

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.zayri@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.	ABSTRACT
Article type: Research Article	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 (Cd) of semicircular side weirs.
Article history: Received 05 June 2025 Received in revised form 09 October 2025 Accepted 16 December 2025 Available online 22 June 2026	Method: The modeling process is based on a dataset comprising 233 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.
Keywords: discharge coefficient, extreme learning machine, XGBoost, sensitivity analysis, Harmonic weir.	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 HT/P ratio (hydraulic head to weir height) as the most influential input parameter in predicting Cd. 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. <i>Advanced Technologies in Water Efficiency</i> , 6(2), 1-23. https://doi.org/10.22126/atwe.2025.12271.1170	
 © The Author(s) Publisher: Razi University. https://doi.org/10.22126/atwe.2025.12271.1170	

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، و مهدی قمشی^۴

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

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

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

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

در باره مقاله	چکیده
نوع مقاله: مقاله پژوهشی	هدف: در این پژوهش، دو مدل یادگیری ماشین شامل ELM و XGBoost با رویکرد بهینه‌سازی بیزی 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 متشکل 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 بیزی 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 با بهره‌گیری از روش‌های سوپول، مورس، آنتروپی 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 سوپول را می‌توان تنها با تغییر در این پارامتر توجیه کرد و تأثیر متقابل آن با سایر پارامترها بسیار ناچیز است.
	نتیجه‌گیری: نتایج حاصل از تمامی روش‌های تحلیل حساسیت بر پایایی و دقت مدل‌های توسعه‌یافته تأکید داشته و نشان می‌دهند که رویکرد ترکیبی یادگیری ماشین و بهینه‌سازی بیزی 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 (۲)، ۱-۲۳.

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



© نویسندگان

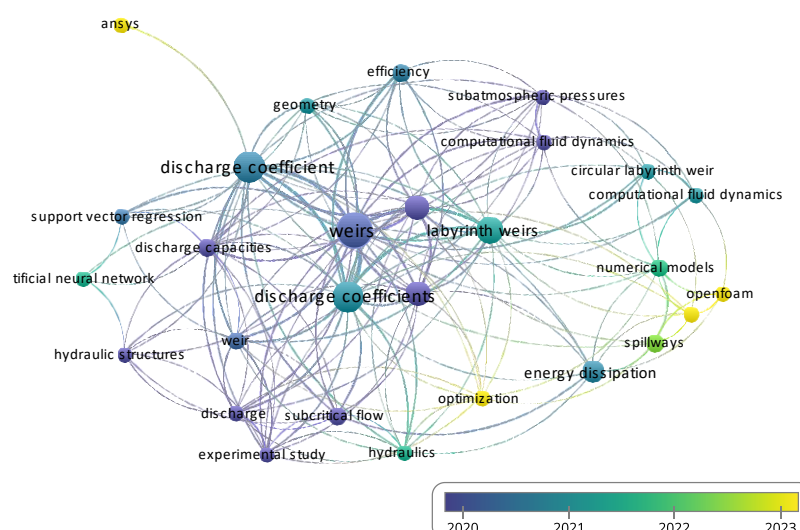
شر: دانشگاه رازی.

مقدمه

سد ها از ارکان اصلی چون بدنه سد، سازه تخلیه کننده سیلاب یا همان سرریز، و سیستم های زهکشی تشکیل یافته اند. چنانچه توان رهاسازی سیلاب از مخزن سد محدود باشد، انتخاب نوع سرریز، در واقع، تلاشی است در راستای بهینه سازی فرآیندی که در آن، دستیابی به بیشترین ظرفیت عبور جریان از سرریز، توأم با حداقل هزینه های اجرایی، مد نظر قرار می گیرد. در این میان، طول و هندسه تاج سرریز دو پارامتر کلیدی، نقش تعیین کننده ای در میزان دبی قابل عبور از آن ایفا می کنند. برای مواجهه با این چالش و به منظور ارتقاء ظرفیت تخلیه، بهره گیری از سرریزهای با پلان غیرمستقیم، موسوم به سرریزهای کنگره ای، به عنوان یک راهکار مؤثر مطرح می گردد. این نوع خاص از سرریزها، نه تنها توان عبور جریان را به طرز چشمگیری بهبود می بخشد، بلکه در مهار افزایش سطح آب در مخزن به هنگام وقوع سیلاب نیز کارآمد ظاهر می شوند. افزون بر این، چنین ساختارهایی در نقش مستهلک کننده های کارآمد انرژی جنبشی جریان، بهبود فرایند هوادهی آب و به طور کلی، سازه هایی برای افت انرژی، کاربردهای قابل توجهی می یابند (قادری و همکاران^۱، ۲۰۲۴؛ حسین و جلیل^۲، ۲۰۲۴؛ اکینگلاری^۳، ۲۰۲۴). سرریزهای کنگره ای در اشکال و طرح های گوناگونی، نظیر پلان های مثلثی، دوزنقه ای، دایره ای و یا چندضلعی، موجود می باشند. 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، می باشد. پژوهشگران، به طور پیوسته، در پی یافتن و شناسایی طرحی بهینه برای این سازه ها هستند؛ طرحی که در عین تضمین عملکردی در سطح بالا، بتواند هزینه های 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 کلیدواژه هایی می پردازد که پژوهشگران پیشین در مطالعات مرتبط با ضریب دبی جریان در سرریزها، بر اساس داده های پایگاه استنادی اسکوپوس، بیشترین کاربرد را برای آنها در نظر دارند. چنانکه از این بررسی استنباط می شود، پیوند روش های میان تکنیک های بهینه سازی و روش های دینامیک سیالات محاسباتی (CFD) با طراحی و تحلیل سرریزهای کنگره ای، خود گواهی بر تلاش های مستمر جهت بهبود و ارتقاء عملکرد این سازه ها در طول پنج سال اخیر است.



شکل ۱. واژگان کلیدی در تحقیقات گزارش شده در مدل سازی هیدرولیکی سرریزهای کنگره ای

¹ Ghaderi et al

² Hussein & Jalil

³ 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 ۲.۳۳ 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 پارامتر بی‌بعد 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 به‌دست‌آمده 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 دنداندار، 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 تحلیلی صریح، در شبیه سازی ضریب دبی، عملکردی مطلوب و قابل قبول از خود به نمایش گذاشته است. شفیی 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. یافته های این پژوهش، مبین آن بود که مدل ترکیبی ANFIS-FFA در عرصه پیش بینی ضریب دبی برای سرریزهای مثلثی شکل، عملکردی برتر و کارایی بهتری را در مقایسه با مدل استاندارد ANFIS به نمایش می گذارد. بنکداری و همکاران^۱ (۲۰۲۰)، با بهره گیری از تکنیک برنامه نویسی 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 پیش بینی 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 هم افزایی با رگرسیون بردار پشتیبان (SVR) که از آن با عنوان SVR_ISADE یاد می شود، پرداخته و نتایج حاصل، گواهی بر عملکرد برتری رویکرد SVR_ISADE در پیش بینی 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 سیکل های سرریز (N) بر ضریب دبی در سرریزهای کنگره ای با پلان نیم دایره و سینوسی پرداختند. نتایج ایشان نشان می دهد که در بازه نسبت های ($H_T/P < 0.35$)، ضریب دبی برای هر دو نوع سرریز کنگره ای ابتدا روندی صعودی و سپس نزولی را تجربه می کند. علاوه بر این، مشخص گردید که ظرفیت عبور جریان در این سرریزهای کنگره ای، در مقایسه با سرریزهای خطی، به میزان ۳۳ درصد برتری دارد. سواعدی و همکاران^۴ (۲۰۲۴)، با استفاده از سری داده آزمایشگاهی، به بررسی تأثیر پارامترهای هندسی و هیدرولیکی بر ضریب دبی سرریز کنگره ای نیم دایره ای پرداختند. آن ها با به کارگیری سه مدل یادگیری ماشین شامل رگرسیون بردار پشتیبان (SVR)، مدل MARS و مدل جنگل تصادفی (RF)، مدل MARS را به عنوان دقیق ترین روش در پیش بینی ضریب دبی معرفی کردند و عمق نسبی (H_T/P) را مؤثرترین پارامتر دانستند. سلیمانی و همکاران^۵ (۲۰۲۲)، با به کارگیری روش های رگرسیون خطی چندگانه (MLR) و رگرسیون غیرخطی، در پی تدوین یک معادله تجربی برای تخمین دبی سرریزهای با مقطع نیم دایره ای برآمدند. مدل های ارائه شده توسط ایشان، با دستیابی به ضرایب تعیین (R^2) به مقادیر ۰/۸۴۹۸ و ۰/۸۵۸۴، انطباق قابل قبولی را با داده های آزمایشگاهی به اثبات رساندند. حقیبن و همکاران^۶ (۲۰۱۸)، با ارائه یک رویکرد داده محور، به تخمین ضریب دبی (Cd) در سرریزهای پله ای پرداختند. مدل بهینه سازی شده توسط ایشان، بهبود چشمگیر ۸۶/۱۳ درصدی در شاخص عملکرد را به ارمغان آورد؛ این دستاورد، تایید بر پتانسیل قابل توجه روش های مبتنی بر داده در افزایش دقت پیش بینی های مربوط به دبی است. لی و همکاران^۷ (۲۰۲۴)، با بهره گیری از ماشین های بردار پشتیبان (SVM) در تلفیق با سه الگوریتم بهینه سازی، به توسعه مدلی جهت پیش بینی ضریب دبی (Cd) در سرریزهای کناری با مقطع نیم دایره (SCSWs) پرداختند. یافته های ایشان تاکید بر آن است که رویکرد مبتنی بر ماشین بردار پشتیبان و الگوریتم ژنتیک (GASVM)، از دقت برتری در پیش بینی و قابلیت

¹ Bonakdari et al² Emami et al³ Safarrazavi et al⁴ Savaedi et al⁵ Suleimany et al⁶ Suleimany et al⁷ 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 این رو، 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، آنتروپی 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 جمع‌آوری 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:

$$Q = \frac{2}{3} C_d L \sqrt{2gH_T^{1.5}} \quad (۱)$$

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

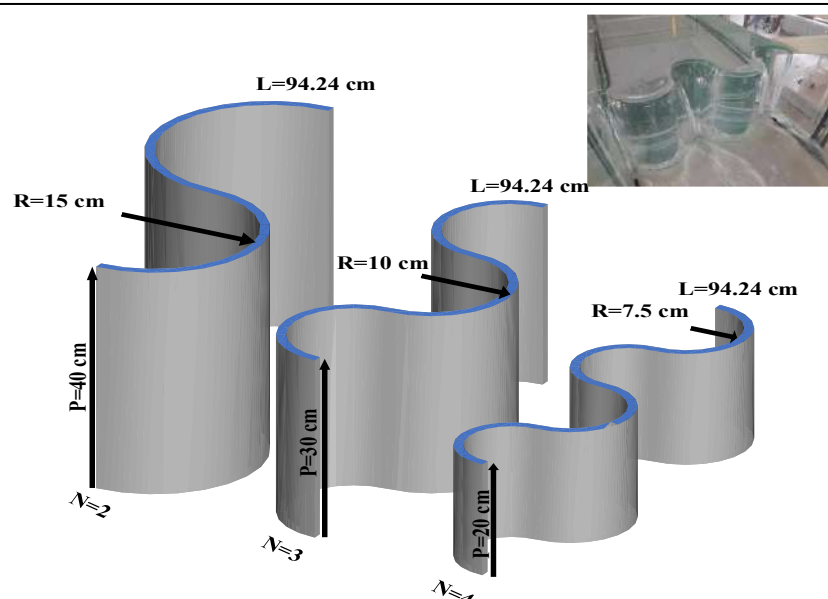
$$Cd = F_1(N, R, L, B, H_T, P, g, \rho, \mu, \delta) \quad (۲)$$

در این رابطه، N معرف تعداد سیکل کنگره، R نشانگر شعاع انحنای هر سیکل نیم‌دایره، B بیانگر پهنای کانال، و P نماد ارتفاع سرریز است. همچنین، ρ ، μ و σ 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 صرف نظر 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 شکالا^۲ (۱۹۷۱)، از سه سانتی‌متر فزونی یابد، می‌توان از آن‌ها صرف نظر نمود. بر این اساس، و با استفاده از تحلیل ابعادی، معادله (۲) به صورت زیر قابل بازنویسی خواهد بود:

$$Cd = F_2\left(N, \frac{R}{P}, \frac{L}{P}, \frac{B}{P}, \frac{H_T}{P}\right) \quad (۳)$$

^۱ Extreme Learning Machine

^۲ Rao & Shukla



شکل ۲. پارامترهای موثر بر ضریب دبی سرریز کنگره‌ای نیم‌دایره طرح هارمونی

در پژوهش حاضر و در راستای توسعه مدل‌های محاسبات نرم، مجموعه داده‌های آزمایشگاهی به منظور برآورد ضریب تخلیه (Cd) در سرریزهای کنگره‌ای با پلان دایره‌ای مستخرج از پژوهش‌های ارهام نمازی و مظفری^۱ (۲۰۲۳) و یل‌دیز و همکاران^۲ (۲۰۲۴) استفاده شده است. این مجموعه داده‌ها، شامل بر ۲۱۵ آزمایش انجام شده 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 به صورت تک سیکل ($N=1$) به تعداد ۱۸ آزمایش مبنای تحلیل‌های این پژوهش را تشکیل داده‌اند. بدین ترتیب، مجموعه‌ای بالغ بر ۲۳۳ نتیجه آزمایشگاهی، به منظور 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 توسعه یافته، 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 به عنوان ساختار نهایی مدل انتخاب می‌گردد. در نهایت، مدل بهینه شده با داده‌های آزمون ارزیابی شده و نتایج پیش‌بینی و عملکرد مدل با مدل‌های پایه مقایسه می‌شود. جدول (۱) شاخص‌های آماری تفکیک شده 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. به طور کلی، این نمودار نشان می‌دهد همبستگی خطی ضعیفی بین متغیرها و Cd وجود دارد، بنابراین پیش‌بینی دقیق بر اساس روش‌های کلاسیک رگرسیون دشوار است.

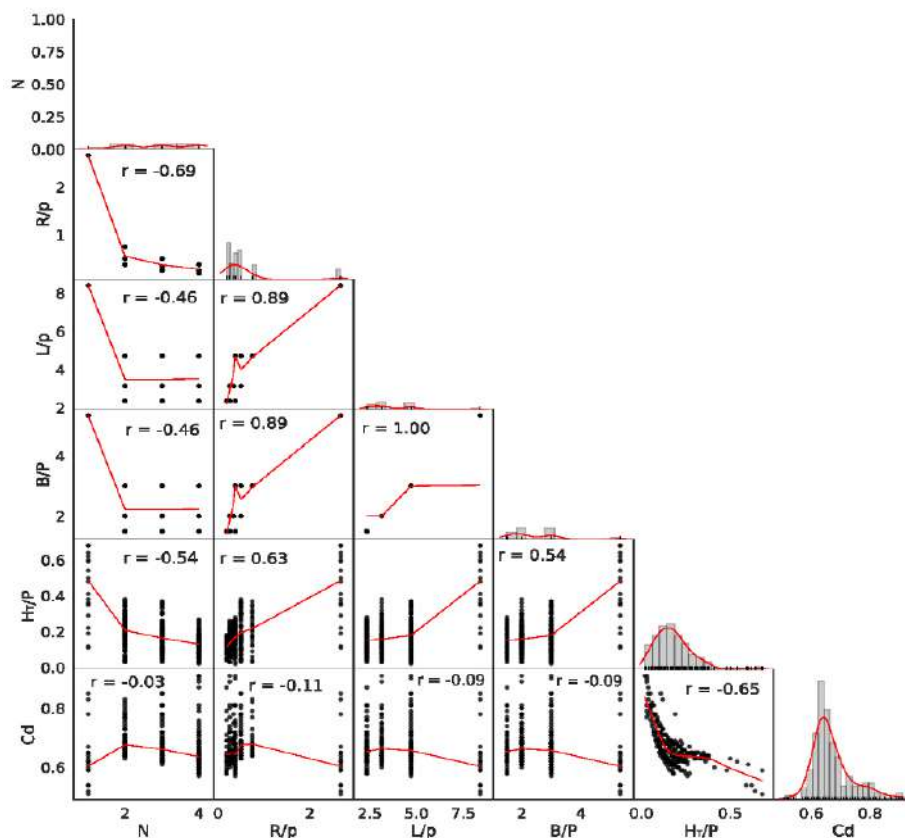
^۱ Arham Namazi & Mozaffari

^۲ Yıldız et al

^۳ Arham Namazi & Mozaffari

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

مرحله	شاخص	cd	N	R/p	L/p	B/p	H/p
آموزش	کمینه	۰/۵۱۰	۱	۰/۱۸۷	۲/۳۵۶	۱/۵۰۰	۰/۰۲۰
	بیشینه	۰/۹۱۰	۴	۲/۶۶۷	۸/۴۰۰	۵/۳۳۳	۰/۶۸۰
	میانگین	۰/۶۷۲	۲/۹۰۳	۰/۵۴۶	۳/۷۹۴	۲/۴۱۴	۰/۱۸۷
	انحراف معیار	۰/۰۷۱	۰/۹۵۱	۰/۵۹۶	۱/۵۴۸	۰/۹۸۳	۰/۱۲۰
اعتبارسنجی	کمینه	۰/۵۴۰	۱	۰/۱۸۷	۲/۳۵۶	۱/۵	۰/۰۳۰
	بیشینه	۰/۸۹۰	۴	۲/۶۶۷	۸/۴۰۰	۵/۳۳۳	۰/۶۲۰
	میانگین	۰/۶۷۲	۲/۷۵۹	۰/۶۶۵	۴/۱۷۳	۲/۶۵۵	۰/۱۹۲
	انحراف معیار	۰/۰۶۹	۰/۹۷۹	۰/۷۰۸	۱/۷۳۱	۱/۰۹۸	۰/۱۱۳

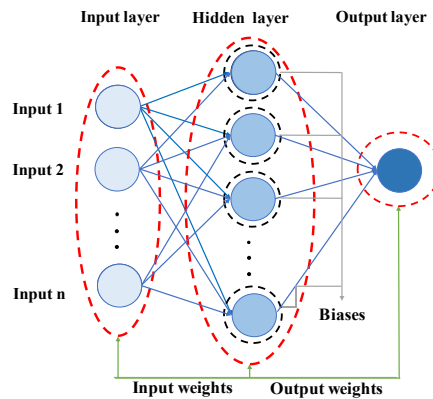


شکل ۳. نمودار هیستوگرام و ماتریس همبستگی بین همه متغیرها

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» می گردد که از مقادیر تصادفی این دو ماتریس و تابع فعال سازی مناسب حاصل می شود.



شکل ۴. معماری روش ELM

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

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

در این معادله، متغیرهای ورودی با نماد x_i نشان داده شده اند و خروجی متناظر با این ورودی ها با y_i نمایش داده می شود. همچنین، بایاس لایه پنهان در شاخص i با پارامتر b_i مشخص می گردد. لازم به ذکر است که تمامی بایاس های لایه های پنهان به صورت تصادفی مقداردهی اولیه می شوند.

در فرایند بهینه سازی مدل یادگیری افراطی ELM، دو ابرپارامتر اصلی شامل تعداد نرون های لایه پنهان^۲ و نوع تابع فعال سازی^۳ به منظور بهبود دقت پیش بینی مورد ارزیابی و تنظیم قرار گرفتند. پارامتر n_hidden بیانگر تعداد نرون ها در لایه میانی مدل است که نقش مهمی در ظرفیت یادگیری و پیچیدگی مدل ایفا می کند، درحالی که تابع فعال سازی نوع نگاشت غیرخطی بین لایه ها را مشخص می سازد و بر توان مدل در استخراج ویژگی های پنهان داده ها اثرگذار است. برای پارامتر تعداد نرون های لایه پنهان، بازه ای بین ۱۰ تا ۵۰۰ انتخاب شد که طیف گسترده ای از ظرفیت مدل را شامل می شود. در مورد تابع فعال سازی 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 می سازد. مطابق شکل (۵)، داده های ورودی (x_i, y_i) به مدل داده می شوند تا اولین درخت تصمیم $f_1(x)$ ساخته شود (چن و گسترین^۵، ۲۰۱۶؛ و همکاران^۶، ۲۰۲۲). خروجی این درخت معمولاً پیش بینی اولیه ای 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:

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

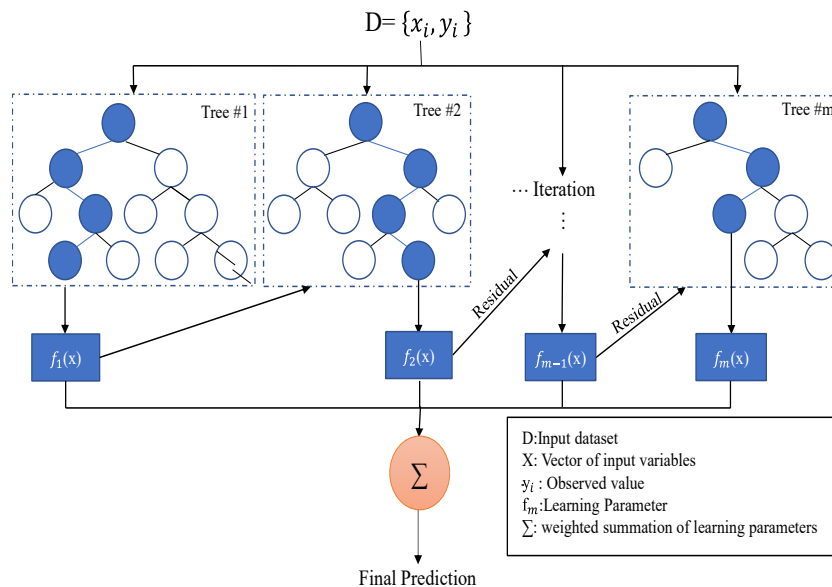
در این رابطه، $f_t(x_i)$ یادگیرنده جدید در مرحله t است، $f_i^{(t-1)}$ پیش‌بینی مرحله قبلی و x_i ورودی مدل است. همان‌طور که در نمودار ۵ دیده می‌شود، در هر مرحله تکرار، مدل جدید $f_t(x)$ براساس باقیمانده‌ی مدل قبلی ساخته می‌شود تا به بهبود پیش‌بینی کمک کند. تابع هدف مدل به شکل زیر تعریف می‌شود:

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

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:

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

که در آن ω بردار امتیاز گره‌های برگ، 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. فلوچارت مدل *XGBoost* (پیرایی و همکاران^۲، ۲۰۲۳)

^۱ Residual

^۲ Piraei et al

در فرایند بهینه سازی مدل XGBoost با استفاده از الگوریتم بهینه سازی بیزی^۱، شش ابرپارامتر کلیدی شامل عمق درخت ها^۲، نرخ یادگیری^۳، تعداد درخت ها^۴، درصد نمونه برداری^۵، نسبت انتخاب ویژگی ها^۶ و پارامتر جریمه تقسیم^۷ مورد ارزیابی و تنظیم قرار گرفتند. این ابرپارامترها به ترتیب نقش تعیین کننده ای در کنترل پیچیدگی مدل، جلوگیری از بیش برازش، و بهبود دقت پیش بینی ایفا می کنند. 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)، محدوده ای اولیه و نسبتاً وسیع برای هر ابرپارامتر در نظر گرفته شد. این محدوده به گونه ای انتخاب گردید که احتمال وجود مقدار بهینه در آن بالا باشد. سپس با ثابت نگه داشتن سایر ابرپارامترها در مقادیر پیش فرض، 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 داده های آزمایشگاهی محاسبه گردید. چنانچه مقدار R^2 از ۰/۷۵ بیشتر می بود، مقدار مربوطه به عنوان مقدار قابل قبول ذخیره می شد. در نهایت، بیشینه و کمینه مقادیر ذخیره شده برای هر ابرپارامتر، به ترتیب به عنوان کران بالایی و پایینی دامنه جستجو در فرایند بهینه سازی تعیین شدند.

جدول ۲. محدوده پارامترهای قابل تنظیم مدل XGBoost

مؤلفه	محدوده تغییرات
عمق درخت ها	۳ تا ۲۰
نرخ یادگیری	۰.۰۱ تا ۰.۵
تعداد درخت ها	۵۰ تا ۱۰۰۰
درصد نمونه برداری	۰/۳ تا یک
نسبت انتخاب ویژگی ها	۰/۳ تا یک
پارامتر جریمه تقسیم	صفر تا ۱۰

این دامنه ها به عنوان ورودی در الگوریتم بهینه سازی بیزی تعریف شده و موجب تسریع در همگرایی مدل به سمت ترکیب بهینه از ابرپارامترها گردیدند. روند دستیابی به توسعه مدل بهینه سازی شده XGBoost از کتابخانه sklearn و bayes_opt در زبان برنامه نویسی 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 نمونه گیری تصادفی و اجرای مکرر شبیه سازی است، به طوریکه در هر تکرار تنها یکی از پارامترها تغییر می کند. اثر اولیه تغییر هر پارامتر به صورت رابطه (۸) محاسبه می شود

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

$$d_i(X) = \frac{f(x_1, \dots, x_{i-1}, x_i + \Delta, x_{i+1}, \dots, x_n) - f(x_1, \dots, x_{i-1}, x_i, \dots, x_n)}{\Delta} \quad (8)$$

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، نسخه‌های اصلاح شده از میانگین اثر اولیه نیز با عنوان μ^* به‌صورت رابطه (۹) پیشنهاد شده است (کینگ و پررا^۱، ۲۰۱۳).

$$\mu_i^* = \frac{1}{R} \left| \sum_{j=1}^R d_i(X^{(j)}) \right| \quad (9)$$

۴-۲. روش سوپول

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

$$V(y) = \sum_{i=1}^n V_i + \sum_{i \leq j \leq n} V_{ij} + \dots + \sum_{i \leq l} V_{l \dots n} \quad (10)$$

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.

$$S_i = \frac{V_i}{V(y)} \quad (11)$$

$$S_{ij} = \frac{V_{ij}}{V(y)} \quad (12)$$

$$S_{Ti} = \frac{V_{\sim i}}{V(y)} \quad (13)$$

در این معادلات، $V_{\sim i}$ نمایانگر سهم تمامی پارامترها به‌استثنای پارامتر i در واریانس خروجی مدل است. برای محاسبه این شاخصه ۱ 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.

۴-۳. روش آنتروپی

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

$$H(x) = -\sum_j P_j \ln P_j \quad (14)$$

¹ King and Perera

² Global sensitivity analysis

³ Sobol

⁴ Li et al

⁵ 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 می شود:

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

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

در شاخص U ، مقدار صفر نشان دهنده 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 می کند (میشرا و همکاران^۱، ۲۰۰۳).

۴-۴. روش SHAP

روش SHAP یک رویکرد مستقل از مدل برای تفسیر پیش بینی های حاصل از هر مدل یادگیری ماشین است (لوندبرگ و لی^۲، ۲۰۱۷). این روش با بهره گیری از نظریه بازی ها و تبیین های محلی، سهم هر ویژگی را در پیش بینی نهایی بر اساس اثرات نهایی (حاشیه ای) آن توزیع می کند. به منظور اطمینان از توزیع منصفانه مشارکت ویژگی ها، مقادیر SHAP با استفاده از رابطه (۱۷) محاسبه می شوند.

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

در اینجا، $\phi_i(v)$ نشان دهنده سهم یا مشارکت ویژگی i است. N مجموعه ای از تمام ویژگی های موجود در مدل بوده و n بیانگر تعداد کل ویژگی ها است. S زیرمجموعه ای از ویژگی ها بدون در نظر گرفتن i است، درحالی که $v_x(S)$ پیش بینی مورد انتظار برای زیرمجموعه S را نشان می دهد. عبارت $[v_x(S \cup \{i\}) - v_x(S)]$ تغییر در مقدار پیش بینی به واسطه حضور ویژگی i را نشان می دهد.

۵. معیارهای ارزیابی

به منظور ارزیابی مدل های مورد استفاده در این تحقیق از شش شاخص های 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:

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

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

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

¹ Mishra et al

² Lundberg and Lee

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

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

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

در رابطه‌های فوق O_i مقادیر ضریب دبی مشاهداتی (واقعی)، P_i مقادیر ضریب دبی پیش‌بینی شده، $\bar{O}_i$ 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، MAPE و RAE نزدیک به صفر، نشان‌دهنده دقت بیشتر و عملکرد بهتر مدل هستند.

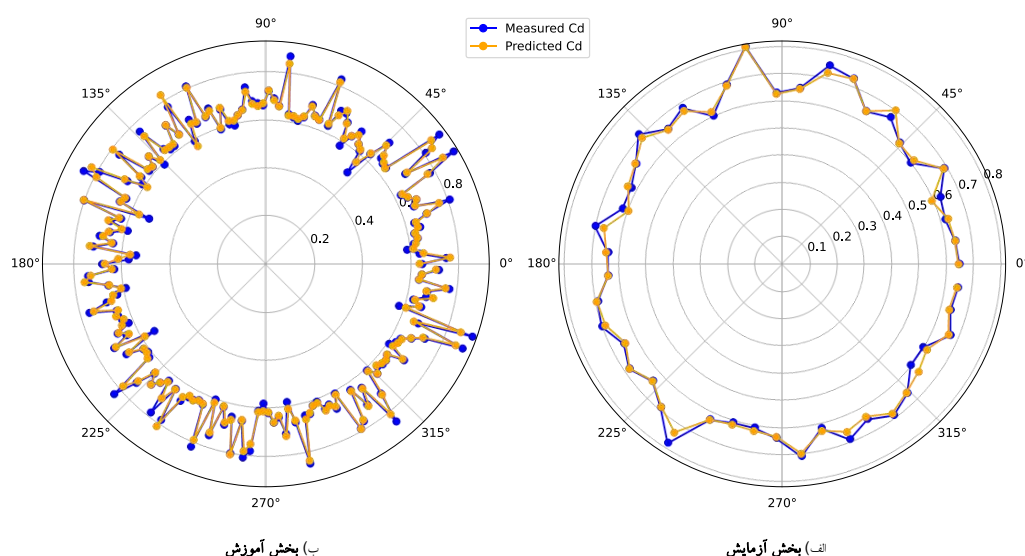
یافته‌های پژوهش

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 نیمه‌دایره‌ای 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 سریزهای نیم‌دایره الف) بخش آزمایش و ب) بخش آموزش

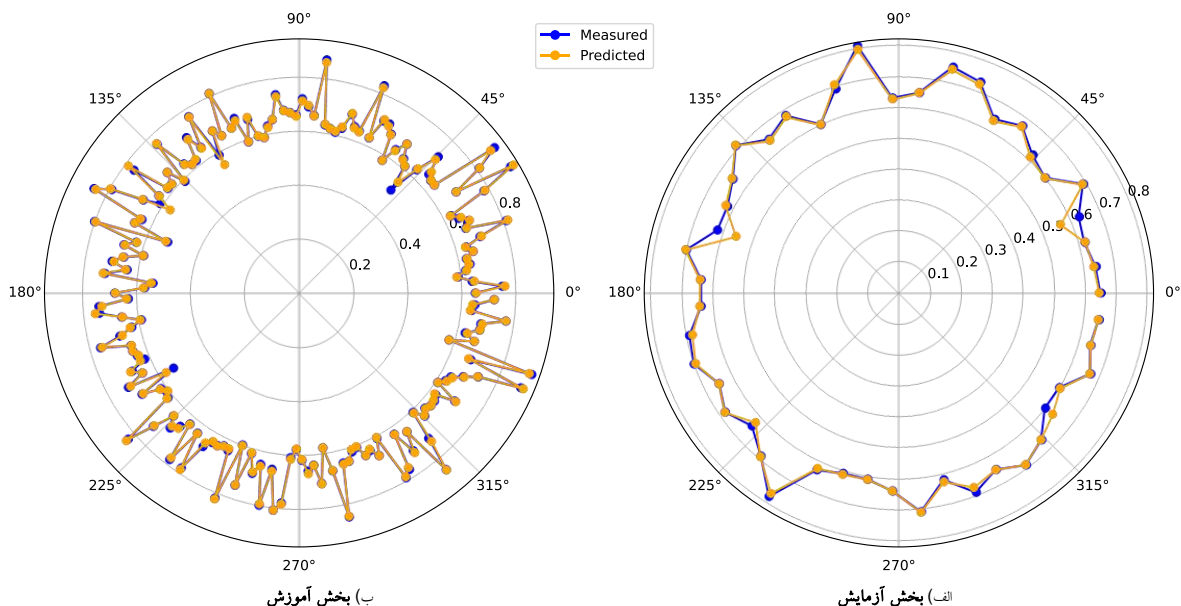
۲. نتایج مدل *ELM*

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 نرون‌های 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 قابل‌توجهی 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>	۳ = 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
	۲۲ = تعداد نرون

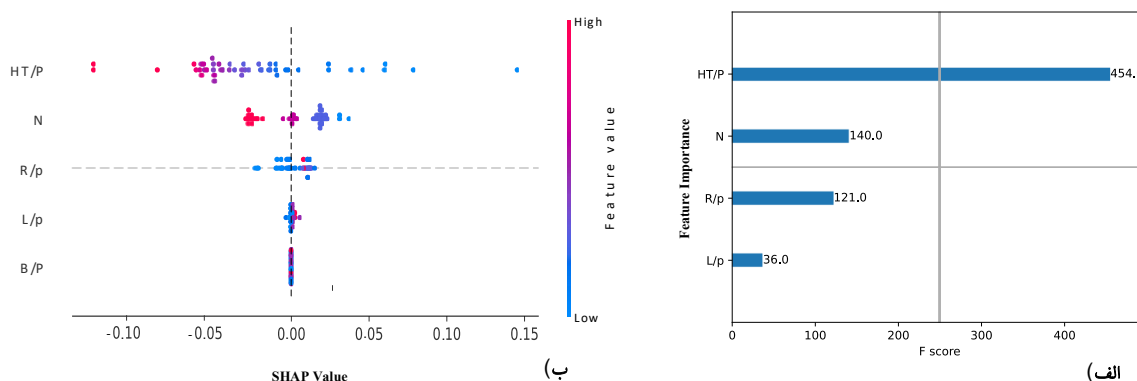
مقایسه نمودارهای قطبی در شکل (۷) حاصل از مقادیر واقعی و پیش‌بینی شده برای دو بخش آموزش و آزمون نیز بیانگر هم‌راستایی و انطباق بالای مدل با داده‌های واقعی است. الگوهای ترسیمی در این نمودارها نشان می‌دهند که مدل ELM با ساختار بهینه همانند مدل Xgboost توانسته است روند تغییرات Cd را با دقت بالا بازسازی کند.



شکل ۷. نمودارهای قطبی مربوط به مقادیر پیش‌بینی شده مدل ELM در برابر مقادیر واقعی ضریب دبی (Cd) برای سریزهای نیم‌دایره الف) بخش آزمایش و ب) بخش آموزش

۳. نتایج تحلیل حساسیت

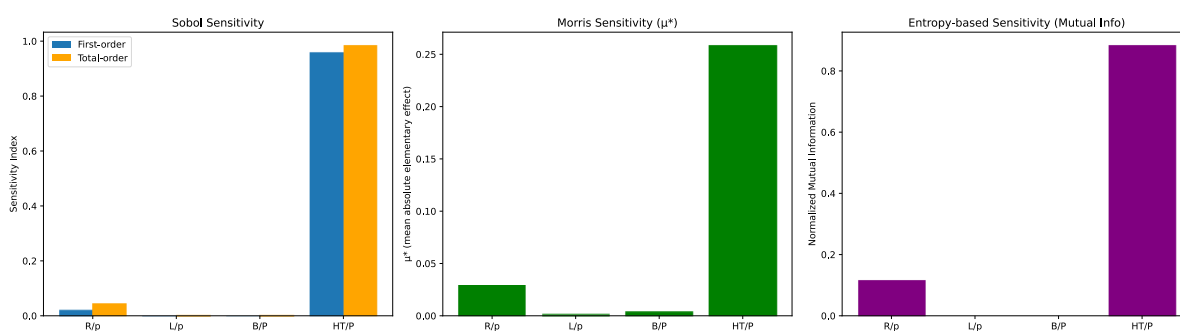
شکل (۸-الف) ارائه شده تحلیل دقیقی از اهمیت و تأثیر ویژگی‌ها در مدل XGBoost ارائه می‌دهند. بر اساس این نمودار که محور افقی تعداد دفعاتی که ویژگی در تقسیم‌گرهای درخت استفاده شده است، اهمیت متغیر H_T/P با امتیاز ۴۵۴ بالاترین نقش را در پیش‌بینی مدل ایفا کرده و مهم‌ترین عامل در تصمیم‌گیری مدل بوده است. پس از آن، متغیرهای N با امتیاز ۱۴۰، 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 به کار 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 سوبول (تحلیل واریانس جهانی)، روش موریس (اثر اولیه میانگین) و روش مبتنی بر آنترپوی (اطلاع متقابل) استفاده شد. نتایج هر سه روش نیز، برتری متغیر H_T/P را به عنوان مهم ترین پارامتر ورودی به وضوح نشان می دهند. مطابق شکل (۹) در روش سوبول، 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 می توان تنها با تغییر در این پارامتر توجیه کرد و تأثیر متقابل آن با سایر پارامترها بسیار ناچیز است. در مقابل، پارامترهای R/p و L/p و B/p تأثیر بسیار ناچیزی دارند به طوری که شاخص کل آن ها به سختی از مقدار ۰/۰۲ تجاوز می کند. 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 می شود، اما تأثیر آن در مقایسه با H_T/P بسیار پایین تر است. در نهایت، در روش اطلاع متقابل نیز بیشترین حساسیت به H_T/P اختصاص دارد به طوری که مقدار نرمال شده آن حدود ۰/۸۷ بوده و R/p بافاصله زیاد و مقدار حدودی ۰/۱۳ در رتبه دوم قرار می گیرد، درحالی که L/p و B/p تقریباً اثر قابل ذکری ندارند.

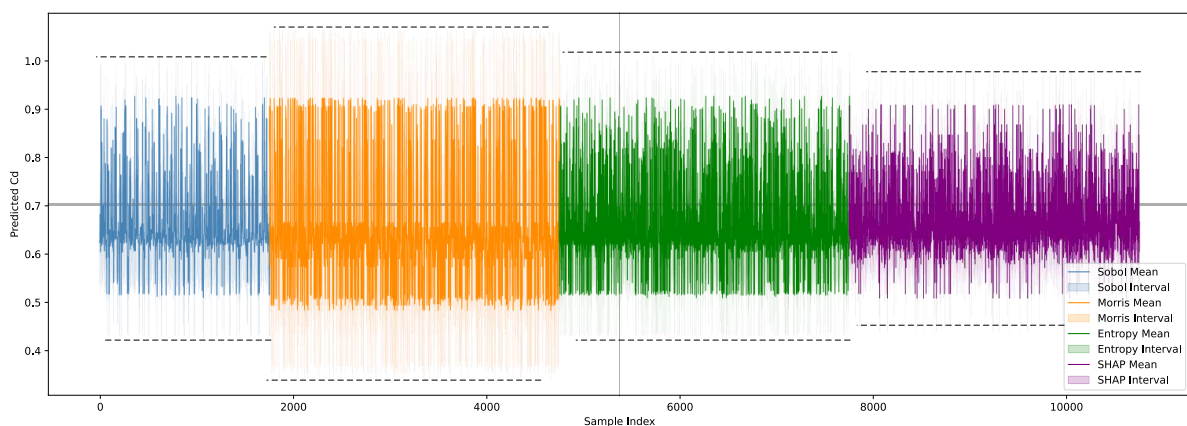
مقایسه کلی این پنج روش نشان می دهد که به طور هم راستا پارامتر H_T/P را به عنوان مؤثرترین ورودی شناسایی کرده اند که نشان از پایایی نتایج تحلیل حساسیت و اعتبار مدل مورداستفاده دارد. همچنین، اتفاق نظر این روش ها می تواند مبنای تصمیم گیری برای کاهش بعد مسئله و طراحی آزمایش های بعدی قرار گیرد.



شکل ۹. آنالیز حساسیت با استفاده از روش های آنترپوی، موریس و سوبول

در شکل (۱۰) نمودار چهار روش مختلف نمونه گیری برای تحلیل حساسیت مدل XGBoost را مقایسه می کند. محور افقی معرف ایندکس نمونه برداری است که برای هر چهار روش آنالیز حساسیت برابر ۳۰۰۰ در نظر گرفته شده است. محور عمودی مقدار پیش بینی شده برای متغیر هدف (Cd) است. برای هر روش، میانگین پیش بینی ها به صورت خط پرن رنگ و نوار بازه

(interval) که نمایانگر تغییرات ($\pm$ انحراف معیار) است با رنگی روشن تر ترسیم شده است. به طور کلی، توزیع خروجی مدل در همه روش ها 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 روش ها، مشاهده می شود که روش سوبول (آبی) و آنتروپی (سبز) دارای بازه های نوسان متعادل هستند که نشان از پایداری نسبی پیش بینی ها در این نمونه گیری ها دارد. روش موریس (نارنجی) دارای گستره نوسان بزرگ تری است که ممکن است ناشی از ماهیت تصادفی تر یا ساختار وابسته تری به پارامترهای ورودی باشد. در مقابل، آنالیز SHAP (بنفش) اگرچه مبتنی بر خروجی مدل است، اما بازه های نوسان آن محدودتر به نظر می رسد که نشان دهنده این است که ویژگی های انتخاب شده توسط SHAP در محدوده ای پایدار اثرگذار هستند. این نتیجه می تواند 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 می کند. در نهایت، استفاده ترکیبی از این روش ها می تواند تحلیل جامع تری از پایداری و حساسیت مدل نسبت به ورودی ها فراهم کند.



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

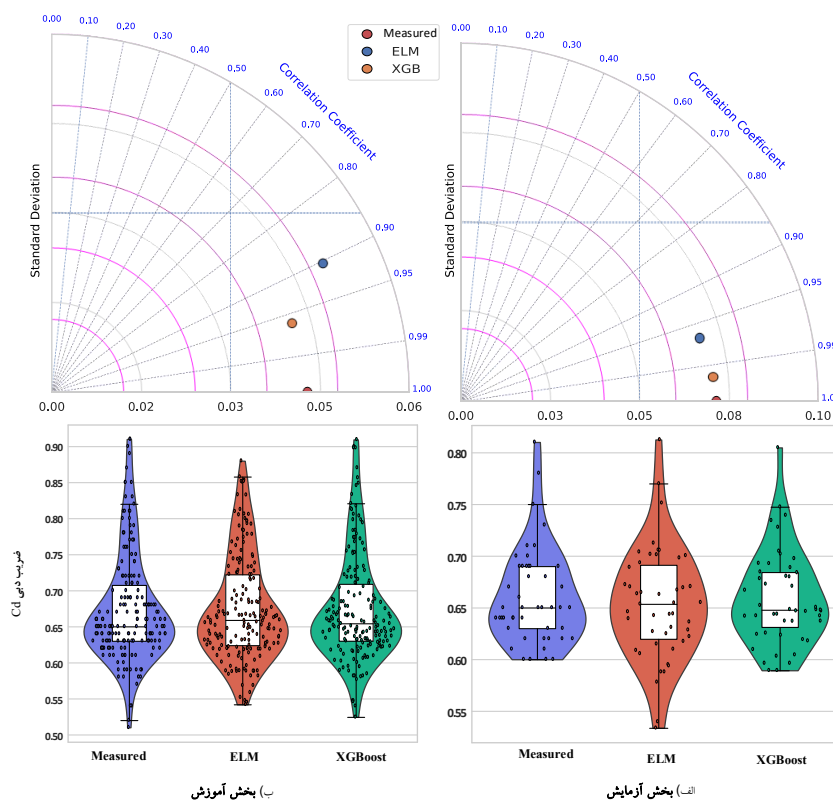
بحث

در این مطالعه، عملکرد دو مدل یادگیری ماشین XGBoost و ELM در پیش بینی مقادیر ضریب دبی (Cd) تحت نمونه گیری های حاصل از چهار روش آنالیز حساسیت سوبول، موریس، آنتروپی و SHAP مورد بررسی قرار گرفت. هر چهار روش مهم ترین پارامتر تأثیرگذار را متغیر H_T/P معرفی نمودند. برای ارزیابی عملکرد مدل های یادگیری ماشین، از نمودار تیلور و ویولن مطابق شکل (۱۱) استفاده شد. با تحلیل دقیق نمودارهای تیلور برای ارزیابی عملکرد مدل های پیش بینی ضریب دبی (Cd) در دو بخش آموزش و آزمایش، می توان تصویری جامع از دقت، همبستگی و پایداری هر مدل به دست آورد. در نمودار تیلور مربوط به بخش آموزش (نمودار سمت چپ)، داده های اندازه گیری شده (Measured) با انحراف معیار حدود $0/48$ و ضریب همبستگی یک به عنوان مرجع قرار گرفته اند. مدل XGBoost با قرارگیری بسیار نزدیک به نقطه مرجع و داشتن ضریب همبستگی بالا در حدود $0/97$ و انحراف معیار تقریباً برابر با داده های واقعی، عملکرد بسیار دقیقی در یادگیری از داده ها نشان داده است. در مقابل، مدل ELM که با نقطه آبی مشخص شده، ضریب همبستگی پایین تری در حدود $0/93$ دارد و موقعیت آن دورتر از داده های 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 پایین تر (تقریباً ۰/۹ یا کمتر)، فاصله بیشتری از نقطه مرجع دارد. این نشان می دهد که XGBoost نه تنها در مرحله آموزش دقت بالایی دارد و رفتار ضریب دبی را دقیق تر پیش بینی می کند.

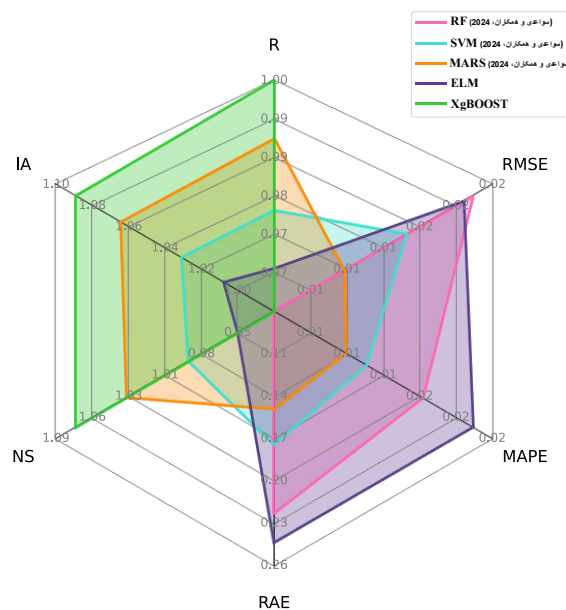
نمودارهای ویولن نمایش داده شده توزیع مقادیر ضریب دبی (Cd) را برای داده های اندازه گیری شده و دو مدل یادگیری ماشین ELM و XGBoost در دو بخش آزمایش (شکل ۱۱-الف) و آموزش (شکل ۱۱-ب) به تصویر می کشند. در بخش آموزش، مقدار میانه ی Cd برای داده های واقعی حدود ۰/۷ بوده و توزیع نسبتاً متراکمی در این محدوده دیده می شود. مدل ELM در این بخش میانه ای حدود ۰/۶۹ دارد و توزیع آن گرایش بیشتری به ناحیه پایین تر (حدود ۰/۶۵ تا ۰/۷) دارد، در حالی که مدل XGBoost با میانه ای تقریباً برابر با ۰/۷ و توزیعی متراکم در اطراف آن، بسیار نزدیک به داده های واقعی عمل کرده است. همچنین، دامنه ی تغییرات در XGBoost به نسبت مقارن تر و نرمال تر است که نشان دهنده دقت و ثبات بهتر این مدل در مرحله آموزش است. در بخش آزمایش، توزیع داده های واقعی در محدوده ۰/۶۵ تا ۰/۷ متمرکز است و میانه ی آن حدود ۰/۶۷ است. مدل ELM در این بخش با میانه ای در حدود ۰/۶۶ و دامنه ی نسبتاً پهن و کشیده ای که به سمت مقادیر بالاتر و پایین تر انحراف دارد، دقت کمتری نسبت به بخش آموزش نشان می دهد. از سوی دیگر، مدل XGBoost در بخش آزمایش نیز با میانه ای نزدیک به ۰/۶۷ و توزیعی متمرکزتر، تطابق بهتری با داده های واقعی دارد. پهنای کمتر نمودار ویولن برای XGBoost به ویژه در مرکز داده ها (۰/۶۵ تا ۰/۷) نشان دهنده همگرایی بهتر پیش بینی ها در اطراف مقدار واقعی است. به طور کلی، تحلیل این دو نمودار نشان می دهد که مدل XGBoost هم در مرحله آموزش و هم در مرحله آزمون، در بازتولید و پیش بینی ضریب دبی عملکرد بهتری نسبت به مدل ELM داشته و با پراکندگی کمتر، میانه نزدیک تر به داده های واقعی و توزیع متمرکزتر، گزینه ای دقیق تر و پایدارتر برای مدل سازی به شمار می رود.



شکل ۱۱. دیاگرام تیپور 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 نوسانی‌تر 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 محدود کردن 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 اسپیلاین^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 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

¹ Random forest

² Support Vector Machine

³ multivariate adaptive regression spline

⁴ Savaedi et al

نتیجه گیری

پیش بینی دقیق ضریب دبی در سرریزهای نیم دایره طرح هارمونیک، برای طراحی و عملکرد بهینه سیستم های هیدرولیکی از اهمیت بالایی برخوردار است. به دلیل ارتباط پیچیده بین ضریب دبی و پارامترهای مؤثر بر آن، معادلات تجربی در پیش بینی دقیق این ضریب با محدودیت هایی مواجه هستند. در مطالعه حاضر، دو مدل ترکیبی جدید یادگیری ماشین با عنوان ELM و XGBoost توسعه داده شده است که برای مدل سازی ضریب دبی در این نوع از سازه ها به کار گرفته شد. این دو مدل جدید، مزایای الگوریتم تجمعی تقویتی و افراطی را با الگوریتم بهینه سازی بیزی ترکیب می کنند. به منظور کاهش خطای پیش بینی در مدل های یادگیری ماشین، ابتدا تحلیل اهمیت ویژگی ها با استفاده از روش چهار روش انجام شد تا میزان تأثیر نسبی هر پارامتر ورودی مشخص گردد.

در مجموع، ترکیب مدل XGBoost با روش های نمونه گیری SHAP می تواند بهترین گزینه برای پیش بینی دقیق و پایدار Cd باشد. این ترکیب نه تنها بازه های پیش بینی باریکی ارائه می دهد، بلکه نسبت به داده های نمونه برداری شده مقاومت بیشتری در برابر نویز و نوسانات دارد. این نتایج می تواند راهنمای مناسبی برای انتخاب مدل و روش نمونه گیری در مطالعات آبی مرتبط با تحلیل حساسیت و پیش بینی ویژگی های وابسته به عدم قطعیت باشد. همچنین نتایج نشان داد مدل XGBoost با وجود ساختار پیشرفته و قابلیت های تنظیم پارامتر، عملکرد نسبتاً ضعیف تری 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 پیش بینی دلالت دارد.

ملاحظات اخلاقی

پیروی از اصول اخلاق پژوهش

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

تعارض منافع

بنا بر اظهار نویسندگان این مقاله تعارض منافع ندارد.

سپاسگزاری

در پایان، از حمایت های مالی شورای پژوهشی دانشگاه شهید چمران اهواز کمال تشکر را داریم (GN: SCU.WHI403.43525).

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., & Chabbra, 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)
- Yıldız, 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., & Behroozi, 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 Karimi^{3✉}, and Arman Moghadamnia⁴

1. Department of Water Science and Engineering, Faculty of Agriculture, University of Kurdistan, Sanandaj, Iran. Email: e.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, University of Kurdistan, Kurdistan, Iran. Email: bakhtiar.karimi@uok.ac.ir
4. Department of Water Science and Engineering, Faculty of Agriculture, University of Kurdistan, 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)

Publisher: Razi University.

<https://doi.org/10.22126/atwe.2025.12042.1163>

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: e.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

در باره مقاله	چکیده
نوع مقاله: مقاله پژوهشی	هدف: هدف از این پژوهش، توسعه مدل‌هایی برای شبیه‌سازی دقیق توزیع و توزیع مجدد رطوبت در خاک‌های دولایه تحت آبیاری قطره‌ای سطحی بود.
تاریخ دریافت: ۱۴۰۴/۰۱/۲۹ تاریخ بازنگری: ۱۴۰۴/۰۴/۱۴ تاریخ پذیرش: ۱۴۰۴/۰۷/۰۹ تاریخ انتشار: ۱۴۰۵/۰۴/۰۱	روش پژوهش: برای دستیابی به این هدف، آزمایش‌هایی بر روی یک مدل فیزیکی شفاف پلکسی‌گلاس 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.
کلیدواژه‌ها: آبیاری قطره‌ای، پروفیل خاک، شبیه‌سازی، عرض خیس‌شدگی، فاز توزیع.	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*، ۶ (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 (پياز 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 قطره‌چکان‌ها و لوله‌های فرعی (لاترال‌ها) تعیین می‌شود تا از هدررفت آب به صورت رواناب سطحی و نفوذ عمقی جلوگیری کند (کیلچ^۵، ۲۰۲۰؛ صولت و همکاران^۶، ۲۰۲۱). از عوامل مهم و تاثیرگذار در تعیین ابعاد خیس شده پياز 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 لایه بندی خاک.

ادبیات موضوع و پیشینه پژوهش

مطالعات زیادی در زمینه مدل‌سازی الگوی خیس‌شدگی پياز رطوبتی به انجام رسیده است که به صورت مختصر در سه طبقه-بندی ارائه می‌گردد. مدل‌های رایج در زمینه مدل‌سازی الگوی پياز 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 تاثیر لایه‌ای بودن خاک و شیب‌دار 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

¹ Shu et al² Skaggs et al³ Jamei et al⁴ Karimi et al⁵ Kilic⁶ Solat et al

مناسبی در زمینه مدل سازی دارند. کریستول مونز و همکاران^۱ (۲۰۲۲) یک مدل تجربی برای تخمین عرض و عمق جبهه مرطوب در آبیاری قطره ای سطحی، بر اساس آزمایش های تجربی در ظرف مکعبی شکل با دیواره های شفاف در خاک هایی با بافت لومی رسی شنی، ارائه دادند. نتایج نشان دهنده این بود که مدل تولید شده کارآمد و ساده بوده و می تواند ابزار بسیار مفیدی برای طراحی و بهره برداری از سامانه های آبیاری قطره ای سطحی در خاک هایی 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 حل های عددی دقیق و آزمایش های میدانی، جهت الگوی خیس شدن خاک در این سامانه، پرداختند. داده های تولید شده توسط این شبیه سازی با موفقیت با مدل های تحلیلی و نتایج عددی لوم رسی پانوش مقایسه شد. نتایج نشان دادن که نفوذ از یک منبع قطره ای چکه ای می تواند با تقارن شعاعی کروی ساده علاوه بر شبیه سازی های تحلیلی یا عددی توصیف شود. صولت و همکاران (۲۰۲۱) به ارزیابی الگوی جبهه پیشروی رطوبت در آبیاری قطره ای زیر سطحی با جریان پیوسته و پالسی پرداختند. نتایج بیان داشت که در سامانه آبیاری قطره ای زیر سطحی با جریان پالسی با افزایش زمان استراحت در هر چرخه، پیاز رطوبتی گسترده تر شده و جبهه پیشروی رطوبت به طور افقی بیش تر حرکت می کند. همچنین، مشخص شد که در سامانه آبیاری قطره ای با کاربردهای پیوسته و پالسی، با حجم آب مساوی، توزیع افقی جبهه پیشروی رطوبت در دبی های کم نسبت به دبی های زیاد بیش تر است. بیش ترین عمق خیس شدگی در خاک با بافت سبک مربوط به دبی های بالا و در خاک با بافت سنگین مربوط به دبی های پایین مشاهده شد. صولت و همکاران (۲۰۲۱) به بررسی و مدل سازی الگوی خیس شدگی در اراضی شیب دار پرداختند. در این تحقیق مدل های تجربی و مدل های عددی مورد ارزیابی قرار گرفتند و نتایج تحقیق نشان داد که هر دو مدل عملکرد قابل قبولی در تخمین الگوی خیس شدگی دارند. همچنین عملکرد مدل تجربی در مقایسه با مدل عددی هایدروس به نسبت بهتر بود. بن-کیسی و همکاران^۳ (۲۰۲۱) برای ارزیابی فرآیند توزیع مجدد رطوبت در سامانه های آبیاری قطره ای پیوسته و پالسی، در دو حالت جریان سطحی و زیر سطحی، آزمایش هایی با بهره گیری از یک روش نوین یادگیری ماشین انجام گرفت. در این مطالعه، مدل سازی توزیع مجدد جبهه رطوبتی بر اساس پارامترهای مربوط به خاک و سامانه آبیاری، به عنوان ورودی های مدل، مورد بررسی قرار گرفت. هدف اصلی، تحلیل رفتار جبهه رطوبتی تحت شرایط مختلف آبیاری (پیوسته و پالسی) در سامانه های سطحی و زیر سطحی به منظور بهبود دقت پیش بینی و مدیریت بهینه منابع آب بود. نتایج روش ارزیابی شده و با نتایج شبکه های عصبی رگرسیون تعمیم یافته و خطوط رگرسیون تطبیقی چند متغیره، مقایسه شد. یافته ها نشان داد که روش نوین به کار رفته، (یادگیری ماشین) دقت بالاتری در تخمین ابعاد جبهه مرطوب دارد و به عنوان یک ابزار کارآمد در مدل سازی سامانه های آبیاری قطره ای قابل توصیه است. با توجه به مطالب گفته شده در بالا مشخص می گردد. شیر و همکاران^۴ (۲۰۲۰) در تحقیقی به مدل سازی پیاز رطوبتی تحت سامانه آبیاری پیوسته و پالسی پرداختند و نتایج این تحقیق نشان داد که مدل های شبکه عصبی مصنوعی با در نظر گرفتن سناریوهای مختلف تخمین دقیقی از ابعاد خیس شده پیاز رطوبتی دارند. مطالعات متعددی که در زمینه مدل سازی پیاز رطوبتی به انجام رسیده است، جمع بندی کلی تحقیقات صورت گرفته نشان می دهد مدل های تجربی عملکرد مناسبی در زمینه مدل سازی پیاز رطوبتی دارند و همچنین کاربرد این مدل ها برای اهداف طراحی (در مقایسه با سایر مدل های موجود) بسیار آسان تر می باشند. همچنین از مطالعات صورت گرفته مشخص می گردد که تحقیقات بسیار اندکی در زمینه خاک های لایه ای به انجام رسیده است. از آنجائی که خاک های زراعی در اثر فعالیت های کشاورزی نظیر

¹ Cristóbal-Muñoz et al

² Asher et al

³ Ben-Kisi et al

⁴ Shiri et al

خاک‌ورزی، افزودن خاک، فعالیت ریزجانداران و فعالیت ریشه گیاهان به دولایه با چگالی‌های مختلف تبدیل می‌گردند، به‌نحوی که لایه بالایی دارای بافت با خصوصیات فیزیکی متفاوت، در مقایسه با لایه پائینی است. بدین جهت مطالعه الگوی خیس شدن خاک توسط قطره‌چکان‌ها در خاک‌های دولایه می‌تواند موجب افزایش دقت تعیین ابعاد پیاز رطوبتی و بهبود عملکرد سامانه‌های آبیاری قطره‌ای گردد (جامعی و همکاران، ۲۰۲۲a).

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

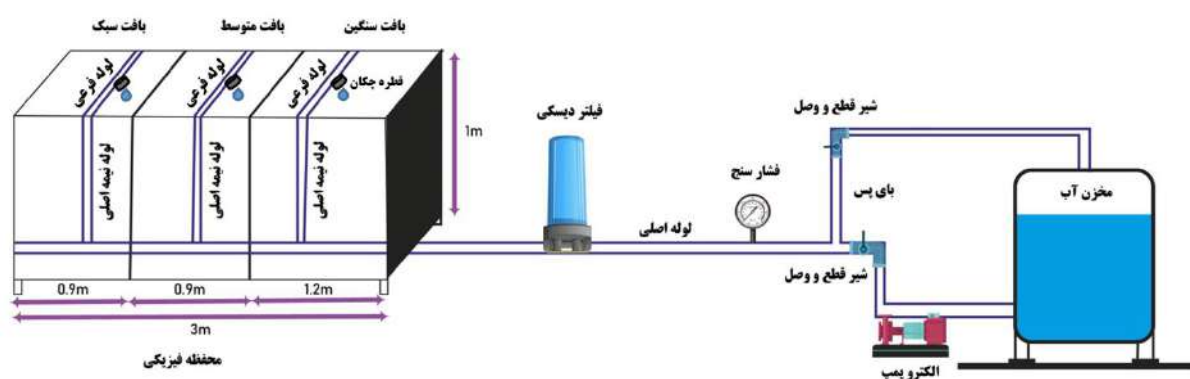
۱. مشاهدات آزمایشگاهی

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 پیاز 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 صولت، 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 زبر بر روی آن یک دیواره زبر 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 این‌رو 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 این‌حال، 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. بر این اساس، دبی‌های نهایی مورد استفاده در آزمایش شامل ۲/۴، ۴ و

^۱ Preferential Flows

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

خصوصیات فیزیکی خاک مورد استفاده در آزمایش ها در جدول (۱) ارائه شده است. توضیح این که در مورد انتخاب بافت خاک و نوع قطره چکان سعی شد که با انتخاب سه بافت خاک (سبک، متوسط و سنگین) بتوان تا حد زیادی نتایج مطالعه را به همه بافت ها تا حد امکان ربط داد، در خصوص انتخاب نوع قطره چکان باتوجه به این که قطره چکان هایی که کشاورزان در منطقه مورد استفاده قرار می دهند، قطره چکان های تنظیم شونده (نتافیم) است، در این مطالعه از این نوع قطره چکان مورد استفاده قرار گرفت. به منظور ارزیابی ضریب یکنواختی توزیع (CU) و ضریب تغییرات ساخت (CV) قطره چکان های موجود در سامانه آبیاری قطره ای مذکور، ابتدا تعدادی از این قطره چکان ها را به طور تصادفی انتخاب کرده و در شرایط آزمایشگاهی با فشار ثابت نصب شد. سپس، حجم آب خروجی هر قطره چکان را در بازه زمانی مشخص اندازه گیری کرده و با محاسبه دبی متوسط ($\bar{Q}$) و انحراف معیار (σ) دبی ها، 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 قطره چکان مورد مطالعه را نشان می دهد.



شکل ۱. مدل آزمایشگاهی و تجهیزات به کاررفته

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	۳۴/۴	۱۵/۶	شن-رس	۰/۵۴۶	۱/۳۵
متوسط	۱۴/۳	۲۵/۷	۶۰	شن-رس-لوم	۱/۳۹۰	۱/۴۵
سبک	۱۱/۲	۹/۶	۷۹/۲	شن-لوم	۳/۰۳۲	۱/۵۵

جدول ۲. مشخصات فنی و هیدرولیکی قطره چکان مورد استفاده

پارامتر	دبی ۲ (لیتر در ساعت)	دبی ۴ (لیتر در ساعت)
ضریب یکنواختی توزیع (درصد)	۹۸	۹۹
درصد ضریب تغییرات ساخت قطره چکان	۰/۰۳۲	۰/۰۱۷

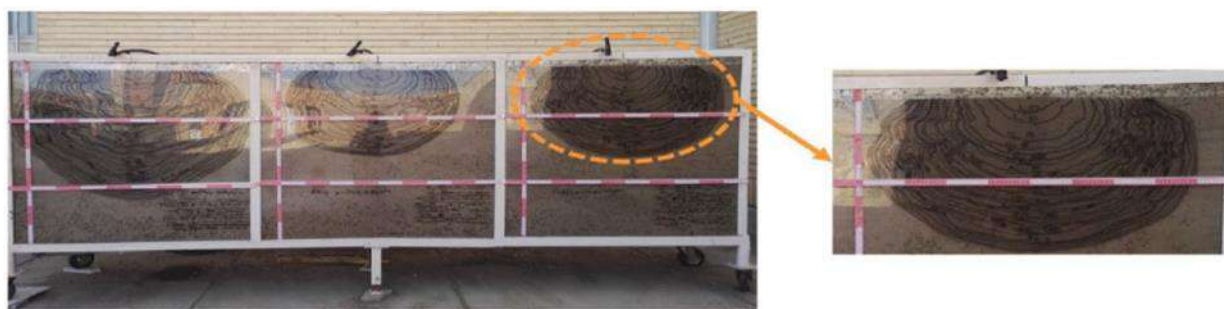
۲. نحوه انجام آزمایش ها

نحوه انجام آزمایش ها بدین صورت بود که ابتدا برای تهیه خاک های موردنظر به منظور انجام آزمایش ها دو نوع خاک با بافت های متفاوت تهیه گردید و به منظور خشک کردن، در هوای آزاد و در معرض نور 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، به‌صورت لایه‌های متوالی، لایه زیرین با ضخامت ۸۰ و لایه بالایی با ضخامت ۲۰ سانتی‌متری در مدل قرار گرفت. این روش، باتوجه 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 خشک‌شدن کامل نمونه‌های خاک، مجدداً به‌صورت 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. مدت‌زمان آبیاری در همه تیمارها شش 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 به‌عنوان 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	سنگین	سبک	سبک
لایه زیرین (بافت)	سنگین	سبک	متوسط	سبک	متوسط	سنگین



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

¹ Plexiglass

² Grapher

۳. الگوی رگرسیون غیر خطی

به منظور شبیه سازی و استفاده از داده های حاصل از نرم افزار گرافر جهت پیش بینی جبهه پیشروی رطوبت آب در زمان آبیاری، در سامانه آبیاری قطره ای سطحی با کاربرد آبیاری پیوسته در گام توزیع، مدل های تجربی جهت تخمین ابعاد پیاز رطوبتی ارائه گردید. همچنین عوامل تاثیرگذار در این مدل ها وابسته به خصوصیات فیزیکی خاک و خصوصیات فنی و هیدرولیکی قطره چکان است. فرم معادلات ارائه شده به صورت روابط (۱) و (۲) ارائه می گردد (ویسمن^۱، ۲۰۰۳).

$$D_h = c_1 \cdot t^{c_2} \cdot Q^{c_3} \cdot \left(\frac{K_{s1}}{K_{s2}}\right)^{c_4} \cdot \left(\frac{\rho_{b1}}{\rho_{b2}}\right)^{c_5} \cdot \left(\frac{\theta_{01}}{\theta_{02}}\right)^{c_6} \cdot \left(\frac{S_{i1}}{S_{i2}}\right)^{c_7} \cdot \left(\frac{C_1}{C_2}\right)^{c_8} \cdot \left(\frac{S_1}{S_2}\right)^{c_9} \cdot \left(\frac{T_{on}}{T_{tot}}\right)^{c_{10}} \quad (1)$$

$$D_v = c_1 \cdot t^{a_2} \cdot Q^{c_3} \cdot \left(\frac{K_{s1}}{K_{s2}}\right)^{c_4} \cdot \left(\frac{\rho_{b1}}{\rho_{b2}}\right)^{c_5} \cdot \left(\frac{\theta_{01}}{\theta_{02}}\right)^{c_6} \cdot \left(\frac{S_{i1}}{S_{i2}}\right)^{c_7} \cdot \left(\frac{C_1}{C_2}\right)^{c_8} \cdot \left(\frac{S_1}{S_2}\right)^{c_9} \cdot \left(\frac{T_{on}}{T_{tot}}\right)^{c_{10}} \quad (2)$$

D_h و D_v به ترتیب توزیع جبهه رطوبتی افقی و عمودی پائین قطره چکان ها (بر حسب سانتی متر)، $C_1, C_2, \dots, C_{11}$ ضرایب تجربی معادلات، دبی قطره چکان Q (بر حسب لیتر در ساعت)، K_{s1} و K_{s2} به ترتیب هدایت هیدرولیکی اشباع لایه بالایی و لایه زیرین (بر حسب سانتی متر در ساعت)، t زمان کاربرد آبیاری و زمان توزیع مجدد رطوبت (بر حسب دقیقه)، S_i درصد سیلت، C در صد رس و S درصد شن، ρ_b چگالی ظاهری (گرم در سانتی مترمکعب) 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 آن جا که در آبیاری پیوسته فرایند آبیاری بدون وقفه انجام می شود، این نسبت برابر با ۱ است.

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

وضع پیاز 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 می شود. در این قسمت نیز عوامل مؤثر از قبیل خصوصیات فیزیکی خاک و قطره چکان است (ویسمن، ۲۰۰۳).

$$D_h = c_1 \cdot t^{c_2} \cdot Q^{c_3} \cdot \left(\frac{K_{s1}}{K_{s2}}\right)^{c_4} \cdot \left(\frac{\rho_{b1}}{\rho_{b2}}\right)^{c_5} \cdot \left(\frac{\theta_{01}}{\theta_{02}}\right)^{c_6} \cdot \left(\frac{S_{i1}}{S_{i2}}\right)^{c_7} \cdot \left(\frac{C_1}{C_2}\right)^{c_8} \cdot \left(\frac{S_1}{S_2}\right)^{c_9} \cdot \left(\frac{T_{on}}{T_{tot}}\right)^{c_{10}} \cdot V^{c_{11}} \quad (3)$$

$$D_v = c_1 \cdot t^{c_2} \cdot Q^{c_3} \cdot \left(\frac{K_{s1}}{K_{s2}}\right)^{c_4} \cdot \left(\frac{\rho_{b1}}{\rho_{b2}}\right)^{c_5} \cdot \left(\frac{\theta_{01}}{\theta_{02}}\right)^{c_6} \cdot \left(\frac{S_{i1}}{S_{i2}}\right)^{c_7} \cdot \left(\frac{C_1}{C_2}\right)^{c_8} \cdot \left(\frac{S_1}{S_2}\right)^{c_9} \cdot \left(\frac{T_{on}}{T_{tot}}\right)^{c_{10}} \cdot V^{c_{11}} \quad (4)$$

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

۵. معیارهای ارزیابی

برای ارزیابی و اعتبارسنجی مدل ها، شاخص های آماری ریشه میانگین مربعات خطا ($RMSE$)، ضریب تبیین (R^2)، میانگین خطای مطلق (MAE) و ضریب جرم باقی مانده (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

$$CRM = 1 - \left(\sum_{i=1}^N P_i / \sum_{i=1}^N O_i \right) \quad (۸)$$

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 پژوهشی

در طراحی سامانه‌های آبیاری قطره‌ای، آگاهی از نحوه انتشار رطوبت در خاک، نقش اساسی در تعیین فاصله و عمق بهینه لاترال‌ها ایفا می‌کند. این دانش نه تنها برای برآورد دقیق محل نصب لاترال‌ها ضروری است، بلکه در برنامه‌ریزی و مدیریت مؤثر آبیاری نیز اهمیت بالایی دارد. این مطالعه الگوی گسترش رطوبت (پیز 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 (*Toolbar 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 ($RMSE$) ۵/۹۳۴ سانتی‌متر و خطای مطلق میانگین (MAE) آن ۴/۸۳۶ سانتی‌متر بود. ضریب تعیین (R^2) نیز برابر با ۰/۸۵۶ است. همچنین، خطای نسبت بندی شده (CRM) با مقدار ۰/۰۰۲۱- نشان داد به طور کلی مدل در پیش‌بینی توزیع افقی، مقداری بیش از مقدار واقعی را برآورد کرد. در مقابل، برای توزیع عمودی (رابطه ۲)، $RMSE$ برابر با ۴/۶۶۹ سانتی‌متر و MAE برابر با ۳/۵۲۲ سانتی‌متر است. R^2 نیز برابر با ۰/۸۸۴ است. مقدار مثبت CRM که برابر با ۰/۰۰۳۴ 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 ۸/۸۷۹ و ۸/۰۳۱ سانتی‌متر محاسبه شد. همچنین، خطای مطلق میانگین (MAE) نیز به ترتیب ۷/۳۰۹ و ۷/۰۰۱ سانتی‌متر تعیین گردید. ضریب تعیین (R^2) به دست آمده برای توزیع افقی و عمودی به ترتیب ۰/۵۲۴ و ۰/۷۹۸ بوده که نشان‌دهنده تطابق نسبی مدل با داده‌های مشاهده‌ای، به ویژه 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 کاررفته، در شبیه‌سازی توزیع رطوبت خاک در زمان آبیاری عملکرد مطلوب‌تری نسبت به مرحله توزیع مجدد (پس از قطع آبیاری) نشان داد. این اختلاف، به ویژه 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، به ویژه 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

^۱ 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
$C2$	۰/۲۷۶	۰/۳۹۶	۰/۰۲۶	۰/۰۳۲
$C3$	۰/۲۱۸	۰/۵۷۲	۰/۰۰۱	۰/۰۰۵
$C4$	۰/۰۰۰	۲۶/۰۱۶	۰/۰۰۰	۲۵/۰۶۱
$C5$	۰/۰۰۰	۷/۷۴-۸	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	۰/۵۵۳	۰/۰۰۰	۰/۳۷۳
$C10$	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
$MAE (cm)$	۴/۸۳۶	۳/۵۲۲	۷/۳۰۹	۷/۰۰۱
CRM	-۰/۰۰۲۱	۰/۰۰۳۴	-۰/۰۰۰۷	۰/۰۰۳۸

در گام بعدی به منظور 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 محاسبه شده 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 سنگین و پایینی سبک) 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 ($HL1$ ، $HL3$ ، $HL5$ ، $VL1$ ، $VL3$ و $VL6$) و ($HL2$ ، $HL4$ ، $HL6$ ، $VL2$ ، $VL4$ و $VL5$) به ترتیب در شرایط کم برآوردی و بیش‌برآوردی

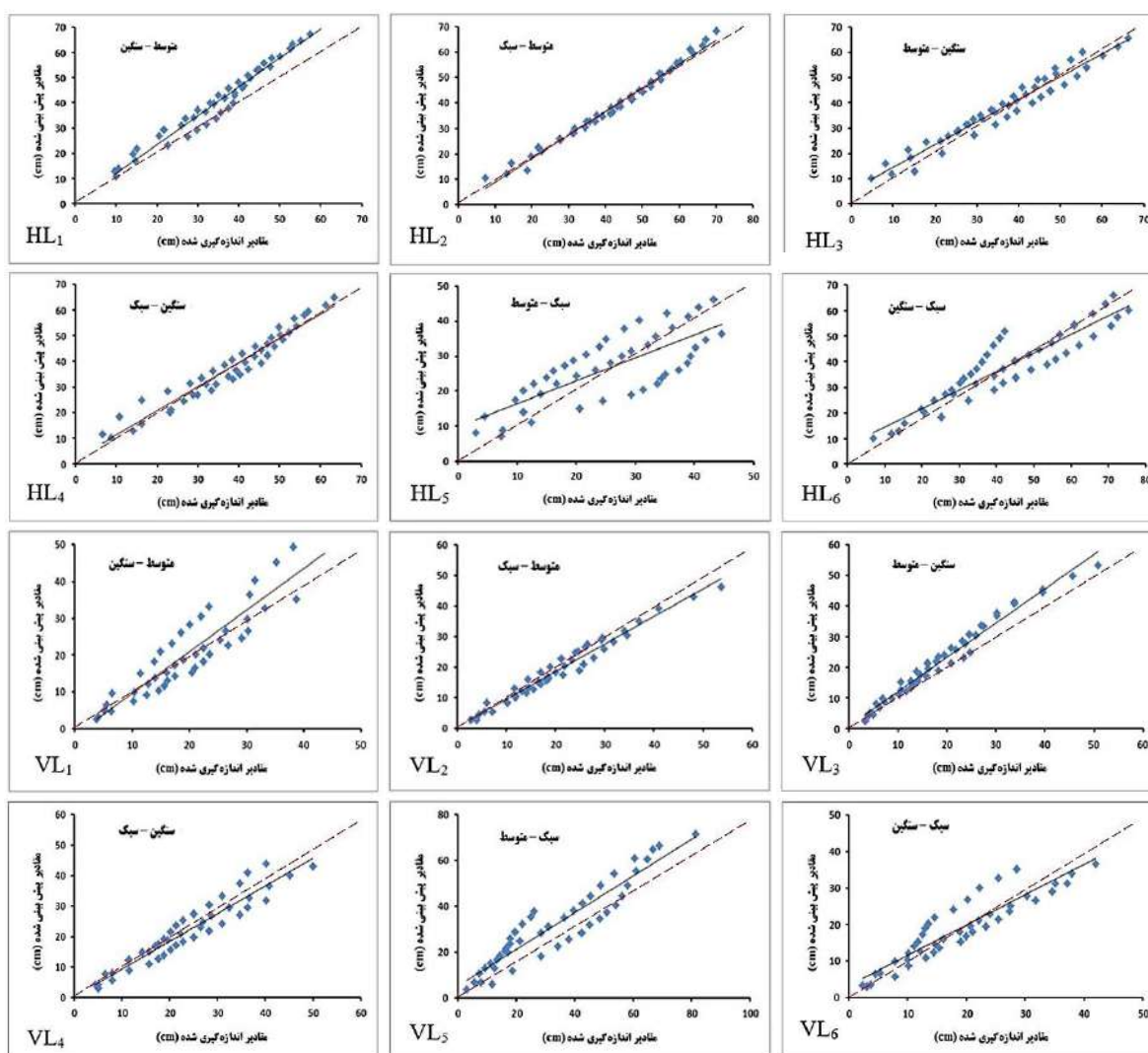
¹ Malek & Peters

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 نیم‌رخ‌های خاک (HL)				
HL_1	۰/۹۶۵	۶/۵۳	۵/۷۵	-۰/۰۴۵۸
HL_2	۰/۹۸۶	۳/۹۵	۳/۶۴	-۰/۰۶۹۱
HL_3	۰/۹۹۱	۳/۷۵	۳/۴۲	-۰/۱۶۸۸
HL_4	۰/۹۴۱	۳/۴۱	۲/۸۲	۰/۰۷۴۸
HL_5	۰/۹۳۱	۷/۴۴	۶/۵۹	۰/۰۴۶۰
HL_6	۰/۸۵۳	۸/۴۸	۶/۸۰	-۰/۳۴۰۷
توزیع عمودی رطوبت در نیم‌رخ‌های خاک (VL)				
VL_1	۰/۸۵۱	۴/۸۴	۳/۷۰	-۰/۰۴۵۸
VL_2	۰/۹۶۹	۲/۵۶	۲/۰۱	۰/۰۶۹۱
VL_3	۰/۹۷۷	۴/۰۰	۳/۲۹	۰/۱۶۸۸
VL_4	۰/۹۱۲	۳/۷۷	۳/۰۶	۰/۰۷۴۸
VL_5	۰/۸۷۷	۷/۴۰	۵/۷۹	۰/۰۴۶۰
VL_6	۰/۹۸۰	۵/۴۱	۵/۸۹	-۰/۳۴۰۷

HL_1 تا HL_6 به ترتیب نمایانگر توزیع افقی و VL_1 تا VL_6 توزیع عمودی رطوبت در نیم‌رخ‌های 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 اندازه گیری و شبیه سازی توزیع پیشروی رطوبت در راستای افقی و عمودی و مقایسه با خط یک به یک (خط چین قرمز رنگ) برای تیمارهای مورد بررسی

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

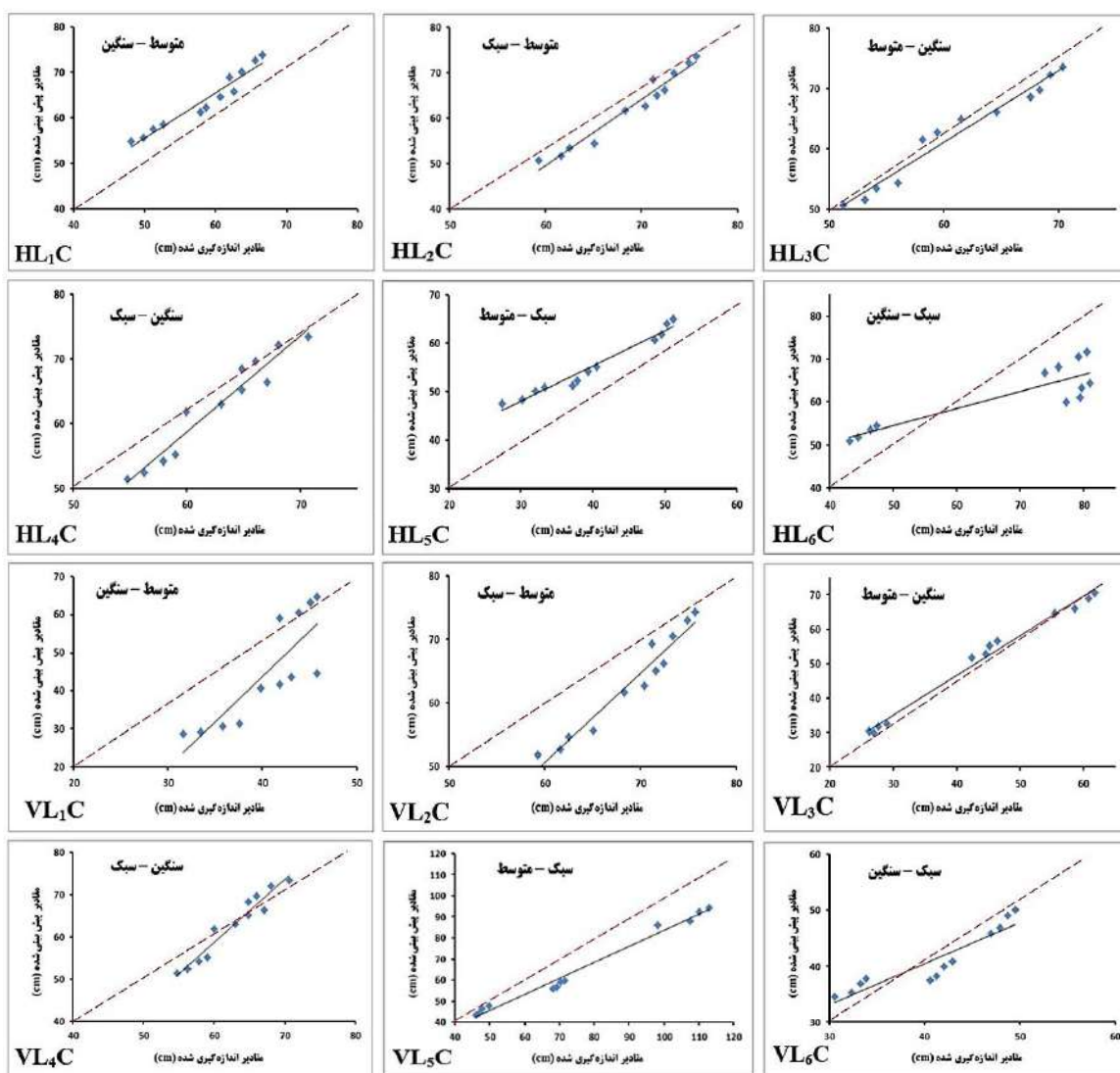
پس از انجام آبیاری و سپس قطع جریان، توزیع مجدد رطوبت اتفاق می افتد. در جدول (۶)، نتایج آنالیز آماری داده های مربوط به توزیع مجدد رطوبت در تیمارها در دو راستای افقی و عمودی ارائه گردیده است. عملکرد مدل ها در شبیه سازی توزیع مجدد افقی در تیمارهای مختلف، با شاخص های آماری متفاوتی همراه بوده است. مقدار R^2 به دست آمده برای این مدل ها بین ۷۷/۴ تا ۹۶/۶ درصد بوده که نشان دهنده تطابق مناسب مدل ها با داده های مشاهده ای است. با این حال، مقادیر $RMSE$ و MAE که به ترتیب بین ۲/۳۱ تا ۱۱/۷۲ سانتی متر و ۲/۰۴ تا ۱۵/۳۰ سانتی متر متغیر بوده اند، نشان می دهد که مدل ها در برخی تیمارها با خطای بیش تری همراه بوده اند. همچنین، برخی مدل ها در برخی تیمارها (HL_1C ، HL_3C و HL_4C) مقدار واقعی را بیش از حد برآورد کرده و در برخی دیگر کمتر از مقدار واقعی برآورد نموده اند (HL_2C ، HL_6C و HL_5C). در میان تیمارها تیمار HL_5C (توزیع مجدد افقی رطوبت در خاک با لایه های بالایی سبک و پائینی متوسط) بیش ترین و تیمار HL_3C (توزیع مجدد افقی رطوبت در خاک با لایه های بالایی سنگین و پائینی متوسط) کم ترین شاخص خطاها را داشتند. ارزیابی مدل ها در فاز توزیع مجدد عمودی نشان داد که اگرچه مدل ها به طور کلی عملکرد خوبی داشته اند، اما میزان دقت آن ها در تیمارهای مختلف متفاوت بوده است. محدوده تغییرات خطای این مدل ها، از نظر $RMSE$ بین ۳/۶۷ تا ۱۲/۱۸ سانتی متر و از نظر MAE بین ۳/۶۴ تا ۱۰/۳۶ سانتی متر بوده

است. همچنین مقدار R^2 برابر بازه ۰/۶۰ تا ۰/۹۸۷ بود، برخی مدل‌ها (VL_6C و VL_4C, VL_3C, VL_1C) در حالت بیش‌برآوردی و برخی دیگر (VL_5C و VL_2C) در حالت کم‌برآوردی 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 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	۶/۳۶	۵/۷۲	۰/۰۸۳۰
HL_3C	۰/۹۶۴	۲/۳۱	۲/۰۴	-۰/۰۲۱۸
HL_4C	۰/۹۴۱	۲/۹۷	۲/۶۲	-۰/۰۰۱۱
HL_5C	۰/۹۶۶	۱۵/۵۱	۱۵/۳۰	۰/۳۸۴۶
HL_6C	۰/۷۷۴	۱۱/۷۲	۱۰/۸۴	۰/۰۸۸۷
توزیع مجدد عمودی رطوبت (VLC)				
VL_1C	۰/۶۹۶	۱۰/۶۲	۷/۶۸	-۰/۱۰۷۸
VL_2C	۰/۹۴۵	۶/۳۶	۵/۷۲	۰/۰۸۳۰
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	۱۰/۳۶	۰/۱۳۸۴
VL_6C	۰/۹۰۲	۳/۶۷	۳/۶۴	-۰/۱۱۲۳

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، سبک و متوسط، سبک و سنگین) هستند.



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

بحث

طراحی سامانه های آبیاری قطره ای بر اساس مدل های شبیه سازی انتقال رطوبت در خاک (فاز پیشروی و پسروی)، یکی از راهکارهای نوین برای افزایش راندمان سامانه های آبیاری است. در این پژوهش، با بهره گیری از مدل های رگرسیونی غیرخطی و شاخص های آماری و با در نظر گرفتن ویژگی های فیزیکی خاک و مشخصات هیدرولیکی قطره چکان، به مدل سازی و ارزیابی فرایند توزیع و توزیع مجدد آب در خاک های لایه ای در دو جهت افقی و عمودی پرداخته شد. جدول (۷) مقایسه مقادیر اندازه گیری و شبیه سازی توزیع مجدد رطوبت در راستای افقی و عمودی برای تیمارهای مورد بررسی را نشان می دهد.

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 بشارت (۱۳۹۵)	شبیه‌سازی ابعاد پیاز رطوبتی بافت‌های مختلف خاک	استفاده از نرم‌افزار HYDRUS-2D	الف) بیش‌ترین عمق و قطر پیاز رطوبتی در بافت شنی و کم‌ترین آن در بافت سیلتی مشاهده شده است. ب) دقت مدل‌ها برای بافت‌های 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 خان‌محمدی و بشارت، در این پژوهش پیچیدگی بیش‌تری با در نظر گرفتن خاک دولایه 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 بافت 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 دولایه ایجاد شده است. پ) مدل توسعه‌یافته در مطالعه مذکور در شبیه‌سازی حرکت رطوبت در فاز توزیع مجدد در جهت افقی دقت بالایی نداشت؛ اما در مطالعه خان‌محمدی و بشارت مدل توسعه‌یافته توانایی خوبی در شبیه‌سازی داشتند از دلایل اصلی پیچیدگی حرکت آب در فاز توزیع مجدد در خاک دولایه است.
کریمی و کریمی (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، بافت 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 کریمی و کریمی از سیستم آبیاری قطره‌ای پالسی بهره برده‌اند. ب) در این مطالعه، شبیه‌سازی ابعاد پیاز رطوبتی در خاک‌های ناهمگن انجام شده است، درحالی‌که مطالعه کریمی و کریمی به بررسی خاک‌های همگن پرداخته است. پ) مدل‌های مورد استفاده در مطالعه کریمی و کریمی 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 اندازه گیری و شبیه سازی توزیع مجدد رطوبت در راستای افقی و عمودی برای تیمارهای مورد بررسی

پژوهشگران	موضوع	روش	نتایج	مقایسه
کریمی و صولت (۱۳۹۹)	شبیه سازی کامل پیاز رطوبتی در آبیاری قطره ای سطحی	توسعه و ارزیابی مدل های تجربی در پیش بینی توزیع و توزیع مجدد رطوبت	الف) مدل های توسعه یافته توانایی خوبی در پیش بینی توزیع و توزیع مجدد رطوبت در خاک دارند. ب) مدل ها قادر به پیش بینی شکل پیاز رطوبتی در فازهای توزیع و توزیع مجدد هستند	الف) مدل های توسعه یافته در شبیه سازی اولیه توزیع رطوبت عملکرد خوبی داشتند، اما پیچیدگی های ناشی از لایه لایه بودن خاک، به ویژه در پیش بینی حرکت افقی رطوبت پس از آبیاری، باعث کاهش دقت مدل ها شد. ب) در حالی که مطالعه کریمی و صولت به بررسی رفتار رطوبت در خاک های همگن محدود شده بود، هدف پژوهش حاضر توسعه مدل هایی برای پیش بینی دقیق تر توزیع رطوبت در خاک های پیچیده تر بود.
کریمی و کریمی (۱۴۰۰)	ارزیابی الگوی جبهه پیشروی رطوبت در آبیاری قطره ای زیر سطحی با جریان پیوسته و پالسی	ارزیابی الگوی حرکت رطوبت در سامانه آبیاری قطره ای زیر سطحی با جریان پیوسته و پالسی	الف) در آبیاری پالسی، با افزایش زمان استراحت بین پالس ها، رطوبت بیش تر در جهت افقی گسترش می یابد. ب) در دبی های کم، رطوبت بیش تر در جهت افقی گسترش می یابد و در دبی های زیاد، عمق نفوذ رطوبت بیش تر است. پ) بافت خاک تأثیر قابل توجهی بر عمق نفوذ رطوبت دارد.	
عرب و همکاران (۱۴۰۱)	بررسی آزمایشگاهی توزیع رطوبت در سامانه های آبیاری قطره ای سطحی و زیر سطحی	اندازه گیری توزیع رطوبت در دو سامانه آبیاری قطره ای سطحی و زیر سطحی	الف) افزایش دبی در هر دو سامانه باعث افزایش مساحت خیس شده می شود، اما این افزایش در سامانه زیر سطحی بیش تر است. ب) تغییرات توزیع مجدد رطوبت در سامانه زیر سطحی بیش تر از سامانه سطحی است. پ) در سامانه سطحی، آب آزادانه تر در خاک حرکت می کند و تغییرات اصلی در جبهه رطوبت قبل از توزیع مجدد رخ می دهد	الف) در این پژوهش، تنوع بافت خاک ها با بررسی شش پروفیل مختلف مورد توجه قرار گرفته است، در حالی که مطالعه عرب و همکاران تنها به بررسی بافت شنی محدود شده است. ب) در مطالعه مذکور شبیه سازی حرکت آب در خاک های ناهمگن انجام گرفت؛ اما در مطالعه عرب و همکاران خاک تک لایه با بافت شنی بود. پ) برخلاف مطالعه عرب و همکاران که بر روی تأثیر پارامترهای دبی بر روی پیاز رطوبتی در خاک شنی در سامانه های آبیاری قطره ای زیر سطحی و سطحی صورت گرفته بود، این پژوهش به شبیه سازی 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 فرآیندهای 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: ایزج سهرابی، آرمان مقدم‌نیار و بختیار کریمی؛ تهیه گزارش پژوهش: پیمان طهماسی؛ تحلیل داده‌ها: پیمان طهماسی 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 پایان نامه دانشجویی نویسنده اول و همچنین پژوهانه برای سایر نویسندگان انجام شده است.

سپاسگزاری

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

منابع

- خانمحمدی، ندا، و بشارت، سینا. (۱۳۹۵). شبیه سازی 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 سامانه های آبیاری قطره ای 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*، ۳۴(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>
- محمدیگی، آرش، میرزایی، فرهاد، و اشرف، نگین. (۱۳۹۵). بررسی و مقایسه توزیع مجدد رطوبت در آبیاری قطره ای با جریان پالسی و جریان پیوسته. *مجله تحقیقات آب و خاک ایران (علوم کشاورزی ایران)*، ۴۷(۳)، ۴۶۷-۴۶۳. https://ijswr.ut.ac.ir/article_59317.html
- نوروزیان، زهرا، صدرالدینی، علی اشرف، ناظمی، امیرحسین، و دلیرحسن نیا، رضا. (۱۳۹۵). بررسی تجربی و عددی توزیع رطوبت خاک در آبیاری قطره ای 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: fariborzoyosefvand@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 Kooh 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. نویسنده 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: fariborzoyosefvand@gmail.com

در باره مقاله	چکیده
نوع مقاله: مقاله پژوهشی	هدف: هدف از این پژوهش، توسعه مدل‌هایی برای شبیه‌سازی دقیق توزیع و توزیع مجدد رطوبت در خاک‌های دولایه تحت آبیاری قطره‌ای سطحی بود.
تاریخ دریافت: ۱۴۰۳/۱۱/۰۱ تاریخ بازنگری: ۱۴۰۴/۰۲/۲۹ تاریخ پذیرش: ۱۴۰۴/۰۸/۲۱ تاریخ انتشار: ۱۴۰۵/۰۴/۰۱	روش پژوهش: برای دستیابی به این هدف، آزمایش‌هایی بر روی یک مدل فیزیکی شفاف پلکسی‌گلاس 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.
کلیدواژه‌ها: دبی رودخانه، زنجیره مارکوف، سد مارون، ORELM، Hybrid Models	یافته‌ها: افته‌ها 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: 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 وردی 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 می‌کنند 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 رواناب 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 رواناب در سال‌های آتی تحت تأثیر 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؛ شرستا 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 بیلان 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؛ az^{2020} ؛ زینعلی و همکاران^{۱۰}، 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. باین‌حال، 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^{۱۱}، 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

ایوکوویچ^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^۶، ۲۰۱۴؛ بایسته و آذری^۷، ۲۰۲۱).

از این رو جایگزینی روش های 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 روش های عددی و مدل های ریاضی داشته باشند بسیار پر اهمیت است (نورمحمدی دهبالایی و همکاران^۸، ۲۰۲۳). در اکثر این روش ها پیش بینی وقایع هیدرولوژیکی بدون استفاده از مدل های شبیه سازی بر اساس تجزیه و تحلیل سری های زمانی، روش های مبتنی بر زنجیره مارکوف و یا ابزار هوش مصنوعی است و در زمان کمتر، با صرف هزینه کمتر و بادقت بالا قادر به پیش بینی این وقایع هستند (سلطانی و آذری^۹، ۲۰۲۲؛ گوزمان و همکاران^{۱۰}، ۲۰۱۹؛ ندیری و همکاران^{۱۱}، ۲۰۱۹). در سال های اخیر در کنار روش های استوکاستیک (ابتهاج و همکاران^{۱۲}، ۲۰۲۰؛ زین الدین و همکاران^{۱۳}، ۲۰۲۰؛ مزرعه و همکاران^{۱۴}، ۲۰۲۳ و ۲۰۲۴؛ آذری و همکاران^{۱۵}، ۲۰۲۱) به صورت گسترده از روش های مبتنی بر هوش مصنوعی مانند GMDH, ELM, LS-SVM, ORELM و روش های هیبرید برای پیش بینی پارامترهای هیدروکلیماتولوژی مانند دما، بارندگی، جریان رودخانه ها و تغییرات تراز آب مخازن سطحی و آب زیرزمینی استفاده شده است (ابتهاج و همکاران^{۱۶}، ۲۰۱۶؛ زین الدین و همکاران^{۱۷}، ۲۰۱۸؛ سلطانی و همکاران^{۱۸}، ۲۰۲۱؛ اسماعیلی و همکاران^{۱۹}، ۲۰۲۱).

نکته مهم دیگر برای استفاده جامع از این روش ها بخصوص در مناطق فاقد داده های زمینی، امکان استفاده از داده ها و اطلاعات ماهواره ای مربوط به سری زمانی داده های هیدرولوژیکی مانند دبی، بارندگی و دما است. این داده ها توسط برخی از ماهواره ها برای اکثر نقاط کره زمین ارائه می شوند و کاملاً رایگان و در دسترس محققان قرار دارد. بر این اساس موضوع جدیدی بر اساس تحلیل اطلاعات ماهواره ای اخیراً ظهور یافته است. علاقه مندی اصلی محققان این زمینه استفاده از اطلاعات ماهواره ای برای مدل سازی و پیش بینی وقایع هیدرولوژیکی است. دبی رودخانه ها می تواند توسط سیگنال های ماهواره ای پیش بینی شود. برای پیش بینی دبی رودخانه ها برای آینده با استفاده از اطلاعات ماهواره ای به منظور نظارت بر سیل یا طراحی درست سازه های هیدرولیکی لازم است سیگنال های ماهواره ای به طور دقیق تری مورد ارزیابی قرار گیرد. استفاده از اطلاعات موجود ماهواره ای در دسترس و ارزان برای پیش بینی ویژگی های هیدرولوژیکی رودخانه ها، به عنوان جایگزینی برای اندازه گیری های گران قیمت در محل، یکی از جالب ترین زمینه های تحقیقاتی در هیدرولوژی است. تحقیقات نشان داده اند که با استفاده از اطلاعات مبتنی بر ماهواره، دبی رودخانه ها را می توان بادقت زیاد پیش بینی کرد. پیش بینی ویژگی های آینده رودخانه ها با استفاده از اطلاعات ماهواره ای تنها زمانی امکان پذیر است که سیگنال های مبتنی بر فضا بادقت قابل پیش بینی 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 Mazraeh et al

¹⁵ Azari et al

¹⁶ Esmacili et al

ادبیات موضوع و پیشینه پژوهش

برینریج 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 شش 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 (کامروززaman 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 تاثیر می‌گذارد؛ لذا محققان زیادی با استفاده از روش *MC* به پیش‌بینی این پارامتر در مناطق مختلف جهان پرداخته اند (دهامشه و همکاران^۷، ۲۰۱۴؛ گوویی و همکاران^۸، ۲۰۱۷؛ ژوو و همکاران^۹، ۲۰۱۷؛ آکسوی و همکاران^{۱۰}، ۲۰۱۸؛ لیبو 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؛ نکووین-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 وقت گیر 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 کوتاه مدت

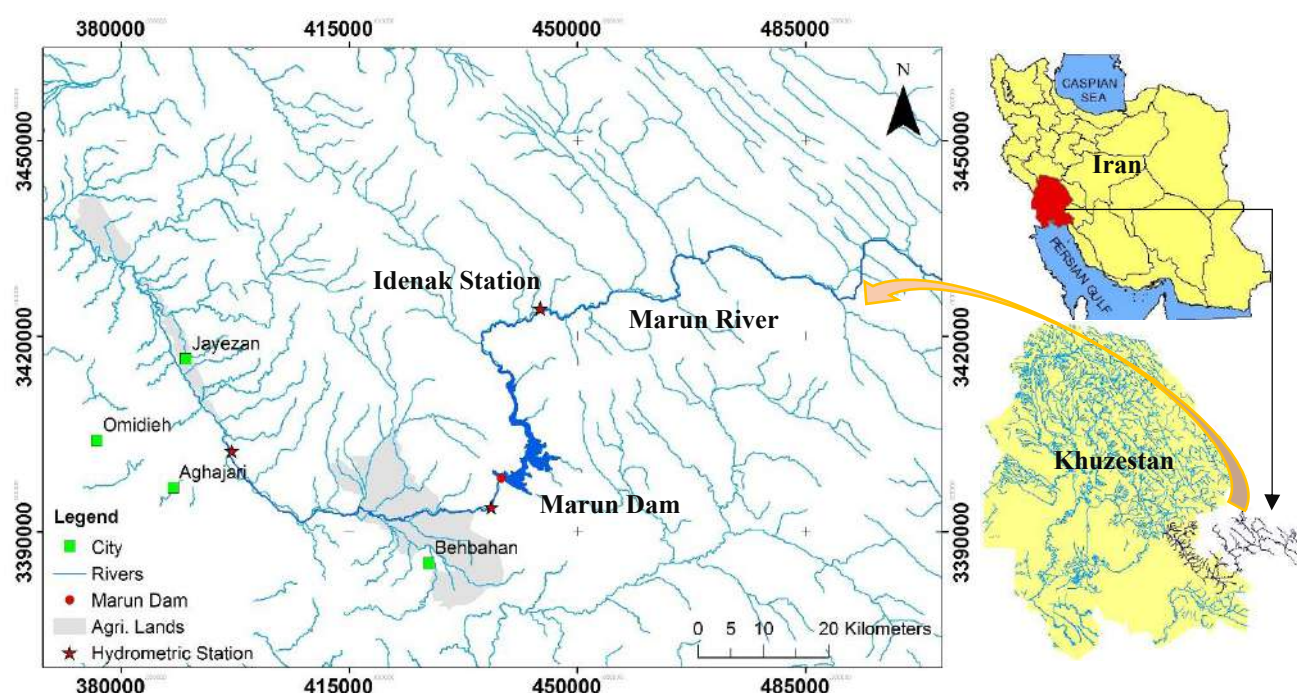
¹ Braineridge et al² Cohen et al³ Bonakdari et al⁴ Su et al⁵ Kamruzzaman et al⁶ Kaviani et al⁷ Dahamsheh et al⁸ Gui et al⁹ Zhou et al¹⁰ Aksoy et al¹¹ Liu et al¹² Wang & Wang¹³ Wang et al¹⁴ Nguyen-Huy et al

استفاده شده است. هدف از این تحقیق مقایسه عملکرد روش های هیبرید GA-ANN و ICA-ANN و ORELM در مقایسه با روش معمول زنجیره مارکوف (MC) در ترکیب با سیگنال های ماهواره ای برای پیش بینی جریان ورودی به مخزن سد مارون است تا بتوان از آن به عنوان راهکاری ارزان و بدون نیاز به مدل ها و معادلات پیچیده که غالباً نیاز به حجم داده ها و اطلاعات زیادی دارند استفاده کرد. در این صورت می توان به نتایج این مدل ها در رودخانه های 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 کوه های نیل و سفید کوه سرچشمه گرفته و پس از طی مسافت ۱۲۰ کیلومتر به دریاچه سد مارون وارد می شود. سد مخزنی مارون بر روی رودخانه مارون در فاصله ۱۹ کیلومتری شمال شرق بهبهان در استان خوزستان و قسمت جنوبی ایران است. جانمایی رودخانه ها و مصارف موجود در منطقه در شکل (۱) آمده است.



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

۲. داده های ماهواره^۱ (AMSR)

رادیومتر اسکن مایکروویو پیشرفته (AMSR) سیگنال های ضعیف مایکروویو ساطع شده از منابع طبیعی مانند سطح زمین و جو را اندازه گیری می کند. 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 به دست آوردن اطلاعات در نزدیکی ژاپن و تأیید عملکرد سنسور، 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 مالی ۲۰۲۳ راه اندازی شد.

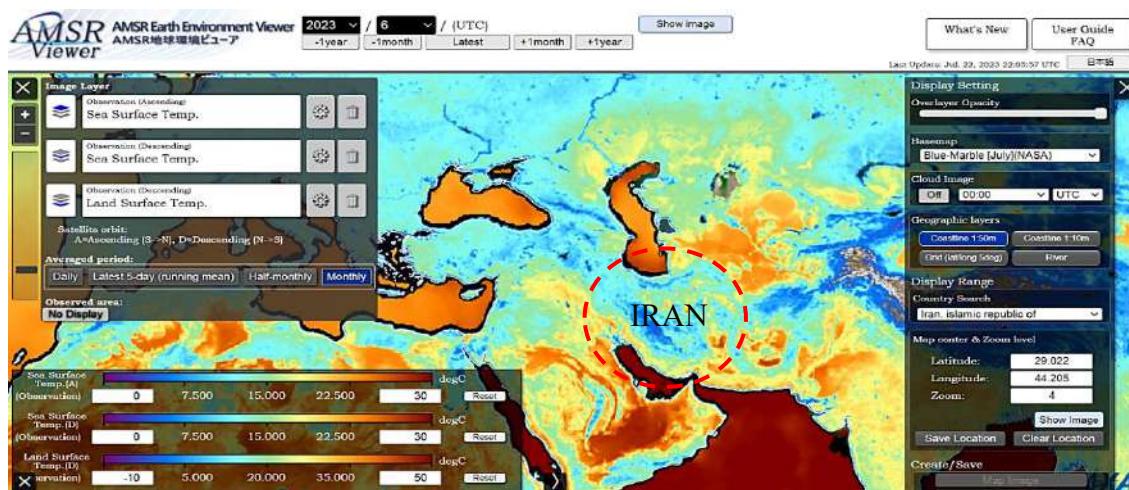
رادیومتر اسکن مایکروویو پیشرفته (AMSR) روی سه ماهواره کار می‌کند.

۱. AMSR در فضاپیما 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 فضاپیما 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 فضاپیما 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. آنتن 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 ۲۰۲۳

باتوجه‌به اینکه اندازه مساحتی که AMSR تحت پوشش قرار می‌دهد 8×12 km 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 (Tb) 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 می آید 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.

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

در معادله مزبور $T_{b,w}$ درجه‌حرارت روشنایی قسمت‌های زمین از پیکسل در نظر گرفته شده است و همچنین $T_{b,l}$ 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.

$$T_b = T((1-w)\varepsilon_l + w\varepsilon_w) \quad (۳)$$

در معادله بالا L ضریب انتشار مناطق خشک است و 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.

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

در این معادله ε_l و ε_w ثابت و w یک متغیر است؛ بنابراین تمام تغییرات سیگنال به مقدار w مربوط است. باتوجه 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 تداوم 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.

$$X_n, \quad n = 0, 1, 2, \dots \quad (۶)$$

در اینجا، X_n یک‌رویه تصادفی است که تعداد محدودی از مقادیر ممکن را دارد. عبارت $X_n = i$ می‌گوید که در زمان n ، رویه کار 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.

$$P_{ij} = P\{X_{n+1} = j | X_n = i, X_{n-1} = i_{n-1}, \dots, X_1 = i_1, X_0 = i_0\} \quad (۷)$$

لازم به ذکر است که تمام مقادیر n و $i, j, i_0, \dots, i_{n-1}$ 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.

$$\sum_{j=0}^{\infty} P_{ij} = 1 \quad \begin{cases} i=0,1,\dots \\ j \geq 0 \\ P_{ij} \geq 0 \end{cases} \quad (۸)$$

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

$$MM = \begin{bmatrix} P_{00} & P_{01} & P_{02} & \dots \\ P_{10} & P_{11} & P_{12} & \dots \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ P_{i0} & P_{i1} & P_{i2} & \dots \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \end{bmatrix} \quad (۹)$$

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 اندازه گیری چندان آسان به نظر نمی رسد. 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 داغ ترین، نزدیک ترین و خشک ترین 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 می یابد؛ زیرا ضریب انتشار مناطق خشک بیشتر از ضریب انتشار مناطق مرطوب است؛ بنابراین طبق معادله (۲) خشک ترین پیکسل، داغ ترین پیکسل نیز است پس این پیکسل به عنوان پیکسل کالیبراسیون انتخاب می شود.

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

طبق مطالعات *De Groeve* و همکاران به دلیل دقت کم یک پیکسل به عنوان داغ ترین پیکسل برای جلوگیری از مشکلات غیرمنتظره یک صفحه پیکسل 9×9 به جای در نظر گرفتن مقدار یک پیکسل به عنوان داغ ترین پیکسل در اطراف هر پیکسل اندازه گیری در نظر گرفته شده و ۹۵ درصد دمای روشنایی آن ها به عنوان دمای روشنایی پیکسل کالیبراسیون برای استفاده در معادله (۴) در روش اندازه گیری سیگنال ماهواره در نظر گرفته شد.

تحقیق حاضر به جای پیش بینی دبی آینده رودخانه ها، بر روی پیش بینی سیگنال های ماهواره ای با استفاده از اطلاعات گذشته خود متمرکز است. این تحقیق بر اساس سیگنال های ماهواره ای، تغییرات دبی رودخانه مارون را با روش زنجیره مارکوف استاندارد (MC) که توسط نویسندگان این تحقیق توسعه داده شده پیش بینی می کند و نتایج را با خروجی مدل های مبتنی بر هوش مصنوعی مقایسه می نماید. برای انتخاب بهترین مدل از شاخص های آماری RMSE، NRMSE، NASH و R استفاده شد که در معادلات (۱۲) تا (۱۵) نشان داده شده اند. 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 شبیه سازی است را معرفی می کند.

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

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

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

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

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

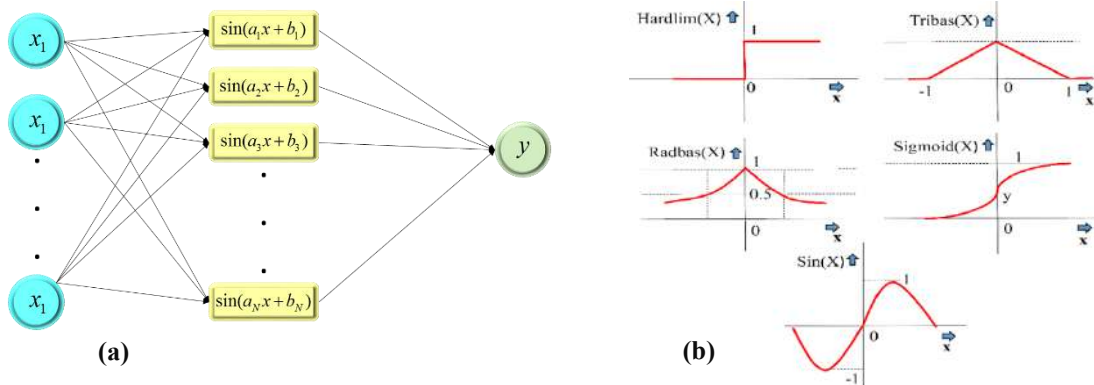
ماشین آموزش نیرومند (ELM) یک شبکه عصبی پیشخور^۲ تک‌لایه بوده و توسط هوانگ^۳ و همکاران (۲۰۰۴، ۲۰۰۶) ارائه شده است. ELM وزن‌های ورودی را به صورت تصادفی و وزن‌های خروجی را به صورت تحلیلی^۴ تعیین می‌کند. ساختار کلی این الگوریتم در شکل (۳. الف) ارائه شده است. تنها تفاوت ELM با شبکه عصبی پیشخور تک‌لایه^۵ (SLFFNN)، 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 به صورت تابع پیوسته تکه‌ای^۷ باشد درحالی‌که برای نرون لایه خروجی به صورت خطی است. مدل ELM از الگوریتم‌های مختلفی جهت محاسبه وزن‌ها و بایاس‌ها استفاده می‌کند که در نتیجه کاهش قابل توجه زمان آموزش شبکه را به همراه دارد. توصیف ریاضی شبکه عصبی پیشخور تک‌لایه با تعداد n گره مخفی، به صورت 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 به منظور محاسبه خروجی پاسخ نرون‌ها استفاده می‌شود. زمانی که مجموعه‌ای از سیگنال ورودی وزن‌دار اعمال می‌شود، برای به دست آوردن 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 به صورت 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

فعال سازی نرون های 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 می شود:

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

که $g(.)$ می تواند هر تابع فعال سازی غیر خطی 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 فعال سازی j امین نرون لایه مخفی برای k امین نمونه آموزشی است به طوری که فعال سازی همه نرون های لایه مخفی برای نمونه های مورد استفاده در آموزش توسط این ماتریس ارائه می شود. در این ماتریس j ستون و k ردیف است. ماتریس H به عنوان ماتریس لایه مخفی خروجی شبکه عصبی بیان می شود. وزن های بین نرون های لایه مخفی و خروجی با استفاده از برازش حداقل مربعات برای مقادیر هدف در حالت آموزش در برابر خروجی های نرون های لایه مخفی برای هر نمونه آموزشی، بکار برده می شود که معادل ریاضی آن را می توان به شکل زیر بیان کرد:

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

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

که β نشان دهنده وزن بین نرون لایه خروجی و نرون های لایه مخفی است و T بردار نشان دهنده مقادیر هدف برای نمونه های آموزش است که به صورت معادله (۲۱) بیان می شود:

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

نهایتاً وزن ها را می توان از معادله (۲۲) محاسبه کرد:

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

که در آن:

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

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

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 نرون های لایه های مخفی و لایه پنهان و H' شبه معکوس $Moore-Penrose$ ماتریس H است. T بردار بین وزن های نمونه های آموزشی است. با توجه به توضیحات ارائه شده می توان گفت که آموزش ELM شامل دو مرحله است: مرحله اول، اختصاص تصادفی وزن ها و بایاس ها به نرون های لایه پنهان و محاسبه خروجی لایه پنهان ماتریس H و مرحله دوم، محاسبه وزن های خروجی با استفاده از شبه معکوس $Moore-Penrose$ ماتریس H و مقادیر هدف برای نمونه های آموزشی مختلف. روند آموزش جهت پیدا کردن ماتریس لایه پنهان (H)، سریع است به طوری که از سرعت بالاتری نسبت به الگوریتم های مبتنی بر تکرار رایج مانند لونیگ-مارکوآردت^۱ که در آن هیچ نوع روالی از بهینه سازی غیر خطی را در بر نمی گیرد، برخوردار است؛ بنابراین زمان آموزش شبکه به طور قابل توجهی کاهش می یابد (هوآنگ ۲۰۰۶).

^۱ Levenberg-Marquardt

۶. آموزش نیرومند با داده‌های پرت^۱

به منظور مدل سازی با استفاده از مدل های مبتنی بر هوش مصنوعی همیشه داده های به صورت outlier وجود دارند و به دلیل اینکه عموماً وجود چنین نمونه هایی در بسیاری از موارد به طبیعت موجود در مسئله برمی گردد، امکان حذف آنها وجود ندارد؛ بنابراین، درصدی از کل خطای آموزش (e) را شامل می شود. به منظور برخورد با چنین داده هایی، وجود outliers با sparsity تعریف می شود. ژانگ^۲ و لو^۳ (۲۰۱۵) با دانش اینکه استفاده از l0-norm sparsity را نسبت به l2-norm بهتر منعکس می کند، جهت محاسبه ماتریس وزن خروجی (β)، به جای استفاده از l2-norm، خطای آموزش (e) را به گونه ای در نظر می گیرند 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 وزن های خروجی است (w₀ یا همان w_{output} است).

(یا در برخی منابع به این شکل نوشته می شود (w₀) ماتریس وزن های خروجی است):

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

رابطه فوق یک مسئله برنامه نویسی غیرمحدب^۴ است. یکی از ساده ترین راه ها جهت حل این مسئله، نوشتن آن به صورت یک مسئله محدب قابل کنترل بدون از بین رفتن ویژگی پراکندگی^۵ است. ترم پراکنده یا sparse با استفاده از l1-norm به دست می آید. جای گذاری l0-norm با l1-norm، نه تنها منجر به حداقل سازی تحدب^۶ (کم شدن تابع خطا) می شود بلکه وجود مشخصات پراکندگی یا وجود وقایع حدی (داده های نادر) را نیز تضمین می کند.

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

رابط فوق یک مسئله بهینه سازی محدب مقید^۷ است به طوری که به طور کامل دامنه مناسب رویکرد تکمیل شده ضرب لاگرانژی^۸ را تطبیق می کند.

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

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 حداقل سازی تابع زیر طی فرایند تکراری، به دست می آید.

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

۷. مدل های هیبرید ICA-ANN و GA-ANN

یکی از ساده ترین و کارآمدترین روش های پیشنهادی برای استفاده در طراحی شبکه های 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

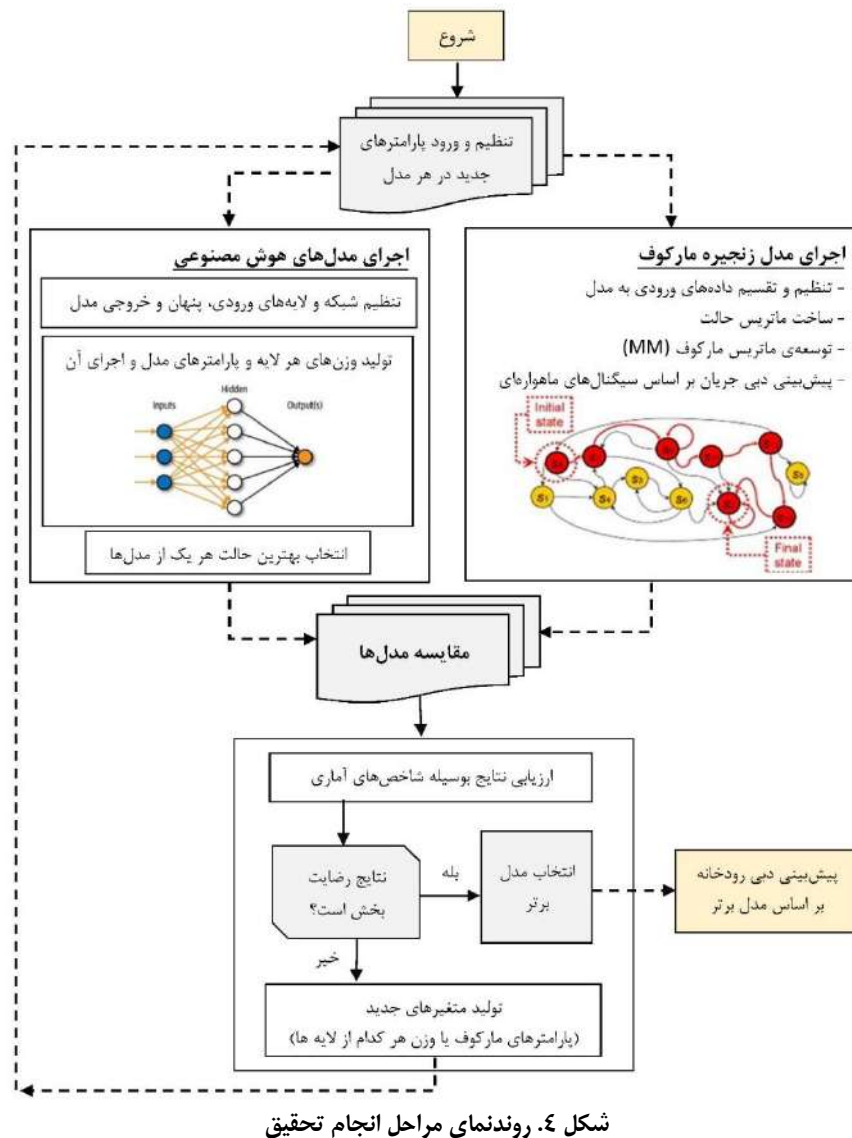
⁹ Yang

¹⁰ Zhang

¹¹ Penalty

تمام نرون های یک لایه به تمام نرون های لایه بعد متصل هستند. این چیدمان اصطلاحاً یک شبکه با اتصالات کامل را تشکیل می دهد. برخلاف شبکه های عصبی پرسپترون تک لایه، شبکه های چند لایه می توانند برای یادگیری مسائل غیرخطی و همچنین مسائلی با تصمیم گیری های متعدد بکار روند. اگر مجموعه داده دارای m ویژگی باشد؛ بنابراین در شبکه های عصبی لایه ورودی نیز دارای m نرون است و از این رو نیاز به n تا وزن W نیز هست که در ورودی ها ضرب شوند. ویژگی های مجموعه داده ها، متغیرهای مستقلی هستند که بر خروجی یا متغیر وابسته تأثیر می گذارند. همچنین با داشتن n نرون درون لایه پنهان، به n عدد مجموعه وزن ها ($W1, W2, \dots, Wn$) نیاز است تا بتوان عملیات ضرب وزن ها در ورودی های X انجام شود. برای پیش بینی دقیق خروجی مدل، باید وزن های شبکه در تمام لایه ها اصلاح شده و مقادیر بهینه آنها به دست آید. به منظور آموزش شبکه و اصلاح وزن ها تا رسیدن به یک خطای معنادار، روش های بسیار زیادی وجود دارد. یکی از روش های مؤثر در این زمینه ترکیب مدل $MILP$ با الگوریتم بهینه سازی در قالب یک مدل هیبرید است. در این تحقیق از دو مدل هیبرید $GA-ANN$ و $ICA-ANN$ استفاده شد. در ساختار این مدل ها، وزن های بهینه توسط الگوریتم های بهینه سازی ژنتیک و رقابت استعماری به دست می آیند. تابع هدف در این مدل ها کمینه سازی مقدار $RMSE$ است. تولید و اصلاح وزن ها در ساختار مدل تا رسیدن به کمترین خطا ادامه می یابد و تعداد تکرار الگوریتم بر این اساس تنظیم می شود. در هر یک از این مدل ها ۸۰ درصد از داده های موجود به صورت تصادفی به عنوان داده های مرحله آموزش در نظر گرفته شد و داده های باقیمانده (۲۰ درصد) به عنوان داده های مرحله آزمون بکار گرفته شد.

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



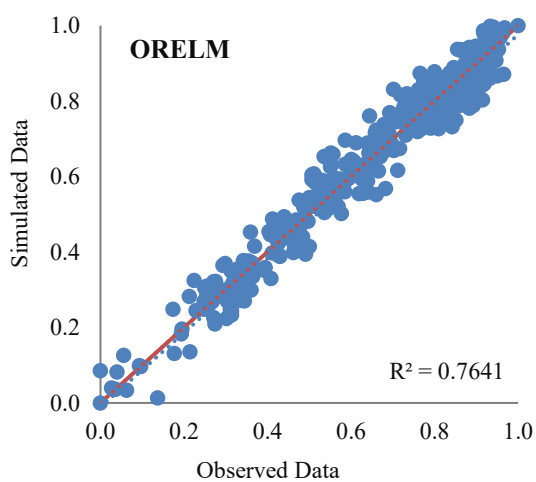
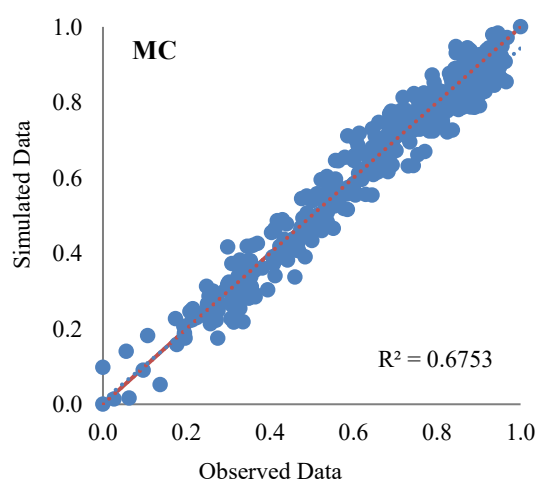
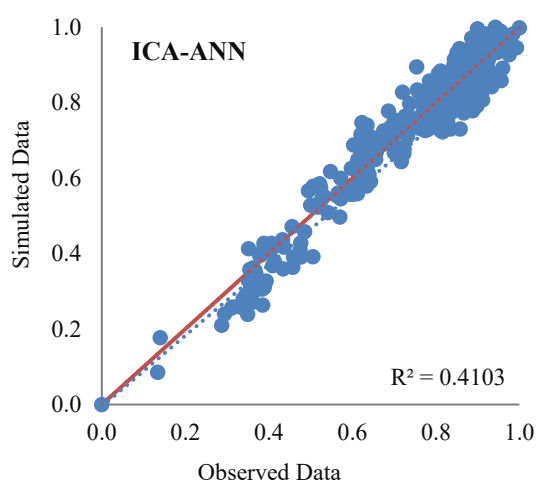
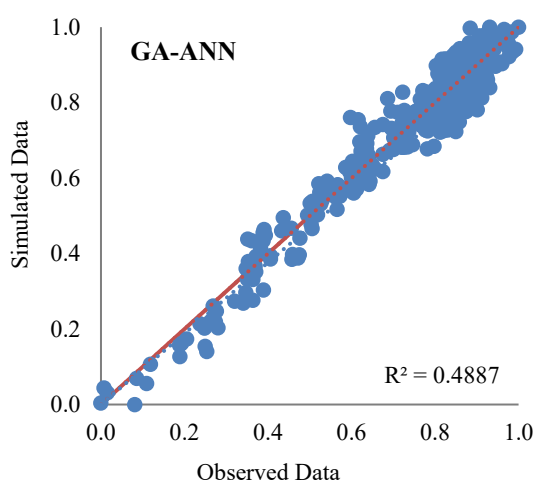
یافته‌های پژوهش

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

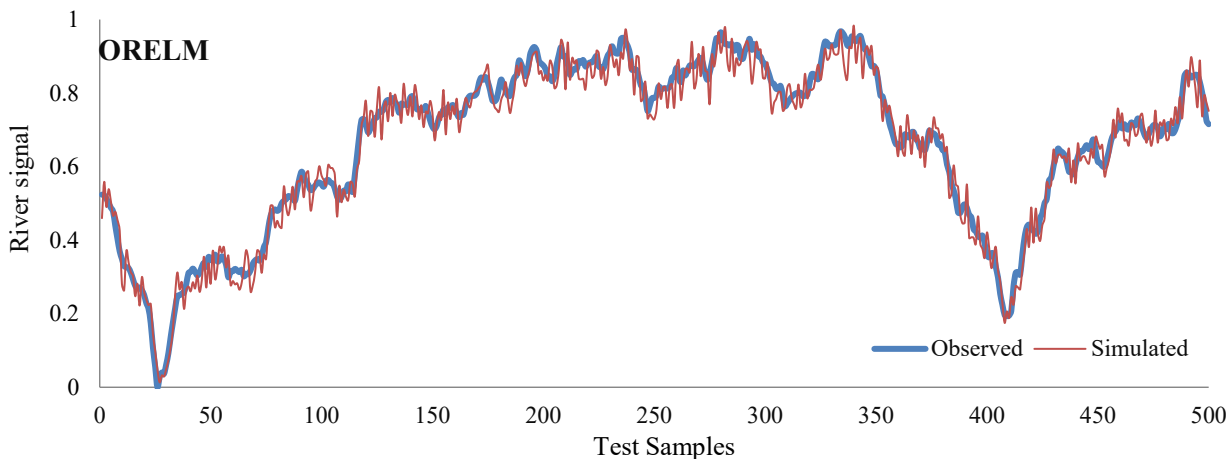
بهترین نتایج حاصل از اجرای هر کدام از این مدل‌ها در جدول (۱) ارائه شده است. بر اساس این جدول مدل ORELM باتوجه به تمامی شاخص‌ها دارای دقت بیشتری نسبت به سایر مدل‌ها در مراحل train و test می‌باشد. پس از آن مدل MC در رده دوم از نظر دقت پیش‌بینی قرار دارد. شکل (۵) پراکندگی نقاط در اطراف خط $Y=X$ و مقدار 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. پراکنش منظم تر 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 مشاهداتی در مرحله تست در شکل (۶) نشان داده شده است.

جدول ۱. ارزیابی عملکرد مدل های $GA-ANN$ ، $ICA-ANN$ ، MC و $ORELM$ در پیش بینی دبی رودخانه بر اساس سیگنال های ماهواره ای با استفاده از شاخص های آماری در مراحل $train$ و $test$

Model Type	Input combination		Terrain				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

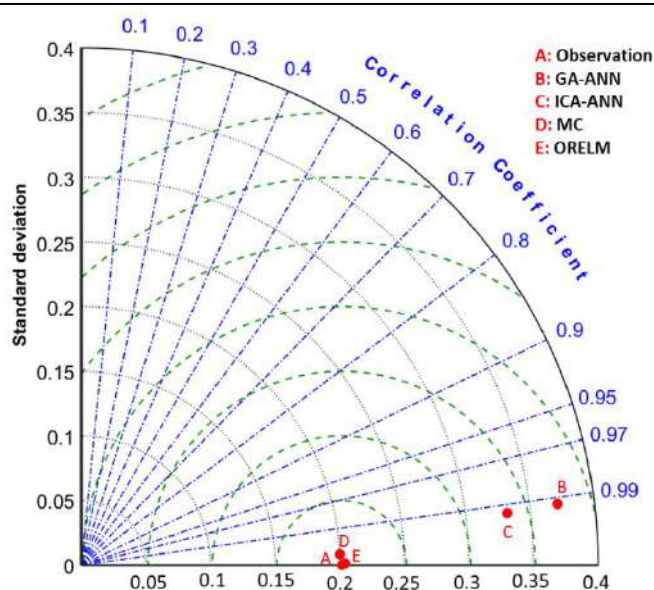


شکل ۶. سری زمانی مقادیر پیش‌بینی شده دبی رودخانه بر اساس مدل برتر (ORELM) در مقایسه با داده‌های مشاهداتی در مرحله تست

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، ICA-ANN، MC 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 مشاهداتی دبی رودخانه و نتایج ارزیابی مدل‌های فوق به ترتیب با نقاط D, C, B 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، ICA-ANN، MC و ORELM را با روش پیشنهادی برای ارزیابی صحت پیش‌بینی‌های انجام شده مقایسه می‌کند. فاصله هر نقطه ایجاد شده برای مدل‌های مختلف (E, D, C, B) 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 D, C, B) 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 بادقت زیاد پیش‌بینی نماید.



شکل ۷. نمودار گرافیکی تبلور برای انتخاب بهترین مدل هوش مصنوعی در مرحله تست مدل سازی

بحث

در این مطالعه از روش های مبتنی بر شبکه های عصبی مصنوعی برای پیش بینی سری زمانی جریان رودخانه بر اساس سیگنال های ماهواره ای در مقایسه با روش زنجیره مارکوف معمولی استفاده شده است تا بتوان قابلیت جایگزینی این روش ها با مدل های پیچیده و همچنین استفاده از اطلاعات ماهواره ای بجای داده های گران قیمت زمینی را بررسی کرد. این امر برای جایی که شرایط مطلوب برای به کارگیری مدل های عددی پیچیده برقرار نیست و یا اینکه اطلاعات کافی زمینی در دست نیست بسیار حائز اهمیت است. طوری که بتوان بر اساس تعداد ورودی های بسیار اندک و سیگنال های ماهواره ای، دبی رودخانه ها را با دقت زیاد پیش بینی نمود. با توجه به اهداف این تحقیق در تمامی روش های هوش مصنوعی و روش زنجیره مارکوف از سیگنال های ماهواره ای در روزهای قبل به عنوان داده های ورودی به مدل استفاده شد. خروجی مدل نیز داده های مشاهداتی ثبت شده در ایستگاه هیدرومتری در نزدیکی ورودی به سد مارون در ماه حاضر (t) است که بر اساس داده برداری زمینی استخراج شده است. برای پیش بینی جریان ورودی به مخزن سد مارون، عملکرد این مدل ها بر اساس شاخص های RMSE، NRMSE، NASH و R مورد ارزیابی قرار گرفت.

نتیجه گیری

امکان پیش بینی دبی رودخانه مارون در محل ورودی به سد بر اساس حجم اطلاعات بسیار کم نسبت به مدل های عددی و تنها با استفاده از سیگنال های ماهواره ای یکی از مهم ترین دستاوردهای این تحقیق است. در این حالت بدون نیاز به پارامترهای هواشناسی، خاک، زمین شناسی، اطلاعات توپوگرافی و شیب حوضه، پوشش گیاهی، اطلاعات برداشت آب از رودخانه ها، داده های اندرکنش آب سطحی و زیرزمینی و بدون نیاز به نقشه ها و نرم افزارهای پیچیده و بدون صرف زمان و هزینه زیاد برای کالیبراسیون و صحت سنجی مدل های ریاضی، دبی رودخانه بر اساس روش های هوش مصنوعی و سیگنال های ماهواره ای پیش بینی می گردد. این امر کمک بزرگی به متخصصین بخش منابع آب در حوضه های فاقد آمار یا حوضه هایی که فاقد اطلاعات پایه ای و نقشه های دقیق بوده و یا مناطقی که با نقص آمار گسترده مواجه هستند می کند. زیرا با استفاده از مدل های هوش مصنوعی با صرف زمان و هزینه بسیار کم اطلاعات مدیریتی بسیار ارزشمندی در خصوص پیش بینی نوسانات جریان ورودی به مخازن سدها در سال های

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 بیلان 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 به‌دست‌آمده 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 با 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>
- Esmaeili, 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 Relationshipbetween ManMade Lake and Surrounding Aquifer, Cimahi, Banduge, 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., & Ekhlasmand, 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., & Ekhlasmand, 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 Barani¹, Samad Emamgholizadeh^{2✉}, and Khalil Azhdari³

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 Sofla 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.

Selajgeh (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, Kutan, 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. نویسنده مسئول، گروه آب و محیط زیست، دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه صنعتی شاهرود، ایران. رایانامه: s_gholizadeh517@Shahroodut.ac.ir

۳. گروه آب و خاک، دانشکده کشاورزی، دانشگاه صنعتی شاهرود، ایران. رایانامه: Azhdari2055@yahoo.com

درباره مقاله	چکیده
نوع مقاله: مقاله پژوهشی تاریخ دریافت: ۱۴۰۳/۰۹/۱۰ تاریخ بازنگری: ۱۴۰۳/۱۲/۲۰ تاریخ پذیرش: ۱۴۰۴/۰۵/۰۳ تاریخ انتشار: ۱۴۰۵/۰۴/۰۱ کلیدواژه‌ها: حوضه آبخیز، روابط تجربی، رودخانه، سیلاب.	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. روش پژوهش: با استفاده از داده‌های رودخانه‌های تاش سفلی، فرحزاد، ابرسج و مجن، 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. یافته‌ها: بهترین روش تجربی برای رودخانه‌های تاش سفلی، فرحزاد، مجن (بند انحرافی-دوراهی) و ابرسج به ترتیب روش‌های سیلاب ویژه، فولر، دیکن و فرانکو-رودیر بود. همچنین خطای نسبی این روش‌ها به ترتیب 35.6، ۳.۷، 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)، ۶۵-۸۳.

10.22126/atwe.2025.11381.1145



© نویسندگان

شر: دانشگاه رازی.

مقدمه

سیل یکی از مهم ترین بلایای طبیعی است که بسیاری از نقاط جهان از جمله کشورهای توسعه یافته را تحت تأثیر قرار می دهد. در بین بلایای طبیعی، بیشترین آسیب را سیل به انسان وارد می کند، و یک سوم خسارات ناشی از بلایای طبیعی مربوط به سیل است و پیامدهای آن می تواند به طور مستقیم و غیرمستقیم بر دو سوم جمعیت زمین تأثیر بگذارد. جدا از آسیب های فیزیکی، سالانه بخش زیادی از مردم جهان در اثر سیل جان خود را از دست می دهند (سلیمانی و درویشی، ۱۳۹۹؛ یوانگ^۱، ۲۰۲۳).

باتوجه به اینکه سیل بزرگ ترین و مهم ترین بحران اقلیمی است که همه ساله جان هزاران نفر را می گیرد و خسارات فراوانی را به جامعه انسانی و محیط زیست وارد می آورد و از گذشته های بسیار دور همواره انسان را به هراس انداخته است، مدیریت و کنترل آن بسیار مهم است. شواهد و گزارش های موجود نشان می دهد که خسارات ناشی از سیل بیش از سایر سوانح طبیعی است (استعلاجی و همکاران^۲، ۲۰۲۳).

مخاطرات و بلایای طبیعی یکی از مهم ترین نگرانی های جهانی است که به دفعات زیاد در تمام دنیا اتفاق می افتد و از آن جایی که ارتباط نزدیکی با وضعیت رشد و توسعه کشورها دارد آسیب های جبران ناپذیر اقتصادی و اجتماعی در زندگی مردم ایجاد می کند (پکار^۳، ۲۰۲۴).

سیل می تواند ناشی از پدیده های طبیعی مانند طغیان رودخانه ها، طوفان های ساحلی، جزرومد یا بارندگی شدید در مناطق شهری باشد و یا می تواند به واسطه عوامل انسانی مانند عملکرد نادرست سازه های هیدرولیکی یا رهاسازی بی رویه آب ناشی از یک حادثه، یا ریزش جزئی یا کلی یک سد رخ دهد. طی ۲۰ سال گذشته، سیل تکراری ترین نوع بلایای طبیعی بوده است. ویژگی های بارندگی به عنوان مهم ترین عوامل اقلیمی مؤثر بر وقوع سیل در نظر گرفته می شود (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 رواناب ها جای خود را به واقع گرایی و درک این واقعیت دهد که همیشه نمی توان در مهار سیلاب ها موفق بود، بلکه باید کوشید تا پیامدهای مخرب و زیان بار آن را کاهش داد. مدیریت سیلاب از اقدامات اساسی در برنامه ریزی منابع آب است که برای به حداقل رساندن خسارات و دستیابی به توسعه پایدار جوامع به کار می رود. اولین قدم جهت مدیریت سیل، داشتن اطلاعات و داده های 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 سیل های ویرانگر و خسارت های فاجعه باری شده است. علاوه بر آن عوامل انسانی نیز مانند تخریب حوضه های آبخیز می توانند موجب بدتر شدن خسارت سیل شوند. بنابراین در جهت کاهش خسارات مالی و جانی مدیریت سیل، بسیار مهم است. این امر جایگاه ویژه ای به مدیریت غیرساختاری در مدیریت کلی سیل داده است. سیستم های هشدار و پیش بینی سیل از جمله روش های غیرسازه ای هستند که نقش عمده ای در کاهش خسارات سیل دارند (پناهی و همکاران، ۱۴۰۱).

ادبیات موضوع و پیشینه پژوهش

باتوجه به اهمیت برآورد سیل در پروژه های مختلف، پژوهشگران متعددی در این زمینه تحقیق نمودند که برای مثال می توان به موارد زیر اشاره نمود.

¹ Young

² Estelaji et al

³ Peker et al

⁴ Cred- UNDRR

⁵ 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 متعارف و خطی، گروه زیر حوضه‌های همگن را تعیین کردند. برای مناطق مذکور، توزیع احتمالاتی غالب منطقه توزیع لوگ پیرسون تیپ ۳ تعیین گردید و بر اساس 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.

عرب‌خدری (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 ۳۸ 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 با 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، فانینگ^۷، هورتون^۸، روش سازمان زمین‌شناسی آمریکا^۹ را مورد آنالیز حساسیت قرار دادند. نتایج به‌دست‌آمده 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 Dicken

² Kreiger

³ Fuller

⁴ English

⁵ Koutan

⁶ Meyer

⁷ Fanning

⁸ Horton

⁹ USGS

¹⁰ Turk

عزیزنیا 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 نکویی 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 بارندگی 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 بادقت نسبتاً مناسب پیش بینی کرد.

روش پژوهشی

۱. منطقه مورد مطالعه

در این تحقیق رودخانه های شهرستان شاهرود واقع در استان سمنان (تاش سفلی، فرحزاد، 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.

^۱ Campbell & Side



رودخانه تاش



رودخانه فرحزاد



رودخانه مجن بند انحرافی-دوراهی



رودخانه ابرسج

شکل ۱. موقعیت مکانی رودخانه های مورد مطالعه در محیط گوگل ارث

جدول ۱. موقعیت مکانی ایستگاه های هیدرومتری در رودخانه های مورد مطالعه

ردیف	نام ایستگاه	نام رودخانه	طول جغرافیایی	عرض جغرافیایی	ارتفاع (متر)	مساحت حوضه (کیلومتر مربع)
۱	مجن بند انحرافی-دوراهی	مجن	۵۴-۳۸-۵۹	۳۶-۲۸-۳۴	۲۰۵۵	۱۴۷۰۹
۲	فرحزاد-تاش	تاش	۵۴-۴۲-۱۲	۳۶-۳۰-۴۱	۱۹۰۷	۱۲۲
۳	تاش سفلی	تاش	۵۴-۴۰-۳۳	۳۶-۳۳-۳۳	۲۲۲۷	۳۵۰۷
۴	ابرسج	ابرسج	۵۴-۵۵-۲۰	۳۶-۳۴-۵۹	۱۷۵۰	۱۹۰۲

۲. معرفی روابط تجربی

روابطه ی تجربی بر پایه همبستگی بین مقادیر سیلاب و پارامترهای فیزیکی و بارندگی در بسیاری از کشورها ارائه شده است. در حقیقت این روابط تنها برای منطقه ای که داده های آن در رابطه همبستگی بکار برده شده اند، اعتبار دارد و در دیگر حوضه ها باید پارامترهای آن بومی سازی شوند. برای به دست آوردن پیک سیلاب در محل خروجی زیرحوضه های حوضه آبریز، نیاز به تحلیل منطقه ای و انتقال مقادیر سیلاب به موقعیت خروجی این زیرحوضه ها است. از روش های تجربی ذیل برای تحلیل منطقه ای سیلاب استفاده شده است:

روش دیکن (Diken)

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

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

که در آن: A : سطح حوضه آبریز بر حسب کیلومترمربع، 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 (کیلومترمربع)
۱	۲۵ تا
۰/۵	۲۵ تا ۲۵۰۰
۰/۳۳	۲۵۰۰ تا ۲۵۰۰۰
۰/۲۵	۲۵۰۰۰ 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.

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

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

که در آن $Q_{MAX.d}$: 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 سالیانه، 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)

¹ Subramanya

² Fuller

³ Chow et al

روش سیلاب ویژه

در این روش از نسبت سیلاب های مشاهده شده با دوره بازگشت مختلف به مساحت حوضه آبریز استفاده می گردد. با استفاده از این روش سیلاب ویژه ایستگاه های آب سنجی منطقه مطالعاتی محاسبه، سپس سیلاب ویژه منطقه طرح برای دوره بازگشت مختلف به دست آمده و مبنای محاسبه سیلاب خروجی زیرحوضه های حوضه آبریز مورد مطالعه قرار می گیرد (چاو و همکاران، ۱۹۹۸).

روش فرانکو-رودیر

روش تجربی فرانکو-رودیر^۱ نیز یک روش تجربی نظیر دیکن است که در رابطه آن علاوه بر ضریب مساحت، توان نیز تغییر می کند. 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 یاد شده، مقادیر ضریب فرانکو - رودیر ایستگاه های آب سنجی منطقه مطالعاتی و رابطه مساحت با دوره برگشت مختلف به دست آمده است.

یافته های پژوهشی

۱. بررسی صحت داده ها

پس از جمع آوری آمار آبدی سالانه ایستگاه های آب سنجی موجود در منطقه مطالعاتی، صحت این آمار به روش های مختلف مورد بررسی قرار گرفته است. نخست با بررسی و مقایسه سال به سال آبدی ایستگاه های 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 داده های پرت (*Outliers*) با روش چشمی معمولاً با استفاده از نمودارهای گرافیکی (نمودار پراکنش)^۲ انجام می شود. این روش به ما کمک می کنند تا داده هایی که به طور غیرعادی از الگوی کلی داده ها 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 داده ها، 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 داده های آبدی سالانه ایستگاه های منتخب ارائه شده است. در این جدول، چهار ایستگاه مختلف بررسی شده اند: فرحزاد، تاش سفلی، مجن بند انحرافی-دوراهی و ابرسج. هر ایستگاه دارای مقادیر متفاوتی برای حدود مجاز (U)، U محاسبه شده، Nb تعداد نمونه های دنباله b و Na تعداد نمونه های دنباله a است. همان گونه که نتایج این جدول نشان می دهد، بر اساس آزمون مذکور این ایستگاه ها دارای داده های تصادفی هستند.

¹ Franco, Rodier

² Scatter Plot

³ Outlier data

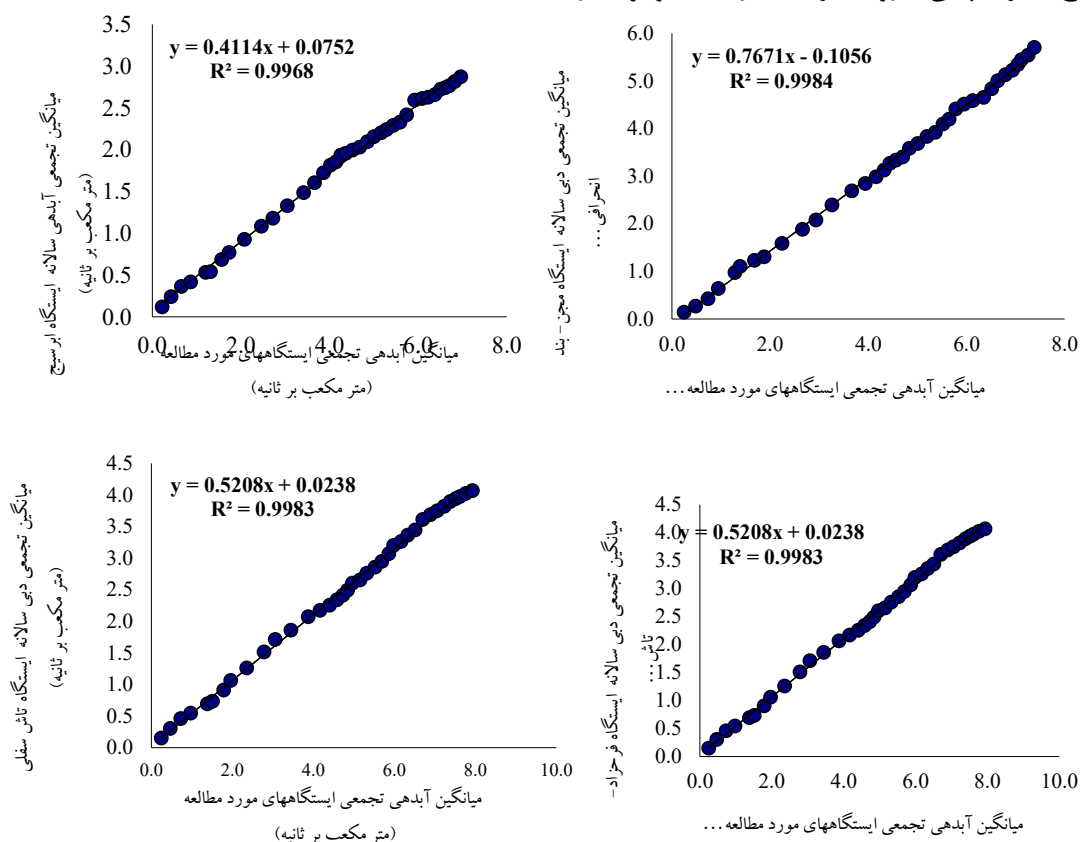
⁴ Run-Test

⁵ Double Mass Curve test

جدول ۳. نتایج آزمون ران تست بر روی آمار آبدی 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
تاش سفلی	۱۱	۱۹	۱۱	۲۰-۹	۵
مجن بند انحرافی-دوراهی	۱۳	۱۸	۱۱	۲۳-۱۰	۵
ابرسج	۷	۱۳	۸	۱۵-۵	۵

منحنی‌های جرم مضاعف (Double Mass Curve) یک ابزار گرافیکی قدرتمند برای بررسی سازگاری و همگنی داده‌های هیدرولوژیکی، مانند آبدی سالانه، است. این منحنی‌ها معمولاً برای تشخیص تغییرات ناگهانی یا روندهای غیرعادی در داده‌ها استفاده می‌شوند. در این منحنی محور افقی (X)، مجموع تجمعی آبدی سالانه یک ایستگاه مرجع (یا میانگین چند ایستگاه و محور عمودی (Y)، مجموع تجمعی آبدی سالانه ایستگاه مورد بررسی است و هر نقطه روی نمودار نشان‌دهنده مجموع تجمعی آبدی تا آن سال است. در شکل (۲) منحنی‌های جرم مضاعف آمار آبدی سالانه ایستگاه‌های منتخب ارائه شده است. بر اساس نتایج به‌دست‌آمده از این آزمون آمار آبدی سالانه ایستگاه‌های منتخب همگی همگن هستند چرا که منحنی ترسیم شده به‌صورت یک خط مستقیم با 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 نرم افزار 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) رودخانه های مورد مطالعه با استفاده از توابع توزیع آماری

تابع توزیع انتخاب شده	۵۰۰	۱۰۰	۵۰	۲۵	۱۰	۵	۲	دوره بازگشت (سال)	ایستگاه
<i>Log_pearson3</i>	۵۳/۲۱	۴۶/۰۶	۴۰/۲۱	۳۴/۰۳	۲۷/۵۹	۱۸/۸۹	۱۳/۴۱	۴/۵۹	ابرسج
<i>Gumbel Max</i>	۵۳/۶۱	۴۶/۶۳	۴۱/۳۴	۳۶/۰۳	۳۰/۶۹	۲۳/۴۸	۱۷/۷۷	۹/۱۶	مجن بند انحرافی-دوراهی
<i>Log_pearson3</i>	۴۲/۱۱	۳۸/۲۳	۳۴/۹۲	۳۱/۲۶	۲۷/۲۲	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 رودخانه های مورد مطالعه (تاش سفلی، مجن، ابرسج، فرحزاد) در شهرستان شاهرود واقع در استان سمنان بوده است، با فرض اینکه در این رودخانه ها اندازه گیری دبی وجود ندارد، از داده های ایستگاه های هیدرومتری موجود در اطراف رودخانه های مورد مطالعه جهت برآورد سیلاب استفاده گردید و سپس نتایج به دست آمده برای سیلاب با دوره های بازگشت متفاوت با مقادیر سیلاب برآورد شده با استفاده از توابع توزیع آماری به دست آمده مورد مقایسه قرار گرفت. در جداول (۵) نتایج حاصل از برآورد سیلاب با روش های تجربی برای رودخانه تاش سفلی ارائه شده است.

برای بررسی دقت مدل های تجربی در برآورد سیلاب رودخانه های مورد مطالعه از معیار خطای نسبی^۱ که یک معیار مهم در ارزیابی دقت و صحت اندازه گیری ها یا محاسبات است (رابطه ۵)، استفاده شد. این خطا نشان دهنده میزان اختلاف بین مقدار دبی سیلاب اندازه گیری شده و مقدار دبی سیلاب محاسبه شده است و به صورت نسبی بیان می شود. خطای نسبی معمولاً به صورت درصد یا نسبت بیان می شود و به شکل زیر محاسبه می شود:

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

RE = خطای نسبی، O مقدار دبی سیلاب اندازه گیری شده و P مقدار دبی سیلاب محاسبه شده است.

همان طور که نتایج به دست آمده در جدول (۶) نشان می دهد 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 می باشد.

^۱ 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 فرانکو-رودیر	روش تجربی فولر	متوسط
۲	۳/۳۷	۳/۶۲	۳/۳۶	۲/۱۵	۳/۱۳
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	۹/۹۲	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	۲۳/۶۵	۳۳/۷۳	۲۷/۹۹	۱۸/۳۶	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 فرانکو-رودیر	روش تجربی فولر	متوسط
۲	۴/۵۵	۲۵/۷۸	۲۰/۳۵	۲۶/۰۷	۵۲/۷۸	۳۱/۲۵
۵	۱۱/۵۵	۳۸/۶۲	۲۴/۷۲	۳۳/۴۵	۵۷/۲	۳۸/۵
۱۰	۱۷/۶۴	۴۴/۶۸	۲۸/۱۴	۳۸/۱۴	۵۹/۸۲	۴۲/۶۹
۲۵	۲۶/۹	۵۰/۸۱	۳۳/۱۶	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	۵۵/۳۵	۷۰/۶۳	۵۸/۵۴
۵۰۰	۶۹/۷۳	۶۶/۰۹	۵۱/۶۳	۵۹/۸۶	۷۳/۶۶	۶۲/۸۱
	متوسط خطا	۵۰/۵۴	۳۵/۶۳	۴۴/۸۵	۶۴/۰۳	۴۸/۷۷

رودخانه فرحزاد

باتوجه به اینکه در اطراف حوضه فرحزاد ایستگاه‌های هیدرومتری مجن، ابرسج، 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 ۱۲۲/۲۴ درصد می‌باشد.

جدول ۷. برآورد حداکثر سیلاب (متر مکعب بر ثانیه) رودخانه فرحزاد با روش های تجربی

دوره بازگشت (سال)	روش دیکن	روش سیلاب ویژه	روش فرانکو-رودیر	روش تجربی فولر	متوسط
۲	۶/۲۴	۱۲/۳۸	۹/۵۴	۵/۷۴	۸/۴۷
۵	۱۳/۱	۲۹/۷۱	۲۰/۳۷	۱۳/۲۱	۱۹/۱
۱۰	۱۸/۰۴	۴۳/۳۳	۲۸/۱	۱۸/۹۴	۲۷/۱
۲۵	۲۴/۴۶	۶۱/۴۵	۳۸	۲۶/۵۳	۳۷/۶۱
۵۰	۲۷/۴۳	۷۲/۶۷	۴۲/۷۹	۳۰/۹۶	۴۳/۴۶
۱۰۰	۳۳/۵۷	۸۷/۵۲	۵۱/۷۹	۳۷/۳۹	۵۲/۵۷
۲۰۰	۳۸/۰۱	۹۹/۸۵	۵۸/۳۶	۴۲/۵۷	۵۹/۷
۵۰۰	۴۳/۷۱	۱۱۵/۲۶	۶۶/۶۶	۴۹/۰۸	۶۸/۶۸

جدول ۸. خطای محاسبه شده (درصد) با روش های تجربی برای رودخانه فرحزاد

دوره بازگشت (سال)	فرحزاد	روش دیکن	روش سیلاب ویژه	روش فرانکو-رودیر	روش تجربی فولر	متوسط
۲	۸/۴۷	۲۶/۳۸	۴۶/۰۵	۱۲/۵۹	۳۲/۲۸	۳/۳
۵	۱۶/۱۴	۱۸/۸۱	۸۴/۰۹	۲۶/۲۲	۱۸/۱۴	۱۸/۳۴
۱۰	۲۱/۲۳	۱۵	۱۰۴/۱۲	۳۲/۳۹	۱۰/۷۵	۲۷/۶۹
۲۵	۲۷/۲۲	۱۰/۱۳	۱۲۵/۷۳	۳۹/۵۸	۲/۵۶	۳۸/۱۶
۵۰	۳۱/۲۶	۱۲/۲۶	۱۳۲/۴۲	۳۶/۸۵	۰/۹۸	۳۹/۰۱
۱۰۰	۳۴/۹۲	۳/۸۷	۱۵۰/۶	۴۸/۲۹	۷/۰۷	۵۰/۵۲
۲۰۰	۳۸/۲۳	۰/۵۸	۱۶۱/۲	۵۲/۶۵	۱۱/۳۵	۵۶/۱۶
۵۰۰	۴۲/۱۱	۳/۸۱	۱۷۳/۷۲	۵۸/۳۱	۱۶/۵۵	۶۳/۱
	متوسط خطا	۱۰/۴	۱۲۲/۲۴	۳۸/۳۶	۳/۷۱	۳۶/۶۲

رودخانه مجن بند انحرافی-دوراهی

برای رودخانه مجن بند انحرافی-دوراهی، باتوجه به اینکه در اطراف حوضه آن رودخانه حوضه های تاش سفلی، ابرسیج، فرحزاد وجود دارد و دارای شرایط مشابه با آن حوضه است، از داده های ایستگاه های هیدرومتری آن ها جهت برآورد ضرایب تجربی استفاده شد و در نهایت مقادیر دبی سیلاب با استفاده از هر کدام از روش های تجربی (دیکن، فولر، سیلاب ویژه، فرانکو-رودیر) برآورد گردید که نتایج به دست آمده در جدول (۹) ارائه شده است.

همان طور که نتایج به دست آمده در جدول (۱۰) نشان می دهد 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 نهایتا بیشترین خطا مربوط به روش سیلاب ویژه با ۱۳۱/۷۹ درصد می باشد.

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

دوره بازگشت (سال)	روش دیکن	روش سیلاب ویژه	روش فرانکو-رودیر	روش تجربی فولر	متوسط
۲	۶/۸۷	۱۵	۱۱/۲۳	۶/۶۹	۹/۹۵
۵	۱۴/۴۳	۳۶/۰۲	۲۳/۷۳	۱۵/۴۱	۲۲/۴
۱۰	۱۹/۸۶	۵۲/۵۲	۳۲/۵۹	۲۲/۱	۳۱/۷۷
۲۵	۲۶/۹۴	۷۴/۴۹	۴۳/۸۸	۳۰/۹۴	۴۴/۰۶
۵۰	۳۰/۲	۸۸/۰۹	۴۹/۳۳	۳۶/۱۱	۵۰/۹۳
۱۰۰	۳۶/۹۶	۱۰۶/۱	۵۹/۵۴	۴۳/۶۲	۶۱/۵۶
۲۰۰	۴۱/۸۵	۱۲۱/۰۵	۶۶/۹۸	۴۹/۶۶	۶۹/۸۸
۵۰۰	۴۸/۱۳	۱۳۹/۷۲	۷۶/۳۷	۵۷/۲۵	۸۰/۳۷

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

دوره بازگشت (سال)	مجن بند انحرافی- دوراهی	روش دیکن	روش سیلاب ویژه	روش فرانکو-رودیر	روش تجربی فولر	متوسط
۲	۹/۱۶	۲۴/۹۹	۶۳/۸۵	۲۲/۷	۳۷/۳۳	۶/۰۶
۵	۱۷/۷۷	۱۸/۸۳	۱۰۲/۶۵	۳۳/۵۲	۲۵/۶۷	۲۲/۹۲
۱۰	۲۳/۴۸	۱۵/۳۹	۱۲۳/۷۲	۳۸/۸	۱۹/۳۱	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	۴۱/۳۴	۱۰/۵۹	۱۵۶/۶۴	۴۴/۰۲	۹/۵۵	۴۵/۱۳
۲۰۰	۴۶/۶۳	۱۰/۲۵	۱۵۹/۶	۴۳/۶۴	۸/۷۱	۴۶/۰۷
۵۰۰	۵۳/۶۱	۱۰/۲۲	۱۶۰/۶۴	۴۲/۴۶	۸/۴۵	۴۶/۱۱
	متوسط خطا	۱۴/۸۳	۱۳۱/۷۹	۳۸/۱۳	۱۷/۰۸	۳۴/۵

رودخانه ابرسج

باتوجه به اینکه در اطراف حوضه ابرسج ایستگاه های هیدرومتری تاش سفلی، مجن و فرحزاد هستند از داده های این ایستگاه جهت برآورد ضرایب تجربی استفاده شد. برآورد سیلاب با استفاده از روش های تجربی دیکن، فولر، سیلاب ویژه، فرانکو-رودیر در جدول (۱۱) ارائه گردید.

همان طور که نتایج به دست آمده در جدول (۱۱) نشان می دهد، علارقم اینکه روش دیکن خطای زیادی دارد اما سه روش سیلاب ویژه، روش فرانکو-رودیر و روش تجربی فولر دارای دقت بهتری نسبت به روش دیکن بوده اند. کمترین خطا برآورد سیلاب رودخانه ابرسج مربوط به روش روش فرانکو-رودیر بوده است که مقدار آن ۳۸/۹۱ درصد بوده است. بعد از آن سیلاب ویژه با خطای ۵۶/۸۹ درصد می باشد.

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

دوره بازگشت (سال)	روش دیکن	روش سیلاب ویژه	روش فرانکو-رودیر	روش تجربی فولر	متوسط
۲	۱۱/۱۵	۱/۳۵	۱/۶۹	۱/۱۵	۳/۸۳
۵	۲۶/۴۲	۲/۷۸	۳/۷۹	۲/۳۶	۸/۸۴
۱۰	۳۸/۳۴	۳/۸	۵/۳۵	۳/۲	۱۲/۶۵
۲۵	۵۴/۸۹	۵/۱۱	۷/۴۳	۴/۳	۱۷/۹۳
۵۰	۵۴/۱۹	۵/۵۸	۸/۲۸	۴/۷۲	۱۸/۱۹
۱۰۰	۷۹/۰۲	۶/۹۸	۱۰/۴۳	۵/۸۵	۲۵/۵۷
۲۰۰	۹۱/۷۵	۷/۹	۱۱/۹۴	۶/۶۱	۲۹/۵۵
۵۰۰	۱۰۸/۹۲	۹/۱۱	۱۳/۸۹	۷/۶	۳۴/۸۸

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

دوره بازگشت (سال)	ابرسج	روش دیکن	روش سیلاب ویژه	روش فرانکو-رودیر	روش تجربی فولر	متوسط
۲	۲/۷۷	۳۰۳/۰۵	۵۱/۱۷	۳۸/۹۶	۵۸/۳۶	۱۱۲/۸۹
۵	۴/۴۷	۴۹۰/۸۶	۳۷/۷۷	۱۵/۱۵	۴۷/۳۲	۱۴۷/۷۷
۱۰	۶/۳۲	۵۰۴/۵۷	۳۹/۹۹	۱۵/۳۸	۴۹/۳۸	۱۵۲/۳۳
۲۵	۱۰	۴۴۸/۸۸	۴۸/۸۶	۲۵/۷۵	۵۷/۰۲	۱۴۵/۱۳
۵۰	۱۴/۱۴	۲۸۳/۱۶	۶۰/۵۴	۴۱/۴۷	۶۶/۶۳	۱۱۲/۹۵
۱۰۰	۲۰	۲۹۵/۰۸	۶۵/۱۱	۴۷/۸۳	۷۰/۷۷	۱۱۹/۷
۲۰۰	۲۸/۲۸	۲۲۴/۳۹	۷۲/۰۶	۵۷/۸	۷۶/۶۳	۱۰۷/۷۲
۵۰۰	۴۴/۷۲	۱۴۳/۵۵	۷۹/۶۴	۶۸/۹۳	۸۳	۹۳/۷۸
	متوسط خطا	۳۳۶/۶۹	۵۶/۸۹	۳۸/۹۱	۶۳/۶۴	۱۲۴/۰۳

بحث

برای انجام این پژوهش رودخانه های تاش سفلی، فرحزاد، مجن بند انحرافی - دوراهی و ابرسج در نظر گرفته شد. این رودخانه ها در استان سمنان شهرستان شاهرود قرار گرفته اند. به منظور برآورد مقادیر سیلاب از روش های تجربی مرسوم برآورد سیلاب (دیکن، فولر، سیلاب ویژه، فرانکو-رودیر) استفاده گردید. نتایج به دست آمده به شرح ذیل است:

- برای رودخانه تاش سفلی، بهترین برآورد سیلاب روش سیلاب ویژه بوده است که مقدار خطای آن ۳۵/۶۳ درصد بوده است.
- برای رودخانه فرحزاد 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 فرانکو-رودیر که مقدار خطای آن ۳۸/۹۱ درصد بوده است.

نتیجه گیری

همان طوری که نتایج به دست آمده برای رودخانه های مختلف مورد تحقیق نشان می دهد، مقادیر خطا در رودخانه های مختلف متفاوت بوده است و همچنین یک روش خاص را نمی توان به صورت 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 می دهد این روش به خوبی توانسته است مقدار حداکثر سیلاب را تخمین بزند.

به عبارت بهتر نتایج این پژوهش نشان می دهد که روش های تجربی مختلف برای برآورد سیلاب در رودخانه های مختلف، دقت متفاوتی دارند. این تفاوت در دقت ناشی از ویژگی های هیدرولوژیکی و هیدرولیکی خاص هر رودخانه است، مانند شیب، مساحت حوضه، نوع خاک، و شرایط اقلیمی. در نهایت، این پژوهش نشان می دهد که عدم توجه به انتخاب روش مناسب می تواند 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 نموده اند 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 منطقه ای استان سمنان که اطلاعات مورد نیاز این پژوهش را در اختیار نویسندگان قرار دادند، سپاسگزاری می گردد.

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 خدری، مهدی. (۱۳۶۸). بررسی سیلاب‌های حداکثر در حوضه‌های آبخیز شمال البرز، پایان نامه کارشناسی ارشد، دانشگاه تهران، تهران، ایران.
- بنی صفار، محمد. (۱۳۹۲). برآورد سیل حوضه آبخیز با استفاده از روش‌های تجربی کریگر، فولر و SCS (مطالعه موردی: حوضه زرین‌گل، استان گلستان). کنفرانس ملی انجمن ایرانی ژئومورفولوژی، 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 مرتع و آبخیزداری، ۱ (۱)، ۲۱-۱۰. <https://doi.org/20.1001.1.2008790.1389.1.1.1.5>
- عبادی فر، محسن، و نادری دژگاه، 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، زهرا، 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 (۲۰)، 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، ملک‌نژاد، 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 شرق 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 سورخاب). 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 /کوهیدرولوژی، 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 Dejgah, 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://iwrj.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(2), 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 Seydon 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 پایین‌دست 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@bkatu.ac.ir

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

در باره مقاله	چکیده
نوع مقاله: مقاله پژوهشی	هدف: هدف این مقاله، بررسی تأثیر موقعیت هسته آسفالتی در سدهای سنگریزه‌ای بر میزان دبی عبوری و پایداری شیب پایین‌دست در شرایط جریان پایدار است. همچنین، تحلیل حساسیت پارامترهای مؤثر بر پایداری سد، به‌ویژه زاویه اصطکاک مصالح پوسته سد، مورد توجه قرار گرفته است.
تاریخ دریافت: ۱۴۰۴/۰۳/۰۷ تاریخ بازنگری: ۱۴۰۴/۰۷/۰۸ تاریخ پذیرش: ۱۴۰۴/۰۹/۱۵ تاریخ انتشار: ۱۴۰۵/۰۴/۰۱	روش پژوهش: این مطالعه با استفاده از تحلیل‌های عددی و مدل‌سازی شرایط هیدرولیکی و مکانیکی سد انجام شده است. تأثیر جابه‌جایی هسته آسفالتی از سمت بالادست به پایین‌دست بر روی دبی نشت، ضریب ایمنی و قابلیت اطمینان شیب پایین‌دست در شرایط استاتیکی و شبه‌استاتیکی بررسی شده است. همچنین، تحلیل حساسیت برای تعیین پارامترهای کلیدی مؤثر بر پایداری سد انجام گرفته است.
کلیدواژه‌ها: هسته بتن آسفالتی، سد سنگریزه‌ای، جریان پایدار، آنالیز حساسیت، آنالیز احتمالاتی.	یافته‌ها: جابه‌جایی هسته آسفالتی به سمت پایین‌دست، باعث افزایش دبی عبوری از سد می‌شود. این جابه‌جایی، ضریب ایمنی و قابلیت اطمینان شیب پایین‌دست را در شرایط استاتیکی و شبه‌استاتیکی کاهش می‌دهد. بر اساس تحلیل حساسیت، زاویه اصطکاک مصالح پوسته سد بیشترین تأثیر را بر پایداری شیب پایین‌دست دارد.
	نتیجه‌گیری: موقعیت هسته آسفالتی در سدهای سنگریزه‌ای نقش تعیین‌کننده‌ای در عملکرد هیدرولیکی و پایداری سازه دارد. قرارگیری هسته در سمت بالادست، نه تنها نشت آب را کاهش می‌دهد، بلکه پایداری شیب پایین‌دست را نیز بهبود می‌بخشد. همچنین، زاویه اصطکاک مصالح پوسته سد به‌عنوان پارامتر کلیدی در طراحی این نوع سدها باید مورد توجه ویژه قرار گیرد. این یافته‌ها می‌توانند در بهینه‌سازی طراحی سدهای سنگریزه‌ای با هسته آسفالتی مؤثر باشند.

استناد: اصغری پری، سیدعلی؛ اصغری پری، سیدامین (۱۴۰۴). تأثیر مکان هسته بتن آسفالتی در سد سنگریزه‌ای بر تحلیل احتمالاتی پایداری شیب پایین‌دست در شرایط جریان پایدار. *فناوری‌های پیشرفته در بهره‌وری آب*، ۶ (۲)، ۸۴-۱۰۱.

10.22126/atwe.2025.12240.1169



© نویسندگان

شر: دانشگاه رازی.

مقدمه

برای مدت طولانی، هسته‌های رسی معمولاً در سدهای خاکی به عنوان یک جزء آب‌بندی در ساختار سد استفاده می‌شوند. سدهای با هسته بتنی آسفالتی یکی از گزینه‌های مهم در طراحی سدهای خاکی و سنگ‌ریزی 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 (کمپته 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 به صورت غیراشباع در نظر گرفته شده تا بینش 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 بتن آسفالتی انجام شده است.

والستاد و همکاران^۳ (۱۹۹۱) سد استوراتن در نروژ را بررسی نمود. آنها تغییر شکل دائمی سد با استفاده از روش نیومارک را محاسبه کردند که نتایج نشان می‌دهد که رفتار سد در برابر زلزله خوب است. گوردیل^۴ (۱۹۹۹) سد کوپرا را برای هر دو حالت سطوح زمین‌لرزه OBE و MCE مورد تحلیل قرارداد. در این تحلیل‌ها از روش اجزا محدود و مدل هاپیربولیک برای محاسبه تنش‌ها استفاده کردند. نتایج این مطالعه حاکی از آن بود که با وجود اینکه ترک‌هایی در هسته سد به وجود آمد؛ اما با توجه به قابلیت خودترمیمی قیر، نشست در مدت زمان کوتاهی متوقف شد. منیتز و جونز^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 پایین دست 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 بازیار 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 قرارداد. تست‌های یکنواخت و چرخه‌ای متعدد برای ارزیابی نمونه‌های بتن آسفالتی مورد استفاده در سازه‌های هیدرولیکی استفاده شد. رفتار سد گرمروود توسط

¹ ICOLD² Hoeg³ Walstad et al⁴ Gurdal⁵ Meintjes & Jones⁶ Mahabadi & Roosta⁷ Gatmiri & Mokarram

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 گرم‌رود عملکرد خوبی در برابر زلزله دارد. قهرمان نژاد و همکاران (۲۰۱۰) تغییر شکل لرزه‌ای سد رودخانه شور با هسته بتنی قیری 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. اختراپور 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 0.4% 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 قرارداد. نتایج آزمایش‌های میز لرزه‌ای با نتایج عددی مطابق بود. تابلان و همکاران^۲ (۲۰۱۷) رفتار سد دریدرسی را تحت بارهای مختلف زلزله تحلیل کرد. روش اجزای محدود و نرم‌افزار انسیس 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 خلیج 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 با 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	حداقل 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 نرم افزار تخصصی Slide2 به دست می‌آید. Slide2 یک نرم افزار 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 حدی دوبعدی 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.

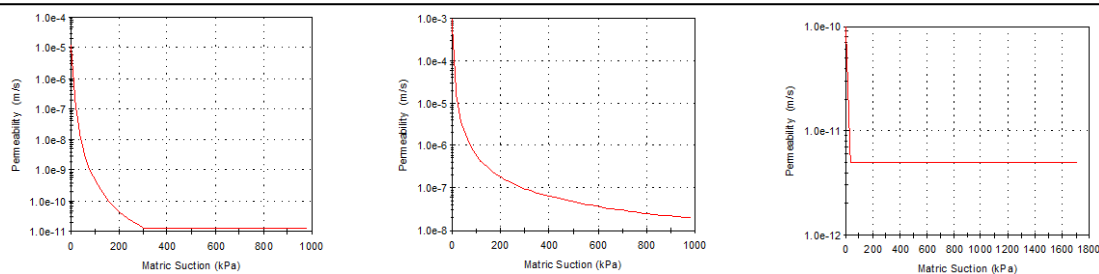
۳. داده‌های ورودی برای تجزیه و تحلیل سد

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 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)	Ks (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

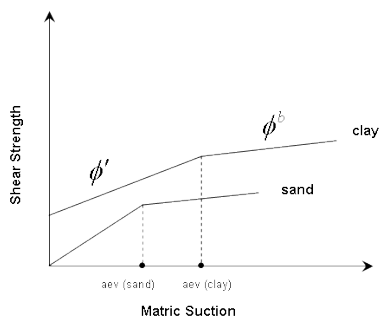


Shell

Filter

Asphalt Core

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



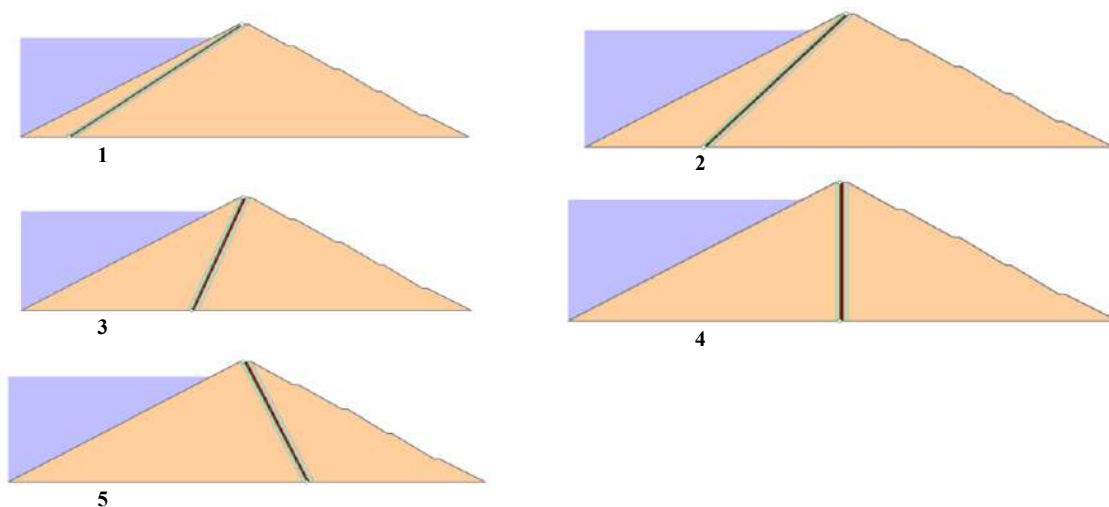
شکل ۳. اثر مقدار ورودی هوا (AEV) بر روی پوش مقاومت برشی اشباع نشده (فردلاند، ۲۰۰۰)

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	1:2.5
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 قطعیت ها و تمایز بین سناریوهایی است که با سطوح عدم قطعیت به طور قابل توجهی بالا یا پایین مشخص می شوند (وارد و پچت^۱، ۲۰۱۸). قابلیت اطمینان (R) به عنوان قابلیت عملکرد بدون تجربه شکست تعریف می شود که می تواند به عنوان احتمال موفقیت نیز تعبیر شود که با رابطه (۱) نشان داده می شود:

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

برعکس، احتمال شکست (PF) به احتمال وقوع شکست قبل از یک زمان مشخص (t) اشاره دارد و می تواند 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 می شود، نسبت میانگین حاشیه ایمنی (که میانگین ضریب ایمنی منهای 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 می شود:

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

یک ضریب ایمنی قطعی، حاشیه ایمنی در یک سیستم را بر اساس مقادیر ورودی متوسط یا مورد انتظار نشان می دهد. با این حال، مقادیر ورودی واقعی به ندرت دقیقاً با میانگین مطابقت دارند و این معیار را برای پرداختن مؤثر به خطرات و عدم قطعیت ها ناکافی می کند؛ بنابراین، روش های احتمالی یا تصادفی برای محاسبه تغییرپذیری و عدم قطعیت ضروری هستند و بیش مهمی در مورد ریسک ارائه می دهند. شاخص قابلیت اطمینان نقش کلیدی در ارزیابی پایداری شیب به دنبال تحلیل احتمالی، اندازه گیری 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 پایین تر 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 (فون 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 می شود 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 می توان با استفاده از ضریب تغییرات (COV) که نسبت انحراف استاندارد به محتمل ترین مقدار پارامتر است، کمی سازی کرد. این اندازه گیری به عنوان یک شاخص تغییرپذیری پارامتر عمل می کند و همان طور که در رابطه (۴) نشان داده شده است، می تواند 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 کرده اند. 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 می دهد که محدوده ضریب تغییرات گسترده تر از ۱٪ تا ۱۵٪، همان طور که توسط استاماتوپلوس و کوتزیاس^۳ (۱۹۷۵) ذکر شده است. علاوه بر این، لومب^۴ (۱۹۷۴) و لاکاس و ندیم^۵ (۱۹۹۶) ضریب تغییرات را بین ۵ تا ۱۳ درصد گزارش کردند. همان طور 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 بینش ها بر اهمیت در نظر گرفتن تنوع در پارامترهای خاک هنگام ارزیابی پایداری شیب و ویژگی های ژئوتکنیکی تأکید می کند. 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

یافته های پژوهشی

۱. نتایج آنالیز نشت

برای تحلیل نشت سد صیدون در شرایط جریان پایدار، از نرم افزار Slide2 استفاده شده است. نتایج حاصل از این تجزیه و تحلیل که در شکل (۵) و (۶) ارائه شده است، نشان می دهد که جابه جایی هسته سد از سمت پوسته بالادست به سمت پایین دست می تواند منجر به کاهش نرخ جریان سد گردد. این تغییر به دلیل افزایش مقاومت در برابر جریان، شیب های هیدرولیکی تغییر یافته، تجمع بالقوه آب و تغییرات ساختاری به وجود می آید. ثبات و هماهنگی این عوامل می توانند بی نظمی و اتلاف انرژی بیشتری به همراه داشته باشند و در نهایت جریان کلی در سد را کاهش دهند. همان طور که در شکل (۵) مشاهده می شود، 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 می دهد 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 یافته ها نشان می دهند که موقعیت هسته سد تأثیر قابل توجهی بر رفتار جریان درون سد دارد و اهمیت طراحی دقیق در این زمینه را مورد تأکید قرار می دهد؛ بنابراین، توجه به جنبه های مهندسی هیدرولیک در طراحی سدها و پروژه های زیرساختی از اهمیت بالایی برخوردار است.

¹ Brainosky

² Duncan

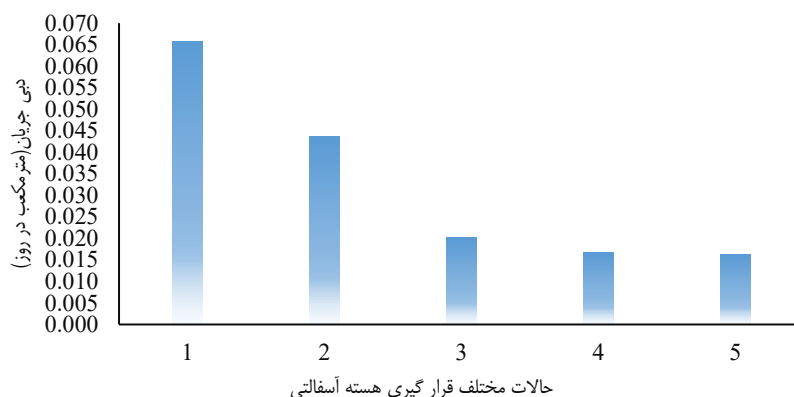
³ Stamatopoulous & Cottzias

⁴ Lumb

⁵ Lacasse & Nadim

⁶ Singh

⁷ Höeg & Murarka



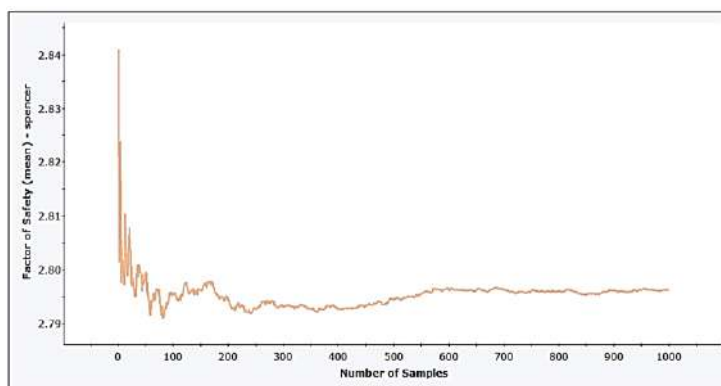
شکل ۵. نتایج آنالیز نشت از بدنه سد در حالت جریان پایدار

۲. نتایج تحلیل پایداری شیب

استفاده از نرم افزار Slide2 برای ارزیابی پایداری شیب پایین دست سد خاکی رویکردی جامع برای تحلیل پایداری شیب محسوب می شود. در نظر گرفتن هر دو حالت استاتیک و شبه استاتیک این امکان را فراهم می آورد 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 می دهد.

۳. آنالیز حداقل شیب احتمالاتی کلی

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

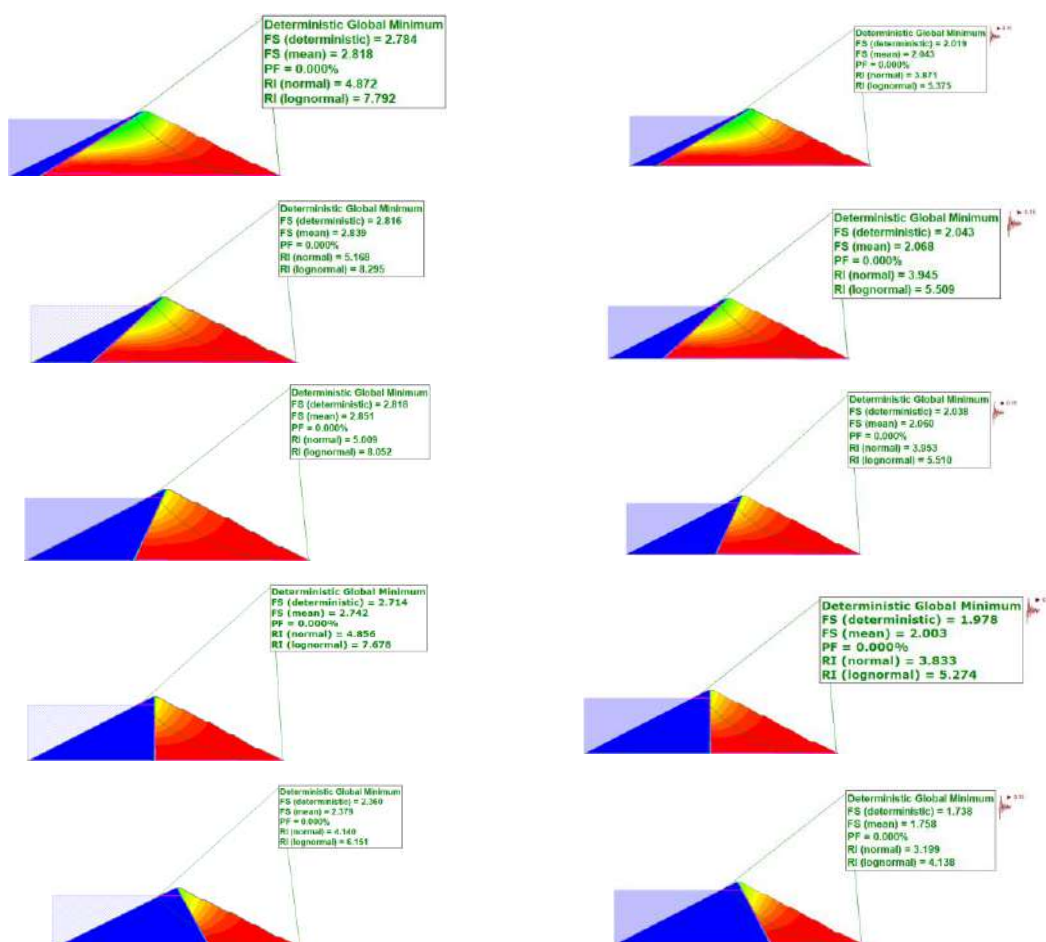


شکل ۶. همگرایی نتایج آنالیز احتمالاتی برای ۱۰۰۰ نمونه

^۱ 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 ۰/۱۸ توصیه نموده است. سازمان مهندسان ارتش ایالات متحده^۱ (۱۹۸۷) استفاده از ضریب زلزله افقی ۰/۱۵ را برای مناطق پرخطر، بر اساس نقشه‌های منطقه‌بندی، پیشنهاد می‌دهد. در سال ۱۹۷۹ پروفیسور سید^۲ اعلام نمود، هرگاه سدی با ضریب زلزله ۰/۱۵ و ضریب اطمینان ۱/۱۵ طراحی شود مادامی که حداکثر شتاب تاج سد از ۰/۷۵ کمتر شود، سد برای زلزله‌ای به بزرگی ۸ ریشتر پایدار بوده به گونه‌ای 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 ۰/۱۵ برای حالت بارگذاری در آنالیزهای شبه‌استاتیکی استفاده شده و به دلیل اثر کم و همچنین نامشخص 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 ۰/۱۵ 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

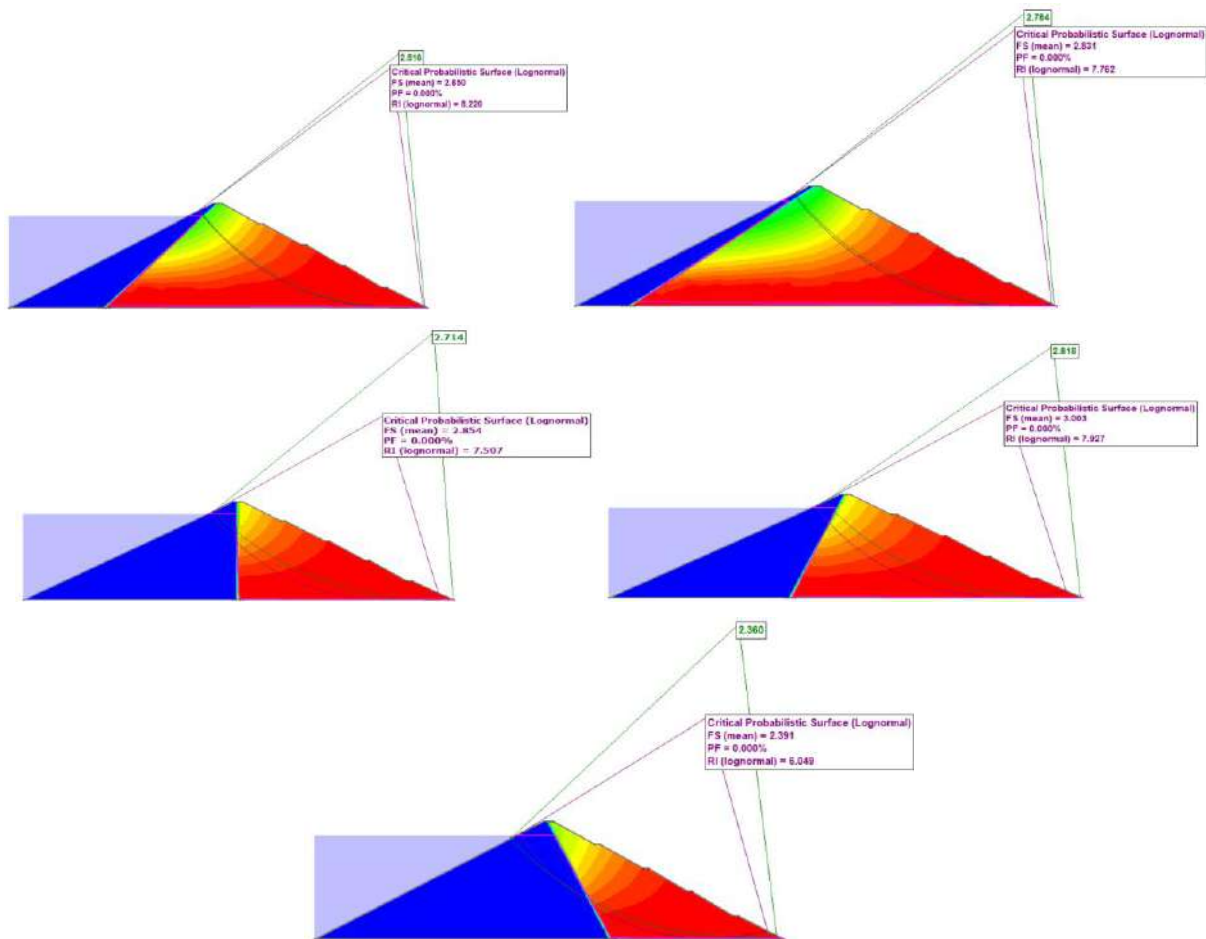
نتایج در شکل (۷) نشان می‌دهد که برای سه سناریو اول که در آن شیب هسته به سمت بالادست سد است، ضریب ایمنی ($F.S$) شیب پایین دست تقریباً در مقدار $2/82$ ثابت می‌ماند. در مقابل، برای سناریوهای چهارم و پنجم که در آن هسته در داخل قوس گسیختگی قرار می‌گیرد، کاهش ضریب ایمنی مشاهده می‌شود به طوری که در حالت ۵ به مقدار $2/36$ می‌رسد. این نشان می‌دهد که موقعیت هسته با حرکت به سمت پایین دست 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 بالای 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 استاتیک، 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.

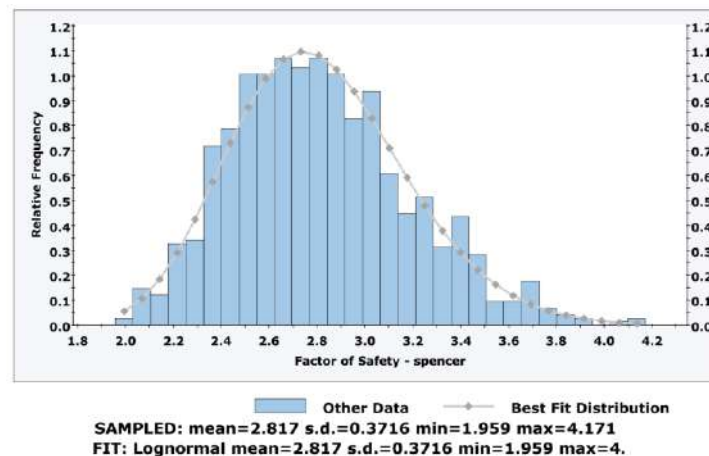
۴. آنالیز احتمالاتی حداقل اطمینان

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 شبیهی 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، شبیهی 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 شبیهی 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 تأیید می‌کند.



شکل ۸. نتایج آنالیز احتمالاتی حداقل اطمینان



شکل ۹. توزیع حاکم بر ضریب ایمنی در آنالیز احتمالاتی

۵. آنالیز تغییرات مکانی

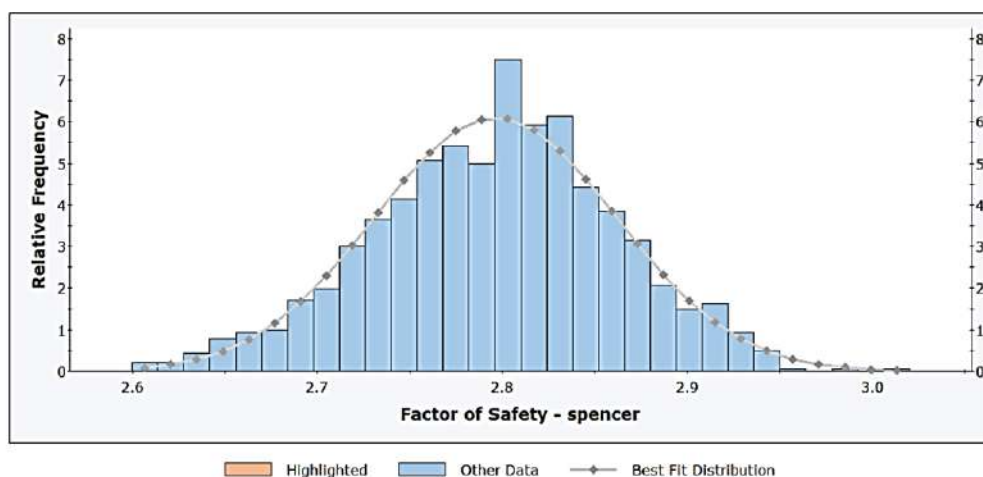
تجزیه و تحلیل تغییرات مکانی نقش اساسی در لحاظ کردن تنوع ذاتی خواص خاک در یک توده خاک ایفا می کند که اغلب در تحلیل های پایداری شیب احتمالاتی سنتی نادیده گرفته می شود. با در نظر گرفتن تغییرات مکانی خواص خاک مانند استحکام و وزن واحد در مکان های مختلف درون توده خاک، مهندسان می توانند نمایش واقعی تری از شرایط 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 نمونه برداری شده استفاده می شود. این فرایند توزیع فضایی مقادیر را در سرتاسر مصالح ایجاد می کند که منعکس کننده 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. همان طور 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 می کرد. علاوه بر این، نتایج در جدول (۶) نشان می دهد که هنگام در نظر گرفتن تغییرات فضایی، مقدار $F.S$ کاهش یافته است. باین حال، این کاهش با افزایش قابل توجهی در شاخص قابلیت اطمینان (RI) همراه است که نشان می دهد 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 (شبه استاتیکی)		آنالیز حداقل اطمینان		آنالیز تغییرات مکانی	
	$F.S$	RI	$F.S$	RI	$F.S$	RI	$F.S$	RI ($l_x=25; l_y=5$)
<i>Cases</i>								
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



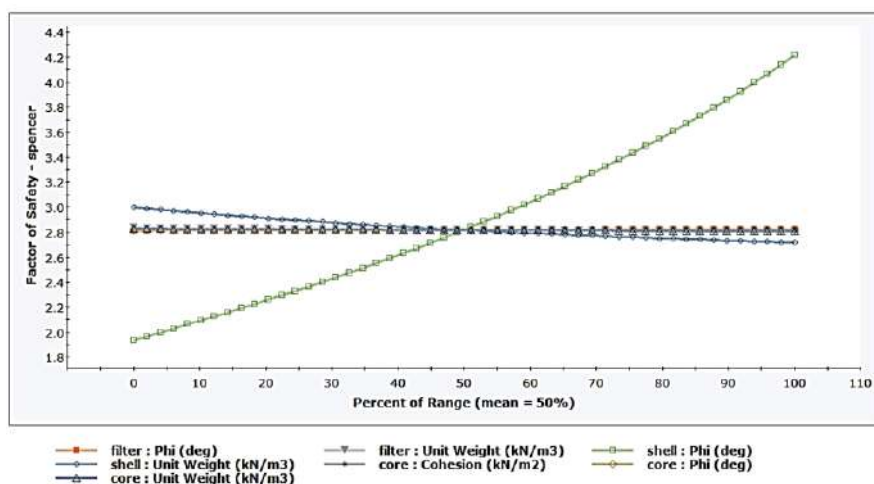
SAMPLED: mean=2.796 s.d.=0.06548 min=2.6 max=3.02 (PF=0.000% RI=27.43322, best fit=Normal distribution)
FIT: Normal mean=2.796 s.d.=0.06548 min=2.6 max=3.02

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

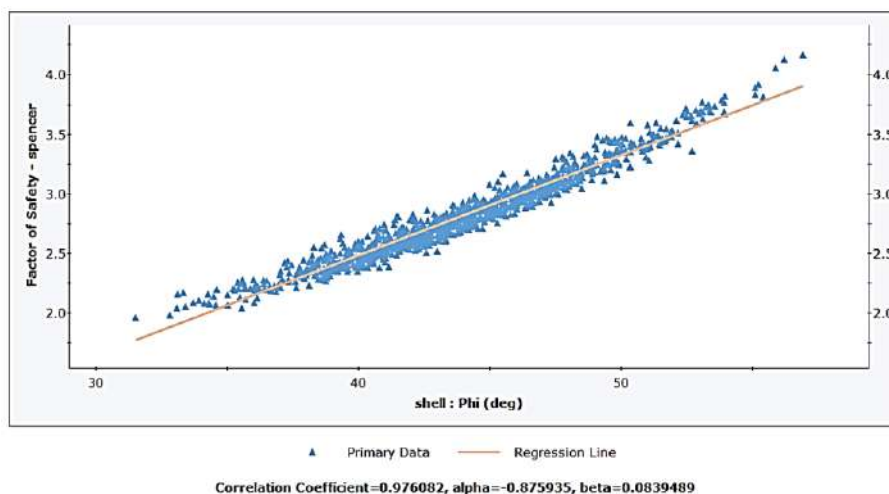
۶. تحلیل حساسیت

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 می کند. یافته های حاصل از تجزیه و تحلیل حساسیت در شکل های (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 جابه‌جایی 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 نشت آب دارد. جابه‌جایی 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 بینش دقیق تری برای طراحی ایمن تر سدها ارائه می دهد. باید توجه داشته باشیم که معمولاً در طراحی سدهای خاکی با هسته آسفالتی، برخی حالت ها به دلیل مسائل فنی، ساخت و ساز، پایداری سد و قابلیت اجرای عملی، بیشتر مورد استفاده قرار می گیرند، در حالی که برخی حالت ها کمتر کاربردی یا حتی غیر عملی هستند. به طور خاص، حالت هایی که هسته آسفالتی در مرکز سد یا به طور قائم قرار دارد (مثل حالت ۴) معمول تر و پایدارتر هستند و به خوبی از نشتی آب جلوگیری می کنند. حالت هایی 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 می شود. در نتیجه، طراحی نهایی بستگی به شرایط هیدرولیکی، ژئوتکنیکی، اقتصادی و اجرایی دارد.

نتیجه گیری

در این تحقیق، تأثیر موقعیت هسته آسفالتی در داخل یک سد سنگ ریزه ای بر نتایج تحلیل احتمالاتی مربوط به پایداری شیب پایین دست 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. یافته های کلیدی تحقیق به شرح زیر خلاصه می شود:

۱. نتایج آنالیز نشت: تجزیه و تحلیل نشت نشان می دهد که حرکت هسته آسفالتی از سمت بالادست به سمت پایین دست سد سنگ ریزه ای منجر به کاهش دبی جریان از بدنه سد می شود. با این حال این کاهش در حالات ۱ و ۲ به ۳ بیشتر مشهود است.
۲. آنالیز حداقل شیب احتمالاتی کلی: این تحلیل نشان می دهد که فاکتور ایمنی ($F.S$) برای شیب پایین دست زمانی که هسته آسفالتی در بالادست سد قرار می گیرد نسبتاً ثابت می ماند. با این حال، پایین ترین مقدار $F.S$ زمانی رخ می دهد که هسته آسفالتی به سمت پایین دست منتقل شود. علاوه بر این، تجزیه و تحلیل احتمالاتی نشان می دهد که سد یک شاخص قابلیت اطمینان (RI) بیشتر از ۳ را در تمام شرایط، از جمله تجزیه و تحلیل استاتیک و شبه استاتیک حفظ می کند.
۳. تحلیل احتمالاتی حداقل اطمینان: در تحلیل احتمالاتی حداقل اطمینان، سطح لغزشی که بیشترین احتمال خرابی یا کمترین قابلیت اطمینان را دارد، شناسایی می شود. این سطح لغزش لزوماً با سطح لغزش مشخص شده در روش حداقل شیب کلی که بر اساس پارامترهای مقاومتی مصالح سد محاسبه می شود، 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 می دهد.
۴. در نظر گرفتن تغییر پذیری مکانی: هنگام محاسبه تغییر پذیری مکانی خواص خاک، ضریب ایمنی برای شیب پایین دست کاهش می یابد در حالی که شاخص قابلیت اطمینان افزایش می یابد که نشان دهنده درک جامع تری از پویایی پایداری است.
۵. نتایج تجزیه و تحلیل حساسیت: تجزیه و تحلیل حساسیت نشان می دهد 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 می کند و نقش حیاتی پارامترهای پوسته را در ارزیابی پایداری سد تقویت می کند.

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 به‌خاطر 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.iust.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 Arman ^{1✉}, and Elham Darvishi ²

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)

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

Publisher: Razi University.

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 بیلوار

علی آرمان^۱ و الهام درویشی^۲

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

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

در باره مقاله	چکیده
نوع مقاله: مقاله پژوهشی، مقاله مروری، تاریخ دریافت: ۱۴۰۴/۰۹/۰۵ تاریخ بازنگری: ۱۴۰۵/۰۱/۱۲ تاریخ پذیرش: ۱۴۰۵/۰۳/۰۱ تاریخ انتشار: ۱۴۰۵/۰۴/۰۱	هدف: ارزیابی جامع وضعیت بهره‌برداری شبکه آبیاری و زهکشی دشت بیلوار و ارائه راهکارهای مدیریتی و فنی جهت بهبود عملکرد آن. روش پژوهش: این تحقیق شامل ارزیابی عملکرد مدول‌های نیروپیک، 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 مولینه Seba، تحلیل هیدرولیکی، بازدید از تأسیسات، پرسش‌نامه‌های بهره‌برداران و پردازش اطلاعات در محیط GIS جمع‌آوری گردید. یافته‌ها: خطای اندازه‌گیری مدول‌های نیروپیک کمتر از ۵ درصد بوده و عملکرد قابل‌قبولی داشتند، اما سازه‌های 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 نشت در سازه‌ها است. انتخاب نامناسب پمپ‌ها، عدم تراز تجهیزات و ضعف نگهداری در ایستگاه‌های پمپاژ موجب کاهش بازده عملکرد شده است. قطع برق روزانه سبب هدررفت قابل‌توجه آب در شبکه گردیده است. جایگزینی بخشی از کانال با لوله می‌تواند ضمن کاهش تلفات، برخی ایستگاه‌های پمپاژ را حذف نماید. پایین‌بودن سودآوری کشت‌های رایج، نبود بازار مطمئن و ضعف دانش فنی کشاورزان از عوامل اصلی عدم مشارکت بهره‌برداران تشخیص داده شد. نتیجه‌گیری: توسعه کشت‌های پاییزه با ارزش افزوده بالاتر، استقرار سامانه GIS، اصلاح مدیریت بهره‌برداری و ارتقای نگهداری ایستگاه‌های پمپاژ به‌عنوان 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 بیلوار. فناوری‌های پیشرفته در

بهره‌وری آب، ۵ (۲)، ۱۱۹-۱۰۲.

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



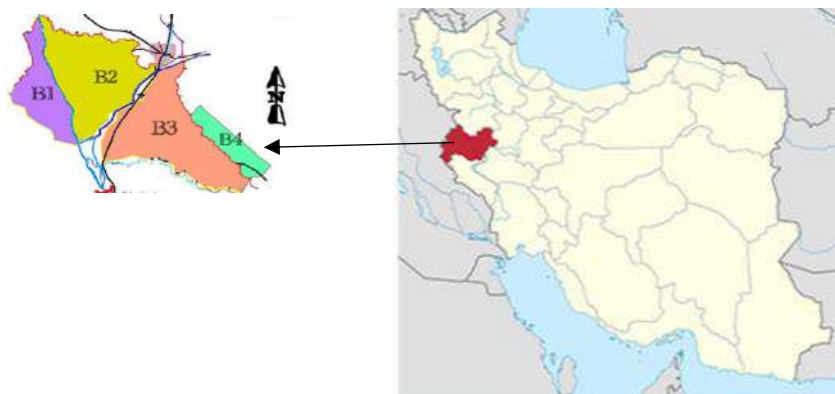
© نویسندگان

شر: 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

^۱ Clemmens

ادبیات موضوع و پیشینه پژوهش

ارزیابی عملکرد شبکه‌های آبیاری طی دهه‌های اخیر به یکی از محورهای اصلی پژوهش‌های 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 بهره‌برداری شبکه‌ها را بررسی کرده‌اند.

۱. مطالعات داخلی

شاهرخ‌نیا و جوان (۱۳۸۵) با بررسی شاخص‌های عملکرد آبیاری در شبکه درودزن نشان دادند که راندمان توزیع و تحویل آب در بسیاری از بخش‌های شبکه کمتر از مقادیر طراحی بوده و اصلاح بهره‌برداری می‌تواند موجب افزایش بهره‌وری شود. جلیلی و همکاران (۱۳۸۵) در ارزیابی شبکه‌های آبیاری با روش *Benchmarking* نتیجه گرفتند که شاخص‌های عملکردی ابزار مناسبی برای مقایسه و رتبه‌بندی شبکه‌ها هستند.

حبیبی‌کندین و همکاران (۱۳۹۶) عملکرد مدول‌های نیروپیک را در شبکه سفیدرود مورد بررسی قرار دادند و نشان دادند که این سازه‌ها در شرایط مناسب بهره‌برداری دارای دقت قابل‌قبولی در تحویل دبی هستند. کانونی و همکاران (۱۳۹۷) نیز عملکرد هیدرولیکی مدول‌های نیروپیک در شبکه یامچی اردبیل را ارزیابی کرده و اعلام نمودند که نوسانات سطح آب تأثیر مستقیمی بر خطای اندازه‌گیری این سازه‌ها دارد.

در حوزه مدیریت ایستگاه‌های پمپاژ، شریف‌نژاد و پرورش‌ریزی (۱۳۹۵) با استفاده از تحلیل پوششی داده‌ها عملکرد ایستگاه‌های پمپاژ کشاورزی را بررسی کرده و ضعف نگهداری تجهیزات را عامل اصلی کاهش راندمان معرفی نمودند. حکمتی‌راد و همکاران (۱۳۹۴) نیز نشان دادند که انتخاب نامناسب پمپ‌ها و عدم نگهداری صحیح موجب افزایش مصرف انرژی و کاهش بازده عملکرد می‌شود.

در زمینه تلفات انتقال آب، سالمی و همکاران (۱۳۹۷) راندمان توزیع آب در کانال‌های بتنی شبکه‌های خوزستان را بررسی کردند و نتیجه گرفتند که نشت سازه‌ها و برداشت‌های غیرمجاز مهم‌ترین عوامل کاهش راندمان انتقال هستند. عباسی و بهراملو (۱۳۹۷) نیز علت شکست پوشش بتنی کانال‌ها را مورد مطالعه قرار داده و ضعف نگهداری و شرایط نامناسب بهره‌برداری را از عوامل اصلی تخریب سازه‌ها دانستند.

سجودی و هاشمی‌شاهدانی (۱۴۰۰) در تحقیقی مروری روش‌های برآورد راندمان انتقال در شبکه‌های آبیاری ایران را مورد بررسی قرار دادند. آنها عنوان نمودند تلفات در سیستم‌های انتقال و توزیع آب کشاورزی به دو دلیل اصلی رخ می‌دهد: نشت و عملکرد نامناسب سازه‌های کانال که باعث ایجاد تلفات بهره‌برداری می‌شود. عوامل مختلفی از جمله رشد علف‌های هرز در کانال‌ها، تجمع رسوب در کانال‌ها، تجمع زباله در کانال‌ها، ترک خوردن پوشش کانال، خرد شدن یا جابه‌جایی قطعات بتن در کانال‌ها، تخریب به دلیل کیفیت نامناسب مصالح و عدم وجود دانش کافی بهره‌برداری در سطح کلان و خرد تصمیم‌گیران آب کشور سبب افزایش تلفات در سامانه‌های توزیع و تحویل کشاورزی هستند.

محمدی‌قلعه‌نی و نحوی‌نیا (۱۴۰۱) در تحقیقی که برروی 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، درحالی‌که راندمان خالص تنها مفهوم استفاده مجدد از تلفات مفید را در مقیاس مکانی بزرگتر از مزرعه لحاظ می‌کند.

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 زاوه، تربت‌حیدریه و گناباد به ترتیب برابر با ۵۱، ۴۹ و ۸۷ درصد به دست آمد (ذوالفقاران ۱۴۰۱).

۲. مطالعات خارجی

مورنو 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 گونداری اتیوپی، راندمان انتقال کانال‌ها را حدود ۷۴٪ و راندمان کل را ۴۰٪ برآورد نموده‌اند که نشان از افت قابل توجه 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 به صورت 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 تحت فشار 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) نمایی از شبکه مورد بررسی را ارائه شده است.

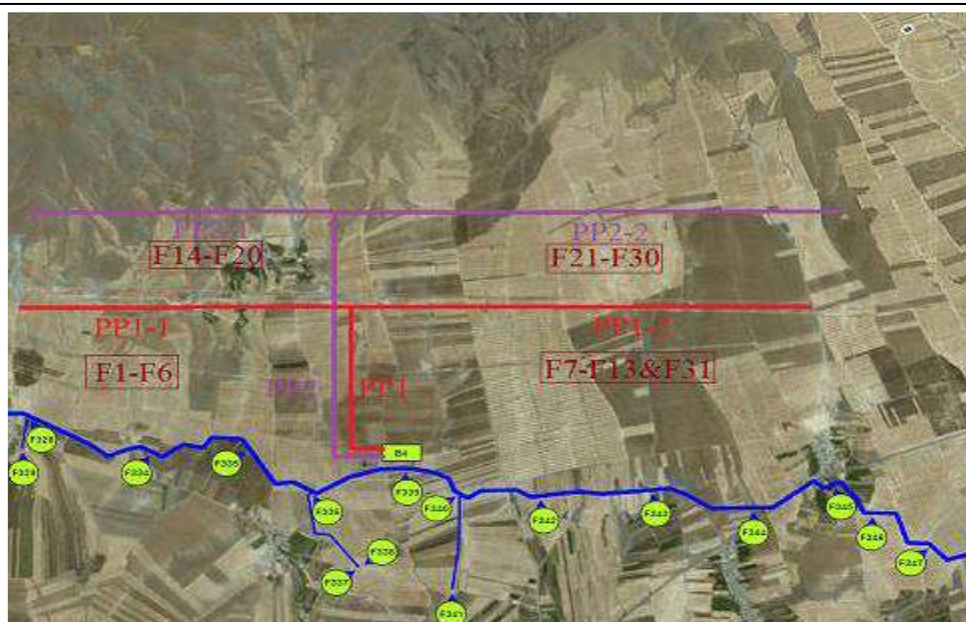
¹ Moreno et al

² Ghumman et al

³ Ahmad et al

⁴ Dayyabu et al

⁵ Melsse et al



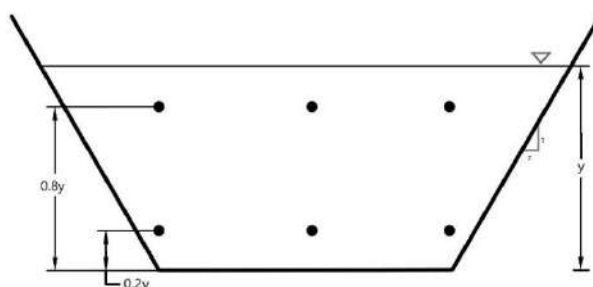
شکل ۲. نمایی از شبکه آبیاری مورد بررسی

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. به منظور 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:

$$V = 0.1378N + 0.0168 \quad (۱)$$

پس از برداشت اطلاعات موردنظر، ابتدا در هر یک از تقسیم‌بندی‌های مقاطع ذوزنقه‌ای، 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.

$$V_{ave} = \frac{V_{0.2y} + V_{0.8y}}{2} \quad (۲)$$



شکل ۴. نحوه داده‌برداری در مقطع ذوزنقه‌ای

به‌منظور محاسبه راندمان انتقال شبکه، دبی در نقاط خروجی آبپخش، خروجی سیفون معکوس قبل از ایستگاه پمپاژ ۳۰۱ و زهکش مابین 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 آبپخش	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 آبپخش	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:

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

که در آن:

• E_c = راندمان انتقال

• Q_i = دبی ورودی

• Q_o = دبی خروجی

باتوجه به اندازه گیری های به عمل 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 ۹۲.۳ 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 ایستگاه های پمپاژ

عملکرد ایستگاه های 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 نیرویک و تنظیم‌کننده سطح آب

به‌منظور بررسی دقت عملکرد سازه‌های اندازه‌گیری و تنظیم جریان در شبکه آبیاری دشت ییلوار، اندازه‌گیری‌های میدانی دبی و سرعت جریان در کانال‌های اصلی و آبپخش‌ها 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 نیرویک در شرایط بهره‌برداری موجود از پایداری قابل‌قبولی برخوردار است، هرچند اختلاف‌هایی میان دبی طراحی و دبی واقعی مشاهده شد.

جدول ۵. نتایج ارزیابی عملکرد مدول‌های نیرویک

محل اندازه‌گیری	دبی طراحی (لیتر بر ثانیه)	دبی اندازه‌گیری شده (لیتر بر ثانیه)	درصد خطا	وضعیت عملکرد
خروجی آبپخش شماره ۱	۱۲۰	۱۱۶	۳.۳	مناسب
خروجی آبپخش شماره ۲	۱۵۰	۱۴۴	۴	مناسب
خروجی آبپخش شماره ۳	۱۸۰	۱۷۲	۴.۴	مناسب
خروجی آبپخش شماره ۴	۲۱۰	۲۰۱	۴.۲	مناسب
خروجی آبپخش شماره ۵	۲۵۰	۲۳۹	۴.۴	مناسب

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

این نتایج با یافته‌های حبیبی‌کندین و همکاران (۱۳۹۶) و کانونی و همکاران (۱۳۹۷) مطابقت دارد که عملکرد قابل‌قبول مدول‌های نیرویک را در شبکه‌های آبیاری کشور گزارش نموده‌اند. بااین‌وجود، 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	مناسب	کوپلینگ نامناسب	متوسط
۳۰۳	بیشتر از مقدار طراحی	بالا	انتخاب نامناسب پمپ	متوسط
۳۰۴	کمتر از مقدار طراحی	پایین	هواگرفتگی مکرر	ضعیف
۳۰۵	مناسب	مناسب	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، کوپلینگ 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 ۳۰۲	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 قابل توجهی 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 آبپخش منتقل می‌کند، تأمین می‌شود. چنانچه قطعی برق رخ دهد و بهره‌بردار بخواند 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
نشستی کانال و سیفون‌ها	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 به‌عمل‌آمده 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 به‌عمل‌آمده، 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 مسدود شدن 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. باوجود مزایای لوله‌گذاری در این شبکه، متأسفانه هزینه بسیار بالای 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

شاخص	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. از سوی دیگر، اتکای بیش از حد به کانال‌های روباز، همان‌طور که در مورد کانال *BLMC* دیده می‌شود، خود عاملی برای تلفات آب از طریق نشت 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 می‌کنند 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 قابل‌توجه 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. با این حال، 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 عدم هماهنگی میان برنامه کشت و ظرفیت واقعی شبکه است. بررسی عملکرد سازه‌های اندازه‌گیری نیرویک 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 نیروی می‌توانند به‌عنوان ابزار مؤثر تحویل حجمی آب در شبکه عمل کنند. با این حال، نتایج نشان داد که بخشی از خطاهای موجود در تحویل آب ناشی از شرایط هیدرولیکی نامناسب در بالادست و پایین‌دست 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. نتایج مربوط به ارزیابی ایستگاه‌های پمپاژ نشان داد که بخش قابل‌توجهی 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، نشتی 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 قابل‌توجهی با دبی طراحی داشت که این مسئله علاوه بر افزایش هزینه بهره‌برداری، باعث کاهش یکنواختی توزیع آب در اراضی پایین‌دست 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 آب‌پخش 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 قابل‌توجه ناشی از نشت، 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 قابل‌توجهی 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 محصولات 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. پایین‌بودن 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 بیلوار 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 بیلوار نیازمند رویکردی جامع و چندبعدی است. صرف بهبود سازه‌های فیزیکی بدون اصلاح نظام بهره‌برداری و مدیریت، نمی‌تواند منجر به افزایش پایدار راندمان شبکه شود؛ بنابراین ترکیبی از اقدامات فنی، مدیریتی و اجتماعی برای بهبود وضعیت شبکه ضروری است.

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.

- 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، قمرنیا، 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/20.1001.1.26454531.1385.7.4.6.3>
- حبیبی‌کندبن، عمار، دوستی، میلاد، و مالدیدی، امیرحسین. (۱۳۹۶). ارزیابی عملکرد مدول‌های نیروپیک 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 فرآیند تعمیر و نگهداری دریاچه‌های 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)، ۳۸-۵۱. <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)، ۷۶-۸۸. <https://doi.org/10.22125/iwe.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)، ۷۵-۸۷. <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)، ۳۳-۴۶. 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)، ۱۷۵-۱۷۹. https://iwrij.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)، ۶۹-۸۴. <https://doi.org/10.22092/idser.2018.116684.1280>
- کانونی، امین، پوریامنش، منوچهر، نیکپور، محمدرضا، و فیضی، اتابک. (۱۳۹۷). ارزیابی عملکرد هیدرولیکی و بهره‌برداری دریاچه‌های مدول نیروپیک در کانال اصلی توزیع آب (مطالعه موردی: شبکه آبیاری یامچی، اردبیل). نشریه آبیاری و زهکشی ایران، ۱۲(۶)، ۱۴۴۷-۱۴۳۵. 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)، ۱۲-۳۵. https://idj.aid.ir/article_55206.html

- محمدجانی، اسماعیل، و یزدانیان، نازنین. (۱۳۹۳). تحلیل وضعیت بحران آب در کشور و الزامات مدیریت آن. فصلنامه روند، ۲۱(۶۵و۶۶)، ۱۴۴-۱۱۷. <https://www.id.ir/filesserver/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)، ۱۵۶-۱۴۱. <https://doi.org/10.22125/iwe.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 تجن. 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)، ۱۳۹-۱۲۵. <https://doi.org/10.22067/jsw.v0i0.8514>
- نیکمهر، سامان، پرورش ریزی، عاطفه، و منعم، محمد جواد. (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)، ۱۱۸-۱۰۹. https://iwrj.ku.ac.ir/article_10536.html
- ورجاوند، پیمان، آبالان، 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., & Bień, 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., Belaarabi, 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]
- Melsse, 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/files/server/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://iwrrj.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://dor.isc.ac/dor/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]