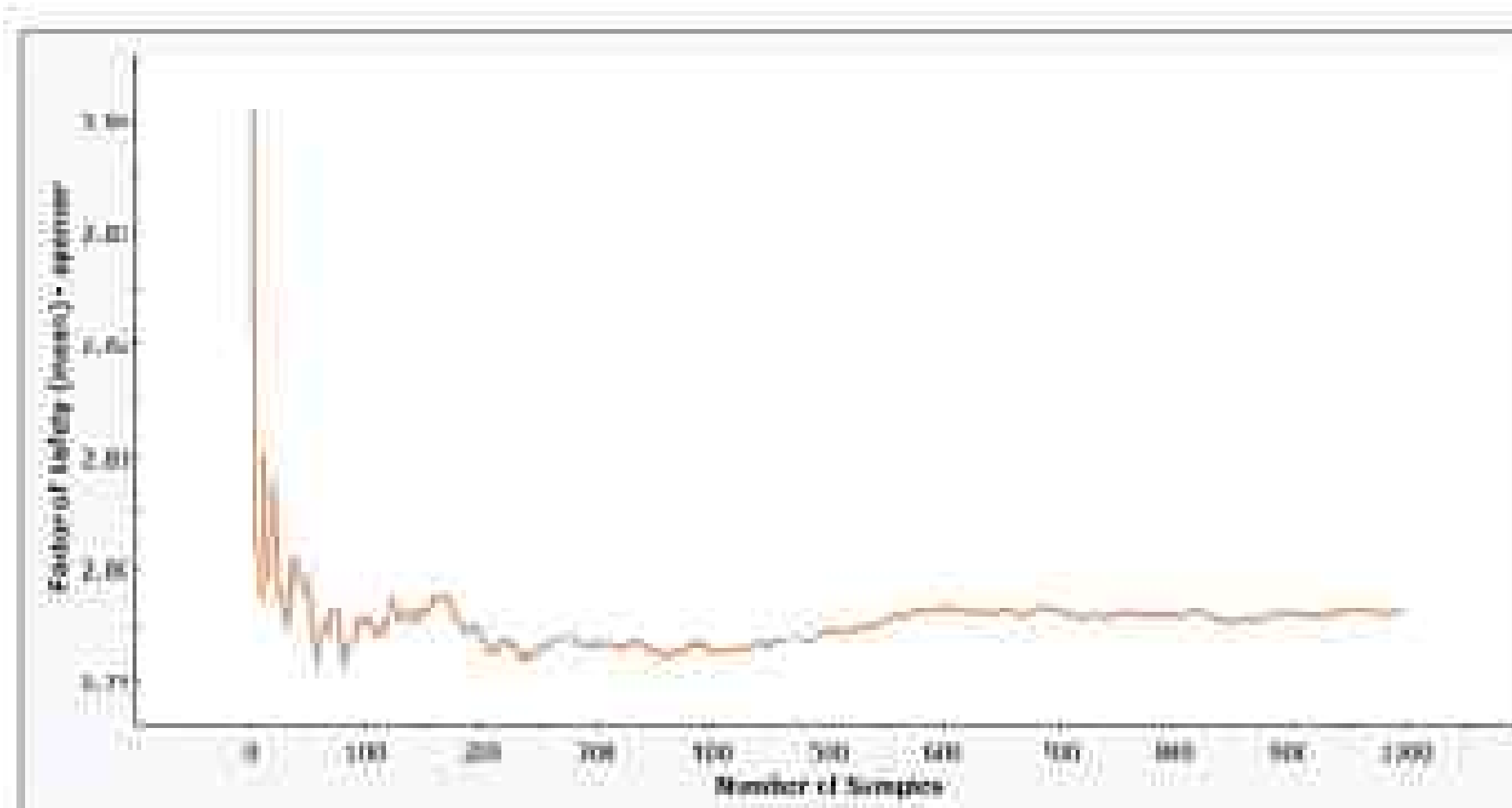
شکل ۵. نتایج آنالیز نشت از بدنه سد در حالت جریان پایدار

۲. نتایج تحلیل پایداری شیب

استفاده از نرم‌افزار Slide2 برای ارزیابی پایداری شیب پایین دست سد خاکی رویکردی جامع برای تحلیل پایداری شیب محسوب می‌شود. در نظر گرفتن هر دو حالت استاتیک و شبه‌استاتیک این امکان را فراهم می‌آورد که پایداری سد را در شرایط مختلف به طور کامل بررسی کنیم. ترکیب نتایج تجزیه و تحلیل نشت با مشخصات مصالح ارائه شده در جدول (۵)، مراحل ضروری برای انجام یک ارزیابی جامع از پایداری شیب پایین دست سد خاکی را تشکیل می‌دهد.

۳. آنالیز حداقل شیب احتمالاتی کلی

در تجزیه و تحلیل پایداری شیب احتمالاتی، هر سطح لغزش با استفاده از نمونه‌های تولید شده برای هر متغیر تصادفی تحت تکرارهای متعددی از محاسبات پایداری قرار می‌گیرد. هر تکرار نشان‌دهنده یک ترکیب متمایز از متغیرهای ورودی است که بر اساس تکنیک نمونه‌گیری به کار گرفته شده، ایجاد می‌شود. تجزیه و تحلیل پایداری برای حداقل سطح لغزش کلی هر مورد انجام می‌گیرد و سپس N بار، ضریب ایمنی محاسبه می‌شود که N بیانگر تعداد نمونه‌ها است. در ادامه، با شناسایی تعداد تحلیل‌هایی که ضریب ایمنی کمتری از ۱ دارند (که نشان‌دهنده ناپایداری است) و تقسیم این تعداد بر کل نمونه‌ها، احتمال شکست تعیین می‌شود. برای تولید نمونه‌هایی از متغیرهای ورودی بر اساس توزیع احتمال آن‌ها، از روش نمونه‌گیری هایپرکیوب لاتین^۱ استفاده شد و ۱۰۰۰ نمونه به کار گرفته شد. نتایج نشان می‌دهند که ۱۰۰۰ نمونه برای محاسبه ضریب همگرایی ایمنی کافی است (شکل ۶).

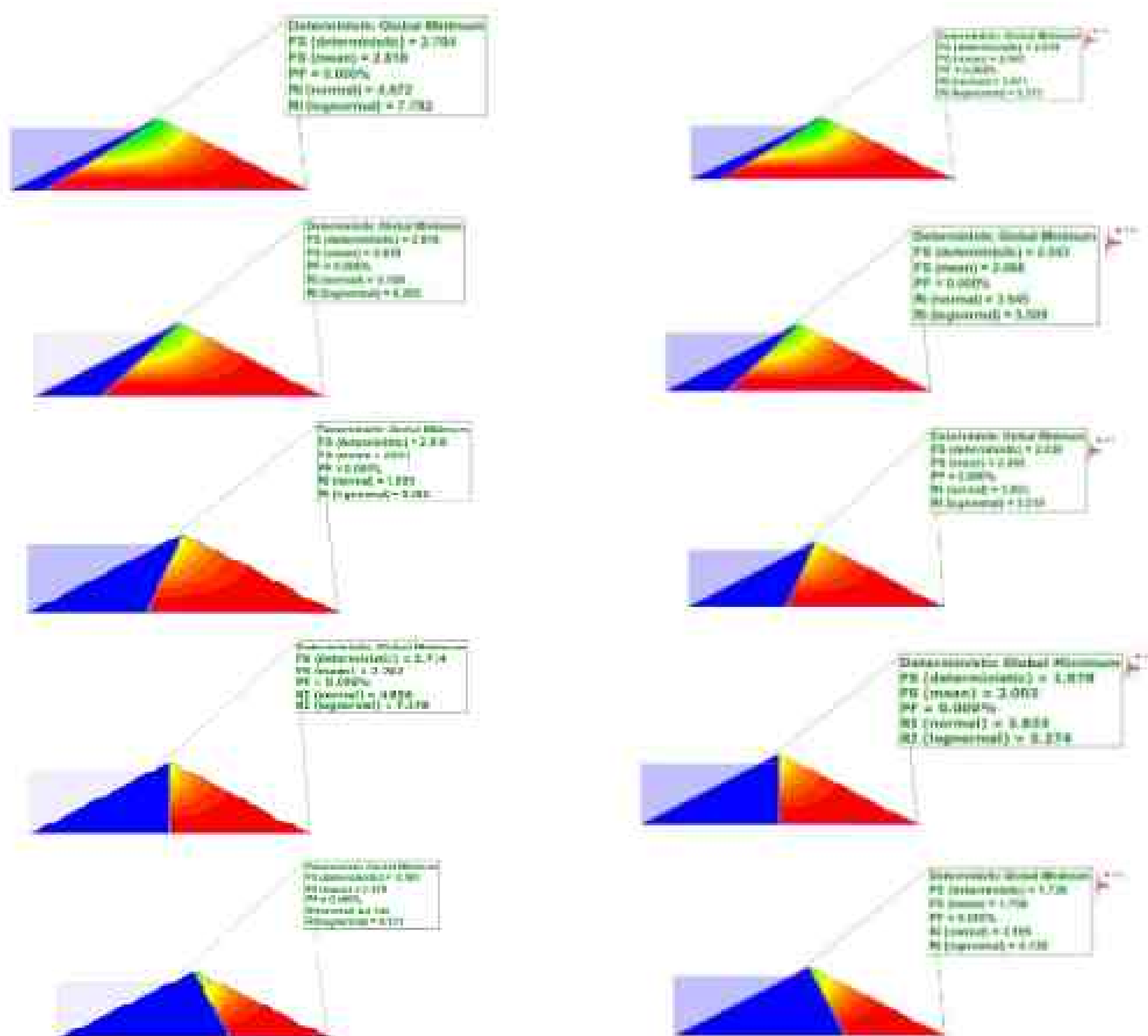


شکل ۶. همگرایی نتایج آنالیز احتمالاتی برای ۱۰۰۰ نمونه

¹ Latin Hypercube

در بسیاری از کشورها، از نقشه‌های پهنه‌بندی و مقادیر تعیین شده برای تعیین ضریب زلزله در طراحی سدها استفاده می‌شود. با این حال، استانداردهای طراحی سدهای فعلی در ایران چنین معیارهایی را ارائه نمی‌دهند که این موضوع منجر به انتخاب ضریب زلزله در محاسبات پایداری شیب عمدتاً بر اساس قضاوت مهندسی و مقررات کشورهای دیگر می‌شود. استاندارد کشور ژاپن حداقل ضریب زلزله اعمال شده در پی سد را برای مناطق پر خطر $0/18$ توصیه نموده است. سازمان مهندسان ارتش ایالات متحده^۱ (۱۹۸۷) استفاده از ضریب زلزله افقی $0/15$ را برای مناطق پرخطر، بر اساس نقشه‌های منطقه‌بندی، پیشنهاد می‌دهد. در سال ۱۹۷۹ پروفیسور سید^۲ اعلام نمود، هرگاه سدی با ضریب زلزله $0/15$ و ضریب اطمینان $1/15$ طراحی شود مادامی که حداکثر شتاب تاج سد از $0/75$ کمتر شود، سد برای زلزله‌ای به بزرگی ۸ ریشتر پایدار بوده به‌گونه‌ای که تغییر مکان‌های سد در حد قابل قبولی کوچک خواهد بود.

باتوجه به موارد فوق و نتایج مطالعات لرزه‌خیزی ساختگاه سد صیدون از ضریب زلزله افقی $0/15$ برای حالت بارگذاری در آنالیزهای شبه‌استاتیکی استفاده شده و به دلیل اثر کم و همچنین تامشخص ضریب زلزله قائم از اعمال آن صرف‌نظر شده است. هر چند بهتر است که با تلفیق مطالعات لرزه‌خیزی و زمین‌شناختی محل ساختگاه مقدار شتابی را که با احتمال مشخص در طول عمر سازه ممکن است رخ دهد به طریق احتمالی محاسبه شده و در آنالیز لرزه‌ای مورد استفاده قرار گیرد؛ اما از آنجا که هدف این مطالعه مقایسه حالات مختلف قرارگیری هسته آسفالتی است همان ضریب $0/15$ در نظر گرفته شده است. نتایج تحلیل احتمالی برای تمامی موارد و در حالت‌های استاتیک و شبه‌استاتیک در شکل (۷) و جدول (۶) ارائه شده است.



شکل ۷. نتایج آنالیز احتمالاتی پایداری شیب در حالت استاتیکی و شبه‌استاتیکی

¹ USBR

² Seed

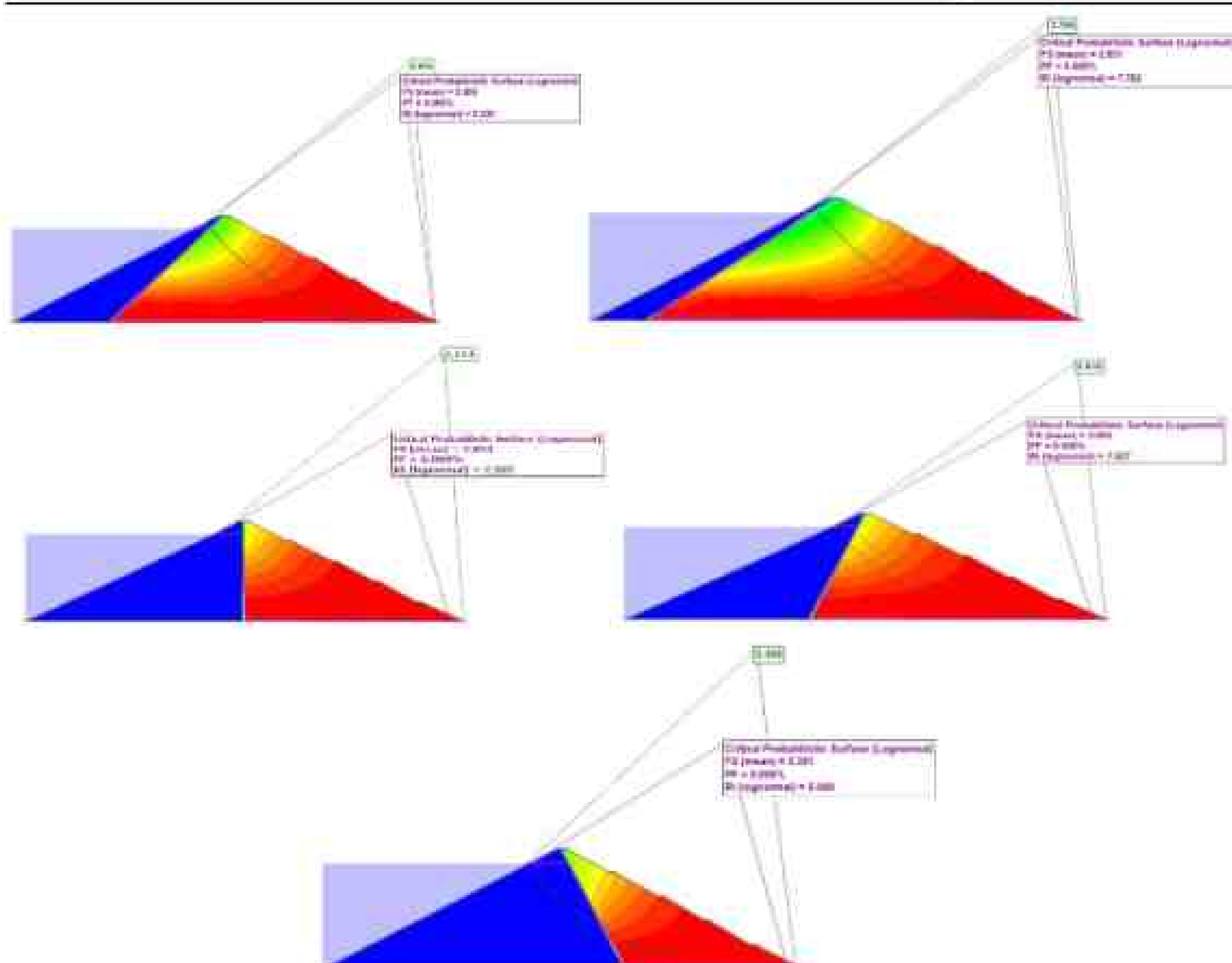
نتایج در شکل (۷) نشان می‌دهد که برای سه سناریو اول که در آن شیب هسته به سمت بالادست سد است، ضریب ایمنی ($F.S$) شیب پایین‌دست تقریباً در مقدار $۲/۸۲$ ثابت می‌ماند، در مقابل، برای سناریوهای چهارم و پنجم که در آن هسته در داخل قوس گسیختگی قرار می‌گیرد، کاهش ضریب ایمنی مشاهده می‌شود به طوری‌که در حالت ۵ به مقدار $۲/۳۶$ می‌رسد. این نشان می‌دهد که موقعیت هسته با حرکت به سمت پایین‌دست بر پایداری شیب تأثیر منفی می‌گذارد، همچنین مقدار قابلیت اطمینان شیب در تمامی حالات مقادیری بیشتر از ۳ را نشان می‌دهد که نشان از اطمینان بالایی شیب است. از آنجا که توزیع خاک بر ضریب ایمنی از توزیع لوگ نرمال پیروی می‌کند، لذا مقدار قابلیت اطمینان بر اساس توزیع لوگ نرمال در نتایج آورده شده است.

نتایج در شکل (۷) نشان می‌دهد که در حالت شبه استاتیکی، ضریب ایمنی در تمامی حالات، بیشتر از یک باقی می‌ماند که نشان‌دهنده پایداری سد است هر چند که روندی شبیه به حالت استاتیکی در آن مشاهده می‌شود. علاوه بر این، شاخص قابلیت اطمینان (RI) بیشتر از سه است که نشان‌دهنده سطح بالایی از اطمینان در توانایی سد برای مقاومت در برابر عدم قطعیت‌ها و خرابی‌های بالقوه است. این نتایج نشان می‌دهد که سد در شرایط شبه‌استاتیکی پایداری و قابلیت اطمینان بالایی از خود نشان می‌دهد.

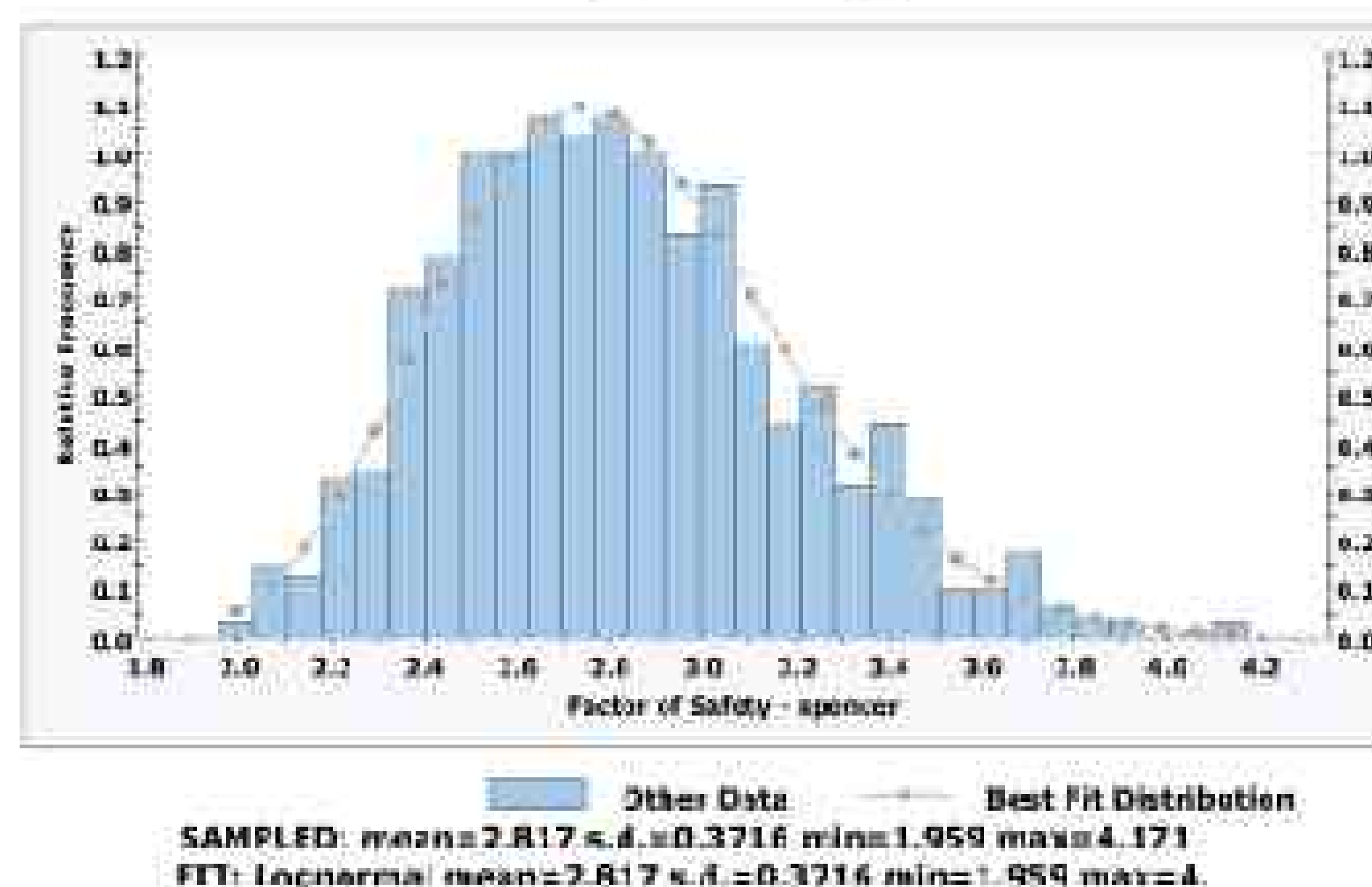
۴. آنالیز احتمالاتی حداقل اطمینان

روش احتمالاتی حداقل اطمینان شیب در Slide2 برای تجزیه و تحلیل پایداری شیب احتمالی شامل تکرار N بار جستجو برای حداقل سطح لغزش کلی است که N نشان‌دهنده تعداد نمونه‌های تولید شده برای متغیرهای تصادفی است. در هر تکرار، مجموعه جدیدی از نمونه‌های متغیر تصادفی اعمال می‌شود و جستجو برای سطح حداقل لغزش با حداقل قابلیت اطمینان انجام می‌شود. این فرایند تکراری، با در نظر گرفتن تغییرپذیری و عدم قطعیت مرتبط با پارامترهای ورودی، امکان کاوش کامل سطوح شکست احتمالی در شیب را فراهم می‌کند. روش احتمالاتی حداقل اطمینان چندین مزیت نسبت به روش احتمالاتی کلی در تحلیل پایداری شیب احتمالی دارد. یک مزیت مهم این است که در این روش شیبی که بیشترین احتمال شکست را دارد بر اساس متغیرهای تصادفی تعریف شده تعیین می‌شود که لزوماً با شیب حالت قبل یکسان نیست. با انجام تکرارهای متعدد و بررسی سطوح مختلف شکست بالقوه، روش احتمالاتی حداقل اطمینان ارزیابی جامع‌تر و قوی‌تری از پایداری شیب را با در نظر گرفتن طیف کاملی از عدم قطعیت‌ها در پارامترهای ورودی ارائه می‌کند. در این تحلیل، شیبی که دارای کمترین قابلیت اطمینان است به عنوان شیب بحرانی انتخاب می‌شود که لزوماً شیب با حداقل ضریب ایمنی نیست. این نشان می‌دهد که صرف انجام آنالیز پایداری شیب بالادست و پیدا کردن ضریب ایمنی آن نه تنها کافی نیست؛ بلکه حتی آنالیز احتمالاتی کلی نیز نمی‌تواند شیبی که بیشترین احتمال شکست (کمترین قابلیت اطمینان) را دارد، نشان دهد و حتماً باید آنالیز احتمالاتی حداقل اطمینان انجام شود. از آنجایی که بهترین توزیع حاکم بر $F.S$ لوگ نرمال است (شکل ۹)، از نتایج RI این توزیع در تحلیل استفاده شده است. نتایج روش احتمالاتی حداقل اطمینان در شکل (۸) ارائه شده است.

نتایج روش احتمالاتی حداقل اطمینان شیب نشان می‌دهد که سطح لغزشی با کمترین شاخص قابلیت اطمینان (RI) ضریب ایمنی بالاتری ($F.S$) را در مقایسه با آنالیز حداقل شیب کلی نشان می‌دهد. علاوه بر این، نتایج در شکل (۸) نشان می‌دهد که سطح لغزشی شناسایی شده با استفاده از این روش، عمیق‌تر از سطح تعیین شده توسط روش حداقل شیب کلی است. نکته مهم این است که نتایج این آنالیز نشان می‌دهد که قابلیت اطمینان این سطح لغزش همچنان از مقدار عدد ۳ بیشتر است و پایداری آن را تایید می‌کند.



شکل ۸. نتایج آنالیز احتمالاتی حداقل اطمینان



شکل ۹. توزیع حاکم بر ضریب ایمنی در آنالیز احتمالاتی

۵. آنالیز تغییرات مکانی

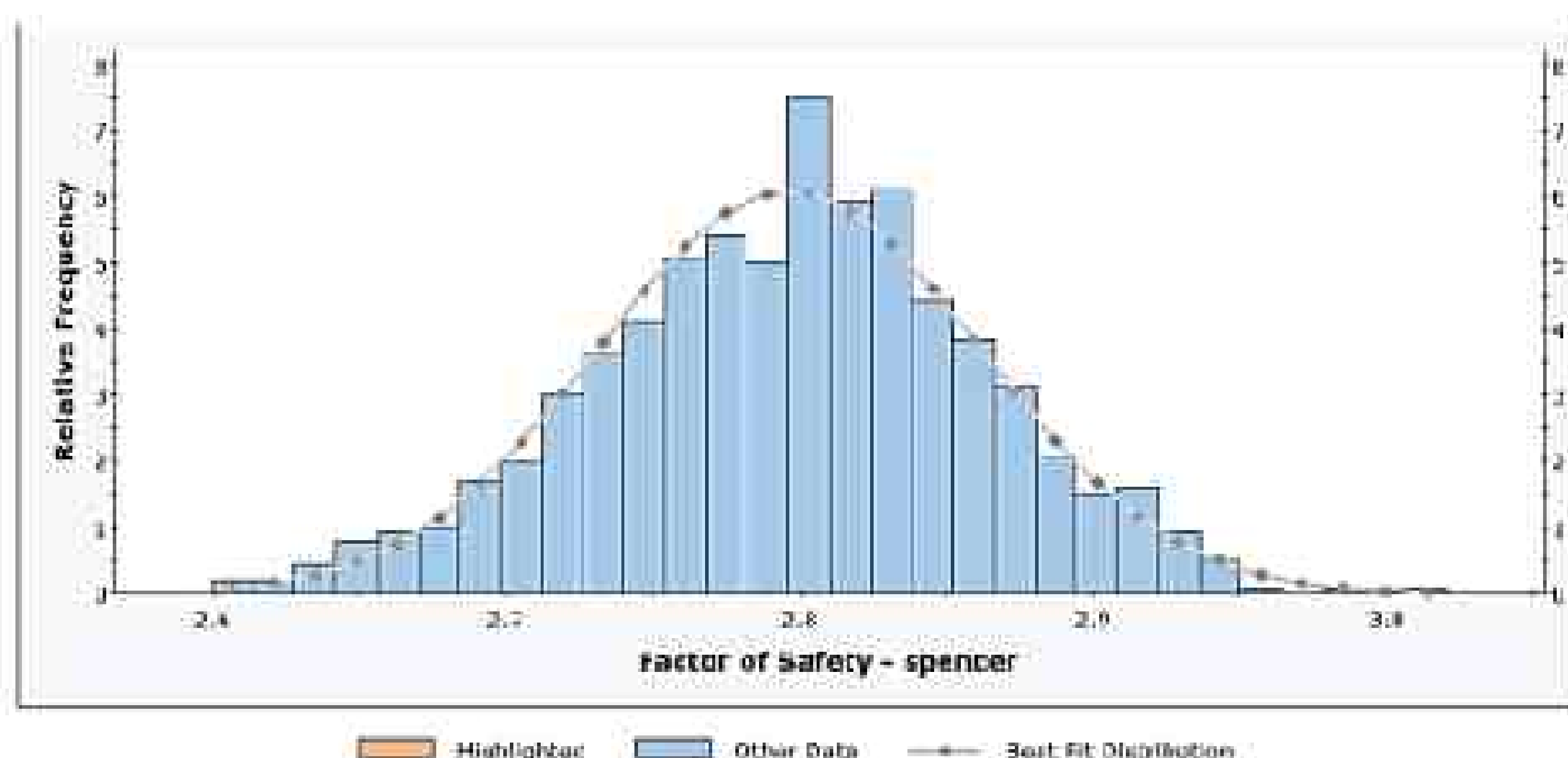
تجزیه و تحلیل تغییرات مکانی نقش اساسی در لحاظ کردن تنوع ذاتی خواص خاک در یک توده خاک ایفا می کند که اغلب در تحلیل های پایداری شیب احتمالاتی سستی نادیده گرفته می شود. با در نظر گرفتن تغییرات مکانی خواص خاک مانند استحکام و وزن واحد در مکان های مختلف درون توده خاک، مهندسان می توانند نمایش واقعی تری از شرایط زمین واقعی به دست آورند. در تجزیه و تحلیل تنوع مکانی، توزیع های آماری و پارامترهای طول همبستگی برای تولید میدان های تصادفی مقادیر برای هر ویژگی

خاک نمونه‌برداری شده استفاده می‌شود. این فرایند توزیع فضایی مقادیر را در سرتاسر مصالح ایجاد می‌کند که منعکس‌کننده تنوع طبیعی موجود در خاک است. در خاک، طول همبستگی در جهت X معمولاً بسیار بیشتر است - اغلب حدود ۵ تا ۱۰ برابر - نسبت به جهت Y . در این تحقیق طول همبستگی برابر با ۵ متر در جهت Y و ۲۵ متر در جهت X در نظر گرفته شده است.

نتایج تجزیه و تحلیل در شکل (۱۱) و جدول (۶) آورده شده است. همان‌طور که در شکل (۱۱) نشان داده شده است، توزیع حاکم بر ضریب ایمنی ($F.S$) برای همه موارد نرمال است، برخلاف شرایط قبلی که از توزیع لگ نرمال پیروی می‌کرد. علاوه بر این، نتایج در جدول (۶) نشان می‌دهد که هنگام در نظر گرفتن تغییرات فضایی، مقدار $F.S$ کاهش یافته است. با این حال، این کاهش با افزایش قابل توجهی در شاخص قابلیت اطمینان (RI) همراه است که نشان می‌دهد اگرچه ضریب ایمنی کمتر است، قابلیت اطمینان و استحکام کلی سازه هنگام محاسبه تنوع فضایی بهبود یافته است.

جدول ۶. نتایج انواع آنالیز شیب برای شرایط مختلف قرارگیری هسته آسفالتی در بدنه سد

نوع آنالیز	آنالیز حداقل احتمال (استاتیکی)		آنالیز حداقل احتمال (شیبه استاتیکی)		آنالیز حداقل اطمینان		آنالیز تغییرات مکانی	
Cases	$F.S$	RI	$F.S$	RI	$F.S$	RI	$F.S$	RI ($l_x=25; l_y=5$)
1	2.84	7.79	2.02	5.37	2.84	7.76	2.60	25.24
2	2.82	8.29	2.04	5.51	2.85	8.22	2.60	23.72
3	2.82	8.05	2.04	5.51	3	7.93	2.62	24.03
4	2.71	7.67	1.98	5.27	2.85	7.51	2.54	24.65
5	2.36	6.15	1.74	4.14	2.39	6.05	2.20	19.40



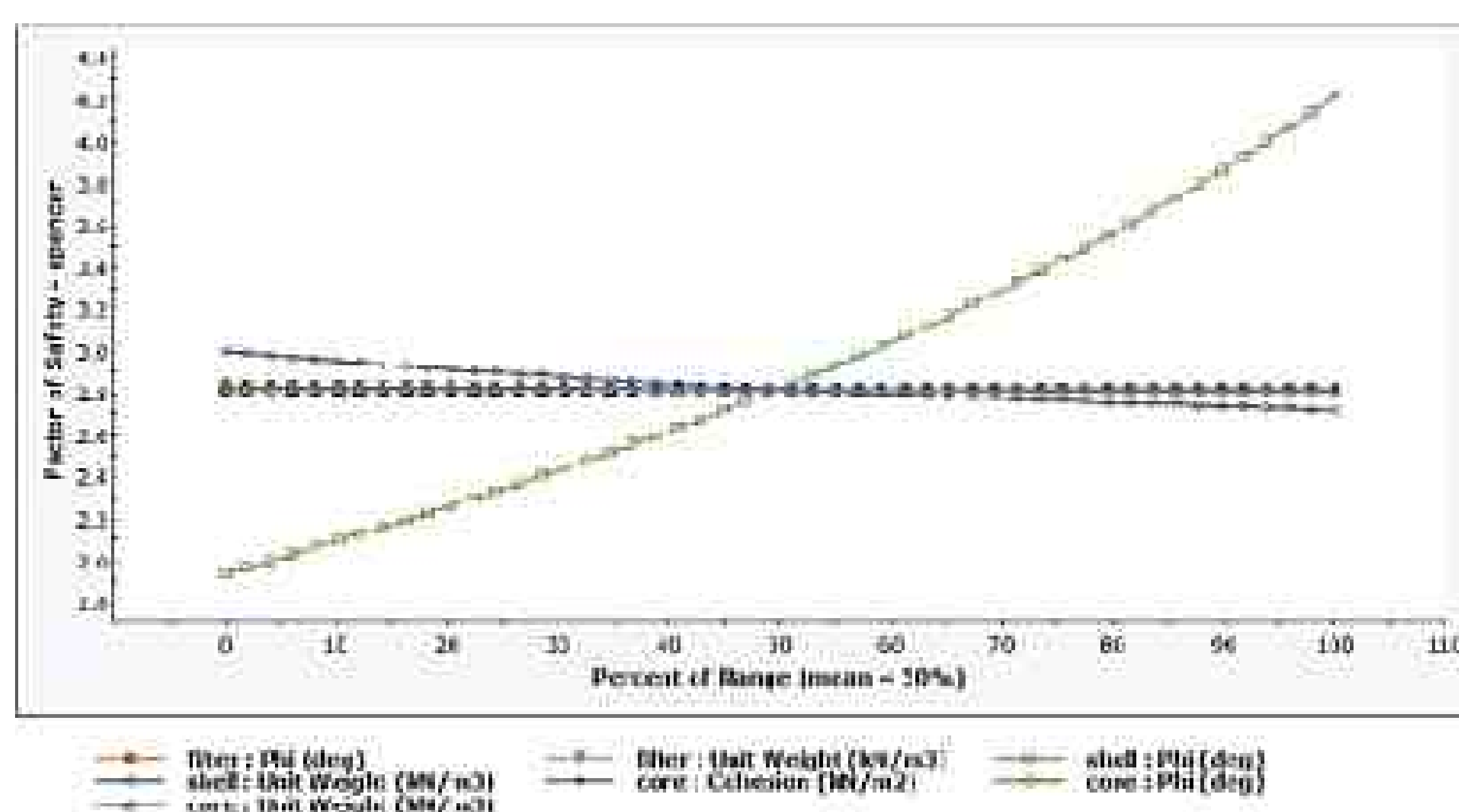
SAMPLED: mean=2.796 s.d.=0.06548 min=2.6 max=3.02 (FF=0.000%, RI=27.43323, best fit=Normal distribution)
FIT: Normal mean=2.796 s.d.=0.06548 min=2.6 max=3.02

شکل ۱۱. توزیع حاکم بر ضریب ایمنی در آنالیز تغییرات مکانی

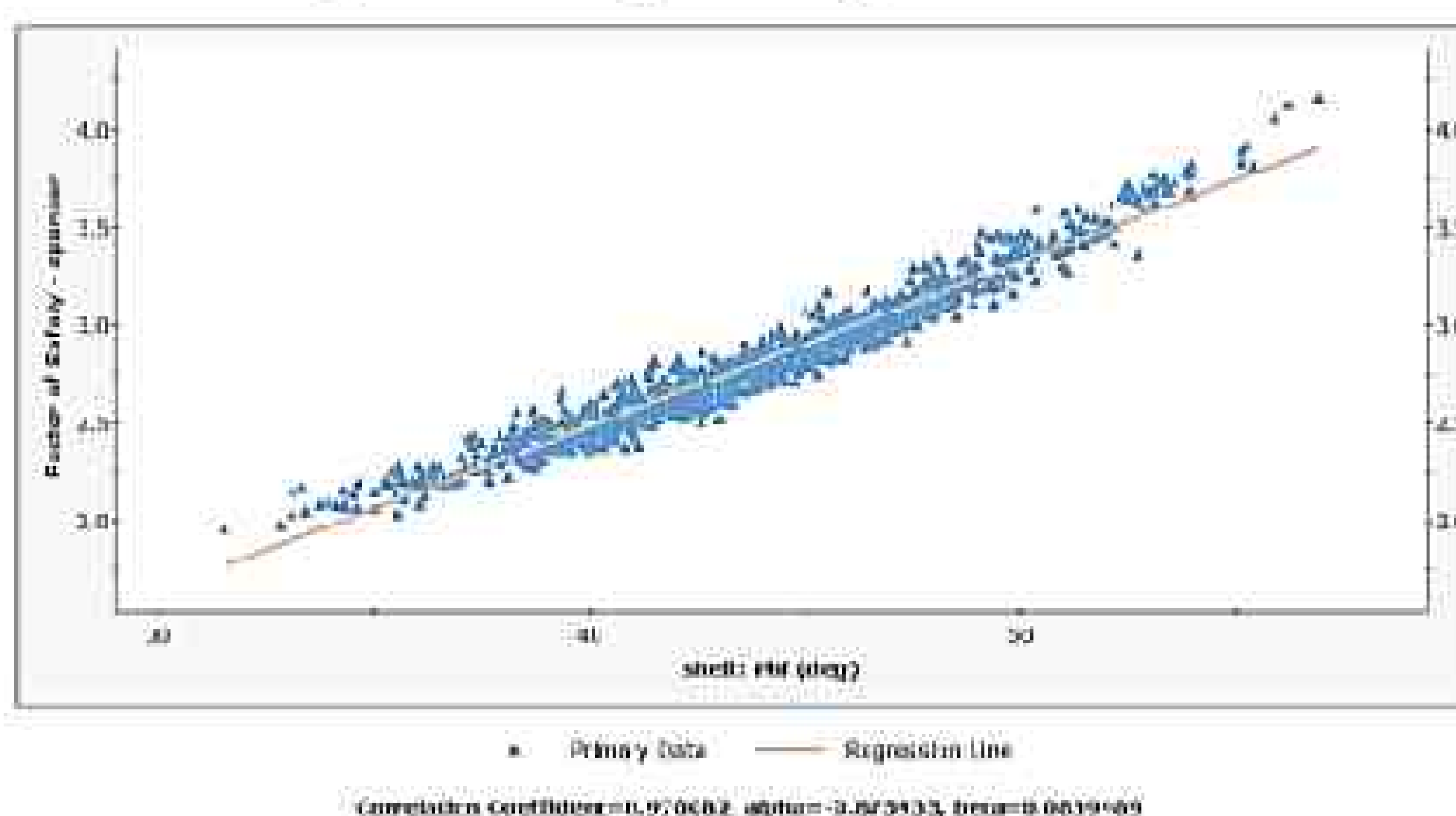
۶. تحلیل حساسیت

انجام یک تحلیل حساسیت بر اساس توزیع آماری پارامترهای مصالح سد، درک جامعی از چگونگی تأثیر تغییرات در عوامل مختلف بر نتایج فاکتور ایمنی را فراهم می‌کند. یافته‌های حاصل از تجزیه و تحلیل حساسیت در شکل‌های (۱۲) و (۱۳) نشان داده شده است. در شکل (۱۲)، مشهود است که زاویه اصطکاک مواد پوسته بیشترین تأثیر را بر ضریب ایمنی شیب سد دارد. این قابل درک

است، زیرا سطح لغزش در درجه اول مصالح پوسته را قطع می‌کند و بر نقش مهم پارامترهای پوسته در تجزیه و تحلیل پایداری شیب تأکید می‌کند. علاوه بر این، نتایج نشان می‌دهد که با جابجایی هسته آسفالتی از بالادست به سمت پایین‌دست پوسته، تأثیر پارامترهای مصالح بر ضریب ایمنی ($F.S$) تغییری نمی‌کند. شکل (۱۳) رابطه بین پارامترهای پوسته و ضریب ایمنی شیب را بیشتر بررسی می‌کند و یک همبستگی خطی بین زاویه اصطکاک مواد پوسته و ضریب ایمنی را نشان می‌دهد. در مقابل، هیچ ارتباط معنی‌داری بین ضریب ایمنی با سایر پارامترهای مقاومتی مشاهده نمی‌شود که نقش غالب زاویه اصطکاک مصالح پوسته را در تأثیرگذاری بر پایداری شیب کلی نشان می‌دهد.



شکل ۱۲. تأثیر تغییرات پارامترهای مصالح سد بر ضریب ایمنی سد



شکل ۱۳. رابطه همبستگی بین زاویه اصطکاک مصالح پوسته و ضریب ایمنی سد

بحث

نتایج این پژوهش نشان می‌دهد که موقعیت هسته آسفالتی در سدهای سنگ‌ریزه‌ای تأثیر قابل‌توجهی بر پایداری شیب پایین‌دست و میزان نشست آب دارد. جابجایی هسته به سمت پایین‌دست باعث کاهش ضریب ایمنی و افزایش خطر ناپایداری می‌شود. درحالی‌که قرارگیری آن در بالادست، پایداری بیشتری را تضمین می‌کند. همچنین، زاویه اصطکاک مصالح پوسته سد به‌عنوان مؤثرترین پارامتر در پایداری شیب شناسایی شد. این یافته‌ها با مطالعات پیشین مانند تحقیقات هوگ^۱ (۱۹۹۳) و فنگ و

^۱ Hoeg

همکاران^۱ (۲۰۲۰) که بر اهمیت طراحی هسته و خواص مصالح تأکید داشتند همسو است. اما این پژوهش با بررسی تحلیل احتمالاتی و تغییرات مکانی، گامی فراتر نهاده و بیش از پیش دقیق‌تری برای طراحی ایمن‌تر سدها ارائه می‌دهد. باید توجه داشته باشیم که معمولاً در طراحی سدهای خاکی با هسته آسفالتی، برخی حالت‌ها به دلیل مسائل فنی، ساخت‌وساز، پایداری سد و قابلیت اجرای عملی، بیشتر مورد استفاده قرار می‌گیرند، در حالی که برخی حالت‌ها کمتر کاربردی یا حتی غیرعملی هستند. به طور خاص، حالت‌هایی که هسته آسفالتی در مرکز سد یا به طور قائم قرار دارد (مثل حالت ۴) معمول‌تر و پایدارتر هستند و به خوبی از نشتی آب جلوگیری می‌کنند. حالت‌هایی که هسته آسفالتی با شیب تندی قرار گرفته یا به صورت نامتقارن هستند (مثل حالت ۱ یا ۲ و ۵) ممکن است مشکلات اجرایی، ضعف در پایداری یا کنترل نشتی را به همراه داشته باشند و کمتر ترجیح داده می‌شود. در نتیجه، طراحی نهایی بستگی به شرایط هیدرولیکی، ژئوتکنیکی، اقتصادی و اجرایی دارد.

نتیجه‌گیری

در این تحقیق، تأثیر موقعیت هسته آسفالتی در داخل یک سد سنگ‌ریزه‌ای بر نتایج تحلیل احتمالاتی مربوط به پایداری شیب پایین‌دست در شرایط حالت جریان پایدار مورد بررسی قرار گرفت. سد خاکی صیدون در ایران به عنوان مطالعه موردی مورد استفاده قرار گرفت و پنج موقعیت مختلف هسته سد مورد تجزیه و تحلیل قرار گرفت. یافته‌های کلیدی تحقیق به شرح زیر خلاصه می‌شود:

۱. نتایج آنالیز نشتی تجزیه و تحلیل نشت نشان می‌دهد که حرکت هسته آسفالتی از سمت بالادست به سمت پایین‌دست سد سنگ‌ریزه‌ای منجر به کاهش دبی جریان از بدنه سد می‌شود. با این حال این کاهش در حالات ۱ و ۲ به ۳ بیشتر مشهود است.
۲. آنالیز حداقل شیب احتمالاتی کلی: این تحلیل نشان می‌دهد که فاکتور ایمنی ($F.S$) برای شیب پایین‌دست زمانی که هسته آسفالتی در بالادست سد قرار می‌گیرد نسبتاً ثابت می‌ماند. با این حال، پایین‌ترین مقدار $F.S$ زمانی رخ می‌دهد که هسته آسفالتی به سمت پایین‌دست منتقل شود. علاوه بر این، تجزیه و تحلیل احتمالاتی نشان می‌دهد که سد یک شاخص قابلیت اطمینان (RI) بیشتر از ۳ را در تمام شرایط، از جمله تجزیه و تحلیل استاتیک و شبه استاتیک حفظ می‌کند.
۳. تحلیل احتمالاتی حداقل اطمینان: در تحلیل احتمالاتی حداقل اطمینان، سطح لغزشی که بیشترین احتمال خرابی یا کمترین قابلیت اطمینان را دارد، شناسایی می‌شود. این سطح لغزش لزوماً با سطح لغزش مشخص شده در روش حداقل شیب کلی که بر اساس پارامترهای مقاومتی مصالح سد محاسبه می‌شود، یکسان نخواهد بود. مقایسه نتایج این دو روش نشان داد که مقدار ضریب ایمنی روش تحلیل احتمالاتی حداقل اطمینان بیشتر از روش حداقل شیب کلی است در حالی که عمق سطح لغزش بحرانی افزایش یافته است. همچنین قابلیت اطمینان این روش مقدار کمتری را برای سطح لغزش نشان می‌دهد.
۴. در نظر گرفتن تغییرپذیری مکانی: هنگام محاسبه تغییرپذیری مکانی خواص خاک، ضریب ایمنی برای شیب پایین‌دست کاهش می‌یابد در حالی که شاخص قابلیت اطمینان افزایش می‌یابد که نشان‌دهنده درک جامع‌تری از پویایی پایداری است.
۵. نتایج تجزیه و تحلیل حساسیت: تجزیه و تحلیل حساسیت نشان می‌دهد که زاویه اصطکاک مصالح پوسته بیشترین تأثیر را بر ضریب ایمنی شیب در تمام حالات دارد. علاوه بر این، تجزیه و تحلیل حساسیت، یک رابطه خطی بین زاویه اصطکاک مصالح پوسته و ضریب ایمنی شیب را شناسایی می‌کند و نقش حیاتی پارامترهای پوسته را در ارزیابی پایداری سد تقویت می‌کند.

ملاحظات اخلاقی

پیروی از اصول اخلاق پژوهش

نویسندگان اصول اخلاقی را در انجام و انتشار این پژوهش علمی رعایت نموده‌اند و این موضوع مورد تأیید همه آنهاست.

تعارض منافع

بنا بر اظهار نویسندگان این مقاله تعارض منافع ندارد.

سپاسگزاری

از سازمان آب و برق استان خوزستان بخاطر همکاری صمیمانه آنها و تهیه گزارش‌های سد صیدون بسیار سپاسگزاریم.

References

- Akhtarpour, A., & Khodaii, A. (2014). A study of the seismic response of asphaltic concrete used as a core in rockfill dams. *Journal of Seismology and Earthquake Engineering*, 16, 169–184. https://www.jsee.ir/article_240693.html
- Akhtarpour, A., & Khodaii, A. (2013). Experimental study of asphaltic concrete dynamic properties as an impervious core in embankment dams. *Construction and Building Materials*, 41, 319–334. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2012.11.104>
- Baziar, M. H., Salemi, S., & Heydari, T. (2006). Analysis of earthquake response of an asphalt concrete core embankment dam. *International Journal of Civil Engineering*, 4(3), 192–211. <http://ijce.iut.ac.ir/article-1-342-en.html>
- Biernatowski, K. (1985). Statistical characteristic of subsoil. *The 11th International Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering*, San Francisco, California, USA. <https://pascal-francis.inist.fr/vibad/index.php?action=getRecordDetail&idt=9287230>
- Carter, J. P., & Kulhawy, F. H. (1992). Analysis of laterally loaded shafts in rock. *Journal of Geotechnical Engineering*, 118(6), 839–855. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)0733-9410\(1992\)118:6\(839\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)0733-9410(1992)118:6(839))
- Cornell, C. A., & Vanmarcke, E. H. (1969). The major influences on seismic risk. *The 4th World Conference on Earthquake Engineering*, Santiago, Chile. <https://www.sciepub.com/reference/124848>
- Duncan, J. M. (2000). Factors of safety and reliability in geotechnical engineering. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 126(4), 307–316. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)1090-0241\(2000\)126:4\(307\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)1090-0241(2000)126:4(307))
- Durmaz, S., & Ülgen, D. (2021). Prediction of earthquake-induced permanent deformations for concrete-faced rockfill dams. *Natural Hazards*, 105, 587–610. <https://doi.org/10.1007/s11069-020-04328-7>
- Feizi-Khankandi, S., Ghalandarzadeh, A., Mirghasemi, A. A., & Hoeg, K. (2009). Seismic analysis of the Garmrood embankment dam with asphaltic concrete core. *Soils and Foundations*, 49(2), 153–166. <https://doi.org/10.3208/sandf.49.153>
- Feizi-Khankandi, S., Mirghasemi, A. A., Ghalandarzadeh, A., & Hoeg, K. (2008). Cyclic triaxial tests on asphalt concrete as a water barrier for embankment dams. *Soils and Foundations*, 48(3), 319–332. <https://doi.org/10.3208/sandf.48.319>
- Feng, S., Wang, W., Hu, W., Deng, Y., Yang, J., Wu, S., Zhang, C., & Höeg, K. (2020). Design and performance of the Quxue asphalt-core rockfill dam. *Soils and Foundations*, 60(5), 1036–1049. <https://doi.org/10.1016/j.sandf.2020.06.006>
- Fredlund, M. D. (2000). The role of unsaturated soil property functions in the practice of unsaturated soil mechanics. Doctoral dissertation, *University of Saskatchewan*, Saskatoon, Saskatchewan, Canada. <https://core.ac.uk/download/pdf/226137518.pdf>
- Gatmiri, B., & Mokarram, N. (2003). Dynamic analysis of embankment dam with concrete asphalt core. *The 4th International Conference on Seismology and Earthquake Engineering*, Tehran, Iran. https://www.researchgate.net/publication/278241578_Dynamic_analysis_of_embankment_dam_with_Concrete-Asphalt_Core
- Gurdil, A. (1999). Seismic behaviour of an asphaltic concrete core dam. *1st Symposium on Dam Foundation*, Antalya, Turkey. <https://core.ac.uk/download/229085448.pdf>
- Höeg, K. (1993). Asphaltic concrete cores for embankment dams. *Norwegian Geotechnical Institute Publications*, Oslo, Norway. <https://repository.tudelft.nl/record/uuid:4193e0b8-f433-4f87-bf16-94d9ff17e793>

- Höeg, K., & Murarka, R. P. (1974). Probabilistic analysis and design of a retaining wall. *Journal of the Geotechnical Engineering Division*, 100(3), 349–366. <http://worldcat.org/oclc/3519342>
- Kotzias, P. C., & Stamatopoulos, A. C. (1975). Statistical quality control at Kastraki earth dam. *Journal of the Geotechnical Engineering Division*, 101(9), 837–853. <https://ascelibrary.org/doi/10.1061/AJGEB6.0000192>
- Lacasse, S., & Nadim, F. (1996, May). Model uncertainty in pile axial capacity calculations. *Offshore Technology Conference*, Houston, TX, United States. <https://doi.org/10.4043/7996-MS>
- Liu, J., Liu, F., Kong, X., & Yu, L. (2016). Large-scale shaking table model tests on seismically induced failure of concrete-faced rockfill dams. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 82, 11–23. <https://doi.org/10.1016/j.soildyn.2015.11.014>
- Lumb, L. I., Aldridge, K. D., & Henderson, G. A. (1993). A generalized ‘core resonance’ phenomenon: Inferences from a Poincaré core model. *Dynamics of Earth's Deep Interior and Earth Rotation*, 72, 51–68. <https://agupubs.onlinelibrary.wiley.com/doi/book/10.1029/GM072#page=60>
- Mahabadi, S. G., & Roosta, R. M. (2002). Seismic analysis and design of asphaltic concrete core embankment dams. *International Journal on Hydropower and Dams*, 9 (4), 75–78. <https://researchoutput.csu.edu.au/en/publications/seismic-analysis-and-design-of-asphaltic-concrete-core-embankment>
- Meintjes, H., & Jones, G. (1999). Dynamic analyses of the new Ceres dam. *In Geotechnics for Developing Africa*, CRC Press, Durban, South Africa. <https://www.taylorfrancis.com/chapters/edit/10.1201/9781003211174-67/dynamic-analyses-new-ceres-dam-meintjes-jones>
- Middleton, B. J. (1982). 14th International Congress of ICOLD. *Civil Engineering Siviele Ingenieurswese*, 1982 (10), 548. https://journals.co.za/doi/pdf/10.10520/AJA10212019_14676
- Nejad, B. G., Soden, P., Taiebat, H., & Murphy, S. (2010). Seismic deformation analysis of a rockfill dam with a bituminous concrete core. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 10 (1), 012106. <https://doi.org/10.1088/1757-899X/10/1/012106>
- Phoon, K. K., & Kulhawy, F. H. (2008). Serviceability limit state reliability-based design. *In Reliability-based design in geotechnical engineering*, CRC Press, Durban, South Africa. <https://www.taylorfrancis.com/chapters/edit/10.1201/9781482265811-14/serviceability-limit-state-reliability-based-design-kok-kwang-phoon-fred-kulhawy>
- Qiu, T., Wang, W., Höeg, K., Feng, S., & Zhao, R. (2021). 3D analysis of the 174-m high Quxue asphalt-core rockfill dam in a narrow canyon. *Soils and Foundations*, 61 (6), 1645–1659. <https://doi.org/10.1016/j.sandf.2021.08.008>
- Taylan, D., & Aydın, T. (2018). Analysis of dynamic behavior of Darideresi-II Dam by ANSYS. *Natural Hazards*, 90, 1223–1235. <https://doi.org/10.1007/s11069-017-3091-0>
- Valstad, T., Selnes, P., Nadim, F., & Aspen, B. (1991). Seismic response of a rockfill dam with an asphaltic concrete core. *International Water Power and Dam Construction*, 43 (8), 22–27. <https://pascal-francis.inist.fr/vibad/index.php?action=getRecordDetail&idt=4818350>
- Varde, P.V., & Pecht, M.G. (2018). *Risk-based engineering: an integrated approach to complex systems—special reference to nuclear plants*. Springer Publications, Singapore. https://link.springer.com/chapter/10.1007/978-981-13-0090-5_1
- Wu, Y., Jiang, X., Fu, H., Xu, K., & Wu, Z. (2018). Three-dimensional static and dynamic analyses of an asphalt-concrete core dam. *GeoShanghai International Conference*, Shanghai, China. https://link.springer.com/chapter/10.1007/978-981-13-0125-4_65



Performance assessment and operational optimization of Bilavar plain irrigation network

Ali Arman¹ , and Elham Darvishi² 

1. Corresponding author, Campus of Agriculture and Natural Resources, Department of water engineering, Razi university, Kermanshah, Iran, Email: a.arman@razi.ac.ir

2. Campus of Agriculture and Natural Resources, Department of water engineering, Razi university, Kermanshah, Iran. Email: e.darvishi@razi.ac.ir

Article Info.

ABSTRACT

Article type:

Research Article

Article history:

Received 26 November 2025

Received in revised form 01

April 2026

Accepted 22 May 2026

Available online 22 June 2026

Keywords:

Irrigation and drainage

network,

operation,

transmission efficiency,

pumping station,

Nearpeak

module,

Bilavar plain,

GIS.

Objective This research aimed to comprehensively assess the Bilavar Plain Irrigation and Drainage Network's operational performance. The study further sought to identify targeted management and technical strategies to enhance water productivity, minimize losses, and ensure stable agricultural output.

Method: Data collection relied on a multi-faceted strategy combining field surveys, direct facility inspections, and discharge measurements using a Seba current meter. These primary data were supplemented by rigorous hydraulic analysis and GIS-based spatial mapping to characterize network performance. The study further examined the effects of pressure outages on water loss, assessed the operational efficiency of Nirpeak modules and pumping stations, and used structured questionnaires to analyze the socio-economic factors shaping farmer participation.

Results: The assessment yielded several key findings. While the Nirpeak modules performed within acceptable tolerances, with measurement errors below 5%, the water level regulating structures were found to be only in average condition. Transmission efficiency along the main canal ranged from 90.8% to 91.6%—notably below design specifications—owing primarily to leakage and unauthorized water diversions. Pumping station performance was substantially undermined by poor maintenance, equipment misalignment, and inappropriate pump selection, with daily power interruptions further compounding water losses. On the socio-economic front, the study identified low profitability of traditional crops, market volatility, and limited technical knowledge as the principal barriers to active farmer participation.

Conclusions: The study yields three main recommendations: converting parts of the canal to a pressurized pipe system to reduce water losses and optimize pumping, improving network operation, maintenance, and GIS-based monitoring to enhance performance, and promoting high-value autumn crops to strengthen farmers' incomes and the long-term sustainability of the irrigation network.

Cite this article: Arman, A., & Darvishi, E. (2026). Performance assessment and operational optimization of Bilavar plain irrigation network. *Advanced Technologies in Water Efficiency*, 5 (2), 102-119. <https://doi.org/10.22126/atwe.2026.13971.1217>



© The Author(s)

Publisher: Razi University.

<https://doi.org/10.22126/atwe.2026.13971.1217>

Introduction

The global water crisis—particularly acute in arid and semi-arid regions such as Iran, where agriculture consumes over 90% of renewable water resources—has rendered the efficient management and enhanced performance of irrigation and drainage networks an urgent imperative. Yet, in many such systems, actual performance falls considerably short of design expectations due to a confluence of technical, managerial, and social factors, including structural deterioration, inefficient pumping stations, unauthorized diversions, and inadequate maintenance regimes.

The Bilavar Plain Irrigation network, a key agricultural infrastructure in western Iran, exemplifies these challenges, grappling with high conveyance losses, suboptimal pumping station performance, and limited stakeholder engagement. In response, this research undertakes a comprehensive operational assessment of the network, aiming to pinpoint critical technical and managerial constraints. Building on this diagnosis, the study proposes targeted interventions to enhance water transmission efficiency, upgrade pumping station functionality, and refine operation management practices—thereby supporting the long-term sustainability of agricultural production in the region.

Method

The Bilavar Plain irrigation and drainage network, located in Kermanshah province, is a pivotal agricultural water transmission and distribution system in western Iran. Designed to supply water to regional farmlands and enhance crop productivity, the network comprises main and branch canals, water regulation and measurement structures, pumping stations, and both gravity-fed and pressurized conveyance systems. Given the region's semi-arid climate—where most precipitation occurs during cooler months—and the agricultural sector's heavy reliance on irrigation, optimizing network performance is of critical importance.

To comprehensively evaluate the network's operational status, this research adopted a mixed-methods approach. Data collection integrated technical and operational assessments with extensive field inspections of canals, hydraulic structures, and pumping stations, alongside precise flow measurements using a Seba current meter. The study further assessed the performance of Nearpeak modules and transmission canals, evaluated pumping station efficiency, and analyzed socio-economic factors influencing farmer participation through structured questionnaires. All spatial data were compiled into a GIS-based database to support management and decision-making. This multifaceted framework enables accurate identification of system bottlenecks and informed formulation of targeted improvement strategies.

Results

Assessment of the pumping stations revealed significant discrepancies between pump selection and actual field requirements for head and discharge. These mismatches have resulted in reduced operational efficiency, accelerated equipment wear, and hydraulic imbalances across the network. Additional deficiencies—including leaking connections, unlevel suction lines, faulty valves, and improper installation—have facilitated air ingress and precipitated premature mechanical failures. Compounding these technical issues, operators possess limited technical expertise, and the reliance on unqualified maintenance personnel has further exacerbated equipment damage and inflated operational costs.

Evaluation of the BLMC canal indicated that water conveyance efficiency fell short of design standards, a shortfall attributable primarily to leakage, unauthorized diversions, canal degradation, and inadequate supervisory oversight. Recurring daily power outages have compounded these losses by halting pumping operations, which in turn increases seepage and evaporation losses. To address these challenges, this study proposes two complementary strategies: utilizing gravity-irrigated lands during power interruptions to maintain supply continuity, and transitioning from open canals to pressurized pipelines to substantially reduce conveyance losses and enhance overall network performance.

Conclusions

The findings underscore that improving the Bilavar irrigation network extends well beyond physical rehabilitation; it necessitates a holistic strategy that integrates technical upgrades, operational reforms, sustained maintenance, and robust monitoring and control systems. Addressing pumping station inefficiencies, minimizing conveyance losses, curbing unauthorized water use, and optimizing cropping patterns can collectively yield substantial performance gains. Equally critical, however, are the socio-economic dimensions—enhancing farmer participation through targeted incentives and capacity-building is indispensable for achieving lasting operational sustainability. The study concludes that the network's long-term viability hinges on a triad of interconnected interventions: technical, managerial, and social. Only through such an integrated approach can the Bilavar Plain network realize its full potential as a resilient and productive agricultural water system.

Author Contributions

All authors contributed equally to the conceptualization of the article and writing of the original and subsequent drafts.

Data Availability Statement

Data available on request from the authors.

Acknowledgements

The authors would like to thank all participants in the present study.

Ethical Considerations

The authors avoided data fabrication, falsification, plagiarism, and misconduct.

Funding

This research did not receive any specific grant from funding agencies in the public, commercial, or not-for-profit sectors.

Conflict of Interest

The authors declare no conflict of interest.



ارزیابی عملکرد و بهینه‌سازی مدیریت بهره‌برداری شبکه آبیاری و زهکشی دشت یلوار

علی آرمان^۱ و الهام درویشی^۲

۱. نویسنده مسئول، پردیس کشاورزی و منابع طبیعی، گروه مهندسی آب، دانشگاه رازی، کرمانشاه، ایران. رایانامه: a.sarm3n@razi.ac.ir

۲. پردیس کشاورزی و منابع طبیعی، گروه مهندسی آب، دانشگاه رازی، کرمانشاه، ایران. رایانامه: a.darvishi@razi.ac.ir

درباره مقاله	چکیده
نوع مقاله: مقاله پژوهشی، مقاله مروری. تاریخ دریافت: ۱۴۰۴/۰۹/۰۵ تاریخ بازنگری: ۱۴۰۵/۰۱/۱۲ تاریخ پذیرش: ۱۴۰۵/۰۲/۰۱ تاریخ انتشار: ۱۴۰۵/۰۴/۰۱ کلیدواژه‌ها: شبکه آبیاری و زهکشی، بهره‌برداری، راندمان انتقال، ایستگاه پمپاژ، مدل تیرپکه، دشت یلوار، GIS	هدف: ارزیابی جامع وضعیت بهره‌برداری شبکه آبیاری و زهکشی دشت یلوار و ارائه راهکارهای مدیریتی و فنی جهت بهبود عملکرد آن. روش پژوهش: این تحقیق شامل ارزیابی عملکرد مدل‌های تیرپکه بررسی راندمان انتقال در کانال BLMC، تحلیل وضعیت ایستگاه‌های پمپاژ ناحیه عمرانی B3 و B4، بررسی هدررفت آب در زمان قطع برق، امکان‌سنجی جایگزینی کانال روباز با سامانه انتقال تحت فشار و تحلیل عوامل اجتماعی-اقتصادی عدم انعقاد قرارداد کشاورزان بوده است. داده‌ها از طریق برداشت‌های میدانی، اندازه‌گیری دبی با مولیبه Seba، تحلیل هیدرولیکی، بازدید از تاسیسات، پرسش‌نامه‌های بهره‌برداران و پردازش اطلاعات در محیط GIS جمع‌آوری گردید. یافته‌ها: خطای اندازه‌گیری مدل‌های تیرپکه کمتر از ۵ درصد بوده و عملکرد قابل‌قبولی داشتند، اما سامانه‌های تنظیم‌کننده سطح آب (چک‌ها) در وضعیت متوسط ارزیابی شدند. راندمان انتقال در بخشی از کانال اصلی حدود ۹۰/۸ تا ۹۱/۶ درصد محاسبه شد که کمتر از مقادیر طراحی بوده و عمدتاً ناشی از برداشت‌های غیرمجاز و تسهیل در سامانه است. انتخاب نامناسب پمپ‌ها، عدم تراز تجهیزات و ضعف نگهداری در ایستگاه‌های پمپاژ موجب کاهش بازده عملکرد شده است. قطع برق روزانه موجب هدررفت قابل‌توجه آب در شبکه گردیده است. جایگزینی بخشی از کانال یا لوله می‌تواند ضمن کاهش تلفات برخی ایستگاه‌های پمپاژ را حذف نماید. پائین‌بودن سودآوری کشت‌های رایج، نبود بازار مطمئن و ضعف دانش فنی کشاورزان از عوامل اصلی عدم مشارکت بهره‌برداران تشخیص داده شد. نتیجه‌گیری: توسعه کشت‌های پاییزه یا ارزش افزوده یا لایتر، استقرار سامانه GIS، اصلاح مدیریت بهره‌برداری و ارتقای نگهداری ایستگاه‌های پمپاژ به عنوان مهم‌ترین راهکارهای بهبود عملکرد شبکه پیشنهاد گردید.

استناد: آرمان، علی؛ و درویشی، الهام. (۱۴۰۵). ارزیابی عملکرد و بهینه‌سازی مدیریت بهره‌برداری شبکه آبیاری و زهکشی دشت یلوار. فناوری‌های پیشرفته در بهره‌وری آب، ۵ (۲)، ۱۱۹-۱۰۲.

<http://doi.org/10.22126/atwe.2026.13971.1217>



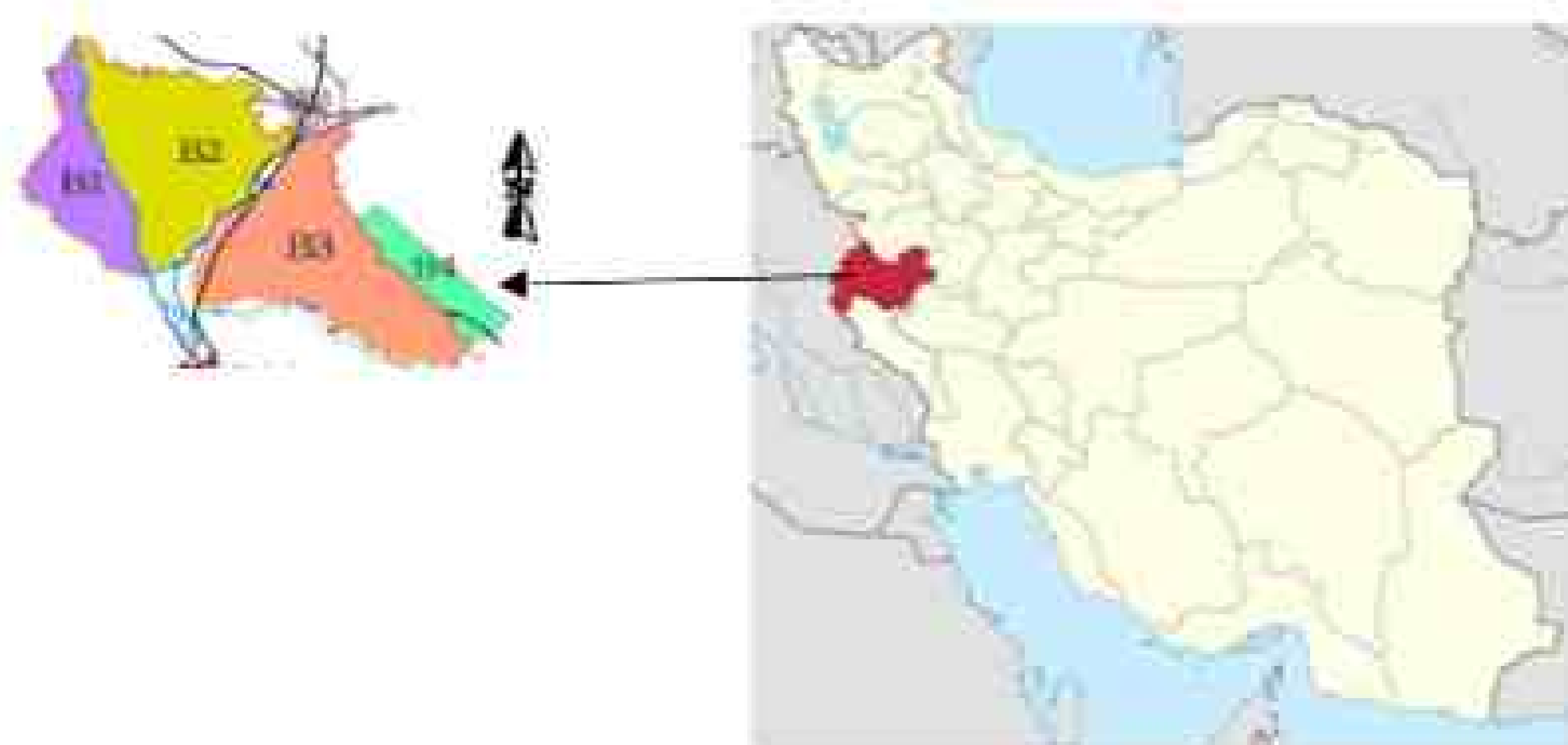
نویسندگان

شماره: دانشگاه رازی

مقدمه

بحران آب در دهه‌های اخیر به یکی از مهم‌ترین چالش‌های توسعه کشاورزی در جهان تبدیل شده است. رشد جمعیت، افزایش تقاضای غذایی، توسعه اراضی کشاورزی و تغییرات اقلیمی موجب شده است که بهره‌برداری بهینه از منابع آب اهمیت دوچندان یابد. در کشورهای خشک و نیمه‌خشک نظیر ایران، بخش کشاورزی بزرگ‌ترین مصرف‌کننده منابع آب بوده و بیش از ۹۰ درصد آب تجدیدپذیر کشور را مصرف می‌کند. از این رو ارتقای راندمان آبیاری و کاهش تلفات در شبکه‌های انتقال و توزیع آب، یکی از اساسی‌ترین راهکارهای مدیریت پایدار منابع آب محسوب می‌شود. شبکه‌های آبیاری و زهکشی باهدف انتقال، توزیع و تحویل مناسب آب به اراضی کشاورزی طراحی می‌شوند، اما عملکرد واقعی بسیاری از این شبکه‌ها به دلایل فنی، مدیریتی، اقتصادی و اجتماعی فاصله قابل توجهی با شرایط طراحی دارد. مطالعات متعدد نشان داده‌اند که ضعف در بهره‌برداری و نگهداری، نارسایی سازه‌های اندازه‌گیری، نبود سامانه‌های کنترلی مناسب، رسوب‌گذاری، برداشت‌های غیرمجاز و ناکارآمدی ایستگاه‌های پمپاژ از مهم‌ترین عوامل کاهش بهره‌وری آب در شبکه‌های آبیاری هستند (شاهرخ‌نیا و جوان، ۱۳۸۵؛ محمدجانی و یزدانیان، ۱۳۹۳؛ کلمنز^۱، ۲۰۱۲).

شبکه‌های آبیاری و زهکشی به‌منظور کنترل عملکرد می‌باید در دوره‌های زمانی مشخصی مورد بررسی قرار گیرند. یکی از شبکه‌های آبیاری مدرن در کشور، شبکه آبیاری و زهکشی گاوشان (بیلوار) در استان‌های کردستان و کرمانشاه است. این شبکه در دشت بیلوار باهدف توسعه کشاورزی آبی و افزایش بهره‌وری منابع آب احداث شده است. شبکه مذکور دارای چهار ناحیه عمرانی B1، B2، B3 و B4 است. به دلیل آنکه دو ناحیه عمرانی B3 و B4 مجموعاً با مساحتی حدود ۳۵۰۰ هکتار در استان کرمانشاه قرار دارد و کارفرمای این طرح نیز شرکت آب منطقه‌ای استان کرمانشاه بوده است، لذا موارد مورد بحث در این تحقیق متمرکز بر نواحی عمرانی B3 و B4 است. بررسی‌ها نشان داد باوجود سرمایه‌گذاری قابل توجه در اجرای این شبکه، طی سال‌های اخیر مشکلات متعددی در زمینه بهره‌برداری و نگهداری آن مشاهده شده است. از جمله مهم‌ترین این مشکلات می‌توان به تلفات انتقال آب، عملکرد نامناسب برخی ایستگاه‌های پمپاژ، ضعف در تحویل عادلانه آب، برداشت‌های غیرمجاز، نبود سیستم اطلاعاتی یکپارچه و عدم مشارکت کامل بهره‌برداران اشاره کرد. در شکل (۱)، نمایی از موقعیت قرارگیری استان کرمانشاه در کشور و شبکه گاوشان در استان کرمانشاه نشان داده شده است.



شکل ۱. موقعیت استان کرمانشاه و نواحی عمرانی شبکه آبیاری گاوشان (بیلوار)

باتوجه به اهمیت موضوع، در این پژوهش تلاش شده است. ارزیابی جامعی از وضعیت عملکرد شبکه آبیاری دشت بیلوار انجام شده و مهم‌ترین چالش‌های فنی و مدیریتی آن شناسایی گردد. همچنین راهکارهای عملی برای بهبود راندمان انتقال، کاهش هدررفت آب، ارتقای عملکرد ایستگاه‌های پمپاژ و بهینه‌سازی مدیریت بهره‌برداری ارائه شد.

¹ Clemmens

ادبیات موضوع و پیشینه پژوهش

ارزیابی عملکرد شبکه های آبیاری طی دهه های اخیر به یکی از محورهای اصلی پژوهش های مهندسی آب تبدیل شده است. در این زمینه، مطالعات متعددی در داخل و خارج کشور انجام شده که هرکدام ابعاد مختلفی از عملکرد هیدرولیکی، مدیریتی و بهره برداری شبکه ها را بررسی کرده اند.

۱. مطالعات داخلی

شاهرخ نیا و جوان (۱۳۸۵) با بررسی شاخص های عملکرد آبیاری در شبکه درودزن نشان دادند که راندمان توزیع و تحویل آب در بسیاری از بخش های شبکه کمتر از مقادیر طراحی بوده و اصلاح بهره برداری می تواند موجب افزایش بهره وری شود. جلیلی و همکاران (۱۳۸۵) در ارزیابی شبکه های آبیاری با روش *Benchmarking* نتیجه گرفتند که شاخص های عملکردی ابزار مناسبی برای مقایسه و رتبه بندی شبکه ها هستند.

حبیبی کدین و همکاران (۱۳۹۶) عملکرد مدول های تیرپیک را در شبکه سفیدرود مورد بررسی قرار دادند و نشان دادند که این سازه ها در شرایط مناسب بهره برداری دارای دقت قابل قبولی در تحویل دبی هستند. کانونی و همکاران (۱۳۹۷) نیز عملکرد هیدرولیکی مدول های تیرپیک در شبکه یامچی اردبیل را ارزیابی کرده و اعلام نمودند که نوسانات سطح آب تأثیر مستقیمی بر خطای اندازه گیری این سازه ها دارد.

در حوزه مدیریت ایستگاه های پمپاژ، شریف خژاد و پرورش ریزی (۱۳۹۵) با استفاده از تحلیل پوششی داده ها عملکرد ایستگاه های پمپاژ کشاورزی را بررسی کرده و ضعف نگهداری تجهیزات را عامل اصلی کاهش راندمان معرفی نمودند. حکمتی راد و همکاران (۱۳۹۴) نیز نشان دادند که انتخاب نامناسب پمپ ها و عدم نگهداری صحیح موجب افزایش مصرف انرژی و کاهش بازده عملکرد می شود.

در زمینه تلفات انتقال آب، سالمی و همکاران (۱۳۹۷) راندمان توزیع آب در کانال های بتنی شبکه های خوزستان را بررسی کردند و نتیجه گرفتند که نشت سازه ها و برداشتهای غیرمجاز مهم ترین عوامل کاهش راندمان انتقال هستند. عباسی و بهراملو (۱۳۹۷) نیز علت شکست پوشش بتنی کانال ها را مورد مطالعه قرار داده و ضعف نگهداری و شرایط نامناسب بهره برداری را از عوامل اصلی تخریب سازه ها دانستند.

سجودی و هاشمی شاهدانی (۱۴۰۰) در تحقیقی مروری روشهای برآورد راندمان انتقال در شبکه های آبیاری ایران را مورد بررسی قرار دادند. آنها عنوان نمودند تلفات در سیستم های انتقال و توزیع آب کشاورزی به دو دلیل اصلی رخ می دهد: نشت و عملکرد نامناسب سازه های کانال که باعث ایجاد تلفات بهره برداری می شود. عوامل مختلفی از جمله رشد علف های هرز در کانال ها، تجمع رسوب در کانال ها، تجمع زیاله در کانال ها، ترک خوردن پوشش کانال، یخزد شدن یا جابه جایی قطعات بتن در کانال ها، تخریب به دلیل کیفیت نامناسب مصالح و عدم وجود دلتش کافی بهره برداری در سطح کلان و خرد تصمیم گیران آب کشور سبب افزایش تلفات در سامانه های توزیع و تحویل کشاورزی هستند.

محمدی قلعه نی و تحوی نیا (۱۴۰۱) در تحقیقی که بر روی شبکه آبیاری آوان خوزستان انجام دادند، به این نتیجه رسیدند که راندمان موثر بیان بهتری در مورد مناسب بودن مدیریت آبیاری در مقیاس مزرعه و نحوه انجام آبیاری دارد. درحالی که راندمان خالص تنها مفهوم استفاده مجدد از تلفات مفید را در مقیاس مکانی بزرگتر از مزرعه لحاظ می کند.

همچنین در تحقیقات متعددی جایگزینی برخی محصولات با درآمد بالا و راندمان آبیاری بیشتر مدنظر قرار گرفته است. در تحقیقی راندمان کاربرد گیاه زعفران بر اساس آمار ده‌ساله در شهرستان‌های زاوله، تربت‌حیدریه و گناباد به ترتیب برابر با ۵۱، ۴۹ و ۸۷ درصد به دست آمد (ذوالفقاران ۱۴۰۱).

۲. مطالعات خارجی

مورتو و همکاران^۱ (۲۰۰۷) عملکرد انرژی ایستگاه‌های پمپاژ را تحلیل کرده و نقش تعمیر و نگهداری را در کاهش مصرف انرژی برجسته ساختند.

گمان و همکاران^۲ (۲۰۰۹) امکان خاموشی شبانه کانال‌ها را برای صرفه‌جویی آب ارزیابی کرده و کاهش تلفات انتقال را گزارش کردند.

کلمنز (۲۰۱۲) سیستم‌های کنترل اختلاف سطح آب در کانال‌های اصلی را مورد بررسی قرارداد و بیان نمود که کنترل خودکار می‌تواند پایداری تحویل آب را افزایش دهد.

احمد و همکاران^۳ (۲۰۲۴) مطالعه‌ای مروری را در زمینه بررسی روش‌ها و شاخص‌های ارزیابی عملکرد در سیستم‌های آبیاری به انجام رسانده‌اند. نشان می‌دهد که تنوع زیادی در شاخص‌های مورد استفاده در سطح جهان وجود دارد و فقدان استانداردسازی یکی از چالش‌های اصلی این حوزه است.

دایابو و همکاران^۴ (۲۰۲۴) در تحقیقی شبکه آبیاری بنی امیر مراکش به مساحت حدود ۳۴۰۰۰ هکتار را بر اساس عملکرد تحویل آب در سطح کانال‌های فرعی از نظر کفایت، قابلیت اطمینان و عدالت در توزیع مورد ارزیابی قرار دادند. نتایج نشان داد که این شاخص‌ها در تمامی سال‌های بررسی در سطح متوسط تا ضعیف قرار داشته‌اند.

ملسه و همکاران^۵ (۲۰۲۵) در مطالعه‌ای دیگر در شبکه آبیاری Gomit در جنوب گوتندار اتیوپی، راندمان انتقال کانال‌ها را حدود ۷۴٪ و راندمان کل را ۴۰٪ برآورد نموده‌اند که نشان از افت قابل‌توجه آب در مسیر انتقال دارد.

مرور پژوهش‌های انجام‌شده نشان می‌دهد که ارزیابی جامع شبکه‌های آبیاری نیازمند بررسی هم‌زمان ابعاد هیدرولیکی، مدیریتی، اقتصادی و اجتماعی است. باوجود مطالعات متعدد، تاکنون پژوهش جامعی درباره شبکه آبیاری دشت بیلوار انجام نشده و بسیاری از مشکلات بهره‌برداری آن به‌صورت دقیق تحلیل نگردیده است. ازاین‌رو پژوهش حاضر با رویکردی جامع به بررسی عملکرد شبکه پرداخته است.

روش پژوهش

شبکه آبیاری و زهکشی دشت بیلوار در استان کرمانشاه واقع شده و یکی از مهم‌ترین شبکه‌های انتقال و توزیع آب کشاورزی غرب کشور محسوب می‌شود. این شبکه باهدف تأمین آب اراضی کشاورزی منطقه و افزایش بهره‌وری تولیدات زراعی احداث گردیده است. شبکه شامل کانال‌های اصلی و فرعی، سازه‌های تنظیم و اندازه‌گیری آب، ایستگاه‌های پمپاژ و سامانه‌های انتقال ثقلی و تحت‌فشار است. اقلیم منطقه نیمه‌خشک بوده و بخش عمده بارندگی در فصل سرد سال رخ می‌دهد. محدودیت منابع آب و وابستگی شدید تولیدات کشاورزی به آبیاری، ضرورت بهره‌برداری بهینه از شبکه را دوچندان کرده است. در شکل (۲) تمایی از شبکه مورد بررسی را ارائه شده است.

¹ Moreno et al

² Ghumman et al

³ Ahmad et al

⁴ Dayyabu et al

⁵ Malsse et al



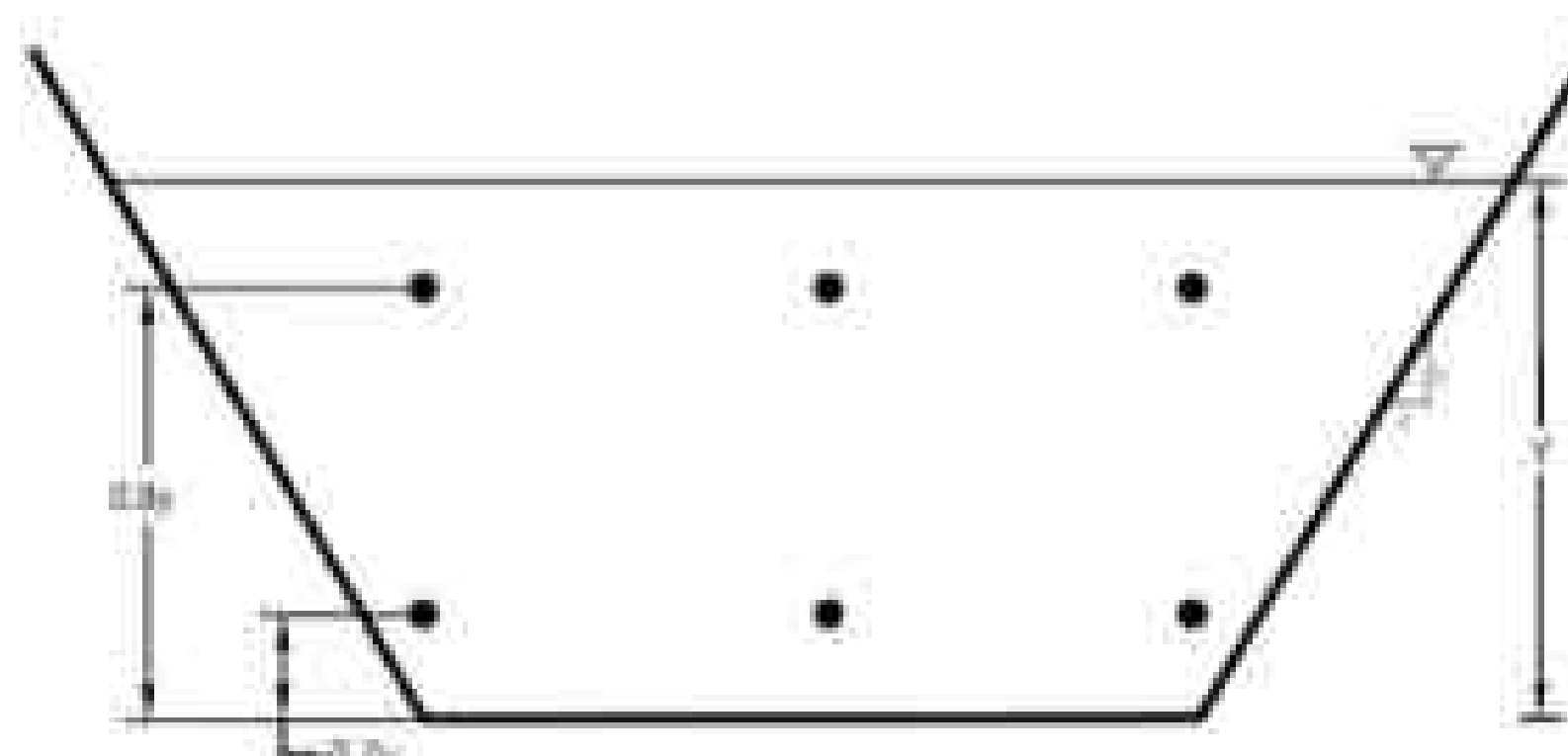
شکل ۲. نمایی از شبکه آبیاری مورد بررسی

۱. جمع آوری داده‌ها

در این پژوهش از ترکیبی از داده‌های میدانی، اسناد بهره‌برداری، برداشت‌های هیدرولیکی و اطلاعات پرسش‌نامه‌ای استفاده شد. داده‌های فنی شامل نقشه‌های اجرایی شبکه، اطلاعات ایستگاه‌های پمپاژ، مشخصات سازه‌های اندازه‌گیری و سوابق بهره‌برداری از شرکت آب منطقه‌ای کرمانشاه دریافت گردید. به‌منظور بررسی وضعیت واقعی شبکه، بازدیدهای میدانی متعددی از کانال‌ها، سازه‌ها و ایستگاه‌های پمپاژ انجام شد. در این بازدیدها وضعیت فیزیکی تأسیسات، نشت آب، برداشت‌های غیرمجاز، عملکرد تجهیزات و شرایط بهره‌برداری مورد ارزیابی قرار گرفت.

۲. اندازه‌گیری دبی و ارزیابی سازه‌ها

برای اندازه‌گیری سرعت جریان و تعیین دبی در مقاطع مختلف شبکه از مولینه *Seba* برای حالت سیلابی استفاده شد. اندازه‌گیری‌ها در چندین مقطع از کانال BLMC و سازه‌های آبگیر انجام گرفت. باتوجه به آنکه اغلب مسیر کانال دوزنقه‌ای است و عمق نیز بیش از ۱ متر است، سرعت در هر مقطع در ۳ ناحیه و دو عمق برداشت گردید. شکل (۳) نمای شماتیک از محله‌ای برداشت سرعت در مقاطع دوزنقه‌ای را نمایش می‌دهد.



شکل ۳. نمای شماتیک محله‌ای برداشت سرعت در مقاطع دوزنقه‌ای

پس از استقرار مولینه *Seba* در هر نقطه، حدود ۴۰ ثانیه داده‌برداری انجام گردید و سپس با استفاده از رابطه زیر، مقدار سرعت در هر استقرار به دست آمد:

$$V = 0.1378N + 0.0168 \quad (1)$$

پس از برداشت اطلاعات موردنظر، ابتدا در هر یک از تقسیم‌بندی‌های مقاطع دوزنقه‌ای، سرعت متوسط با استفاده از رابطه (۲) محاسبه شد. سپس با دانستن سطح مقطع هر تقسیم‌بندی و ضرب آن در مقدار سرعت متوسط، مقدار دبی عبوری از مقطع موردنظر محاسبه گردید.

$$V_{ave} = \frac{V_{0.2y} + V_{0.8y}}{2} \quad (2)$$



شکل ۴. نحوه داده‌برداری در مقطع دوزنقه‌ای

به‌منظور محاسبه راندمان انتقال شبکه، دبی در نقاط خروجی آبپخش، خروجی سیفون معکوس قبل از ایستگاه پمپاژ ۳۰۱ و زهکش ملین ایستگاه‌های پمپاژ ۳۰۱ و ۳۰۲ در نظر گرفته شد. در جداول (۱) الی (۴)، مقادیر دبی در نقاط یاد شده برای دبی‌های ۳۱۰۰، ۲۹۰۰، ۲۷۰۰ و ۱۵۰۰ لیتر بر ثانیه و راندمان انتقال در هر ناحیه ارائه شده است.

جدول ۱. محاسبات مربوط به راندمان انتقال برای دبی اسمی ۳۱۰۰ لیتر بر ثانیه

محل اندازه‌گیری	دبی (لیتر بر ثانیه)	راندمان انتقال (درصد)
خروجی آبپخش	۳۲۷۰	-
خروجی سیفون معکوس	۳۰۱۰	۹۲
زهکش بین ایستگاه‌های پمپاژ ۳۰۱ و ۳۰۲	۳۰۰۰	۹۱.۵

جدول ۲. محاسبات مربوط به راندمان انتقال برای دبی اسمی ۲۹۰۰ لیتر بر ثانیه

محل اندازه‌گیری	دبی (لیتر بر ثانیه)	راندمان انتقال (درصد)
خروجی آبپخش	۲۹۶۰	-
خروجی سیفون معکوس	۲۷۳۰	۹۲.۳
زهکش بین ایستگاه‌های پمپاژ ۳۰۱ و ۳۰۲	۲۷۰۰	۹۱.۳

جدول ۳: محاسبات مربوط به راندمان انتقال برای دبی اسمی ۲۷۰۰ لیتر بر ثانیه

محل اندازه گیری	دبی (لیتر بر ثانیه)	راندمان انتقال (درصد)
خروجی لپخش	۲۷۵۰	-
خروجی سیفون معکوس	۲۵۳۰	۹۲
زهکش بین ایستگاههای پمپاژ ۳۰۱ و ۳۰۲	۲۵۰۵	۹۱

جدول ۴: محاسبات مربوط به راندمان انتقال برای دبی اسمی ۱۵۰۰ لیتر بر ثانیه

محل اندازه گیری	دبی (لیتر بر ثانیه)	راندمان انتقال (درصد)
خروجی لپخش	۱۵۵۰	-
خروجی سیفون معکوس	۱۳۹۰	۹۰
زهکش بین ایستگاههای پمپاژ ۳۰۱ و ۳۰۲	۱۳۷۰	۸۹.۴

۴. بررسی راندمان انتقال

راندمان انتقال آب در کانال اصلی با اندازه گیری دبی در چندین مقطع متوالی محاسبه شد. راندمان انتقال از رابطه زیر تعیین گردید:

$$E_e = \frac{Q_o}{Q_i} \times 100 \quad (3)$$

که در آن:

• E_e = راندمان انتقال

• Q_i = دبی ورودی

• Q_o = دبی خروجی

باتوجه به اندازه گیری های بعمل آمده برای دبی های ۱۵۰۰ الی ۳۱۰۰ لیتر بر ثانیه که نتایج آن در جداول ۱ الی ۴ ارائه شده است، مقادیر راندمان های انتقال در محدوده ۸۹.۴ درصد تا ۹۲.۲ درصد بوده است. باتوجه به شرایط محلی منطقه و وجود برداشت های غیرمجاز در ساحل چپ کانال آبیاری، راندمان انتقال به دست آمده شرایط مطلوبی را برآورد می کند.

۵. ارزیابی ایستگاههای پمپاژ

عملکرد ایستگاههای پمپاژ ناحیه عمرانی B3 و B4 از طریق بررسی فشار خروجی، دبی تحویلی، وضعیت لوله مکش، کوپلینگ ها و تجهیزات مکانیکی مورد ارزیابی قرار گرفت. همچنین شرایط تعمیر و نگهداری، نحوه بهره برداری و میزان خرابی تجهیزات بررسی شد.

۶. بررسی عوامل اجتماعی و اقتصادی

به منظور تحلیل عوامل عدم مشارکت کشاورزان در انعقاد قرارداد بهره برداری، پرسش نامه ای طراحی و میان ۹۰ نفر از بهره برداران توزیع شد. پرسشنامه شامل سؤالاتی درباره سودآوری کشت ها، مشکلات فنی، هزینه های بهره برداری، وضعیت بازار محصولات و میزان رضایت از عملکرد شبکه بود.

یافته‌ها

۱. ارزیابی عملکرد سازه‌های اندازه‌گیری نیربیک و تنظیم‌کننده سطح آب

به منظور بررسی دقت عملکرد سازه‌های اندازه‌گیری و تنظیم جریان در شبکه آبیاری دشت بیلوار، اندازه‌گیری‌های میدانی دبی و سرعت جریان در کانال‌های اصلی و آبخش‌ها انجام شد. در این راستا از مولینه مدل Seba جهت برداشت سرعت نقطه‌ای جریان و محاسبه دبی واقعی استفاده گردید. نتایج حاصل نشان داد که عملکرد مدول‌های نیربیک در شرایط بهره‌برداری موجود از پایداری قابل قبولی برخوردار است. هرچند اختلاف‌هایی میان دبی طراحی و دبی واقعی مشاهده شد.

جدول ۵. نتایج ارزیابی عملکرد مدول‌های نیربیک

محل اندازه‌گیری	دبی طراحی (لیتر بر ثانیه)	دبی اندازه‌گیری شده (لیتر بر ثانیه)	درصد خطا	وضعیت عملکرد
خروجی آبخش شماره ۱	۱۲۰	۱۱۶	۲٫۲	مناسب
خروجی آبخش شماره ۲	۱۵۰	۱۴۴	۴	مناسب
خروجی آبخش شماره ۳	۱۸۰	۱۷۲	۴٫۴	مناسب
خروجی آبخش شماره ۴	۲۱۰	۲۰۱	۴٫۲	مناسب
خروجی آبخش شماره ۵	۲۵۰	۲۳۹	۴٫۴	مناسب

نتایج جدول فوق نشان می‌دهد که اختلاف میان دبی طراحی و دبی واقعی در اکثر مدول‌های نیربیک کمتر از ۵ درصد است. این موضوع بیانگر عملکرد قابل قبول مدول‌ها در شرایط بهره‌برداری فعلی شبکه است. مناسب‌ترین مقطع برای اندازه‌گیری دبی، خروجی آبخش‌ها در ۱۰۰ متری پایین‌دست مدول نیربیک تشخیص داده شد؛ زیرا در این ناحیه جریان از آشفتگی کمتری برخوردار بوده و شرایط جریان به صورت ساختاریافته است.

این نتایج با یافته‌های حبیبی‌کندبن و همکاران (۱۳۹۶) و کاتونی و همکاران (۱۳۹۷) مطابقت دارد که عملکرد قابل قبول مدول‌های نیربیک را در شبکه‌های آبیاری کشور گزارش نموده‌اند. با این وجود، در برخی سازه‌ها نوسانات تراز آب بالادست، رسوب‌گذاری موضعی و فرسودگی تجهیزات موجب کاهش دقت تحویل آب شده بود. در ادامه، عملکرد سازه‌های تنظیم سطح آب (چک‌ها) مورد بررسی قرار گرفت که نتایج آن در جدول (۶) ارائه شده است.

جدول ۶. نتایج عملکرد سازه‌های تنظیم سطح آب

سازه	نوع سازه چک	وضعیت کنترل تراز آب	وضعیت سازه	میزان رسوب‌گذاری	ارزیابی نهایی
چک شماره ۱	نوک اردکی	نسبتاً پایدار	مناسب	کم	متوسط رو به خوب
چک شماره ۲	نوک اردکی	ناپایدار	فرسوده	متوسط	متوسط
چک شماره ۳	نوک اردکی	پایدار	مناسب	کم	خوب
چک شماره ۴	نوک اردکی	نوسانی	نیمه‌فرسوده	زیاد	ضعیف
چک شماره ۵	نوک اردکی	نسبتاً پایدار	مناسب	متوسط	متوسط

بررسی‌ها نشان داد عملکرد سازه‌های تنظیم سطح آب در مجموع در سطح متوسط قرار دارد. مهم‌ترین عوامل کاهش عملکرد این سازه‌ها شامل نبود سیستم‌های کنترل خودکار، فرسودگی تجهیزات مکانیکی و تجمع رسوبات در برخی مقاطع حساس است. نوسانات سطح آب در برخی چک‌ها موجب اختلال در عملکرد مدول‌های پایین‌دست و افزایش خطای تحویل آب شده است. در نتیجه، لزوم بازسازی سازه‌های فرسوده و اجرای سامانه‌های کنترل هوشمند در شبکه بیش‌ازپیش احساس می‌شود.

۲. ارزیابی عملکرد ایستگاه‌های پمپاژ

ارزیابی عملکرد ایستگاه‌های پمپاژ ناحیه عمرانی B3 و B4 یکی از مهم‌ترین بخش‌های این پژوهش بود؛ زیرا بخش عمده اراضی تحت پوشش شبکه وابسته به سیستم‌های پمپاژ هستند. نتایج بازدیدهای میدانی و اندازه‌گیری‌های انجام‌شده نشان داد که

بخش قابل توجهی از ایستگاه‌ها با مشکلات فنی و بهره‌برداری مواجه‌اند که این مسئله موجب افزایش مصرف انرژی، کاهش راندمان و افزایش هزینه‌های نگهداری شده است.

نتایج ارزیابی ایستگاه‌های پمپاژ در جدول (۷) ارائه شده است.

جدول ۷. نتایج ارزیابی ایستگاه‌های پمپاژ

شماره ایستگاه	وضعیت دبی	وضعیت فشار	مشکلات اصلی مشاهده شده	وضعیت عملکرد
۳۰۱	کمتر از مقدار طراحی	پایین	نشتی اتصالات، خرابی سوپاپ	ضعیف
۳۰۲	نزدیک به مقدار طراحی	متناسب	کویلینگ نامناسب	متوسط
۳۰۳	بیشتر از مقدار طراحی	بالا	انتخاب نامناسب پمپ	متوسط
۳۰۴	کمتر از مقدار طراحی	پایین	هواگرفتگی مکرر	ضعیف
۳۰۵	متناسب	متناسب	مشکلات جزئی تعمیراتی	خوب

بررسی فشار خروجی پمپ‌ها در حالت شیر بسته نشان داد که در برخی ایستگاه‌ها انتخاب پمپ متناسب با هد و دبی مورد نیاز مزرعه صورت نگرفته است. در نتیجه، تعدادی از ایستگاه‌ها دارای دبی بیش از نیاز و برخی دیگر با کمبود دبی مواجه بودند. این عدم تطابق موجب کاهش راندمان هیدرولیکی و افزایش استهلاک تجهیزات شده است.

در بسیاری از ایستگاه‌ها مشکلاتی نظیر تراز نبودن لوله مکش، نشتی اتصالات، کویلینگ نامناسب و خرابی سوپاپ‌ها مشاهده گردید. این مشکلات باعث ورود هوا به سیستم، کاهش راندمان مکش و افزایش دفعات هواگیری پمپ‌ها شده بود. همچنین ارتعاشات ناشی از نصب غیراصولی در برخی ایستگاه‌ها سبب افزایش استهلاک قطعات مکانیکی و کاهش عمر مفید تجهیزات شده است.

یکی از مهم‌ترین یافته‌های پژوهش، ضعف دانش فنی بهره‌برداران در زمینه تعمیر و نگهداری ایستگاه‌های پمپاژ بود. در بسیاری موارد تعمیرات توسط افراد غیرمتخصص انجام شده و این موضوع علاوه بر افزایش هزینه‌ها، موجب آسیب بیشتر به تجهیزات شده است. نتایج این بخش با یافته‌های مورنو و همکاران (۲۰۰۷) و شریف‌نژاد و پرورش‌ریزی (۱۳۹۵) همخوانی دارد.

۳. ارزیابی تلفات آب و راندمان انتقال در کانال BLMC

یکی از مهم‌ترین شاخص‌های ارزیابی شبکه‌های آبیاری، میزان راندمان انتقال آب در کانال‌ها است. در این پژوهش، به منظور بررسی میزان تلفات آب در کانال BLMC، اندازه‌گیری سرعت و دبی جریان در چندین مقطع مختلف انجام شد. نتایج راندمان انتقال آب در جدول (۸) ارائه شده است.

جدول ۸. راندمان انتقال آب

مقطع اندازه‌گیری	فاصله از آبپخش (متر)	دبی ورودی (لیتر بر ثانیه)	دبی خروجی (لیتر بر ثانیه)	راندمان انتقال (%)
خروجی آبپخش تا سیفون معکوس	۷۰۰	۳۳۰۰	۳۰۲۳	۹۱٫۶
سیفون معکوس تا ایستگاه ۳۰۱	۱۰۰	۳۰۲۳	۲۷۵۵	۹۱٫۱
ایستگاه ۳۰۱ تا ایستگاه ۳۰۳	۱۰۰۰	۲۷۵۵	۲۵۰۲	۹۰٫۸

بر اساس نتایج جدول فوق، راندمان انتقال در بخش‌های مختلف کانال کمتر از مقادیر طراحی بوده است. کاهش راندمان عمدتاً ناشی از نشتی سیفون معکوس، برداشت‌های غیرمجاز، فرسودگی پوشش کانال و ضعف نظارت بهره‌برداری است. وجود باغات در بالادست ایستگاه پمپاژ ۳۰۱ و مشاهده مسیرهای برداشت غیرمجاز آب، بیانگر ضعف نظارت بر توزیع آب در این بخش از شبکه (ابتدای شبکه) است.

یکی دیگر از عوامل مؤثر بر افزایش تلفات، از مدار خارج بودن ایستگاه پمپاژ ۳۰۱ (اولین ایستگاه موجود در مسیر) است. عدم بهره‌برداری از این ایستگاه موجب کاهش حساسیت بهره‌برداران نسبت به برداشت‌های غیرمجاز و تشدید بی‌نظمی در توزیع آب

شده است. مطالعات ورجاوند و همکاران (۱۳۹۹) نیز نشان داده‌اند که ضعف مدیریت بهره‌برداری و نبود کنترل مستمر، نقش مستقیمی در افزایش تلفات آب در شبکه‌های آبیاری دارد.

۴. بررسی هدررفت آب در زمان قطع برق

یکی از چالش‌های اصلی شبکه بیلوار، وابستگی گسترده سیستم آبیاری به ایستگاه‌های پمپاژ برقی است. بر اساس بررسی‌های انجام‌شده، در فصل زراعی تابستان به طور متوسط روزانه حدود ۴ ساعت قطعی برق در شبکه رخ می‌دهد که این مسئله موجب هدررفت حجم قابل‌توجهی از آب در کانال‌ها می‌شود. ذکر این نکته ضروری است که در زمان قطعی برق حجم بسیار زیادی از آب شبکه هدر می‌رود، زیرا ورودی به شبکه توسط تونل انتقالی که به‌صورت ثقلی آب را از سد به آبخس منتقل می‌کند، تأمین می‌شود، چنانچه قطعی برق رخ دهد و بهره‌بردار بخواهد ورودی آب را از سد گاوشان قطع نماید، حداقل ۶ ساعت طول می‌کشد که این حجم آب مهار گردد؛ بنابراین با قطعی برق عملاً نمی‌توان اقدام خاصی در این خصوص نتیجه داد و شاهد هدررفت حجم بسیار زیادی از آب شبکه خواهیم بود.

عوامل اصلی هدررفت آب در شبکه در جدول (۹) ارائه شده است.

جدول ۹. عوامل اصلی هدررفت آب در شبکه

عامل هدررفت	میزان تأثیر	توضیحات
قطع برق ایستگاه‌های پمپاژ	بسیار زیاد	توقف انتقال آب به مزارع
برداشت غیرمجاز	زیاد	به‌ویژه در بالادست ایستگاه ۳۰۱
لشی کانال و سقون‌ها	متوسط	فرسودگی سازه‌ها
عدم هماهنگی برنامه آبیاری	زیاد	افزایش تلفات در زمان خاموشی
ضعف نگهداری تجهیزات	متوسط	کاهش راندمان انتقال

۵. امکان‌سنجی جایگزینی کانال روباز با خط لوله

به‌منظور کاهش تلفات انتقال، کنترل برداشت‌های غیرمجاز و حذف بخشی از ایستگاه‌های پمپاژ، امکان جایگزینی کانال روباز با سیستم انتقال تحت‌فشار مورد بررسی قرار گرفت. ابتدا با استفاده از نرم‌افزار *WaterGems* مدل‌سازی لازم از محل خروجی تونل صورت پذیرفت و مشخص شد تا ایستگاه پمپاژ سوم می‌توان فشار لازم را برای تأمین هد آبپاش‌ها ایجاد نمود. پارامترهای تلفات نفوذ و تبخیر، برداشت‌های غیرمجاز، هزینه‌های اجرا و نگهداری، پمپاژ و راندمان انتقال هر دو سیستم روباز و لوله در شبکه بیلوار مورد بررسی قرار گرفت. بر اساس بررسی‌های به‌عمل آمده که نتایج آن در جدول (۱۰) ارائه شده است، عوامل یاد شده برای هر دو گزینه روباز و لوله‌ای مورد بررسی و مقایسه قرار گرفت. طبق بررسی‌های به‌عمل آمده، لوله‌گذاری کانال اصلی شبکه بیلوار موجب کاهش تلفات و نشت خواهد شد. این تلفات شامل تبخیر و هدررفت در انتهای کانال است. همچنین در زمان قطع برق و یا مسدودشدن کانال، آب وارد اراضی نزدیک کانال نخواهد شد، از مزایای دیگر لوله‌گذاری خط اصلی کاهش دزدی آب در مسیر خط اصلی خواهد شد. همچنین تا حدی توان مصرفی ایستگاه‌های پمپاژ کاهش خواهد یافت. با وجود مزایای لوله‌گذاری در این شبکه، متأسفانه هزینه بسیار بالایی اجرای لوله‌گذاری و همچنین تخریب سازه‌های در مسیر آن می‌تواند مزایای لوله‌گذاری را به حداقل ممکن برساند. نتایج مقایسه سیستم کانال روباز و انتقال با لوله در جدول (۱۰) ارائه شده است.

جدول ۱۰. نتایج مقایسه سیستم کانال روباز و انتقال با لوله

تفاوت	کانال روباز	سیستم لوله‌ای
تلفات نفوذ و تبخیر	زیاد	بسیار کم
برداشت غیرمجاز	بالا	محدود
هزینه اولیه اجرا	کمتر	بسیار زیاد
هزینه نگهداری	متوسط	کم
نیاز به پمپاژ	بیشتر	کمتر
راندمان انتقال	متوسط	بالا

بحث

این مقاله به‌خوبی به مشکلات اساسی که بسیاری از شبکه‌های آبیاری در سراسر جهان با آن روبرو هستند، پرداخته است. از یک سو، چالش‌های فنی مانند انتخاب نادرست پمپ‌ها، نصب غیراصولی، فرسودگی تجهیزات و نگهداری نامناسب، مستقیماً بر راندمان و مصرف انرژی تأثیر می‌گذارند. این مسائل که در ایستگاه‌های پمپاژ شبکه دشت بیلوار مشاهده شده، منجر به هدررفت آب و افزایش هزینه‌های عملیاتی می‌شود. ازسوی دیگر، اتکای بیش از حد به کانال‌های روباز، همان‌طور که در مورد کانال *BLMC* دیده می‌شود، خود عاملی برای تلفات آب از طریق نشست و تبخیر است. علاوه بر این، برداشت‌های غیرمجاز و مدیریت ناکافی برنامه آبیاری، به‌ویژه در زمان قطع برق، تشدیدکننده این مشکلات هستند.

جنبه اجتماعی و اقتصادی مقاله نیز بسیار حائز اهمیت است. کاهش مشارکت کشاورزان به دلیل سودآوری پایین کشت‌های پاییزه فعلی، ریسک تولید و عدم وجود بازارهای تضمین شده، نشان می‌دهد که بهبود زیرساخت‌های فیزیکی به‌تنهایی کافی نیست. دانش فنی ناکافی بهره‌برداران نیز عامل مهم دیگری در افزایش تلفات آب و کاهش بهره‌وری کلی شبکه است. راهکارهای ارائه شده، مانند توسعه کشت محصولات باارزش اقتصادی بالاتر و نیاز آبی کمتر (مانند سیر و پیاز)، و همچنین ایجاد یک بانک اطلاعات مکانی جامع در *GIS*، رویکردی کل‌نگر را برای مدیریت پایدار شبکه آبیاری پیشنهاد می‌کند که هم به جنبه‌های فنی و هم به نیازها و انگیزه‌های انسانی توجه دارد.

نتیجه‌گیری

بررسی‌های هیدرولیکی نشان داد که استفاده از خط لوله می‌تواند باعث کاهش قابل توجه تلفات نفوذ، تبخیر و برداشت‌های غیرمجاز شود. همچنین با ایجاد فشار طبیعی در بخشی از مسیر، امکان حذف یا کاهش ظرفیت برخی ایستگاه‌های پمپاژ وجود خواهد داشت که این موضوع موجب کاهش مصرف انرژی و هزینه‌های بهره‌برداری می‌شود. بااین‌حال، هزینه اولیه اجرای سیستم لوله‌گذاری بسیار بالا بوده و اجرای آن نیازمند تحلیل دقیق اقتصادی است؛ بنابراین پیشنهاد می‌شود در مرحله نخست، این طرح به‌صورت موضعی و در بخش‌هایی که دارای بیشترین میزان تلفات هستند اجرا گردد تا امکان ارزیابی اقتصادی و فنی آن فراهم شود. ارزیابی عملکرد شبکه آبیاری و زهکشی دشت بیلوار نشان داد که اگرچه این شبکه از نظر زیرساخت فیزیکی و گستره پوشش اراضی، یکی از پروژه‌های مهم آبیاری غرب کشور محسوب می‌شود، اما در مرحله بهره‌برداری با مجموعه‌ای از چالش‌های فنی، مدیریتی، هیدرولیکی و اجتماعی مواجه است که موجب کاهش راندمان انتقال و توزیع آب، افزایش هزینه‌های بهره‌برداری و کاهش رضایت بهره‌برداران شده است. نتایج این پژوهش نشان داد که بخش عمده مشکلات شبکه نه ناشی از کمبود منابع آب، بلکه ناشی از ضعف در مدیریت بهره‌برداری، عدم نگهداری مناسب تأسیسات، نبود سیستم‌های پایش و کنترل دقیق و همچنین هماهنگی میان برنامه کشت و ظرفیت واقعی شبکه است. بررسی عملکرد سازه‌های اندازه‌گیری نیربیک نشان داد که این سازه‌ها

در شرایط بهره‌برداری فعلی، عملکرد نسبتاً قابل قبولی دارند و خطای تخمین دبی در آن‌ها کمتر از ۵ درصد است. این موضوع بیانگر آن است که در صورت نگهداری مناسب و بهره‌برداری اصولی، مدول‌های نیرویگ می‌توانند به‌عنوان ابزار مؤثر تحویل حجمی آب در شبکه عمل کنند. با این حال، تایج نشان داد که بخشی از خطاهای موجود در تحویل آب ناشی از شرایط هیدرولیکی نامناسب در بالادست و پایین دست سازه‌ها، رسوب‌گذاری، تغییرات سطح آب و نیز ضعف در تنظیم دریچه‌های کنترل‌کننده سطح آب است. همچنین ارزیابی سازه‌های تنظیم‌کننده سطح آب نشان داد که عملکرد آن‌ها در محدوده متوسط قرار داشته و نوسانات سطح آب در برخی بازه‌ها موجب اختلال در توزیع یکنواخت آب می‌شود. این موضوع می‌تواند در بلندمدت سبب کاهش عدالت توزیع آب در سطح شبکه گردد. تایج مربوط به ارزیابی ایستگاه‌های پمپاژ نشان داد که بخش قابل توجهی از مشکلات بهره‌برداری شبکه به عملکرد نامناسب این ایستگاه‌ها مربوط است. انتخاب نامناسب پمپ‌ها نسبت به دبی و فشار موردنیاز مزارع، عدم تراز مناسب لوله مکش، فرسودگی اتصالات، نشی در خطوط انتقال و ضعف در تعمیر و نگهداری، موجب کاهش راندمان پمپاژ و افزایش مصرف انرژی شده است. در برخی ایستگاه‌ها، دبی واقعی پمپ‌ها اختلاف قابل توجهی با دبی طراحی داشت که این مسئله علاوه بر افزایش هزینه بهره‌برداری، باعث کاهش یکنواختی توزیع آب در اراضی پایین دست شده است. بررسی‌های میدانی همچنین نشان داد که نبود نیروی متخصص محلی برای تعمیر و سرویس پمپ‌ها، یکی از عوامل اصلی افزایش خرابی تجهیزات و تحمیل هزینه‌های سنگین به بهره‌برداران است. در واقع، ضعف دانش فنی بهره‌برداران در حوزه تعمیرات الکترومکانیکی موجب شده است که بسیاری از تعمیرات به‌صورت غیراصولی انجام گیرد و عمر مفید تجهیزات کاهش یابد. اندازه‌گیری تلفات انتقال در کانال BLMC نشان داد که راندمان انتقال واقعی شبکه کمتر از مقادیر طراحی است. راندمان انتقال در بازه خروجی آب‌بخش تا ایستگاه پمپاژ ۳۰۱ به طور متوسط حدود ۹۱/۶ درصد و در بازه بعدی حدود ۹۰/۸ درصد محاسبه شد؛ درحالی‌که در گزارش‌های اولیه طراحی، راندمان انتقال حدود ۹۵ درصد در نظر گرفته شده بود. این اختلاف نشان‌دهنده وجود تلفات قابل توجه ناشی از نشی، برداشت‌های غیرمجاز و ضعف نگهداری سازه‌های انتقال است. بررسی میدانی وجود باغات و برداشت‌های غیرمجاز در بالادست ایستگاه‌های پمپاژ را تأیید نمود. این مسئله نشان می‌دهد که عدم نظارت کافی بر شبکه و غیرفعال بودن برخی ایستگاه‌های پمپاژ، زمینه‌ساز افزایش برداشت‌های غیرمجاز شده است؛ بنابراین احیای ایستگاه‌های غیرفعال، نصب تجهیزات پایش هوشمند و افزایش نظارت بهره‌برداری می‌تواند نقش مؤثری در کاهش تلفات انتقال داشته باشد. مدل‌سازی شبکه با استفاده از نرم‌افزار *WaterGEMS* و تحلیل شرایط قطع برق نشان داد که یکی از مهم‌ترین عوامل هدررفت آب در شبکه، خاموشی ایستگاه‌های پمپاژ در ساعات اوج مصرف برق است. در دوره تابستان، روزانه حدود چهار ساعت قطعی برق موجب عبور بدون استفاده حجم قابل توجهی از آب در کانال می‌شود. نتایج این بخش نشان داد که مدیریت مناسب برنامه آبیاری و تخصیص اراضی ثقلی در زمان قطعی برق می‌تواند بخش مهمی از این هدررفت را کاهش دهد. همچنین مشخص شد که انتخاب الگوی کشت مناسب، به‌ویژه توسعه محصولاتی با نیاز آبی کمتر مانند ذرت علوفه‌ای، می‌تواند فشار وارد بر شبکه را کاهش داده و پایداری بهره‌برداری را افزایش دهد. بررسی امکان جایگزینی کانال روباز با سیستم انتقال لوله‌ای نشان داد که با توجه به اختلاف ارتفاع موجود در مسیر شبکه، امکان حذف بخشی از ایستگاه‌های پمپاژ و انتقال ثقلی آب در برخی بازه‌ها وجود دارد. تحلیل‌های هیدرولیکی نشان داد که استفاده از خطوط لوله با قطر مناسب علاوه بر کاهش تلفات نفوذ و تبخیر، می‌تواند هزینه‌های نگهداری شبکه را کاهش داده و پایداری انتقال آب را افزایش دهد. هرچند هزینه اولیه اجرای چنین طرحی بالا خواهد بود، اما در بلندمدت کاهش هزینه انرژی، کاهش تلفات آب و افزایش قابلیت کنترل شبکه می‌تواند توجیه اقتصادی مناسبی ایجاد نماید. نتایج حاصل از بررسی عوامل عدم تمایل کشاورزان به انعقاد قرارداد با مدیریت شبکه نشان داد که مشکلات اقتصادی و اجتماعی نقش مهمی در کاهش مشارکت بهره‌برداران دارند. پایین بودن سودآوری برخی

کشت‌های پاییزه، ریسک بالای تولید، نبود بازار خرید تضمینی، شیوع بیماری‌های گیاهی و هزینه بالای نگهداری ایستگاه‌های پمپاژ از مهم‌ترین عوامل مؤثر بر کاهش استقبال کشاورزان از عضویت در شبکه بوده است. علاوه بر این، بسیاری از بهره‌برداران تجربه کافی در زمینه کشاورزی آبی و مدیریت مصرف آب ندارند و همین موضوع موجب افزایش تلفات و کاهش بهره‌وری آب شده است. این یافته‌ها نشان می‌دهد که موفقیت شبکه‌های مدرن آبیاری صرفاً وابسته به زیرساخت فنی نیست، بلکه عوامل اجتماعی-اقتصادی و مدیریتی نیز نقش تعیین‌کننده‌ای در پایداری بهره‌برداری دارند. در بخش الگوی کشت، نتایج نشان داد که توسعه کشت محصولات باارزش اقتصادی بالاتر نظیر سیر و پیاز می‌تواند درآمد کشاورزان را افزایش داده و انگیزه مشارکت آنان در شبکه را تقویت کند. بررسی شرایط اقلیمی منطقه نشان داد که این محصولات قابلیت سازگاری مناسبی با شرایط دشت ییلوار دارند و در صورت ایجاد بازار فروش مناسب، می‌توانند جایگزین بخشی از کشت‌های کم‌بازده فعلی شوند. همچنین توسعه کشت‌های کم‌مصرف آبی می‌تواند فشار وارد بر منابع آب شبکه را کاهش داده و راندمان مصرف آب را بهبود بخشد. تهیه بانک اطلاعات مکانی شبکه در محیط GIS نیز یکی از دستاوردهای مهم این پژوهش محسوب می‌شود. ایجاد پایگاه‌داده یکپارچه از اطلاعات بهره‌برداری، موقعیت تأسیسات، وضعیت ایستگاه‌های پمپاژ، مشخصات مزارع و اطلاعات عملکردی شبکه، امکان تصمیم‌گیری دقیق‌تر و مدیریت علمی‌تر شبکه را فراهم می‌کند. این بانک اطلاعاتی می‌تواند پایه‌ای برای توسعه سیستم‌های مدیریت هوشمند آب، پایش آنلاین و برنامه‌ریزی آینده شبکه باشد. به‌طور کلی، نتایج این پژوهش نشان داد که ارتقای عملکرد شبکه آبیاری ییلوار نیازمند رویکردی جامع و چندبعدی است. صرف بهبود سازه‌های فیزیکی بدون اصلاح نظام بهره‌برداری و مدیریت، نمی‌تواند منجر به افزایش پایداری راندمان شبکه شود؛ بنابراین ترکیبی از اقدامات فنی، مدیریتی و اجتماعی برای بهبود وضعیت شبکه ضروری است.

ملاحظات اخلاقی

پیروی از اصول اخلاقی پژوهش

نویسندگان اصول اخلاقی را در انجام و انتشار این پژوهش علمی رعایت نموده‌اند و این موضوع مورد تأیید همه آنهاست.

تعارض منافع

پنا بر اظهار نویسندگان این مقاله تعارض منافع ندارد.

اسدی، مهدی، کوچک زاده، صالح، و ستوده نیا، عباس. (۱۳۹۰). راهنمای اندازه‌گیری جریان آب. انتشارات کمیته ملی آبیاری و زهکشی ایران، تهران، ایران. <https://lib.kashanu.ac.ir/Inventory/4/105065.htm>

جلیلی، جلال، جبلی، سید جلال، قصرنیا، هوشنگ، و منعم، محمدجواد. (۱۳۸۵). ارزیابی شبکه‌های آبیاری به روش Benchmarking با تعیین ارزش نسبی شاخص‌ها. *مجله تحقیقات مهندسی کشاورزی*، ۷(۲۹)، ۷۱-۸۸. <https://dor.isc.ac/dor/20.1001.1.26454531.1385.7.4.63>

حبیبی‌کنندن، عمار، دوستی، میلاد، و مالدیمی، امیرحسین. (۱۳۹۶). ارزیابی عملکرد مدول‌های نیرویک به عنوان سازه آبگیر در تأمین آب اراضی پایین‌دست خود در شبکه آبیاری و زهکشی سفیدرود. *نشریه آبیاری و زهکشی ایران*، ۴(۱)، ۶۵-۷۲. <https://doi.org/10.22067/jwsd.v4i1.54374>

حسینی، سید محمود، و ابریشمی، جلیل. (۱۳۷۹). هیدرولیک کانال‌های باز. انتشارات دانشگاه امام رضا (ع)، مشهد، ایران. <https://www.isoom.com/book/11317999>

حکمتی راد، سنور، رضایی، حسین، و قزلباش، بهمن. (۱۳۹۴). ارزیابی کیفی عملکرد در ایستگاه‌های پمپاژ آب کشاورزی (مطالعه موردی ایستگاه‌های پمپاژ شبکه آبیاری و زهکشی دشت مهاباد). *نشریه مهندسی آبیاری و زهکشی*، ۱۰-۱. <https://www.sid.ir/FileServer/SF/687139401429>

دلفان‌آذری، مرتضی، و پرورش‌ریزی، عاطفه. (۱۳۹۹). ارتقای فرایند تعمیر و نگهداری درجه‌های آبگیر در کانال‌های آبیاری بر اساس پایش و تحلیل وضع موجود (موردکاوی شبکه آبیاری شمال بهبهان). *مجله تحقیقات مهندسی سازه‌های آبیاری و زهکشی*، ۲۱(۷۹)، ۹۰-۷۱. <https://doi.org/10.22092/idser.2020.128597.1413.71-90>

ذوالفقاران، اردلان. (۱۴۰۱). تعیین آب کاربردی و بهره‌وری مصرف آب در مزارع زعفران استان خراسان رضوی. *نشریه فناوری های پیشرفته در بهره‌وری آب*، ۲(۱)، ۵۱-۳۸. <https://doi.org/10.22126/atwe.2022.7535.1015>

زارع ابیانه، حمید، حیدری، آرمان، و دانشکار آراسته، پیمان. (۱۳۹۸). ارزیابی عملکرد مدیریت آب در شبکه آبیاری دشت قزوین. *نشریه مهندسی آبیاری و آب ایران*، ۱۰(۳۸)، ۸۸-۷۶. <https://doi.org/10.22125/iawe.2019.100726>

سالمی، حمیدرضا. (۱۳۹۳). ارزیابی عملکرد هیدرولیکی ساختمان‌های آبگیر و تنظیم سطح آب در شبکه‌های آبیاری زاینده‌رود و درودزن. *مجله تحقیقات مهندسی کشاورزی*، ۱۵(۱)، ۸۱-۱۰۳. <https://doi.org/10.22092/erams.2014.102153>

سجودی، زینب، و هاشمی شاهدانی، سید مهدی. (۱۴۰۰). مروری بر راندمان انتقال و توزیع آب در شبکه‌های آبیاری ایران و روش‌های برآورد آن. *نشریه پژوهش و فناوری محیط زیست*، ۶(۹)، ۸۷-۷۵. <https://journal.ri.acecr.ir/Article/15984>

شاهرخ‌نیا، محمدعلی، و جوان، محمد. (۱۳۸۵). بررسی شاخص‌های عملکرد آبیاری در شبکه آبیاری درودزن. *مجله تحقیقات مهندسی کشاورزی*، ۷(۲۹)، ۴۶-۳۳. https://idser.reeo.ac.ir/article_102577.html

شریف‌نژاد، اعظم، و پرورش‌ریزی، عاطفه. (۱۳۹۵). ارزیابی کمی عملکرد ایستگاه پمپاژ آب کشاورزی به روش تحلیل پوششی داده‌ها (بررسی موردی: ایستگاه پمپاژ اصلی سبیلی استان خوزستان). *مجله پژوهش آب ایران*، ۱۰(۳)، ۱۷۹-۱۷۵. https://iwvj.ku.ac.ir/article_10493.html

عباسی، نادر، و بهراملو، رضا. (۱۳۹۷). بررسی علل شکستگی‌های پوشش بتنی کانال‌های انتقال آب (مطالعه موردی کانال اصلی شبکه آبیاری شبانکاره). *مجله تحقیقات مهندسی سازه‌های آبیاری و زهکشی*، ۱۹(۷۰)، ۸۴-۶۹. <https://doi.org/10.22092/idser.2018.116684.1280>

کانونی، امین، پوریامش، منوچهر، نیکبور، محمدرضا، و فیضی، اتابک. (۱۳۹۷). ارزیابی عملکرد هیدرولیکی و بهره‌برداری درجه‌های مدول نیرویک در کانال اصلی توزیع آب (مطالعه موردی: شبکه آبیاری یامچی، اردبیل). *نشریه آبیاری و زهکشی ایران*، ۱۲(۶)، ۱۴۴۷-۱۴۲۵. https://idj.aid.ir/article_85909.html

کانونی، امین، و منعم، محمدجواد. (۱۳۹۵). بهینه‌سازی تخصیص و برنامه‌ریزی تحویل آب در شبکه‌های آبیاری. *نشریه آبیاری و زهکشی ایران*، ۱۰(۱)، ۲۵-۱۲. https://idj.aid.ir/article_55206.html

- محمدجالی، اسماعیل، و یزدانیان، نازنین. (۱۳۹۳). تحلیل وضعیت بحران آب در کشور و الزامات مدیریت آن. فصلنامه روند، ۲۱(۶۵۶۶)، ۱۴۴-۱۱۷. <https://www.id.ir/files/ver/jf/10000413936604.pdf>
- محمدی قلعه نی، مهدی، و نحوی نیا، محمد جواد. (۱۴۰۱). تحلیل مفاهیم راندمان آبیاری در سطح شبکه آبیاری (مطالعه موردی: شبکه آوان خوزستان). مجله مهندسی آبیاری و آب، ۱۲(۴)، ۱۴۱-۱۵۶. <https://doi.org/10.22125/rwe.2022.150688>
- محمدی، امیر، پرورش ریزی، عاطفه، و عباسی، نادر. (۱۳۹۶). ارزیابی عملکرد هیدرولیکی سازه های تنظیم و توزیع آب در شبکه آبیاری ورامین. مجله هیدرولیک، ۱۲(۳)، ۱-۱۲. <https://doi.org/10.30482/jhyd.2017.52004>
- مددی، ساسان، عمادی، علیرضا، و شاهنظری، علی. (۱۳۹۳). ارزیابی عملکرد کانال اصلی واحد عمرانی شماره یک شبکه آبیاری و زهکشی نجن. مجله پژوهش های حفاظت آب و خاک، ۲۱(۵)، ۱۹۳-۲۰۸. <https://dor.isc.ac/dor/20.1001.1.23222069.1393.21.5.10.3>
- منتظر، علی اصغر، و پاشازاده، نرجس. (۱۳۹۰). ارزیابی عملکرد توزیع آب در شرایط مختلف بهره برداری کانال اصلی غرب شبکه آبیاری دز با استفاده از مدل هیدرولیکی CANALMAN. نشریه آب و خاک، ۲۵(۱)، ۱۲۵-۱۳۹. <https://doi.org/10.22067/jsw.v0i0.8514>
- لیکمه‌ر، سامان، پرورش ریزی، عاطفه، و منعم، محمدجواد. (۱۳۹۶). ارزیابی عملکرد توزیع آب در کانال اصلی شبکه آبیاری کوثر با کنترل خودکار در جهت بالادست و پایین دست. مجله پژوهش آب ایران، ۱۱(۱)، ۱۰۹-۱۱۸. https://iwrj.ku.ac.ir/article_10536.html
- ورجواند، پیمان، آپالان، شکراله، سالمی، نادر، عزیزی، آذرخش، گوشه، محی الدین، و لک زاده، ایرج. (۱۳۹۹). بررسی میدانی تأثیر مدیریت بهره برداری بر روی تلفات آب و رسوب گذاری کانال های آبیاری. نشریه دانش آب و خاک، ۳۰(۲)، ۷۵-۸۹. <https://dor.isc.ac/dor/20.1001.1.20085133.1399.30.2.6.4>

References

- Abbasi, N., & Bahramloo, R. (2018). Investigation on Causes of Destruction of Concrete Lining of Irrigation Canals Constructed on Gypsiferous Soils (A Case Study for Shabankareh Irrigation Network). *Irrigation and Drainage Structures Engineering Research*, 19(70), 69-84. <https://doi.org/10.22092/idser.2018.116684.1280> [In Persian]
- Ahmad, M. T., Haie, N., Gonçalves, J. M., Pinho, J., Yen, H., Yakubu, M. L., ... & Suleimana, A. (2024). Performance assessment and indicators for agricultural water management—A review. *Water and Environment Journal*, 38(2), 192-211. <https://doi.org/10.1111/wej.12913>
- Asadi, M., Koochakzadeh, S., & Sotoudehnia, A. (2011). Guide to Water Flow Measurement. *Iranian National Committee on Irrigation and Drainage Publications*, Tehran, Iran. <https://lib.kashanu.ac.ir/Inventory/4/105065.htm> [In Persian]
- Borkowski, B., Wetula, A., & Bien, A. (2012). Design, optimization, and deployment of a waterworks pumping station control system. *ISA Transactions*, 51(4), 539-549. <https://doi.org/10.1016/j.isatra.2012.03.002>
- Clemmens, A. J. (2012). Water-level difference controller for main canals. *Journal of Irrigation and Drainage Engineering*, 138(1), 1-8. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)IR.1943-4774.0000367](https://doi.org/10.1061/(ASCE)IR.1943-4774.0000367)
- Dayyabu, M., Katsuyuki Shimizu, K., Yamazaki, Y., Nangia, V., Mansouri, A., Belarabi, M. Ousstous, L. (2024). Investigation on water delivery performance and its quantification in large-scale Beni Amir irrigation scheme, Morocco. *Journal of Arid Land Studies*, 34 (S), 45-49. <https://agris.fao.org/search/en/providers/122511/records/66d9c5b3f995ef9c0425d038>
- Delfan Azari, M., & Parvaresh Rizi, A. (2020). Improvement of Maintenance Process of Offtake Structures in Irrigation Canals Based on Monitoring and Analyzing of the Current Situation (Case Study of Northern Behbahan Irrigation Scheme). *Irrigation and Drainage Structures Engineering Research*, 21(79), 73-92. <https://doi.org/10.22092/idser.2020.128597.1413> [In Persian]
- Ghumman, A. R., Khan, Z., & Turrall, H. (2009). Study of feasibility of night-closure of irrigation canals for water saving. *Agricultural Water Management*, 96, 457-464. <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2008.09.009>
- Habibi Kandbon, A., Dosti, M., & Molaghadimi, A. H. (2017). Neyrpic-Modules Evaluation for Intake Structures in the Water Providence to Downstream Areas: A Case Study of the Sefidrud Irrigation and Drainage Network. *Journal of Water and Sustainable Development*, 4(1), 65-72. <https://doi.org/10.22067/jwsd.v4i1.54374> [In Persian]
- Hekmatirad, S., Rezaei, H., & Ghazalbash, B. (2015). Qualitative performance assessment of agricultural water pumping stations (Case study: Pumping stations of the Mahabad Irrigation and Drainage Network). *Journal of Irrigation and Drainage Engineering*, 1-10. <https://www.sid.ir/FileServer/SF/687139401429> [In Persian]
- Hosseini, S. M., & Abrishami, J. (2000). Open Channel Hydraulics. *Imam Reza University Publications*, Mashhad, Iran. <https://www.gisoom.com/book/11317999> [In Persian]
- Jalili, J., Jabali, S. J., Ghamarnia, H., & Moneam, M. J. (2006). Evaluation of irrigation networks using the benchmarking method by determining the relative values of performance indicators. *Journal of Agricultural Engineering Research*, 7(29), 71-88. <https://dor.isc.ac/dor/20.1001.1.26454531.1385.7.4.6.3> [In Persian]
- Kanooni, A., & Monem, M. J. (2016). Allocation and Water Delivery Scheduling Optimization in Irrigation Networks. *Iranian Journal of Irrigation & Drainage*, 10(1), 12-23. https://idj.iaid.ir/article_55206.html [In Persian]
- Kanooni, A., Pouryamanesh, M., Nikpour, M., & Feizi, A. (2019). Evaluation of hydraulic performance and operation of Neyrpic Modules in the main distribution canal (Case study:

- Yamchi irrigation network, Ardabil). *Iranian Journal of Irrigation & Drainage*, 12(6), 1435-1447. https://idj.iaid.ir/article_85909.html [In Persian]
- Madadi, S., Emadi, A., & Shahnazari, A. (2014). Performance evaluation of the main canal in Civil Unit No. 1 of the Tajan Irrigation and Drainage Network. *Journal of Water and Soil Conservation Research*, 21(5), 193-208. <https://dor.isc.ac/dor/20.1001.1.23222069.1393.21.5.10.3> [In Persian]
- Melisse, D.W., Tegegne, M.A., & Ayele, T.M. (2025). Evaluation of hydraulic and hydrologic factors influencing irrigation water use efficiency in the Gomit irrigation scheme, South Gondar, Ethiopia. *Appl Water Sci*, 15, 300. <https://doi.org/10.1007/s13201-025-02659-z>
- Mohammadi Ghaleni, M., & Nahvinia, M. J. (2022). The Analysis of Irrigation Efficiency Concepts at the level of Irrigation Network (Case study: Avan Irrigation Network, khozestan). *Irrigation and Water Engineering*, 12(4), 141-156. <https://doi.org/10.22125/iwe.2022.150688> [In Persian]
- Mohammadi, A., Parvaresh Rizi, A., & Abbasi, N. (2017). Evaluation of Hydraulic Performance of Regulators and Distribution Structures in Varamin Irrigation Network. *Journal of Hydraulics*, 12(3), 1-12. <https://doi.org/10.30482/jhyd.2017.52004> [In Persian]
- Mohammadjani, E., & Yazdani, N. (2014). Analysis of the water crisis in Iran and the requirements for its management. *Ravand Quarterly*, 21(65-66), 117-144. <https://www.sid.ir/fileservers/jf/10000413936604.pdf> [In Persian]
- Montazar, A., & Pashazadeh, N. (2011). Performance Assessment of West Main Canal of Dez in the Different Water Operational Scenarios Using CANALMAN Model. *Water and Soil*, 25(1), 125-139. <https://doi.org/10.22067/jsw.v0i0.8514> [In Persian]
- Moreno, M., Carrión, P., Planells, P., Ortega, J., & Tarjuelo, J. (2007). Measurement and improvement of the energy efficiency at pumping stations. *Biosystems Engineering*, 98(4), 479-486. <http://om.ciheam.org/article.php?IDPDF=800125>
- Nikmehr, S., Parvarsh Rizi, A. and Monem, M. (2017). Performance Assessment of Main Canal of Kosar Irrigation Network Using Upstream and Downstream Automatic Control. *Iranian Water Research Journal*, 11(1), 109-118. https://iwrj.sku.ac.ir/article_10536.html [In Persian]
- Osman, I. S., Schultz, B., Osman, A., & Suryadi, F. X. (2017). Effects of different operation scenarios on sedimentation in irrigation canals of the Gezira Scheme, Sudan. *Irrigation and Drainage*, 66(1), 82-89. <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/abs/10.1002/ird.2023>
- Sajoudi, Z., & Hashemy Shahdany, S. M. (2021). A review of water conveyance and distribution efficiency in Iran's irrigation networks and methods for its estimation. *Journal of Environmental Research and Technology*, 6(9), 75-87. <https://journal.eri.acecr.ir/Article/15984> [In Persian]
- Salemi, H. R. (2014). Hydraulic performance evaluation of intake and water level regulation structures in the Zayandeh-Rud and Doroodzan irrigation networks. *Journal of Agricultural Engineering Research*, 15(1), 81-103. <https://doi.org/10.22092/erams.2014.102153> [In Persian]
- Scanlon, B., Keese, K., Flint, A., Flint, L., Gaye, C., Edmunds, W., & Simmers, I. (2006). Global synthesis of groundwater recharge in semiarid and arid regions. *Hydrol. Process*, 20(15), 3335-3370. <https://doi.org/10.1002/hyp.6335>
- Shahrokhnia, M. A., & Javan, M. (2006). Evaluation of irrigation performance indicators in the Doroodzan Irrigation Network. *Journal of Agricultural Engineering Research*, 7(29), 33-46. https://idser.areeo.ac.ir/article_102577.html [In Persian]
- Sharif-Nejad, A., & Parvaresh-Rizi, A. (2016). Quantitative performance evaluation of an agricultural water pumping station using Data Envelopment Analysis (Case study: Sobili

- Main Pumping Station, Khuzestan Province). *Iranian Journal of Water Research*, 10(3), 175–179. https://iwrj.sku.ac.ir/article_10493.html [In Persian]
- Varjavand, P. , Salamati, N. , Absalan, S. , Azizi, A. , Goosheh, M., & Lakzadeh, I. (2020). Field Investigation of Operational Management Effect on Water Losses and Sedimentation in Irrigation Channels. *Water and Soil Science*, 30(2), 75-89. <https://doi.isc.ac/doi/20.1001.1.20085133.1399.30.2.6.4> [In Persian]
- Zare Abyaneh, H., Heidari, A., & Daneshkar Arasteh, P. . (2019). Evaluation of Water Management Performance in Irrigation Network of Qazvin Plain. *Irrigation and Water Engineering*, 10(2), 76-88. <https://doi.org/10.22125/iwe.2019.100726> [In Persian]
- Zolfagharan, A. (2022). Determination of applied water and water productivity in saffron fields in Khorasan Razavi province. *Advanced Technologies in Water Efficiency*, 2(1), 38-51. <https://doi.org/10.22126/atwe.2022.7535.1015> [In Persian]