انتشارات دانشگاه شهید چمران اهواز

Iranian Hydraulic Association

علوم و مهندسی آبیاری

(علمی)

ISSN 2588-5952

پاییز ۱۴۰۴ | جلد چهل و هشتم شماره ۳

عنوان	نویسندگان	صفحه
تخمین نسبت جذب سدیم (SAR) و هدایت الکتریکی (EC) با استفاده از مدل‌های هیبریدی رگرسیون بردار پشتیبان و جنگل تصادفی-مطالعه موردی رودخانه قطور، غرب ایران	میلاد شرفی، جواد بهمنش، وحید رضاویردی‌نژاد و سعید صمدیان‌فرد	۱
بررسی آزمایشگاهی اثر جت مستغرق بر خصوصیات پرش هیدرولیکی نامتقارن در بستر سینوسی	فتح‌الله داوری دهکردی، جواد احدیان، سید محسن سجادی، آناریتا اسکورزینی و ماریو دیباکو	۲۱
بررسی کاربرد تحلیل پوششی داده‌های پنجره‌ای در فرایندهای مدیریتی مصارف آب کشاورزی (مطالعه موردی: استان خوزستان)	دلال مدحج و عادل دحیماوی	۴۵
بررسی اثر نسبت ظاهری مخازن کم عمق بر میزان توزیع غلظت رسوبات معلق	محمد افراشته و بابک لشکرآرا	۵۵
پیش‌بینی بار رسوب معلق رودخانه با استفاده از مدل ماشین بردار پشتیبان و روش‌های محاسباتی بهبودیافته	حامد نوذری، فاطمه چدنی، مهدی کلانتری و علیرضا مهربانی بشار	۷۵
اثر طوقه مشبک بر آبشستگی موضعی پیرامون گروه پایه‌های استوانه‌ای پل	نسرین بهرامی و مهدی قمشی	۹۹
تعیین الگوی کشت پیشنهادی محصولات عمده زراعی با استفاده از شاخص آب، انرژی و غذا (مطالعه موردی: شبکه آبیاری دشت ورامین)	ارشاد آبیار و محمود مشعل	۱۰۹
کلاس‌بندی و مدل‌سازی مبتنی بر محاسبات نرم کیفیت آب رودخانه کارون: ایستگاه‌های آب‌سنجی گتوند و اهواز	غزاله صالح پور، محمدرضا زایری و مهدی زینی وند	۱۲۵

علوم و مهندسی آبیاری

(علمی)

جلد چهل و هشتم شماره۳ **پاییز ۱۴۰۴**

مدیر مسؤول: سعید برومندنسب

سردبیر: سیدمحمود کاشفی‌پور

مدیر داخلی: مهدی دریایی

تایپ و صفحه آرایی: ندا یزدانی

ویراستار: ندا یزدانی

هیأت تحریریه:

آخوندعلی، علی‌محمد	استاد	هیدرولوژی و منابع آب، دانشکده مهندسی آب و محیط زیست، دانشگاه شهید چمران اهواز
حیدرپور، منوچهر	استاد	آبیاری و زهکشی، دانشکده کشاورزی، دانشگاه صنعتی اصفهان
زندپارسا، شاهرخ	استاد	آبیاری و زهکشی، دانشکده کشاورزی، دانشگاه شیراز
قمشی، مهدی	استاد	سازه‌های آبی، دانشکده مهندسی آب و محیط زیست، دانشگاه شهید چمران اهواز
کاشفی‌پور، سیدمحمود	استاد	سازه‌های آبی، دانشکده مهندسی آب و محیط زیست، دانشگاه شهید چمران اهواز
لیاقت، عبدالمجید	استاد	آبیاری و زهکشی، دانشکده کشاورزی، دانشگاه تهران
حسین زاده دلیر، علی	استاد	گروه مهندسی آب- دانشکده کشاورزی- دانشگاه تبریز.
ناصری، عبد علی	استاد	آبیاری و زهکشی، دانشکده مهندسی آب و محیط زیست، دانشگاه شهید چمران اهواز
استفانو پالیارا	استاد	گروه مهندسی عمران، دانشگاه پیزا،ایتالیا
لای سای هین	دانشیار	گروه مهندسی عمران، دانشکده مهندسی، دانشگاه مالایا،مالزی.
رضا احمدیان	استاد	گروه مهندسی عمران،دانشکده مهندسی، دانشگاه کاردیف، انگلستان
هِنک ریتزما	دانشیار	گروه مدیریت منابع آب، گروه علوم محیط زیست،دانشگاه واگنینگن و پژوهش، هلند

صاحب امتیاز: دانشگاه شهید چمران اهواز ـ دانشکده مهندسی آب و محیط زیست

کلیه مکاتبات از طریق سردبیر مجله به نشانی اهواز ـ دانشگاه شهید چمران اهواز ـ دانشکده مهندسی آب و محیط زیست دفتر مجله علمی علوم و مهندسی آبیاری تلفن ۰۹۰۴۶۳۰۵۶۴۸ و دورنگار ۳۳۶۵۶۷۰۳ (۰۶۱) صورت گیرد.

این مجله در سایت **http://jise.scu.ac.ir** نمایه می شود.

نشانی پست الکترونیکی: **JISE.Water@scu.ac.ir** و **JISE.Water@yahoo.com**

مجوز انتشار از وزارت فرهنگ و ارشاد اسلامی ۱۲۴/۱۰۳۶۲ به تاریخ ۷۷/۱۰/۸ و مجوز دفتر بررسی نشریات وزارت علوم، تحقیقات و فناوری ۳/۱۱/۱۲۶۴ به تاریخ ۲۹ /۸۸/۷ برای مجله علوم و مهندسی آبیاری

بسم الله الرحمن الرحيم

اسامی بررسی کنندگان مقالات این شماره

اسماعیلی	کاظم
انوری	صدیقه
پارسائی	عباس
حقی آبی	امیر حمزه
خزیمه نژاد	حسین
دانشفراز	رسول
دشتی	سیده سولماز
دهقانی سانیچ	حسین
زایری	محمدرضا
رمضانی	یوسف
سبزقبائی	غلامرضا
سراج	منصور
شفاعی بجستان	محمود
شریفی	محمدرضا
قمشی	مهدی
لشکرآرا	بابک
مختاران	علی
مطیعی	همایون

پیشگفتار

سپاس و ستایش پروردگار متعال که بر ما منت گذاشت تا با همت و پشتکار اعضاء هیأت تحریریه، کارکنان مجله، همکاری داوران و ویراستاران، جلد ۴۸، شماره ۳ مجله علمی علوم و مهندسی آبیاری با خرسندی فراوان به علاقه‌مندان علوم مهندسی آب تقدیم گردد.

مجله علوم و مهندسی آبیاری یک سابقه حدود ۴۳ ساله دارد و وزارت علوم و تحقیقات و فناوری مجوز این مجله علمی- پژوهشی در شکل حاضر در سال ۱۳۸۸ صادر کرد. این مجله در سایت های بین المللی ISC و Doaj نیز نمایه شده است. امتیاز این مجله متعلق به دانشگاه شهید چمران اهواز است.

هیأت تحریریه مجله علمی- پژوهشی علوم و مهندسی آبیاری امیدوار است که همکاران محترم در کلیه مراکز علمی و پژوهشی با ارسال مقالات ارزنده علمی و کاربردی خود در تخصص‌های مهندسی آب، آبیاری و زهکشی، منابع آب، سازه های آبی، هیدرولیک رسوب، محیط زیست آبی، آبخیزداری، آب- هواشناسی (هیدرومتئورولوژی)، هیدرولوژی، آب های زیرزمینی، اقتصاد آب و علوم وابسته به آنها، با این مجله همکاری نموده و در فراهم ساختن زمینه‌ی استمرار و پیوستگی چاپ و انتشار مجله و ارائه خدمات بیشتر و ارزنده تر در نشر علوم مهندسی آب و آبیاری ما را همراهی نمایند. از کلیه بررسی کنندگان مقالات و صاحب نظران که در فرصت های گوناگون با ارائه نظرات اصلاحی خود در بهبود کیفیت مجله نقشی به عهده گرفته اند، صمیمانه سپاسگزاری می نماید.

از همکاران گرامی که نتیجه مطالعات و تحقیقات خود را جهت چاپ و انتشار به این مجله ارسال می نمایند تقاضا می شود که ضوابط تعیین شده (راهنمای تهیه مقاله) را دقیقاً رعایت فرمایند. توجه به ضوابط مجله و رعایت آن از جانب صاحبان مقاله، ضمن جلوگیری از دوباره کارهای زیاد و وقت گیر، موجب تسریع و بهبود کیفیت چاپ مقالات نیز خواهد گردید.

سردبیر

فهرست مطالب

عنوان	صفحه

تخمین نسبت جذب سدیم (SAR) و هدایت الکتریکی (EC) با استفاده از مدل‌های هیبریدی رگرسیون بردار پشتیبان و جنگل تصادفی-مطالعه موردی رودخانه قطور، غرب ایران ۱
میلاد شرفی، جواد بهمنش، وحید رضاویردی‌نژاد و سعید صمدیان‌فرد

بررسی آزمایشگاهی اثر جت مستغرق بر خصوصیات پرش هیدرولیکی نامتقارن در بستر سینوسی ۲۱
فتح‌الله داوری دهکردی، جواد احدیان، سید محسن سجادی، آناریتا اسکورزینی و ماریو دیباکو

بررسی کاربرد تحلیل پوششی داده‌های پنجره‌ای در فرایندهای مدیریتی مصارف آب کشاورزی (مطالعه موردی: استان خوزستان) ۴۵
دلال مدحج و عادل دحیماوی

بررسی اثر نسبت ظاهری مخازن کم عمق بر میزان توزیع غلظت رسوبات معلق ۵۵
محمد افراشته و بابک لشکرآرا

پیش‌بینی بار رسوب معلق رودخانه با استفاده از مدل ماشین بردار پشتیبان و روش‌های محاسباتی بهبودیافته ۷۵
حامد نوذری، فاطمه چدنی، مهدی کلانتری و علیرضا مهربانی بشار

اثر طوقه مشبک بر آبشستگی موضعی پیرامون گروه پایه‌های استوانه‌ای پل ۹۹
نسرین بهرامی و مهدی قمشی

تعیین الگوی کشت پیشنهادی محصولات عمده زراعی با استفاده از شاخص آب، انرژی و غذا (مطالعه موردی: شبکه آبیاری دشت ورامین) ۱۰۹
ارشاد آبیار و محمود مشعل

کلاس‌بندی و مدل‌سازی مبتنی بر محاسبات نرم کیفیت آب رودخانه کارون: ایستگاه‌های آب‌سنجی گتوند و اهواز ۱۲۵
غزاله صالح پور، محمدرضا زایری و مهدی زینی وند

Shahid Chamran University of Ahvaz

Irrigation Sciences and Engineering (JISE)
Vol. 48, No. 3, Fall 2025, p. 1-20

Research Paper

Journal homepage: https://jise.scu.ac.ir

EXTENDED ABSTRACT

Estimation of sodium absorption ratio (SAR) and electrical conductivity (EC) using hybrid models of support vector regression and random forest-case study of Qatur river, west of Iran

M. Sharafi[1], J. Behmanesh[2*], V. Rezaverdinejad[3] and S. Samadianfard[4]

1- Ph.D. Student, Department of Water Engineering, Faculty of Agriculture, Urmia University, Urmia, Iran.
2- Corresponding Author, Professor, Department of Water Engineering, Faculty of Agriculture, Urmia University, Urmia, Iran. (j.behmanesh@urmia.ac.ir)*
3- Professor, Department of Water Engineering, Faculty of Agriculture, Urmia University, Urmia, Iran.
4- Associate Professor, Department of Water Engineering, Faculty of Agriculture, University of Tabriz, Tabriz, Iran.

ARTICLE INFO

Artlcle history:
Received: 29 July 2024
Revised: 18 November 2024
Accepted: 20 November 2024
Available online: 05 November 2025

Keywords:
Irrigation water quality, Sodium absorption ratio, Machine learning, Data mining, Wilcox diagram, Hydrology.

TO CITE THIS ARTICLE:

Sharafi, M., Behmanesh, J., Rezaverdinejad, V., Samadianfard, S. 2025. 'Estimation of sodium absorption ratio (SAR) and electrical conductivity (EC) using hybrid models of support vector regression and random forest-case study of Qatur river, west of Iran', *Irrigation Sciences and Engineering*, 48(3), pp. 1-20. doi: 10.22055/jise.2024.47590.2131

Abstract

In the field of irrigation, water quality has an effective role in determining the compatibility of water with soil and different crops. As a valuable tool for water quality assessment, the Wilcox diagram enables stakeholders to promote sustainable agricultural practices by reducing potential risks related to water salinity and sodium content. However, measuring sodium absorption ratio (SAR) and electrical conductivity (EC) parameters is associated with various challenges such as cost and time, calibration error, and maintenance problems. So, this research was carried out to predict SAR and EC parameters using easily accessible parameters including sulfate and chloride in Qatur river located in the northwest of Iran from 1993 to 2019. The models used included random forest (RF) and support vector regression (SVR) which have been optimized by genetic algorithm (GA), fruit fly algorithm and Golden ball optimization (GBO). The analysis of the results of this research showed that the RF-GA model had the least error in the Qatur river station with root mean square error of 0.809 meq.lit-1 and 0.146 dS.m-¬1 for SAR and EC parameters, respectively. Also, The SVR-GBO model with the root mean square error of 0.809 meq.lit-1 and 0.146 dS.m-1 and SVR-FOA with the root mean square error of 0.998 meq.lit-1 and 0.169 dS.m-1 for SAR and EC parameters, respectively had suitable performance. Finally, the evaluation of the utilized parameters indicated that chloride plays an important role in predicting SAR and EC parameters, and if sulfate is not measured, it can be used as a promising alternative.

Introduction

The process of measuring both EC and SAR parameters is a laborious task and necessitates considerable monetary investment, especially when dealing with a substantial quantity of samples (Waqas et al., 2024). Consequently, the utilization of alternative methodologies has gained paramount importance. The present research aims to accurately predict the EC and SAR parameters in the Qatur River located in the Aras River catchment, Iran, using the support vector regression (SVR) and random forest (RF) models optimized with fruit fly (FOA), genetic (GA), and golden ball (GBO) algorithms. Finally, the models will be evaluated using different evaluation criteria.

Methodology

Study area

In recent years, the quality of the Aras River has potentially decreased due to factors such as intense agricultural activities and the need to monitor water quality has become more important than in the past. Therefore, to monitor the water quality, the condition of Qatur River, in the right branch of Aras River, Iran, has been investigated.

Random forest (RF)

The random forest algorithm is a potent ensemble learning algorithm widely used for diverse tasks such as regression, classification, and unsupervised learning. It was presented by Breiman and is known for its superior performance (Breiman 2001).

Support vector regression (SVR)

Support vector regression (SVR) is an algorithm belonging to the domain of machine learning, specifically designed for the purpose of regression tasks. SVR was introduced by Vapnik and Chervonenkis (1974).

Genetic algorithm (GA)

Genetic algorithms (GAs) are a type of non-deterministic models that are inspired by Darwinian theory (Hüe 1997). Unlike other optimization methods, GA focuses on evaluating the objective function (McKinney and Lin 1994).

Fruit fly optimization algorithm (FOA)

The Fruit Fly Optimization Algorithm (FOA) is a nature-inspired optimization algorithm based on the behavior of fruit flies, first proposed by Pan (2012). It is a metaheuristic algorithm that aims to find the best solution to a given problem (Wang et al., 2022).

Golden Ball Optimization (GBO)

The Golden Ball Optimization algorithm is an innovative meta-heuristic method inspired by soccer game tactics and strategies. In this algorithm, players are considered as search agents in the problem space that pursue a common goal through cooperation and interaction (Osaba et al., 2014).

Also, in this research, three different scenarios have been utilized to evaluate the role of input parameters on SAR and EC parameters. Table (1) also indicates the scenarios utilized to evaluate the role of input parameters.

Table 1- The input combinations of the studied models.

Scenario	Input		Output
1	SO_4		SAR-EC
2	Cl		SAR-EC
3	SO_4	Cl	SAR-EC

Results and Discussion

Tables (2) presents the results of the models utilized in the test period based on R, RMSE, NRMSE, NS, and WI criteria for Qatur River station. The evaluation of the studied models of the SAR parameter prediction indicated that the RF-GA-3 model with criteria R = 0.983, RMSE = 0.809 (meq/lit), NRMSE = 0.024, NS = 0.965, and WI = 0.991 has had the best performance compared to other models. For the EC parameter, the results also indicated that the RF-GA-3 model with criteria R = 0.995, RMSE = 0.146 (dS/m), NRMSE = 0.012, NS = 0.991, and WI = 0.998 has the highest accuracy. Also, the results are in agreement with the results of Hassan et al., (2021) who predicted water quality parameters utilizing classification algorithms and indicated that the MLR model with an accuracy of 99.83% is known as a valuable model in EC parameter prediction.

Conclusions

Wilcox diagram divides water into different classes using SAR and EC parameters. This investigation has been carried out to predict SAR and EC parameters utilizing easily accessible parameters including sulfate and chloride in Qatur River station. The utilized models include RF, RF-GA, SVR, and SVR-FOA, which were evaluated utilizing different evaluation criteria. The evaluation of the outcomes of this examination indicated that the RF-GA-3 model with R = 0.983, and 0.995, respectively, for SAR and EC parameters had the highest accuracy in the Qatur River station. One of the limitations of the present investigation is the lack of access to data from other stations to evaluate the accuracy of the models used. Therefore, it is suggested to utilize data from different stations to check the ability of models for future studies.

Table 2- The evaluation results of the models used in Qatur River station.

Parameter	**SAR**					**EC**				
Scenario	R	RMSE (meq/lit)	NRMSE	NS	WI	R	RMSE (dS/m)	NRMSE	NS	WI
RF-1	0.862	2.348	0.069	0.708	0.925	0.876	0.813	0.064	0.708	0.931
RF-2	0.969	1.078	0.032	0.938	0.984	0.989	0.219	0.017	0.979	0.995
RF-3	**0.977**	**0.923**	**0.027**	**0.955**	**0.989**	**0.992**	**0.215**	**0.017**	**0.900**	**0.995**
RF-GA-1	0.896	1.927	0.057	0.803	0.943	0.918	0.598	0.047	0.842	0.957
RF-GA-2	0.977	0.939	0.028	0.953	0.988	0.990	0.213	0.017	0.980	0.995
RF-GA-3	**0.983**	**0.809**	**0.024**	**0.965**	**0.991**	**0.995**	**0.146**	**0.012**	**0.991**	**0.998**
RF-GBO-1	0.887	2.011	0.059	0.786	0.938	0.902	0.661	0.052	0.807	0.948
RF-GBO-2	0.974	0.981	0.029	0.949	0.987	0.989	0.225	0.018	0.978	0.994
RF-GBO-3	**0.980**	**0.877**	**0.026**	**0.959**	**0.990**	**0.995**	**0.154**	**0.012**	**0.990**	**0.997**
SVR-1	0.869	2.194	0.065	0.745	0.915	0.869	0.764	0.060	0.743	0.914
SVR-2	0.966	1.128	0.033	0.933	0.983	0.987	0.241	0.019	0.974	0.993
SVR-3	**0.970**	**1.068**	**0.032**	**0.940**	**0.984**	**0.991**	**0.229**	**0.018**	**0.977**	**0.995**
SVR-FOA-1	0.913	1.840	0.054	0.821	0.942	0.908	0.645	0.051	0.817	0.942
SVR-FOA-2	**0.974**	**0.998**	**0.028**	**0.947**	**0.987**	0.996	0.234	0.019	0.976	0.993
SVR-FOA-3	0.973	1.050	0.031	0.942	0.984	**0.994**	**0.169**	**0.013**	**0.987**	**0.999**
SVR-GBO-1	0.874	2.166	0.064	0.752	0.916	0.988	0.235	0.019	0.976	0.994
SVR-GBO-2	0.968	1.097	0.032	0.936	0.983	0.993	0.182	0.014	0.985	0.996
SVR-GBO-3	**0.972**	**1.042**	**0.031**	**0.943**	**0.984**	**0.994**	**0.176**	**0.014**	**0.986**	**0.997**

Acknowledgments

The authors of the article hereby express their gratitude to the regional water company of West Azerbaijan province for receiving the data and also to the research and technology vice-chancellor of Urmia University for the financial support of this study with grant number 19621.

Conflict of Interest

The authors declared no potential conflicts of interest concerning the research, authorship, and publication of this article. Confirmation.

Funding

The financial support of this research has been provided by Grant number 1961 and we hereby thank the Honorable Vice Chancellor of Research from Urmia University for their support.

Data Availability Statements

The datasets generated and/or analyzed during the current study are available from the corresponding author on reasonable request.

Authors' contribution
First Author: Milad Sharafi, Collecting data and writing the first draft of the article.
Second Author: Javad Behmanesh, Reading and revising the initial draft.
Third Author: Vahid Rezaverdinejad, Reading and revising the initial draft.
Fourth Author: Saeed Samadian Fard, Reading and revising the initial draft.

References

1- Breiman, L., 2001. Random forests. *Machine learning*, 45(4), pp.5-32. https://doi.org/10.1023/A:1010933404324.

2- Hassan, M., Hassan, M., Akter, L., Rahman, M., Zaman, S., Khan, H., Jahan, N., Smrity, R.N., Farhana, J. and Raihan, M., 2021. Efficient prediction of water quality index (WQI) using machine learning algorithms. *Human-Centric Intelligent Systems*, 1(3), pp.86-97. https://doi.org/10.2991/hcis.k.211203.001.

3- Hüe, X., 1997. Genetic algorithms for optimization. Citeseer.

4- McKinney, D.C. and Lin, M.D., 1994. Genetic algorithm solution of groundwater management models. *Water Resources Research*, 30(6), pp.1897-1906. https://doi.org/10.1029/94WR00554.

5- Osaba, E., Diaz, F. and Onieva, E., 2014. Golden ball: a novel meta-heuristic to solve combinatorial optimization problems based on soccer concepts. *Applied intelligence*, 41(1), pp.145-166. https://doi.org/10.1007/s10489-013-0512-y.

6- Pan, W.-T., 2012. A new fruit fly optimization algorithm: taking the financial distress model as an example. *Knowledge-Based Systems*, 26(1), pp.69-74. https://doi.org/10.1016/j.knosys.2011.07.001.

7- Vapnik, V. and Chervonenkis, A.Y., 1974. The method of ordered risk minimization, I. *Avtomatika i Telemekhanika*, 8(1), pp.21-30.

8- Wang, R.-Y., Hu, P., Hu, C.-C. and Pan, J.-S., 2022. A novel Fruit Fly Optimization Algorithm with quasi-affine transformation evolutionary for numerical optimization and application. *International Journal of Distributed Sensor Networks*, 18(2), pp.155-168. https://doi.org/10.1177/15501477211073037.

9- Waqas, M., Humphries, U.W., Wangwongchai, A., Dechpichai, P., Zarin, R. and Hlaing, P.T., 2024. Incorporating novel input variable selection method for in the different water basins of Thailand. *Alexandria Engineering Journal*, 86(1), pp.557-576. https://doi.org/10.1016/j.aej.2023.11.046.

© 2025 Shahid Chamran University of Ahvaz, Ahvaz, Iran. This article is an open access article distributed under the terms and conditions of the Creative Commons Attribution 4.0 International (CC BY 4.0 license) (http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/).

علوم و مهندسی آبیاری جلد ۴۸، شماره‌ی۳، پاییز ۱۴۰۴، مقاله پژوهشی، ص. ۲۰-۱

تخمین نسبت جذب سدیم (SAR) و هدایت الکتریکی (EC) با استفاده از مدل‌های هیبریدی رگرسیون بردار پشتیبان و جنگل تصادفی-مطالعه موردی رودخانه قطور، غرب ایران

میلاد شرفی[۱]، جواد بهمنش[۲*]، وحید رضاویردی‌نژاد[۳] و سعید صمدیان‌فرد[۴]

۱- دانشجوی دکتری، گروه مهندسی آب، دانشکده کشاورزی، دانشگاه ارومیه، ارومیه، ایران.

۲*- نویسنده مسئول، استاد، گروه مهندسی آب، دانشکده کشاورزی، دانشگاه ارومیه، ارومیه، ایران j.behmanesh@urmia.ac.ir

۳- استاد، گروه مهندسی آب، دانشکده کشاورزی، دانشگاه ارومیه، ارومیه، ایران.

۴- دانشیار، گروه مهندسی آب، دانشکده کشاورزی، دانشگاه تبریز، تبریز، ایران.

دریافت: ۱۴۰۳/۰۵/۰۸ بازنگری: ۱۴۰۳/۰۸/۲۸ پذیرش: ۱۴۰۳/۰۸/۳۰ انتشار: ۱۴۰۴/۰۸/۱۴

چکیده

در زمینه آبیاری، کیفیت آب نقش مؤثری در تعیین سازگاری آب با خاک و محصولات مختلف دارد. نمودار Wilcox به‌عنوان یک ابزار ارزشمند برای ارزیابی کیفیت آب، ذینفعان را قادر می‌سازد تا با کاهش خطرات بالقوه مربوط به شوری آب و محتوای سدیم، شیوه‌های کشاورزی پایدار را ترویج کنند. با این حال، اندازه‌گیری پارامترهای نسبت جذب سدیم (SAR) و هدایت الکتریکی (EC) با چالش‌های مختلفی مانند هزینه و زمان، خطای کالیبراسیون و مشکلات نگهداری همراه است. بر این اساس، این تحقیق به‌منظور پیش‌بینی پارامترهای SAR و EC با استفاده از پارامترهای دردسترس شامل سولفات و کلرید در رودخانه قطور واقع در شمال غرب ایران از سال ۱۳۷۲ تا ۱۳۹۸ انجام شد. مدل‌های مورد استفاده شامل جنگل تصادفی (RF)، رگرسیون بردار پشتیبان (SVR) بودند که توسط الگوریتم‌های ژنتیک (GA)، مگس میوه (FOA) و بهترین توپ طلایی (GBO) بهینه‌سازی شدند. تجزیه و تحلیل یافته‌های حاصل از این تحقیق نشان داد که مدل RF-GA کم‌ترین خطا را در ایستگاه رودخانه قطور با داشتن جذر میانگین مربعات خطای ۰/۸۰۹ meq/lit و ۰/۱٤٦ dS/m به‌ترتیب برای پارامترهای SAR و EC داشته است. همچنین مدل SVR-GBO با داشتن جذر میانگین مربعات خطای ۰/۸۷۷ meq/lit و ۰/۱٥٤ dS/m و مدل SVR-FOA نیز با داشتن جذر میانگین مربعات خطای ۰/۹۹۸ meq/lit و ۰/۱٦۹ dS/m به‌ترتیب برای پارامترهای SAR و EC عملکرد مناسبی را داشتند. درنهایت ارزیابی پارامترهای مورد استفاده نشان داد که کلرید نقش مهمی در پیش‌بینی پارامترهای SAR و EC دارد و در صورت عدم اندازه‌گیری سولفات، می‌توان از آن به‌عنوان یک جایگزین امیدوارکننده استفاده کرد.

کلید واژها: نسبت جذب سدیم، یادگیری ماشینی، داده‌کاوی، هیدرولوژی.

مقدمه

رودخانه‌ها منبع اصلی تأمین آب سطحی در جهان هستند و مقدار آب مورد نیاز بخش‌های مختلف را تأمین می‌کنند (Giri 2021). رودخانه‌ها به‌عنوان یکی از بخش‌های حیاتی چرخه هیدرولوژیکی، اکوسیستم‌ها را حفظ می‌کنند و نشان می‌دهند که با تقویت تنوع زیستی، نقش به‌سزایی در اکوسیستم‌ها دارند (Palmer and Ruhi 2019). رودخانه‌ها علاوه‌بر نقشی که در اکوسیستم‌ها دارند، به‌عنوان منبع اصلی تامین آب شیرین در جوامع انسانی نیز ضروری هستند (Wang and He 2022). کمیت و کیفیت آب رودخانه‌ها در سال‌های اخیر به‌دلایلی مانند رشد جمعیت، بی‌توجهی به نگرانی‌های زیست‌محیطی و مصرف بیش از حد منابع آب سطحی به‌طور قابل توجهی کاهش یافته است (Mousazadeh et al., 2021). این کاهش کیفیت در رودخانه‌ها، چالش‌های مهمی را برای بخش کشاورزی، که بزرگترین مصرف‌کننده آب شیرین در سطح جهان است، ایجاد کرده است و تقریباً ۸۵ درصد از مصرف را به خود اختصاص داده است (Qadir et al., 2007). از جمله مسائل اصلی مرتبط با استفاده از آب با کیفیت پایین در کشاورزی، افزایش سطح شوری و سدیم در خاک است (Machado and Serralheiro 2017; Pincay and Cantos 2024). استفاده از آب شور به تجمع نمک در خاک کمک می‌کند و در نتیجه مانع از رشد محصولات حساس می‌شود (Alkharabsheh et al., 2021). علاوه بر این، آبیاری با آب حاوی سدیم بالا بر ساختار خاک‌های رسی تأثیر منفی می‌گذارد و در نتیجه مانع رشد گیاه می‌شود (Rahimi et al., 2021). بنابراین، با توجه به نقش مهم نمک و سدیم در آب آبیاری، خاک‌ها بر اساس میزان هدایت الکتریکی (Electrical conductivity) و نسبت جذب سدیم (Sodium adsorption ration) به طبقات مختلفی طبقه‌بندی می‌شوند (Amezketa and de Lersundi 2008). اندازه‌گیری هدایت الکتریکی در آب معمولاً با استفاده از

 DOI: 10.22055/jise.2024.47590.2131

یک EC متر انجام می‌شود (Cavins et al., 2000). درحالی‌که تعیین نسبت جذب سدیم پس از ارزیابی غلظت کلسیم، منیزیم و سدیم انجام می‌شود (Sposito and Mattigod 1977). فرآیند اندازه‌گیری هر دو پارامترEC و SAR یک کار پرزحمت بوده و نیاز به سرمایه‌گذاری پولی قابل‌توجهی دارد، به‌ویژه هنگامی‌که با مقدار قابل‌توجهی از نمونه‌ها سروکار داریم. لذا، استفاده از روش‌های جایگزین اهمیت زیادی را پیدا می‌کند. در سال‌های اخیر، مدل‌های هوشمند به‌دلیل توانایی آن‌ها در به حداقل رساندن خطاها و بهینه‌سازی زمان پیش‌بینی، نسبت به رویکردهای تجربی اهمیت قابل‌توجهی پیدا کرده‌اند (Waqas et al., 2024; Woźniak et al., 2024).

Nouraki et al. (2021) پارامترهای کیفیت آب شامل SAR، سختی کل (Total hardness) و کل جامدات محلول (Total dissolved solids) را با استفاده از مدل‌های جنگل تصادفی (Random forest)، M5P، رگرسیون بردار پشتیبان (Support vector regression)و رگرسیون خطی چندگانه (Multi-layer regression)در رودخانه کارون پیش‌بینی کردند. یافته‌های این تحقیق نشان داد که مدل‌هایRF، SVR و MLR به‌ترتیب با داشتن ضریب تعیین ۰/۹۸، ۰/۹۹ و ۰/۹۹ عملکرد مناسبی را در تخمین پارامترهای TDS، SAR و TH داشته‌اند. در تحقیقی Sepahvand et al. (2021) عملکرد مدل‌های درختی شامل M5P، RF، M5P کیسه‌ای (bagged M5P) و روش گروهی برای پردازش داده‌ها (group method for data handling) را برای پیش‌بینی SAR در سه حوزه آبخیز آلستار، بیرانشهر و خرم‌آباد واقع در ایران ارزیابی کردند. این تحقیق نشان داد که مدل BM5P با داشتن جذر میانگین مربعات خطا ۰/۰۰۹ از دقت بیشتری نسبت به سایر مدل‌های مورد استفاده برخوردار بوده است. در یک بررسی، El Bilali و Taleb (2020) پارامترهای کیفیت آب آبیاری را با استفاده از مدل‌های MLR، RF، SVR، تقویت تطبیقی (adaptive boosting)، نزدیک‌ترین همسایگی (k- k nearest neighbor)، درخت تصمیم (decision tree)، شبکه عصبی مصنوعی (Artificial neural network) و گرادیان نزولی تصادفی (stochastic gradient descent) پیش‌بینی کردند. همچنین داده‌های مورد نیاز از پایش نه ایستگاه در چهار رودخانه واقع در حوضه بورگرگ مراکش به‌دست آمد. نتایج این مطالعه نشان داد که مدل‌های مورد استفاده (به جز KNN وSVR) پارامترهای کیفیت آب رودخانه را با ضریب همبستگی ۰/۹ با موفقیت پیش‌بینی کردند. در مطالعه‌ای Mokhtar et al. (2022) شاخص‌های کیفیت آب آبیاری بحرالبقر مصر را بر اساس مدل‌های یادگیری ماشین و رگرسیون چندگانه پیش‌بینی کردند. ارزیابی نتایج این تحقیق نشان داد که بر اساس شاخص پراکندگی (scatter index)، تمامی مدل‌های مورد استفاده با مقادیر خطای کمتر از ۰/۱ دقت بالایی برای همه پارامترها به جز کربنات سدیم باقی‌مانده نشان دادند. در تحقیقی دیگر Haghiabi et al. (2018) به پیش‌بینی کیفیت آب با استفاده از روش‌های یادگیری ماشین در رودخانه تیره واقع در جنوب غرب ایران پرداختند. ارزیابی دقت مدل‌های اعمال‌شده نشان داد که SVM دقیق‌ترین مدل بوده و کم‌ترین خطا را نسبت به سایر مدل‌ها داشته است. Qishlaqi et al. (2017) به ارزیابی هیدروشیمیایی کیفیت آب رودخانه تیره رود واقع در حوضه آبریز کرخه پرداختند. ارزیابی نتایج این مطالعه نشان داد که (به‌جز پارامتر سولفات) منیزیم، کلسیم و باقی آنیون‌ها و کاتیون‌ها در محدوده استاندارد سازمان جهانی بهداشت بودند.

در سال‌های اخیر، افزایش قابل‌توجهی در استفاده از مدل‌های هیبریدی در مقایسه با مدل‌های مستقل وجود داشته است (Rad and Kasaeian 2024). این تغییر را می‌توان به مزایای متعددی از جمله بهبود عملکرد، افزایش استحکام، انعطاف‌پذیری، سازگاری و هم‌افزایی نسبت داد که آن‌ها را به انتخابی ارجح نسبت به مدل‌های مستقل در زمینه‌ها و کاربردهای مختلف تبدیل کرده است (Manikandan and Pant 2021). توانایی در مهار نقاط قوت رویکردها و روش‌های مختلف، آن‌ها را به ابزاری قدرتمند برای مقابله با مشکلات پیچیده و دست‌یابی به نتایج دقیق‌تر و قابل اطمینان‌تر تبدیل می‌کند. در تحقیقی Ahmadianfar et al. (2020) مدل‌سازی EC رودخانه سفیدرود در ایران را با استفاده از رگرسیون خطی وزنی موجک هیبریدی در طی ۲۰ سال بررسی کرد. ارزیابی نتایج این تحقیق نشان داد که مدل پیشنهادی با ریشه میانگین مربعات خطا ۸۹/۷۸ به‌عنوان بهترین مدل در حوزه مورد بررسی تعیین شد. در مطالعه‌ای Kisi et al. (2019) پارامترهای کیفیت آب از جمله EC، SAR و TH را با هیبریداسیون مدل سیستم استنتاج عصبی–فازی تطبیقی (Adaptive neural-fuzzy inference system) با الگوریتم‌های تکاملی مدل‌سازی کرد. نتایج تحقیق نشان داد که الگوریتم ژنتیک پیوسته (Continuous genetic algorithm) بهترین عملکرد را با افزایش ضریب تعیین مدل ANFIS در حدود ۰/۱۴، ۰/۱۳ و ۰/۱۵ برای پارامترهای TH، EC و SAR داشت. در مطالعه‌ای دیگر Jamei et al. (2023) هدایت الکتریکی و بی‌کربنات آب رودخانه کارون را با استفاده از یک مدل ترکیبی مبتنی‌بر شبکه عصبی بازگشتی عنصری (elemental recurrent neural network) پیش‌بینی کرد. این تحقیق نشان داد که پیش‌بینی هدایت الکتریکی و شاخص‌های یون بی‌کربنات با استفاده از مدل‌های ترکیبی می‌تواند به‌طور موثر مورد استفاده قرار گیرد.

نظارت دقیق و مداوم بر کیفیت آب در منابع آب سطحی به‌دلیل تأثیر بالقوه بر سلامت انسان و حفظ اکوسیستم حیاتی است. رودخانه‌ها به‌عنوان منابع ارزشمند آب شیرین با افزایش جمعیت و گسترش کشاورزی در بیش‌تر موارد به‌عنوان پساب کارخانه‌ها و زهکش‌های کشاورزی عمل کرده و به‌طور فزاینده‌ای

در معرض خطر کاهش کیفیت قرار می‌گیرند. همچنین اندازه‌گیری پارامترهای کیفی مستلزم صرف زمان و هزینه برای انجام آزمایش‌ها و آوردن نمونه‌ها به آزمایشگاه در ظروف مخصوص بوده و در برخی موارد فاصله زیاد تا آزمایشگاه نیز باعث تغییر در کیفیت نمونه‌ها می شود. بنابراین استفاده از روش‌هایی که پارامترهای کیفیت آب را در زمان واقعی در رودخانه‌ها با دقت بالایی ارائه می‌کنند، به‌عنوان امری مؤثر تلقی می‌شوند. از سوی دیگر، نمودار ویلکاکس (Wilcox) با طبقه‌بندی کیفیت آب آبیاری با استفاده از پارامترهای SAR و EC، به‌عنوان راهنمای عملی برای کشاورزان برای مدیریت کارآمد و پایدار منابع آب در شیوه‌های کشاورزی عمل می‌کند. در نمودار Wilcox پارامتر SAR در قسمت عمودی نمودار و پارامتر EC در قسمت افقی قرار داشته و همچنین کل نمودار به ۱۶ بخش از C1-S1 (کیفیت بسیار خوب) تا C4-S4 (کیفیت بسیار بد) تقسیم شده است. بنابراین، پیش‌بینی این پارامترها با استفاده از عناصر در دسترس، باعث صرفه‌جویی در زمان و هزینه می‌شود. با توجه به پیچیدگی‌های زمین‌شناسی و استفاده گسترده از منابع آبی رودخانه قطور در فعالیت‌های کشاورزی، بررسی کیفیت آب آن از اهمیت بالایی برخوردار است. تاکنون تحقیقات محدودی به بررسی دقیق رابطه میان پارامترهای کیفی آب مانند نسبت جذب سدیم (SAR)و هدایت الکتریکی (EC) در این منطقه پرداخته‌اند. از این‌رو، نیاز به مدل‌های پیش‌بینی دقیق برای مدیریت بهینه منابع آب و جلوگیری از کاهش کیفیت آب بیش از پیش مورد نیاز می‌باشد. لذا، این پژوهش با استفاده از مدل‌های یادگیری ماشین شامل جنگل تصادفی (RF) و رگرسیون بردار پشتیبان (SVR) بهینه‌سازی شده با الگوریتم‌های ژنتیک (GA)، مگس میوه (FOA) و بهترین توپ طلایی (GBO) تلاش می‌کند دقت پیش‌بینی این پارامترها را ارتقا داده و به بهبود مدیریت منابع آبی منطقه کمک کند. در نهایت، مدل‌ها با استفاده از معیارهای ارزیابی مختلفی مورد ارزیابی قرار خواهند گرفت.

مواد و روش‌ها

منطقه مطالعه

در سال‌های اخیر کیفیت رودخانه ارس به‌دلیل عواملی مانند فعالیت‌های شدید کشاورزی و ضایعات کارخانه‌جات آبمیوه‌سازی به‌طور بالقوه کاهش یافته و کیفیت آب دو رودخانه قطور و آق در شاخه سمت راست رود ارس را تحت تأثیر قرار داده است (Nasehi et al., 2013). در تحقیق حاضر، تنها رودخانه قطور مورد بررسی قرار گرفته است. قطور رودخانه‌ای در شرق ترکیه و شمال غربی ایران است که از شهر سرای در شرق ترکیه سرچشمه می‌گیرد و سرانجام در نزدیکی شهر جلفا ایران به رود ارس می‌پیوندد. رودخانه قطور در منطقه‌ای با زمین‌شناسی پیچیده واقع شده است که عمدتاً شامل سازندهای رسوبی و آذرین می‌باشد. این منطقه بخشی از زون زمین‌ساختی زاگرس به شمار می‌رود و در برخی نواحی تحت تأثیر فعالیت‌های تکتونیکی قرار گرفته است. ساختارهای زمین‌شناسی منطقه شامل لایه‌های آهکی، شیل و ماسه‌سنگ است که به‌دلیل فرسایش، تنوع مورفولوژیکی قابل توجهی ایجاد کرده‌اند. کاربری اراضی اطراف رودخانه قطور به‌طور عمده شامل فعالیت‌های کشاورزی و باغداری است، به‌ویژه در نواحی پایین‌دست که منابع آبی رودخانه به آبیاری زمین‌های زراعی اختصاص می‌یابد. در بخش‌های کوهستانی و بالادست، مراتع و جنگل‌های پراکنده وجود دارد که دارای توپوگرافی شیب‌دار و خاک‌های نسبتاً ناپایدار می‌باشند. رودخانه آق نیز از ارتفاعات شهرستان چالدران در مرز ایران و ترکیه سرچشمه می‌گیرد و پس از عبور از دره قره، وارد دشت چاپیاره شده و در روستای مراکان به رودخانه قطور می‌پیوندد (Aghapour and Mahvi 2005).

شکل (۱) موقعیت جغرافیایی ایستگاه مورد بررسی را نشان می‌دهد. علاوه‌بر این، جدول (۱) آمار مجموعه داده‌های آموزش و آزمایش در رودخانه قطور را برای هر چهار پارامتر نشان می‌دهد. داده‌های مورد استفاده در این تحقیق از سازمان آب منطقه‌ای استان آذربایجان غربی و مربوط به سال‌های ۱۳۹۸-۱۳۷۲ بوده است. همچنین ۶۷ درصد داده‌ها برای آموزش مدل‌ها و ۳۳ درصد به‌طور تصادفی برای آزمایش استفاده شده است.

جنگل تصادفی (RF)

الگوریتم جنگل تصادفی یک الگوریتم یادگیری گروهی قدرتمند است که به‌طور گسترده برای کارهای متنوعی مانند رگرسیون، طبقه‌بندی و یادگیری بدون نظارت استفاده می‌شود. جنگل تصادفی توسط بریمن ارائه شد و به‌دلیل عملکرد برترش شناخته شده است (Breiman 2001). این الگوریتم با ساخت مجموعه‌ای از درخت‌ها انجام می‌شود، به‌طوری‌که درخت تکی بر روی زیرمجموعه‌های مختلفی از داده‌های آموزشی منحصر به فرد آموزش داده می‌شود (Biau and Scornet 2016). این روش به‌عنوان "کیسه‌بندی" (bagging) شناخته می‌شود و اجازه می‌دهد تا تنوع کنترل شده را در بین درختان معرفی کند (Altman and Krzywinski 2017). یکی از ویژگی‌های کلیدی جنگل تصادفی استفاده از نمونه‌های خارج از کیسه (out-of-bag) است (Janitza and Hornung 2018). این نمونه‌ها نقاط داده‌ای هستند که در آموزش یک درخت خاص وجود ندارند و برای ارزیابی عملکرد تعمیم مدل استفاده می‌شوند. علاوه‌بر این، تکنیک جنگل تصادفی معیاری با اهمیت متغیر ارائه می‌دهد که به‌صورت عددی تأثیر هر مشخصه ورودی را بر فاز پیش‌بینی ارزیابی می‌کند.

DOI: 10.22055/jise.2024.47590.2131

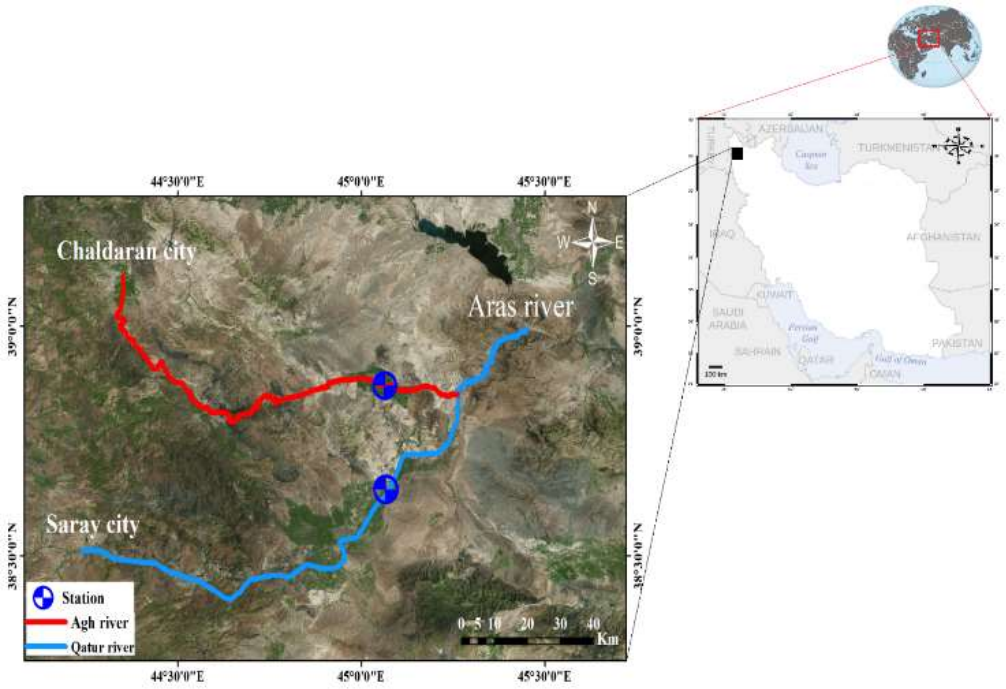


Fig. 1- Geographical location of the Aras basin.
شکل ۱- موقعیت جغرافیایی حوضه ارس

جدول ۱- آمار مجموعه داده‌های آموزش و آزمایش در رودخانه قطور
Table 1- Statistics of training and testing datasets in Qatur river

Statistical parameters	Training set				Testing set			
	SO_4	Cl	SAR	EC	SO_4	Cl	SAR	EC
Unit	mg/lit	mg/lit	-	dS/m	mg/lit	mg/lit	-	dS/m
Mean	2.12	4.82	2.53	1148.19	2.15	4.7	2.53	1132.7
Minimum	0.1	0.05	0.06	200	0.22	0.1	0.06	240
Maximum	10.28	170	40.76	20150	26.63	114	33.86	12870
Standard deviation	2.91	14.16	4.5	1723.12	3.13	12.22	4.35	1505.6

رگرسیون بردار پشتیبانی (SVR)

رگرسیون بردار پشتیبان (SVR) یک الگوریتم متعلق به حوزه یادگیری ماشین است که به‌طور خاص برای اهداف رگرسیونی طراحی شده است. این الگوریتم از الگوریتم ماشین بردار پشتیبان (Support vector machine) مشتق شده است که عمدتاً برای مسائل طبقه‌بندی استفاده می‌شود. SVR توسط Vapnik و Chervonenkis (1974) معرفی شد. رگرسیون بردار پشتیبان (SVR) به‌طور خاص برای رسیدگی به مشکلات رگرسیون طراحی شده است، که در آن هدف اولیه پیش‌بینی یک متغیر پیوسته است (Hamdi et al., 2018). از یک تابع به نام تابع ضرر غیرحساس (e-insensitive loss) برای محاسبه خطاها در داده‌های آموزشی استفاده می‌کند (Karal 2017). این تابع اجازه می‌دهد تا یک حد تحمل یا حاشیه خطا در پیش‌بینی‌ها مشخص شود.

الگوریتم ژنتیک (GA)

الگوریتم‌های ژنتیک (Genetic Algorithm's) نوعی از مدل‌های غیرقطعی هستند که از نظریه داروین الهام گرفته شده‌اند (Hüe 1997). برخلاف سایر روش‌های بهینه‌سازی، GAها نیازی به محاسبه مشتقات جزئی ندارند یا با مسائل اعداد صحیح مختلط سروکار دارند (McKinney and Lin 1994). در عوض، GAها بر ارزیابی تابع هدف تمرکز می‌کنند. یکی از مزایای GA این است که آن‌ها راه‌حل‌ها را از چندین نقطه شروع، جستجو می‌کنند نه فقط از یک نقطه به‌خصوص. این به کاهش خطر گیر افتادن در یک بهینه محلی کمک می‌کند (Albadr et

al., 2020). GAها از قوانین انتقال احتمالی برای هدایت فرآیند جستجو استفاده می‌کنند و از کاوش متنوع در فضای راه‌حل اطمینان می‌دهند (Costa-Carrapiço et al., 2020). پیشرفت سودمندترین راه‌حل‌ها در الگوریتم‌های ژنتیک با به‌دست آوردن نمونه‌های نماینده از کل طیف راه‌حل‌های احتمالی انجام می‌شود. نمونه‌ها متعاقباً از طریق بهره‌برداری از عملگرهای ژنتیکی، مانند تقاطع و جهش، برای تولید راه‌حل‌های جدید با هم ترکیب می‌شوند. این سیر عمل تا زمانی که معیارهای فسخ مقرر برآورده نشود، ادامه می‌یاب (Koohestani 2020). پارامترهای GA حاصل شامل انتخاب والدین، نرخ جهش و نرخ تقاطع است (Hassanat et al., 2019). نرخ تقاطع پتانسیل اجرای عملگر تقاطع را برای راه‌حل‌های والد انتخابی روشن می‌کند، درحالی‌که نرخ جهش احتمال اتخاذ یک عنصر ژنتیکی انتخاب شده به‌طور تصادفی را در یک راه‌حل فرزند تازه تشکیل شده مشخص می‌کند (Schmitt 2001).

الگوریتم بهینه سازی مگس میوه (FOA)

الگوریتم بهینه‌سازی مگس میوه (FOA) یک الگوریتم بهینه‌سازی الهام گرفته از طبیعت است که بر اساس رفتار مگس‌های میوه است که برای اولین بار توسط Pan (2012) ارائه شد، عمل می‌کند. این یک الگوریتم فراابتکاری است که هدف آن یافتن بهترین راه‌حل برای یک مشکل معین با تقلید از رفتار جستجوگر مگس میوه است (Wang et al., 2022). در طبیعت، مگس‌های میوه با حرکت تصادفی در محیط خود رفتار منحصر به‌فردی در جستجوی منابع غذایی از خود نشان می‌دهند. آن‌ها بر اساس رایحه خود جذب منابع غذایی می‌شوند و تمایل دارند در اطراف امیدوارکننده‌ترین آن‌ها جمع شوند (Shao et al., 2020).

الگوریتم بهینه‌سازی توپ طلایی (GBO)

الگوریتم بهینه‌سازی توپ طلایی (Golden Ball Optimization) یک روش نوآورانه فراابتکاری است که از تاکتیک‌ها و استراتژی‌های بازی فوتبال الهام گرفته است. در این الگوریتم، بازیکنان به‌عنوان عوامل جستجو در فضای مسئله تلقی می‌شوند که با همکاری و تعامل، هدف مشترک (یافتن بهترین راه‌حل) را دنبال می‌کنند (Osaba et al., 2014). توپ طلا نمادی از بهینه‌ترین راه‌حل ممکن در این فضاست که بازیکنان (عوامل) با تبادل اطلاعات و موقعیت‌یابی‌های بهینه سعی در نزدیک شدن به آن دارند. این روش از دو فرآیند اکتشاف (گستردگی جستجو در فضای راه‌حل‌ها) و بهره‌برداری (متمرکز شدن بر نواحی امیدبخش) بهره می‌برد تا تعادلی میان یافتن راه‌حل‌های جدید و اصلاح آن‌ها ایجاد کند. ویژگی برجسته بهینه‌سازی توپ طلا در توانایی آن برای فرار از بهینه‌های محلی و دسترسی به نواحی بهینه‌تر فضای جستجو نهفته است (Worawattawechai et al., 2022). GBO با الهام از تصمیم‌گیری‌های گروهی و تاکتیک‌های فوتبال، مدلی قدرتمند برای حل مسائل بهینه‌سازی است که پیچیدگی و تعاملات بین عوامل را به‌خوبی در نظر می‌گیرد.

توسعه مدل‌ها

در این تحقیق از الگوریتم ژنتیک برای افزایش دقت مدل جنگل تصادفی مستقل استفاده شد. برای پیاده‌سازی مدل هیبریدی RF-GA ابتدا داده‌ها به دو قسمت آموزشی و آزمایشی تقسیم شده و وارد مدل می‌شوند. سپس جامعه اولیه برای داده‌ها در نظر گرفته شده و پس از انتخاب پارامترهای بهینه‌سازی، مدل جنگل تصادفی داده‌ها را طبقه‌بندی کرده و تحلیل برازش از داده‌ها گرفته می‌شود. این تحلیل تا آخرین نسل که بهترین دقت به‌دست می‌آید، ادامه دارد. در نهایت، با استفاده از معیارهای ارزیابی عملکرد، مدل ترکیبی محاسبه شده و نتایج مدل‌سازی نمایش داده می‌شود. مدل RF-GA در نرم‌افزار RapidMiner پیاده‌سازی شده است و مراحل اجرای الگوریتم ژنتیک در شکل (۲) نشان داده شده است.

FOA یک الگوریتم بهینه‌سازی مبتنی‌بر رفتار مگس میوه بوده که برای پیاده‌سازی این مدل داده‌ها به دو قسمت آموزشی و آزمون تقسیم شده و وارد مدل می‌شوند. برای اجرای مدل، پارامترهای بهینه‌سازی شامل اندازه جمعیت و حداکثر تولید توسط کاربر برای مدل تعریف می‌شود. سپس فاصله و جهت جستجوی غذا به‌صورت تصادفی برای هر مگس میوه تعریف می‌شود. در مرحله بعد پارامتر S_i توسط مدل محاسبه شده و برازش مناسب به‌دست می‌آید. سپس بهترین غلظت بو در نقاط X و Y یافت می‌شود. در مرحله بعد، اگر حداکثر تکرار در نظر گرفته شده توسط کاربر بیشتر از نسل باشد، مراحل قبلی تکرار می‌شود، در غیر این‌صورت با استفاده از ارزیابی عملکرد محاسبه می‌شود. مدل هیبریدی SVR-FOA در نرم افزار MATLAB پیاده‌سازی شده و فرآیند اجرای الگوریتم مگس میوه در شکل (۳) نشان داده شده است.

 DOI: 10.22055/jise.2024.47590.2131

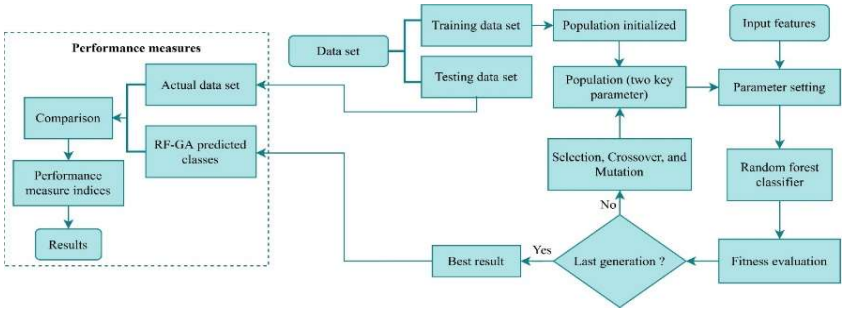


Fig. 2- General process of GA model
شکل ۲- فرآیند کلی مدل GA

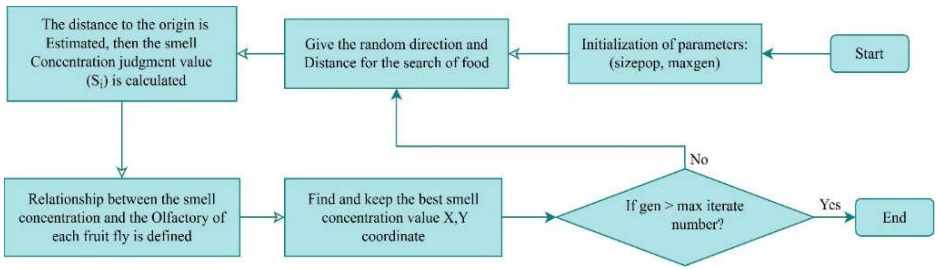


Fig. 3- General process of FOA model
شکل ۳- فرآیند کلی مدل FOA

مدل‌های هیبریدی RF-GBO و SVR-GBO در نرم‌افزار Python پیاده‌سازی شده و فلوچارت مربوط به الگوریتم بهینه‌سازی بهترین توپ طلایی در شکل (۴) آورده شده است. برای اجرای این الگوریتم در ابتدا جمعیت بازیکنان (population) به‌طور تصادفی تولید می‌شوند. اندازه جمعیت نیز در این مرحله مشخص می‌شود. سپس جمعیت بازیکنان به چند تیم تقسیم می‌شوند تا در هر فصل(iteration) با یکدیگر رقابت کنند. بازیکنان با استفاده از داده‌ها آموزش داده می‌شوند (training dataset) تا بازی شروع شود و در هر مرحله امتیازاتی به هر تیم تعلق می‌گیرد تا حداکثر امتیاز حاصل شود. در نهایت اگر تعداد تکرارها بیش‌تر از حداکثر تکرار (max iteration) نباشد مدل به تقسیم‌بندی بازیکنان ارجاع داده می‌شود تا بقیه مراحل از سر گرفته شوند.

پارامترهای مورد نیاز برای دست‌یابی به حداکثر کارایی در مطالعه حاضر برای اجرای مدل‌های SVR و SVR-FOA در جدول (۲) آورده شده است. در هر دو مدل SVR و SVR-FOA، پارامترهای ε، γ، و C توابع محوری هستند. مدل ε، همچنین به‌عنوان اپسیلون شناخته می‌شود، نشان‌دهنده حاشیه تحمل در اطراف خط رگرسیون است. γ، که به‌عنوان گاما شناخته می‌شود، پارامتری است که تأثیر یک نمونه تمرین فردی را مشخص می‌کند. از سوی دیگر، C مربوط به پارامتر منظم‌سازی است که بر تعادل بین دستیابی به حداقل خطای آموزشی و پیچیدگی مدل مرزی حاکم است. همچنین در مدل هیبریدی SVR-FOA، نرخ یادگیری (Learning Rate) و برد پرواز (Flight Range) دو متغیر اساسی هستند که در فرآیند بهینه‌سازی اهمیت محوری دارند. LR که به‌عنوان نرخ یادگیری نیز شناخته می‌شود، میزان هر مرحله یا سرعتی را که الگوریتم در آن دانش را از تکرارهای قبلی کسب می‌کند، تعیین می‌کند. برعکس، FR نشان‌دهنده حداکثر بازه‌ای است که مگس میوه می‌تواند در طول هر تکرار بپوشاند. پارامترهای maxgen و sizepop در هر سه مدل ترکیبی نشان‌دهنده حداکثر تولید و اندازه جمعیت است که پس از آزمون و خطا به‌دست می‌آید. Exploration factor میزان تعادل بین جستجوی فضای جدید و بهینه‌سازی فضای قبلی را تعیین می‌کند و Learning coefficient نشان‌دهنده نرخ یادگیری در هر تکرار می‌باشد. Inertia weight میزان اینرسی (ماندگاری حرکت) را در طول تکرارها کنترل می‌کند و Convergence tolerance محدوده همگرایی الگوریتم را مشخص می‌کند.

همچنین در این تحقیق از سه سناریو مختلف برای ارزیابی نقش پارامترهای ورودی بر پارامترهای SAR و EC استفاده شده که در جدول (۳) آورده شده است. ترتیب سناریوهای در نظر گرفته شده بر اساس ضریب همبستگی پیرسون بوده به‌طوری‌که سناریوی اول کم‌ترین همبستگی و سناریوی آخر بیش‌ترین همبستگی را با پارامترهای SAR و EC داشته‌اند. دلیل انتخاب ضریب همبستگی پیرسون به سادگی و قابلیت تفسیر آن بازمی‌گردد که امکان ارزیابی سریع و واضح روابط خطی بین متغیرها را فراهم می‌کند.

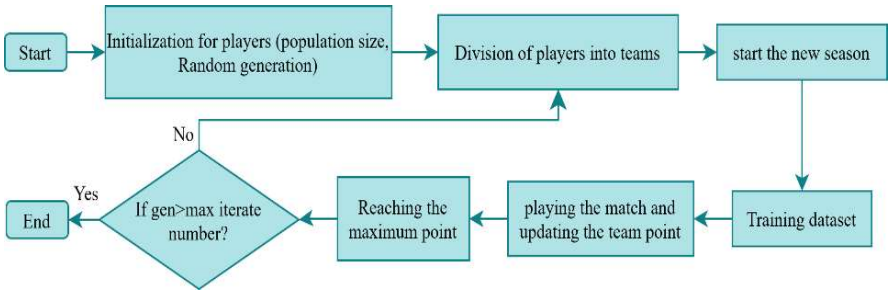


Fig. 4- General process of GBO algorithm
شکل ٤- فرآیند کلی الگوریتم GBO

جدول ۲- مقادیر هایپرپارامترهای مورد استفاده برای مدل‌های مورد مطالعه
Table 2- The values of hyperparameters used for the studied models

parameter	SVR	FOA	GA	GBO
LR	-	0.1	-	-
FR	-	0.5	-	-
maxgen	-	100	200	200
sizepop	-	30	50	50
kernel	RBF	-	-	-
C	1	-	-	-
ε	0.001	-	-	-
γ	0.01	-	-	-
Exploration factor	-	-	-	0.7
Learning coefficient	-	-	-	1.5
Inertia weight	-	-	-	0.7
Convergence tolerance	-	-	-	10^{-5}

جدول ۳- سناریوهای مورد استفاده برای مدل‌های مورد مطالعه
Table 3- Scenarios used for the studied models

Scenario	Input		Output
1	SO_4		SAR-EC
2	Cl		SAR-EC
3	SO_4	Cl	SAR-EC

معیارهای ارزیابی

در مطالعه حاضر برای پیش‌بینی پارامترهای SAR و EC، معیارهای ارزیابی ضریب همبستگی (Correlation coefficient)، جذر میانگین مربعات خطا (Root mean squared error)، جذر میانگین مربعات خطای نرمال شده (Normalized Root mean squared error)، ضریب نش‌ساتکلیف (Nash-Sutcliffe coefficient) و شاخص توافق ویلموت (Willmott's index of agreement) استفاده شد که در معادله‌های (۱) تا (۵) آورده شده است.

$$R = \frac{\sum_{i=1}^{N}(O_i-\overline{O_i})(P_i-\overline{P_i})}{\sqrt{\sum_{i=1}^{N}(O_i-\overline{O_i})^2\sum_{i=1}^{N}(P_i-\overline{P_i})^2}} \quad (۱)$$

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{N}\sum_{i=1}^{N}(P_i-O_i)^2} \quad (۲)$$

$$NRMSE = \frac{RMSE}{Max(O_i)-Min(O_i)} \quad (۳)$$

$$NS = 1-\left[\frac{\sum_{i=1}^{N}(O_i-P_i)^2}{\sum_{i=1}^{N}(O_i-\overline{O_i})^2}\right] \quad (۴)$$

$$WI = 1-\left[\frac{\sum_{i=1}^{N}(O_i-P_i)^2}{\sum_{i=1}^{N}(|P_i-\overline{O_i}|+|O_i-\overline{O_i}|)^2}\right] \quad (۵)$$

در روابط بالا N تعداد مشاهدات، P_i و O_i به‌ترتیب مقادیر پیش‌بینی شده و مشاهداتی را نشان می‌دهند. همچنین $\overline{P_i}$ و $\overline{O_i}$ به‌ترتیب میانگین مقادیر پیش‌بینی شده و مشاهداتی را نشان می‌دهند.

 DOI: 10.22055/jise.2024.47590.2131

نتایج و بحث

در تحقیق حاضر، سه سناریو با استفاده از متغیرهای پیش‌بینی کننده شامل Cl و SO_4 به‌عنوان ورودی مدل‌ها در نظر گرفته شد (جدول ۳). عملکرد مدل‌های RF، RF-GA، SVR، و SVR-FOA در این مجموعه داده تأیید شد. نتایج مدل‌های مورد استفاده در دوره آزمایشی را بر اساس معیارهای R، RMSE، NRMSE، NS و WI برای ایستگاه رودخانه قطور در جدول (۴) ارائه شده است. ارزیابی سناریوهای مختلف RF برای پارامتر SAR نشان می‌دهد که سناریوی سوم با R= ۰/۹۷۷، RMSE = ۰/۹۲۳ (meq/lit)، NRMSE = ۰/۰۲۷، NS = ۰/۹۵۵ و WI = ۰/۹۸۹ دقت بالاتری نسبت به سایر سناریوهای RF داشته است. برای مدل RF-GA، مقایسه خطاهای پیش‌بینی برای هر سه سناریو نشان می‌دهد که RF-GA-3 کم‌ترین خطا (RMSE =۰/۸۰۹ meq/lit) را نسبت به سایر سناریوهای این مدل داشته است. در میان سناریوهای مختلف SVR، سناریوی اول دارای بیش‌ترین خطا (RMSE =۲/۱۹۴ meq/lit، و NRMSE =۰/۰۶۵) و سناریوی سوم دارای کم‌ترین خطا (RMSE =۱/۰۶۸ meq/lit، و NRMSE =۰/۰۳۲) بوده است. برای مدل ترکیبی SVR-FOA، دو سناریوی آخر تقریباً ضریب همبستگی یکسانی دارند، با این حال، سناریوی دوم دارای مقدار خطای نسبتاً پایین‌تری (RMSE =۰/۹۹۸ meq/lit) و از این رو دارای دقت بالاتری است.

ارزیابی اولین سناریوی مدل RF با مدل RF-GA برای پیش‌بینی هدایت الکتریکی نشان می‌دهد که در مدل ترکیبی، معیارهای خطای RMSE و NRMSE به‌ترتیب ۳۰/۵ و ۳۰/۶ درصد کاهش یافته‌اند. در سناریوی دوم مدل‌های RF منفرد و ترکیبی، مقدار معیارهای R، NS، WI و NRMSE بدون تغییر باقی‌ماند، درحالی‌که مقدار RMSE در مدل ترکیبی اندکی کاهش یافت. همچنین برای مدل‌های SVR منفرد و هیبرید شده با مگس میوه، ارزیابی سناریوی اول دو مدل نشان می‌دهد که مقدار شاخص‌های خطای RMSE و NRMSE به‌ترتیب ۱۶/۹ و ۱۶/۲ درصد کاهش یافته است. برای سناریوی دوم، شاخص‌های R و RMSE در مدل ترکیبی به‌ترتیب یک و سه درصد بهبود یافته‌اند و سایر شاخص‌ها تقریباً بدون تغییر باقی مانده‌اند. در سناریوی سوم، مقایسه دو مدل نشان داد که در مدل ترکیبی، شاخص‌های خطای RMSE و NRMSE به‌ترتیب ۳۰/۲ و ۳۲/۳ درصد کاهش و سایر شاخص‌ها اندکی افزایش یافتند.

مقایسه نتایج مدل‌های مختلف SVR در پیش‌بینی پارامتر SAR نشان می‌دهد که SVR-FOA-2 توانسته دقت مدل SVR-1 را حدود ۷۴/۹۴ درصد افزایش دهد (با کاهش RMSE). همچنین RF-GA-3 نیز توانست دقت مدل RF-1 را حدود ۹۷/۵ درصد افزایش دهد. همچنین برای پیش‌بینی پارامتر EC، مدل SVR-FOA-3 توانست دقت مدل SVR-1 را حدود ۱۲۷/۵۵ درصد افزایش دهد و RF-GA-3 نیز توانست دقت مدل RF-1 را حدود ۱۳۹/۱ درصد افزایش دهد.

در نهایت، ارزیابی مدل‌های مورد مطالعه از پیش‌بینی پارامتر SAR نشان داد که مدل RF-GA-3 با داشتن معیارهای R =۰/۹۸۳، RMSE = ۰/۸۰۹ (meq/lit)، NRMSE ۰/۰۲۴ =، NS = ۰/۹۶۵ و WI = ۰/۹۹۱ بهترین عملکرد را نسبت به مدل‌های دیگر داشته است. برای پارامتر EC نیز نتایج نشان داد که مدل RF-GA-3 با معیارهای R =۰/۹۹۵، (meq/lit) RMSE = ۰/۱۴۶، NRMSE = ۰/۰۱۲، NS = ۰/۹۹۱ و WI = ۰/۹۹۸ بالاترین دقت را داشته است. نتایج این تحقیق با نتایج Rahnama et al. (2020) که کاربرد مدل ANFIS را با سیستم فازی خوشه‌بندی c-means برای پیش‌بینی SAR در نقاط مختلف ایران بررسی کردند و نشان دادند که مدل پیشنهادی مقدار SAR را با ضریب تعیین ۰/۴۸ پیش‌بینی می‌کند، همخوانی دارد. همچنین این نتایج در تطابق با نتایج Hassan et al. (2021) می‌باشد، که پارامترهای کیفیت آب را با استفاده از الگوریتم‌های طبقه‌بندی پیش‌بینی کردند و نشان دادند که مدل MLR با دقت ۹۹/۸۳ درصد به‌عنوان یک مدل ارزشمند در پیش‌بینی پارامتر EC شناخته می‌شود. همچنین از محدودیت‌های تحقیق حاضر می‌توان به عدم دسترسی به داده‌های سایر ایستگاه‌ها برای ارزیابی دقت مدل‌های مورد استفاده اشاره نمود. بنابراین پیشنهاد می‌شود از داده‌های ایستگاه‌های مختلف برای بررسی توانایی مدل‌ها برای مطالعه‌های آتی استفاده شود.

ارزیابی و مقایسه نتایج مدل‌های منفرد و هیبریدی نشان می‌دهد که مدل‌های هیبریدی به‌شکل مؤثری سبب کاهش خطای پیش‌بینی مدل‌های منفرد شده‌اند. به‌طوری‌که ارزیابی سناریوهای مختلف مدل RF-GBO نشان می‌دهد سناریو سوم در پیش‌بینی نسبت جذب سدیم بهترین عملکرد را در میان تمام سناریوها داشته است. ضریب همبستگی بالای ۰/۹۸ نشان‌دهنده همخوانی بسیار قوی بین مقادیر پیش‌بینی شده و مشاهده شده SARاست، که این امر به‌دقت بالای مدل اشاره دارد. همچنین، مقدار RMSE پایین (۰/۸۷۷) وNRMSE برابر با ۰/۰۲۶ حاکی از این است که این مدل از خطاهای بسیار کمتری نسبت به دیگر مدل‌ها برخوردار بوده است. مقدار ضریب کارایی نش–ساتکلیف (NS) برابر با ۰/۹۵۹ و شاخص ویلموت (WI) معادل ۰/۹۹ نیز نشان می‌دهد که مدل RF-GBO-3 در بازتولید داده‌های مشاهده‌شده، کارایی بسیار بالایی داشته است. همچنین، مدل‌های RF-GBO-2 و SVR-GBO-3 با ضریب همبستگی‌های نزدیک به هم (۰/۹۷۴ و ۰/۹۷۲)، عملکرد قابل قبولی داشتند، اما دقت آن‌ها اندکی کمتر از RF-GBO-3 بوده است.

جدول ٤- نتایج ارزیابی مدل‌های مورد استفاده در ایستگاه رودخانه قطور

Table 4- The evaluation results of the models used in Qatur river station

Parameter	SAR					EC				
Scenario	R	RMSE (meq/lit)	NRMSE	NS	WI	R	RMSE (dS/m)	NRMSE	NS	WI
RF-1	0.862	2.348	0.069	0.708	0.925	0.876	0.813	0.064	0.708	0.931
RF-2	0.969	1.078	0.032	0.938	0.984	0.989	0.219	0.017	0.979	0.995
RF-3	**0.977**	**0.923**	**0.027**	**0.955**	**0.989**	**0.992**	**0.215**	**0.017**	**0.900**	**0.995**
RF-GA-1	0.896	1.927	0.057	0.803	0.943	0.918	0.598	0.047	0.842	0.957
RF-GA-2	0.977	0.939	0.028	0.953	0.988	0.990	0.213	0.017	0.980	0.995
RF-GA-3	**0.983**	**0.809**	**0.024**	**0.965**	**0.991**	**0.995**	**0.146**	**0.012**	**0.991**	**0.998**
RF-GBO-1	0.887	2.011	0.059	0.786	0.938	0.902	0.661	0.052	0.807	0.948
RF-GBO-2	0.974	0.981	0.029	0.949	0.987	0.989	0.225	0.018	0.978	0.994
RF-GBO-3	**0.980**	**0.877**	**0.026**	**0.959**	**0.990**	**0.995**	**0.154**	**0.012**	**0.990**	**0.997**
SVR-1	0.869	2.194	0.065	0.745	0.915	0.869	0.764	0.060	0.743	0.914
SVR-2	0.966	1.128	0.033	0.933	0.983	0.987	0.241	0.019	0.974	0.993
SVR-3	**0.970**	**1.068**	**0.032**	**0.940**	**0.984**	**0.991**	**0.229**	**0.018**	**0.977**	**0.995**
SVR-FOA-1	0.913	1.840	0.054	0.821	0.942	0.908	0.645	0.051	0.817	0.942
SVR-FOA-2	**0.974**	**0.998**	**0.028**	**0.947**	**0.987**	0.996	0.234	0.019	0.976	0.993
SVR-FOA-3	0.973	1.050	0.031	0.942	0.984	**0.994**	**0.169**	**0.013**	**0.987**	**0.999**
SVR-GBO-1	0.874	2.166	0.064	0.752	0.916	0.988	0.235	0.019	0.976	0.994
SVR-GBO-2	0.968	1.097	0.032	0.936	0.983	0.993	0.182	0.014	0.985	0.996
SVR-GBO-3	**0.972**	**1.042**	**0.031**	**0.943**	**0.984**	**0.994**	**0.176**	**0.014**	**0.986**	**0.997**

در پیش‌بینی هدایت الکتریکی نیز، مدل RF-GBO-3 مجدداً عملکرد بهتری را نسبت به سایر سناریوهای الگوریتم بهینه‌سازی GBO داشته است. این مدل با داشتن ضریب همبستگی ۰/۹۹۵، RMSE برابر با ۰/۱۵۴ و NRMSE معادل ۰/۰۱۲، دقت مناسبی را در پیش‌بینیEC ارائه می‌دهد. همچنین، مقادیر NS و WI به‌ترتیب برابر با ۰/۹۹ و ۰/۹۹۷ نشان می‌دهد که مدل به‌خوبی توانسته است داده‌های مشاهده‌شده را پیش‌بینی کرده و بهینه‌ترین پیش‌بینی‌ها را فراهم آورد. مدل-SVR GBO-3نیز با ضریب همبستگی ۰/۹۹۴ و RMSE برابر ۰/۱۷۶ عملکردی نزدیک به RF-GBO-3 داشته است.

مقایسه عملکرد مدل‌های هیبریدی و منفرد در تحقیقات پیشین نیز نشان‌دهنده برتری قابل ملاحظه مدل‌های هیبریدی می‌باشد. برای مثال Wu و Wang (2022) در تحقیقی از دو مدل جدید یادگیری ماشین شامل جنگل و تصادفی و جنگل تصادفی ترکیب شده با تجزیه حالت تجربی مجموعه کامل با نویز تطبیقی (CEEMDAN) برای پیش‌بینی کیفیت آب در حوضه رودخانه توالاتین استفاده کردند. مقایسه نتایج این مطالعه نشان داد که مدل CEEMDAN-RF با داشتن کم‌ترین جذر میانگین درصد خطا (۳/۹ درصد) بهترین عملکرد را داشته و سبب بهبود پایداری مدل جنگل تصادفی منفرد گردید. Liu et al. (2013) در مطالعه‌ای با استفاده از یک رویکرد ترکیبی، شامل رگرسیون بردار پشتیبان ترکیب شده با الگوریتم ژنتیک با ارزش واقعی (real-value genetic algorithm) به پیش‌بینی کیفیت آب کارخانه‌های آبزی YiXing ، در چین پرداختند. نتایج این بررسی نشان داد که RGA-SVR از مدل‌های SVR و انتشار پس‌پاپ (back-propagation)بر اساس ریشه میانگین مربعات خطا بهتر عمل کرد. Su et al. (2022) در تحقیقی با استفاده از مدل رگرسیون بردار پشتیبان هیبرید شده با الگوریتم جستجوی گنجشک بهبودیافته (improved sparrow search algorithm) به پیش‌بینی کیفیت آب پرداختند. نتایج این مطالعه نشان داد که مدل هیبریدی با داشتن ضریب تعیین ۰/۹۸ دقت بالاتری را نسبت به مدل SVR (با داشتن ضریب تعیین ۰/۹۳) داشته است.

با توجه به این که الگوریتم‌های بهینه‌سازی مانند GBO در تحقیقات معدودی مورد استفاده قرار گرفته‌اند. لذا، مطالعه‌های آینده می‌توانند از این الگوریتم در ترکیب با سایر مدل‌های یادگیری ماشین برای مسائل مشابه استفاده کنند. این پیشنهاد می‌تواند به افزایش درک از توانایی این الگوریتم‌ها در مسائل مختلف کمک کند.

شکل (۵) نمودارهای پراکنش برای بهترین سناریو در هر مدل برای پیش بینی SAR در ایستگاه رودخانه قطور را نشان می‌دهد. خط قرمز ۱:۱ بوده و هر چه نقاط به این خط نزدیک‌تر باشند دقت آن مدل بیش‌تر خواهد شد. مقایسه ضریب تعیین در هر چهار مدل نشان می‌دهد که مدل RF-GA-3 با ضریب تعیین ۰/۹۶۵۵ بهتر از سایر مدل‌ها عمل کرده است. پس از مدل -RF GA، مدل RF-GBO-3 نیز دارای مقدار همبستگی بالاتری نسبت به مدل‌های دیگر با ضریب تعیین ۰/۹۵۹۵ می‌باشد.

 DOI: 10.22055/jise.2024.47590.2131

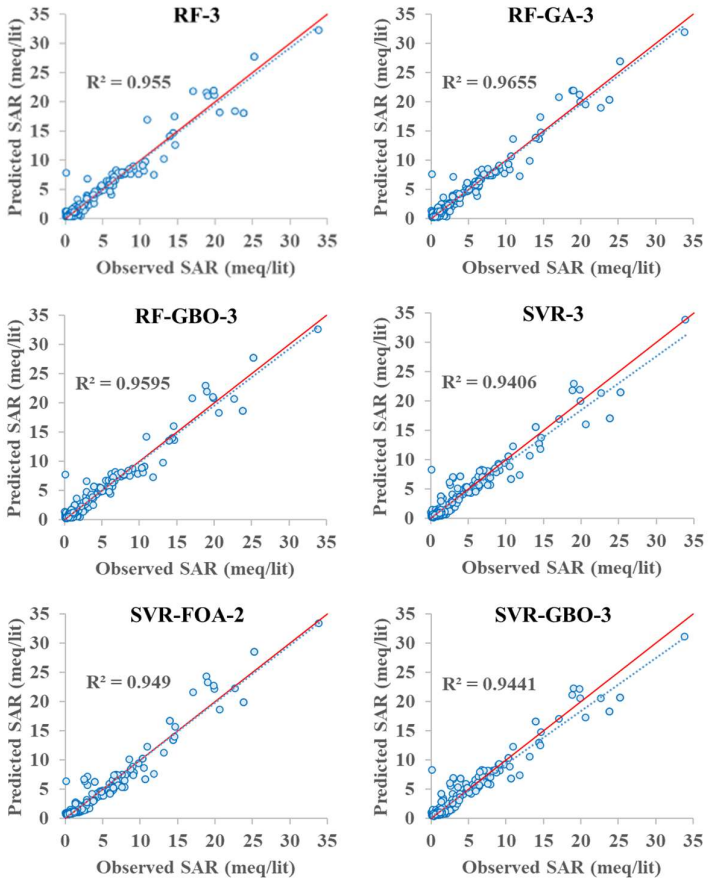


Fig. 5- Scatter plots of the best scenario for predicting the SAR parameter at Qatur River station

شکل ۵- نمودارهای پراکنش بهترین سناریو برای پیش‌بینی پارامتر SAR در ایستگاه رودخانه قطور

شکل (۶) نمودارهای پراکنش را برای بهترین سناریو در هر مدل برای پیش‌بینی EC در ایستگاه رودخانه قطور نشان می‌دهد. خط آبی ۴۵ درجه بوده و هر چه نقاط به این خط نزدیک‌تر باشند، مقدار پیش‌بینی شده به مقدار مشاهداتی نزدیک‌تر خواهد بود. مقایسه ضریب تعیین در هر چهار مدل نشان می‌دهد که مدل RF-GA-3 با ضریب تعیین ۰/۹۹۰۸ بهترین عملکرد را داشته است. پس از مدل RF-GA، مدل SVR-GBO-3 نیز با ضریب تعیین ۰/۹۹۰۳ از دقت بالاتری نسبت به مدل‌های دیگر برخوردار است.

شکل (۷) نمودارهای جعبه‌ای را برای تمام سناریوهای هر مدل در رودخانه قطور نشان می‌دهد. در هر نمودار، جعبه بنفش مقدار مشاهداتی و سایر جعبه‌ها مقدار پیش‌بینی شده می‌باشند. مقایسه جعبه‌های مدل‌های مورد استفاده برای پیش‌بینی SAR با جعبه مشاهداتی نشان می‌دهد که RF-GA-3 و RF-GBO-3 به‌ترتیب نزدیک‌ترین میانگین و میانه را به مقدار مشاهده شده داشته‌اند. همچنین در مدل‌های RF-3 و SVR-FOA-3 اگرچه میانگین و میانه به مقدار مشاهده شده نزدیک بود، اما مقایسه دامنه آن‌ها نشان می‌دهد که هر دو قسمت پایین و بالایی دارای کم‌برآوردی بوده است. برای پارامتر EC، مقایسه جعبه‌ها نشان می‌دهد که سناریوی سوم مدل‌های RF-GA و سپس RF-GBO نزدیک‌ترین میانگین و میانه را نسبت به مقدار مشاهده شده داشته‌اند. در نهایت، مدل SVR-2 کم‌ترین مقدار تخمینی را در بین تمام سناریوها دارا بوده است.

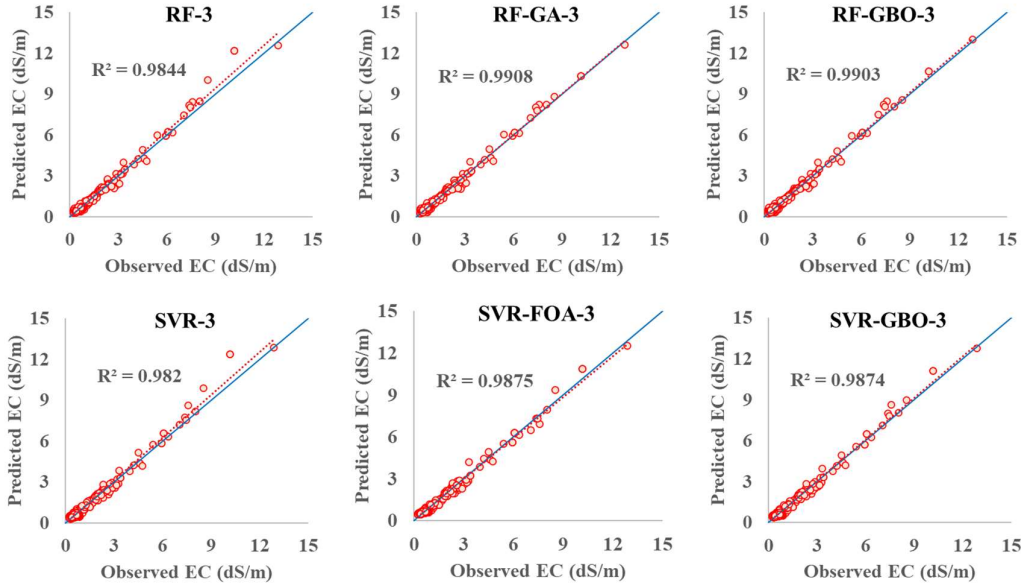


Fig. 6- Scatter plots of the best scenario for predicting the EC parameter at Qatur River station.

شکل ٦- نمودارهای پراکنش بهترین سناریو برای پیش‌بینی پارامتر EC در ایستگاه رودخانه قطور

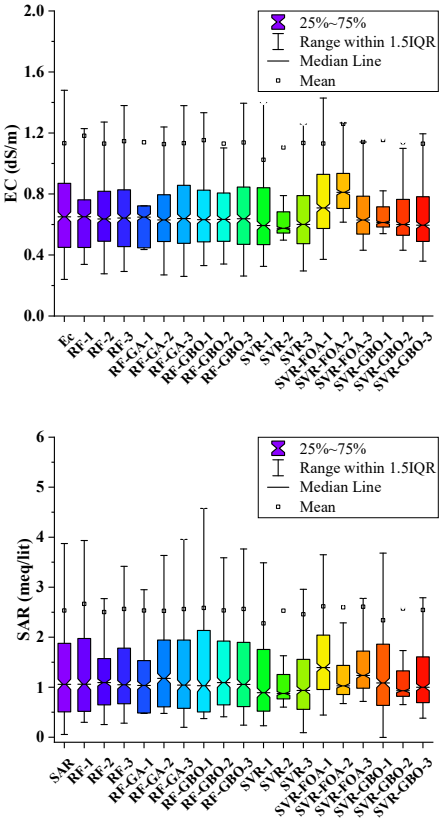


Fig. 7- Boxplots for all scenarios of each model in Qatur River.

شکل ۷- نمودارهای جعبه‌ای برای تمام سناریوهای هر مدل در رودخانه قطور

نتیجه‌گیری

نمودار Wilcox ابزار ارزشمندی است که در ارزیابی مناسب بودن آب برای اهداف آبیاری مورد استفاده قرار می گیرد. نمودار Wilcox آب را با استفاده از پارامترهای SAR و EC به کلاس‌های مختلف تقسیم می‌کند. اما اندازه‌گیری این پارامترها علاوه بر گران بودن، با چالش‌های مختلفی روبه‌رو هستند. بنابراین، این تحقیق به‌منظور پیش‌بینی پارامترهای SAR و EC با استفاده از پارامترهای سهل الوصول شامل سولفات و کلرید در ایستگاه رودخانه قطور انجام شده است. مدل‌های مورد استفاده شامل RF، RF-GA، RF-GBO, SVR, SVR-FOA و SVR-GBO هستند که با استفاده از معیارهای ارزیابی مختلف مورد ارزیابی قرار گرفتند. ارزیابی نتایج این بررسی نشان داد که مدل RF-GA با داشتن ضریب همبستگی ۰/۹۸۳ و ۰/۹۹۵ به‌ترتیب برای پارامترهای SAR و EC بیش‌ترین دقت را در ایستگاه رودخانه قطور داشته است همچنین مدل RF-GBO با داشتن ضریب همبستگی ۰/۹۸ و ۰/۹۹۵ و مدل SVR-FOA نیز با داشتن ضریب همبستگی ۰/۹۷۴ و ۰/۹۹۴ به‌ترتیب برای پارامترهای SAR و EC دقت مناسبی را از خود نشان دادند. ارزیابی نتایج مدل‌ها نشان داد که مدل‌های هیبریدی RF-GA، RF-GBOو SVR-FOA می‌توانند پارامترهای SAR و EC را به‌عنوان یک ابزار قابل اعتماد پیش‌بینی کنند. مدل‌های ترکیبی مورد استفاده پتانسیل قابل‌توجهی برای کمک به کشاورزان و مدیران سیستم‌های آبیاری در تصمیم‌گیری کارآمدتر دارند زیرا پیش‌بینی دقیق پارامترهای SAR و EC منجر به درک صحیح کیفیت آب مصرفی و عملکرد صحیح سیستم‌ها می‌شود.

تشکر و قدردانی

به این وسیله نویسندگان مقاله مراتب تقدیر و تشکر خود را از شرکت آب منطقه‌ای استان آذربایجان غربی در دریافت آمار و نیز از معاونت پژوهش و فناوری دانشگاه ارومیه به خاطر حمایت مالی این مطالعه ابراز می‌نمایند.

تضاد منافع نویسندگان

نویسندگان این مقاله اعلام می‌دارند که هیچ گونه تضاد منافعی در خصوص نگارش و انتشار مطالب و نتایج این پژوهش ندارند.

منابع مالی

حمایت های مالی این تحقیق از محل اعتبار پژوهشی با شماره پژوهانه ۱۹۶۲۱صورت گرفته است. بدینوسیله از حمایت معاونت محترم پژوهشی دانشگاه ارومیه تقدیر می‌شود.

دسترسی به داده‌ها

مجموعه داده‌های تولید شده و یا تحلیل شده در طول مطالعه حاضر، در صورت درخواست معقول، از نویسنده مسئول در دسترس هستند.

مشارکت نویسندگان

نویسنده اول: میلاد شرفی، جمع آوری داده‌ها و نوشتن درفت اولیه مقاله.

نویسنده دوم: جواد بهمنش، راهنمایی نوشتن مقاله، خواندن و اصلاح درفت اولیه.

نویسنده سوم: وحید رضاوردی‌نژاد، راهنمایی نوشتن مقاله، خواندن و اصلاح درفت اولیه.

نویسنده چهارم: سعید صمدیان فرد، راهنمایی نوشتن مقاله، خواندن و اصلاح درفت اولیه.

References

1- Aghapour, A.A. and Mahvi, A.H., 2005. Investigating the chemical quality of Qatur River water and determining the cause of its changes along the way. In *the 8th National Environmental Health Conference*, *University of Tehran, Tehran, Iran*.

2- Ahmadianfar, I ,.Jamei, M. and Chu, X., 2020. A novel hybrid wavelet-locally weighted linear regression (W-LWLR) model for electrical conductivity (EC) prediction in surface water. *Journal of Contaminant Hydrology*, 232(1), pp.103-121. https://doi.org/10.1016/j.jconhyd.2020.103641.

3- Albadr, M.A., Tiun, S., Ayob, M. and Al-Dhief, F., 2020. Genetic algorithm based on natural selection theory for optimization problems. *Symmetry*, 12(11), pp.1758-1771. https://doi.org/10.3390/sym12111758.

4- Alkharabsheh, H.M., Seleiman, M.F., Hewedy, O.A., Battaglia, M.L., Jalal, R.S., Alhammad, B.A., Schillaci, C., Ali, N. and Al-Doss, A., 2021. Field crop responses and management strategies to mitigate soil salinity in modern agriculture: A review. *Agronomy*, 11(11), pp.2299-2317. https://doi.org/10.3390/agronomy11112299.

5- Altman, N. and Krzywinski, M., 2017. Ensemble methods: bagging and random forests. *Nature Methods*, 14(10), pp.933-935 .

6- Amezketa, E. and de Lersundi, J.D.V., 2008. Soil classification and salinity mapping for determining restoration potential of cropped riparian areas. *Land Degradation & Development*, 19(2), pp.153-164. https://doi.org/10.1002/ldr.820.

7- Biau, G. and Scornet, E., 2016. A random forest guided tour. *Test*, 25(2), pp.197-227. https://doi.org/10.1007/s11749-016-0481-7.

8- Breiman, L., 2001. Random forests. *Machine learning*, 45(4), pp.5-32. https://doi.org/10.1023/A:1010933404324.

9- Cavins, T.J., Gibson, J.L., Whipker, B.E. and Fonteno, W.C., 2000. pH and EC meters-tool for substrate analysis. *North Carolina State University*, 1(1), pp.1-14.

10- Costa-Carrapiço, I., Raslan, R. and González, J.N., 2020. A systematic review of genetic algorithm-based multi-objective optimisation for building retrofitting strategies towards energy efficiency. *Energy and Buildings*, 210(12), pp.109-130. https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2019.109690.

11- El Bilali, A. and Taleb, A., 2020. Prediction of irrigation water quality parameters using machine learning models in a semi-arid environment. *Journal of the Saudi Society of Agricultural Sciences*, 19(7), pp.439-451. https://doi.org/10.1016/j.jssas.2020.08.001.

12- Giri, S., 2021. Water quality prospective in Twenty First Century: Status of water quality in major river basins, contemporary strategies and impediments: A review. *Environmental Pollution*, 271(4), pp.116-132. https://doi.org/10.1016/j.envpol.2020.116332.

13- Haghiabi, A.H., Nasrolahi, A.H. and Parsaie, A., 2018. Water quality prediction using machine learning methods. *Water Quality Research Journal*, 53(1), pp.3-13. https://doi.org/10.2166/wqrj.2018.025.

14- Hamdi, T., Ali, J.B., Di Costanzo, V., Fnaiech, F., Moreau, E. and Ginoux, J.-M., 2018. Accurate prediction of continuous blood glucose based on support vector regression and differential evolution algorithm. *Biocybernetics and Biomedical Engineering* ,38(2) ,pp.362-372. https://doi.org/10.1016/j.bbe.2018.02.005.

15- Hassan, M., Hassan, M., Akter, L., Rahman, M., Zaman, S., Khan, H., Jahan, N., Smrity, R.N., Farhana, J. and Raihan, M., 2021. Efficient prediction of water quality index (WQI) using machine learning algorithms. *Human-Centric Intelligent Systems*, 1(3), pp.86-97. https://doi.org/10.2991/hcis.k.211203.001.

16- Hassanat, A., Almohammadi, K., Alkafaween, E.a., Abunawas, E., Hammouri, A. and Prasath, V.S., 2019. Choosing mutation and crossover ratios for genetic algorithms—a review with a new dynamic approach. *Information*, 10(12), pp.390-402. https://doi.org/10.3390/info10120390.

17- Hüe, X., 1997. Genetic algorithms for optimization. Rapport technique, Citeseer.

18- Jamei, M., Ali, M., Karimi, B., Karbasi, M., Farooque, A.A. and Yaseen, Z.M., 2023. Surface water electrical conductivity and bicarbonate ion determination using a smart hybridization of optimal Boruta package with Elman recurrent neural network. *Process Safety and Environmental Protection*, 174(5), pp.115-134. https://doi.org/10.1016/j.psep.2023.03.062.

19- Janitza, S. and Hornung, R., 2018. On the overestimation of random forest's out-of-bag error. *PloS one*, 13(8), pp.201-217. https://doi.org/10.1371/journal.pone.0201904.s001.

20- Karal, O., 2017. Maximum likelihood optimal and robust support vector regression with lncosh loss function. *Neural networks*, 94(3), pp.1-12. https://doi.org/10.1016/j.neunet.2017.06.008.

21- Kisi, O., Azad, A., Kashi, H., Saeedian, A., Hashemi, S.A.A. and Ghorbani, S., 2019. Modeling groundwater quality parameters using hybrid neuro-fuzzy methods. *Water Resources Management*, 33(1), pp.847-861. https://doi.org/10.1007/s11269-018-2147-6.

22- Koohestani, B., 2020. A crossover operator for improving the efficiency of permutation-based genetic algorithms. *Expert Systems with Applications*, 151(4), pp.113-130. https://doi.org/10.1016/j.eswa.2020.113381.

23- Liu, S., Tai, H., Ding, Q., Li, D., Xu, L. and Wei, Y., 2013. A hybrid approach of support vector regression with genetic algorithm optimization for aquaculture water quality prediction. *Mathematical and Computer Modelling*, 58(3-4), pp.458-465. https://doi.org/10.1016/j.mcm.2011.11.021.

24- Machado, R.M.A. and Serralheiro, R.P., 2017. Soil salinity: effect on vegetable crop growth. Management practices to prevent and mitigate soil salinization. *Horticulturae*, 3(2), pp.30-42. https://doi.org/10.3390/horticulturae3020030.

25- Manikandan, M. and Pant, R.S., 2021. Research and advancements in hybrid airships—A review. *Progress in Aerospace Sciences*, 127(17), pp.100-118. https://doi.org/10.1016/j.paerosci.2021.100741.

26- McKinney, D.C. and Lin, M.D., 1994. Genetic algorithm solution of groundwater management models. *Water Resources Research*, 30(6), pp.1897-1906. https://doi.org/10.1029/94WR00554.

27- Mokhtar, A., Elbeltagi, A., Gyasi-Agyei, Y., Al-Ansari, N. and Abdel-Fattah, M.K., 2022. Prediction of irrigation water quality indices based on machine learning and regression models. *Applied Water Science*, 12(4), pp.76-91. https://doi.org/10.1007/s13201-022-01590-x.

28- Mousazadeh, M ,.Paital, B., Naghdali, Z., Mortezania, Z., Hashemi, M., Karamati Niaragh, E., Aghababaei, M., Ghorbankhani, M., Lichtfouse, E. and Sillanpää, M., 2021. Positive environmental effects of the coronavirus 2020 episode: a review. *Environment, Development and Sustainability*, 23(2), pp.12738-12760. https://doi.org/10.1007/s10668-021-01240-3.

29- Nasehi, F., Hassani, A., Monavvari, M., Karbassi, A. and Khorasani, N., 2013. Evaluating the metallic pollution of riverine water and sediments: a case study of Aras River .*Environmental Monitoring and Assessment*, 185(4), pp.197-203. https://doi.org/10.1007/s10661-012-2543-y.

30- Nouraki, A., Alavi, M., Golabi, M. and Albaji, M., 2021. Prediction of water quality parameters using machine learning models: A case study of the Karun River, Iran. *Environmental Science and Pollution Research*, 28(40), pp.57060-57072. https://doi.org/10.1007/s11356-021-14560-8.

31- Osaba, E., Diaz, F. and Onieva, E., 2014. Golden ball: a novel meta-heuristic to solve combinatorial optimization problems based on soccer concepts. *Applied Intelligence*, 41(1), pp.145-166. https://doi.org/10.1007/s10489-013-0512-y.

32- Palmer, M. and Ruhi, A., 2019. Linkages between flow regime, biota, and ecosystem processes: Implications for river restoration. *Science*, 365(64), pp.2087-2099. https://doi.org/10.1126/science.aaw2087.

33- Pan, W.-T., 2012. A new fruit fly optimization algorithm: taking the financial distress model as an example. *Knowledge-Based Systems*, 26(1), pp.69-74. https://doi.org/10.1016/j.knosys.2011.07.001.

34- Pincay, J.M.C. and Cantos, M.F.P., 2024. Analysis of Soil Salinization as an Environmental Issue in Latin America. *Journal of Ecological Engineering*, 25(1), pp.146-152. http://dx.doi.org/10.12911/22998993/174378.

35- Qadir, M., Wichelns, D., Raschid-Sally, L., Minhas, P.S., Drechsel, P., Bahri, A., McCornick, P.G., Abaidoo, R.C., Attia, F. and El-Guindy, S., 2007. Agricultural use of marginal-quality *Water: Opportunities and Challenges. IWMI*, 12(1), pp.1-34 .

36- Qishlaqi, A., Kordian, S. and Parsaie, A., 2017. Hydrochemical evaluation of river water quality—a case study. *Applied Water Science*, 7, pp.2337-2342. https://doi.org/10.1007/s13201-016-0409-0.

37- Rad, M.A.V. and Kasaeian, A., 2024. Evaluation of stand-alone hybrid renewable energy system with excess electricity minimizer predictive dispatch strategy. *Energy Conversion and Management*, 299(18), pp.117-131. https://doi.org/10.1016/j.enconman.2023.117898.

38- Rahimi, L., Amanipoor, H. and Battaleb-Looie, S., 2021. Effect of salinity of irrigation water on soil properties (abadan plain, SW Iran). *Geocarto International*, 36(16), pp.1884-1903. https://doi.org/10.1080/10106049.2019.1678678.

39- Rahnama, E., Bazrafshan, O. and Asadollahfardi, G., 2020. Application of data-driven methods to predict the sodium adsorption rate (SAR) in different climates in Iran. *Arabian Journal of Geosciences*, 13(1), pp.1-19. https://doi.org/10.1007/s12517-020-06146-4.

40- Schmitt, L.M., 2001. Theory of genetic algorithms. *Theoretical Computer Science*, 259(1), pp.1-61. https://doi.org/10.1016/S0304-3975(00)00406-0.

41- Sepahvand, A., Singh, B., Sihag, P., Nazari Samani, A., Ahmadi, H. and Fiz Nia, S., 2021. Assessment of the various soft computing techniques to predict sodium absorption ratio (SAR). *ISH Journal of Hydraulic Engineering*, 27(1), pp.124-13. https://doi.org/10.1080/09715010.2019.1595185.

42- Shao, Z., Pi, D. and Shao, W., 2020. Hybrid enhanced discrete fruit fly optimization algorithm for scheduling blocking flow-shop in distributed environment. *Expert Systems with Applications*, 145(17), pp.113-147. https://doi.org/10.1016/j.eswa.2019.113147.

43- Sposito, G. and Mattigod, S.V., 1977. On the chemical foundation of the sodium adsorption ratio. *Soil Science Society of America Journal*, 41(2), pp.323-329. https://doi.org/10.2136/sssaj1977.03615995004100020030x.

44- Su, X., He, X., Zhang, G., Chen, Y. and Li, K., 2022. Research on SVR water quality prediction model based on improved sparrow search algorithm. *Computational Intelligence and Neuroscience*, 2022(1), pp.7327072. https://doi.org/10.1155/2022/7327072.

45- Vapnik, V. and Chervonenkis, A.Y., 1974. The method of ordered risk minimization, I. *Avtomatika i Telemekhanika*, 8(1), pp.21-30.

46- Wang, H. and He, G., 2022. Rivers: Linking nature, life, and civilization. *River*, 1(1), pp.25-36. https://doi.org/10.1002/rvr2.7.

47- Wang, R.-Y., Hu, P., Hu, C.-C. and Pan, J.-S., 2022. A novel Fruit Fly Optimization Algorithm with quasi-affine transformation evolutionary for numerical optimization and application. *International Journal of Distributed Sensor Networks*, 18(2), pp.155-168. https://doi.org/10.1177/15501477211073037.

48- Waqas, M., Humphries, U.W., Wangwongchai, A., Dechpichai, P., Zarin, R. and Hlaing, P.T., 2024. Incorporating novel input variable selection method for in the different water basins of Thailand. *Alexandria Engineering Journal*, 86(1), pp.557-576. https://doi.org/10.1016/j.aej.2023.11.046.

49- Worawattawechai, T., Intiyot, B., Jeenanunta, C. and Ferrell Jr, W.G., 2022. A learning enhanced golden ball algorithm for the vehicle routing problem with backhauls and time windows. *Computers & Industrial Engineering*, 168, pp.108044. https://doi.org/10.1016/j.cie.2022.108044.

50- Woźniak, M., Szczotka, J., Sikora, A. and Zielonka, A., 2024. Fuzzy logic type-2 intelligent moisture control system. *Expert Systems with Applications*, 238(18), pp.121-137. https://doi.org/10.1016/j.eswa.2023.121581.

51- Wu, J. and Wang, Z., 2022. A hybrid model for water quality prediction based on an artificial neural network, wavelet transform, and long short-term memory. *Water*, 14(4), pp.610. https://doi.org/10.3390/w14040610.

Shahid Chamran University of Ahvaz

Irrigation Sciences and Engineering (JISE)
Vol. 48, No. 3, Fall 2025, p. 21-39

Journal homepage: https://jise.scu.ac.ir

Research Paper

EXTENDED ABSTRACT

The effect of a submerged jet on the characteristics of an asymmetric hydraulic jump in a corrugated bed

F. Davari-Dehkordi[1], J. Ahadiyan[2*], S.M.Sajjadi[3], A. Scorzini[4] and M. Di Bacco[5]

1- Ph.D. in Hydraulic Structures of Water Sciences, Water and Environmental Engineering, Shahid Chamran University of Ahvaz, Ahvaz, Iran.
2- Corresponding Author, Professor, Hydraulic Structures Department, Faculty of Water and Environmental Engineering, Shahid Chamran University of Ahvaz, Ahvaz, Iran (j.ahadiyan@scu.ac.ir)*
3- Associated professor of the Department of Hydraulic Structures, Faculty of Water and Environmental Engineering, Shahid Chamran University of Ahvaz, Ahvaz, Iran.
4- Department of Civil, Environmental and Architectural Engineering, University of L'Aquila, L'Aquila, Italy.
5- Department of Civil, Environmental and Architectural Engineering, University of L'Aquila, L'Aquila, Italy.

ARTICLE INFO

Article history:
Received: 19 July 2023
Revised: 11 December 2023
Accepted: 13 December 2023
Available online: 05 November 2025

Keywords:
Hydraulic jump, Asymmetric jump, Energy dissipation, Hydraulic jump length and Corrugated bed.

TO CITE THIS ARTICLE:

Davari Dehkordi, F., Ahadiyan, J., Sajadi, S. M., Scorzini, A. R., Di Bacco, M. 2025. 'The effect of a submerged jet on the characteristics of an asymmetric hydraulic jump in a corrugated bed', *Irrigation Sciences and Engineering*, 48(3), pp. 21-39. doi: 10.22055/jise.2023.44341.2085

Abstract

Stilling basins are energy-dissipating structures that consistently convert flow from a supercritical to a subcritical state. Negative pressure fluctuations cause significant damage in the basin area. Submerged jet injection nearly eliminates the negative pressure effects in supercritical flow, reducing turbulence and flow velocity downstream. This research aimed to investigate the combined effect of a multiple submerged jet system and continuous corrugated roughness on controlling hydraulic jumps in sudden expansion sections. For this purpose, experiments were conducted in a laboratory flume using three combinations of continuous corrugated beds and submerged jet injection systems. The results showed that the hydraulic jump, with three submerged jet discharge rates and within the inlet Froude number range of 6 to 11, reduced fluctuation intensity and water surface variation in the post-expansion section. It also increased energy dissipation. The energy dissipation rate for horizontal submerged jets was, on average, approximately 20 to 25 percent higher than that of classical and discrete jumps. Correspondingly, at a Froude number of 6, the jump length, roller length, and conjugate depths decreased by 50%, 44%, and 63%, respectively, indicating the positive impact of this system on flow stability.

Introduction

A hydraulic jump is a phenomenon in which the flow transitions from a supercritical to a subcritical state. This phenomenon significantly increases the flow depth over a relatively short distance, thereby reducing the flow velocity and energy (Ahadiyan et al., 2024). Dissipating the flow energy before it moves downstream is an effective solution to prevent potential damage to the canal bed and downstream structures (Ead and Rajaratnam, 2002; Hajialigol et al., 2021; Hajialigol et al., 2024). Khedri-Mirghaed et al. (2018) proposed the use of suspended spherical blocks anchored to the floor of a stilling basin. These blocks had a relative density lower than water and were connected to the basin floor using resistant plastic tethers.

Their results showed that the sequent depth, hydraulic jump length, and energy dissipation all increased when these blocks were used compared to a smooth bed. It was also found that changing the arrangement of the barriers did not significantly change the rate of energy dissipation. Research on hydraulic jump formation has been conducted over rough beds with various shapes, including triangular, cubic, rectangular, trapezoidal, and sinusoidal configurations. The results demonstrated that rough beds significantly reduce the hydraulic jump length (Hager et al., 1990). Furthermore, studies on the properties of hydraulic jumps over sinusoidal beds revealed a linear relationship between the conjugate depth ratio and the Froude number. Haghdoost et al. (2022), investigated the effects of a Lateral Jet Flow (LJF) on the stabilization and key characteristics of the spatial hydraulic jump in a stilling basin with suddenly expanding channels. According to their results, the distance of the LJF from the narrow channel and the number of LJFs improve the stabilization of the hydraulic jump and enhance the flow pattern in the downstream channel. Mahjoubi et al. (2024) investigated a jet system positioned to intersect the flow from an ogee spillway after a sudden expansion. Their results showed a decrease in the momentum parameter from the expansion point downstream. Sharoonizadeh et al. (2022), in a subsequent study, experimentally investigated the interaction effects of multiple submerged opposing jets on the hydrodynamic characteristics of the flow in a downstream channel. The results concluded that the examined system performs effectively in preventing flow instability phenomena associated with suddenly expanding channels.

Another energy dissipation method involves the use of submerged jets. These jets are injected horizontally or at an angle, either from the front or the side of the flow, in conjunction with the hydraulic jump. This technique enhances energy dissipation downstream and reduces the conjugate depth ratio, jump length, and bottom shear forces (Tahmasbipour, et al., 2024).

The purpose of this study is to investigate the effects of a counterflow jet and bed roughness on the energy dissipation performance of the structure. Undoubtedly, increasing the energy dissipation capacity of the structure influences the downstream hydraulic jump characteristics and the required length of the stilling basin.

Methodology

The experiments were conducted in a flume located in the hydraulic models laboratory of the Faculty of Water and Environmental Engineering at Shahid Chamran University, Ahvaz. The flume system consists of a storage tank measuring 1 m in width and 2.4 m in length, and an ogee spillway with a height of 0.6 m and a width of 0.67 m. The main channel is horizontal with a rectangular cross-section, 12 m long, 1 m wide, and 0.87 m deep.

The tests were performed for corrugated beds, with three distinct configurations as detailed in Table 1. These were compared to a baseline case featuring an asymmetric discrete jump without continuous bed roughness.

Subsequently, a submerged jet was introduced into the flow. The jet injection system was connected to the flume's storage tank. The jet flow rate was measured using an ultrasonic flow meter, with values ranging from 4.5 to 8 liters per second. In the longitudinal section of the continuous corrugated bed, the flow absorption, roller length, and hydraulic jump length were measured.

Due to the high turbulence in the overflow section, the initial depth was determined using Belanger's equation (Equation 1) and the downstream depth. The energy dissipation percentage was calculated using Equation (2) (Chanson, 2015).

$$y_1 = \frac{y_2}{2}\left(\sqrt{1 + 8{Fr_2}^2} - 1\right) \quad (1)$$

$$\eta = \frac{\Delta E}{E_1} \times 100 \quad (2)$$

where E_1 is the flow energy at the upstream, y_1 is the first depth of hydraulic jump measured using Equation (1), and y_2 is the second depth of jump measured by a point gauge, and Fr_2 is the Froude No. of the second depth.

Table 1- Characteristics and test variables of the research

Name of corrugated bed	Corrugated bed dimensions (cm)	Abb.. name of jet	Jet discharge (L/s)	Main discharge (L/s)	Froud Number
				26	10.8
C1	S = 3; t = 1	J1	4.5	37	9.5
C2	S = 5; t = 3	J2	6	45	8.7
C3	S = 10; t = 6	J3	8	56	7.4
				67	6.2

Results and Discussion

In this research, experiments were conducted using five primary flow rates: 26, 37, 45, 56, and 67 liters per second. The initial energy of the flow was determined by measuring the overflow depth at the spillway. Additionally, the sequent depth (or secondary depth) of the hydraulic jump was obtained by measuring the water depth downstream of the spillway.

The initial depth of the hydraulic jump at the toe of the spillway was then calculated using Equation (1). Energy dissipation calculations were performed using Equation (2) to determine the percentage of energy loss.

A summary of the test combinations and the resulting energy dissipation percentages for the three types of corrugated beds is presented in Table 2. By determining the location of the hydraulic jump, its influence on the energy dissipation rate was assessed, allowing for the identification of the optimal jump configuration associated with maximum energy loss.

Table 2- The results of the percentage of energy consumption in different situations

Model	Froud Number				
	6.2	6.2	6.2	6.2	6.2
S1: Sample	19.246	44.446	61.081	53.599	29.032
C1	26.305	8.031	19.185	4.522	11.642
C2	11.48	13.277	16.495	4.073	21.584
C3	34.457	38.822	40.490	17.468	1.743
C1-J1	9.710	2.940	4.278	14.967	77.195
C1-J2	2.365	13.716	20.742	28.145	35.576
C1-J3	6.974	20.799	30.341	42.103	55.367
C2-J1	9.500	23.106	32.040	42.314	53.002
C2-J2	10.885	24.928	34.295	45.522	57.969
C2-J3	7.090	20.843	30.115	41.569	53.939
C3-J1	70.371	17.126	0.849	19.903	51.369
C3-J2	33.429	3.492	14.425	35.390	58.852
C3-J3	5.008	4.291	21.239	45.608	60.026

Conclusions

The experimental results demonstrated that the energy dissipation in basins with larger corrugated bed dimensions is approximately 15% higher than in those with smaller dimensions. Furthermore, with the addition of a submerged jet, this value reaches up to 30% in the case of discrete jumps.

The counterflow jet system positively influenced the asymmetric jump, enhancing its stability and improving flow uniformity. At a Froude number (Fr) of 6, the energy loss, hydraulic jump length, and roller length were measured at 50%, 44%, and 63%, respectively. Moreover, as the flow rate increases, the relative reduction in hydraulic jump length diminishes.

In summary, the findings of this study indicate that the combined use of bed roughness and submerged jets as an energy dissipation system significantly improves the flow pattern and key characteristics of the hydraulic jump. Consequently, the implementation of submerged jets can help prevent severe damage to hydraulic structures and protect the downstream riverbed.

Acknowledgements

Thanks to the honorable vice president for research and technology of Shahid Chamran University, Ahvaz, in terms of providing the research validity of this research in the form of a doctoral thesis, and also thanks to the respected personnel of the laboratories of the Faculty of Water and Environmental Engineering of Shahid Chamran University Ahvaz for his great help and assistance in conducting this research.

Conflict of Interest

The authors declared no potential conflicts of interest concerning the research, authorship, and publication of this article.

Funding

The financial support of this research has been provided by Grant number SCU.WH1402.260

Data Availability Statements

Data Availability Statement: All information and results are presented in the text of the article.

Authors' contribution

First Author: Fathollah Davari-Dehkordi, Perform the experiments, Initial Draft of writing the manuscript.
Second Author: Javad Ahadiyan, Developing the plan for conducting experiments, controlling gathered data, reviewing and analyzing data, and final revision of the article.
Third Author: Data management, data analysis, and manuscript review.

References

1- Ahadiyan, J., Abbasi Chenari, S., Azizi Nadian, H., Katopodis, C., Valipour, M., Sajjadi, S. M., & Omidvarinia, M. 2024. Sustainable systems engineering by CFD modeling of lateral intake flow with flexible gate operations to improve efficient water supply. *International Journal of Sediment Research*, 39(4), 629-642. https://doi.org/10.1016/j.ijsrc.2024.05.003.

2- Ead, S.A. and Rajaratnam, N., 2002. Hydraulic jumps on corrugated beds. *Journal of Hydraulic Engineering*, *128*(7), pp.656-663. doi: 10.1061/(ASCE)0733-9429(2002)128:7(656).

3- Hager W.H., Bermen R., Kawagoshi N. 1990. Classic Hydraulic Jump: Length of Roller. Journal of Hydraulic Research, Pages 591-608. Doi: 10.1080/00221689009499048.

4- Haghdoost, M.R., Sajjadi, S.M., Fathi-Moghadam, M., Ahadiyan, J. 2022. Experimental study of spatial hydraulic jump stabilization using lateral jet flow. *Water Supply* 1 November 2022; 22 (11): 8337–8352. doi: https://doi.org/10.2166/ws.2022.376.

5- Hajialigol, S.; Ahadiyan, J.; Sajjadi, M.; Scorzini, A.R.; Di Bacco, M.; Shafai Bejestan, M. 2021. Cross-beams dissipators in abruptly expanding channels: Experimental analysis of the flow patterns. *Journal of Irrigation and Drainage Engineering,* 147, 06021012. Do: 10.1061/(ASCE)IR.1943-4774.0001622.

6- Hajialigol, S., Ahadiyan, J., Sajjadi, S. M., Hazi, M. A., Chadee, A. A., Nadian, H. A., & Kirby, J. T. 2024. Experimental analysis of turbulence measurements in a new dissipator structure (cross beams) in abruptly expanding channels. Results in Engineering, 21, 101829. https://doi.org/10.1016/j.rineng.2024.101829.

7- Mahjoubi, A., Ahadiyan, J., Sajjadi, S. M., Kashefipour, S. M. 2024. 'Asymmetric hydraulic jump control in sudden expansion channels using a Jet system', *Iranian Journal of Soil and Water Research*, 55(10), pp. 1903-1920. doi: 10.22059/ijswr.2024.377718.669725. (In Persian).

8- Khedri-Mirghaed, P., Ahadiyan, J., Varshosaz, A. 2018. 'Effect of Suspended Anchored Spherical Energy Dissipator Blocks on Hydraulic Jump Characteristics', *Modares Civil Engineering journal*, 18(5), pp. 61-70. https://mcej.modares.ac.ir/article_12133.html?lang=en. (In Persian).

9- Sharoonizadeh, S., Ahadiyan, J., Scorzini, A.R., De Bacco, M., Sajjadi, S. M., Fathi-Moghadam, M. 2022. Turbulence characteristics of the flow resulting from the hydrodynamic interaction of multiple counter-flow jets in expanding channels. Acta Mech 233, 3867–3880 (2022). https://doi.org/10.1007/s00707-022-03250-2.

10- Tahmasbipour, M., Azizi Nadian, H., Ahadiyan, J., Oliveto, G., Sajjadi, S. M., & Kiyani, A. M. 2024. Experimental Investigation of T-Jump Stabilization Using Water Jets and Sinusoidal Corrugated Beds. *Water*, 16(23), 3513. https://doi.org/10.3390/w16233513.



© 2025 Shahid Chamran Universiry of Ahvaz, Ahvaz, Iran. This article is an open access article distributed under the terms and conditions of the Creative Commons Attribution 4.0 International (CC BY 4.0 license) (http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/).

علوم و مهندسی آبیاری
جلد ٤٨، شماره‌ی۳، پاییز ١٤٠٤، مقاله پژوهشی، ص. ۲۱-۳۹

بررسی آزمایشگاهی اثر جت مستغرق بر خصوصیات پرش هیدرولیکی نامتقارن در بستر سینوسی

فتح‌الله داوری دهکردی[۱]، جواد احدیان [۲*]، سید محسن سجادی[۳]، آناریتا اسکورزینی[۳] و ماریو دیاکو[۴]

۱- دانشجوی دکتری سازه‌های آبی، دانشکده مهندسی آب و محیط زیست، دانشگاه شهید چمران اهواز، اهواز، ایران.
۲*- نویسنده مسئول، استاد گروه سازه های آبی دانشکده مهندسی آب و محیط زیست، دانشگاه شهید چمران اهواز.j.ahadiyan@scu.ac.ir
۳- دانشیار دانشکده مهندسی آب و محیط زیست، دانشگاه شهید چمران اهواز، اهواز، ایران.
۴- دانشکده مهندسی عمران، محیط زیست و معماری، دانشگاه لاکویلا، لاکویلا، ایتالیا.
۵- دانشکده مهندسی عمران، محیط زیست و معماری، دانشگاه لاکویلا، لاکویلا، ایتالیا

دریافت: ۱۴۰۲/۰۴/۲۸ بازنگری: ۱۴۰۲/۰۹/۲۰ پذیرش: ۱۴۰۲/۰۹/۲۲ انتشار: ۱۴۰۴/۰۸/۱۴

چکیده

حوضچه‌های آرامش، سازه‌های اتلاف انرژی می‌باشند که همواره جریان را از حالت فوق‌بحرانی به زیربحرانی تغییر می‌دهد. نوسانات فشار منفی موجب آسیب‌رسانی قابل‌توجه در محل حوضچه می‌شود. تزریق جت مستغرق تاثیر فشار منفی موجود در جریان فوق‌بحرانی را تقریبا از بین‌برده و سبب کاهش تلاطم و سرعت جریان در پایین‌دست می‌شود. این پژوهش با هدف بررسی اثر توام سیستم جت مستغرق چندگانه و زبری موج‌دار پیوسته بر کنترل پرش هیدرولیکی در مقاطع واگرای ناگهانی انجام شد. بدین منظور، آزمایش‌ها در یک آبراهه آزمایشگاهی با سه ترکیب بستر موج‌دار پیوسته و تزریق سیستم جت مستغرق انجام شدند. نتایج نشان داد پرش هیدرولیکی با سه دبی تزریق جت مستغرق و در محدوده اعداد فرود ورودی شش الی ۱۱، شدت نوسان و تغییر سطح جریان را در محدوده پس از واگرایی مقطع کاهش می‌دهد. همچنین موجب افزایش اتلاف انرژی می‌شود. میزان استهلاک انرژی برای جت‌های افقی مستغرق تقریبا به‌طور میانگین ۲۰ الی ۲۵ درصد بیشتر از مقدار نظیر آن در پرش کلاسیک و گسسته می‌باشد که به‌ترتیب طول پرش، طول غلتاب و اعماق مزدوج در فرود ٦، ۵۰ درصد، ٤٤درصد و ٦۳ درصد کاهش داشتند و نشان از تاثیر مثبت این سیستم بر پایداری جریان می‌دهد.

کلید واژه‌ها: جهش آبی، پرش نامتقارن ، استهلاک انرژی، طول پرش هیدرولیکی و بستر موج‌دار.

مقدمه

کنترل جریان در پایین‌دست سازه‌های هیدرولیکی از اهمیت خاصی برخوردار می‌باشد؛ چرا که با عبور جریان از روی سرریزها، سرعت جریان افزایش می‌یابد و در پایین‌دست می‌تواند موجب تخریب و آسیب شود، لذا باید این نیروی حاصل از انرژی جنبشی را مستهلک نمود. در برخی از موارد برای افزایش راندمان آبگیری می‌توان از انرژی مازاد بهره جست (Ahadiyan et al, 2024a). سازه‌های مستهلک‌کننده انرژی شامل دو نوع ضربه‌ای و پرش هیدرولیکی هستند که نوع ضربه‌ای آب را به سمت موانعی هدایت می‌کند که جریان را از مسیر منحرف کرده و با ایجاد تلاطم بیشتر، انرژی را مستهلک می‌کند. همچنین با تشکیل پرش هیدرولیکی در صورت وجود عمق پایاب، می‌توان از رخدادهای منفی جریان فوق‌بحرانی کاست. پرش هیدرولیکی به‌عنوان یک پدیده اتلاف انرژی در دانش هیدرولیک می‌باشد که طی یک روند سریع، جریان از حالت فوق‌بحرانی به زیربحرانی تغییر می‌کند (Bahrami et al., 2017). سازه‌های استهلاک انرژی متعددی برای کنترل پرش هیدرولیکی وجود دارند که در راستای افزایش بازدهی و تثبیت آن استفاده می‌شوند. رایج‌ترین سازه، حوضچه آرامش با پرش هیدرولیکی کلاسیک می‌باشد که در نتیجه تلاطم و آشفتگی جریان، انرژی اضافی خنثی می‌گردد. با توجه به اینکه هزینه و زمان بسیاری برای ساخت حوضچه‌های آرامش در انتهای سرریزها و سدهای انحرافی می‌شود، پس کاهش طول پرش از جوانب متعددی چون پایداری و طراحی استاندارد مهم می‌باشد. لذا برای رفع این مشکل از واگرایی به‌عنوان یک روش اقتصادی و اصولی در طرح این سازه می‌توان نام برد (Hager and Bremen, 1989). از طرف دیگر در حوضچه‌های آرامش واگرا، جریان نامتقارن خواهد بود و پارامتر اساسی در این ناحیه، عمق پایاب می‌باشد و با نسبت عمق مزدوج به عمق اولیه برای هر نسبت بازشدگی، پنجه پرش به سوی سراب و یا پایاب منتقل می‌شود. پرش هیدرولیکی در مقاطع واگرا با توجه به محل تشکیل و پنجه پرش متاثر از عمق پایاب به‌ترتیب به چهار نوع پرش فرار، گسسته، انتقالی و کلاسیک مطابق با شکل (۱)، تقسیم می‌شوند (Hager and Bremen, 1993)؛ اهمیت این موضوع تحقیق و پژوهش‌های بسیاری را در پی داشته‌است. Herbrand (1973) با بررسی ویژگی پرش گسسته بر روی بستر صاف، میزان طول پرش بصورت تجربی طبق رابطه (۱) آمده‌است.

$$\frac{L_{jB}}{L_j} = 0.8 \ ; \ B < 0.64 \qquad (۱)$$

Matin et al. (2016) با بررسی پرش در مقطع واگرا با نسبت‌های بازشدگی گوناگون، طول پرش را در رابطه (۲) مطابق با رابطه پرش کلاسیک یافت.

$$\frac{L_j}{y_1} = 220 \tanh\left(\frac{Fr_1 - 1}{22}\right) \qquad (۲)$$

بررسی هایی دیگر در رابطه با پرش هیدرولیکی نشان می‌دهد که در صورت وقوع پرش در موقعیت تغییر مقطع، نوع پرش گسسته بوده و طول پرش تحت اثر نسبت بازشدگی مطابق با جدول (۱) خواهد بود (Hager et al., 1990; Hager and Bremen, 1993). از سازه‌هایی چون بسترهای زبر، بیم‌ها، صفحات و موانع مستغرق می‌توان به‌عنوان مستهلک‌کننده استفاده کرد. زبری‌ها در کف کانال‌ها مانعی در برابر جریان بوده و اثر آن‌ها در بستر موجب کاهش مومنتم در خروج نسبت به ورودی در کانال می‌شود (Carollo et al., 2007; Hajialigol et al., 2021). نتایج نشان می‌دهد که استفاده از آستانه در عرض‌های مختلف، با افزایش عرض، افزایش سرعت و در نتیجه کاهش عمق پرش ، باعث افزایش اتلاف انرژی می‌شود (Daneshfaraz et al., 2023).

بررسی‌های فراوان در رابطه با تشکیل پرش هیدرولیکی روی بسترهای زبر با شکل‌های مختلفی همچون مثلثی، مکعب، مستطیلی و ذوزنقه‌ای و بسترهای سینوسی انجام شده‌است (Ead and Rajaratnam,2002; Mohamed Ali,1991; Shafai Bajestan and Neisi, 2009; Alhamid, 2004). نتایج حاصل از این پژوهش‌ها نشان دادند که بستر زبر تاثیر به‌سزایی در کاهش طول پرش هیدرولیکی داشته‌است؛ روابط ارائه شده متناسب با طول پرش و طول غلتاب و شرایط موجود در این آزمایش‌ها به‌طور مختصر در جدول (۱) آمده‌اند. نتایج تحقیقاتی بر ویژگی پرش‌هیدرولیکی در بسترهای موج‌دار نشان دادند که نسبت اعماق مزدوج با اعداد فرود بر روی بسترهای موج‌دار یک رابطه خطی بوده و با افزایش عدد فرود، مقدار ضریب نیروی برشی بسترهای موج‌دار افزایش می‌یابد که حدود ۶/۵ الی ۱۰ برابر بستر صاف می‌باشد (Badizadegan et al., 2014). با توجه به اینکه مهندسان طراح برای هماهنگی بالادست و پایین‌دست و افزایش راندمان، اقدام به حذف سازه تبدیل نموده تا تاثیر مثبتی بر پرش هیدرولیکی داشته‌باشد، استفاده از بستر زبر در مقطع واگرایی عملکردی مفید برای کنترل طول پرش خواهد داشت. با توجه به تحقیقات پیشین می‌توان گفت که هرچه نسبت بازشدگی کمتر باشد، بازدهی پرش هیدرولیکی بیشتر است ولی این میزان نسبت به پرش کلاسیک دارای طول بیشتری خواهد بود (Kazemianzadeh and Shafai Bajestan, 2008; Izadjoo and Shafai Bajestan, 2007; Izadjoo et al., 2005). نتایج بررسی‌های پرش پایدار بر روی بستر موجی شکل با اعداد فرود مختلف نشان داد که به‌طور تقریبی طول پرش نیمی از طول آن روی بستر صاف بوده و عمق ثانویه ۲۵ درصد کاهش یافت (Ead and Rajaratnam, 2002). همچنین تحقیقاتی دیگر نشان دادند که نقش بستر موج‌دار بر روی پرش هیدرولیکی پایدار و قوی به‌صورت تجربی در محدوده اعداد فرود آن‌ها و طول‌موج‌های متفاوت نشان‌دهنده اثر مثبت زبری بر طول غلتاب و پرش بوده‌است (Tokyay, 2012). Abbaspour et al. (2009) با بررسی بستر موج‌دار سینوسی و ویژگی‌های پرش هیدرولیکی نشان دادند که مقادیر عمق نسبی پرش تابعی از عدد فرود اولیه می‌باشد و به شیب یا طول‌موج بستر وابسته نمی‌باشد. این درحالی است که نتایج دیگری نشان می‌دهد با به کارگیری بستر موج‌دار سینوسی در حوضچه آرامش، می‌توان شاهد کاهش نسبت اعماق ثانویه به اولیه تا میزان ۲۰ درصد در حدود عدد فرود ۱۲ و کاهش طول پرش هیدرولیکی به میزان ۳۵ درصد نسبت به پرش کلاسیک بود (Badizadegan et al., 2011).

از سازه‌های استهلاک انرژی دیگری که می‌توان نام برد، تزریق جت‌های مستغرق است که همراه با پرش هیدرولیکی به‌صورت افقی یا زاویه‌دار در راستای مقابل یا عمود بر جریان ممکن است وارد شوند و استهلاک انرژی را در پایین‌دست انجام می‌دهد. نتیجه پژوهشی نشان داد که ورود جت به پرش با زاویه‌های بزرگتر، موجب کاهش نسبت اعماق مزدوج، طول پرش و افزایش استهلاک انرژی و نیروهای برشی کف می‌شود (Dastourani et al, 2016). با افزایش تعداد جت خروجی و تزریق آن به جریان به‌صورت افقی سبب افزایش استهلاک شده و فشار منفی در کف بستر و تلاطم سطح جریان آب را کمتر می‌کند (Deng et al., 2008). در بررسی دیگری که میزان تأثیر جانمایی و موقعیت مکانی تزریق جت مستغرق را بررسی می‌کرد، نتایج حاکی از اتلاف انرژی در فاصله یک‌سوم ابتدایی حوضچه آرامش رخ می‌دهد و در اعداد فرود بیشتر از ۸، میزان ۷۰ درصد سنجیده شد (Chen et al., 2014).

Ahadian و Varshosaz (2018) در تحقیقی به بررسی خصوصیات پرش هیدرولیکی در قالب مطالعه آزمایشگاهی بر روی بستر صاف و همراه با موانع شناور متصل به کف با طول‌های مهاری مختلف پرداختند. در تحقیق آنها برای مدل‌سازی موانع شناور، قطر کاربردی موانع به صورت ثابت برابر با چهار سانتی‌متر در نظر گرفته شد. یکی از نتایج مهم در تحقیق آنها این بود که انعطاف‌پذیری و نوسان در موانع کاربردی به عنوان مستهلک کننده‌ی پرش هیدرولیکی، باعث افزایش افت انرژی مازاد می‌گردد. این در حالی است که با افزایش طول‌های مهاری موانع، بخش بیشتری از مومنتم جریان ورودی جذب موانع می‌شود. که البته این موضوع برای محدوده‌ی اعداد فرود ۵/۱الی ۷/۵ اثر بیشتری دارد. در همین راستا Khedri-Mirghaed et al. (2018) در تحقیقی استفاده از بلوک‌های معلق کروی مهار شده به کف حوضچه آرامش را پیشنهاد نمودند. این نوع بلوک‌ها دارای چگالی نسبی کمتر از آب و به‌وسیله‌ی مهاری از جنس پلاستیک مقاوم به کف حوضچه متصل

DOI: 10.22055/jise.2023.44341.2085

شده بودند. ویژگی اصلی این موانع بر خلاف بلوک‌های صلب معمول، داشتن تحرک و نوسان متناسب با جریان عبوری از آن‌ها است. نتایج آنها نشان داد که عمق ثانویه، طول پرش هیدرولیکی و استهلاک انرژی در حضور این نوع بلوک‌ها نسبت به بستر صاف افزایش داشته است. همچنین مشخص شد که تغییر آرایش موانع تغییر چندانی در میزان استهلاک انرژی ایجاد نمی‌کند.

Hassanpour et al. (2017) با بررسی ویژگی‌های پرش هیدرولیکی با نسبت واگرایی‌های مختلف (۴۰، ۶۰، ۸۰ و ۱۰۰ درصد) و اعداد فرود ورودی در بازه ۶ الی ۱۱ با یکدیگر و همچنین مقایسه با مقادیر مربوطه اندازه‌گیری‌شده برای پرش هیدرولیکی کلاسیک نشان دادند که عمق پایاب موردنیاز برای تشکیل یک پرش هیدرولیکی و نیز طول غلتاب و طول پرش هیدرولیکی روی یک مقطع واگرای تدریجی با بستر ناهموار به‌طور محسوسی کمتر از پرش‌های هیدرولیکی اولیه بود. نتایج نشان می‌دهد که این سازه، انرژی جریان را از بین برده و طول حوضچه‌های آرامش را کاهش می‌دهند و جت‌های پرسرعت را از کف حوضچه‌های آرامش منحرف می‌کنند (Hassanpour et al. 2020; Aal et al. 2018).

Sharoonizadeh et al., (2021) نیز با بررسی تزریق جت مستغرق چندگانه در مقطع واگرای ناگهانی و در فواصل و اعداد فرود معین و با تعداد منافذ خروجی سیستم جت مستغرق، پرش هیدرولیکی را کنترل کرده و در انتقال از جریان فوق‌بحرانی به جریان زیربحرانی، با کاهش قابل‌توجه طول آن، ناپایداری پرش برطرف کرده‌است.

Haghdoost et al. (2022) .در یک مطالعه تجربی اثرات جریان جت جانبی (LJF) را در یک حوضچه آرامش با کانال‌های با واگرای ناگهانی بر تثبیت و ویژگی‌های مهم پرش هیدرولیکی مکانی را بررسی نمودند. طبق نتایج، فاصله LJF از کانال باریک و تعداد LJF، تثبیت پرش هیدرولیکی و بهبود الگوی جریان در کانال پایاب را بهبود می‌بخشد. علاوه بر این، میانگین عمق ثانویه و طول پرش مکانی به‌ترتیب ۱۴ و ۲۰ درصد در مقایسه با عدم وجود LJF کاهش می‌یابد. در همین راستا Sharoonizadeh et al. (2022a) این بار در یک مطالعه، اثرات برهم‌کنش چندین جریان جت متقابل مستغرق به صورت تجربی بر اساس ویژگی‌های هیدرودینامیکی جریان حاصل از کانال پایاب را بررسی نمودند. نتایج، عملکرد خوب سیستم مورد بررسی را در جلوگیری از پدیده ناپایداری جریان مرتبط با کانال‌های با انبساط ناگهانی را نتیجه‌گیری نمودند. در تحقیقی دیگر Sharoonizadeh et al. (2022b) پیکربندی‌های مختلف سیستم جت با اعداد فرود ۷/۴، ۸/۷ و ۹/۵ را آزمایش نمودند و در نهایت، سه پیکربندی بهینه انتخاب شدند. مقایسه نتایج استفاده از سیستم تزریق جت آب با پرش هیدرولیکی نوع S نشان داد که ضرایب تصحیح انرژی و مومنتوم در تمام پیکربندی‌های مختلف به طور قابل توجهی کاهش یافته است. نتایج آنها نشان از عملکرد خوب سیستم تزریق جت در پایدارسازی پرش هیدرولیکی نامتقارن S و کاهش طول حوضچه آرامش بود.

Ahadiyan et al. (2024b) در یک مقطع واگرای تدریجی نسبت به کنترل پرش هیدرولیکی نامتقارن نوع S با استفاده از جت و بستر موجدار تحقیق نمودند. نتایج حاصل از بررسی نشان داد که بستر موج‌دار در محدوده مقطع واگرای تدریجی، طول پرش را نسبت به عدم وجود آن کاهش داده و تغییرات عمق جریان نیز کمتر شده است. همچنین، تاثیر جت مقابل به شکل مستغرق، این روند را بهبود می‌بخشد.

Sajjadi et al., (2025) در یک مطالعه عددی افت انرژی و طول پرش هیدرولیکی نوع S با استفاده از بیم‌های متقاطع به‌عنوان زبری را در بازشدگی‌های ناگهانی مورد بررسی قرار دادند. آن‌ها نشان دادند که به‌کارگیری این سیستم زبری پس از دریافت بهینه ترکیب‌بندی در همه اعماق پایاب مورد آزمایش، باعث پایداری و حذف موج‌های نامتقارن و جریان برگشتی می‌گردد. Mahjoubi et al. (2024) در خصوص قرارگیری سیستم جت در تقابل و تقاطع با جریان آب خروجی از سرریز اوجی پس از مقطع واگرای ناگهانی تحقیق نمودند. یافته‌های آنان نشان داد که پارامتر مومنتم از محل انبساط ناگهانی به سمت پایین دست کاهش می‌یابد. به عبارت دیگر نیروی مومنتم بر روی بستر کاهش می‌یابد. ترکیب‌بندی با تعداد جت حداقل، بیشترین یکنواختی جریان را به همراه داشته و قطر جت وابسته به نوع پرش و عمق پایاب می‌باشد. Tahmasbipour et al. (2024) در خصوص کنترل پرش نامتقارن از نوع T با استفاده از سیستم هم‌زمان جت متقاطع و زبری بستر به صورت مواج تحقیق جامعی ارائه دادند. چنین پیکربندی‌های پیچیده به ندرت در تحقیق‌های گذشته یافت می‌شود. نتایج تجربی ایشان نشان داد که افزایش موج بستر باعث کاهش طول پرش و نسبت عمق ثانویه می‌شود. آنها دریافتند که افزایش دبی نسبی جت، تأثیر قابل توجهی در کنترل پرش T شکل و کاهش طول نسبی آن دارد.

Hajialigol et al. (2023) در یک تحقیق نتیجه استفاده از چند سری تیرهای متقاطع، آزمایش شده در ترکیب‌بندی‌های هندسی و شرایط هیدرولیکی مختلف را بررسی نمودند. این محققین اندازه‌گیری سرعت‌های سه بعدی برای تعیین‌های یکنواختی جریان، ضریب مومنتم و انرژی، تجزیه و تحلیل توزیع سرعت‌های سه بعدی، انرژی جنبشی آشفتگی، بررسی‌های تکمیلی توسعه تمرکز خطوط هم تنش و افت انرژی پرش در شرایط آزمایش‌های مرجع و ترکیب‌بندی‌های بهینه، بررسی نمودند. نتایج آن‌ها نشان داد پارامترهای هیدرودینامیکی نظیر شدت انرژی تلاطمی و تنش‌های رینولدزی در نسبت عمق پایاب ۰/۹ به حداکثر مقدار خود می‌رسد. از این رو در این عمق پایاب حداکثر نرخ استهلاک انرژی نیز رخ می‌دهد. در تحقیقی دیگر Hajialigol et al. (2024) تلاشی برای مطالعه کارایی سرریزها در شرایط سیلاب را بررسی نمودند. برای این منظور از ویژگی‌های آشفتگی جریان ناشی از

مستهلک‌کننده جدید به عنوان مجموعه‌ای از تیرهای عرضی برای کنترل پرش هیدرولیکی نامتقارن استفاده نمودند. آنها نشان دادند تحلیل توزیع سرعت در این سیستم باعث می‌شود آبشارهای انرژی به سطح آب می‌رسند و در آنجا بشکنند، بنابراین می‌توان شرایط پایدارتر و یکنواخت‌تری از نظر خطوط جریان در این حالت در نظر گرفت.

از آن‌جایی‌که سلامت و ایمنی سازه‌ها و شبکه‌های آبیاری و زهکشی و همچنین حفاظت رودخانه و بستر و سواحل آن مدنظر می‌باشد، لذا باید با اتلاف و استهلاک انرژی از وقوع آسیب‌ها و تخریب‌های ناشی از انرژی جنبشی بیش از حد و سرعت بالای جریان آب در رودخانه و کانال‌های آب‌رسانی جلوگیری نمود. حال آن‌که این مهم در راستای بهبود راندمان حوضچه آرامش و کنترل پرش هیدرولیکی و حفظ بستر از فرسایش باشد. در این بررسی هدف اصلی کاهش طول پرش و غلتاب و همچنین ایجاد عمق ثانویه و مزدوج پرش در بازه کمتری از فاصله طولی و استهلاک انرژی بیشتر نسبت به دیگر حالات و انواع پرش‌های هیدرولیکی می‌باشد تا به پایداری جریان و یکنواختی مطلوب دست یافت.

مواد و روش‌ها

آنالیز ابعادی

برای دست‌یابی به اهداف این پژوهش، ابتدا باید به شناخت و آگاهی پارامترهای موثر بر استهلاک انرژی پرداخت تا بتوان عمق ثانویه پرش، طول پرش‌هیدرولیکی و طول غلتابی را به‌دست آورد. با تجزیه و تحلیل و آنالیز ابعادی، رابطه اساسی تحقیق که شامل متغیرهای بدون بعد هستند، استخراج گردید. پارامترهای موثر در این آزمایش در رابطه (۳) ارائه گردیده‌است؛

$$F(\Delta E, E_1, L_j, L_r, \rho, \mu, g, V, Q, Q_j, B, b, P, y_t, y_1, y_2, S, t) = 0 \quad (۳)$$

در رابطه فوق، ΔE افت انرژی، E_1 انرژی اولیه، L_j طول پرش هیدرولیکی، L_r طول غلتابی، ρ جرم مخصوص سیال، μ لزوجت دینامیکی سیال، g شتاب گرانش، V سرعت جریان، Q دبی جریان در کانال اصلی، Q_j دبی جت، B عرض کانال اصلی، b عرض کانال در مقطع واگرا، P فاصله سیستم جت مستغرق از مقطع واگرایی، y_t عمق پایاب، y_1 عمق نخست پرش و y_2 عمق دوم پرش هیدرولیکی، S فاصله هر دو قله متوالی از یکدیگر در بستر سینوسی و t ارتفاع قله‌های بستر سینوسی هستند. با توجه به ارتفاع قله‌ها و طول‌موج یا فاصله هر دو قله که متفاوت می‌باشند، میزان سه بستر با ابعاد مختلف مطابق با جدول (۲) لحاظ شده‌اند؛ همچنین میزان پنج دبی ورودی به کانال و مجرای اصلی در بازه اعداد فرود شش الی ۱۱ انتخاب و سه دبی جت مستغرق، ۴/۵ ، ۶ و هشت لیتر بر ثانیه برای تزریق به کانال اصلی اتخاذ شد که در جدول (۲) نیز آمده‌است. با آنالیز ابعادی و با استفاده از قضیه π باکینگهام و انتخاب ρ, V, y_1 به‌عنوان متغیرهای تکراری، رابطه (۴) به‌صورت پایین حاصل گردید؛

$$F\left(\frac{\Delta E}{E_1}, Fr, Re, \frac{L_j}{y_2}, \frac{L_r}{y_2}, \frac{Q}{Q_j}, \frac{S}{y_1}, \frac{b}{B}, \frac{P}{B}, \frac{y_2}{y_1}, \frac{t}{y_1}, \frac{L_r}{y_1}, \frac{L_j}{y_1}, \frac{B}{y_1}, \frac{b}{y_1}\right) = 0 \quad (۴)$$

در این رابطه، Re عدد رینولدز جریان و Fr عدد فرود هستند که با توجه به اینکه میزان عدد رینولدز از ۲۰۰۰ بیشتر بوده و در محدوده وضعیت آشفته و متلاطم است، می‌توان از عدد رینولدز صرف‌نظر کرد (Chow, 1959). همچنین از مقادیر ثابتی چون $\frac{b}{B}$ و $\frac{P}{B}$ نیز صرف‌نظر گردید؛ بنابراین، رابطه نهایی به‌صورت رابطه (۵) ساده می‌شود:

$$\frac{\Delta E}{E_1} = F\left(Fr, \frac{L_j}{y_1}, \frac{L_r}{y_1}, \frac{Q}{Q_j}, \frac{S}{y_1}, \frac{y_2}{y_1}, \frac{t}{y_1}\right) \quad (۵)$$

دامنه تغییرات پارامترهای بدون بعد در آزمایش‌ها در جدول (۳) ارائه شده‌است.

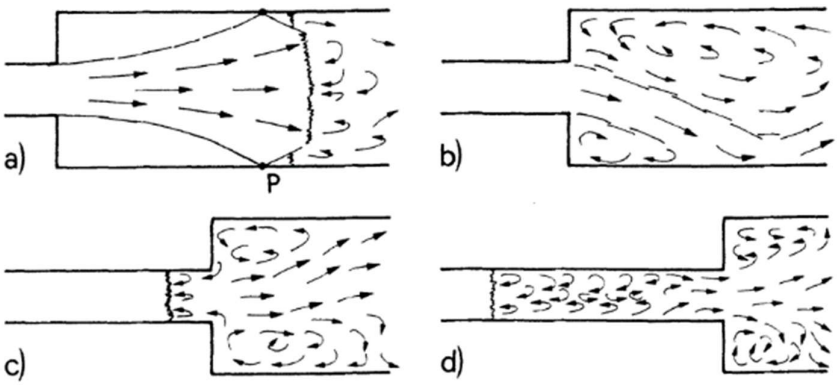


Fig. 1- Types of jumps in the sudden expansion of the section

شکل ۱- انواع پرش در انبساط ناگهانی مقطع

 DOI: 10.22055/jise.2023.44341.2085

جدول ۱- تعدادی روابط پیش بینی طول پرش و طول غلتابی در بستر زبر

Table 1- A number of relationships predict the length of the jump and the length of the swell in the rough bed

No.	Researcher	Equation
(1)	Herbrand, 1973	$\frac{L_{jB}}{L_j} = 0.8 \ ; \ B < 0.64$
(2)	Matin et al., 1998	$\frac{L_j}{y_1} = 220 \tanh\left(\frac{Fr_1 - 1}{22}\right)$
(3)	Hager et al., 1990	$\frac{L_{jB}}{L_j} = 2 - \sqrt{B}$
(4)	Hager et al., 1990	$\frac{L_r}{y_1} = -12 + 160 \tanh\left(\frac{Fr_1}{20}\right)$
(5)	Hager and Bremen, 1993	$\frac{L_j}{y_1} = 8(Fr_1 - 1.5)$

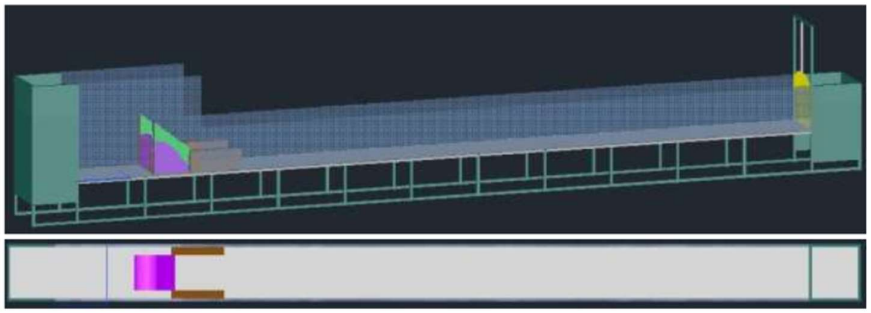


Fig. 2- The laboratory experimental section used in this study

شکل۲- شمایی از فلوم مورد استفاده در این پژوهش

روش انجام آزمایش و امکانات آزمایشگاهی

آزمایش‌ها در یک فلوم در آزمایشگاه مدل‌های هیدرولیکی دانشکده مهندسی آب و محیطزیست دانشگاه شهید چمران اهواز انجام شد. فلوم شامل یک مخزن ذخیره با ابعاد یک متر عرض و ۲/۴ متر طول، یک سرریز اوجی با ارتفاع ۰/۶ متر و عرض ۰/۶۷ متر است. یک مجرای افقی با سطح مقطع مستطیل به طول ۱۲ متر، عرض یک متر و عمق ۰/۸۷ متر می‌باشد. شکل (۲) مقطع طولی فلوم موردنظر را نشان می‌دهد. دو دیوار پلکسی در نوک سرریز در دو طرف کانال نصب شد تا یک قسمت باریک به طول ۰/۶ متر و عرض ۰/۶۷ متر ایجاد شود تا بتوان یک مقطع با انبساط ناگهانی و با نسبت انبساط عرض بالادست به پایین‌دست ۰/۶۷ متر داشت. همچنین یک دریچه عمودی در قسمت انتهایی فلوم برای کنترل عمق پایاب و محل تشکیل پرش هیدرولیکی تعبیه شد (شکل ۳). با استفاده از یک شیر فلکه کشویی، میزان دبی ورودی به فلوم با توجه به منحنی دبی – اشل سرریز تنظیم می‌شود. با استفاده از یک شاخص مدرج به‌عنوان عمق سنج با دقت یک‌دهم سانتی‌متر، عمق آب اندازه‌گیری گردید.

نحوه انجام آزمایش بدین‌صورت بود که با قرارگیری بسترهای موجدار پیوسته بلافاصله پس از مقطع واگرای ناگهانی و ورود دبی‌هایی به میزان ۲۵ الی ۶۷ لیتر بر ثانیه و با تعداد پنج عدد فرود در بازه ۶/۲ الی ۱۰/۸ جریان برقرار شد. پس از ورود دبی معین به‌عنوان جریان اصلی و برقراری جریان، با تنظیم دریچه در پایین‌دست می‌توان میزان عمق پایاب موردنظر برای تشکیل پرش هیدرولیکی را به‌دست آورد و برداشت داده‌های عمقی جریان را با عمق‌سنج و میزان سرعت جریان در طول مسیر را با استفاده از سرعت‌سنج پروانه‌ای یک‌بعدی اندازه‌گیری کرد. همچنین این آزمایش‌ها برای بسترهای موجدار که هرسه حالت آن با ابعاد متفاوت از یکدیگر طبق جدول (۳) هستند، نسبت به حالت نامتقارن پرش گسسته و بدون وجود زبری پیوسته در بستر سنجیده شدند. در ادامه با ورود جت مستغرق توسط سیستمی که با اتصال به مخزن ذخیره‌ای فلوم تامین شده‌بود، تزریق جت صورت گرفت. دبی‌های انتخابی جت ورودی به سیستم به‌صورت مستغرق، ۴/۵ ، ۶ و ۸ لیتر بر ثانیه توسط دبی سنج آلتراسونیک اندازه‌گیری شدند و استغراق جریان و طول غلتاب و پرش هیدرولیکی در بازه طولی بستر موجدار پیوسته سنجیده شدند. شکل (۴) و (۵) نمایی از تزریق جت به سیستم و پرش هیدرولیکی در مقطع بستر موجدار را نشان می‌دهد. با توجه به آشفتگی بسیار بالا در پنجه سرریز می‌توان با استفاده از رابطه بلانگر، رابطه (۶) و عمق پایین دست، عمق اولیه را یافت و همچنین درصد استهلاک انرژی با رابطه (۷) به‌دست‌آمد (Chanson, 2015)؛

$$y_1 = \frac{y_2}{2}\left(\sqrt{1 + 8{Fr_2}^2} - 1\right) \quad (۶)$$

$$\eta = \frac{\Delta E}{E_1} \times 100 \quad (۷)$$

جدول ۲- مشخصات و متغیرهای آزمایش در پژوهش

Table 2- Characteristics and test variables of the research

Froud Number	Main discharge (L/s)	Jet discharge (L/s)	Abb. name of jet	Corrugated bed dimensions (cm)	Name of corrugated bed
10.8	26				
9.5	37	4.5	J1	S = 3; t = 1	C1
8.7	45	6	J2	S = 5; t = 3	C2
7.4	56	8	J3	S = 10; t = 6	C3
6.2	67				



Fig. 3- A view of the gate of the flume (a) and the ogee spillway (b)

شکل۳- نمایی از دریچه فلوم (الف) و سرریز اوجی (ب)



Fig. 4- A view of the bed roughness (a) and hydraulic jump on the bed (b)

شکل٤- نمایی از شکل زبری بستر (الف) و پرش هیدرولیکی در بستر (ب)

 DOI: 10.22055/jise.2023.44341.2085

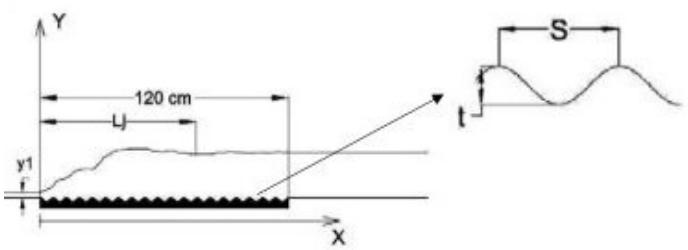


Fig. 5- A view of the sinusoidal corrugated bed after the expansion

شکل۵- شمایی از بستر موج‌دار پس از واگرایی

جدول ۳- روند نام‌گذاری و ترکیب مدل‌های آزمایشی در تحقیق

Table 3- The process of naming and combining experimental models in research

Model	t (cm)	S (cm)	Discharge of jet (L/s)
C1-J1	1	3	4.5
C1-J2	1	3	6
C1-J3	1	3	8
C2-J1	3	5	4.5
C2-J2	3	5	6
C2-J3	3	5	8
C3-J1	6	10	4.5
C3-J2	6	10	6
C3-J3	6	10	8
C1	1	3	-
C2	3	5	-
C3	6	10	-

نتایج و بحث

با توجه به شرایط جریان ورودی و پژوهش‌های پیشین در این زمینه نشان داده‌است که پرش نوع گسسته در مقطع واگرا، نقش پررنگ‌تری در استهلاک انرژی در قیاس با انواع دیگر پرش‌های هیدرولیکی در این‌گونه مقاطع دارد و بازدهی آن رابطه مستقیمی با نسبت بازشدگی بیشتر واگرایی خواهد داشت. لذا برای کنترل پرش هیدرولیکی در مقطع واگرای ناگهانی از ترکیب زبری موج‌دار در بستر همراه با جت مستغرق استفاده شد که نتایج به‌ترتیب ارائه خواهند شد.

الف) استهلاک انرژی سرریز

در این پژوهش، آزمایش‌ها برای پنج دبی اصلی ۲۶، ۳۷، ۴۵، ۵۶ و ۶۷ لیتر بر ثانیه بر روی مدل مذکور انجام شد و با سنجش میزان عمق بالادست سرریز، میزان انرژی اولیه حاصل گردید. همچنین با اندازه‌گیری عمق پایاب در پایین‌دست سرریز، میزان عمق ثانویه پرش هیدرولیکی به‌دست آمد. سپس با استفاده از رابطه (۷)، عمق اولیه پرش هیدرولیکی در پای سرریز محاسبه گردید. همچنین محاسبات مربوط به استهلاک انرژی از طریق رابطه (۸) انجام شد و درصد افت انرژی به‌دست آورده‌شد. روند ترکیب آزمایش‌ها در جدول (۳) به اختصار بیان شده‌است و همین‌طور جدول (۴) خلاصه نتایج محاسباتی درصد استهلاک انرژی برای سه حالت بستر موج‌دار را نشان می‌دهد. با یافتن محل تشکیل پرش هیدرولیکی میزان نقش‌آفرینی آن بر میزان اتلاف انرژی مشخص شده و می‌توان افت انرژی بیشتری داشت.

همانطور که مشاهده می‌شود طبق جدول (۴)، میزان افت انرژی در بستر سینوسی با طول‌موج‌های بلندتر و عمیق‌تر بیشتر بوده و تاثیر بهتری در کاهش سرعت جریان داشته‌است و انرژی را مستهلک کرده و همچنین عمق ثانویه را در طول کمتری از بستر موج‌دار مهار و کنترل کرده‌است. همچنین می‌توان مشاهده کرد که تاثیر تزریق جت در همه حالات و ترکیب‌های قرارگیری با افزایش دبی جت مستغرق بیشتر بوده و در استهلاک انرژی نقش بسزایی دارد. در شکل (۶) تاثیر همزمان زبری بستر و تزریق جت نسبت به حالات بدون جت و همچنین بدون بستر موج‌دار پیوسته به‌هنگام تشکیل پرش نوع گسسته در مقطع واگرایی نشان داده شده‌است. همانطور که پیداست با افزایش دبی جت مستغرق متقابل و افزایش طول‌موج زبری در بستر، اتلاف انرژی بیشتری را نیز به ثبت رسانده شده‌است. البته با افزایش دبی جریان اصلی و دبی‌های کمتر جت مستغرق، مقدار درصد استهلاک انرژی نیز کاهش داشته‌است.

جدول ٤- نتایج میزان درصد استهلاک انرژی در حالات گوناگون

Table 4- The results of the percentage of energy consumption in different situations

Model	Froude Number				
	6.2	7.4	8.7	9.5	10.8
S1: Sample	19.246	44.446	61.081	53.599	29.032
C1	26.305	8.031	19.185	4.522	11.642
C2	11.48	13.277	16.495	4.073	21.584
C3	34.457	38.822	40.490	17.468	1.743
C1-J1	9.710	2.940	4.278	14.967	77.195
C1-J2	2.365	13.716	20.742	28.145	35.576
C1-J3	6.974	20.799	30.341	42.103	55.367
C2-J1	9.500	23.106	32.040	42.314	53.002
C2-J2	10.885	24.928	34.295	45.522	57.969
C2-J3	7.090	20.843	30.115	41.569	53.939
C3-J1	70.371	17.126	0.849	19.903	51.369
C3-J2	33.429	3.492	14.425	35.390	58.852
C3-J3	5.008	4.291	21.239	45.608	60.026

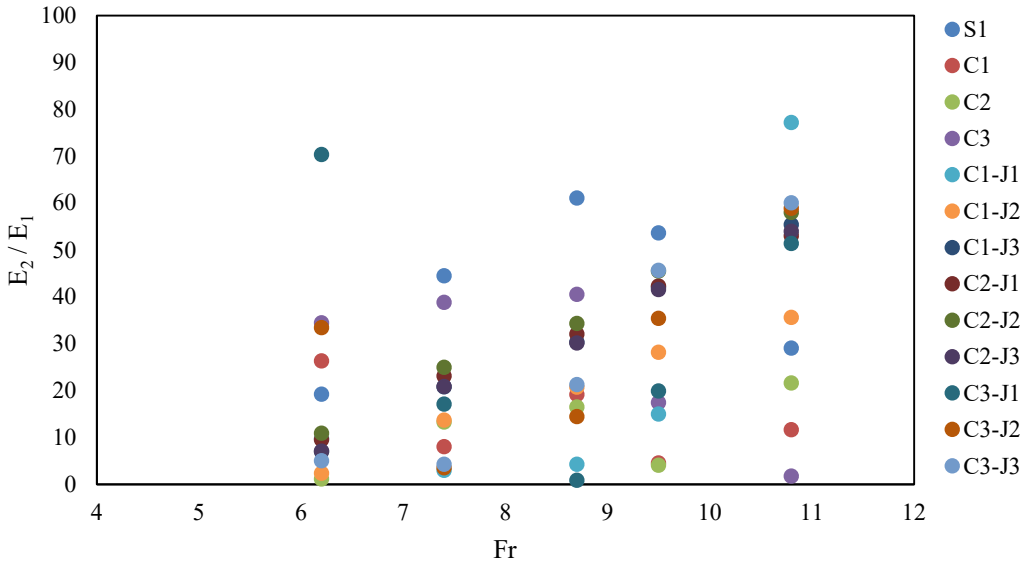


Fig. 6- The relative energy consumption of hydraulic jump caused by the presence of corrugated bed and submerged jet

شکل٦- استهلاک انرژی نسبی پرش هیدرولیکی ناشی از حضور بستر موج‌دار و جت مستغرق

ب) بررسی عمق مزدوج پرش هیدرولیکی

یکی از دیگر شاخصه‌های مهم در پرش هیدرولیکی، نسبت عمق دوم به عمق نخستین پرش می‌باشد؛ چرا که کاهش این نسبت اعماق مزدوج پرش، در طراحی حوضچه های آرامش موثر خواهد بود. شکل (۷) نسبت عدد فرود جریان در مقابل اعماق مزدوج پرش را برای هر یک از حالات مدل‌سازی‌شده نشان می‌دهد. مطابق با این نمودارهای رسم‌شده، قرارگیری بستر موج‌دار با ابعاد هندسی بزرگ‌تر نسبت به حالات دیگر تاثیر بیشتری داشته‌است. همچنین با تزریق جت این میزان بهبود یافته و انرژی بیشتری مستهلک گردیده‌است. در فرود پایین، این تغییرات نسبت به حالت بدون جت برابر ۲۵ درصد بوده و با تزریق جت مقابل جریان به ۴۵ درصد می‌رسد. با افزایش عدد فرود، این میزان کمتر شده و ۳۰ درصد می‌باشد.

ج) طول پرش هیدرولیکی

برای بررسی میزان طول پرش هیدرولیکی، حالت‌های گوناگون مورد آزمایش و سنجش قرار گرفتند. برای تحقق این هدف و تحلیل

DOI: 10.22055/jise.2023.44341.2085

این روش‌های طراحی در هندسه، میزان مقادیر طول پرش نسبت به عمق اولیه سنجیده شده و در مقابل عدد فرود جریان در شکل (۸) به نمایش درآمده‌است. همان‌گونه که مشخص است، با افزایش دبی جت، میزان طول پرش کاهش یافته‌است؛ نظر به نمودار ترسیم‌شده، در حالتی که زبری بستر ابعاد بیشتری از نظر طول موج خود داشته‌است، طول پرش نیز کاهش یافته‌است. این مقادیر برای فرودهای پایین تا ۵۰ درصد کمتر شده و برای فرودهای بالا، ۳۰ درصد کاهش گردیده‌است. در زمانی‌که تزریق جت به مجرای اصلی صورت می‌گیرد، جریان به سمت بالادست هدایت شده و بر اثر تلاطم و اغتشاش، جریان در حوضچه آرامش به‌طور چشم‌گیر و قابل‌ملاحظه‌ای افزایش عمق می‌دهد؛ بنابراین برای مهار پرش هیدرولیکی شکل‌گرفته به طول بیشتری از حوضچه آرامش نیاز است. با مقایسه این حالات نسبت به تحقیق‌های پیشین مشابه، نشان از افزایش استهلاک انرژی و کاهش طول پرش می‌دهند که با اشاره به این مورد می‌توان به آثار مثبت این پژوهش اشاره نمود.

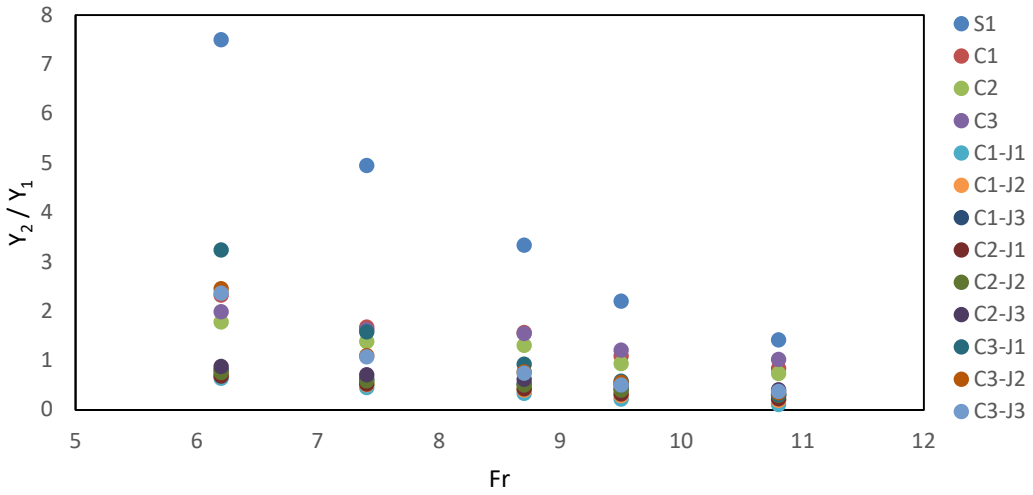


Fig. 7- Comparison of hydraulic jump conjugate depths ratio against Froude number in the presence of corrugated bed and submerged jet

شکل۷- مقایسه نسبت اعماق مزدوج پرش هیدرولیکی در مقابل عدد فرود در حضور بستر موج‌دار و جت مستغرق

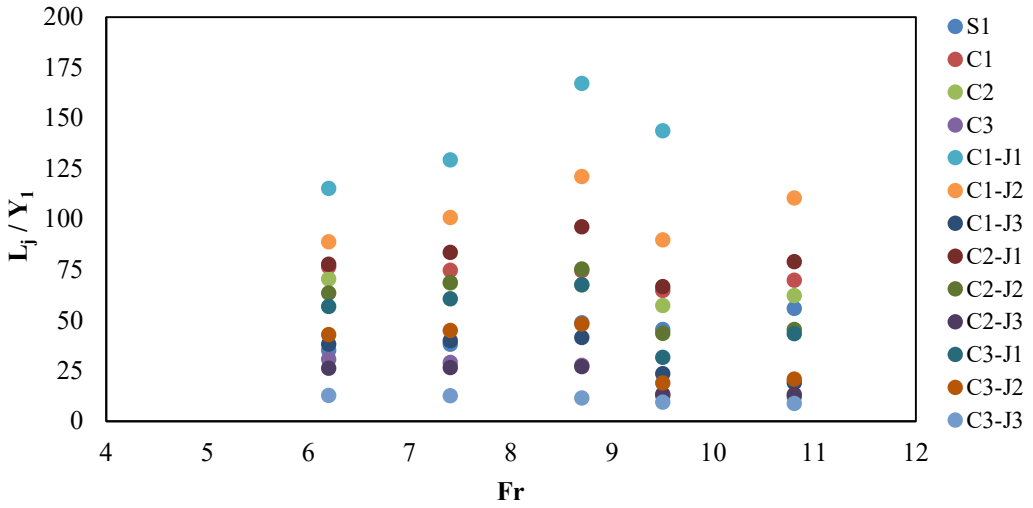


Fig. 8- Comparison of the Froude number against the length of the hydraulic jump to its conjugated depth in the corrugated bed

شکل۸- مقایسه عدد فرود در برابر طول پرش هیدرولیکی نسبت به عمق مزدوج آن در بستر موج‌دار

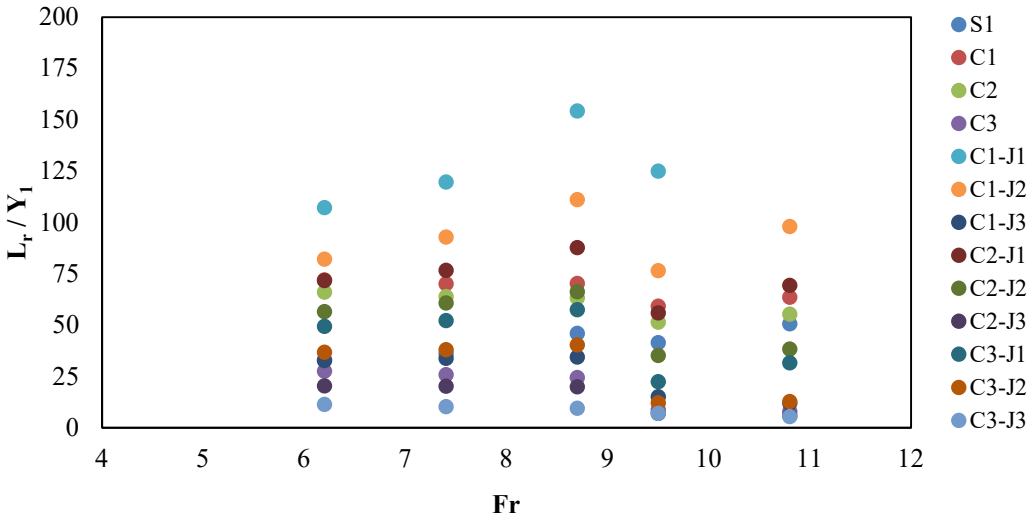


Fig. 9- Variations of the relative jump length against Froud number for bed with different roughness

شکل۹- تغییرات طول نسبی پرش در برابر عدد فرود برای بستر با زبری های مختلف

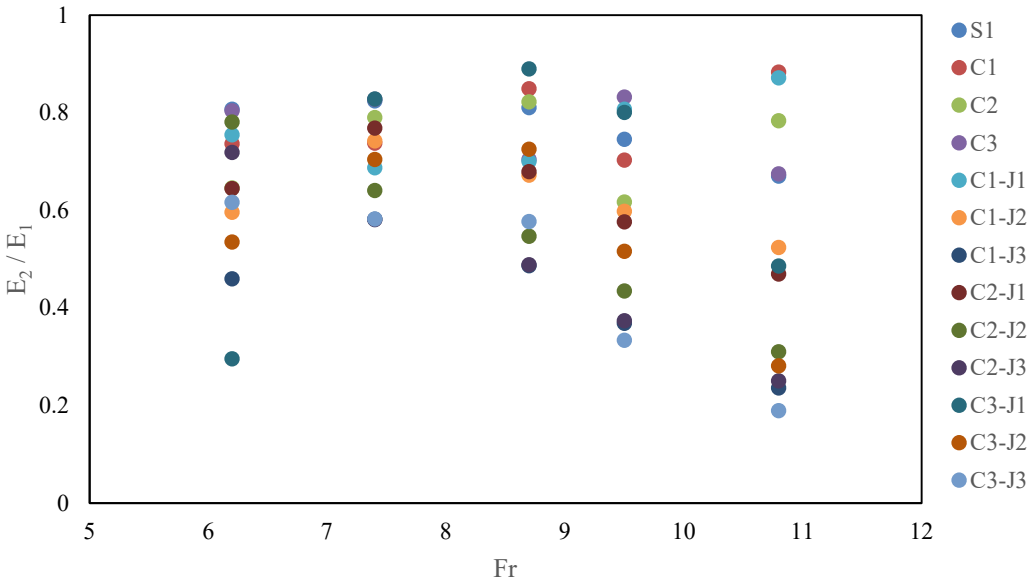


Fig. 10- Relative energy loss versus Froude number relative to each other

شکل۱۰- اتلاف انرژی نسبی در مقابل عدد فرود نسبت به یکدیگر

د) طول غلتاب

از پارامترهای مهم دیگری که در طراحی حوضچه‌های آرامش با اهمیت است، طول غلتاب می‌باشد؛ زیرا در بازه آن ضخامت قسمت دال را باید بیشتر لحاظ کرد و حفاظت بستر را تأمین کرد. پس از اهمیت بسزایی برخوردار است و شاخصی برای بررسی ویژگی‌های پرش هیدرولیکی خواهد بود. لذا در این پژوهش، طول غلتاب در شرایط مختلف اندازه‌گیری شد. از شکل (۹) استنباط می‌شود در دبی‌ها و اعداد فرود پایین، طول غلتاب جت مستغرق بیشتر از حالت پرش نوع گسسته و همین‌طور کلاسیک است و در دبی‌های بالاتر این میزان با یکدیگر برابر می‌شوند. میزان طول غلتاب در محدوده ۴۰ تا ۶۰ درصد و در بیشترین حالت تا ۶۳ درصد نسبت به‌حالت کلاسیک، کاهش داشته‌است. همچنین در شکل (۱۰)، میزان اتلاف انرژی نیز نمایش داده شده‌است که نقش مثبت این سیستم استهلاک را نشان می‌دهد.

 DOI: 10.22055/jise.2023.44341.2085

نتیجه‌گیری

سرعت بالای جریان عبوری در پایین‌دست سرریزها باعث تخریب بستر طبیعی رودخانه و کانال‌های آبرسانی می‌شود. با استفاده از اتلاف‌کننده‌های انرژی همانند حوضچه‌های آرامش، موانع و بلوک‌ها و واگرایی‌ها می‌توان انرژی جنبشی جریان را کاهش داد و به استهلاک انرژی و کاهش طول غلتاب و پرش پرداخت.

از آزمایش‌های صورت‌گرفته مشخص شد که میزان استهلاک انرژی در حوضچه‌هایی که با افزایش ابعاد بستر موج‌دار همراه هستند، حدودا ۱۵ درصد از حالات کوچک‌تر، بیشتر بوده و همچنین با اضافه‌شدن جت مستغرق مقابل این مقدار تا ۳۰ درصد نسبت حالات پرش نوع گسسته نیز می‌رسد. تزریق جت آب موجب اتلاف انرژی در دبی‌های بالاتر جت مستغرق در طول پرش به‌طور میانگین ۲۰ درصد بیشتر از پرش در حالات زبری‌هایی با ابعاد کوچکتر می‌باشد. طول نسبی پرش هیدرولیک با افزایش عدد فرود اولیه یعنی فاصله جت افزایش می‌یابد. بررسی‌های صورت‌گرفته بر روی طول غلتاب نشان‌دهنده این است که در دبی‌های کمتر، ۵۵ الی ۶۰ درصد کاهش داشته و با افزایش دبی، این تغییرات به ۴۰ درصد رسید. مقایسه داده‌های حاصل از این بررسی با دیگر تحقیقات پیشین نشان دادند که زبری موج‌دار تاثیر بسزایی در کنترل پرش و همچنین ترکیب آن با جت مستغرق موجب کاهش سرعت ثانویه و افزایش عمق مزدوج پرش در طول کمتری از مسیر می‌شود.

در مجموع، نتایج به‌دست‌آمده از پژوهش حاضر نشان داد که ترکیب زبری بستر و جت‌های مستغرق به‌عنوان یک سیستم اتلاف انرژی، الگوی جریان و ویژگی‌های اولیه پرش هیدرولیک را به‌طور قابل‌توجهی بهبود می‌بخشند. در نتیجه، استفاده از جت مستغرق می‌تواند به جلوگیری از آسیب شدید به سازه‌های هیدرولیکی و حفظ بستر رودخانه در پایین‌دست کمک کند.

تقدیر و تشکر

با تشکر از معاونت محترم پژوهشی و فنآوری دانشگاه شهید چمران اهواز به لحاظ فراهم نمودن اعتبار پژوهشی این تحقیق در قالب پایان نامه دکتری و نیز با سپاس از پرسنل محترم آزمایشگاه‌های دانشکده مهندسی آب و محیط زیست دانشگاه شهید چمران اهواز به دلیل کمک‌ها و مساعدت‌های فراوان در انجام این تحقیق.

تضاد منافع نویسندگان

نویسندگان این مقاله اعلام می‌دارند که هیچ گونه تضاد منافعی در خصوص نگارش و انتشار مطالب و نتایج این پژوهش ندارند.

منابع مالی

حمایت‌های مالی این تحقیق از محل اعتبار پژوهشی نویسنده دوم به شماره پژوهانه SCU.WH1402.260 صورت گرفته است.

دسترسی به داده‌ها

همه اطلاعات و نتایج در متن مقاله ارائه شده است

مشارکت نویسندگان

نویسنده اول: فتح‌الله داوری دهکردی، انجام آزمایش‌ها، نگارش اولیه مقاله.

نویسنده دوم: جواد احدیان، تدوین برنامه انجام آزمایش‌ها، کنترل داده‌ها، بررسی و تجزیه و تحلیل داده ها، اصلاح نهایی مقاله.

نویسنده سوم: محسن سجادی، کنترل داده‌ها، بررسی و تجزیه و تحلیل داده ها، بررسی درفت مقاله.

References

1- Aal, G.M.A., Sobeah, M., Helal, E. and El-Fooly, M., 2018. Improving energy dissipation on stepped spillways using breakers. *Ain Shams Engineering Journal*, *9*(4), pp.1887-1896. Doi: 10.1016/j.asej.2017.01.008

2- Abbaspour, A., Dalir, A.H., Farsadizadeh, D., Sadraddini, A.A., 2009. Effect of sinusoidal corrugated bed on hydraulic jump characteristics. *Journal of Hydro-Environment Research*, *3*(2), pp.109-117. Doi10.1016/j.jher.2009.05.003.

3- Ahadian, J., Varshosaz, A. 2018. 'Effect of the Floating Sphere Objects Flexible Bearing Length on the Characteristic of the Hydraulic Jump', *Journal of Water and Soil Conservation*, 25(1), pp. 297-308. doi: 10.22069/jwsc.2018.12965.2762. (In Persian).

4- Ahadiyan, J., Abbasi Chenari, S., Azizi Nadian, H., Katopodis, C., Valipour, M., Sajjadi, S. M., & Omidvarinia, M. 2024a. Sustainable systems engineering by CFD modeling of lateral intake flow with flexible gate operations to improve efficient water supply. *International Journal of Sediment Research*, 39(4), 629-642. https://doi.org/10.1016/j.ijsrc.2024.05.003.

5- Ahadiyan, J., Hakami, M., Shafaei Bajestan, M., Sajadi, S. M. 2024b. 'Laboratory investigation of the Effect of a Submerged Jet in a Wavy Bed with a Gradually Diverging Cross-section on the Characteristics of Asymmetric Hydraulic Jump', *Modares Civil Engineering Journal*, 24(1), pp. 151-160. doi: 10.22034/24.1.151. (In Persian).

6- Alhamid, A.A., 2004. S-jump characteristics on sloping basins. *Journal of Hydraulic Research*, 42(6), pp.657-662. Doi: 10.1080/00221686.2004.9628319.

7- Badizadegan, R., Esmaili, K., Faghfour Maghrebi, M., Saneie, M. 2011. 'Hydraulic Jump Properties in Irrigation Canals with Corrugated Bed', *Water and Soil*, 25(3), pp. 676-687. doi: 10.22067/jsw.v0i0.9702. (In Persian).

8- Badizadegan, R., Saneie, M. and Esmaili, K., 2014. Comparison Of Hydraulic Jump Characteristics On Different Types of Corrugated Beds. *Iranian Journal of Irrigation & Drainage*, 8(2), pp.220-232. (In Persian).

9- Bahrami, H., Ghomeshi, M., Kashefi Por, S.M., Salehi Neyshabouri, S.A.A., 2017. Investigation of the characteristics of the density current because of regime changes. *Journal of Marine Science and Technology*, 16(1), pp.112-121. Doi: 10.22113/jmst.2017.7773.1390. (In Persian).

10- Carollo, F.G., Ferro, V. and Pampalone, V., 2007. Hydraulic jumps on rough beds. *Journal of Hydraulic Engineering*, 133(9), pp.989-999. Doi: 10.1061/(ASCE)0733-9429(2007)133:9(989).

11- Chanson, H. 2015 *Energy Dissipation in Hydraulic Structures*. Taylor & Francis, London, UK.

12- Chen, J.G., Zhang, J.M., Xu, W.L. and Peng, Y., 2014. Characteristics of the velocity distribution in a hydraulic jump stilling basin with five parallel offset jets in a twin-layer configuration. *Journal of Hydraulic Engineering*, 140(2), pp.208-217. https://doi.org/10.1061/(ASCE)HY.1943-7900.0000817.

13- Chow, V.T., 1959. Open-channel hydraulics, *McGraw-Hill Book Company, 1959*. ISBN 07-010776-9.

14- Daneshfaraz, R., Norouzi, R., Ebadzadeh, P., Di Francesco, S., Abraham, J.P., 2023. Experimental study of the geometric shape and size of sill effects on the hydraulic performance of sluice gates. *Water*, *15*(2), p.314. https://doi.org/10.3390/w15020314.

15- Dastourani, M., Esmaili, K. and Khodashenas, S.R., 2016. The impact of water jet angle on the characteristics of hydraulic jump. *Journal of Water and Soil Conservation*, *23*(3), pp.225-239. https://doi.org/10.22069/JWFST.2016.3195. (In Persian).

16- Deng, J., Xu, W.L., Zhang, J. M., Qu, J., Y.Q. Yang, 2008. A new type of plunge pool—Multi horizontal submerged jets. *Science in China Series (E: Technological Sciences)*, 51(12): 2128-2141.

17- Ead, S.A. and Rajaratnam, N., 2002. Hydraulic jumps on corrugated beds. *Journal of Hydraulic Engineering*, *128*(7), pp.656-663. doi: 10.1061/(ASCE)0733-9429(2002)128:7(656).

18- Hager, W. H. and Bremen, R. 1989. Classical Hydraulic Jump: Sequent Depths Ratio. *Journal of Hydraulic Research IAHR*, Vol. 27, No. 5, PP. 566-585. Doi: 10.1080/00221688909499111.

19- Hager W.H., Bermen R., Kawagoshi N. 1990. Classic Hydraulic Jump: Length of Roller. Journal of Hydraulic Research, Pages 591-608. Doi: 10.1080/00221689009499048.

20- Hager, W. H. and Bremen, R. 1993. T-jump in abruptly expanding channel, *Journal of Hydraulic Research*, 31:1, 61-78. Doi: 10.1080/00221689309498860.

21- Haghdoost, M.R., Sajjadi, S.M., Fathi-Moghadam, M., Ahadiyan, J. 2022. Experimental study of spatial hydraulic jump stabilization using lateral jet flow. *Water Supply* 1 November 2022; 22 (11): 8337–8352. doi: https://doi.org/10.2166/ws.2022.376.

22- Hajialigol, S.; Ahadiyan, J.; Sajjadi, M.; Scorzini, A.R.; Di Bacco, M.; Shafai Bejestan, M. 2021. Cross-beams dissipators in abruptly expanding channels: Experimental analysis of the flow patterns. *Journal of Irrigation and Drainage Engineering,* 147, 06021012. Do: 10.1061/(ASCE)IR.1943-4774.0001622.

23- Hajialigol, S., Ahadiyan, J., Sajjadi, S.M., Hazi, M.A., Chadee, A.A., Nadian, H.A. and Kirby, J.T., 2024. Experimental analysis of turbulence measurements in a new dissipator structural (cross beams) in abruptly expanding channels. *Results in Engineering*, *21*, p.101829.https://doi.org/10.1016/j.rineng.2024.101829

24- Hajialigol, S., Ahadian, J., Sajadi, S. M., Scorzini, A. R., Shafai Bejestan, M. 2023. 'Laboratory study of crossbeam structural design in control of asymmetric S-type jump of sudden expansion sections', *Journal of Hydraulics*, 18(1), pp. 19-36. doi: 10.30482/jhyd.2022.333263.1595. (In Persian).

25- Hassanpour, N., Hosseinzadeh Dalir, A., Farsadizadeh, D., Gualtieri, C. 2017. An experimental study of hydraulic jump in a gradually expanding rectangular stilling basin with roughened bed. *Water*, 9, 945. Doi: 10.3390/w9120945.

26- Hassanpour, N.; Hosseinzadeh Dalir, A.; Bayon, A.; Abdollahpour, M. 2020. Pressure Fluctuations in the Spatial Hydraulic Jump in Stilling Basins with Different Expansion Ratios. *Water*, 13, 60. Doi: 10.3390/w13010060.

27- Helal, E., Abdelhaleem, F. S., Elshenawy, W. A. (2020). Numerical Assessment of the Performance of Bed Water Jets in Submerged Hydraulic Jumps. *Journal of Irrigation and Drainage Engineering*, 146, 04020014. Doi: 10.1061/(ASCE)IR.1943-4774.000147.

28- Herbrand, K. 1973. The Spatial Hydraulic Jump. *Journal of Hydraulic Research*. Pages 205-2018. Doi: 10.1080/00221687309499774.

29- Izadjoo F., Shafai Bajestan M., Bina M. 2005. Hydraulic Jump Characteristics on a Trapezoidal Corrugated Bed. *The Scientific Journal of Agriculture (SJA)*. Page(s) 107-122. Doi: 10.3923/jas.2007.1164.1169.

30- Izadjoo F., Shafai Bajestan M. 2007. Corrugated Bed Hydraulic Jump Stilling Basin. *Journal of Applied Sciences*. volume 7, issue 8, pp. 1164-1169.

31- Kazemianzadeh A., Shafai Bajestan M. 2008. Experimental study of the effect of roughness arrangement on hydraulic jump characteristics in a stilling basin, *3rd Iran Water Resources Management Conference*, Tabriz University, Iran.

32- Mahjoubi, A., Ahadiyan, J., Sajjadi, S. M., Kashefipour, S. M. 2024. 'Asymmetric hydraulic jump control in sudden expansion channels using a Jet system', *Iranian Journal of Soil and Water Research*, 55(10), pp. 1903-1920. doi: 10.22059/ijswr.2024.377718.669725. (In Persian).

33- Khedri-Mirghaed, P., Ahadiyan, J., Varshosaz, A. 2018. 'Effect of Suspended Anchored Spherical Energy Dissipator Blocks on Hydraulic Jump Characteristics', *Modares Civil Engineering journal*, 18(5), pp. 61-70. https://mcej.modares.ac.ir/article_12133.html?lang=en. (In Persian).

34- Matin, M. A., Alhamid, A. A., Negm, A. M. 1998. Prediction of Sequent Depth Ratio of Hydraulic Jump in Abruptly Expanding Channel, *Proceedings of International Conference on Hydro-Science and Engineering, Hydro-Science and Engineering ICHE98, Advances in Hydro-Science and Engineering*, 14 pages.

35- Matin M.A., Negm A.M. El-Said A.A, and Alhamid A.A. 2016. Prediction of Sequent Depth Ratio of Free Hydraulic Jump in Abruptly enlarged Channels. *Egyptian Journal for Engineering Sciences & Technology*. Pages 31-36.

36- Mohamed Ali, H.S., 1991. Effect of roughened-bed stilling basin on length of rectangular hydraulic jump. *Journal of Hydraulic Engineering*, *117*(1), pp.83-93. Doi: 10.1061/(ASCE)0733-9429(1991)117:1(83).

37- Sajjadi, S. M., Esmaeilzadeh Feridani, F., Ahadiyan, J. 2025. 'Numerical study of energy loss and S-type hydraulic jump length using cross beams as roughness in sudden expansion', *Advanced Technologies in Water Efficiency*, 5(1), pp. 78-97. doi: 10.22126/atwe.2025.11522.1148.

38- Shafai Bejestan M., Neisi K. 2008. 'Effects of Bed Roughness Shape on the Length of Hydraulic Jump', *Journal of Hydraulics*, 3(3), pp. 29-40. doi: 10.30482/jhyd.2008.85472 (In Persian).

39- Shafai Bajestan M., Neisi K. 2009. Effect Shape of Roughness on the Sequent Depth Ratio of Hydraulic Jump. *Water and Soil Science Journal*. Tabriz University, Iran. Pages 165- 176. (In Persian).

40- Sharoonizadeh, S., Ahadiyan, J., Scorzini, A.R., Di Bacco, M., Sajjadi, M. and Moghadam, M.F., 2021. Experimental analysis on the use of counterflow jets as a system for the stabilization of the spatial hydraulic jump. *Water*, *13*(18), p.2572. doi: /10.3390/w13182572.

41- Sharoonizadeh, S., Ahadiyan, J., Scorzini, A.R., De Bacco, M., Sajjadi, S. M., Fathi-Moghadam, M. 2022a. Turbulence characteristics of the flow resulting from the hydrodynamic interaction of multiple counter-flow jets in expanding channels. *Acta Mech* 233, 3867–3880 (2022). https://doi.org/10.1007/s00707-022-03250-2

42- Sharoonizadeh, S., Ahadiyan, J., Fathi Moghadam, M., Sajjadi, M., Di Bacco, M. 2022b. 'Experimental investigation on the characteristics of hydraulic jump in expanding channels with a water jet injection system', *Journal of Hydraulic Structures*, 7(4), pp. 58-75. doi: 10.22055/jhs.2022.40233.1203.

43- Tahmasbipour, M., Azizi Nadian, H., Ahadiyan, J., Oliveto, G., Sajjadi, S. M., & Kiyani, A. M. 2024. Experimental Investigation of T-Jump Stabilization Using Water Jets and Sinusoidal Corrugated Beds. *Water*, 16(23), 3513. https://doi.org/10.3390/w16233513.

44- Tokyay, N.D., 2012. Effect of channel bed corrugations on hydraulic jumps. *In Impacts of Global Climate Change* (pp. 1-9). https://doi.org/10.1061/40792(173)408.

Shahid Chamran University of Ahvaz

Irrigation Sciences and Engineering (JISE)
Vol. 48, No. 3, Fall 2025, p. 41-53

Research Paper

Journal homepage: https://jise.scu.ac.ir

EXTENDED ABSTRACT

Investigation DEA (Data Envelopment Analysis) Window application in the management processes of agricultural water consumptions (case study: Khozestan province)

D. Modhej[1*] and A. Dahimavi[2]

1-Corresponding Author Assistant Professor, Departments of Mathematics, Sosangerd Branch, Islamic Azad University, Sosangerd, Iran (modhej83@gmail.com)*
2-Postdoctoral graduate of Water Resources, Khozestan Water and Power Organization.

ARTICLE INFO

Artlcle history:
Received: 20 June 2024
Revised: 27 October 2024
Accepted: 29 October 2024
Available online: 05 November 2025

Keywords:
Efficiency, Agricultural Water Exploitation Systems, Irrigation Networks.

TO CITE THIS ARTICLE:

Modhej, D., Dahimavi, A. 2025. 'Investigation DEA (Data Envelopment Analysis) Window application in the management processes of agricultural water consumptions (case study: Khozestan province)', *Irrigation Sciences and Engineering*, 48(3), pp. 41-53. doi: 10.22055/jise.2024.46611.2123.

Abstract

The agricultural sector in Iran is based on exploitation systems, so analyzing the efficiency of these systems is of particular importance. In the present study, 10 active exploitation systems in Khuzestan during the cropping seasons spanning from 2015 to 2022 are evaluated using the windowed data envelopment analysis (DEA) method. DEA window analysis is based on a dynamic perspective, regarding the same decision-making unit (DMU) in different periods of time as entirely different DMUs. The findings indicate that during the agricultural seasons of 2015 to 2022, the Nahieh Shomal exploitation system achieved the highest average efficiency, recording a value of 0.971. The exploitation system of Mehr Omidgaran Qaleh Madreseh exhibited the lowest average efficiency at 0.423. In addition, the results showed a consistent decrease in the average efficiency of the Ferdos and Keshtgaran exploitation systems each year.

Introduction

Iran is one of the direst areas in the world, and its water deficiency is considered the main obstacle to agricultural development. Khozestan province is located in the southwest of Iran. 33% of the total surface water resources of the country flow in this province from the Karun, Dez, Karkheh, Jarahi, and Hendijan rivers. In this province, 445000 hectares of major irrigation and drainage network and 338000 of subnetwork are operated and managed by a variety of exploitation systems. So Management processes study of water resources in khozestan province is so significant to utilize the optimal of resources and prevent the waste of them.

Methods

Data Envelopment Analysis (DEA) is a management tool employed to estimate the efficiency of number of decision making units (DMU's). DEA can be used to calculate the efficiency measures, and has a wide

applicability in various service and industry sectors. The first model in DEA was presented in the CCR paper (after Charnes, Cooper and Rhodes1978) to produce the efficiency of DMUs under constant returns to scale (CRS) assumption. Subsequently, Banker et al. (1984) proposed a variable returns to scale version of the CCR model which was named BCC model. Since in real situations, variable returns to scale is more flexible, so in this study, the BCC model is used. Suppose there is a set of n peer DMUs, $\{DMU_j : j = 1,K\ ,n\}$ each using m inputs to produce s outputs and also assume $\mathbf{x}_j = (x_{1j}, x_{2j},..., x_{mj})^T$, $\mathbf{y}_j = (y_{1j}, y_{2j},..., y_{sj})^T$ be the input and output vectors for DMU_j, respectively, such that $\mathbf{x}_j \geq 0, \mathbf{x}_j \neq 0$ and $\mathbf{y}_j \geq 0, \mathbf{y}_j \neq 0$. The input-oriented and output-oriented BCC models evaluate the efficiency of DMU_0 by solving the following linear programs respectively:

$$
\begin{aligned}
&\theta^* = \min \theta \\
&\text{s.t.} \quad \sum_{j=1}^{n} \lambda_j x_{ij} \leq \theta x_{io}, \quad i = 1,K\ ,m \\
&\qquad \sum_{j=1}^{n} \lambda_j y_{rj} \geq y_{ro}, \quad r = 1,K\ ,s \qquad (1) \\
&\qquad \sum_{j=1}^{n} \lambda_j = 1 \\
&\qquad \lambda_j \geq 0, \qquad j = 1, 2,..., n
\end{aligned}
$$

$$
\begin{aligned}
&\varphi^* = \max \varphi \\
&\text{s.t.} \quad \sum_{j=1}^{n} \lambda_j x_{ij} \leq x_{io}, \quad i = 1,K\ ,m \\
&\qquad \sum_{j=1}^{n} \lambda_j y_{rj} \geq \varphi y_{ro}, \quad r = 1,K\ ,s \qquad (2) \\
&\qquad \sum_{j=1}^{n} \lambda_j = 1 \\
&\qquad \lambda_j \geq 0, \qquad j = 1, 2,..., n
\end{aligned}
$$

The choice of input- or output-oriented models depends upon the production process characterizing the firm (i.e. minimize the use of inputs to produce a given level of output or maximize the level of output given levels of the inputs). DEA window analysis is based on a dynamic perspective, regarding the same DMU in different periods of time as entirely different DMUs (Charnes et al. (1985)). The benefit of this method is to describe the dynamic change of the efficiency of each DMU comprehensively, both horizontally and vertically. More importantly, the number of DMU is increased in this method; hence, it enhances the discriminating power by increasing the number of DMUs when a limited number of DMUs is available. Consider a set of N $(n = 1, 2,..., N)$ DMUs in $T(t = 1, 2,..., T)$ period of time. Every DMU has m kinds of input and s kinds of output. Let DMU_t^n denotes the level of input or output for DMU n in t period of time, then input vector x_t^n and output vector y_t^n will be presented as: $x_t^n = (x_{1t}^n, x_{2t}^n, ..., x_{mt}^n)^T, y_t^n = (y_{1t}^n, y_{2t}^n, ..., y_{st}^n)^T$ Consider the window starts at the time point of $k(1 \leq k \leq T)$, and the window width is $w(1 \leq k \leq T - k)$, then input X_{kw} and output Y_{kw} of each window kw will be presented as:

$$X_{kw} = \begin{bmatrix} x_k^1 \\ x_k^2 \\ \dots \\ x_k^N \\ x_{k+1}^1 \\ x_{k+1}^2 \\ \dots \\ x_{k+1}^N \\ \dots \\ x_{k+w}^1 \\ x_{k+w}^2 \\ \dots \\ x_{k+w}^N \end{bmatrix}^T , Y_{kw} = \begin{bmatrix} y_k^1 \\ y_k^2 \\ \dots \\ y_k^N \\ y_{k+1}^1 \\ y_{k+1}^2 \\ \dots \\ y_{k+1}^N \\ \dots \\ y_{k+w}^1 \\ y_{k+w}^2 \\ \dots \\ y_{k+w}^N \end{bmatrix}^T$$

The input-oriented BCC model of DEA window problem for DMU_t^k is given by solving the following linear program:

$$\begin{aligned} & \theta^* = \min \theta \\ \text{s.t.} \quad & X_{kw}\lambda \le \theta x_t^n, \quad t = 1,K\ ,T \\ & Y_{kw}\lambda \ge y_t^n, \quad t = 1,K\ ,T \\ & e\lambda = 1 \\ & \lambda \ge \mathbf{0} \end{aligned} \tag{3}$$

Where $\lambda = (\lambda_1, \lambda_2, ..., \lambda_N)$ and $e = (1,1,...,1)$. . And the output-oriented BCC model is as follows:

$$\begin{aligned} & \varphi^* = \max \varphi \\ \text{s.t.} \quad & X_{kw}\lambda \le x_t^n, \quad t = 1,K\ ,T \\ & Y_{kw}\lambda \ge \varphi y_t^n, \quad t = 1,K\ ,T \\ & e\lambda = 1 \\ & \lambda \ge \mathbf{0} \end{aligned} \tag{4}$$

Results

After analyzing 180 models, the derived values concerning the average efficiency of each window and the yearly averages serve as the metrics for evaluating the efficacy of 10 active exploitation systems of Khuzestan during the cropping seasons spanning from 2015 to 2022.

The average window efficiency values for each operational system throughout the assessment period serve as the foundation for analyzing and evaluating system performance.

The findings indicate that during the agricultural seasons of 2015 to 2022, the exploitation system of Nahieh Shomal achieved the highest average efficiency, recording a value of 0.971. The exploitation system of Mehr Omidgaran Qaleh Madreseh, exhibited the lowest average efficiency at 0.423.

Examining the annual average efficiency reveals that only the exploitation system of Nahieh Shomal attained full efficiency in 2018. Conversely, the exploitation system of Mehr Omidgaran of Qaleh Madreseh in 2017 registered the lowest average efficiency at 0.370. The highest and lowest average efficiency values for each year for Karkheh & Shavoor exploitation system were 0.960 and 0.723, respectively. For the Goor sephid exploitation system, these values were 0.973 and 0.740, and for the Karoon Bozorg exploitation system, they were 0.963 and 0.740.

Results showed a consistent decrease in the average efficiency of Ferdos and Keshtgaran exploitation systems each year. This decline can be attributed to factors such as inadequate production efficiency, delayed agricultural water supply, improper irrigation cycles, and network inefficiencies.

Conclusion

The primary factor contributing to the lowest average efficiency in production cooperatives' exploitation systems is their reliance on government support and a government-oriented structure.
The substantial disparity between the highest and the lowest average efficiencies of these systems each year underscores an imbalance in resource allocation, such as annual budget distribution, for exploitation, maintenance, and repairs of irrigation networks.

Acknowledgment
The authors would like to thank the cooperation of the Khuzestan Water and Power Authority Co.

Conflict of Interest
The authors declared no potential conflicts of interest concerning the research, authorship, and publication of this article. Confirmation.

Funding
The authors received no financial support for the research, authorship, and publication of this article.

Data Availability Statements
The datasets generated and/or analyzed during the current study are available from the corresponding author on reasonable request.

Authors' contribution
First Author: Dalal Modhej, Data analysis and writing the article
Second Author: Adel Dahimavi, Checking the results

References
1- Banker, R.D., Charnes, A. and Cooper, W.W. 1984. Some models for estimating technical and scale inefficiencies in data envelopment analysis, *Management Science*, 30:pp.1078–1092. DOI:10.1287/mnsc.30.9.1078.

2- Charnes, A., Cooper, W.W. and Rhodes, E. 1978. Measuring the efficiency of decision making units, *European Journal of Operational Research*, 2:pp.429–444.DOI:10.1016/0377-2217(78)90138-8.

3- Charnes, A., Clark C.T., Cooper W.W., and Golany B. 1985. A developmental study of data envelopment analysis in measuring the efficiency of maintenance units in the U.S. Air Forces. *Annals of Operations Research*, 2(1), pp.95–112. DOI:10.1007/BF0187.

© 2025 Shahid Chamran Universiry of Ahvaz, Ahvaz, Iran. This article is an open access article distributed under the terms and conditions of the Creative Commons Attribution 4.0 International (CC BY 4.0 license) (http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/).

علوم و مهندسی آبیاری جلد ۴۸، شماره‌ی۳، پاییز ۱٤۰٤، مقاله پژوهشی، ص. ۵۳-٤۱

بررسی کاربرد تحلیل پوششی داده‌های پنجره‌ای در فرایندهای مدیریتی مصارف آب کشاورزی (مطالعه موردی: استان خوزستان)

دلال مدحج[۱*] و عادل دحیماوی[۲]

۱*- نویسنده مسئول، استادیار ،گروه ریاضی، واحد سوسنگرد، دانشگاه آزاد اسلامی، سوسنگرد، ایران modhej83@gmail.com

۲-دانش آموخته پسا دکتری منابع آب، سازمان آب و برق خوزستان.

دریافت: ۱۴۰۳/۰/۳۱ بازنگری: ۱۴۰۳/۰۸/۰۶ پذیرش: ۱۴۰۳/۰۸/۰۸ انتشار: ۱۴۰۴/۰۸/۱۴

چکیده

بخش کشاورزی در ایران، مبتنی بر نظام‌های بهره‌برداری است. سنجش عملکرد و تحلیل کارایی نظام‌های بهره‌برداری برای شناسایی نقاط ضعف و قوت، استفاده بهینه از منابع و عوامل تولید و جلوگیری از هدر رفتن منابع از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است. در پژوهش حاضر، ۱۰ نوع نظام بهره‌برداری فعال در محدوده شبکه‌های آبیاری خوزستان در بازه زمانی ۱٤۰۱-۱۳۹٤ با روش تحلیل پوششی داده‌های پنجره‌ای مورد ارزیابی قرار گرفتند. روش تحلیل پوششی داده‌های پنجره‌ای روشی است که امکان ارزیابی در طول زمان را فراهم می‌آورد. نتایج نشان داد بالاترین میانگین کارایی برای نظام بهره‌برداری ناحیه شمال مربوط به شرکت‌های بهره‌برداری شبکه‌های آبیاری و زهکشی با مقدار ۰/۹۷۱ و کمترین میانگین کارایی مربوط به نظام بهره‌برداری مهر امیدگران قلعه مدرسه از تعاونی‌های تولید با مقدار ۰/٤۲۳ می‌باشد. از سوی یگر میانگین کارایی هر سال نظام‌های بهره‌برداری فردوس و کشتگران روند کاهشی داشتند.

کلید واژه‌ها: کارایی، نظام‌های بهره‌برداری آب، شبکه‌های آبیاری.

مقدمه

امروزه در مباحث پایداری منابع طبیعی، موضوعات مرتبط با منابع آب و چالش‌هایی که در زمینه مدیریت آن‌ها وجود دارد، از اهمیت ویژه‌ای برخوردارند. در بسیاری از نقاط جهان، بهره‌برداری بی‌رویه از منابع آب، پایداری اجتماعی و اکولوژیکی را تهدید می‌کند. ایران در یکی از خشک‌ترین مناطق جهان است و کمبود آب در آن، مهم‌ترین تنگنای توسعه کشاورزی محسوب می‌شود. از حدود ۳۷ میلیون هکتار از اراضی مستعد کشاورزی به‌دلیل محدودیت منابع آب فقط ۱۹/۵میلیون هکتار از اراضی تحت کشت آبی است. از این رو بهبود مدیریت مصرف منابع آب سطحی و زیرزمینی، گامی مهم و مؤثر در مصرف بهینه آب و افزایش راندمان در آبیاری و تولید محصولات کشاورزی به‌شمار می‌آید (Keshavarz and Dehghani Sanij, 2011). نظام‌های بهره‌برداری آب کشاورزی شامل مجموعه‌ای از فنون و رویه‌های قانونی یا عرفی در زمینه‌های تأمین، انتقال و توزیع آب و ساماندهی مناسب عوامل انسانی و نیروی کار در این حوزه است. در این نظام‌ها ، بهره‌برداری از منابع آب کشاورزی شامل برنامه‌ریزی برای احداث سازه‌های انتقال آب تا نقطه مصرف و سطح مدیریت مصرف برای استفاده بهینه آب در سطح مزارع می‌باشد. نظام بهره‌برداری آب کشاورزی هم منافع دولت و هم منافع کشاورزان را در پی دارد. وجود این نظام برای دولت منجر به کاهش پرداخت یارانه برای آبیاری شده و برای کشاورزان نیز باعث افزایش حس مالکیت و بهبود خدمات آبیاری می‌شود. در حقیقت هدف نهایی از ایجاد نظام بهره‌برداری آب کشاورزی دستیابی به بهره‌وری، عدالت و پایداری است. در این نظام‌ها، بهره‌وری زمانی حاصل می‌شود که منابع آب بدون هیچ‌گونه اتلافی به درستی مورد استفاده قرار گیرد و عدالت بدان معناست که آب به نسبت بین مصرف‌کنندگان توزیع شود. بررسی‌های انجام شده در زمینه تاریخ تحولات کشاورزی ایران، این واقعیت را نشان می‌دهد که نقش نظام‌های بهره‌برداری در توسعه کشاورزی کشور از اهمیت بالایی برخوردار است و همواره یکی از مسائل بنیادین کشاورزی ایران در به‌کارگیری منابع آب و خاک به شمار می‌آید (Alizadeh and Hatami Nezhad,2015).

استان خوزستان با برخورداری از جریان پنج رودخانه بزرگ و پرآب کارون، دز، کرخه، جراحی و هندیجان حدود ۳۳ درصد کل منابع آب سطحی کشور را به خود اختصاص داده است. علاوه بر آن، نزدیک به ۴/۳ میلیون هکتار اراضی قابل کشت کشور در این استان قرار دارد. این موارد، استان خوزستان را به‌عنوان یک قطب مهم کشاورزی در تولید محصولات زراعی و اقتصادی کشور مطرح کرده و در این خصوص نقش و جایگاه ویژه‌ای دارد. از سوی دیگر، در کنار گسترش روز افزون فعالیت‌های زراعی در خوزستان، بهره‌برداری از منابع آب از تنوع مختلفی برخوردار بوده و نظام‌های بهره‌برداری متنوعی را در این استان به وجود آورده (Dahimavi et al., 2021). بررسی‌های به‌عمل آمده، نشان می‌دهد که عملکرد این نظام‌ها بنا به دلایلی مانند نقص در طراحی و اجرا و نبود مدیریت

DOI: 10.22055/jise.2024.46611.2123

مناسب، کمتر از حد انتظار می‌باشد (Dahimavi et al., 2018a). ارزیابی کارایی نظام‌های بهره‌برداری این امکان را فراهم می‌سازد که نقاط ضعف و قوت این نظام‌ها در به‌کارگیری و تحقیق منابع و امکانات شناسائی و در ادامه با اتخاذ سیاست مناسب وضعیت موجود نظام‌های بهره‌برداری را بهبود بخشید.

Ul Hassan (2011) در تحقیقی با عنوان تجزیه و تحلیل دستاوردهای به‌دست آمده از تجارب حکمرانی آب در مرکز، جنوب و غرب آسیا، با به‌کارگیری یک مدل مفهومی و استفاده از مدل‌های تحقیق در عملیات، به بررسی رابطه بین مفهوم حکمرانی و مدیریت آبیاری پرداخت و نتیجه‌گیری نمود که حکمرانی ضعیف آب، نتیجه طراحی ضعیف فرآیندهاست. Narayan (1995) با بررسی ۱۲۱ نظام‌بهرهبرداری آب بران در آسیا، آفریقا و آمریکای لاتین دریافت که افزایش مهارت‌ها و آگاهی‌های گروه‌های بهره‌بردار و توجه به ویژگی‌های اقتصادی- اجتماعی کشاورزان و تقویت سازمان‌ها و رهبران محلی در شکل‌گیری و تداوم مدیریت مشارکتی آبیاری تأثیرگذار است. Rogers و Hall (2003) در مقاله‌ای تحت عنوان حکمرانی آب در کشورهای امریکای لاتین و حوزه دریای کارائیپ با یک برش عرضی به بررسی مبانی نظری و تجربی همچنین وضعیت کلی حکمرانی آب در پنج کشور از کشورهای آمریکای لاتین پرداخته و ضمن بررسی میزان همبستگی بین شاخص‌های تأثیرگذار در طراحی نهادهای محلی مدیریت منابع آب در آن کشورها، نتیجه گرفتند که اصلاحات نهادی در قالب تدوین قوانین مناسب، از اصلاحات اقتصادی و تأمین سرمایه مهم‌تر است. Huang et al (2010) در مطالعه‌ای در استان‌های شمالی چین و در حوزه آبخور رود زرد، عملکرد سه نظام بهره‌برداری از منابع آب شامل نظام بهره‌برداری آب‌بران، پیمانکاری‌های آبیاری و نظام- بهره‌برداری آب‌بران سنتی آبیاری را با استفاده از پنج شاخص شامل نگهداری کانال، بهره‌برداری از دریچه‌ها، هماهنگی تحویل آب، جمع‌آوری آب‌بهاء و حل منازعات مقایسه نموده و عملکرد اصلاحات نهادی و پایداری مالی و فیزیکی سیستم‌های آبیاری را مورد بررسی و ارزیابی قرار دادند. آن‌ها روستاها را بر حسب میزان کمبود آب، نوع منبع آب، ویژگی سیستم کانال، خصوصیات مصرف‌کنندگان آب و ویژگی‌های اجتماعی و اقتصادی آن به طبقات مختلف تقسیم کردند و با استفاده از روش نمونه‌گیری طبقه‌بندی تصادفی به انتخاب روستاهای نمونه در هر استان پرداختند. نتایج نشان داد که نظام بهره‌برداری آب‌بران از لحاظ هزینه‌های نگهداری، تحویل به موقع آب و نرخ جمع‌آوری آب‌بهاء، نسبت به تشکل سنتی آبیاری و شیوه پیمانکاری آبیاری بهتر بوده و پایداری بیشتری داشته‌اند. Dahimavi et al. (2018b) با استفاده از نظرات کارگروه تخصصی ۳۲ نفره کارشناسان آب و خاک و به‌کارگیری روش دلفی، شاخص‌های معرف اصول حکمرانی آب کشاورزی در شبکه‌های آبیاری و زهکشی استان خوزستان را توسعه دادند. بر اساس نتایج تحقیق، شاخص مدیریت منابع آب، شاخص دریافت آب بهای زراعی ، شاخص راندمان آبیاری، شاخص آماده به کار بودن دریچه‌ها ، شاخص اراضی زهکشی نشده و شاخص رضایتمندی از مدیریت توزیع آب، از درجه اهمیت بیشتری نسبت به سایر شاخص‌ها، برخوردار بودند. Dahimavi et al. (2021) در تحقیقی تحت عنوان سنجش میزان تاب آوری نظام‌های بهره‌برداری از آب کشاورزی به موضوع تأثیر پذیری عملکرد این نظام‌ها تحت شرایط خاص اقلیمی پرداخته و نتیجه‌گیری کردند که مدیریت مطلوب و علمی، عاملی اساسی در ارتقای تاب آوری هر یک از نظام‌ها در برابر شرایط خاص محسوب می‌گردد.Modhej و Dahimavi (2021) کارایی ۳۳ نظام بهره‌برداری را با استفاده از روش تحلیل پوششی داده‌ها طی فصل زراعی ۱۳۹۸-۱۳۹۷در محدوده شبکه های آبیاری خوزستان مورد بررسی قرار دادند. روش جمع آوری اطلاعات به‌صورت تمام شماری، بهره‌گیری از نظرات متخصصین حوزه آب و استفاده از اطلاعات دسته دوم (اطلاعات سازمانی) انجام گرفت.آن‌ها به‌واسطه تعدد عوامل مؤثر بر عملکرد نظام‌های بهره- برداری، از شاخص‌های ترکیبی استفاده کردند. بر پایه نتایج حاصله، از بین نظام‌های آب کشاورزی مورد ارزیابی، تمام شرکت‌های زیرمجموعه نظام بهره‌برداری از منابع آب کشاورزی شرکت‌های خصوصی کارا می‌باشند. از سویی دیگر، نظام بهره‌برداری مارون از شرکت‌های بهره‌برداری از شبکه‌های آبیاری و زهکشی، و نظام بهره‌برداری کشتگران از تعاونی‌های تولید با مقدار ۰/۷۳ پایین‌ترین سطح کارایی را به‌دست آوردند.

این تحقیق با هدف کاربرد تحلیل پوششی داده‌های پنجره‌ای در ارزیابی کارایی ۱۰ نوع نظام بهره‌برداری آب کشاورزی فعال در استان خوزستان طی سال‌های زراعی ۱۴۰۱-۱۳۹۴ در دستور کار قرار گرفته است. در این روش هر نظام بهره‌برداری در هر دوره زمانی به‌عنوان یک واحد تصمیم گیرنده مستقل در نظر گرفته می‌شود و عملکرد هر نظام در یک دوره خاص با عملکرد خود آن نظام در سایر دوره‌ها و عملکرد نظام‌های دیگر در دوره زمانی معین، مورد مقایسه قرار می‌گیرد. در ادامه ابتدا روش مورد استفاده و سپس نتایج ارائه می‌شوند.

مواد و روش‌ها

به منظور اندازه‌گیری درجه کارایی از دو روش پارامتریک و غیر پارامتریک استفاده می‌شود. روش پارامتریک بیشتر بر پایه اصول اقتصاد سنجی است و در اقتصاد مورد استفاده قرار می‌گیرد. در این روش یک تابع ریاضی برای تولید (هزینه) در نظر گرفته می‌شود که بر اساس آن با به‌کارگیری متغیرهای مستقل، متغیر وابسته تخمین زده می‌شود. برای تخمین پارامترهای تابع تولید از مشاهدات تجربی یا روش‌های برآورد توابع در آمار و اقتصاد سنجی استفاده می‌شود. در نهایت، با توجه به تابع مذکور کارایی محاسبه می‌گردد. در روش غیر پارامتریک، بهترین عملکرد در یک نمونه با استفاده از مدل برنامه‌ریزی خطی شناسایی می‌شود و کارایی بر اساس تفاوت‌های میان مقادیر مشاهده شده و بهترین عملکرد اندازه گیری می‌گردد. روش غیر پارامتریک را می‌توان ساده‌ترین روش تخمین کارایی تلقی

نمود زیرا در این روش نیاز به تصریح تابع نبوده و اندازه‌گیری کارایی با اطلاعات اندک امکان پذیر است. روش غیرپارامتریک برای تخمین کارایی اولین بار توسط Farrell (1957) مطرح شد. موردی که فارل برای اندازه‌گیری کارایی مد نظر قرار داده بود، شامل یک ورودی و یک خروجی بود. او با استفاده از روش غیرپارامتری، کارایی بخش کشاورزی آمریکا نسبت به سایر کشورها را به‌دست آورد. با این وجود، او در ارائه روشی که دربرگیرنده ورودی‌ها و خروجی‌های متعدد باشد، موفق نبود.

Charnes et al. (1978) دیدگاه فارل را توسعه دادند و الگویی خلاقانه را ارائه کردند که توانائی اندازه‌گیری کارایی واحدهای تصمیم‌گیرنده با ورودی‌ها و خروجی‌های متعدد را داشت. این مدل به CCRکه از حروف نام سه فرد Charnes، Cooper و Rhodes ،تشکیل شده است، معروف گردید.

Banker et al. (1984) مدل BCC را ارائه کردند. مدل BCC، از حروف نام سه فرد Banker، Charnes و Cooper تشکیل شده است.

مدل‌های CCR و BCC مدل‌های اساسی درتحلیل پوششی داده‌ها است، تفاوت این دومدل درنوع بازده به مقیاس آن‌ها است. از آن‌جا که تحلیل پوششی داده‌ها یک روش مدیریتی است که علاوه بر سنجش کارایی نسبی، راهکارهای مدیریتی نیز ارائه می‌دهد لذا این روش به یکی از حوزه‌های فعال تحقیقاتی در اندازه‌گیری کارایی تبدیل شده است. در ادامه رویکرد تحلیل پوششی داده‌ها شرح داده می‌شود.

روش تحلیل پوششی داده‌ها

تحلیل پوششی داده‌ها یک روش ریاضی برای ارزیابی کارایی مجموعه ای از واحدهای تصمیم گیرنده Decision Making Unit (DMU) است. در این روش واحدهای تصمیم‌گیری به واحدهای کارا و ناکارا دسته‌بندی می‌شوند و منبع و مقدار ناکارایی برای هر واحد مشخص می‌گردد. تحلیل پوششی داده‌ها از جمله روش‌هایی است که علاوه بر سنجش وارزیابی کارایی واحدهای تصمیم گیرنده، راه‌های افزایش آن‌ها را نیز ارائه می‌دهد. مدل‌های تحلیل پوششی داده‌ها برای ارزیابی کارایی واحدهای تحت بررسی از دو رویکرد مجزا ماهیت ورودی و خروجی استفاده می‌کنند. مدل با ماهیت ورودی، با ثابت نگه داشتن سطح خروجی‌ها، ورودی‌ها را تا حد امکان کاهش می‌دهد. حال آن‌که در مدل با ماهیت خروجی، بدون تغییر در میزان ورودی‌ها، خروجی‌ها به حداکثر مقدار ممکن می‌رسند. انتخاب ماهیت ورودی و خروجی بر اساس میزان کنترل مدیریت بر هر یک از ورودی‌ها و خروجی‌ها تعیین می‌شود. یکی از توانایی‌های تحلیل پوششی داده‌ها، به‌کارگیری مدل‌های مختلف متناظر با بازده به مقیاس‌های متفاوت است. مدل CCR بازده به مقیاس واحدهای تصمیم گیرنده را ثابت فرض می‌کند. در بازده به مقیاس متغیر افزایش در ورودی‌ها به افزایش نامتناسب در خروجی‌ها منجر می‌شود. مدل BCC بازده به مقیاس‌های واحدهای تصمیم گیرنده را متغیر فرض می‌کند. در عمل فرض بازدهی ثابت نسبت به مقیاس به‌علت خاص بودن در بسیاری از واحدهای تصمیم‌گیری قابل اتکاء نمی‌باشد، در ضمن استفاده از بازده به مقیاس متغیر موجب ،تحلیل بسیار دقیق‌تری نسبت به بازده به مقیاس ثابت می‌شود. لذا در پژوهش حاضر از مدل BCC برای ارائه تحلیل دقیق استفاده می شود. فرض کنیم n واحد تصمیم گیرنده موجود باشد که با $\{DMU_j : j=1,\dots,n\}$ نشان خواهیم داد .به‌طوری‌که $\mathbf{x}_j=(x_{1j},x_{2j},\dots,x_{mj})^T$ نشان دهنده بردار ورودی و $\mathbf{y}_j=(y_{1j},y_{2j},\dots,y_{sj})^T$، نشان دهنده بردار خروجی است. در ضمن $\mathbf{x}_j\geq 0,\mathbf{x}_j\neq 0$ و $\mathbf{y}_j\geq 0,\mathbf{y}_j\neq 0$. مدل BCC با ماهیت ورودی، کارایی واحد تصمیم گیرنده تحت بررسی، DMU_o، را با حل مدل زیر ارزیابی می‌کند.

$$\begin{aligned}&\theta^*=min\,\theta\\&\text{s.t.}\sum_{j=1}^{n}\lambda_j x_{ij}\leq\theta x_{io},i=1,\dots,m\\&\sum_{j=1}^{n}\lambda_j y_{rj}\geq y_{ro},r=1,\dots,s\\&\sum_{j=1}^{n}\lambda_j=1\\&\lambda_j\geq 0,j=1,2,\dots,n\end{aligned}\qquad(۱)$$

کارایی واحد DMU_o تحت مدل BCC با ماهیت خروجی از حل مدل زیر به‌دست می‌آید:

$$\begin{aligned}&\varphi^*=max\,\varphi\\&\text{s.t.}\sum_{j=1}^{n}\lambda_j x_{ij}\leq x_{io},i=1,\dots,m\\&\sum_{j=1}^{n}\lambda_j y_{rj}\geq\varphi\, y_{ro},r=1,\dots,s\\&\sum_{j=1}^{n}\lambda_j=1\\&\lambda_j\geq 0,j=1,2,\dots,n\end{aligned}\qquad(۲)$$

در این مدل $\varphi^*=1$ $(\theta^*=1)$ بدین مفهوم است که DMU_o کارا است و در صورتی که $\varphi^*>1$ $(\theta^*<1)$ آن‌گاه DMU_o ناکارا است.

DOI: 10.22055/jise.2024.46611.2123

روش تحلیل پوششی داده‌های پنجره‌ای

در مدل‌های تحلیل پوششی داده‌ها میزان کارایی در شرایط ایستا اندازه‌گیری می‌شوند و لذا یک واحد تصمیم گیرنده با همه واحدهای دیگر در یک دوره زمانی یکسان مورد ارزیابی قرار می‌گیرد. در مقابل روش تحلیل پنجره‌ای بر اساس میانگین متحرک، عملکرد و روند تغییرات یک واحد تصمیم گیرنده را در طول زمان مورد بررسی قرار می‌دهد. روش تحلیل پنجره‌ای برای اولین بار توسط Charnes et al (1985) مطرح شد. در این روش هر واحد تصمیم گیرنده در یک دوره زمانی متفاوت به‌عنوان یک واحد تصمیم گیری مستقل با هویتی متفاوت در نظر گرفته می‌شود و عملکرد یک واحد در یک دوره زمانی خاص در مقابل عملکرد خود آن واحد در سایر دوره‌ها علاوه بر عملکرد واحدهای دیگر در دوره‌های زمانی معین مورد ارزیابی قرار می‌گیرد. این امر سبب افزایش داده‌های مورد بررسی در تجزیه و تحلیل می‌شود و لذا این وضعیت در هنگام مطالعه نمونه‌های با اندازه کوچک مفید است. تغییر عرض پنجره (یعنی تعداد دوره‌های زمانی) نشان دهنده طیفی از تحلیل‌های همزمان (شامل مشاهدات یک دوره زمانی) به تحلیل‌های مقطعی (شامل مشاهدات تمام دوره‌های مورد مطالعه) می‌باشد (Sengupta, 1995). تحلیل پنجره‌ای می‌تواند حالت خاصی از یک تحلیل متوالی باشد. با این حال در تحلیل متوالی فرض می‌شود آن‌چه در گذشته عملی بوده است، عملی باقی می‌ماند و بنابراین تمام مشاهدات قبلی می‌ماند و بنابراین تمام مشاهدات قبلی را شامل می‌شود. باید توجه کرد در این روش عملکرد تمام واحدها در یک پنجره نسبت به همدیگر ارزیابی می‌شوند و لذا به‌طور ضمنی فرض می‌شود که هیچ تغییر فنی در هیچ کدام از پنجره‌ها وجود ندارد. این مطلب یک مسئله کلی در روش تحلیل پنجره‌ای است. با کاهش عرض پنجره این مشکل تا حدی حل می‌شود و جهت اعتبار بخشیدن به تحلیل پنجره‌ای، عرض پنجره باید طوری انتخاب شود که چشم پوشی از تغییرات فنی منطقی باشد. هر چند که در مورد تعریف و اندازه عرض پنجره هیچ نوع نظریه و پشتوانه اساسی وجود ندارد. برای شرح فرمولی این روش، فرض کنید که N واحد تصمیم گیرنده $(n = 1, 2, ..., N)$ در T دوره زمانی $(t = 1, 2, ..., T)$ وجود دارند و همه آن‌ها از m ورودی برای تولید s خروجی استفاده می‌کنند. بنابراین نمونه شامل $T \times N$ مشاهده خواهد بود، و واحد تصمیم گیرنده n در دوره t، یعنی DMU_t^n دارای یک بردار m بعدی از ورودی‌ها $x_t^n = (x_{1t}^n, x_{2t}^n, ..., x_{mt}^n)^T$ و همچنین یک بردار s بعدی از خروجی‌ها $y_t^n = (y_{1t}^n, y_{2t}^n, ..., y_{st}^n)^T$ می‌باشد. پنجره‌ای که از زمان $k(1 \le k \le T)$ شروع می‌شود و دارای عرض $w(1 \le k \le T - k)$ باشد با kw مشخص می‌شود و دارای $w \times N$ مشاهده است. بنابراین ماتریس ورودی و خروجی برای تحلیل پوششی داده‌های پنجره‌ای را می‌توان به‌ترتیب به‌صورت زیر مشاهده نمود.

$$X_{kw} = \begin{bmatrix} x_k^1 \\ x_k^2 \\ \dots \\ x_k^N \\ x_{k+1}^1 \\ x_{k+1}^2 \\ \dots \\ x_{k+1}^N \\ \dots \\ x_{k+w}^1 \\ x_{k+w}^2 \\ \dots \\ x_{k+w}^N \end{bmatrix}^T , Y_{kw} = \begin{bmatrix} y_k^1 \\ y_k^2 \\ \dots \\ y_k^N \\ y_{k+1}^1 \\ y_{k+1}^2 \\ \dots \\ y_{k+1}^N \\ \dots \\ y_{k+w}^1 \\ y_{k+w}^2 \\ \dots \\ y_{k+w}^N \end{bmatrix}^T$$

مدل تحلیل پوششی داده‌های پنجره‌ای با ماهیت ورودی برای DMU_t^k تحت فرض بازده به مقیاس متغیر به صورت زیر به‌دست می‌آید:

$$\begin{aligned} &\theta^* = min\,\theta \\ &\text{s.t.} X_{kw}\lambda \le \theta x_t^n, t = 1, \dots, T \\ &Y_{kw}\lambda \ge y_t^n, t = 1, \dots, T \\ &e\lambda = 1 \\ &\lambda \ge \mathbf{0} \end{aligned} \qquad (۳)$$

که در آن $\lambda = (\lambda_1, \lambda_2, ..., \lambda_{Nw})$ و $e = (1,1,...,1)$.

و بر این اساس مدل تحلیل پوششی داده‌های پنجره‌ای با ماهیت خروجی محور برای DMU_t^k با فرض بازده به مقیاس متغیر به صورت زیر به‌دست می‌آید:

$$\begin{aligned} &\varphi^* = \max \varphi \\ &\text{s.t.} \quad X_{kw}\lambda \le x_t^n, \qquad t = 1, \dots, T \\ &\qquad Y_{kw}\lambda \ge \varphi y_t^n, \qquad t = 1, \dots, T \\ &\qquad e\lambda = 1 \\ &\qquad \lambda \ge \mathbf{0} \end{aligned} \qquad (۴)$$

نظام‌های بهره‌برداری و شاخص‌های ارزیابی عملکرد

در طراحی نظام‌های بهره‌برداری، به‌کارگیری منابع و همچنین بهبود عملکرد نظام‌ها مسائل و مشکلات زیادی وجود دارد که نیازمند ارزیابی همه جانبه و ارائه راهکارهای ارتقاء عملکرد نظام‌ها می‌باشد.

در این پژوهش ۱۰ نوع نظام بهره‌برداری آب کشاورزی فعال در محدوده شبکه‌های آبیاری خوزستان شامل نظام‌های بهره برداری زهره و جراحی، ناحیه شمال، مارون، کارون بزرگ و کرخه و شاوور

از زیر مجموعه نظام‌های بهره‌برداری آب کشاورزی شرکت‌های بهره‌برداری از شبکه‌های آبیاری، گورسفید، فردوس، کشتگران، تدبیروامید و مهر امیدگران قلعه مدسه از نظام‌های بهره‌برداری آب کشاورزی تعاونی‌های تولید به شرح جدول (۱)، طی فصل‌های زراعی ۱۴۰۱-۱۳۹۴ با روش تحلیل پوششی داده‌های پنجره‌ای مورد ارزیابی قرار گرفتند.

معیارهای انتخاب نظام‌های بهره‌برداری بالا از استان خوزستان در این پژوهش عبارتند از:

الف- اطلاعات پایه مورد نیاز محاسبات برای ارزیابی، وجود داشته باشد.

ب- کلیات عامل‌های مؤثر بر عملکرد، یکسان باشند.

در راستای محاسبه کارایی نظام‌های بهره‌برداری سازگار با تحقیق انجام شده توسط Modhej و Dahimavi (2021)، ورودی‌های مورد استفاده شبکه آبیاری، ماشین آلات، کارکنان، هزینه، بهره‌برداران، محصولات ، قراردادها و خروجی‌ها بهره‌وری آب، کشاورزی و سازگاری تعیین شدند.

ایشان به‌دلیل تعدد عوامل مؤثر بر عملکرد نظام‌های بهره‌برداری، از شاخص‌های ترکیبی استفاده کردند و با طراحی جداول ماتریس مقایسات زوجی به تعداد اعضاء گروه خبرگان و محاسبه مقدار میانگین هندسی وزنی، به هر عامل ضریبی متناسب با آن داده و سپس عامل‌های ساده مؤثر در عملکرد نظام‌های بهره-برداری، به صورت وزنی باهم ترکیب شدند.

نتایج و بحث

طی سنوات گذشته کشاورزان استان خوزستان به‌دلیل علاقه به کشت محصولات پرمصرف همانند برنج اغلب در مقابل ایده‌های نوین تغییرات الگوی کشت همچنین کاربرد روش‌های نوین آبیاری با هدف ایجاد محدودیت و بهره‌برداری بهینه و صرفه جویی در منابع آب کشاورزی مقاومت نشان می‌دهند، همچنین با عنایت به اینکه اثرات روش‌های نوین مقایسه در دراز مدت مشخص می‌گردد عرض هر پنجره سه در نظر گرفته شده است و لذا تجزیه و تحلیل پنجره‌ای شامل شش پنجره خواهد بود. از آن‌جا که در نظام‌های بهره‌برداری کنترل بیشتری بر روی ورودی‌ها نسبت به خروجی‌ها وجود دارد ، مدل تحلیل پنجره‌ای با ماهیت ورودی برای ارزیابی بکار می‌رود.

پس از حل ۱۸۰ مدل، مقادیر حاصل از میانگین کارایی هر پنجره و میانگین سالانه، مبنایی برای سنجش و کارایی ۱۰ نوع نظام بهره‌برداری فعال در محدوده شبکه‌های آبیاری خوزستان طی فصل‌های زراعی ۱۴۰۱-۱۳۹۴ به‌دست می‌دهد. نتایج حاصل را می‌توان در جداول (۲) و (۳) مشاهده کرد.

مقادیر حاصل از میانگین کارایی پنجره‌ای هر نظام بهره‌برداری طی دوره ارزیابی، مبنایی است که بر اساس آن، سنجش و ارزیابی عملکرد نظام‌ها، مورد تجزیه و تحلیل قرار گرفته است.

با توجه به نتایج به‌دست آمده، بالاترین میانگین کارایی طی فصل‌های زراعی ۱۴۰۱-۱۳۹۴ برای نظام بهره‌برداری ناحیه شمال از شرکت‌های بهره‌برداری شبکه‌های آبیاری و زهکشی با مقدار ۰/۹۷۱ ثبت شده است . کمترین میانگین کارایی مربوط به نظام بهره‌برداری مهر امیدگران قلعه مدرسه از تعاونی‌های تولید با مقدار ۰/۴۲۳ می‌باشد. از سویی دیگر بر اساس میانگین کارایی هر سال، فقط نظام بهره‌برداری ناحیه شمال در سال ۱۳۹۷ از سطح کارایی کامل برخوردار بوده، و کمترین میانگین کارایی هر سال به نظام بهره‌برداری مهر امیدگران قلعه مدرسه در سال ۱۳۹۶ با مقدار ۰/۳۷۰ تعلق گرفته است. بیشترین و کمترین میانگین کارایی هر سال برای نظام بهره‌برداری کرخه و شاوور ۰/۹۶۰ و ۰/۷۲۳ به‌دست آمد. این مقادیر برای نظام بهره‌برداری گورسفید ۰/۹۷۳ و ۰/۷۴۰ و برای نظام بهره‌برداری کارون بزرگ ۰/۹۶۳ و ۰/۷۴۰ حاصل گردید. شکاف بالا بین بیشترین و کمترین میانگین کارایی هر سال این نظام‌ها بیان‌گر عدم تناسب در برخورداری از امکاناتی نظیر بودجه‌های سالیانه تخصیصی در زمینه بهره‌برداری، نگهداری و تعمیرات شبکه‌های آبیاری تحت پوشش است. برپایه نتایج جدول (۳) میانگین کارایی هر سال نظام‌های بهره‌برداری فردوس و کشتگران روند کاهشی داشته است.

جدول۱- نظام‌های بهره‌برداری از آب منتخب استان خوزستان برای ارزیابی کارایی

Table 1- Selected water exploitation systems of Khozestan Province for efficiency evaluation

Exploitation system's type	Exploitation system's name	Cities of area activity
Agricultural water exploitation systems of exploitation companies of irrigation and drainage networks	Zohreh & Jarrahi Nahieh Shomal Maroon Karoon Bozorg Karkheh & Shavoor	Ramhormoz,Hendigan,Ramshir,omidieh&Shadegan Dezfol,Shosh,Andimeshk&Karkheh Shomal Behbahan&Gayzan Shoshtar,Gotvand,Miyanab&Shomal Shargh Ahvaz Dasht Azadegan,Hovyzeh,Markazi Ahvaz, Karkheh, Abadan&Khoramshahr
Agricultural water exploitation systems of production cooperatives	Goor sephid Ferdos Keshtgaran Tadbir&Omid Mehr Omidgaran Ghaleh Madreseh	Dezfol Dasht Azadegan Ramshir Shoshtar Behbahan

DOI: 10.22055/jise.2024.46611.2123

جدول۲- اندازه کارایی نظام بهره‌برداری آب کشاورزی شرکت‌های بهره‌برداری از شبکه‌های آبیاری و زهکشی طی سال‌های ۱۴۰۱-۱۳۹۴ با استفاده از روش تحلیل پوششی داده‌های پنجره‌ای

Table 2-Efficiency measurement of Agricultural water exploitation systems of exploitation companies of irrigation and drainage networks during 2015-2022 using DEA windows

Zohreh & Jarrahi	1394	1395	1396	1397	1398	1399	1400	1401	Av. Eff. per window
Window 1	0.67	0.61	0.70						0.660
Window 2		0.64	0.78	0.85					0.756
Window 3			0.73	0.78	0.66				0.723
Window 4				0.83	0.77	0.74			0.780
Window 5					0.66	0.83	0.74		0.743
Window 6						0.89	0.79	0.78	0.820
Av. Eff. Per year	0.670	0.625	0.736	0.820	0.696	0.820	0.765	0.780	0.747
Nahieh Shomal	1394	1395	1396	1397	1398	1399	1400	1401	Av. Eff. per window
Window 1	0.98	0.92	1.00						0.966
Window 2		0.94	0.98	1.00					0.973
Window 3			0.96	1.00	1.00				0.986
Window 4				1.00	0.99	0.97			0.986
Window 5					1.00	0.91	1.00		0.970
Window 6						0.90	0.99	0.95	0.946
Av. Eff. Per year	0.980	0.930	0.980	1.000	0.996	0.926	0.995	0.950	0.971
Maroon	1394	1395	1396	1397	1398	1399	1400	1401	Av. Eff. per window
Window 1	0.75	0.70	0.73						0.726
Window 2		0.71	0.77	0.69					0.723
Window 3			0.78	0.74	0.72				0.746
Window 4				0.71	0.79	0.78			0.760
Window 5					0.81	0.78	0.77		0.786
Window 6						0.75	0.77	0.77	0.763
Av. Eff. Per year	0.750	0.705	0.760	0.713	0.773	0.770	0.770	0.770	0.750
Karoon Bozorg	1394	1395	1396	1397	1398	1399	1400	1401	Av. Eff. per window
Window 1	0.91	0.86	0.90						0.890
Window 2		0.89	0.99	0.84					0.906
Window 3			1.00	0.81	0.90				0.903
Window 4				0.81	1.00	0.86			0.890
Window 5					0.90	0.82	0.74		0.820
Window 6						0.89	0.76	0.74	0.796
Av. Eff. Per year	0.910	0.875	0.963	0.820	0.933	0.856	0.750	0.740	0.867
Karkheh & Shavoor	1394	1395	1396	1397	1398	1399	1400	1401	Av. Eff. per window
Window 1	0.79	0.69	0.72						0.733
Window 2		0.68	0.71	0.82					0.736
Window 3			0.74	0.86	0.83				0.810
Window 4				0.80	0.80	0.97			0.856
Window 5					0.84	0.88	0.95		0.890
Window 6						0.83	0.97	0.88	0.893
Av. Eff. Per year	0.790	0.685	0.723	0.826	0.823	0.893	0.960	0.880	0.819

جدول ۳- اندازه کارایی نظام‌های بهره‌برداری از آب کشاورزی تعاونی‌های تولیدطی سال‌های ۱۴۰۱-۱۳۹۴ با استفاده از روش تحلیل پوششی داده‌های پنجره‌ای

Table 3- DEA windows analysis for efficiency of Agricultural water exploitation systems of production cooperatives during 2015-2022

Goor sephid	1394	1395	1396	1397	1398	1399	1400	1401	Av. Eff. per window
Window 1	0.74	0.79	0.79						0.773
Window 2		0.70	0.81	0.88					0.796
Window 3			0.81	0.85	0.93				0.863
Window 4				0.88	0.89	0.97			0.913
Window 5					0.89	1.00	0.99		0.960
Window 6						0.95	0.90	0.92	0.923
Av. Eff. Per year	0.740	0.745	0.803	0.870	0.903	0.973	0.945	0.920	0.871
Ferdos	1394	1395	1396	1397	1398	1399	1400	1401	Av. Eff. per window
Window 1	0.72	0.68	0.65						0.683
Window 2		0.68	0.71	0.65					0.680
Window 3			0.67	0.66	0.61				0.646
Window 4				0.64	0.60	0.64			0.626
Window 5					0.61	0.59	0.60		0.600
Window 6						0,58	0.58	0.59	0.590
Av. Eff. Per year	0.720	0.685	0.673	0.653	0.606	0.603	0.590	0.590	0.637
Keshtgaran	1394	1395	1396	1397	1398	1399	1400	1401	Av. Eff. per window
Window 1	0.73	0.73	0.69						0.716
Window 2		0.71	0.68	0.69					0.693
Window 3			0.68	0.66	0.60				0.646
Window 4				0.62	0.64	0.59			0.616
Window 5					0.61	0.58	0.55		0.580
Window 6						0.58	0.57	0.55	0.566
Av. Eff. Per year	0.730	0.720	0.683	0.656	0.616	0.583	0.560	0.550	0.636
Tadbir&Omid	1394	1395	1396	1397	1398	1399	1400	1401	Av. Eff. per window
Window 1	0.84	0.88	0.87						0.863
Window 2		0.89	0.84	0.90					0.876
Window 3			0.84	0.89	0.81				0.846
Window 4				0.92	0.80	0.77			0.830
Window 5					0.78	0.78	0.82		0.793
Window 6						0.77	0.79	0.75	0.770
Av. Eff. Per year	0.840	0.885	0.850	0.903	0.796	0.773	0.805	0.750	0.829
Mehr Omidgaran Ghaleh Madreseh	1394	1395	1396	1397	1398	1399	1400	1401	Av. Eff. per window
Window 1	0.42	0.49	0.39						0.433
Window 2		0.48	0.35	0.45					0.426
Window 3			0.37	0.46	0.41				0.413
Window 4				0.46	0.45	0.40			0.436
Window 5					0.44	0.42	0.43		0.430
Window 6						0.40	0.39	0.41	0.400
Av. Eff. Per year	0.420	0.485	0.370	0.456	0.433	0.406	0.410	0.410	0.423

DOI: 10.22055/jise.2024.46611.2123

نتیجه گیری

این مطالعه با هدف برآورد و تحلیل کارایی نظام‌های بهره‌برداری آب کشاورزی فعال در محدوده شبکه‌های آبیاری خوزستان انجام شده است. در این راستا ۱۰ نوع نظام بهره‌برداری طی فصل‌های زراعی ۱۳۹۴-۱۴۰۱ با بهره‌گیری از روش تحلیل پوششی داده‌های پنجره‌ای مورد سنجش و ارزیابی قرار گرفت. در مدل‌های تحلیل پوششی داده‌ها میزان کارایی در شرایط ایستا اندازه‌گیری می‌شوند و لذا یک واحد تصمیم گیرنده با همه واحدهای دیگر در یک دوره زمانی یکسان مورد ارزیابی قرار می‌گیرد. در مقابل روش تحلیل پوششی داده‌های پنجره‌ای بر اساس میانگین متحرک، عملکرد و روند تغییرات، یک واحد تصمیم را در طول زمان مورد بررسی قرار می‌دهد. کارایی نظام‌ها، تحت فرض بازده به مقیاس متغیر و با نگرش ماهیت ورودی بررسی شده است. بر اساس نتایج به‌دست آمده، بیشترین میانگین کارایی برای نظام بهره‌برداری ناحیه شمال از شرکت‌های بهره‌برداری شبکه‌های آبیاری و زهکشی و کمترین میانگین کارایی مربوط به نظام بهره‌برداری مهر امیدگران قلعه مدرسه از تعاونی‌های تولید می‌باشد. عامل اساسی در به‌دست آوردن بیشترین میانگین کارایی در نظام‌های بهره‌برداری شرکت‌های بهره‌برداری شبکه‌های آبیاری و زهکشی ، بهره‌مندی این نظام‌ها از حمایت‌های دولتی و ساختار دولت محور است. در مقابل، نبود ساختار حمایتی منسجم، عدم توانمدسازی اعضاء و عدم توسعه مهارت‌ها در بین اعضاء نظام‌های بهره‌برداری تعاونی‌های تولید از عوامل تأثیر گذار در به‌دست آوردن کمترین میانگین کارایی این نظام‌هاست. برپایه دیگر نتایج به‌دست آمده، میانگین کارایی هر سال نظام‌های بهره‌برداری فردوس و کشتگران از زیر مجموعه نظام‌های بهره‌برداری تعاونی‌های تولید، روند کاهشی داشته، این موضوع ناشی از عواملی همانند راندمان تولیدی پایین و عدم برخورداری از آب کشاورزی بهنگام، دور آبیاری مناسب و راندمان پایین شبکه است.

تقدیر و تشکر

بدینوسیله از سازمان آب و برق استان خوزستان به‌ویژه مدیریت محترم تحقیقات، نوآوری و فناوری اطلاعات، تشکر و قدردانی می‌گردد.

تضاد منافع نویسندگان

نویسندگان این مقاله اعلام می‌دارند که هیچ گونه تضاد منافعی در خصوص نگارش و انتشار مطالب و نتایج این پژوهش ندارند.

منابع مالی

نویسندگان هیچ گونه حمایت مالی برای تحقیق، تالیف و انتشار این مقاله دریافت نکردند.

دسترسی به داده‌ها

مجموعه داده‌های تولید شده و یا تحلیل شده در طول مطالعه حاضر، در صورت درخواست معقول، از نویسنده مسئول در دسترس هستند.

مشارکت نویسندگان

نویسنده اول: دلال مدحج، تجزیه و تحلیل داده ها و نگارش مقاله.

نویسنده دوم: عادل دحیماوی، بررسی نتایج.

References

1- Alizadeh, K. and Hatami Nezhad, H., 2015. The role of exploitation systems in the sustainable development of Iranian agriculture (Case study: Central part of Torbat-e Heydarieh), *Journal of Geographical Sciences*.22, pp.71-87. (In Persain)

2- Banker, R.D., Charnes, A. and Cooper, W.W. 1984. Some models for estimating technical and scale inefficiencies in data envelopment analysis, *Management Science*, 30:pp.1078–1092. DOI:10.1287/mnsc.30.9.1078.

3- Charnes, A., Clark C.T., Cooper W.W., and Golany B. 1985. A developmental study of data envelopment analysis in measuring the efficiency of maintenance units in the U.S. Air Forces. *Annals of Operations Research*, 2(1), pp.95–112.

4- Charnes, A., Cooper, W.W. and Rhodes, E. 1978. Measuring the efficiency of decision making units, *European Journal of Operational Research*, 2:pp.429–444. DOI:10.1016/0377-2217(78)90138-8.

5- Dahimavi, A., Akhundali, A., shirvanian, A., Boroomand Nasab, S. (2018a). Extraction and Weighing of Indicators Representing the Principles of Agricultural Water Governance in Irrigation and Drainage Networks of Khuzestan, *Iran-Water Resources Research*. 14(4): 226-238. (In Persain).

6- Dahimavi, A., Akhundali, A., Shirvanian, A. and Boroomand Nasab, S., (2018b). Development of water governance indicators in irrigation and drainage networks of Khuzestan province, *Iranian Journal of Irrigation & Drainage*. 12(4), pp.919-929. (In Persain)

7- Dahimavi, A., Akhoond-Ali, A., Shirvanian, A. and Modhej, D., 2021. Measuring the resilience of exploitation systems from agricultural water based on good governance principles (case study: irrigation networks in Khuzestan Province). *Journal of International Development*, 33(2), pp. 437-453. DOI: 10.1002/jid.3522.

8- Farrell, M.J., 1957. The measurement of productive efficiency. *Journal of the Royal Statistical Society*, 120, pp. 253-281.

9- Huang, Q., Wang, J., Easter K.W. and S. Rozelle., 2010. Empirical assessment of water management institutions in Northern China. *Agricultural Water Management*, 98, pp.361–369. DOI:10.1016/j.agwat.2010.09.004.

10- Keshavarz, A. and Dehghani Sanij, H., 2011. Water productivity index an solutions for future agricultural activities in Iran, *Economic Strategy*. 1(1), pp.199-233. (In Persain)

11- Modhej, D. and Dahimavi, A., 2021. Application of Data Envelopment Analysis in Efficiency Evaluation of Agricultural Water Exploitation Systems in Khozestan province. *Agricultural Economics*, 15(1), pp. 29-53. Doi: 10.22034/IAES.2021.527188.1832.

12- Narayan, D., 1995. *The contribution of people's participation: Evidence from 121 Rural Water Supply Projects* (No. 1, pp. vii+-108).

13- Rogers, A. and W. Hall, 2003. *Effective Water Governance*. TEC BACKGROUND PAPERS. NO. 7. Global Water Partnership (GWP). Printed by Elanders Novum,

14- Sengupta, J.K., 1995. Dynamics of data envelopment analysis: Theory of systems efficiency. Boston: Kluwer Academic Publishers, Dordrecht, London.

15- Ul Hassan, M.M., 2011. Analyzing governance reforms in irrigation: Central, South and West Asian experience. *Irrigation and Drainage*, 60(1), pp.151–162. DOI: 10.1002/ird.564.

Shahid Chamran University of Ahvaz

Irrigation Sciences and Engineering (JISE)
Vol. 48, No. 3, Fall 2025, p. 55-73

Research Paper

Journal homepage: https://jise.scu.ac.ir

EXTENDED ABSTRACT

Investigation the effect of aspect ratio of shallow reservoirs on distribution of suspended sediment concentration

M. Afrashteh[1] and B. Lashkar-Ara[2*]

1- Master Geaduate, , College of Civil Engineering, Jundi-Shapur University of Technology, Dezful, Iran.
2- Corresponding Author, Assistant Professor, College of Civil Engineering, Jundi-Shapur University of Technology, Dezful, Iran (Lashkarara@jsu.ac.ir).*

ARTICLE INFO

Artlcle history:
Received: 23 September 2023
Revised: 23 November 2023
Accepted: 26 November 2023
Available online: 05 November 2025

Keywords:
Shallow reservoirs, sedimentation, aspect ratio, reservoir geometry.

TO CITE THIS ARTICLE:

Afrashteh, M., Lashkar-Ara, B. 2025. 'Investigation the effect of aspect ratio of shallow reservoirs on distribution of suspended sediment concentration', *Irrigation Sciences and Engineering*, 48(3), pp. 55-73. doi: 10.22055/jise.2025.44838.2094.

Abstract

Sedimentation in settling basins is one of the significant challenges in water resource management. This phenomenon can lead to sediment accumulation in water reservoirs, reduced storage capacity, increased flood risks, and water pollution. Therefore, understanding the processes governing sedimentation in basins and optimizing the design of these structures is of great importance. In this research, the impact of aspect ratio (length to width ratio) of the reservoir on the distribution of suspended sediment concentration under free flow conditions has been investigated. Using rectangular tanks with aspect ratios of 1, 2, and 4, the sedimentation rate under various hydraulic conditions was evaluated. This parameter is recognized as one of the most critical factors affecting flow patterns and sediment deposition in settling basins. The results indicated a direct relationship between the aspect ratio of the reservoir and the distribution of suspended sediment concentrations. Specifically, reservoirs with higher aspect ratios (such as a tank with an aspect ratio of 4) retain greater amounts of suspended sediments on their surfaces. Additionally, in settling basins with high aspect ratios, the lateral spreading of dense flow creates a more favorable condition for uniform sediment distribution compared to its longitudinal spreading. Conversely, in basins with lower aspect ratios, greater longitudinal spreading occurs, increasing the likelihood of backflow formation. These findings demonstrate that considering the aspect ratio as a key parameter in the design of settling basins can significantly enhance the performance and efficiency of these structures in sediment management.

Introduction

Sediment accumulation in shallow reservoirs is considered one of the main challenges in water resource management (Lai and Shen, 1996). Accumulated sediments can reduce the reservoirs' capacity and increase environmental hazards (Kantoush and Schleiss, 2009). A precise understanding of the hydraulic processes governing suspended sediments and the impact of reservoir geometry on these processes is essential for optimal design (Dufresne et al., 2010). In this study, the effect of the aspect ratio of the reservoir on the distribution of suspended sediments is investigated with the aim of providing effective solutions to reduce problems arising from sedimentation.

Methodology

In this research, the impact of the aspect ratio of settling basins on the distribution of suspended sediment concentration was examined using Flow-3D software. Three-dimensional models with aspect ratios of 1, 2, and 4 were simulated, and the governing equations for free water flow were solved using the finite volume method. A scalar add-on was utilized to calculate the sediment concentration distribution, incorporating the high-precision transport and diffusion of scalars within the computational grid. The accuracy of the model was evaluated by comparing simulation results with laboratory data, confirming that this approach has the capability to accurately predict concentration distribution patterns and enhance the design performance of settling basins.

Results and Discussion

The analyses revealed that as the aspect ratio of the basins increased (1, 2, and 4), the flow and sedimentation patterns changed. At higher ratios, the lateral expansion of the flow and the accumulation of sediments near the sidewalls increased. In contrast, the distribution of sediments along the longitudinal direction became more uniform. Additionally, backflow and sediment accumulation were more pronounced in basins with higher aspect ratios, which contributed to improved control of incoming sediments.

The results are analyzed based on aspect ratios and the relative time scale t/t_0. For an aspect ratio of 1, at t/t_0=0.5, the dense flow is concentrated in the first quarter of the basin's length, with sediment largely limited to the inflow area. By t/t_0=1, the flow reaches half of the basin, but sediment distribution remains confined, with an increase in concentration in the middle section. At t/t_0=1.5, sediment distribution begins to become more uniform, although the end section of the basin has not fully engaged. At t/t_0=2, sediments reach the end of the basin, marking the beginning of backflow. By t/t_0=3, significant sediment accumulation occurs at the end, accompanied by clear backflow. Finally, at t/t_0=5, the basin is completely filled with sediment, and backflow reaches its maximum intensity.

For an aspect ratio of 2, similar patterns emerge. At t/t_0=0.5, the dense flow advances to one quarter of the basin length, with sediments concentrated at the inflow. At t/t_0=1, the flow reaches halfway, increasing sediment concentration in the middle. At t/t_0=1.5, the flow approaches the end area, distributing sediments more evenly along the basin's length. By t/t_0=2, backflow begins, bringing sediments closer to the outflow area, and at $t/t_{0=}$3, the distribution of sediments becomes more uniform, accompanied by intensified backflow. Eventually, the basin is completely filled with sediment, and the backflow stabilizes.

In the case of an aspect ratio of 4, at t/t_0=0.5, the dense flow only occupies part of the basin's length, with sediments focused near the inflow. At t/t_0=1, the flow reaches the midpoint, with sediment distribution still concentrated in the initial half. As time progresses to t/t_0=1.5, the flow approaches the outflow area, distributing sediments throughout the basin. When t/t_0=2, backflow initiates, with noticeable sediment accumulation in the end and lateral areas. By t/t_0=3, sediment distribution becomes uniform, and backflow intensifies. Finally, at t/t_0=5, the basin is fully filled with sediment, and backflow peaks.

Overall, these analyses indicate that an increase in aspect ratio leads to a more uniform distribution of sediments and improved control of flow within the basin. The performance of sedimentation ponds with different shape factors and the various stages of dense flow progression, return flow, and sediment accumulation are displayed in Figure (1).

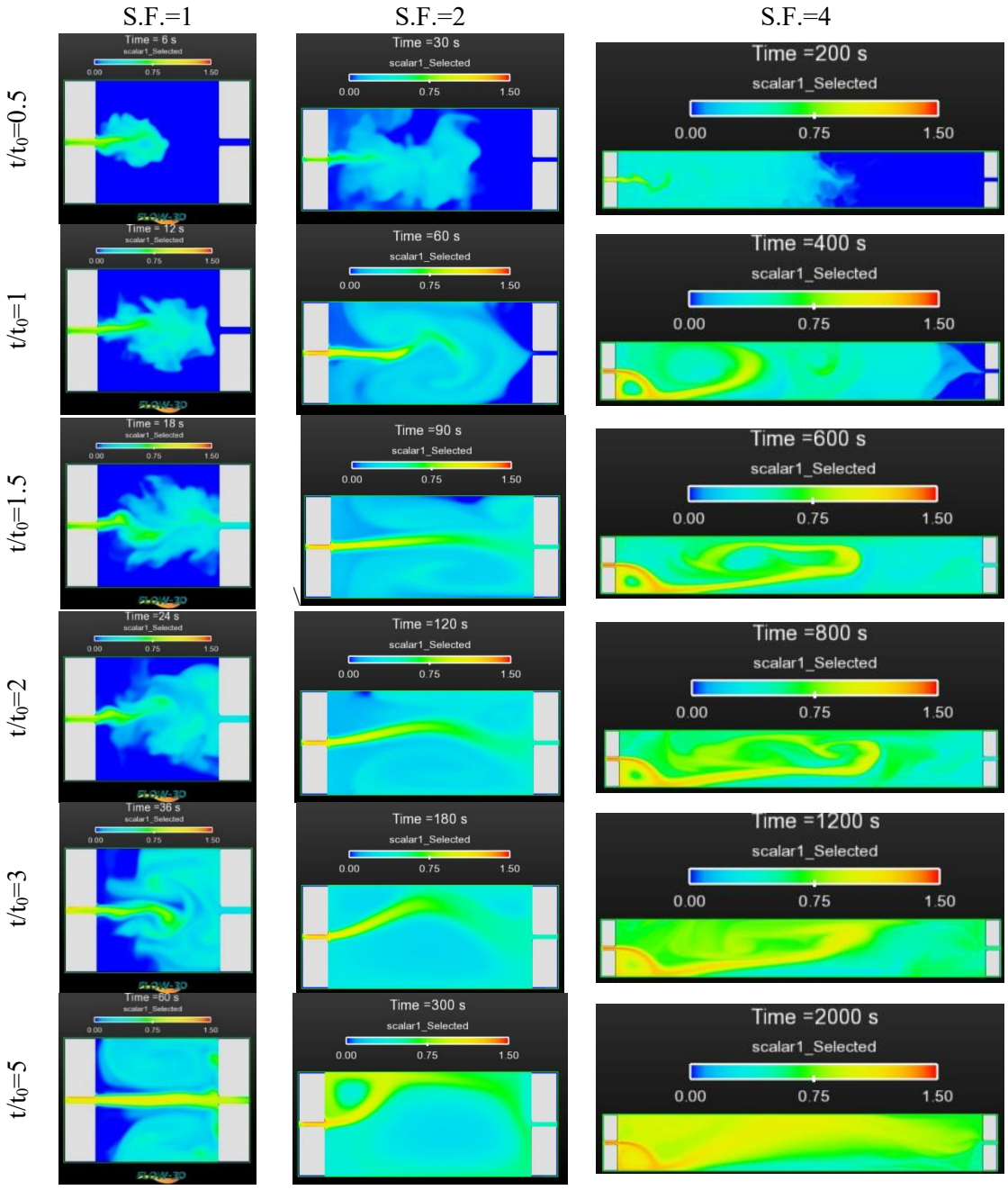


Fig. 1- Analysis of performance variations in sedimentation ponds with different shape factors: Instantaneous phase of dense flow progression, return flow phase, and sediment accumulation phase at various relative time intervals.

Conclusion

The analyses have demonstrated that the aspect ratio of the reservoir significantly impacts the distribution of dense flow. An increase in the aspect ratio leads to improved uniformity in sediment distribution both along and across the reservoir, as well as a reduction in localized concentrations. Furthermore, the development of backflow and sediment control in the end areas operates more effectively, particularly at higher ratios, such as in reservoirs with an aspect ratio of 4. These findings highlight that designing sedimentation basins with higher aspect ratios can enhance the structural

efficiency in sediment management and maintain hydraulic performance, thereby minimizing unwanted blockages and sedimentation. Overall, these results underscore the importance of selecting the appropriate aspect ratio in the design and optimization of sedimentation basins, which can significantly improve their operational quality.

Acknowledgments

The authors of this article would like to express their sincere gratitude to the Jundi-shapur University of Technology, Dezful in Iran for their collaboration in the preparation of this article.

Conflict of Interest

The authors declared no potential conflicts of interest concerning the research, authorship, and publication of this article. Confirmation.

Funding

The authors received no financial support for the research, authorship, and publication of this article.

Data Availability Statements

Data Availability Statement: All information and results are presented in the text of the article.

Authors' contribution

First Author: Mihammad Afrashteh, Data analysis, interpretation of results, writing – original draft.
Second Author: Babak Lashkar-Ara, Supervisor, data analysis, validation, discussion, writing – review & editing, and final approval.

References

1- Lai, J.S. and Shen, H.W., 1996. Flushing sediment through reservoirs. *Journal of Hydraulic Research*, 34(2), pp.237-255. https://doi.org/10.1080/00221689609498499.

2- Kantoush, S., 2007. Symmetric or asymmetric flow patterns in shallow rectangular basins with sediment transport. In *Proceedings of the 32nd Congress of IAHR*. https://hdl.handle.net/20.500.11970/110019.

3. Dufresne, M., Dewals, B.J., Erpicum, S., Archambeau, P. and Pirotton, M., 2010. Experimental investigation of flow pattern and sediment deposition in rectangular shallow reservoirs. International *Journal of Sediment Research*, 25(3), pp.258-270. https://doi.org/10.1016/S1001-6279(10)60043-1.

© 2025 Shahid Chamran Universiry of Ahvaz, Ahvaz, Iran. This article is an open access article distributed under the terms and conditions of the Creative Commons Attribution 4.0 International (CC BY 4.0 license) (http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/).

علوم و مهندسی آبیاری جلد ۴۸، شماره‌ی۳، پاییز ۱٤۰٤، مقاله پژوهشی، ص. ۷۳-۵۵

بررسی اثر نسبت ظاهری مخازن کم عمق بر میزان توزیع غلظت رسوبات معلق

محمد افراشته[۱] و بابک لشکرآرا[۲*]

۱- دانش آموخته کارشناسی ارشد، دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه صنعتی جندی شاپور دزفول.

۲*- نویسنده مسئول، دانشیار دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه صنعتی جندی شاپور دزفول. (Lashkarara@jsu.ac.ir)

دریافت: ۱۴۰۱/۰۷/۰۱ بازنگری: ۱۴۰۱/۰۹/۰۲ پذیرش: ۱۴۰۱/۰۹/۰۵ انتشار: ۱۴۰۴/۰۸/۱۴

چکیده

رسوب‌گذاری در حوضچه‌های ته‌نشینی یکی از چالش‌های مهم و اساسی در مدیریت منابع آبی است. این پدیده می‌تواند به انباشت رسوبات در مخازن آبی، کاهش ظرفیت ذخیره‌سازی، افزایش خطرات سیلاب و نیز آلودگی آب منجر شود. بنابراین، شناخت فرآیندهای حاکم بر رسوب‌گذاری در حوضچه‌ها و مخازن و بهینه‌سازی طراحی این سازه‌ها اهمیت به‌سزایی دارد. در این پژوهش، تأثیر نسبت ظاهری (نسبت طول به عرض) مخزن بر توزیع غلظت رسوبات معلق تحت شرایط جریان آزاد مورد بررسی قرار گرفته است. با استفاده از مخازن مستطیلی با نسبت‌های ظاهری یک، دو و چهار، میزان رسوب‌گذاری در شرایط هیدرولیکی متفاوت ارزیابی شده است. این پارامتر به‌عنوان یکی از مهم‌ترین عوامل مؤثر بر الگوی جریان و رسوب‌گذاری در حوضچه‌های ته‌نشینی شناخته شده است. نتایج نشان داد که نسبت ظاهری مخزن با توزیع غلظت رسوبات معلق ارتباط مستقیم دارد. به‌طوری که مخازن با نسبت ظاهری بالاتر (مانند مخزن با ضریب شکل ٤) میزان بیشتری رسوبات معلق را در سطح خود نگه‌می‌دارند. همچنین، در حوضچه‌های رسوب‌گیر با ضریب شکل بالا، گسترش عرضی جریان چگال نسبت به گسترش طولی آن وضعیت مطلوب‌تری از نظر توزیع یکنواخت رسوبات ایجاد می‌کند. در مقابل، در حوضچه‌های با ضریب شکل پایین، گسترش طولی بیشتر و احتمال تشکیل جریان‌های برگشتی افزایش می‌یابد. این یافته‌ها نشان می‌دهند که توجه به نسبت ظاهری به‌عنوان یک پارامتر کلیدی در طراحی حوضچه‌های رسوب‌گیر می‌تواند به بهبود عملکرد و کارایی این سازه‌ها در مدیریت رسوبات کمک شایانی بنماید.

کلید واژه‌ها: مخازن مستطیلی، رسوب پذیری، الگوی جریان، جریان برگشتی.

مقدمه

معضل رسوب‌گذاری همواره به‌عنوان مهمترین عامل در کوتاه کردن عمر مفید سدها مطرح بوده است و سدهای زیادی به‌دلیل پر شدن از رسوب متروکه شده‌اند. این مشکل به‌ویژه در مناطق استوایی و نیمه خشک به علت بالا بودن دبی جریان رسوب مشهودتر به نظر می‌رسد.

رسوب‌گذاری در سدهای با مخزن عمیق و کم عمق باعث از دست رفتن حجم مفید آن شده و از این رو اهمیت افزایش عمر مفید سدها و حفظ حجم ذخیره آن‌ها برای تداوم کنترل و بهره‌برداری از منابع آب در اولویت برنامه ریزان مدیریت منابع آب کشورها قرار گرفته است. چرا که ساخت سدهای جدید به دلایل آیین نامه‌های سخت گیرانه محیط زیستی، هزینه بالای ساخت و عدم وجود سایت‌های مناسب بسیار مشکل می‌باشد (Lai, 1996). لذا با توجه به اهمیت مساله، کمیته بین المللی سدهای بزرگ یکی از مسائل مهم جهان را در قرن حاضر، مسئله رسوب‌گذاری در سدها دانسته و تأسیس کمیته بین‌المللی رسوب‌گذاری در مخازن در سال ۱۹۹۲ به‌دلیل اهمیت این مسئله می‌باشد. رسوب‌گذاری در مخازن سدهای ساخت بشر، یکی از مشکلات بسیار جدی در مهندسی سدسازی می‌باشد. بنابراین مدیریت رسوب در مخازن سدهای موجود امری ضروریست. اغلب اوقات مدیریت رسوب در تضاد با مدیریت منابع آب می‌باشد. برای مثال برای تولید الکتریسیته بیشتر نیاز است. رقوم سطح آب مخزن بالا نگه داشته شود که این امر موجب افزایش رسوب‌گذاری در مخزن می‌گردد.

علاوه بر این، بررسی‌های انجام‌شده در زمینه‌ی برآورد بار رسوب معلق نشان می‌دهد که دقت تخمین بار رسوبی می‌تواند به‌طور مستقیم بر تحلیل هیدرولیکی جریان اثرگذار باشد؛ موضوعی که در ارزیابی معادلات انتقال رسوب نیز تأیید شده است (Lashkar-Ara & Kiani, 2025).

برای رفع مشکل رسوب‌گذاری از روش‌های مختلفی می‌توان استفاده نمود. به‌طور کلی راه حل‌های کنترل رسوب‌گذاری در مخازن سدها را می‌توان شامل عملیات آبخیزداری و حفاظت خاک، استفاده از روش‌های هیدرولیکی مانند عبوردهی جریان غلیظ، عبور دهی رسوبات و رسوب‌شویی بیان کرد. علاوه بر موارد فوق استفاده از روش‌های کمکی مانند لایروبی، سیفون کردن، سیستم کنارگذر نیز در زمره روش‌های رسوب زدایی از مخازن قرار دارد. مشکلی که طراح با آن روبه‌رو است تخمین میزان رسوب و مدت زمانی است که رسوب در عملکرد مفید مخزن اخلال ایجاد می‌کند.

رسوب‌گذاری در مخزن از سال ۱۹۳۰ مورد بررسی قرار گرفته است رسوب نه تنها ظرفیت ذخیره‌سازی مخزن را کاهش می‌دهد بلکه احتمال طغیان سیل را در قسمت بالا دست به‌دلیل افزایش ارتفاعات بستر رودخانه در انتهای بالا دست مخزن افزایش می‌دهد (Liu et al, 2004). به‌منظور حذف و کاهش رسوبات مخزن،

DOI: 10.22055/jise.2025.44838.2094

روش‌های مختلفی مانند فلاشینگ، لایروبی، هیدروساکشن، لوله کنار گذر و حفاظت از آب و خاک تدوین شده است (Goodland, 1989 & Abasi Zade Bagheban and Lashkar-Ara, 2020 & Aryaei and Lashkar-Ara., 2023)

مخازن کم عمق ناگزیر هستند در برابر ورود برخی رسوبات به مخزن برای تعادل مورفودینامیکی جریان اصلی، تغییراتی در مشخصات هیدرولیکی جریان و انتقال رسوب داشته باشند (Kantoush and Schleiss, 2009).

معیارهای طراحی مخازن کم عمق به اهداف کاربرد آن‌ها بستگی دارد که از آن جمله می‌توان به آبیاری، کنترل سیل، تولید برق اشاره نمود. همچنین در این مخازن باید میزان فرایند ته نشینی رسوبات در یک سطح حداقل طراحی گردد. پیش‌بینی رسوب در مخازن کم عمق بسیار پیچیده بوده و به‌دلیل شکل هندسی مخزن، شرایط هیدرولیکی و مشخصات جریانات رسوبات وارده به مخزن، نیازمند مطالعه‌های هیدرولیکی بیشتری است (Dufresne et al., 2010).

مطالعه‌های پیرامون خصوصیات فیزیکی و رفتار رسوبات چسبنده نشان می‌دهد که لخته‌سازی عاملی کلیدی در پیچیدگی انتقال این نوع رسوبات است (Shadorvan et al., 2018).

از جمله عوامل مؤثر در خصوصیات فیزیکی و شیمیایی رسوبات و همچنین میزان و نحوه توزیع رسوبات در مخازن می‌توان به محل قرار گیری سد در مخزن، وجود خلیج‌ها، باز شدگی‌ها و تنگ شدگی‌ها در مخزن، شیب کف مخزن، تعداد محل‌های ورود جریان به مخزن و اندازه و خصوصیات ذرات رسوبی وارد شده به مخزن اشاره نمود (Asghari Pari et al., 2010 & Goudarzi et al., 2021)

اهمیت مخازن کوچک مربوط به حجم ذخیره آب آن‌ها می‌باشد و به دلایل مختلف امکان کاهش عمر مفید این مخازن وجود دارد. (Michalec, 2008).

در هنگام عملیات فلاشینگ الگوی جریان خروج مواد رسوبی از مخزن با الگوی جریان ورودی با آن متفاوت می‌باشد و برای کنترل رسوب در مخازن لازم است که رویکردهایی مانند لایروبی، و فلاشینگ را در دست مطالعه داشت. فلاشینگ به‌عنوان یک روش کارامد در خروج رسوبات از مخزن می‌تواند بیشتر مدنظر قرار بگیرد (Morris and Fan ,1998)

گزارش‌هایی نیز در خصوص بررسی کارایی هوش مصنوعی در تأثیر ورود هوا بر عمق فرسایش ناشی از جت‌های خروجی از سازه‌های هیدرولیکی منتشر شده است (Lashkar-Ara et al., 2020)

در آزمایش‌هایی که بر روی کانال‌های با مقاطع متفاوت انجام گردید مشاهده شدکه عملیات فلاشینگ تحت فشار با ابعاد هندسه کانال در ارتباط مستقیم می‌باشد. همچنین میزان عمق جریان و میزان سرعت در راندمان فلاشینگ تحت فشار در کانال‌ها تأثیر گذار است و فلاشینگ تحت جریان آزاد فقط دارای اثر موضعی بوده و مقدار کمی از رسوبات را تخلیه می‌نماید (Kantoush and Schleiss, 2009).

محققین زیادی در رابطه با برآورد بار رسوبی و تأثیر آن بر هیدرولیک جریان تحقیق نموده‌اند. و معتقدند که یکی از مهمترین ابزارها برای پیش‌بینی بار رسوبی استفاده از منحنی‌های سنجه- رسوب است اما به‌دلیل تغییرات فصلی بارندگی، پوشش گیاهی، جریان رودخانه و غیره منحنی سنجه- رسوب نیز ممکن است در هر فصل تغییر کند. بنابراین در استفاده از این روش برای تعیین بار رسوبی می‌بایست شرایط مذکور را مدنظر قرار داد. لذا لزوم نمونه‌گیری در شرایط شدت بالای جریان امری بسیار ضروری می‌باشد چرا که گاهی۵۰-۸۰ درصد بار رسوبی سالیانه در جریان‌های با شدت بالا حمل می‌شود.

استفاده از منحنی سنجه رسوب و رابطه رگرسیونی، مقدار میانگین بار رسوبی محاسبه شده بدین روش را تقریباً ۲۰ برابر کوچک‌تر از میانگین بار رسوبی داده‌های اندازه‌گیری شده را نمایش می‌دهد که دلیل آن را عدم وجود اندازه‌گیری بار رسوب در دبی‌های پایین عنوان نمودند و معتقدند که معادله معروف سنجه-رسوب بیشتر برای شرایط غیرعادی با دبی بالا معتبر است در ضمن این محققین بر اندازه‌گیری بار بستر علی‌رغم مشکل بودن روش و غیرحتمی بودنش تأکید فراوان داشتند چرا که میزان باربستر یکی از پارامترهای مهمی است که می‌بایست به مقدار بار معلق اضافه شود. (lee et al., 2005).

مهندسین هیدرولیک و زمین شناس طی دو قرن اخیر، حرکت مواد رسوبی در رودخانه‌ها را مورد بررسی قرار داده‌اند، چرا که رفتار مواد رسوبی، در هیدرولیک رودخانه و تغییر مورفولوژی آن، حائز اهمیت است. طبیعت پیچیده انتقال رسوب و وابستگی آن به شرایط طبیعی، علم انتقال رسوب را به رشته‌های تجربی یا نیمه تجربی تبدیل کرده است. روابط و معادله‌هایی که به بررسی حرکت مواد رسوبی می‌پردازند اغلب، براساس مفاهیمی بنا شده‌اند که در تعیین آن‌ها، فرضیه‌های ساده‌ای صورت گرفته است. این ساده کردن فرضیه‌ها و نادیده گرفتن برخی جزئیات محققین را قادر ساخته تا نرخ انتقال رسوب را به کمک یک یا دو شاخص هیدرولیکی رودخانه تعیین کنند از جمله این شاخص‌ها می‌توان به دبی آبراهه، سرعت متوسط جریان، شیب خط انرژی و تنش برشی اشاره کرد. هر یک از این روابط براساس یک سری نتایج آزمایشگاهی محدود یا در بعضی موارد بر طبق نتایج به دست آمده از آزمایش‌های صحرایی بر روی آبراهه‌ها ارائه شده‌اند. به لحاظ ماهیت تجربی و یا نیمه تجربی این روابط، نتایج حاصل از آن‌ها غالباً با هم متفاوتند و این نتایج بعضاً با آنچه که به واقع در آبراهه‌ها مشاهده می‌شود نیز تفاوت‌های فاحشی دارند. در نتیجه، هیچ یک از معامله‌های انتقال رسوب ارائه شده تاکنون نتوانسته‌اند کاملاً در مجامع مهندسی پذیرفته شوند. چرا که هیچ یک قادر به تخمین و محاسبه دقیق نرخ انتقال رسوب نیستند. این عدم دقت در نتایج حاصل از معادله‌ها در رودخانه‌هایی که تحت تأثیر شرایط خاص جوی و طبیعی قرار دارند، آشکارتر است.

مواد و روش‌ها

معادله‌های حاکم بر جریان

در این قسمت به بررسی تفصیلی در مورد دینامیک سیالات محاسباتی، انواع روش‌های عددی و معرفی نرم‌افزارهای محاسبات عددی پرداخته شده و در انتها با معرفی نرم‌افزار Flow-3D به تشریح معادله‌های کلی حاکم بر جریان سیال، معادله‌های حاکم بر جریان آشفته، روش حجم سیال، روش کسر مساحت و حجم مانع به کار رفته در نرم‌افزار پرداخته خواهد شد.

برخی از معادله‌های انتقال رسوب که به‌طور مدام و پیوسته در حال تغییر، تکمیل و افزایش‌اند و روابط ریاضی مربوطه که در نرم‌افزار مورد نظر استفاده شده است در جدول (۱) ارائه شده است.

جدول ۱- روابط انتقال رسوب معلق در جریان های کانال روباز

Table 1- Suspended Sediment Transport Equations for Open Channel Flows

Researcher's names	Eq	Description
Rouse (1937)	$\frac{c}{c_a}=(\frac{d-y}{y}\times\frac{y}{d-a})^z$ $z=\frac{\omega}{ku_*}$	C: concentration of suspended sediments at the desired depth. C_a: initial concentration of suspended sediments. d: flow depth. ω: settling velocity of particles. k: Von Karman coefficient. u_*: shear velocity. z: Rouse number.
Liu, H. K. (1958).	$C=C_p.(q-\frac{v}{a})\exp(\frac{\gamma_s v.a}{y})$	C: Concentration of suspended sediments at a specific depth. C_p : Concentration of suspended sediments at the water surface or reference point. q: Current flow rate a: Empirical coefficient. v: Flow velocity. γ_s: Density of sedimen. y: depth of the system being studied.
Brooks equation (1965)	$\frac{q_s}{\gamma_w.q.C_{md}}=f(k\frac{V}{u_*},z)$	q_s: suspended load per unit width. γ_w: specific weight of water. q: flow rate per unit width. C_{md}: weight concentration at a distance of 0.5d from the bed. f: function. V: average flow velocity. k: Von Karman coefficient. u_*: shear velocity. z: Rouse number.
Van Rijn (1984)	$C=k\frac{D_s^3}{\upsilon}(\frac{\gamma_s-\rho}{\rho})(\frac{q^{\frac{3}{2}}}{d^{\frac{1}{2}}})$	C: Suspended load flow rate k: The experimental coefficient. D_s: Diameter of sediment particles(m). γ_s: Density of sedimen. ϑ:Viscosity of water (usually in m^2/s). ρ: Density of water (usually in kg/m^3). q: flow rate per unit width. d: flow depth.

DOI: 10.22055/jise.2025.44838.2094

Flow-3D، نرم‌افزاری قوی در زمینه‌ی مکانیک سیالات می‌باشد که تولید، توسعه و پشتیبانی آن توسط شرکت Flow Science Inc. صورت گرفته است. این نرم‌افزار برای تحقیق در مورد رفتار یک، دو و سه بعدی دینامیکی سیالات در محدوده‌ی کاربردی وسیعی طراحی شده است. یکی از قابلیت‌های عمده‌ی این برنامه آنالیزهای هیدرولیکی، توانایی مدل کردن جریان‌های با سطح آزاد به روش VOF می‌باشد.

Flow-3D شامل الگوهای فیزیکی مختلفی می‌باشد که برخی از آن‌ها عبارتند از: آب‌های کم عمق، لزجت، کاویتاسیون، آشفتگی، کشش سطحی و محیط‌های متخلخل. این مدل‌ها در زمینه‌هایی مانند ریخته‌گری مواد، مهندسی فرآیند، هیدرولیک، مهندسی محیط زیست، هوا فضا، علوم دریایی و نفت و گاز کاربرد دارد. برای استفاده از این نرم‌افزار به یک پردازنده‌ی Pentium(III) با ویندوز Xp احتیاج است. حداقل حافظه‌ی کارت گرافیک نیز ۳۲^{Mb} می‌باشد. این برنامه بر روی سیستم عامل Seven و Linux قابل نصب می‌باشد. از مزایای دیگر این نرم‌افزار، قابلیت شبکه کردن آن با سیستم‌های پردازنده‌ی دیگر است.

این نرم‌افزار در تحلیل مسائل جریان‌های با سطح آزاد قابلیت ویژه‌ای دارد. نرم‌افزار Flow-3D نیز مانند نرم‌افزار FLUENT از روش حجم محدود در محاسبات شبکه‌بندی منظم مستطیلی بهره می‌گیرد. این شبکه دارای مزایایی برای تولید آسان و نظم مناسب برای بهبود بخشیدن به شبیه‌سازی عددی است که به کمترین ذخیره‌ی حافظه احتیاج دارد. این نرم‌افزار از روش خاصی به نام FAVOR سود می‌برد و برای شبیه‌سازی هندسی از شبکه‌بندی مستطیلی استفاده می‌کند. در این روش برای هر حجم کنترل، مقدار فشار، سرعت، دما و... به صورت مجزا محاسبه می‌شود.

به‌منظور آشنایی با اساس کار نرم‌افزار به بیان معادله‌های حاکم بر جریان‌های آشفته خواهیم پرداخت. در جریان‌های تراکم ناپذیر، روابط (۱) و (۲) به‌ترتیب رابطه پیوستگی و اندازه حرکت را بیان می‌نمایند.

$$\frac{\partial u_i}{\partial x_i}=0 \qquad (۱)$$

$$\frac{\partial u_i}{\partial t}+u_i\frac{\partial u_i}{\partial x_i}=-\frac{1}{\rho}\frac{\partial p}{\partial x_i}+g_i+\nu\nabla^2 u_i \qquad (۲)$$

در روابط فوق u سرعت لحظه‌ای در جهت i، v لزجت سینماتیکی سیال، ρ جرم مخصوص سیال، g_i مؤلفه شتاب ثقل در جهت i و p فشار در هر نقطه از سیال است. در تحلیل عددی جریان آشفته می‌توان از روابط فوق استفاده کرد اما باید بتوان نوسانات نامنظم و لحظه‌ای کمیت‌های میدان جریان را در هر لحظه و هر نقطه مدل نمود. اما چنانچه مقادیر لحظه‌ای سرعت و فشار یا هر کمیت دیگری مانند Φ را به مقدار متوسط و زمانی تفکیک شود.

به‌منظور حل از مدل تلاطمی LES استفاده شده است. ایده اساسی این مدل این است که تمام ساختارهای تلاطم که قابل محاسبه با استفاده از شبکه محاسباتی هستند، به‌طور مستقیم محاسبه شوند و فقط ساختارهای ریزی که قابل محاسبه نیستند، تقریب زده شوند. زمانی که از مدل LES استفاده می‌شود باید دقت کرد که این مدل سه بعدی و وابسته به زمان است. علاوه بر این، نوسانات باید مقداردهی اولیه شوند و یا در مرزهای ورودی تعریف شوند. اگر چه این عمل نیازمند تلاش بسیار بوده و نیازمند هزینه محاسباتی بالا است ولی نتایجی که تولید می‌شود دارای جزئیات بیشتری نسبت به مدل‌های بر پایه متوسط گیری رینولدز است. در مدل LES اثرات آشفتگی که خیلی کوچکند و قابل محاسبه نیستند باید با یک لزجت آشفتگی، که متناسب است با یک مقیاس طول ضربدر معیاری از نوسانات سرعت در آن مقیاس، نمایش داده می‌شود. می‌توان از یک میانگین هندسی ابعاد سلول شبکه برای مقیاس طول استفاده کرد :

$$L=(\partial x\,\partial y\,\partial z)^{1/3} \qquad (۳)$$

و نوسانات سرعت را با حاصل‌ضرب بزرگی آن و تنش برشی متوسط مقیاس کرد. این کمیت‌ها برای ارائه لزجت گردابی سینماتیکی مدل LES با هم ترکیب می‌شوند:

$$V_T=(CL)^2\sqrt{e_{ij}\,e_{ij}} \qquad (۴)$$

به‌طوریکه C ضریب ثابتی در دامنه ۰/۱ تا ۰/۲ است و e_{ij} اشاره به مؤلفه‌های تانسور نرخ کرنش دارد.

برای حل معادله‌ها از افزونه اسکالر (Scalar) استفاده گردید. این بخش در قسمت فیزیک مدل شبیه‌ساز جریان می‌باشد که از آن در تمامی مدل‌های استاندارد استفاده می‌شود. به‌عنوان مثال می‌توان از مسائل آبشستگی و رسوب‌گذاری، ردیابی نقص‌ها در مدل، ورود هوا یا رصد زمان ماندن سیال یاد کرد. این اسکالرها زمانی که مدل‌های مربوطه آن‌ها فعال می‌شوند به‌طور خودکار تعریف می‌شوند. اسکالرهای تعریف شده می‌توانند توسط کاربر به‌عنوان یک نشان‌گر درون سیال، مشابه ذرات نشان‌گر، یا به‌عنوان بخشی از یک سفارشی‌سازی معرفی شوند (به‌عنوان مثال: شمارش غلظت ذرات در سلول‌های مش مدل).

اسکالر قابل انتقال معمولاً به‌عنوان غلظت بر حسب جرم در حجم سیال در سلول تعریف می‌شود. یک معادله انتقال به‌طور خودکار برای هر اسکالر قابل انتقال، تعریف شده توسط کاربر یا مدل حل می‌شود:

$$\frac{\partial C}{\partial T}+\frac{1}{V_F}[uA_x\frac{\partial C}{\partial x}+\upsilon A_y\frac{\partial C}{\partial y}+\omega A_z\frac{\partial C}{\partial z}] =\frac{1}{V_F}[\frac{\partial}{\partial x}(A_xD\frac{\partial C}{\partial x})+R\frac{\partial}{\partial u}(A_yDR\frac{\partial C}{\partial y})+\frac{\partial}{\partial z}(A_zD\frac{\partial C}{\partial y}] +C_{SOR} \quad (۵)$$

در ساده‌ترین حالت، اسکالرها بر دینامیک سیال تأثیر نمی‌گذارند. آن‌ها با جریان متوسط حرکت می‌کنند و با ضریب انتشار منتشر می‌شوند.

$$\rho D=RMSC.\mu+CMSC \quad (۶)$$

که D در آن ضریب انتشار است.

که در آن RMSC عدد اشمیت معکوس است، μ ویسکوزیته سیال دینامیکی، CMSC یک ضریب انتشار اسکالر ثابت است و ρ چگالی سیال است.

اسکالرها همچنین می‌توانند دارای ویژگی‌های خاصی باشند که بر ویژگی‌های سیال مانند چگالی، ویسکوزیته، مدول الاستیک و تنش تسلیم تأثیر می‌گذارند و قابلیت مدل‌سازی چندین ماده یا سیال با تغییرات موضعی خاص را فراهم می‌کنند. هنگامی که جرم اسکالر در محاسبه مخلوط سیال اسکالر گنجانده شود، به‌سادگی به جرم سیال اضافه می‌شود. به عبارت دیگر، اسکالرها همیشه به‌عنوان املاح بینابینی در نظر گرفته می‌شوند، زمانی که مولکول‌های آن‌ها کاملاً در فضاهای بین مولکول‌های حلال، یعنی سیال، قرار می‌گیرند. یک اسکالر فقط می‌تواند مایع را سنگین‌تر کند. سایر خواص مخلوط حمل شده توسط اسکالرها به‌عنوان میانگین جرمی سیال خالص و ویژگی‌های اسکالر محاسبه می‌شود. به‌عنوان مثال، برای یک اسکالر منفرد، ویسکوزیته مخلوط:

$$\mu_{mix}=[\rho\mu+\sum_i(C_i\mu C_i)]/(\rho+\sum_i(C_i)) \quad (۷)$$

که در آن چگالی و ویسکوزیته سیال خالص هست و ویسکوزیته‌ای که به اسکالر نسبت داده می‌شود. جمع بر روی تمام اسکالرهایی که به ویسکوزیته مخلوط کمک می‌کنند انجام می‌شود.

اسکالرها را می‌توان در شرایط اولیه، در مرزهای ورودی مش و در منابع سیال معرفی کرد. آن‌ها همچنین یک پلتفرم قدرتمند برای سفارشی‌سازی کاربر برای متناسب با نیازهای مدل سازی خاص ارائه می‌کنند.

حرکت اسکالر کسر سیال توسط معادله زیرکنترل می‌شود، تغییرات در یک سلول به مجموع شارهای بین صفحات سلول‌ها کاهش می‌یابد. با این حال، باید در محاسبه این شارها دقت ویژه‌ای صورت گیرد تا تعریف دقیق مرزهای سیال حفظ شود. روش به‌کار گرفته شده در اینجا از نوعی تقریب شار دهنده–پذیرنده استفاده می‌شود. ایده اصلی استفاده از اطلاعات در مورد پایین دست و همچنین بالادست یک مرز شار برای ایجاد یک شکل رابط تقریبی و سپس استفاده از این شکل در محاسبه شار است.

$$V_F\frac{\partial\Phi}{\partial t}+\nabla.(uA\Phi)=RHS \quad (۸)$$

روش اساسی توسعه یافته برای استفاده در روش حجم سیال فاصله که در اینجا استفاده می‌شود، ممکن است با در نظر گرفتن مقدار شار در جهت x از طریق صفحه سلول در طول یک مرحله زمانی از مدت زمان درک شود. شار حجمی که از این وجه عبور می‌کند در واحد سطح مقطع برابر است، جایی که سرعت عادی در سطح و ناحیه باز برای جریان است. علامت سلول‌های دهنده و گیرنده را مشخص می‌کند، یعنی سلول‌ها به‌ترتیب حجم خود را از دست می‌دهند و افزایش می‌دهند. به‌عنوان مثال، اگر مثبت باشد، سلول بالادست یا چپ اهداکننده و سلول پایین دست یا راست گیرنده است. مقدار شار در سطح سلولی در یک مرحله زمانی به‌عنوان ضربات سطح مقطع صورت بدون مانع (δ_y,δ_z) تعریف می‌شود، از آن جایی که براساس معادله‌های (۹) و (۱۰) بیان می‌گردد.

$$\delta F=MIN(F_{AD}|L|+CF,F_DV_{F,D}\,\delta_{x,D} \quad (۹)$$

$$CF=MAX(F_{DM}-F_{AD})|L|-(F_{DM}-F_D) V_{F,F}\,\delta_{xD},\circ.\circ] \quad (۱۰)$$

زیرنویس‌های منفرد نشان دهنده سلول‌های گیرنده (A) و دهنده (D) هستند.

به‌طور خلاصه، ویژگی در معادله (۱۰) از شار F بیشتر از سلول اهداکننده جلوگیری می‌کند، در حالی که این ویژگی یک شار اضافی را به حساب می‌آورد، اگر مقدار خالی (1-F) که باید شار شود از مقدار خالی موجود بیشتر می‌شود. سری شکل‌های زیر توضیح تصویری معادله را ارائه می‌دهد. سلول‌های دهنده و گیرنده در شکل (*a*) مشخص می‌باشد شکل (۱) برای حرکت در سطح سلول‌های عمودی تعریف شده‌اند. آرایش دهنده–گیرنده در (a) نشان داده شده است که در آن خط چین مرز سمت چپ حجم کل در حال انتقال را نشان می‌دهد. مناطق سایه‌دار نشان داده شده در (b-d) مقادیر واقعی شار هستند. در قسمت (c) شکل پایین، تمام سیال در سلول اهداکننده شار شده است زیرا هر چیزی که بین خط چین و مرز شار قرار دارد به سلول گیرنده حرکت می‌کند. اینکه از سلول گیرنده یا دهنده استفاده شود به جهت‌گیری سطح متوسط بستگی دارد. سلول پذیرنده زمانی استفاده می‌شود که سطح در جهتی عادی به خودش برمی‌گردد. در غیر این صورت، از مقدار سلول دهنده استفاده می‌شود. با این حال، اگر سلول پذیرنده خالی باشد یا اگر سلول

DOI: 10.22055/jise.2025.44838.2094

بالادست سلول اهداکننده خالی باشد، از مقدار سلول پذیرنده برای تعیین شار بدون توجه به جهت سطح استفاده می‌شود. این بدان معنی است که قبل از اینکه هر مایعی بتواند وارد سلول خالی پایین دست شود، یک سلول اهداکننده باید تقریباً پر باشد.

هنگامی که شار با روش فوق محاسبه شد، در ناحیه مرزی شار ضرب می‌شود تا مقدار سیالی که باید از سلول دهنده کم شود و به سلول پذیرنده اضافه شود، به‌دست می‌آید. به این ترتیب حجم سیال تعریف شده توسط حفظ می‌شود. هنگامی که فرآیند فرارفت برای تمام مرزهای سلول در مش تکرار می‌شود، مقادیر به‌دست آمده با مقادیر پیشرفته زمان مطابقت خواهد داشت.

شبیه‌سازی جریان

در این تحقیق به بررسی نسبت ظاهری شکل مخزن بر توزیع میزان غلظت رسوبات معلق تحت شرایط جریان آزاد پرداخته شده است. برای این منظور از یک مخزن مستطیلی با نسبت ظاهری مختلف استفاده گردید و میزان توزیع غلظت رسوبات معلق تحت شرایط مختلف مورد بررسی قرار خواهد گرفت. برای تهیه‌ی هندسه‌ی مدل از امکانات ترسیمی خود نرم‌افزار استفاده شده است. در این نرم‌افزار، مدل سه بعدی ترسیم و با فرمت (*.stl) ذخیره شده است. در شکل (۲) مدل مخازن مورد استفاده در تحقیق نشان داده شده است:

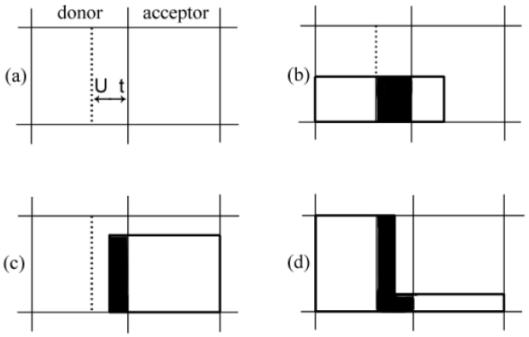


Fig. 1- Examples of free-surface shapes used in the advection of F. The donor-acceptor arrangement is shown in (a) where the dashed line indicated the left boundary of the total volume being advected. The shaded regions shown in (b-d) are the actual amounts of F fluxed.

شکل ۱- نمونه‌هایی از اشکال سطح آزاد که در جابه‌جایی F استفاده شده‌اند. ترتیب اهدایی-پذیرنده در قسمت (a) نشان داده شده است که در آن خط چین مرز سمت چپ کل حجم جابه‌جا شده را مشخص می‌کند. مناطق سایه‌دار در قسمت‌های (b-d) مقدار واقعی جابه‌جایی F را نشان می‌دهند

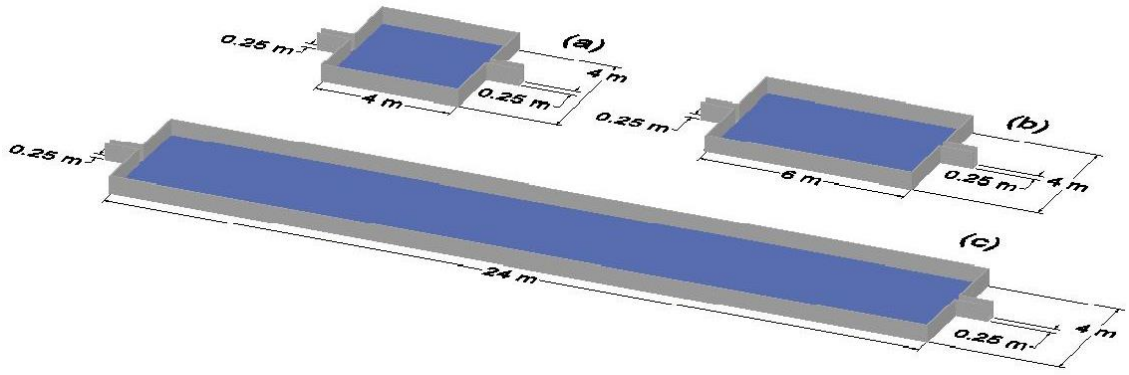


Fig. 2- Geometric shape and dimensions of the models used in this study: a) S.F.=1, b) S.F.=2, and c) S.F.=4

شکل ۲- شکل و ابعاد هندسی مدل‌های مورد استفاده در این تحقیق: الف) S.F.=1، ب) S.F.=2 و ج) S.F.=4

در گام بعد برای ایجاد یک شبکه محاسباتی، از یک بلوک تک به‌صورت یکپارچه که مدل را احاطه نموده استفاده شده است. هر مش‌بندی در نرم‌افزار دارای دو گزینه اندازه سلول (Cell Size) و تعداد سلول (Cell Count) می‌باشد. که اعداد درج شده در کادرهای مربوطه به‌ترتیب برابر اندازه سلول‌های محاسباتی و تعداد کل سلول‌های محاسباتی می‌باشد. برای شبیه‌سازی هندسه‌های پیچیده و یا زمانی که نیاز به وجود میدان‌های حل با سلول‌های ریزتر می‌باشد می‌توان برای کاهش حجم محاسبات از چند شبکه حل (مش پنل) مجزا یا تو در تو استفاده نمود.که البته در این تحقیق در تمامی مراحل از یک شبکه حل با تعداد سلول‌های مورد نیاز که براساس تست‌های متفاوت انجام گرفته شده و مورد نیاز استفاده شده است. البته باید قبل از ورود به مرحله انجام حل تست نسبت اندازه و شکل سلول‌ها انجام گیرد که در ذیل به نحوه انجام این تست پرداخته شده است.

طبق تعریف، نسبت اندازه سلول‌ها عبارت است از نسبت ابعاد دو سلول مجاور هم در یک امتداد خاص ونسبت شکل عبارت است از نسبت بزرگترین بعد یک سلول به کوچکترین بعد آن.

اندازه دو نسبت مذکور بسیار مهم بوده و محدودیت‌هایی در اندازه آن‌ها وجود دارد. در تعریف یک بلوک از میدان حل، حداکثر مقدار نسبت اندازه سلول‌های مجاور هم و نسبت شکل آن‌ها باید کنترل گردد برای حصول نتایج درست و منطقی و کاهش خطا و زمان شبیه‌سازی، باید نسبت اندازه دو سلول مجاور تا حد ممکن نزدیک به یک باشد و حداکثر از ۱/۲۵ تجاوز نکند. همچنین نسبت شکل نیز تا حد ممکن نزدیک یک باشد و حداکثر از سه تجاوز نکند. در کل مدل سازی‌های انجام شده در این تحقیق تعداد سلول‌های شبکه محاسباتی به نحوی تعیین گردید که نسبت اندازه دوسلول بین ارقام یک الی ۱/۰۵ می‌باشد و همچنین نسبت شکل بین ارقام یک الی ۱/۲ محدود بوده است. حساسیت به شبکه‌بندی و انفصال میدان حل، همواره یکی از مسائل مهم در مدل‌های عددی بوده است. در همین زمینه الگوهای شبکه‌بندی مختلفی ارائه شده است که هر کدام دارای نقاط ضعف و قوت مخصوص به خود هستند. Flow-3D نسبت به مرزهای جامد و شبکه‌بندی نحوه‌ی برخورد متفاوتی در مقایسه با سایر بسته‌های نرم‌افزاری دینامیک سیالات محاسباتی (CFD) دارد. Flow-3D از روش کسر مساحت–حجم مانع استفاده می‌کند. در این روش، شکل نهایی موانع به شبکه‌ی ساخته شده در اطراف آن‌ها بستگی دارد. اگر سطح مانع دارای لبه‌های تیز، مقعر و یا محدب باشد ممکن است محل تقاطع چندگانه به وجود آید. این حالت هنگامی رخ می‌دهد که یک پاره خط شبکه بیش از یکبار توسط مانع قطع شود. در چنین حالتی قسمت واقع شده در یک سلول در تشکیل جسم مورد نظر توسط نرم‌افزار شناسایی نمی‌گردد و مطابق شکل (۳)، شکل‌های سمت چپ به فرم شکل‌های سمت راست در می‌آید. برای مشخص کردن حدود شبکه‌بندی، بلوک‌هایی مشخص می‌شود که کلیه‌ی اندازه‌های سازه‌ی مورد نظر و فضای آزاد در داخل آن تعریف می‌شود. می‌توان تمام جزئیات مورد نظر را در یک بلوک هم در نظر گرفت.

یکی از قابلیت‌های کلیدی نرم‌افزار Flow-3D، امکان تقسیم میدان محاسباتی به چندین بلوک است که در هر بلوک با توجه به شرایط خاص، از مش مناسب استفاده می‌شود. هر بلوک نماینده بخشی از میدان محاسباتی است و این تقسیم‌بندی می‌تواند به دو روش انجام شود: با استفاده از بلوک‌های متوالی که در کنار یکدیگر قرار گرفته و هیچ‌گونه هم‌پوشانی ندارند، یا با بهره‌برداری از بلوک‌های درهم که در این حالت، یک بلوک به‌طور کامل درون بلوک دیگری قرار می‌گیرد. مقادیر کمیت‌ها با روش عددی در هر بلوک محاسبه می‌شوند؛ سپس این مقادیر از یک بلوک به بلوک دیگر با استفاده از درون‌یابی منتقل می‌شوند به شکلی که پیوستگی برقرار باشد.

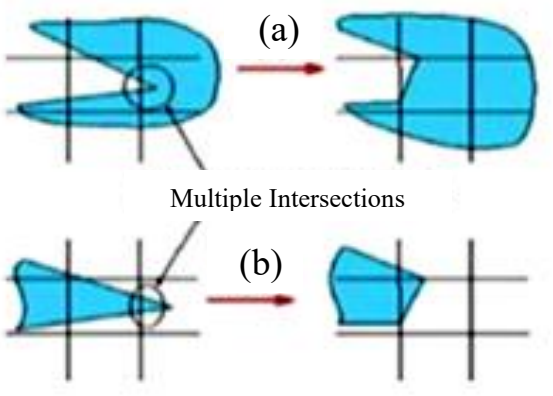


Fig. 3- Interpretation of multiple intersections: Original shape is shown on the left and the resulting shape on the right

شکل ۳-تفسیر تقاطع‌های متعدد: شکل اصلی در سمت چپ و شکل حاصل‌شده در سمت راست نمایش داده شده است

DOI: 10.22055/jise.2025.44838.2094

شرایط مرزی برای کلیه مدل‌های مورد استفاده در این تحقیق در شکل (۴) به تفصیل نمایش داده شده است.

به‌منظور مدل سازی، سه هندسه مخزن مستطیلی به شرح جدول (۲) انتخاب گردید. که کلیه پارامترهای هندسه مخازن انتخاب شده شامل L طول مخزن، B عرض مخزن، b عرض کانال ورودی، H عمق مخزن، L/B نسبت ظاهری مخزن می‌باشد.

برای بررسی توزیع غلظت در سطح مخازن تعریف شده میزان غلظت ورودی برابر شش گرم در لیتر و دبی ورودی به مخزن برابر ۱۰ لیتر برثانیه در نظر گرفته شده است.مدت زمان انجام تحلیل انجام گرفته ۱۰ برابر زمان رسیدن غلظت ورودی به انتهای مخزن در نظر گرفته شده است. و نتایج در این زمان بررسی گردید.

واسنجی مدل

برای اعتبارسنجی مدل‌های عددی توسعه یافته در این پژوهش، مقادیر میانگین سرعت جریان حاصل از شبیه‌سازی عددی با داده‌های آزمایشگاهی به‌دست‌آمده از مطالعه‌های پیشین مقایسه شده‌اند (Kantoush, 2007). نتایج این مقایسه در شکل (۵) ارائه شده است. همچنین، برای تحلیل دقیق‌تر میزان همخوانی و پراکندگی داده‌ها، نمودار پراکندگی (Scatter Plot)بین مقادیر مشاهداتی (Observed) و پیش بینی (Predicted) متوسط سرعت جریان درون حوضچه (u) ، در شکل (۶) ترسیم شده اند و به‌عنوان معیاری برای ارزیابی دقت مدل عمل می‌کند. در این نمودار، خط نقطه‌چین با شیب واحد به‌عنوان خط بهترین تطبیق (Perfect Agreement Line) در نظر گرفته شده است؛ یعنی در صورت کاملاً دقیق بودن پیش‌بینی‌ها، تمام نقاط داده بر روی این خط قرار می‌گیرند. نتایج نشان می‌دهد که نقاط داده‌های مشاهده‌شده به طور قابل توجهی نزدیک به این خط قرار گرفته‌اند، که نشان‌دهنده همبستگی قوی و همخوانی بالای مدل عددی با داده‌های آزمایشگاهی است. معادله خط رگرسیون برازش شده از بین داده ها ($y = 1.0091x$) نیز نشان‌دهنده انطباق بسیار نزدیک بین مقادیر پیش‌بینی‌شده و مشاهده‌شده است. برای کمّی‌سازی دقت مدل، شاخص‌های آماری خطای ریشه میانگین مربعات (RMSE = 0.065) و میانگین مربعات خطا (MSE = 0.037) محاسبه شده‌اند. مقادیر کم این شاخص‌ها نشان‌دهنده انحراف ناچیز مدل از داده‌های واقعی و در نتیجه اعتبار بالای مدل عددی در شبیه‌سازی رفتار جریان است. علاوه بر این، خطوط منقطع ترسیم شده با شیب‌های ±۲۰٪ در بالا و پایین خط بهرین تطبیق، به عنوان محدوده‌های قابل قبول دقت پیش‌بینی در نظر گرفته شده‌اند. قرار گرفتن بیشتر نقاط داده در داخل این محدوده‌ها، عملکرد مناسب مدل را در شرایط عملی و کاربردهای مهندسی تأیید می‌کند. به طور کلی، این تحلیل آماری و گرافیکی نقش حیاتی در اعتبارسنجی شبیه سازی صورت گرفته ایفا می‌کند و اطمینان لازم را فراهم می‌آورد که مدل توسعه‌یافته قادر است جزئیات و رفتارهای پیچیده پدیده‌های هیدرودینامیکی را با دقت قابل قبولی ارائه نماید.

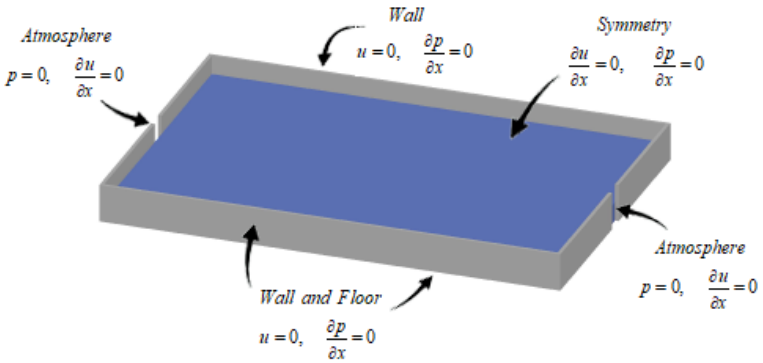


Fig 4 - Boundary conditions introduced to the model
شکل ٤- شرایط مرزی معرفی شده به مدل

Table 2- Specifications of the numerical models
جدول ۲- مشخصات سناریوهای مدل سازی

Model	B	L	L/B	b	H
m_1	4.00	4.00	1.00	0.25	0.30
m_2	4.00	8.00	2.00	0.25	0.30
m_3	4.00	16.00	4.00	0.25	0.30

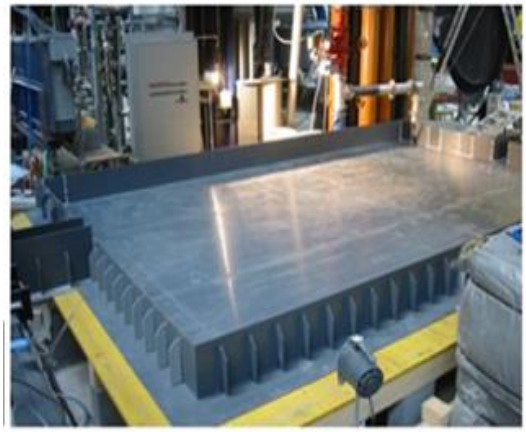


Fig. 5- The experimental setup used in the study by Kantoush (2007).
شکل ۵- مدل آزمایشگاهی مورد استفاده در تحقیقات (Kantoush, 2007)

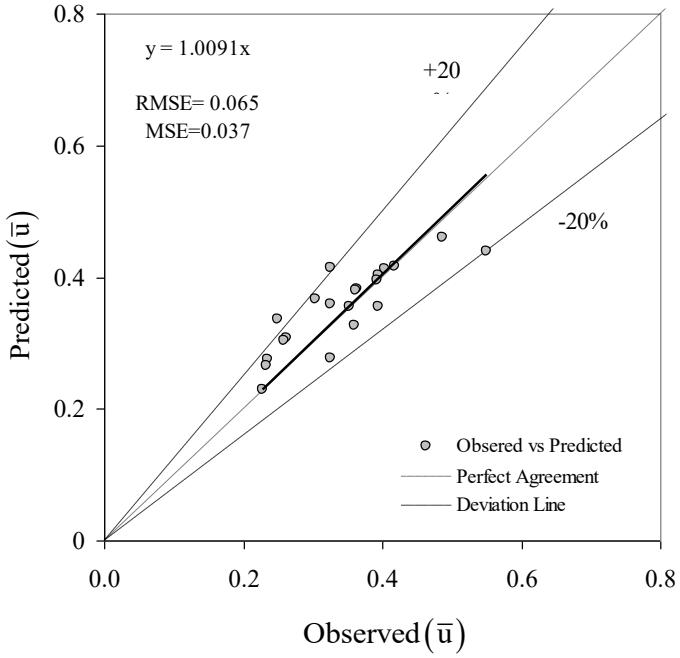


Fig. 6. Scatter plot of predicted versus observed spatially-averaged flow velocities within the settling basin
شکل ٦-نمودار پراکندگی سرعت های متوسط جریان پیش بینی شده در مقابل مقادیر مشاهداتی درون حوضچه رسوبگیر

یافته‌ها

تأثیر ضریب شکل حوضچه بر الگوی جریان و رسوب‌گذاری

در تحلیل رفتار جریان غلیظ درون حوضچه رسوب‌گیر با ضریب شکل معادل یک، تغییرات دینامیکی و پیشرفت جریان را می‌توان به وضوح در شکل (۷) مشاهده کرد. برای این منظور، از یک پارامتر نسبی زمان به نام "زمان پیشرفت" استفاده شده است که به صورت نسبت t/t_0 تعریف می‌شود. در این فرمول، t نمایان‌گر زمان لحظه‌ای پیشرفت پیشانی جریان غلیظ درون حوضچه و t_0 زمان مورد نیاز برای طی کردن کامل طول حوضچه توسط پیشانی جریان غلیظ است. در سناریوی اول و پس از گذشت سه ثانیه از آغاز اجرای مدل شکل (a–۷)، با توجه به اینکه پارامتر نسبی زمان پیشرفت t/t_0 به سمت ۰/۲۵ میل می‌کند، جریان غلیظ تنها موفق به طی کردن یک چهارم طول حوضچه می‌شود. با ادامه این روند و افزایش نسبت زمان پیشرفت به ۰/۵، پیشانی جریان غلیظ به‌طور تقریبی نیمی از طول حوضچه را طی می‌کند (شکل b–۷). پس از ۱۲ ثانیه از آغاز مدل شکل (c–۷)، پیشانی جریان غلیظ تمام تلاش خود را برای رسیدن به دیواره انتهایی حوضچه به کار می‌گیرد و در این مرحله،

DOI: 10.22055/jise.2025.44838.2094

پارامتر نسبی زمان پیشرفت به سمت یک میل می‌کند $t/t_0=1$، در حالی که پیشانی جریان غلیظ به دیواره نزدیک می‌شود، هنوز رسوبی از کانال انتهایی خارج نشده است. با توجه به مومنتوم (تصادم) به وجود آمده ناشی از برخورد پیشانی جریان غلیظ با دیواره انتهایی و انهدام مغزه پیشانی جریان غلیظ، گسترش جریان در ناحیه عرضی حوضچه آغاز می‌شود. این شرایط می‌تواند به تخلیه بخشی از رسوبات از کانال انتهایی منجر شود و احتمالاً در صورت افزایش غلظت در مجاورت دیواره انتهایی حوضچه، پتانسیل تغییر جهت حرکت نیز به وجود می‌آید. این مرحله به‌عنوان "فاز جریان برگشتی" یا "Reverse Flow Phase" نام‌گذاری می‌شود و زمانی محقق می‌گردد که پارامتر نسبی زمان از یک فراتر رود. بعد از گذشت ۱۶ ثانیه از اجرای مدل $t/t_0=1.34$ ، تخلیه رسوبات از کانال انتهایی آغاز می‌شود شکل (d–۷) و در زمان ۲۰ ثانیه $t/t_0=1.67$، تجمع رسوبات در مجاورت دیواره انتهایی شکل می‌گیرد شکل (e–۷) پس از ۳۰ ثانیه ،$t/t_0=2.5$ پیشانی جریان غلیظ پتانسیل لازم برای ایجاد جریان برگشتی را پیدا کرده و به سمت دیواره‌ها گسترش می‌یابد شکل (f–۷). این تغییرات به وضوح نشان‌دهنده تأثیر ضریب شکل بر الگوی جریان و فرآیند رسوب‌گذاری است. با ادامه زمان، در ۴۰ ثانیه $t/t_0=3.34$ ، جریان برگشتی در حال تکامل است شکل (g–۷) و در زمان‌های ۷۰ ثانیه $t/t_0=5.84$ شکل (h–۷) و ۱۰۰ ثانیه $t/t_0=8.38$ شکل (i–۷) این جریان به‌طور کامل شکل می‌گیرد و حوضچه وارد فاز انباشت رسوبات می‌شود. در این شرایط، پیشانی جریان غلیظ ورودی به حوضچه با حداقل پخشیدگی در عرض، به سمت کانال خروج هدایت می‌شود.

در شـرایط با ضـریب شـکل حوضـچه برابر دو، الگوی پخش جریان غلیظ به شرح زیر است:

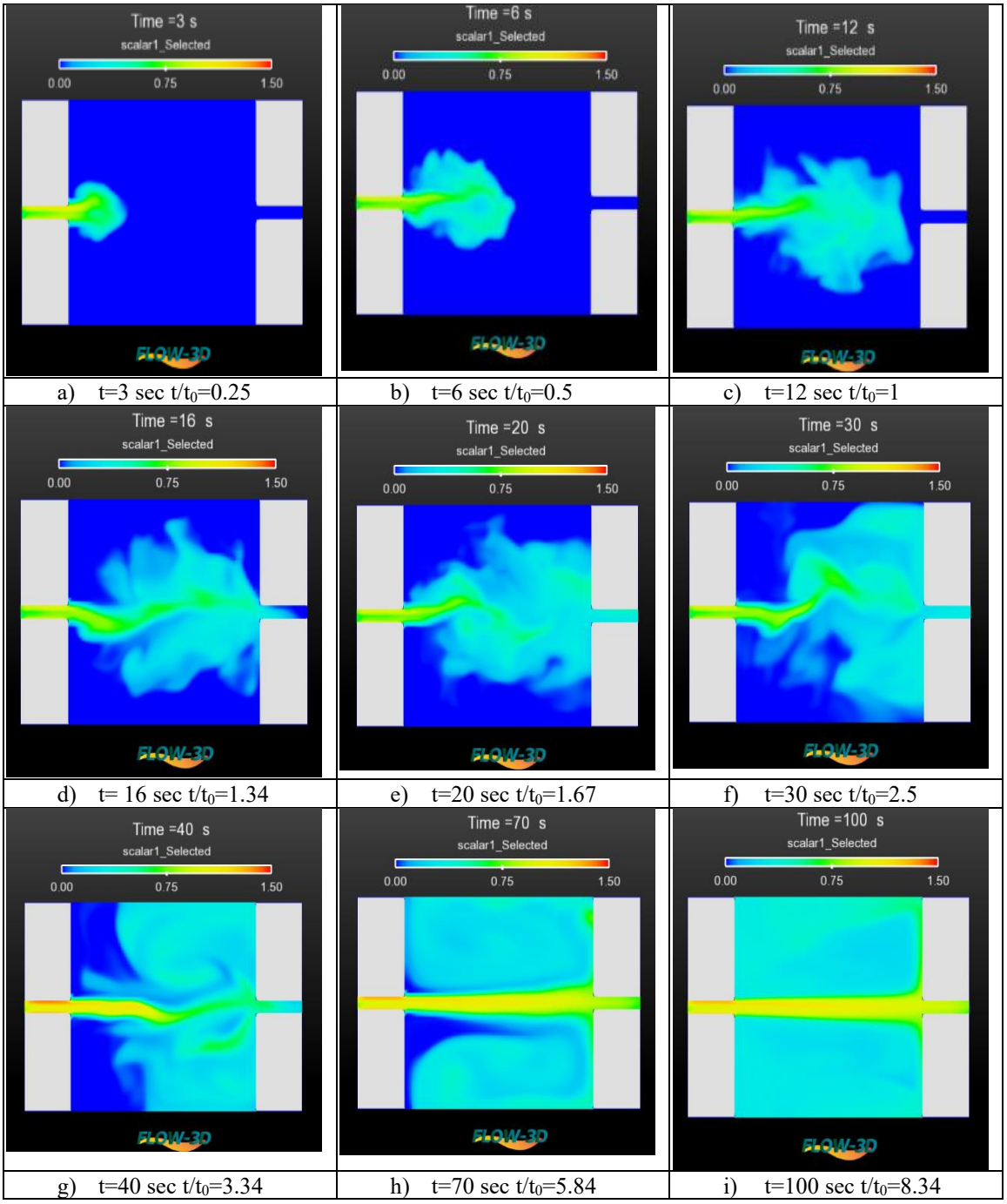
۱۲ ثانیه پس از اجرای مدل شکل (a–۸)، پیشانی جریان غلیظ بیش از یک سوم طول حوضچه را طی نموده است و با گذشت ۲۰ ثانیه (شکل b–۸)، پیشانی جریان غلیظ بیش از نیمی از طول حوضچه را پیموده است. شکل (c–۸) الگوی جریان را پس از گذشت ۵۰ ثانیه از اجرای مدل گزارش می‌نماید. در این حالت مشاهده می‌گردد که توزیع عرضی جریان به واسطه تشکیل گردابه‌های ون کارمن، شتاب بیشتری گرفته و توان جریان جهت طی مسیر طولی حوضچه بیشتر صرف توزیع عرضی و پخش رسوب در کل سطح حوضچه می‌گردد. در این زمان، پیشانی جریان غلیظ بیش از هفتاد درصد طول حوضچه را طی نموده است. همچنین گردابه‌های ون کارمن باعث شده‌اند که قبل از برخورد جریان غلیظ با دیواره مقابل، جریان وارد فاز برگشتی شود. پس از طی ۶۰ ثانیه از اجرای مدل تفاوت چندانی با حالت قبل در توزیع طولی پیشانی جریان غلیظ رخ نداده است شکل (d–۸)، اما گسترش گردابه‌های ون کارمن در خلاف جهت جریان قابل مشاهده است. در این شرایط، جریان برگشتی تقریباً کامل شده و گسترش عرضی آن تا دیواره ورودی حوضچه رسیده است. پس از طی ۷۰ ثانیه از اجرای مدل، جریان غلیظ وارد کانال تخلیه می‌شود (شکل e–۸). در این حالت، زمان پیشرفت به حدود $t/t_0=1.17$ می‌رسد، و گردابه‌های ون کارمن منجر به تکمیل فاز جریان برگشتی می‌شوند. با رسیدن زمان پیشرفت به مقدار $t/t_0=1.34$ جریان وارد فاز انباشت می‌گردد (شکل f–۸). شکل‌های (i, g, h–۸) به‌ترتیب مربوط به اجرای مدل در زمان‌های ۹۰، ۱۲۰ و ۱۶۰ ثانیه هستند که همگی نشان‌دهنده تکمیل فاز انباشت در حوضچه‌های رسوب‌گیر با ضریب شکل (۲) می‌باشند.

توزیع الگوی جریان حاوی رسوب در حوضچه‌های رسوب‌گیر با ضریب شکل (۴) بشرح زیر می‌باشد.

همان‌گونه که در شکل (a–۹) مشاهده می‌گردد پس از طی ۱۲ ثانیه از اجرای مدل، جریان آب و رسوب حدود ۱۵ درصد طول حوضچه را طی می‌ننماید. پس از گذشت ۵۰ ثانیه از اجرای مدل شکل (b–۹)، زمان پیشرفت به حدود $t/t_0=0.125$ می‌رسد. در این زمان، قبل از آنکه پیشانی جریان غلیظ یک‌سوم طول حوضچه را طی کند، مغزه جریان غلیظ تقریباً متلاشی شده و جریان چگال به دیواره‌های جانبی حوضچه رسیده است. این نشان می‌دهد، در حوضچه‌های با ضریب شکل بیشتر از دو، گسترش عرضی جریان زودتر از گسترش طولی آن رخ می‌دهد. با گذشت ۱۰۰ ثانیه از اجرای مدل شکل (c–۹)، توزیع عرضی و طولی رسوبات حدود ۳۵ درصد کل حوضچه را پوشش داده است.مادامی‌که زمان پیشرفت به $t/t_0=0.4$ نزدیک می‌شود، توزیع رسوبات تقریباً نیمی از کل حوضچه را فرا گرفته است.

این نشان می‌دهد که الگوی جریان قبل از اتمام فاز پیشرفت و تشکیل فاز جریان برگشتی، وارد فاز انباشت می‌شود. پس از ۴۰۰ ثانیه که زمان پیشرفت به یک می‌رسد شکل (e–۹)، یک جریان غلیظ ثانویه درون جریان چگال اولیه تشکیل شده است که از الگوی گردابه‌های ون کارمن تبعیت می‌کند.

پس از سپری شدن ۵۰۰ ثانیه از اجرای مدل و ۱۰۰ ثانیه از زمان تشکیل جریان غلیظ ثانویه، رسوبات از کانال تخلیه خارج می‌شوند و الگوی جریان بدون آنکه واردفاز برگشتی شود، وارد فاز انباشت می‌گردد (شکل f–۹). شکل‌های (h، g و h–۹) به‌ترتیب در زمان‌های ۵۵۰، ۱۳۰۰ و ۲۰۰۰ ثانیه نشان‌دهنده تکمیل فاز انباشت در حوضچه‌های رسوب‌گیر با ضریب شکل (۴) می‌باشند. بررسی‌ها و مقایسه نتایج الگوی جریان آب و رسوب درحوضچه‌های با ضریب شکل (۱)، (۲) و (۴) حاکی از آن است که در حوضچه‌های با ضریب شکل بیشتر مانند شکل (۹)، گسترش عرضی جریان چگال نسبت به گسترش طولی آن سریع‌تر اتفاق می‌افتد. همچنین امکان تشکیل جریان غلیظ ثانویه درون جریان چگال اولیه وجود دارد که از الگوی گردابه‌های ون کارمن نیز پیروی می‌کند.



a) t=3 sec t/t_0=0.25 b) t=6 sec t/t_0=0.5 c) t=12 sec t/t_0=1

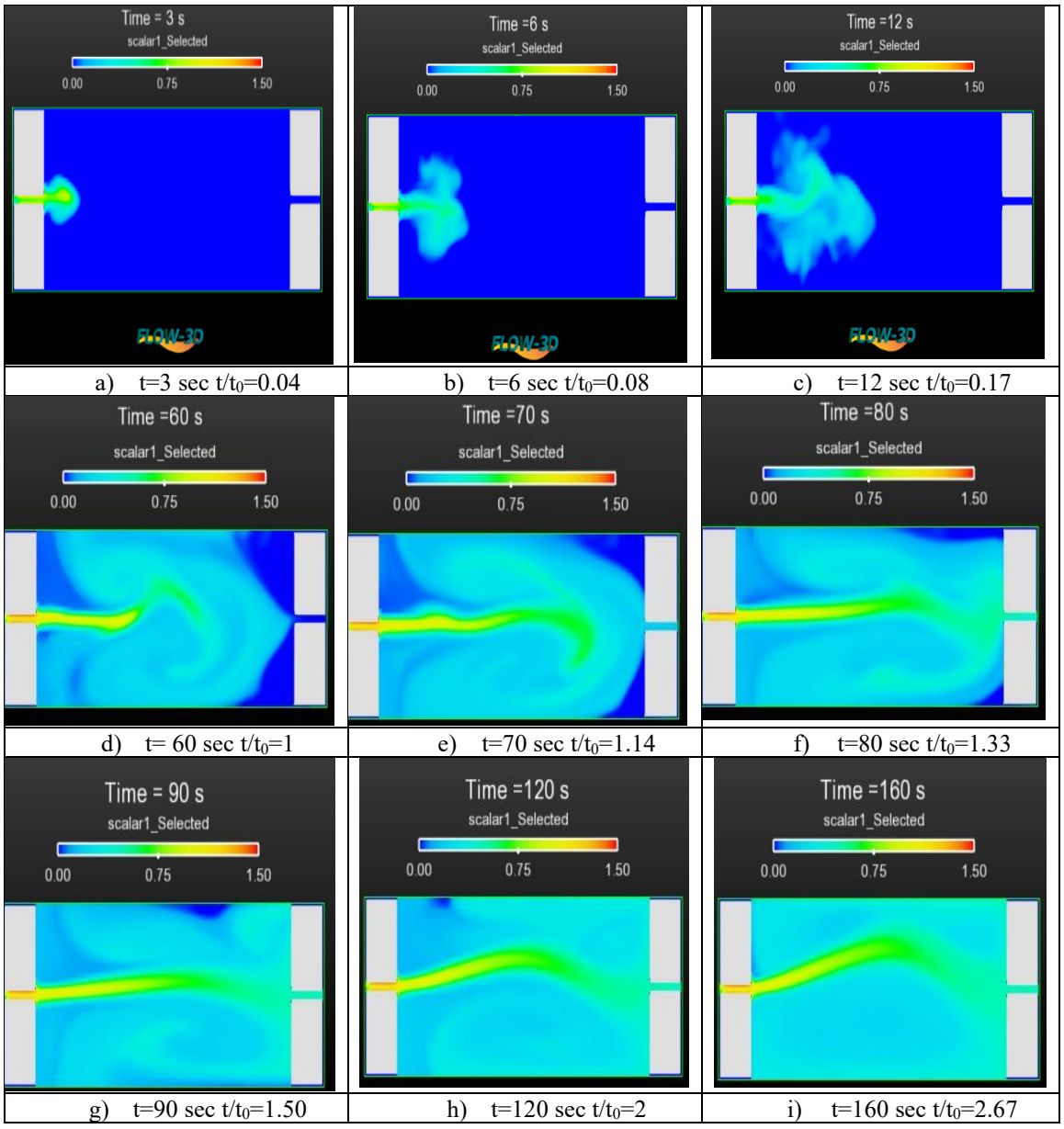
d) t= 16 sec t/t_0=1.34 e) t=20 sec t/t_0=1.67 f) t=30 sec t/t_0=2.5

g) t=40 sec t/t_0=3.34 h) t=70 sec t/t_0=5.84 i) t=100 sec t/t_0=8.34

Fig.7- Analysis of sedimentation pond performance variations: instantaneous progression phases of the front, return flow, and accumulation under a shape coefficient of (1)

شکل ۷- تحلیل تغییرات عملکرد حوضچه رسوب‌گیر: فازهای پیشرفت لحظه‌ای پیشانی، جریان برگشتی و انباشت در شرایط با ضریب شکل (۱)

DOI: 10.22055/jise.2025.44838.2094



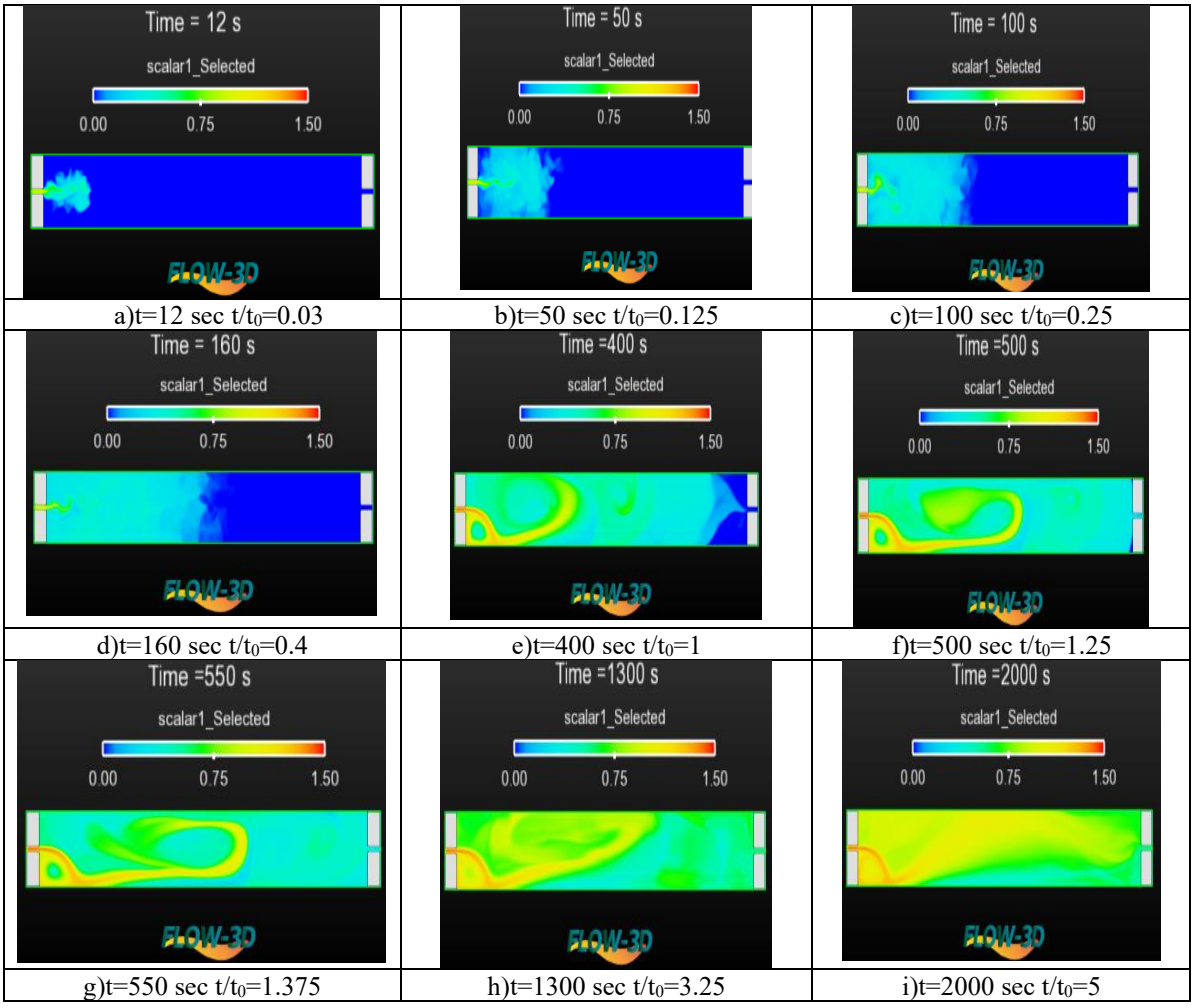
a) t=3 sec t/t_0=0.04 b) t=6 sec t/t_0=0.08 c) t=12 sec t/t_0=0.17

d) t= 60 sec t/t_0=1 e) t=70 sec t/t_0=1.14 f) t=80 sec t/t_0=1.33

g) t=90 sec t/t_0=1.50 h) t=120 sec t/t_0=2 i) t=160 sec t/t_0=2.67

Fig. 8- Analysis of sedimentation pond performance variations: instantaneous progression phases of the front, return flow, and accumulation under a shape coefficient of (2).

شکل ۸ - تحلیل تغییرات عملکرد حوضچه رسوب‌گیر: فازهای پیشرفت لحظه‌ای پیشانی، جریان برگشتی و انباشت در شرایط با ضریب شکل (۲)



a)t=12 sec t/t_0=0.03 | b)t=50 sec t/t_0=0.125 | c)t=100 sec t/t_0=0.25

d)t=160 sec t/t_0=0.4 | e)t=400 sec t/t_0=1 | f)t=500 sec t/t_0=1.25

g)t=550 sec t/t_0=1.375 | h)t=1300 sec t/t_0=3.25 | i)t=2000 sec t/t_0=5

Fig. 9- Analysis of sedimentation pond performance variations: instantaneous progression phases of the front, return flow, and accumulation under a shape coefficient of (4).

شکل ۹ - تحلیل تغییرات عملکرد حوضچه رسوب‌گیر: فازهای پیشرفت لحظه‌ای پیشانی، جریان برگشتی و انباشت در شرایط با ضریب شکل (٤)

نتیجه‌گیری

با توجه به بررسی تجربی الگوی جریان آب و رسوب در حوضچه‌های رسوب‌گیر با ضرایب شکل مختلف، می‌توان به نتایج علمی زیر دست یافت:

تحقیقات نشان داده که در حوضچه‌های با ضریب شکل بالاتر (مانند مخزن با ضریب شکل ۴)، گسترش عرضی جریان چگال نسبت به گسترش طولی آن سرعت بیشتری دارد. به‌طوری که پیشانی جریان غلیظ قبل از رسیدن به یک سوم طول حوضچه، به دیواره‌های جانبی می‌رسد و باعث توزیع یکنواخت رسوبات در سطح حوضچه می‌شود. این پدیده می‌تواند به‌دلیل افزایش سرعت انتشار جریان در جهت عرضی نسبت به جهت طولی در حوضچه‌های با ضریب شکل بالا باشد. همچنین در این شرایط، امکان تشکیل جریان غلیظ ثانویه درون جریان اولیه وجود دارد که از الگوی گردابه‌های ون کارمن پیروی می‌کند. تشکیل این جریان ثانویه می‌تواند ناشی از پدیده‌های پیچیده هیدرودینامیکی در حوضچه‌های با ضریب شکل بالا باشد. برعکس، در حوضچه‌های با ضریب شکل کمتر (مانند مخزن با ضریب شکل ۱ و ۲)، گسترش طولی جریان چگال نسبت به گسترش عرضی آن سرعت بیشتری دارد و احتمال تشکیل جریان برگشتی بیشتر است. این الگوی جریان می‌تواند ناشی از کاهش اثرات جبهه‌ای و افزایش اثرات طولی در حوضچه‌های با ضریب شکل پایین‌تر باشد. بنابراین، در طراحی حوضچه‌های رسوب‌گیر باید به ضریب شکل حوضچه به‌عنوان یک پارامتر مهم توجه شود تا الگوی جریان و توزیع رسوبات در آن‌ها بهینه گردد. این موضوع می‌تواند در بهبود عملکرد و راندمان این سازه‌ها نقش بسزایی داشته باشد.

تقدیر و تشکر

نویسندگان این مقاله، بدینوسیله از همکاری ها و حمایت‌های دانشگاه صنعتی جندی شاپور در فرآیند تهیه و تدوین این پژوهش صمیمانه قدردانی و تشکر می نمایند.

DOI: 10.22055/jise.2025.44838.2094

تضاد منافع نویسندگان

نویسندگان این مقاله اعلام می‌دارند که هیچ گونه تضاد منافعی در خصوص نگارش و انتشار مطالب و نتایج این پژوهش ندارند.

منابع مالی

نویسندگان هیچ گونه حمایت مالی برای تحقیق، تألیف و انتشار این مقاله دریافت نکردند.

دسترسی به داده‌ها

همه اطلاعات و نتایج در متن مقاله ارائه شده است.

مشارکت نویسندگان

نویسنده اول: محمد افراشته، تجزیه و تحلیل داده ها، تفسیر نتایج و نگارش پیشنویس مقاله.

نویسنده دوم: بابک لشکرآرا، استاد راهنما، تجزیه و تحلیل داده‌ها، اعتبارسنجی، بحث و ویرایش نهایی

References

1- Abasi Zade Bagheban, M. and Lashkar-Ara, B., 2020. Evaluation of the Performance of the Hydraulic Suction Method in Sediment Removal of Reservoirs. *Journal of Civil and Environmental Engineering*, 50(98), pp.43-52. DOI: 10.22034/CEEJ.2020.11126.

2- Aryaei, H. and Lashkar-Ara, B., 2023. Evaluation of bottom outlet effect on the behavior of entered turbidity current into the Dez Dam reservoir. *Advanced Technologies in Water Efficiency*, *3*(3), pp.20-36. DOI: 10.22126/ATWE.2023.9641.1061.

3- Asghari Pari, S.A., Kashefi Pour, S.M. and Ghomeshi, M., 2010. Experimental investigation on controlling of sedimentary density current using constructing obstacle. *Journal of Irrigation Sciences and Engineering*, 33(2), pp.1-15. https://doi.org/10.22055/jise.2010.13475

4- Brooks, R.H., 1965. *Hydraulic properties of porous media*. Colorado State University.

5- Dufresne, M., Dewals, B.J., Erpicum, S., Archambeau, P. and Pirotton, M., 2010. Experimental investigation of flow pattern and sediment deposition in rectangular shallow reservoirs. International *Journal of Sediment Research*, 25(3), pp.258-270. https://doi.org/10.1016/S1001-6279(10)60043-1.

6- Goudarzi, M., Lashkar-Ara, B. and Seyed Kaboli, H., 2021. Experimental study of the consolidation of the cohesive sediments Case study: Karkheh dam reservoir. *Scientia Iranica*, *28*(6), pp.3072-3081. Doi: 10.24200/SCI.2021.57114.5069.

7- Goodland, R., 1989. The World Bank's new policy on the environmental aspects of dam and reservoir projects. Indian *Journal of Public Administration*, 35(3), pp.607-633. https://doi.org/10.1177/0019556119890328.

8- Kantoush, S., 2007. Symmetric or asymmetric flow patterns in shallow rectangular basins with sediment transport. In *Proceedings of the 32nd Congress of IAHR*. https://hdl.handle.net/20.500.11970/110019.

9- Kantoush, S.A. and Schleiss, A.J., 2009. Channel formation during flushing of large shallow reservoirs with different geometries. *Environmental Technology*, *30*(8), pp.855-863. https://doi.org/10.1080/09593330902990162.

10- Lai, J.S. and Shen, H.W., 1996. Flushing sediment through reservoirs. *Journal of Hydraulic Research*, 34(2), pp.237-255. https://doi.org/10.1080/00221689609498499

11- Lashkar-Ara, B., Baharvand, S. and Najafi, L., 2020. The Study of the Performance of Data-Driven Models to Predict the Scour Depth Caused by the Aerated Vertical Jet. *Irrigation Sciences and Engineering*, *43*(4), pp.79-89. doi: 10.22055/jise.2021.36599.1959.

12- Lashkar-Ara, B. and Kiani, F., 2025. Evaluating optimal relationships for estimating suspended sediment discharge in the Balaroud River. *Irrigation Sciences and Engineering*, 47(4), pp. 81-92. DOI: 10.22055/jise.2025.48205.2139.

13- Lee, C., Schwab, D.J. and Hawley, N., 2005. Sensitivity analysis of sediment resuspension parameters in coastal area of southern Lake Michigan. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 110(C3). https://doi.org/10.1029/2004JC002326.

14- Liu, R., Zhou, J.L. and Wilding, A., 2004. Microwave-assisted extraction followed by gas chromatography–mass spectrometry for the determination of endocrine disrupting chemicals in river sediments. *Journal of Chromatography* A, 1038(1-2), pp.19-26. https://doi.org/10.1016/j.chroma.2004.03.030

15- Liu, H.K., 1958. Closure to "mechanics of sediment-ripple formation". *Journal of the Hydraulics Division*, 84(5), pp.5-31. https://doi.org/10.1061/JYCEAJ.0000225.

16- Michalec, B., 2008. Appraisal of suspended sediment concentration on reference level according to van Rijn's method. *Annals of Warsaw University of Life Sciences-SGGW. Land Reclamation*, (40). https://doi.org/10.2478/v10060-008-0038-x.

17- Morris, G.L. & Fan, J. (1998) Reservoir Sedimentation Handbook: Design and Management of Dams, Reservoirs, and Watersheds for Sustainable Use. New York: McGraw-Hill. ISBN: 978-0-07-043302-1.

18- Morris, G.L. and Fan, J., 1998. *Reservoir sedimentation handbook: design and management of dams, reservoirs, and watersheds for sustainable use.*

19- Rouse, H., 1937. Modern conceptions of the mechanics of fluid turbulence. *Transactions of the American Society of Civil Engineers*, *102*(1), pp.463-505. https://doi.org/10.1061/TACEAT.0004872.

20- Shadorvan, M., Lashkar-Ara, B. and Seyed Kaboli, H., 2018. Assessment of the cohesive sediments fall velocity in Karkheh Dam reservoir. *Irrigation Sciences and Engineering*, *41*(2), pp.211-224.pp.211-224. Doi: 10.22055/JISE.2018.22358.1601.

21- Van Rijn, L.C., 1984. Sediment transport, part III: bed forms and alluvial roughness. *Journal of Hydraulic Engineering,* 110(12), pp. 1733-1754. https://doi.org/10.1061/(ASCE)0733-9429(1984)110:12(1733).

Shahid Chamran University of Ahvaz

Irrigation Sciences and Engineering (JISE)
Vol. 48, No. 3, Fall 2025, p. 75-93

Research Paper

Journal homepage: https://jise.scu.ac.ir

EXTENDED ABSTRACT

Suspended sediment load estimation using Support Vector Machine-Simulated Annealing algorithm and improved computational methods

H. Nozari[1*], F. Chodani[2], M. Kalantari[3] and A. Mehrabani Bashar[4]

1- Corresponding Author, Associate Professor, Dapartment of Water Sciences and Engineering, Bu-Ali Sina University, Hamedan, Iran (h.nozari@basu.ac.ir).*
2- M.Sc. graduated, Department of Water Sciences and Engineering, Bu-Ali Sina University, Hamedan, Iran.
3- Assistant Proffesor, Department of Statistics, Payame Noor University, Tehran, Iran.
4- M.Sc. graduated, Department of Water Sciences and Engineering, Bu-Ali Sina University, Hamedan, Iran.

ARTICLE INFO

Artlcle history:
Received: 07 October 2023
Revised: 19 October 2024
Accepted: 21 October 2024
Available online: 05 November 2025

Keywords:
Sediment Rating Curve, FAO Method, Generalized Reduced Gradient, Nonlinear Optimization.

TO CITE THIS ARTICLE:

Nozari, H., Chodani, F., Kalantari, M., Mehrabani Bashar, A. 2025. 'Suspended sediment load estimation using Support Vector Machine-Simulated Annealing algorithm and improved computational methods', *Irrigation Sciences and Engineering*, 48(3), pp. 75-93. doi: 10.22055/jise.2024.44894.2096.

Abstract

Studying and developing water resource systems requires an accurate prediction of river suspended sediment load. Since sediment load measurement is costly and time-consuming, the simulation methods based on the sediment load time series are usually restricted to sample numbers. This study used two different methods to forecast the monthly suspended sediment load. In the first method, the Support Vector Machine (SVM) algorithm was used to forecast sediment load based on a monthly time series of suspended sediment data. In this method, the hyperparameter coefficients of the SVM model were optimized using the Simulated Annealing (SA) algorithm. Additionally, this model was evaluated under single-input-single-output (SISO) and multiple-input-single-output (MISO) patterns. The suspended sediment load and flow data of the Yalfan River from 2007 to 2015 were the SISO's inputs and outputs, respectively. Moreover, the MISO's second input was a fixed number series. In the second method, the sediment rating curve and the FAO method forecast it. A %9.93-point increase in the Standard Error (SE) index was obtained by normalizing the SVM-SA's input data. Switching the input patterns from single input-single output (SISO) to multiple input-single output (MISO) resulted in a %1.03 improvement in SE. By optimizing the coefficients of the discharge-sediment variables in the rating curve and FAO method using the General Reduced Gradient (GRG) technique, the SE index improved by %10.13 and %73.19, respectively. The results showed that the SVM-SA model based on the normalized MISO approach is the best method for suspended sediment load forecasting.

Introduction

Sediment is one of the most significant non-point sources of river pollution (Shojaeezadeh et al., 2018) and its precise estimation is a key factor in hydro-environmental projects, such as the design and implementation of water structures (AlDahoul et al., 2021). Since direct sampling of sediment load is difficult and time-consuming, various physical, experimental and mathematical models are employed to estimate it (Ramezanipour et al., 2017). The Support Vector Machine (SVM) is a widely used model in hydrology for forecasting, classification, solving linear and non-linear regressions, and pattern

recognition (Samantary et al., 2020 ،Huang et al., 2021). This model's forecasting accuracy has been improved by Simulated Annealing (SA) algorithm in many studies. As sediment load data has statistical defects and its direct measurements are costly, the use of computational and classical methods such as rating curves and the FAO method is unavoidable (Shojaeezadeh et al., 2018). Many studies have shown that using optimization algorithms and modifying discharge-sediment relationships can improve the performance of computational and artificial intelligence methods. In the present study, two different methods are used to forecast the monthly suspended sediment load. The first method examines how the data patterns and the type of probability distribution affect the SVM-SA's performance, and the second method examines how the Generalized Reduced Gradient (GRG) optimization method affects the modified FAO and rating curve. Finally, computational and direct forecasting methods are compared, and the most accurate model for sediment load forecasting is introduced.

Methodology

The SVM model is a statistical machine learning system, which finds the optimal hyperplane to categorize the data based on a binary classification. An important factor affecting the performance of this model is parameter adjustment (Sedighkia and Datta., 2023). Traditional SVM models use trial and error to determine parameters; however, in this study, the SA optimization algorithm chooses them. This algorithm is a local search method, which tries to find the global optimum solution. In the hybrid SVM-SA model, the initial values of the SVM's parameters are first set manually based on the previous studies' suggestions; then, the SA algorithm calculates the parameters' optimal values, and the model will be executed (Mehrabani Bashar et al., 2023). So, the modeling process will be faster and more accurate without the need for repetitive trial and error (Azadi et al., 2022). This study compares the performance of the SVM-SA model based on the SISO and the MISO approaches and evaluates the effect of input data normalization on their performance.

Most sediment load time series contain missing values, so understanding and quantifying the nonlinear interactions between the historical sediment load and discharge flow data is essential. In the sediment rating curve method, sediment load and flow data are plotted against each other on a logarithmic scale, and a power line is fitted (Azadi et al., 2020). The sediment discharge is calculated using this line's equation:

$$Q_s = aQ_w^b \quad (1)$$

Where Qs = suspended sediment discharge (ton/month); Qw = flow discharge (m3/s); a and b = regression coefficients.

To bring the sediment load values estimated by the rating curve closer to the observational data, the FAO method modifies the drainage coefficient and uses the following equation instead:

$$Q_s = (\overline{Q}_S / \overline{Q}_w^{\ b})Q_w^b \quad (2)$$

Where $\overline{Q}_S$ = average sediment load: and $\overline{Q}_W$ = average discharge.

In this study, the discharge-sediment equations were optimized by the GRG method. The coefficients of the discharge-sediment variables were considered decision variables, and the objective function was minimizing the difference between the estimated and the observed data.

Results and Discussion

According to Figure (1), all methods except the FAO method perform similarly and are within the range of RMSE=500. The performance of the FAO method was significantly improved by GRG optimization. Normalizing the SVM-SA's input data improved both the SISO and MISO approaches.

The SVM-SA model based on the normalized MISO approach has the lowest RMSE and the highest correlation and also is closer to the observational data, which indicates its superiority.

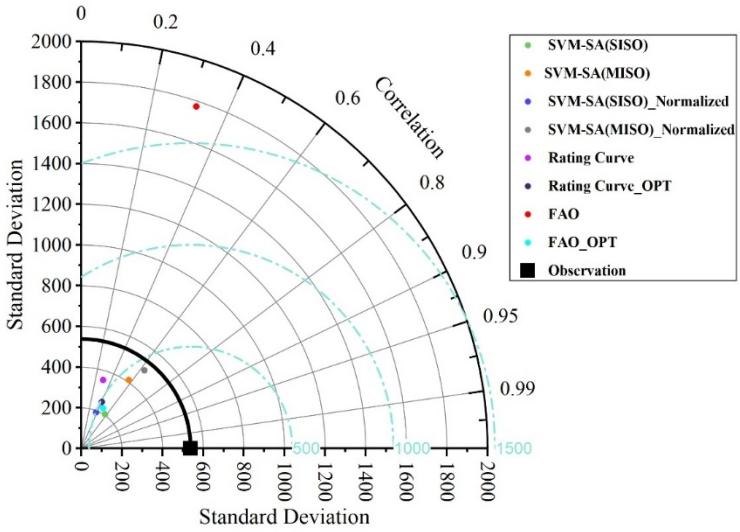


Fig. 1- Taylor diagram for the performance of the sediment load estimation methods

Conclusions

The performance of both original and normalized modeling was improved by separating and modifying the SVM-SA's input data from SISO to MISO patterns. Also, data normalization improved both the SISO and MISO approaches. The GRG optimization algorithm improved the performance of the mentioned computational methods by selecting coefficients of discharge-sediment variables, making these methods competitive with direct forecasting models. The results showed that the SVM-SA model based on the normalized MISO approach is the best method for suspended sediment load forecasting.

Acknowledgements

This manuscript was financially supported by the Regional Water Company of Hamedan, and the authors would like to express their gratitude.

Conflict of Interest

The authors declared no potential conflicts of interest concerning the research, authorship, and publication of this article. Confirmation.

Funding

This study was conducted with financial support from the Hamedan Regional Water Company. The authors wish to express their sincere gratitude for this assistance. Additionally, the authors extend their appreciation to Bu-Ali Sina University of Hamadan for providing the necessary facilities to facilitate this research.

Data Availability Statements

The datasets generated and/or analyzed during the current study are available from the corresponding author on reasonable request.

Authors' contribution

First Author: Hamed Nozari, was responsible for planning the project, developing the main conceptual ideas, and analyzing the data

Second Author: Fatemeh Chodani, conducted the calculations, analyzed the data, and authored the manuscript.

Third Author: Mahdi Kalantari, was responsible for developing the main conceptual ideas, establishing the computational framework

Fourth Author: Alireza Mehrabani, Bashar conducted the calculations, analyzed the data, and authored the manuscript.

References

1- AlDahoul, N., Essam, Y., Kumar, P., Ahmed, A. N., Sherif, M., Sefelnasr, A., and Elshafie, A. 2021. Suspended sediment load prediction using long short-term memory neural network. Scientific Reports, 11(1): 1-22. DOI: 10.1038/s41598-021-87415-4.

2- Azadi, S., Nozari, H., and Godarzi, E. 2020. Predicting sediment load using stochastic model and rating curves in a hydrological station. *Journal of Hydrologic Engineering*, 25(8): 05020017. DOI: 10.1061/(ASCE)HE.1943-5584.0001967.

3- Azadi, S., Vafaee, M., and Nozari, H. 2022. Estimation of precipitation using the combined method of Support Vector Machine-Simulated Annealing algorithm (case study: Gorgan synoptic station). *Advanced Technologies in Water Efficiency*, 2(3), 14-34. (In Persian). DOI: 10.22126/ATWE.2022.8393.1028.

4- Huang, C. C., Chang, M. J., Lin, G. F., Wu, M. C., and Wang, P. H. 2021. Real-Time forecasting of suspended sediment concentrations reservoirs by the optimal integration of multiple machine learning techniques. *Journal of Hydrology*, 34: 100804. DOI: 10.1016/j.ejrh.2021.100804.

5- Mehrabani Bashar, A., Nozari, H., Marofi, S., Mohamadi, M., and Ahadiiman, A. 2023. Investigation of factors affecting rural drinking water consumption using intelligent hybrid models. *Water Science and Engineering*, 16(2), 175-183. DOI: 10.1016/j.wse.2022.12.002.

6- Ramezanipour, E., Mosaedi, A., and Mesdaghi, M. 2017. Determination of the Best Model for Estimation of Suspended Sediment by using Statistical Error Criteria (Case Stude: Some Sub-Watersheds of Kashafroud). *Journal of Watershed Management Research*, 8(15): 112-124. (In Persian). DOI: 10.29252/jwmr.8.15.112.

7- Samantary, S., Sahoo, A., and Ghose, D. K. 2020. Assessment of Sediment Load Concentration Using SVM, SVM-FFA and PSR-SVM-FFA in Air Watershed, India: A Case Study. *KSCE Journal of Civil Engineering*, 24, 1944-1957. DOI: 10.1007/s12205-020-1889-x.

8- Sedighkia, M., and Datta, B. 2023. Linking SVM based habitat model and evolutionary optimization for managing environmental impacts of hydropower plants. *River Research and Applications*, 39, 897-910. DOI: 10.1002/rra.4121.

9- Shojaeezadeh, S. A., Nikoo, M. R., McNamara, J. P., AghaKouchak, A., and Sadegh, M. 2018. Stochastic modeling of suspended sediment load in alluvial rivers. *Advances in Water Resources*, *119*: 188–196. DOI: 10.1016/j.advwatres.2018.06.006.

© 2025 Shahid Chamran Universiry of Ahvaz, Ahvaz, Iran. This article is an open access article distributed under the terms and conditions of the Creative Commons Attribution 4.0 International (CC BY 4.0 license) (http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/).

علوم و مهندسی آبیاری جلد ٤٨، شماره‌ی۳، پاییز ١٤٠٤، مقاله پژوهشی، ص. ۹۳-۷۵

پیش‌بینی بار رسوب معلق رودخانه با استفاده از مدل ماشین بردار پشتیبان و روش‌های محاسباتی بهبودیافته

حامد نوذری[1*]، فاطمه چدنی[2]، مهدی کلانتری[3] و علیرضا مهربانی بشار[4]

۱*- نویسنده مسئول، دانشیار گروه علوم و مهندسی آب، دانشگاه بوعلی سینا، همدان، ایران (h.nozari@basu.ac.ir).

۲- دانش‌آموخته کارشناسی ارشد، گروه علوم و مهندسی آب، دانشگاه بوعلی سینا، همدان، ایران.

۳- استادیار گروه آمار، دانشگاه پیام نور، تهران، ایران.

۴- دانش‌آموخته کارشناسی ارشد، گروه علوم و مهندسی آب، دانشگاه بوعلی سینا، همدان، ایران.

دریافت: ۱۴۰۲/۰۷/۱۵ بازنگری: ۱۴۰۳/۰۷/۲۸ پذیرش: ۱۴۰۳/۰۷/۳۰ انتشار: ۱۴۰۴/۰۸/۱۴

چکیده

برآورد دقیق بار رسوب معلق رودخانه، امری ضروری در مطالعه و توسعه سیستم‌های منابع آب است. اندازه‌گیری مستقیم بار رسوبی، پرهزینه و زمان‌بر است، لذا توسعه مدلی جایگزین نظیر منحنی سنجه و یا مدل‌های شبیه‌سازی توصیه می‌شود. در این مطالعه از دو روش مختلف برای پیش‌بینی بار رسوب معلق رودخانه استفاده شد. در روش اول میزان بار رسوبی با استفاده از مدل ماشین بردار پشتیبان (SVM) پیش‌بینی شد. در این روش، ضرایب هایپر پارامترهای مدل SVM با الگوریتم تبرید (SA) بهینه شدند. همچنین به مقایسه عملکرد این مدل تحت الگوهای تک ورودی-تک خروجی (SISO) و چند ورودی-تک خروجی (MISO) نیز پرداخته شد. سری آبدهی و بار رسوب معلق رودخانه یلفان طی دوره ۱۳۹٤-۱۳۸٦ به‌ترتیب به‌عنوان ورودی و خروجی مدل معرفی شدند. در روش دوم نیز، از منحنی سنجه و روش رسوب‌سنجی اصلاحی FAO استفاده شد. نرمال‌سازی داده‌های ورودی به مدل SVM، باعث بهبود ۹/۹۳ درصدی شاخص خطای استاندارد (SE) در بخش آزمون مدل‌سازی شد، همچنین اصلاح الگوی ورودی به این مدل از الگوی SISO به MISO باعث بهبود ۱/۰۳ درصدی در این شاخص شد. پس از بهینه‌سازی ضرایب منحنی سنجه و روش اصلاحی FAO با استفاده از گرادیان کاهش‌یافته عمومی (GRG) نیز، شاخص SE به‌ترتیب ۱۰/۱۳ و ۷۳/۱۹ درصد بهبود یافت. از میان روش‌های بررسی شده، مدل SVM مبتنی بر الگوی چند ورودی-تک خروجی نرمال شده، به‌عنوان بهترین روش معرفی و به‌منظور پیش‌بینی بار رسوب معلق رودخانه پیشنهاد می‌گردد.

کلید واژه‌ها: منحنی سنجه رسوب، رسوب‌سنجی اصلاحی FAO، گرادیان کاهش‌یافته عمومی، بهینه‌سازی غیرخطی.

مقدمه

رسوب از منابع اصلی آلودگی غیرنقطه‌ای در رودخانه‌ها است. کاهش عمر مفید و ظرفیت ذخیره سدها، انتقال آلودگی، ایجاد جزایر رسوبی در مسیر رودخانه، کاهش ظرفیت انتقال جریان‌های سیلابی، خسارات به ابنیه و مزارع و حتی خسارات جانی، از پیامدهای فرآیند فرسایش و از اثرات نامطلوب رسوب‌گذاری هستند (Shojaeezadeh et al., 2018). لذا برآورد دقیق رسوب حمل شده توسط رودخانه‌ها در حوزه‌های بسیاری نظیر طراحی و ساخت سازه‌های آبی، آبخیزداری، حفاظت خاک، محیط‌زیست، کشاورزی و مدیریت منابع آب امری ضروری است (AlDahoul et al., 2021). از مرسوم‌ترین روش‌های اندازه‌گیری بار رسوب معلق، نمونه‌برداری مستقیم از مقاطع و اعماق مختلف رودخانه و سپس محاسبات و اندازه‌گیری‌های آزمایشگاهی است، اما بر اساس نظر Ramezanipour et al (2017) تجهیز کردن تمام ایستگاه‌های هیدرومتری به وسایل اندازه‌گیری و برداشت نمونه، مستلزم صرف هزینه و زمان زیادی است که سبب شده اطلاعات محدودی از بار رسوبی در دسترس باشد (Azadi et al., 2020). از این رو مدل‌های مختلفی از جمله مدل‌های فیزیکی، تجربی و مدل‌های ریاضی به‌منظور برآورد بار رسوبی رودخانه استفاده می‌شوند.

به‌طور کلی مدل‌های پیش‌بینی به دو دسته تقسیم می‌شوند: مدل‌های دانش محور و مدل‌های داده محور. در مدل‌های دانش محور، پارامترها بر اساس روابط و فرمول‌ها محاسبه می‌شوند، که به درک فرآیند فیزیکی سیستم وابسته است. اما فرآیندهای هیدرولوژیکی اکثرا پیچیده‌اند، توصیف آن‌ها برای مدل آسان نیست و حتی درصورت دست‌یابی به روابط، عموماً تعمیم‌پذیر نخواهند بود. در مدل‌های داده محور، آینده تابعی از گذشته است و پیش‌بینی براساس آنالیز آماری داده‌های تاریخی انجام می‌شود، که به اطلاعات جانبی دیگری نیاز ندارد. لذا برای برآورد و پیش‌بینی بار رسوب معلق رودخانه، استفاده از سری‌های زمانی توصیه می‌شود (Ba et al., 2018). در این راستا، مدل‌های تصادفی مختلف، بر سری زمانی برازش داده می‌شوند و پس از بررسی خواص داده‌ها، مدل مناسب انتخاب و در نهایت پیش‌بینی انجام می‌گردد. روش‌های مدل‌سازی سری‌های زمانی در دو دسته روش‌های آماری و روش‌های هوش مصنوعی طبقه‌بندی می‌شوند. مدل‌های خودهمبسته (Autoregressive)، میانگین متحرک (Moving

DOI: 10.22055/jise.2024.44894.2096

Average) و انواع مدل‌های میانگین متحرک خودهمبسته یکپارچه (Autoregressive Integrated Moving Average) از پرکاربردترین روش‌های آماری و همچنین مدل‌های شبکه عصبی مصنوعی (Artificial Neural Network)، الگوریتم ژنتیک (Genetic Algorithm)، برنامه‌ریزی ژنتیک (Genetic Programming) و ماشین بردار پشتیبان (Support Vector Machine) نیز از مؤثرترین روش‌های هوش مصنوعی برای مدل‌سازی سری‌های زمانی هستند (AlDahoul et al., 2021).

مدل SVM توسط Cortes و Vapnik (1995) معرفی شد، که ابزاری قدرتمند برای طبقه‌بندی داده‌ها و حل مسائل رگرسیونی خطی و غیرخطی است (Huang et al., 2021). این روش که بر اساس تئوری یادگیری آماری استوار است، با اعمال محدودیت‌های تصمیم‌گیری به طبقه‌بندی بهینه داده‌ها می‌پردازد (Samantary et al., 2020). مدل‌های SVM توانایی کشف روابط ناشناخته بین متغیرهای ورودی و خروجی یک سیستم را دارند و برای سری‌های با داده‌های کم و پراکنده نیز قابل اجرا هستند (Deka, 2014). توانایی طبقه‌بندی همزمان مسائل خطی و غیرخطی، تطبیق‌پذیری با داده‌های بزرگ مقیاس و انعطاف‌پذیری از طریق ارائه توابع کرنل مختلف، از مزایای این مدل‌ها هستند (Huang et al., 2021). از آنجا که مدل SVM بر اصول کمینه‌سازی ریسک ساختاری (Structural Risk Minimization) استوار است، در حوزه‌های مختلفی مانند هیدرولوژی کاربرد گسترده‌ای دارد، که از جمله آن می‌توان به تخمین رطوبت خاک، ارزیابی کیفیت و پیش‌بینی سطح آب زیرزمینی، پیش‌بینی بارش و رواناب، تبخیر و تعرق، سطح آب دریاچه‌ها و مخازن، سیل و خشکسالی، جریان آبدهی و بار رسوبی رودخانه اشاره کرد (Deka, 2014). Lin et al (2006) برای پیش‌بینی آبدهی بلندمدت از مدل‌های SVM، ARIMA و ANN استفاده کردند. نتایج این مطالعه نشان داد، مدل SVM در مقایسه با مدل‌های دیگر عملکرد بهتری داشته و قادر به کشف ویژگی‌های غیرخطی سری زمانی است. Huang et al (2021) برای پیش‌بینی غلظت رسوب معلق وارد شده به یک مخزن ذخیره‌سازی، مدل‌های یادگیری ماشین پرسپترون چندلایه (Multilayer Perceptron)، جنگل تصادفی (Random Forest)، SVM، شبکه عصبی عمیق (Deep Neural Networks)، شبکه عصبی بازگشتی (Recurrent Neural Networks)، حافظه طولانی کوتاه‌مدت (Long Short-Term Memory) و شبکه عصبی واحد بازگشتی دروازه‌دار (Gated Recurrent Units) را مقایسه کردند. نتایج این مطالعه نشان داد، مدل‌های SVM و LSTM در مقایسه با مدل‌های دیگر، عملکرد بهتری در پیش‌بینی غلظت رسوب معلق دارند. Nozari و Tavakoli (2018) برای پیش‌بینی بارش ماهانه در تغییرات اقلیم استان همدان، به مقایسه مدل‌های SVM، ARMAX، ARIMA و مدل ترکیبی ماشین بردار پشتیبان–تبدیل موجک (Wavelet - Support Vector Machines) پرداختند. نتایج این مطالعه نشان داد، مدل سنتی SVM پارامترهای قابل تنظیم کمتری دارد و با سهولت بیشتر و در زمان کمتری بارش ماهانه را پیش‌بینی می‌کند.

همچنین در مطالعه‌های بسیاری، اثر الگوریتم بهینه‌سازی تبرید (Simulated Annealing Algorithm) را بر دقت پیش‌بینی مدل SVM بررسی کردند. Mohammadi و Heidarpour (2019) برای تخمین دمای خاک، از الگوریتم شبیه‌سازی تبرید بر پایه ماشین بردار پشتیبان (SVM-SA) استفاده کردند. نتایج این مطالعه نشان داد، تلفیق SA و SVM باعث کمینه شدن خطای پیش‌بینی و بهبود نتایج شبیه‌سازی می‌شود. در مطالعه‌ای دیگر، Sedighkia و Datta (2023) برای طبقه‌بندی و شبیه‌سازی اثرات تولید نیروی برق آبی بر کیفیت زیستگاه پایین دست رودخانه تجن در ایران، از مدل SVM-SA استفاده کردند و نشان دادند، تنظیم پارامترهای مدل SVM با استفاده از الگوریتم SA، باعث کاهش اختلاف بین مقادیر پیش‌بینی شده و داده‌های مشاهده‌ای می‌شود. Mehrabani Bashar et al (2023) برای بررسی عوامل مؤثر بر مصرف آب شرب روستایی استان همدان، به مقایسه مدل‌های سیستم استنتاجی فازی عصبی (Adaptive Neuro-Fuzzy Inference System)، SVM-SA، ANFIS-GA و ANFIS ترکیب شده با الگوریتم بهینه‌سازی ازدحام ذرات (Particle Swarm Optimization) پرداختند. نتایج این مطالعه نشان داد، مدل SVM-SA در مقایسه با سایر مدل‌های بررسی شده از دقت بیشتری برخوردار است. در مطالعه‌ای دیگر، Azadi et al (2022) برای برآورد بارندگی ایستگاه سینوپتیک گرگان از الگوریتم SVM-SA استفاده کردند. نتایج این مطالعه نشان داد، الگوریتم ترکیبی SVM-SA دقت بالایی در شبیه‌سازی تغییرات بارندگی دارد و به عنوان الگوریتم هیبریدی جدید در حوزه علوم و مهندسی معرفی می‌شود.

عدم قطعیت در پدیده‌ی رسوب‌گذاری، روابط غیرخطی و همچنین دسترسی به اطلاعات محدودی از فرسایش و رسوب انتقال یافته، باعث بروز اختلاف زیادی بین بار رسوبی مشاهده‌ای و برآوردهای صورت گرفته شده است. لذا تعیین روابط تجربی بین آبدهی و بار رسوبی نظیر، به‌عنوان راه حل جایگزین پیشنهاد می‌شود (Shojaeezadeh et al., 2018). درصورت وجود اندازه‌گیری‌های پیوسته و کافی در ایستگاه‌های هیدرولوژی و با برقراری رابطه بین دبی اندازه‌گیری شده و رسوب نظیر آن، می‌توان به سایر مقادیر بار رسوبی رسید. در این راستا، روش‌های محاسباتی نظیر منحنی‌های سنجه، جایگزین مناسبی برای اندازه‌گیری مستقیم بار رسوب معلق رودخانه هستند (Azadi et

Barzegari Bonadkohi و Armin (2016) خاصیت لگاریتمی محورها و عمل برون‌یابی برای برآورد بار رسوبی، خروجی منحنی سنجه را با اریب همراه می‌کند که سبب شده این روش به ازای مقادیر بالای آبدهی دچار کم‌برآورد شود و در مقادیر کم آبدهی نیز، بار رسوبی را بیش برآورد کند (Hapsari et al., 2019). محققان بسیاری در راستای بهبود عملکرد روش‌های محاسباتی، در پی اصلاح روابط آبدهی-رسوب بوده‌اند. Efthimiou (2019) پس از مقایسه منحنی سنجه کلاسیک، منحنی سنجه دوخطی، منحنی سنجه تفکیک شده بر اساس فصول تر و خشک سال و منحنی سنجه تفکیک شده بر اساس بازوی بالارونده و پایین‌رونده هیدروگراف سیلاب، نشان داد تخصیص دو خط مجزا برای برآورد بار رسوبی در منحنی سنجه، نسبت به سایر روش‌های بررسی شده از دقت بیشتری برخوردار است. Asadi et al (2021) برای بهینه‌سازی ضرایب مدل رگرسیونی منحنی سنجه، از الگوریتم‌های فراابتکاری GA، PSO، رقابت استعماری (Imperialist Competitive Algorithm) و روش‌های کلاسیک اصلاحی FAO و CF2 استفاده کردند. نتایج این مطالعه نشان داد، بهینه‌سازی ضرایب منحنی سنجه باعث بهبود عملکرد این روش می‌شود و الگوریتم‌های فراابتکاری نسبت به روش‌های اصلاحی کلاسیک موفق‌تر هستند. Barzegari Bonadkohi و Armin (2016) برای پیش‌بینی بار رسوب معلق رودخانه، مدل‌های سری زمانی مارکف و آریما را با روش‌های منحنی سنجه اصلاح شده مقایسه کردند. نتایج این مطالعه نشان داد، مدل‌های سری زمانی نسبت به روش‌های محاسباتی عملکرد بهتری داشتند و روش حد وسط دسته‌ها و ضریب MVUE به‌ترتیب به عنوان بهترین نوع منحنی سنجه و ضریب اصلاحی معرفی می‌شوند. در مطالعه‌ای دیگر، Varvani و Khalighi (2007) تأثیر ضرایب اصلاحی MVUE، CF1، CF2 و FAO را بر بهبود عملکرد منحنی سنجه مقایسه کردند. نتایج این مطالعه نشان داد، اصلاح منحنی سنجه با روش رسوب‌سنجی FAO، روش موفق‌تری برای محاسبه بار رسوب معلق رودخانه است.

با مروری بر مطالعه‌های انجام شده و با توجه به نقص آماری داده‌های بار رسوبی و هزینه بالای اندازه‌گیری مستقیم بار رسوبی، استفاده از روش‌های غیرمستقیم برای برآورد بار رسوب معلق رودخانه امری اجتناب ناپذیر است. از طرف دیگر، مطالعه‌های بسیاری به بهبود عملکرد روش‌های محاسباتی و مدل‌های هوش مصنوعی از طریق اصلاح روابط آبدهی-رسوب و به‌کارگیری الگوریتم‌های بهینه‌سازی تأکید کرده‌اند. از این رو در مطالعه‌ی حاضر، به مقایسه دو روش مختلف برای پیش‌بینی بار رسوب معلق رودخانه پرداخته شده است. در روش اول تأثیر الگوی وارد شده به مدل و نوع توزیع احتمالاتی داده‌ها، بر عملکرد مدل SVM بررسی می‌شود. در روش دوم نیز تأثیر روش بهینه‌سازی گرادیان کاهش‌یافته عمومی، بر عملکرد روش‌های محاسباتی رسوب‌سنجی اصلاحی FAO و منحنی سنجه بررسی می‌شود. در نهایت نتایج حاصل از برآورد مستقیم و غیرمستقیم بار رسوب معلق رودخانه مقایسه و بهترین روش برای برآورد بار رسوبی معرفی خواهد شد.

مواد و روش‌ها

منطقه مورد مطالعه

منطقه مطالعاتی پژوهش حاضر، ایستگاه هیدرومتری یلفان در محل رودخانه یلفان واقع در طول جغرافیایی "۴۱'۳۶°۴۸ و عرض جغرافیایی "۴۷'۳۴°۴۳ در استان همدان است. متوسط آبدهی و بار رسوبی سالانه ثبت شده در دوره ۱۳۹۴-۱۳۸۶ این ایستگاه به‌ترتیب برابر ۳/۰۳ مترمکعب بر ثانیه و ۸۹/۷۰ تن در ماه است. انحراف معیار آبدهی و بار رسوبی ثبت شده در دوره آماری مذکور نیز به‌ترتیب برابر ۶/۳۴ و ۸۹۱/۵۶ هستند. سری آبدهی و بار رسوبی مشاهداتی مورد مطالعه، در شکل (۱) ارائه شده‌اند. مساحت حوضه آبخیز یلفان ۷۱۷۳ هکتار است. حوضه آبخیز یلفان از زیرحوضه‌های سد اکباتان همدان و سد وفرقان ساوه است، که از شمال به حوضه آبخیز قره‌چای، از جنوب به حوضه آبخیز سد کرخه، از شرق به بخشی از حوضه آبخیز قره‌چای و از غرب به حوضه آبخیز گاماسیاب منتهی می‌شود (Nouri et al., 2019). در این مطالعه، از داده‌های بار رسوب معلق و آبدهی دوره ۱۳۹۴-۱۳۸۶ این ایستگاه که توسط سازمان آب منطقه‌ای استان همدان جمع آوری شده، استفاده شده است. موقعیت جغرافیایی منطقه مورد مطالعه، در شکل (۲) نمایش داده شده است.

مدل ماشین بردار پشتیبان (SVM)

مدل SVM یک سیستم یادگیری آماری است، که در یک طبقه‌بندی دودویی با انتخاب خط بهینه‌ای که بیشترین فاصله را با دو دسته دارد، داده‌ها را دسته‌بندی می‌کند (Üneş et al., 2021). SVM دارای دو مدل رگرسیونی نوع اول و رگرسیونی نوع دوم است که به‌ترتیب با SVM-v و SVM-ε نشان داده می‌شوند و نوع دوم دارای کاربرد بیشتری در مسائل رگرسیونی است (Hamel, 2009). در مسائل غیرخطی نیز تابع ریاضی کرنل، داده‌ها را به فضای با ابعاد بالاتر منتقل و آن‌ها را در فضای خطی جدید دسته‌بندی می‌کند. به‌کارگیری توابع کرنل باعث ساده‌تر شدن مدل و کاهش حداکثری خطای پیش‌بینی رابطه (۱) با درنظر گرفتن یکسری محدودیت‌ها رابطه (۲) می‌شود، که بر محبوبیت این مدل می‌افزاید (Deka, 2014).

$$\frac{1}{2}W^TW + C\sum_{i=1}^{N}\xi_i + C\sum_{i=1}^{N}\xi_i^* \qquad (۱)$$

$$\begin{aligned} &W^T\phi(x_i) + b - y_i \le \varepsilon + \xi_i^* \\ &y_i - W^T\phi(x_i) - b \le \varepsilon + \xi_i^* \\ &\xi_i^*, \xi_i \ge 0 \end{aligned} \qquad (۲)$$

DOI: 10.22055/jise.2024.44894.2096

که در این روابط C ثابت گنجایش، W بردار ضرایب، ξ_i و ξ_i^* ضرایب کمبود، b ضریب ثابت، N الگوهای آموزش مدل و Ø تابع کرنل هستند. در مدل SVM پس از وارد کردن داده‌ها، عملیات پردازش شروع می‌شود. سپس نوع تابع کرنل انتخاب و پارامترهای آن تنظیم می‌شوند. درنهایت آموزش مدل آغاز و خروجی‌ها تولید خواهند شد (Üneş et al., 2021). مراحل اجرای این مدل در شکل (۳) ارائه شده است. در مطالعه‌ی حاضر، عملکرد مدل SVM به ازای کرنل‌های چندجمله‌ای (Polynomial)، خطی (Linear) و تابع پایه شعاعی (RBF) مقایسه شد. معادله ریاضی کرنل‌های مورد بررسی، در جدول (۱) ارائه شده است. در این روابط x_i و x_j پارامترهای ورودی به مدل، d درجه چندجمله‌ای، C مقدار ثابت و γ عرض کرنل است که توسط کاربر تعیین می‌شود.

الگوریتم بهینه‌سازی تبرید (SA)

الگوریتم تبرید یک روش بهینه‌سازی فراابتکاری مبتنی بر مدل مونت کارلو است، که توسط Kirkpatrick et al (1983) معرفی شد. این الگوریتم یک روش جستجوی محلی است، که سعی بر به‌دست آوردن جواب بهینه عمومی دارد (Bahrami et al., 2016). اساس عملکرد این الگوریتم برگرفته از فرآیند تبرید یا آنیلینگ (Annealing) در علم متالوژی است. در علم مواد، تبرید یک عملیات حرارتی است که با هدف افزایش شکل‌پذیری و کاهش سختی ماده انجام می‌شود. طی این فرآیند، ابتدا فلز گرم شده، سپس دمای آن در یک درجه خاص ثابت می‌ماند و به تدریج سرد خواهد شد. با گرم کردن فلز، مولکول‌های آن آزادانه حرکت می‌کنند، اما با سردکردن تدریجی ماده، حرکت مولکول‌ها محدود می‌شود. اگر فرآیند سرد کردن به حدی کند باشد که از تعادل ترمودینامیکی ماده در هر مرحله اطمینان حاصل شود، انرژی گرمایی به‌طور یکنواختی در جسم توزیع می‌شود و ساختار بلوری ایجاد شده به بهترین شکل و به‌صورت مقاوم و متقارن خواهد بود. این کاهش دما و حرکت به سمت سرد شدن سیستم در رابطه‌ی (۳) نشان داده شده است.

$$T_i = \alpha \times (T_{i-1}), \qquad \forall_i = 1,\ldots,n \qquad (۳)$$

در این رابطه α ضریب تبرید است، که مقدار آن معمولاً بین ۰/۵ تا ۰/۹۹ درنظر گرفته میشود. T دمای سیستم و n تعداد دفعات کاهش سطح دما در سیستم هستند (Kirkpatrick et al., 1983).

عملکرد الگوریتم SA نیز در ابتدا با یافتن یک جواب اولیه آغاز می‌شود و با نوسانات زیادی به سمت جواب‌های همسایه پیش می‌رود، اما به تدریج دامنه تغییرات آن کاهش می‌یابد و در نهایت به سمت جواب بهینه همگرا می‌شود. این امر سبب شده تا SA برخلاف روش‌های بهینه‌سازی موضعی که فقط مقدار کمینه نزدیک به حدس اولیه را پیدا می‌کنند، قادر به ارائه مقدار کمینه مطلق باشد (Tran and Tran, 2007 ،Fabian, 1997).

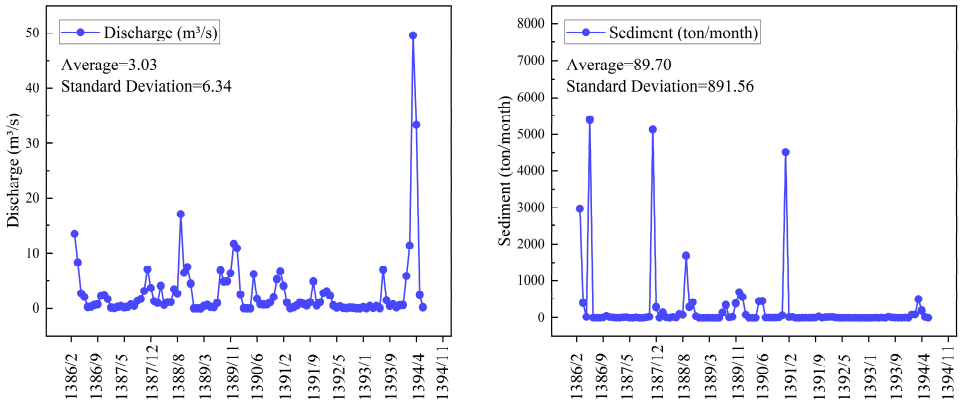


Fig. 1- Observational (a) discharge flow and (b) sediment time series of the Yalfaan station (2007-2015)

شکل ۱- (a) سری آبدهی و (b) بار رسوبی مشاهداتی ایستگاه یلفان (۱۳۹٤-۱۳۸٦)

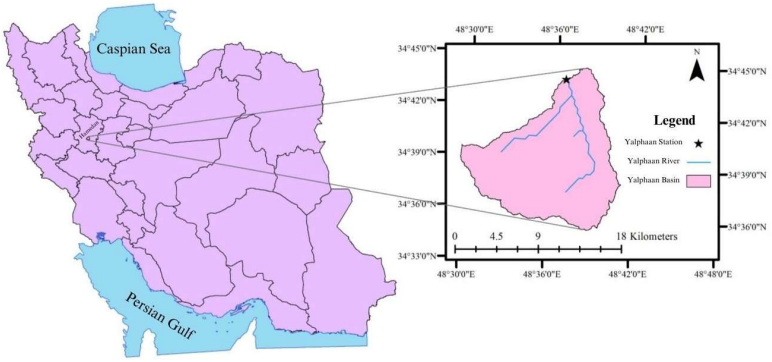


Fig. 2- Location of the study area
شکل ۲- موقعیت جغرافیایی منطقه مورد مطالعه

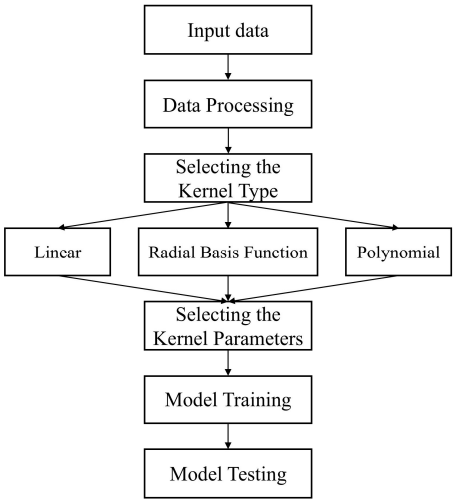


Fig. 3- Flowchart of the SVM model
شکل ۳- مراحل اجرای مدل SVM

جدول ۱- انواع توابع کرنل
Table 1- Types of kernel functions

Kernel	Formula	Optimisation parameter(s)
Linear	$K(x_i, x_j) = x_i . x_j$	-
RBF	$K(x_i, x_j) = exp(-\gamma \left\| x_i - x_j \right\|^2)$	γ
Polynomial	$K(x_i, x_j) = \left(\gamma \left(x_i . x_j\right) + C\right)^d$	γ,C,d

مدل SVM-SA

یکی از عوامل مؤثر بر عملکرد مدل‌های SVM، تنظیم پارامترهای طبقه‌بندی کننده آن‌ها است (Sedighkia and Datta, 2023). در جدول (۱) پارامترهای کنترل‌کننده و قابل تنظیم توسط کاربر برای هر یک از کرنل‌ها ارائه شده است. گاما (γ) که متناظر با نوع تابع کرنل است، بر تعداد بردارهای پشتیبان تأثیرگذار است. تعداد بردارهای پشتیبان، زمان آموزش مدل را تعیین می‌کنند و مقدار بیش از حد آن‌ها باعث بیش‌برازش مدل می‌شود. بنابراین تعیین این پارامتر به‌طور مستقیم عملکرد مدل SVM را

DOI: 10.22055/jise.2024.44894.2096

تحت تأثیر قرار می‌دهد. d درجه چندجمله‌ای و C نیز مقدار ثابت است (Sedighkia and Datta, 2023).

در مدل سنتی SVM، معمولاً پارامترها را با سعی و خطا تعیین می‌کنند، اما در مطالعه‌ی حاضر، برای انتخاب پارامترهای مذکور، از الگوریتم بهینه‌سازی SA استفاده شد. بدین منظور ابتدا مقدار اولیه پارامترها مطابق با مقادیر پیشنهادی مطالعه‌های پیشین، بر اساس ماهیت داده‌های ورودی و به‌صورت دستی تنظیم می‌شوند، سپس مقادیر بهینه آن‌ها با استفاده از الگوریتم SA محاسبه و برای تولید خروجی و اتمام مدل‌سازی، وارد مدل SVM خواهند شد (Mehrabani Bashar et al., 2023). بدین ترتیب مدل‌سازی از سعی و خطای مکرر بی‌نیاز و با سرعت و دقت بیشتری انجام می‌شود (Azadi et al., 2022).

منحنی سنجه

درون‌یابی و برون‌یابی، دو روش متداول برای محاسبه بار رسوب معلق رودخانه هستند، که نیازمند نمونه‌برداری منظم و پیوسته از ایستگاه‌های هیدرولوژی می‌باشند. از جمله روش‌های برونیابی مؤثر برای برآورد بار رسوبی، منحنی‌های سنجه هستند (Efthimiou, 2019). تنها متغیر مورد نیاز برای برآورد بار رسوبی با استفاده از منحنی سنجه، مقادیر دبی نظیر است، در حالی که در مدل‌های هیدرولیکی به اطلاعات ورودی زیادی نیاز است. Azadi et al (2020) برای برآورد بار رسوب معلق ماهانه حوضه آبیاکا (Abiaca Creek) طی دوره ۲۰۰۳-۱۹۹۱ از روش‌های مختلفی از جمله مدل‌سازی آماری، منحنی سنجه رسوب و روش تجزیه ضربی و جمع‌پذیر استفاده کردند، که دقت بالای نتایج منحنی سنجه رسوب را تأیید کردند. در منحنی سنجه، بار رسوب و دبی جریان در برابر هم و در یک محور مختصات تمام لگاریتمی ترسیم و خطی بر آن‌ها برازش داده می‌شود. از معادله این خط برای تکمیل سری زمانی بار رسوبی استفاده می‌شود، که Q_s بار رسوبی، Q_w دبی جریان و a و b ضرایب رگرسیون هستند.

$$Q_s = aQ_w^b \qquad (۴)$$

روش رسوب‌سنجی اصلاحی FAO

روش رسوب‌سنجی FAO، نسخه اصلاح شده معادله USBR است، که در آن شیب خط رگرسیونی منحنی سنجه ثابت فرض می‌شود (Javidan et al., 2022) و برای بهبود عملکرد منحنی سنجه یک خطی اعمال می‌گردد (Varvani and Khalighi, 2007). در این روش برای نزدیک کردن مقادیر بار رسوبی برآورد شده توسط منحنی سنجه به مقادیر مشاهده‌ای، ضریب آبدهی را اصلاح و از رابطه (۵) برای محاسبه بار رسوبی استفاده می‌شود:

$$Q_s = (\overline{Q}_S / \overline{Q}_w^{\ b})Q_w^b \qquad (۵)$$

که $\overline{Q}_S$ و $\overline{Q}_W$ به ترتیب مقادیر بار رسوبی متوسط و آبدهی متوسط هستند.

گرادیان کاهش‌یافته عمومی (GRG)

روش گرادیان کاهش یافته عمومی یک روش بهینه‌سازی غیرخطی است، که با یک رویکرد تکرارشونده به مقدار بهینه مسئله نزدیک می‌شود. در این روش، تابع هدف یا هر یک از قیود می‌توانند خطی یا غیرخطی باشند. GRG ابتدا محدودیت‌های تابع هدف را خطی می‌کند، سپس با تکرار روش بهینه‌سازی خطی به جواب بهینه مسئله می‌رسد (Hatami et al., 2020). در مطالعه حاضر، ضرایب متغیرها در روابط آبدهی-رسوب (روش‌های رسوب‌سنجی اصلاحی FAO و منحنی سنجه)، به‌عنوان متغیرهای تصمیم درنظر گرفته شدند و تابع هدف نیز حداقل‌سازی اختلاف بین رسوب برآورد شده و داده‌های مشاهده‌ای است. تابع هدف مطالعه‌ی حاضر، در رابطه (۶) ارائه شده و محدودیت اعمال شده برای آن نیز مثبت بودن مقادیر داده‌ها است.

$$Minf = \sum_{i=1}^{n} \left| X_{i_{obs}} - X_{i_{sim}} \right| \qquad (۶)$$

در این رابطه n، $X_{i_{obs}}$ و $X_{i_{sim}}$ به‌ترتیب تعداد داده‌ها، داده‌های مشاهداتی و داده‌های شبیه‌سازی شده هستند.

ارزیابی عملکرد مدل

برای ارزیابی کارایی و دقت مدل‌های مورد استفاده در مطالعه حاضر، از شاخص‌های آماری جذر میانگین مربعات خطا (RMSE)، خطای استاندارد (SE)، اریب متوسط (MBIAS) و ضریب تعیین (R^2) استفاده شد.

$$RMSE = \frac{\sqrt{\sum_{i=1}^{n} \left(X_{i_{obs}} - X_{i_{sim}} \right)^2}}{n} \qquad (۷)$$

$$SE = \frac{RMSE}{\overline{X}_{obs}} \qquad (۸)$$

$$\mathrm{MBIAS} = \frac{\sum_{i=1}^{n} (X_{i_{obs}} - X_{i_{sim}})}{n} \qquad (۹)$$

$$R^2 = \frac{\left[\sum_{i=1}^{n} (X_{i_{obs}} - \overline{X}_{obs})(X_{i_{sim}} - \overline{X}_{sim}) \right]^2}{\sum_{i=1}^{n} (X_{i_{obs}} - \overline{X}_{obs})^2 . \sum_{i=1}^{n} (X_{sim} - \overline{X}_{sim})^2} \qquad (۱۰)$$

که در این روابط، $X_{i_{obs}}$ و $X_{i_{sim}}$ به‌ترتیب داده‌های مشاهداتی و شبیه‌سازی شده، $\overline{X}_{obs}$ و $\overline{X}_{sim}$ به‌ترتیب میانگین داده‌های مشاهداتی و میانگین داده‌های شبیه‌سازی شده و n تعداد داده‌ها هستند.

نتایج و بحث

در این مطالعه برای پیش‌بینی بار رسوب معلق ماهانه ایستگاه هیدرومتری یلفان، از سری زمانی آبدهی و بار رسوبی این ایستگاه طی ۱۳۹۴-۱۳۸۶ استفاده شد. متوسط آبدهی و بار رسوبی سالانه ثبت شده در این دوره ایستگاه به‌ترتیب برابر ۳/۰۳ مترمکعب و ۸۹/۷۰ هزار تن در سال است. انحراف معیار آبدهی و بار رسوبی ثبت شده در دوره آماری مذکور نیز به‌ترتیب برابر ۶/۳۴ و ۸۹۱/۵۶ هستند. از مجموع ۱۰۶ داده به‌کار رفته در هر سری، تعداد ۷۴ داده (۷۰ درصد) به‌صورت تصادفی برای واسنجی و ۳۲ داده (۳۰ درصد) برای صحت‌سنجی نتایج مدل‌ها درنظر گرفته شدند. بدین منظور از مدل تلفیقی ماشین بردار پشتیبان-الگوریتم تبرید (SVM-SA)، منحنی سنجه و روش رسوب‌سنجی اصلاحی FAO استفاده گردید.

به منظور پیش‌بینی بار رسوبی توسط مدل SVM-SA، از مدل تهیه شده در نرم‌افزار متلب استفاده شد و عملکرد این مدل، قبل و بعد از نرمال‌سازی داده‌ها و به ازای الگوهای تک ورودی-تک خروجی (SISO) و چند ورودی-تک خروجی (MISO) مقایسه شد. با توجه به اینکه آمار و اطلاعات آبدهی و بار رسوبی ایستگاه مورد بررسی در این تحقیق، به‌صورت پیوسته و منظم برداشت نشده و داده‌های روزانه با تعداد محدود و با فواصل زمانی پراکنده برداشت شده است. بنابراین امکان تعیین ساختارهای متفاوت از ورودی و ایجاد تأخیر یک و یا چند روزه در ورودی‌ها وجود ندارد. لذا داده‌ها بدون تأخیر زمانی و به‌صورت هم‌زمان وارد مدل شدند. متغیرهای ورودی، خروجی و مقدار بهینه پارامترهای مدل SVM در جدول (۲) ارائه شده است. نرمال‌سازی داده‌ها از طریق عمل لگاریتم‌گیری صورت گرفت. همچنین مقادیر آبدهی در سه بازه‌ی $x < 0.36$، $0.36 < x < 1.31$ و $x > 1.31$، تفکیک شدند و به‌ترتیب اعداد ۱، ۲ و ۳ به هر یک از بازه‌ها نسبت داده شد و به‌عنوان ورودی دوم برای آموزش مدل به‌کار رفت. عملکرد مدل SVM به ازای کرنل‌های RBF، خطی و چندگانه بررسی و نتایج مقایسه شدند. همچنین تعیین پارامترهای کنترل‌کننده مدل نیز از طریق به‌کارگیری الگوریتم بهینه‌سازی SA صورت گرفت. در شکل (۴) نمودار پراکنش داده‌های محاسباتی-مشاهداتی برای بخش آزمون مدل SVM-SA به ازای حالت‌های مذکور مقایسه شده اند. از میان کرنل‌های بررسی شده برای مدل SVM، کرنل RBF، کرنل خطی و کرنل چندجمله‌ای به‌ترتیب در رتبه‌های اول تا سوم قرار گرفتند و این نتیجه به ازای الگوهای SISO، MISO، داده‌های اصلی و داده‌های نرمال شده نیز تکرار شد. در مطالعه حاضر، جدول و اشکال ارائه شده برای مدل SVM، نتایج مبتنی بر RBF هستند و از تکرار آن‌ها برای سایر کرنل‌ها صرف نظر شده است. شکل (۵) نیز عملکرد این مدل را به ازای داده‌های نرمال شده نشان می‌دهد. اصلاح الگوی داده‌های وارد شده به مدل از حالت SISO به MISO باعث بهبود نتایج مدل‌سازی به ازای هر دو سری اصلی و نرمال شده گردید. نرمال‌سازی داده‌ها نیز باعث بهبود عملکرد مدل در هر دو الگوی SISO و MISO شد. از میان تمام حالت‌های بررسی شده، مدل SVM-SA با الگوی چند ورودی-تک خروجی نرمال شده، عملکرد بهتری داشته و برای پیش‌بینی بار رسوب معلق رودخانه پیشنهاد می‌گردد.

شکل (۶) توزیع خطای مدل در روش‌های مذکور را نشان می دهد. ملاحظه می‌شود که احتمال اینکه مقادیر خطا به صفر نزدیک باشند در روش الگوی چند ورودی-تک خروجی نرمال شده، بیشتر است. همچنین توزیع این خطا به نرمال نزدیکتر است.

تجزیه و تحلیل عدم قطعیت مدل‌ها و تشخیص ویژگی‌های آماری خروجی مدل براساس روابط موجود بین پارامترها و ورودی‌های مدل از مهم‌ترین موارد مدل‌سازی در هیدرولوژی به‌شمار می‌آید. لذا مدل‌های مورد نظر در این تحقیق ۲۰ مرتبه اجرا شدند و عدم قطعیت نتایج حاصل از اجراهای مختلف هر یک از مدل‌ها محاسبه شدند. با توجه به برتری نتایج مدل مبتنی بر کرنل RBF نسبت به سایر کرنل‌ها، عدم قطعیت SVM مبتنی بر کرنل RBF به ازای الگوهای مختلف در شکل (۷) نشان داده شده است. ملاحظه می‌شود که در تکرارهای مختلف SVM با الگوهای SISO، SISO نرمال شده و MISO نرمال شده، نتایج مدل مشابه و فاقد عدم قطعیت می‌باشد و بیشترین عدم قطعیت در نتایج مربوط به الگوی MISO می‌باشد.

از آنجا که همبستگی مناسبی بین بار رسوب معلق و آبدهی نظیر وجود دارد، برای برآورد غیرمستقیم بار رسوب معلق رودخانه، از منحنی سنجه استفاده شد. بدین منظور ۷۰ درصد از مقادیر آبدهی به‌ترتیب صعودی مرتب و در برابر بار رسوبی نظیر، و در محورهای تمام لگاریتمی ترسیم شدند. در نهایت از معادله خط توانی برازش داده شده بر این نقاط، برای تکمیل ۳۰ درصد باقی مانده سری زمانی رسوب استفاده شد. در شکل (۸)، منحنی سنجه ایستگاه هیدرومتری یلفان ارائه شده است. در مقادیر پایین دبی، اختلاف داده‌های مشاهده‌ای و مقادیر برازش داده شده کم است، اما با افزایش دبی رودخانه، این اختلاف نیز افزایش می‌یابد، که ناشی از خاصیت لگاریتمی محورهای منحنی سنجه است (Azadi et al., 2020). در همین راستا با ایجاد یک شکست در نقطه‌ی دبی متوسط، داده‌ها به دو قسمت تقسیم می‌شوند و با برازش دو خط مجزا، تخمین بار رسوبی با دقت بیشتری انجام خواهد شد.

جدول ۲- متغیرهای ورودی، خروجی و مقادیر بهینه پارامترهای مدل SVM

Table 2- Inputs, outputs, and Optimized parameter(s) of the SVM model

Model	Optimized parameter(s)			Inputs	Outputs
	Linear	RBF	Polynomial		
SVM-SA (SISO)	-	$\gamma = 2.92$	$\gamma = 0.0009$ $C = 42.77$ $d = 3$	Discharge flow	Sediment load
SVM-SA (MISO)	-	$\gamma = 0.97$	$\gamma = 0.0048$ $C = 2.18$ $d = 3$	Discharge flow	Sediment load
SVM-SA (SISO) – Normalized	-	$\gamma = 8.37$	$\gamma = 5000.5$ $C = 8.81$ $d = 5$	Normalized Discharge flow	Normalized Sediment load
SVM-SA (MISO) – Normalized	-	$\gamma = 28.69$	$\gamma = 0.00002$ $C = 53.4$ $d = 3$	Normalized Discharge flow	Normalized Sediment load

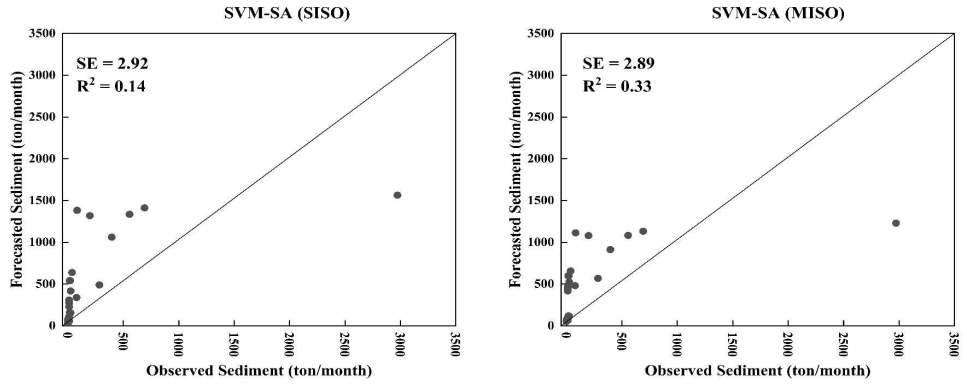


Fig. 4- Distribution of the computational-observational data for the SVM-SA's test part

شکل ٤- نمودار پراکنش داده‌های محاسباتی-مشاهداتی برای بخش آزمون مدل SVM-SA

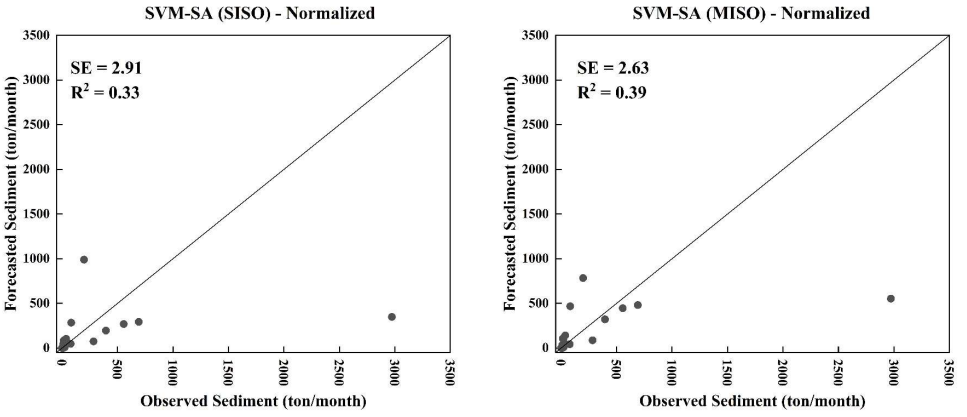


Fig. 5- Distribution of the computational-observational data for the normalized SVM-SA's test part

شکل ٥- نمودار پراکنش داده‌های محاسباتی-مشاهداتی برای بخش آزمون مدل SVM-SA نرمال شده

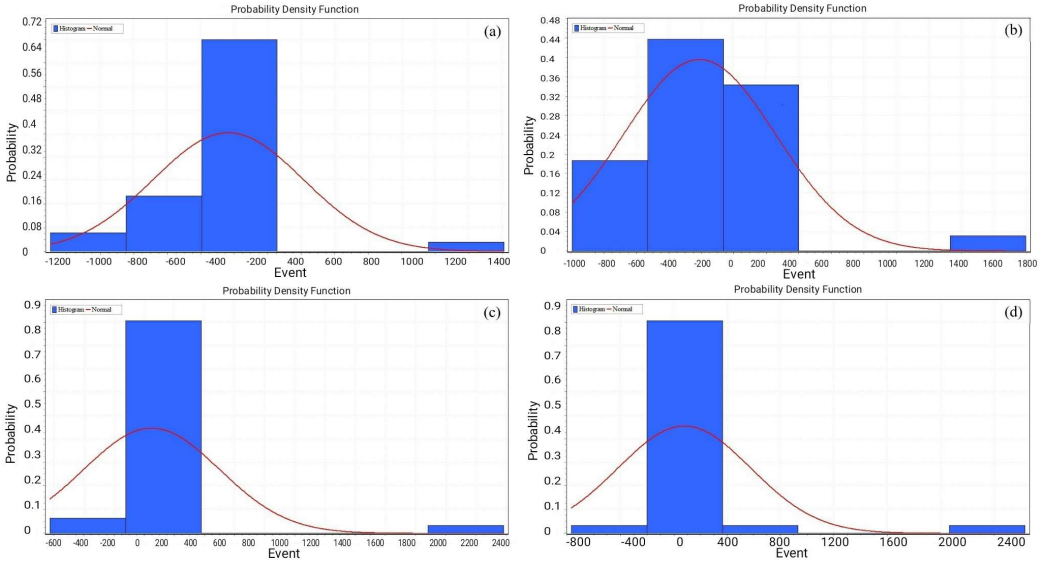


Fig. 6- Error distribution of SVM-SA model based on (a) SISO, (b) MISO, (c) normalized SISO and (d) normalized MISO patterns in sediment load simulation

شکل ٦- توزیع خطای مدل SVM-SA مبتنی بر الگوهای (a) SISO، (b) MISO، (C) SISO نرمال شده و (d) MISO نرمال شده در شبیه‌سازی بار رسوبی

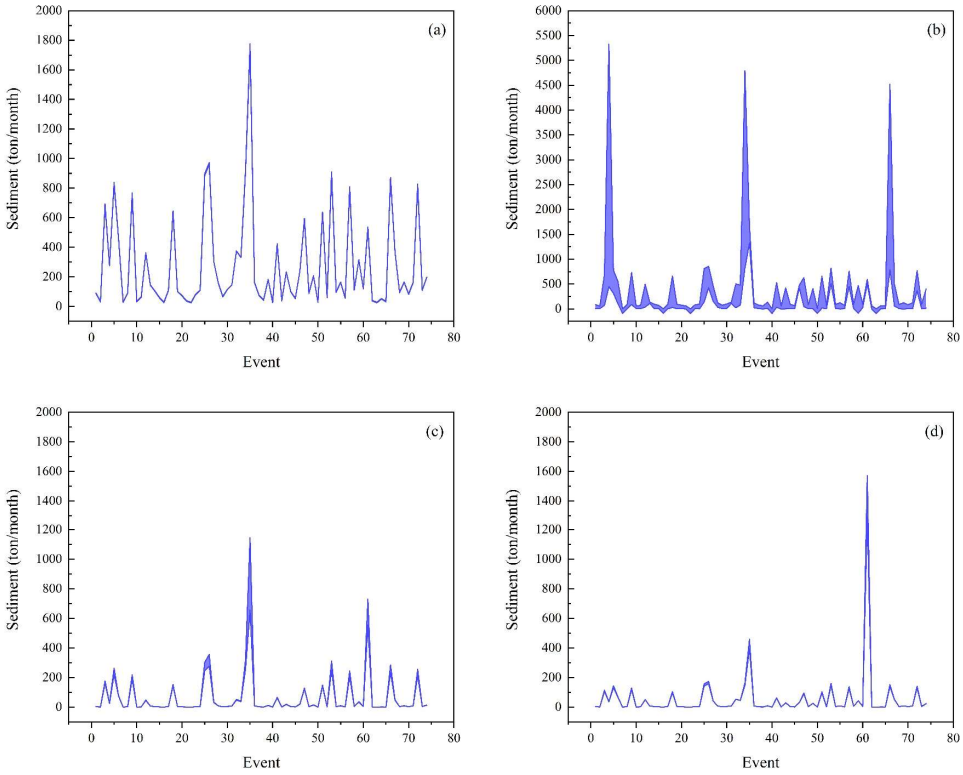


Fig. 7- Uncertainty of SVM-SA model based on (a) SISO, (b) MISO, (c) normalized SISO and (d) normalized MISO patterns in sediment load simulation

شکل ۷- عدم قطعیت مدل SVM-SA مبتنی بر الگوهای (a) SISO، (b) MISO، (C) SISO نرمال شده و (d) MISO نرمال شده در شبیه‌سازی بار رسوبی

DOI: 10.22055/jise.2024.44894.2096

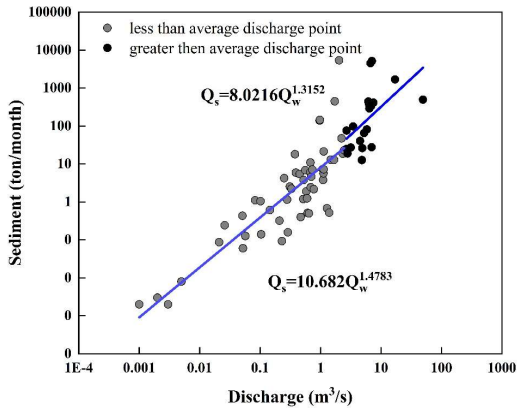


Fig. 8- Sediment rating curve for the Yalphan hydrometric station

شکل ۸- منحنی سنجه ایستگاه هیدرومتری یلفان

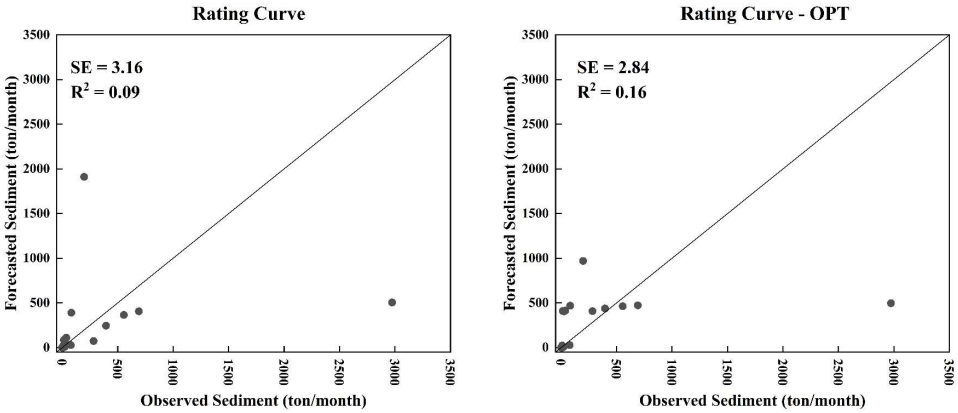


Fig. 9- Distribution of the computational-observational data for the sediment rating curve

شکل ۹- نمودار پراکنش داده‌های محاسباتی-مشاهداتی برای روش منحنی سنجه

در این مطالعه، ضرایب متغیرهای معادله آبدهی-رسوب با استفاده از الگوریتم بهینه‌سازی گرادیان کاهش‌یافته عمومی (GRG) انتخاب شد. تابع هدف در بهینه‌سازی مذکور، حداقل‌سازی اختلاف بین رسوب برآورد شده و داده‌های مشاهده‌ای است و متغیرهای تصمیم نیز ضرایب متغیرهای این رابطه هستند.

در شکل (۹) نمودار پراکنش داده‌های محاسباتی-مشاهداتی برای روش منحنی سنجه قبل و بعد از بهینه‌سازی مقایسه شده اند. انتخاب ضرایب متغیرهای معادله آبدهی-رسوب با استفاده از الگوریتم بهینه‌سازی GRG، باعث بهبود عملکرد منحنی سنجه در برآورد بار رسوب معلق رودخانه شد.

در این تحقیق، روش رسوب‌سنجی FAO نیز برای اصلاح رابطه آبدهی-رسوب و بهبود عملکرد منحنی سنجه بکار گرفته شد (شکل ۱۰). همچنین ضرایب متغیرها در معادله آبدهی-رسوب این روش، با استفاده از روش گرادیان کاهش‌یافته عمومی انتخاب شدند. تابع هدف در بهینه‌سازی مذکور، حداقل‌سازی اختلاف بین رسوب برآورد شده و داده‌های مشاهده‌ای است و متغیرهای تصمیم نیز ضرایب متغیرهای این رابطه هستند. در شکل (۱۱) نمودار پراکنش داده‌های محاسباتی-مشاهداتی برای روش رسوب‌سنجی اصلاحی FAO قبل و بعد از بهینه‌سازی ضرایب مقایسه شده اند. انتخاب ضرایب متغیرهای معادله آبدهی-رسوب با استفاده از الگوریتم GRG، باعث بهبود قابل ملاحظه‌ای در عملکرد روش رسوب‌سنجی FAO و کاهش ۷۳/۱۹ درصدی شاخص خطای استاندارد (SE) شد.

دیاگرام تیلور ارائه شده در شکل (۱۲)، عملکرد مدل‌ها را قبل و بعد از بهینه‌سازی نشان می‌دهد. در این شکل، اختلاف خطی بین بار رسوبی مشاهداتی و مقادیر برآورد شده، توسط شاخص RMSE و با خطچین آبی مشخص شده است. تمامی روش‌ها به جز روش رسوب‌سنجی FAO، از عملکرد مشابهی برخوردارند و در محدوده‌ی RMSE=500 قرار گرفته‌اند. بهینه‌سازی روش FAO با استفاده از گرادیان کاهش یافته عمومی، باعث بهبود قابل ملاحظه‌ای در عملکرد این مدل شده است. مدل SVM-SA مبتنی بر الگوی چند ورودی-تک خروجی نرمال شده، نسبت به سایر روش‌ها دارای کمترین RMSE و بیشترین همبستگی است و از طرف دیگر به مقادیر مشاهداتی نیز نزدیک‌تر است، که نشان دهنده برتری این مدل نسبت به سایر مدل‌ها می‌باشد.

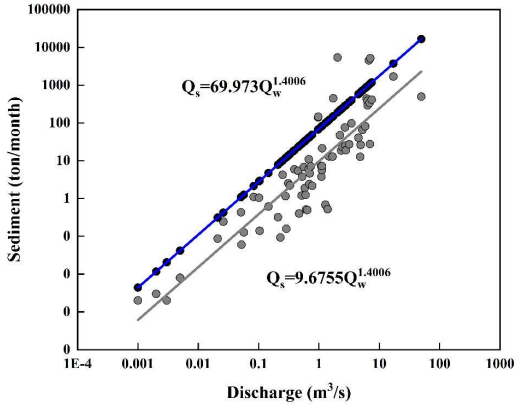


Fig. 10- The modified rating curve using FAO method for the Yalphan hydrometric station

شکل ۱۰- منحنی سنجه اصلاح شده با روش رسوب‌سنجی FAO برای ایستگاه هیدرومتری یلفان

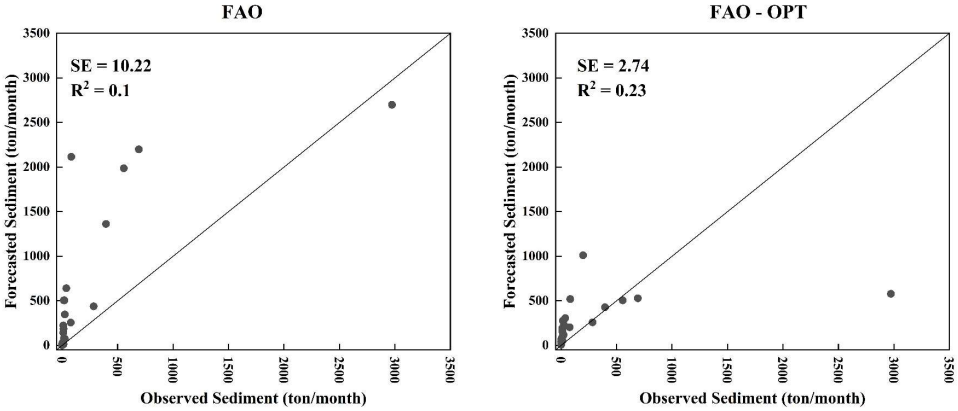


Fig. 11- Distribution of the computational-observational data for the FAO method

شکل ۱۱- نمودار پراکنش داده‌های محاسباتی-مشاهداتی برای روش رسوب‌سنجی اصلاحی FAO

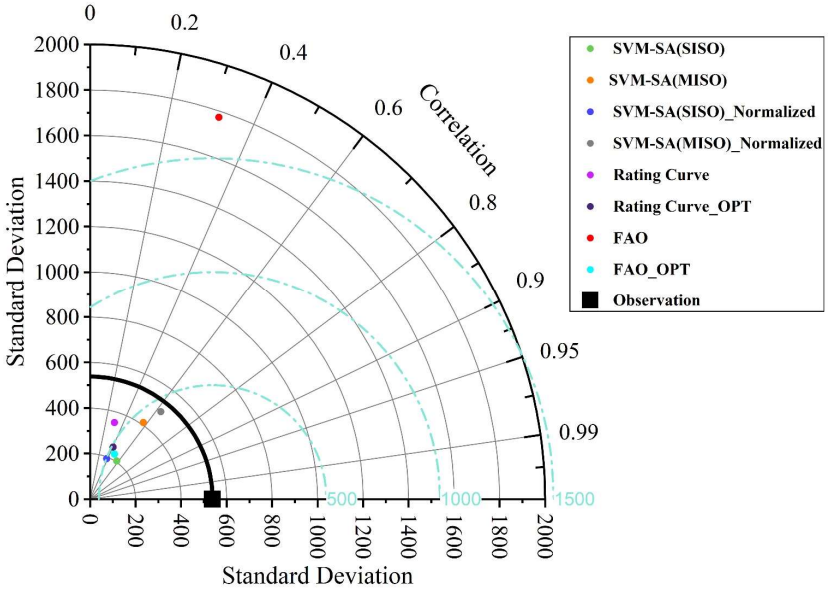


Fig. 12- Taylor diagram for the performance of the sediment load estimation methods

شکل ۱۲- دیاگرام تیلور عملکرد روش‌های برآورد بار رسوبی

 DOI: 10.22055/jise.2024.44894.2096

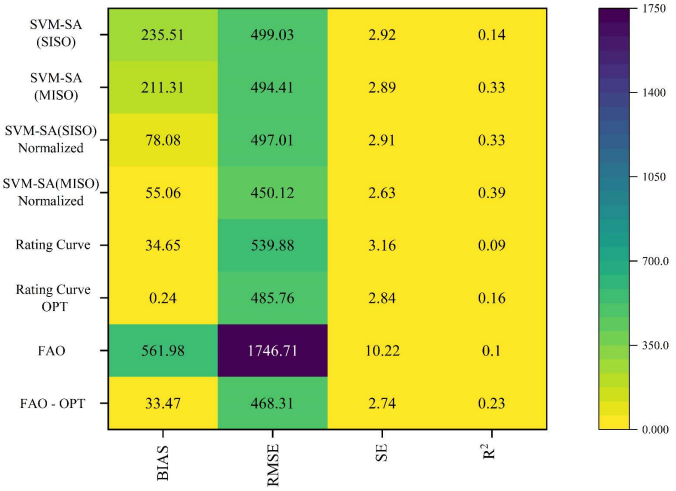


Fig. 13- Values of statistical indices in estimating the monthly sediment load by various models

شکل ۱۳- مقادیر شاخص‌های آماری در برآورد بار رسوبی ماهانه به تفکیک مدل‌ها

در شکل (۱۳) عملکرد مدل‌های مورد مطالعه، در قالب نمودار حرارتی مقایسه شده است. در این نمودار، مدل‌ها در محورهای افقی و شاخص‌های آماری نیز در محورهای عمودی ارائه شده اند. مقدار شاخص‌های آماری هر مدل نیز در سلول نظیر قرار گرفته است. با توجه به این شکل، بهترین مدل برای برآورد بار رسوبی ماهانه ایستگاه یلفان، مدل SVM-SA (MISO)-N با SE=2.63، RMSE=450.12، BIAS=55.06 و R^2=0.39 است، که تأییدی بر نتایج دیاگرام تیلور می‌باشد. مدل‌های FAO-OPT، Rating Curve-OPT، SVM-SA (MISO)، SVM-SA (SISO)-N، Rating Curve و FAO نیز به ترتیب در رتبه‌های دوم تا هفتم قرار گرفتند. نتایج حاکی از تأثیر مثبت الگوریتم بهینه‌سازی GRG بر عملکرد روش‌های محاسباتی است. همچنین نرمال‌سازی داده‌های ورودی به مدل SVM-SA باعث بهبود عملکرد این مدل در هر دو الگوی SISO و MISO شد. در این مطالعه، ضرایب متغیرهای معادله آبدهی–رسوب با استفاده از الگوریتم بهینه‌سازی گرادیان کاهش‌یافته عمومی (GRG) انتخاب شد. تابع هدف در بهینه‌سازی مذکور، حداقل‌سازی اختلاف بین رسوب برآورد شده و داده‌های مشاهده‌ای است و متغیرهای تصمیم نیز ضرایب متغیرهای این رابطه هستند.

نتیجه‌گیری

تحقیق حاضر با هدف بررسی تأثیر نوع توزیع احتمالاتی، نوع کرنل انتخابی و الگوی داده‌های ورودی بر عملکرد مدل SVM-SA و همچنین بهبود روش‌های محاسباتی برآورد بار رسوبی از طریق بهینه‌سازی ضرایب معادله‌ها، انجام شده است. بدین منظور از دو روش مختلف برای پیش‌بینی بار رسوب معلق ایستگاه هیدرومتری یلفان استفاده شد. در روش اول تأثیر الگوی وارد شده به مدل، نوع کرنل و نوع توزیع احتمالاتی داده‌ها، بر عملکرد مدل SVM-SA بررسی شد. نتایج نشان داد، تفکیک داده‌های مشاهداتی و اصلاح الگوی داده‌های وارد شده به این مدل از حالت SISO به MISO باعث بهبود نتایج مدل‌سازی به ازای هر دو سری اصلی و نرمال شده گردید. همچنین نرمال‌سازی داده‌ها با استفاده از عمل لگاریتم‌گیری، باعث بهبود عملکرد این مدل در هر دو الگوی SISO و MISO شد. از میان کرنل‌های بررسی شده برای مدل SVM نیز، RBF، کرنل خطی و کرنل چندجمله‌ای به ترتیب در رتبه‌های اول تا سوم قرار گرفتند و این نتیجه به ازای الگوهای SISO، MISO، داده‌های اصلی و داده‌های نرمال شده نیز تکرار شد. در روش دوم نیز تأثیر روش بهینه‌سازی گرادیان کاهش‌یافته عمومی، بر عملکرد روش‌های محاسباتی رسوب‌سنجی اصلاحی FAO و منحنی سنجه مورد بررسی قرار گرفت. نتایج نشان داد، انتخاب ضرایب متغیرهای معادله آبدهی–رسوب با استفاده از الگوریتم بهینه‌سازی GRG، باعث بهبود قابل توجهی در عملکرد روش‌های محاسباتی مذکور در برآورد بار رسوب معلق رودخانه می‌شود و این دو روش را به روش‌های مؤثر و قابل رقابت با روش‌های پیش‌بینی مستقیم بار رسوبی تبدیل کرده است. از میان روش‌های بررسی شده، مدل SVM-SA مبتنی بر الگوی چند ورودی–تک خروجی نرمال شده، به عنوان بهترین روش معرفی و برای پیش‌بینی بار رسوب معلق رودخانه پیشنهاد می‌گردد.

تشکر و قدردانی

مطالعه‌ی حاضر با حمایت مالی کمیته تحقیقات شرکت سهامی آب منطقه‌ای استان همدان انجام شده است و نویسندگان از این طریق مراتب تقدیر و تشکر خود را اعلام می‌دارند. همچنین از دانشگاه بوعلی سینا همدان برای در اختیار قرار دادن امکانات جهت انجام این پژوهش تشکر و قدردانی می شود.

تضاد منافع نویسندگان

نویسندگان این مقاله اعلام می‌دارند که هیچ گونه تضاد منافعی در خصوص نگارش و انتشار مطالب و نتایج این پژوهش ندارند.

منابع مالی

مطالعه‌ی حاضر با حمایت مالی کمیته تحقیقات شرکت سهامی آب منطقه‌ای استان همدان انجام شده است.

دسترسی به داده‌ها

مجموعه داده‌های تولید شده و یا تحلیل شده در طول مطالعه حاضر، در صورت درخواست معقول، از نویسنده مسئول در دسترس هستند.

مشارکت نویسندگان

نویسنده اول: حامد نوذری، مسئول برنامه‌ریزی پروژه، توسعه ایده‌های مفهومی اصلی و تجزیه و تحلیل داده‌ها

نویسنده دوم: فاطمه چدنی، انجام محاسبات، بررسی نتایج تجزیه و تحلیل داده ها و نوشتن نسخه ی خطی مقاله

نویسنده سوم: مهدی کلانتری، توسعه ایده‌های مفهومی اصلی، ایجاد چارچوب محاسباتی

نویسنده چهارم: علیرضا مهربانی بشار، انجام محاسبات، بررسی نتایج تجزیه و تحلیل داده ها و نوشتن نسخه ی خطی مقاله

References

1- AlDahoul, N., Essam, Y., Kumar, P., Ahmed, A. N., Sherif, M., Sefelnasr, A., and Elshafie, A. 2021. Suspended sediment load prediction using long short-term memory neural network. *Scientific Reports*, 11(1): 1-22. DOI: 10.1038/s41598-021-87415-4.

2- Asadi, H., Dastorani, M.T., Sidle, R.C., and Shahedi, K. 2021. Improving Flow Discharge-Suspended Sediment Relations: Intelligent Algorithms versus Data Separation. *Water* 13(24):3650. DOI: 10.3390/w13243650.

3- Azadi, S., Nozari, H., and Godarzi, E. 2020. Predicting sediment load using stochastic model and rating curves in a hydrological station. *Journal of Hydrologic Engineering*, 25(8): 05020017. DOI: 10.1061/(ASCE)HE.1943-5584.0001967.

4- Azadi, S., Vafaee, M., and Nozari, H. 2022. Estimation of precipitation using the combined method of Support Vector Machine-Simulated Annealing algorithm (case study: Gorgan synoptic station). *Advanced Technologies in Water Efficiency*, 2(3), 14-34. (In Persian). DOI: 10.22126/ATWE.2022.8393.1028.

5- Ba, H., Guo, S., Wang, Y., Hong, X., Zhong, Y., and Liu, Z. 2018. Improving ANN model performance in runoff forecasting by adding soil moisture input and using data preprocessing techniques. *Hydrology Research*, 49(3): 744-760. DOI: 10.2166/nh.2017.048.

6- Bahrami, S., Ardejani, F. D., and Baafi, E. 2016. Application of artificial neural network coupled with genetic algorithm and simulated annealing to solve groundwater inflow problem to an advancing open pit mine. *Journal of Hydrology*, 536, 471-484. DOI: 10.1016/j.jhydrol.2016.03.002.

7- Barzegari Banadkoki, F., and Armin, M. 2016. Suspended sediment prediction using time series and sediment rating curve (Case study: Ghazaghly station in Gorganroud River). *Iranian Journal of Watershed Management Science and Engineering*, 9(31), 77-88. (In Persian).

8- Cortes, C., and Vapnik, V. 1995. Support-vector networks. *Mach Learn* 20, 273–297. DOI: 10.1007/BF00994018.

9- Deka, P. C. 2014. Support vector machine applications in the field of hydrology: A review. *Applied Soft Computing*, 19,372-386. DOI: 10.1016/j.asoc.2014.02.002.

10-Efthimiou, N. 2019. The role of sediment rating curve development methodology on river load modeling. *Environmental Monitoring and Assessment*, 191(2), 108. DOI: 10.1007/s10661-018-7167-4.

11-Fabian, V. 1997. Simulated Annealing Simulated. *Computers & Mathematics with Applications*, 33, 81-94. DOI: 10.1016/S0898-1221(96)00221-0.

12-Hamel, L. 2009. Knowledge Discovery with Support Vector Machines. John Wiley, Hoboken, NJ, USA. DOI: 10.1002/9780470503065.

13-Hapsari, D., Onishi, T., Imaizumi, F., Noda, K., and Senge, M. 2019. The Use of Sediment Rating Curve under its Limitations to Estimate the Suspended Load. *Reviews in Agricultural Science.* 7: 88-101. DOI: 10.7831/ras.7.0_88.

14-Hatami, S., Banihabib, M.E., and Soltani, J. 2020. Determination of Optimal Operation Policy of Reservior with Nonlinear Model to Reduce Reservoir Water Losses. *Iranian journal of Ecohydrology*, 7(1), pp. 277-290. (In Persian). DOI: 10.22059/ije.2020.295631.1266.

15-Huang, C. C., Chang, M. J., Lin, G. F., Wu, M. C., and Wang, P. H. 2021. Real-Time forecasting of suspended sediment concentrations reservoirs by the optimal integration of multiple machine learning techniques. *Journal of Hydrology*, 34: 100804. DOI: 10.1016/j.ejrh.2021.100804.

16-Javidan, S., Sattari, M. T., Karimzadeh, P., and Mehrabi, A. 2022. Performance Analysis of Hydrological and Data-Based Models in Estimation of Suspended Sediment Rate. *Environment and Water Engineering*, 8(2): 468-480. DOI: 10.22034/jewe.2021.305599.1632.

17-Kirkpatrick, S., Gelatt, C., D., and Vecchi, M., P. 1983. Optimization by simulated annealing. *Science*, 220, 671–680. DOI: 10.1126/science.220.4598.671.

18-Lin, J. Y., Cheng, C. T., and Chau, K. W. 2006. Using support vector machines for long-term discharge prediction. *Hydrological Sciences Journal*, 51(4), 599-612. DOI: 10.1623/hysj.51.4.599.

19-Mehrabani Bashar, A., Nozari, H., Marofi, S., Mohamadi, M., and Ahadiiman, A. 2023. Investigation of factors affecting rural drinking water consumption using intelligent hybrid models. *Water Science and Engineering*, 16(2), 175-183. DOI: 10.1016/j.wse.2022.12.002.

20-Mohammadi, B., and Heidarpour, B. 2019. Effect of climatic parameters on soil temperature estimation by hybrid refrigeration simulation algorithm. *Nivar*, 43((104-105), pp. 1-12. (In Persian). DOI: 10.30467/nivar.2019.83519.

21-Nouri, H., Ildoromi, A., Sepehri, M., and Artimani, M. 2019. Comparing Three Main Methods of Artificial Intelligence in Flood Estimation in Yalphan Catchment. *Geography and Environmental Planning*, 29(4), pp. 35-50. (In Persian). DOI: 10.22108/gep.2018.98036.0.

22-Nozari, H., and Tavakoli, F. 2018. Evaluation of the Efficiency of Linear and Nonlinear Models in Predicting Monthly Rainfall (Case Study: Hamedan Province). *Journal of Watershed Management Research*, 10(20): 1-12. (In Persian). DOI: 10.29252/jwmr.10.20.1.

23-Ramezanipour, E., Mosaedi, A., and Mesdaghi, M. 2017. Determination of the Best Model for Estimation of Suspended Sediment by using Statistical Error Criteria (Case Stude: Some Sub-Watersheds of Kashafroud). *Journal of Watershed Management Research*, 8(15): 112-124. (In Persian). DOI: 10.29252/jwmr.8.15.112.

24-Samantary, S., Sahoo, A., and Ghose, D. K. 2020. Assessment of Sediment Load Concentration Using SVM, SVM-FFA and PSR-SVM-FFA in Air Watershed, India: A Case Study. *KSCE Journal of Civil Engineering*, 24, 1944-1957. DOI: 10.1007/s12205-020-1889-x.

25-Sedighkia, M., and Datta, B. 2023. Linking SVM based habitat model and evolutionary optimization for managing environmental impacts of hydropower plants. *River Research and Applications*, 39, 897-910. DOI: 10.1002/rra.4121.

26-Shojaeezadeh, S. A., Nikoo, M. R., McNamara, J. P., AghaKouchak, A., and Sadegh, M. 2018. Stochastic modeling of suspended sediment load in alluvial rivers. *Advances in Water Resources, 119*: 188–196. DOI: 10.1016/j.advwatres.2018.06.006.

27-Tran, N. H., and Tran, K. 2007. Combination of fuzzy ranking and simulated annealing to improve discrete fracture inversion. *Mathematical and Computer Modeling*, 45(7-8), 1010-1020. DOI: 10.1016/j.mcm.2006.08.013.

28-Üneş, F., Taşar, B., Demirci, M., Zelenakova, M., Kaya, Y. Z., and Varçin, H. 2021. Daily Suspended Sediment Prediction Using Seasonal Time Series and Artificial Intelligence Techniques. *Rocznik Ochrona Środowiska*, 23: 117-137. DOI: 10.54740/ros.2021.008.

29-Varvani, J., and Khalighi, SH. 2007. Investigation of sediment rating curves error for estimating flood events sediment yield in Gharachay river. *New Finding in Agriculture*, 1(3), pp. 201-214. (In Persian).

Shahid Chamran University of Ahvaz

Irrigation Sciences and Engineering (JISE)
Vol. 48, No. 3, Fall 2025, p. 95-108

Research Paper

Journal homepage: https://jise.scu.ac.ir

EXTENDED ABSTRACT

Effect of Netted Collar on Local Scouring around the Bridge Cylindrical Pile Groups

N. Bahrami[1] and M. Ghomeshi[2*]

1- PhD Graduated of Hydraulic Structures, Lorestan Univversity
2- Corresponding Author, Professor of Department of Water Structurs Faculty of Water and Environmental Engineering, Shahid Chamran University of Ahvaz, Iran. (ghomeshi@scu.ac.ir).*

ARTICLE INFO

Artlcle history:
Received: 19 April 2018
Revised: 25 November 2018
Accepted: 27 November 2018
Available online: 05 November 2025

Keywords:
Local Scouring, Cylindrical Pile Group, Clear Water, Netted Collar, Inhibition of Scouring.

TO CITE THIS ARTICLE:

Bahrami, N., Ghomeshi, M. 2025. 'Effect of Netted Collar on Local Scouring around the Bridge Cylindrical Pile Groups', *Irrigation Sciences and Engineering*, 48(3), pp. 95-108. doi: 10.22055/jise.2018.25526.1756.

Abstract

The problem of scouring of bridge piers has been of interest to hydraulic experts for decades. Various methods have been proposed to control scour, one of which is the use of a netted collar. In this study, the effect of the presence of netted collars on the scouring of bridge cylindrical pile groups under clear flow conditions was investigated. For this purpose, a flume with a length of 6 m and a width of 73 cm was used, and the effect of collars with openings of 0%, 30%, 50%, and 70% was examined at levels of 0.5D above the bed (where D is the diameter of the pier) and on the bed during nine experiments. At the level on the bed, all collars were highly effective, and the 30% netted collar completely controlled the scour around the first pier. At the 0.5D level, the 30% netted collar reduced the scour depth by 58% compared to the no-collar condition, while the efficiency of the collars with openings of 0%, 50%, and 70% at this level was 4%, 0%, and 15%, respectively. In general, efficiency increased as the collar level decreased.

Introduction

The construction of bridges and other hydraulic structures along the rivers and streams creates some changes to the flow pattern in this area, One of this changes is the scouring in the bridge piers and abutments. Local scouring refers to the erosion of the bed in the vicinity of the pier foundation due to the complex vortex system around it. This system consists of horseshoe vortices originating from down flow in the pier upstream and wake vortices that occur due to the separation of flow in the sides of the pier (Breusers, 1991). In addition to the above factors, the following factors also contribute to the scouring of the pile groups: reinforcing, sheltering, shed vortices, and compressed horse-shoe vortex (Hannah, 1978). The collar is a thin plate that is mounted horizontally around the pier and prevents the down flow from collision to the bed surface. Shahsavari et al. (2017) showed that the use of roughness with different arrangements on the abutment, the use of a simple collar and the combination of these two methods at best reduced the scour to 47, 60 and 83 percent, respectively. Alem (2012) reduced the scour depth around the abutment of bridge by using a 33% netted collar at a level of 2cm and 4cm

above the bed surface by 10.4% and 9.4% respectively in compare with simple collar. Jalili (2013) used 0, 15, 30, and 40 netted collar on the pier and in the results found that, in Feroud Number equal to 0.19, 40% netted collar with a 43% reduction in scouring, in the Feroud Number of 0.16, 15% netted collar with 60% reduction of scouring and in the Feroud Number of 0.13, 30% netted collar with 94% reduction in scouring had the highest efficiency. In this research, the effect of netted collars with different openings at the different levels on the scouring of the bridge cylindrical piel group have been investigated.

Methodology

In this research, a laboratory channel with a length of 6m and a width of 73cm was used in the hydraulic laboratory of Shahid Chamran University of Ahvaz. Chiew and Melville (1987) recommended the width of the pier should be less than 10% of the width of the flume to not affect the channel walls on the scour depth. The piers used had a diameter (D) of 2.5 cm, divided into three groups and four different rows at a distance of 2.5 meters from the entrance of the flume. The center-to-center spacing between the groups and center-to-center spacing between the rows were 7.4D and 4D equivalent, respectively. Also, Melville (1992) proposed a standard deviation of sediment particles should be less than 1.3 in order to eliminate the effects of the sediment size on the depth of scour. The sediment particles used had a size of 0.5 mm and standard deviation was 1.18. The critical velocity of particles erosion was measured 0.26m/s. Collars had meshed and the openings parts were of 0, 30, 50 and 70 percent and were installed at the level of 05D above the bed and on the bed in the Feroud Number equal to 0.16.

Results and Discussion

First, a 5-hours experiment was performed without the presence of the piers and the experiments time was obtained about 4 hours. A test was also conducted without the presence of collars to compare the results.

In the experiment with the presence of simple collar at the 0.5d level the collar had no significant effect on the reduction of scouring. In the experiments with the presence of the 30% netted collar, vortices were greatly depleted by the opening parts of collar and the boundary layer was further developed and consequently reduce the scour about 58% in compare with non-collar state. The 50% netted collar had no effect on the scour of first pier and the 70% netted collar slightly reduced the first pier scour about 15%. In general, the effect of the collar on the back piers was more than the first one. On the bed level all collars had high efficiency by preventing the collision vortices to the surface of the bed. Figure (1) and (2) show the percentage of scour reduction in different experiments (R is the percentage of reduction in the scour).

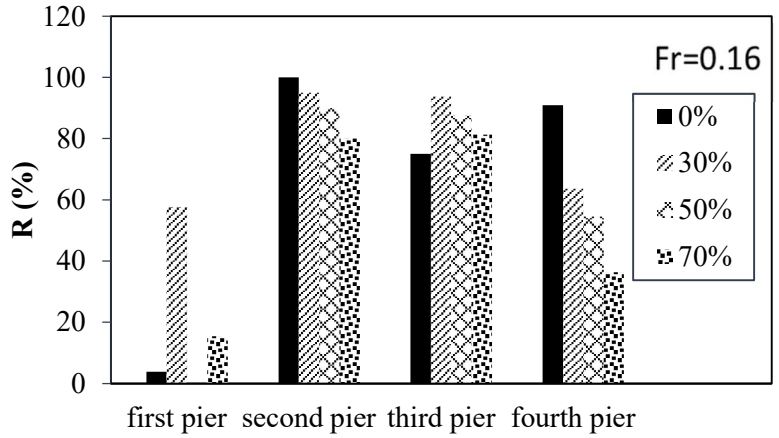


Fig 1- The percentage reduction in scour depth with the presence of collars with different opening percentages at the 0.5*D* level is shown (the column for the collar that did not reduce scour is not included)

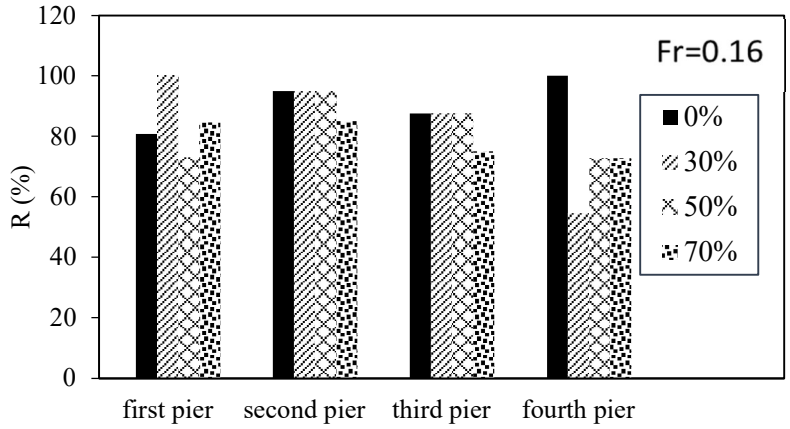


Fig 2- The percentage reduction in scour depth with the presence of collars with different opening percentages at the bed level

Conclusions

This research was carried out to investigate the effect of netted collars with different openings and different levels on the scour depth of the bridge cylindrical pile groups. The 30% netted collar installed on the bed surface was completely controlled first pier scouring by preventing of collision the down flow to the bed surface; on this level all the collars had high efficiency. At the level of 0.5D the 30% netted collar reduced the scour around the pier by 58% and weakened the power of the vortices. In general the 30% netted collar had the highest efficiency on both levels and increased collar efficiency by decreasing the collar level installation.

Acknowledgment

We would like to express our gratitude to the officials of the Hydraulic Laboratory at Shahid Chamran University of Ahvaz for their utmost cooperation in conducting this research.

Conflict of Interest

The authors declared no potential conflicts of interest concerning the research, authorship, and publication of this article. Confirmation.

Funding
The financial support of this research has been provided by Grant number SCU.WH.1397.86 and we hereby thank the Honorable Vice Chancellor of Research from , Shahid Chamran University of Ahvaz for their support.

Data Availability Statements
Data Availability Statement: All information and results are presented in the text of the article.

Authors' contribution
First Author: Nasrin Bahram, Conducting experiments, writing the article, Data analysis, drawing graphs- Participation share: 50 percent
Second Author: Mehdi Ghomedhi, Review and analysis of results, revision and editing of the article- Participation share: 50 percent

References
1- Alem, Z., 2012. Effect of netted collar on the scour of bridge abutment. M.S.C. Thesis. Faculty of Water Science Engineering, *Shahid Chamran University of Ahvaz*. (in Persian).

2- Breusers, H. and Raudkivi, A., 1991. *Scouring. Hydraulic design considerations*. Balkema, Rotterdam, the Netherlands.

3- Chiew, Y. and Melville, B., 1987. Local scour around bridge piers. *Hydraulic Research, 25(1), pp.*15-26. https://doi.org 10.1080/00221688709499285.

4- Hannah, C., 1978. *Scour at Pile Groups*. Research Rep. No. 28-3.

5- Jalili, A., 2013. Effect of using netted collar on bridge piers scouring. M.S.C. Thesis. Faculty of Water Science Engineering, *Shahid Chamran University of Ahvaz*. (in Persian).

6- Shahsavari, H., Heidarpour, M. and Mohammadalizadeh, M., 2017. Simultaneous Effect of Collar and Roughness on Reducing and Controlling the Local Scour around Bridge Abutment. *Acta Universitatis Agriculturae et Silviculturae Mendelianae Brunensis,* 65**,** 491-499. https://doi.org/10.11118/actaun201765020491.

7- Melville, B., 1992. Local scour at bridge abutments. *Hydraulic Engineering,* 118**,** 615-631. https://doi.org/10.1061/(ASCE)0733-9429(1992)118:4(615).

© 2025 Shahid Chamran Universiry of Ahvaz, Ahvaz, Iran. This article is an open access article distributed under the terms and conditions of the Creative Commons Attribution 4.0 International (CC BY 4.0 license) (http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/).

علوم و مهندسی آبیاری جلد ۴۸، شماره‌ی۳، پاییز ۱٤۰٤، مقاله پژوهشی، ص. ۱۰۸-۹۵

اثر طوقه مشبک بر آبشستگی موضعی پیرامون گروه پایه‌های استوانه‌ای پل

نسرین بهرامی[۱] و مهدی قمشی[۲*]

۱-دانش‌آموخته دکتری سازه‌های آبی، دانشگاه لرستان

۲*-نویسنده مسئول، استاد گروه سازه‌های آبی، دانشکده مهندسی آب و محیط زیست، دانشگاه شهید چمران اهواز، ghomeshi@scu.ac.ir

دریافت: ۱۳۹۷/۰۱/۳۰ بازنگری: ۱۳۹۷/۰۹/۰۴ پذیرش: ۱۳۹۷/۰۹/۰۶ انتشار: ۱۴۰۴/۰۸/۱۴

چکیده

مسئله‌ی آبشستگی پایه‌های پل چندین دهه است که مورد توجه متخصصان علم هیدرولیک بوده است. تاکنون روش‌های مختلفی به‌منظور مهار آبشستگی پیشنهاد شده که استفاده از طوقه مشبک یکی از این روش‌ها می‌باشد. در این تحقیق اثر حضور طوقه‌های مشبک بر آبشستگی گروه پایه‌های استوانه‌ای پل در شرایط جریان زلال بررسی شد. بدین منظور از فلومی به طول ٦ متر و عرض ۷۳ سانتی‌متر استفاده شد و تأثیر طوقه با بازشدگی ۰، ۳۰، ۵۰ و ۷۰ درصد در ترازهای ۰/۵D بالای بستر (D قطر پایه می‌باشد) و روی بستر، طی نه آزمایش مورد بررسی قرار گرفت. در تراز روی بستر تمام طوقه‌ها از کارایی بالایی برخوردار بودند و طوقه ۳۰ درصد مشبک توانست آبشستگی اطراف پایه اول را کاملاً کنترل نماید. در تراز ۰/۵D نیز طوقه ۳۰ درصد مشبک، ۵۸ درصد عمق آبشستگی را نسبت به حالت بدون طوقه کاهش داد در حالی که کارایی طوقه‌های ۰، ۵۰ و ۷۰ درصد مشبک در این تراز به‌ترتیب برابر ٤، ۰ و ۱۵ درصد بود. به‌طور کلی با کاهش تراز طوقه بر کارایی آن افزوده شد.

کلید واژه‌ها: آبشستگی موضعی، گروه پایه استوانه‌ای، جریان زلال، طوقه مشبک، مهار آبشستگی.

مقدمه

احداث پل و دیگر سازه‌های هیدرولیکی در مسیر رودخانه‌ها، تغییراتی را در الگوی جریان در این محل به وجود آورده که آبشستگی پایه‌ها و تکیه‌گاه‌های پل یکی از این تغییرات محسوب می‌شود. آبشستگی موضعی به فرسایش بستر در مجاورت پی پایه در اثر سیستم گردابه‌های پیچیده اطراف آن گفته می‌شود. این سیستم شامل گردابه‌های نعل اسبی نشأت گرفته از جریان پایین‌رونده در وجه بالادست پایه و گردابه‌های برخاستگی که در اثر جدایی جریان در طرفین پایه رخ می‌دهند، می‌باشد (Breusers and Raudkivi,1991). علاوه بر آن، عوامل زیر نیز در آبشستگی گروه پایه‌ها دخالت دارند: عامل تقویت کننده، عامل حفاظت کننده، گردابه‌های جاری و به هم فشردگی گردابه‌های نعل اسبی (Hannah,1978). بنا به نظر Hoffmans و Verheij (1997) تحلیل آبشستگی جزء لاینفک طراحی، زیرسازی و پی‌سازی پل‌های جدید می‌باشد و این تحلیل باید تضمین‌کننده‌ی مقاومت پل در برابر سیلاب‌های بزرگ باشد. روش‌های مهار آبشستگی به دو صورت می‌باشند: ۱- روش‌های محافظت از ذرات بستر مانند استفاده از پوشش سنگ‌چین ۲- روش‌های تغییر الگوی جریان مانند استفاده از صفحات مستغرق و طوقه. تاکنون مطالعه‌های متعددی پیرامون این روش‌ها صورت گرفته است. از جمله Shafai Bejestan et al. (2015) با بررسی اثر استفاده از صفحات مستغرق روی تکیه‌گاه پل تحت زوایا و موقعیت‌های مختلف، عنوان نمودند که صفحه مستغرق با زاویه ۴۰ درجه نسبت به افق علاوه بر دور کردن آبشستگی از تکیه‌گاه، ۹۵ درصد عمق آبشستگی را نیز کاهش داد. طوقه که موضوع مورد بحث در این پژوهش می‌باشد، یک صفحه نازک است که به صورت افقی در اطراف پایه نصب شده و مانع از برخورد جریان پایین‌رونده به سطح بستر می‌شود. Singh et el. (2001) مشاهده نمودند که طوقه به قطر ۲/۵D بر روی بستر، آبشستگی پایه استوانه‌ای را به‌طور کامل کنترل کرد؛ در حالی که برای طوقه‌های با عرض ۱/۵D و ۲D در همین تراز به‌ترتیب ۵۰ و ۶۸ درصد از میزان آبشستگی کاسته شد. Zarrati et al. (2006) با بررسی آبشستگی پیرامون گروه‌پایه استوانه‌ای دوتایی مشاهده نمودند که ترکیب طوقه پیوسته و سنگ‌چین آبشستگی پایه جلویی را ۵۰ درصد کاهش داد؛ در حالی که طوقه‌های مستقل و پیوسته آبشستگی این پایه را به‌ترتیب ۳۰ و ۲۵ درصد کاهش دادند. Heidarpour et el. (2010) با قرار دادن طوقه‌ای به اندازه ۳D بر روی گروه‌پایه‌ی استوانه‌ای سه تایی هم راستا با جریان و با فواصل ۳D، در بهترین حالت آبشستگی پایه اول تا سوم را به ترتیب ۰، ۱۹ و ۴۵ درصد کاهش دادند؛ تأثیر طوقه بر روی پایه‌های پشتی به‌دلیل گردابه‌های ضعیف‌تر در وجه بالادست آن‌ها، بیشتر از پایه جلویی بود. Khozeymehnezhad et al. (2014) با بررسی تأثیر ابعاد طوقه‌های متقارن و نامتقارن بر آبشستگی تکیه‌گاه پل مشاهده نمودند که چنانچه عرض طوقه نامتقارن در قسمت بالادست بیشتر از عرض آن در قسمت پایین‌دست باشد، نسبت به طوقه‌ی متقارن هم مساحت خود، از عملکرد بالاتری برخوردار خواهد بود؛ در حالت عکس طوقه متقارن عملکرد بهتری نشان می‌دهد. ایشان هم‌چنین با بررسی تراز کارگذاری طوقه متقارن، طوقه‌های زیر بستر را در کاهش عمق

DOI: 10.22055/jise.2018.25526.1756

آبشستگی مؤثرتر از طوقه‌های روی بستر و بالای بستر عنوان نمودند. آزمایش‌های Shahsavari et al. (2017) نشان داد که استفاده از زبری با آرایش‌های مختلف بر روی تکیه‌گاه، استفاده از طوقه ساده و ترکیب این دو روش در بهترین حالت به‌ترتیب ۴۷، ۶۰ و ۸۳ درصد آبشستگی تکیه‌گاه را کاهش داد. طوقه مشبک نوعی از طوقه است که بازشدگی‌هایی با درصدهای مختلف روی آن ایجاد می‌شود. این بازشدگی‌ها همانند زبری عمل نموده و ضمن آشفته نمودن لایه مرزی روی طوقه باعث افزایش مومنتم جریان در اطراف طوقه می‌شوند. نتیجه‌ی این عمل تمایل کمتر جریان برای جدایی از سطح طوقه و کاهش قدرت گردابه‌های اطراف پایه می‌باشد. به علاوه طوقه مشبک دارای وزن سازه‌ای کمتری نسبت به طوقه ساده بوده و هزینه‌ی اجرایی کمتری نیز نسبت به آن دارد. Alem (2012) با استفاده از طوقه ۳۳ درصد مشبک روی تکیه‌گاه پل در تراز دو و چهار سانتی‌متر بالای بستر به‌ترتیب ۱۰/۴ و ۹/۴ درصد عمق آبشستگی را نسبت به طوقه ساده کاهش داد؛ همچنین طوقه مشبک با آشفته نمودن جریان لایه مرزی، توسعه مکانی آبشستگی را به مکانی دورتر از تکیه‌گاه انتقال داد. Jalili (2013) با استفاده از طوقه‌های ساده، ۱۵، ۳۰ و ۴۰ در صد مشبک بر روی پایه استوانه‌ای پل مشاهده نمود که در عدد فرود ۰/۱۹ طوقه ۴۰ درصد مشبک با ۴۳ درصد کاهش آبشستگی، در عدد فرود ۰/۱۶ طوقه ۱۵ درصد مشبک با ۶۰ درصد کاهش آبشستگی و در عدد فرود ۰/۱۳ طوقه ۳۰ درصد مشبک با ۹۴ درصد کاهش آبشستگی، بالاترین کارایی را داشتند. وی علت کاهش آبشستگی در آزمایش با حضور طوقه مشبک را، آشفته شدن جریان لایه مرزی و کاهش جدایی آن از سطح طوقه عنوان نمود. Hemmati et al. (2016) با بررسی طوقه ۳۰ درصد مشبک با ابعاد مختلف و در ترازهای کارگذاری متفاوت پیرامون تک‌پایه استوانه‌ای، مشاهده نمودند که طوقه به اندازه ۲/۵D و ۳D در تراز ۰/۱D زیر بستر حدود ۷۳ درصد عمق آبشستگی را کاهش داد؛ در حالی که درصد کاهش عمق آبشستگی در تراز ۰/۵D زیر بستر با حضور طوقه‌های ۱/۵D و ۲D حدوداً برابر ۴۰ درصد بود. هم‌چنین نتایج تحقیقات ایشان نشان داد که کارایی طوقه‌های مشبک، ۲۰ درصد بالاتر از طوقه‌های ساده بود. با توجه به اهمیت مسئله آبشستگی و اینکه مطابق آمار سازمان راهداری و حمل و نقل جاده‌ای کشور در ۳۷ درصد موارد، آبشستگی علت تخریب پل‌ها در کشور ایران بوده است (Khademi, 2012). بنابراین لازم است که تحقیقات بیشتری در این زمینه صورت گیرد. از آنجا که تاکنون تحقیق‌های محدودی روی آبشستگی گروه‌پایه‌ها صورت گرفته و مطالعه در خصوص طوقه‌های مشبک نیز در حد انگشت‌شمار و منحصر به تک پایه می‌باشد، لذا در این تحقیق تأثیر حضور طوقه‌های مشبک با درصدهای بازشدگی مختلف و در ترازهای کارگذاری متفاوت، بر آبشستگی گروه پایه‌های استوانه‌ای پل مورد بررسی قرار می‌گیرد.

مواد و روش‌ها

تجهیزات آزمایشگاهی

برای انجام این تحقیق از یک کانال آزمایشگاهی با دیواره‌هایی از جنس شیشه سکوریت به طول ۶ متر و عرض کف ۷۳ سانتی‌متر در آزمایشگاه هیدرولیک دانشگاه شهید چمران اهواز استفاده شد. جریان با استفاده از یک پمپ سانتریفیوژ از مخزن ذخیره آب به داخل فلوم پمپاژ شد. همچنین به‌منظور از بین بردن تلاطم جریان ورودی به فلوم، یک ورقه‌ی پوشال نصب شده روی یک صفحه مشبک در جهت عمود بر جریان و همچنین یک ورقه‌ی یونولیت بر روی سطح آب مورد استفاده قرار گرفت. جریان پس از طی کردن طول فلوم با عبور از روی دریچه کشویی که در انتهای فلوم به منظور تنظیم عمق آب تعبیه شده بود، وارد مخزن خروجی شده و مجددا به مخزن ذخیره آب وارد می‌شد. برای حذف اثر اندازه رسوبات بر عمق آبشستگی موضعی طبق توصیه‌ی Melville و Sutherland (1988) نسبت عرض پایه به قطر ذرات رسوبی باید از ۲۵-۲۰ بیشتر باشد. همچنین Melville (1992) برای حذف اثر غیر یکنواختی رسوبات بر عمق آبشستگی، انحراف معیار ذرات را کمتر از ۱/۳ پیشنهاد نمود. در ارتباط با عدم تأثیر دیواره‌های کانال بر عمق آبشستگی Chiew و Melville (1987) عرض پایه را کمتر از ۱۰ درصد عرض فلوم توصیه نمودند. Raudkivi و Ettema (1983) نیز عنوان نمودند که عرض کانال آزمایشگاهی باید حداقل ۶/۲۵ برابر عرض پایه باشد. بنابراین بازه‌ای از فلوم به ضخامت ۱۰ سانتی‌متر و طول تقریبی ۳ متر با رسوبات غیرچسبنده به اندازه ۰/۵ میلی‌متر و انحراف معیار ۱/۱۸ پوشانده شد. پایه‌های استفاده شده دارای قطر (D) برابر ۲/۵ سانتی‌متر بوده که در سه گروه و چهار ردیف مختلف در فاصله‌ی ۲/۵ متری از ابتدای فلوم (برای اطمینان از توسعه یافتن جریان) قرار گرفتند. فاصله‌ی مرکز به مرکز گروه‌پایه‌ها از هم ۷/۴D و فاصله‌ی مرکز به مرکز ردیف‌ها از هم ۴D در نظر گرفته شد. در این تحقیق از طوقه‌هایی به اندازه W=۳D استفاده شد که دارای چهار درصد بازشدگی ۰ درصد (طوقه ساده)، ۳۰ درصد، ۵۰ درصد و ۷۰ درصد درصد بوده و در دو تراز ۰/۵D بالای بستر و روی بستر در اطراف گروه‌پایه وسط، مورد آزمایش قرار گرفتند. شکل (۱) تصویر طوقه‌های استفاده شده و مدل آزمایشگاهی را نشان می‌دهد.

سرعت بحرانی

سرعت بحرانی سرعتی است که طی آن ذرات بستر شروع به حرکت نموده و آبشستگی در حالت بستر متحرک اتفاق خواهد افتاد. بنا به نظر Melville و Chiew (1999) برای انجام آزمایش‌ها در شرایط آب زلال، سرعت متوسط جریان باید در محدوده $V<V_c$ $>0/3Vc$ باشد. بنابراین سرعت بحرانی (سرعت آستانه حرکت)، ذرات بر اساس روش آستانه حرکت رسوبات محاسبه شد.

بدین منظور آزمایشی بدون حضور پایه‌ها با دبی ۲۲ لیتر بر ثانیه انجام شد که طی آن اعماق مختلفی از ۳۰ تا ۱۰ سانتی‌متر مورد

آزمایش قرار گرفت و در هر عمق به مشاهده‌ی حرکت یا عدم حرکت رسوبات پرداخته شد. طی این آزمایش ملاحظه شد که ذرات در عمق ۱۱/۵ سانتی‌متر شروع به حرکت کردند، بنابراین با توجه به مشخص بودن دبی و عرض کانال آزمایشگاهی، سرعت آستانه‌ی حرکت رسوبات ۰/۲۶ متر بر ثانیه بدست آمد. هم‌چنین طبق توصیه‌ی Oliveto و Hager (2002) به منظور جلوگیری از اثر زبری بر میزان آبشستگی، عمق جریان باید بیشتر از ۲۰ میلی‌متر باشد ؛ در نهایت به منظور بررسی آبشستگی در شرایط جریان زلال سرعت ۰/۲ متر بر ثانیه و عمق ۱۵ سانتی‌متر برای انجام آزمایش‌ها انتخاب شد.

شرایط هیدرولیکی و روش انجام آزمایش‌ها

برای انجام هر آزمایش ابتدا سطح بستر توسط ماله تسطیح شده و برای اطمینان از تراز شدن رسوبات از تراز حبابی و در اطراف پایه‌ها از متر لیزری استفاده شد. سپس دریچه کشویی انتهای فلوم کاملاً بالا آورده شده و جریان آب با دبی بسیار پایینی وارد فلوم شد تا از تشکیل فرم بستر جلوگیری به عمل آید؛ پس از گذشت چند دقیقه دبی به تدریج تا مقدار مورد نظر افزوده شده و دریچه روی عمق ثابت ۱۵ سانتی‌متر تنظیم شد. در پایان آزمایش نیز پمپ را خاموش نموده و پس از گذشت چند ساعت و تخلیه‌ی کامل آب درون فلوم، توپوگرافی بستر در اطراف پایه‌ها به وسیله‌ی متر لیزری برداشت شد. جدول (۱) شرایط هیدرولیکی آزمایش‌ها را نشان می‌دهد.

نتایج و بحث

زمان تعادل آبشستگی

پدیده آبشستگی فرآیندی وابسته به زمان بوده و با گذشت زمان بر عمق آن افزوده شده تا جایی که روند آن بسیار کند و یا متوقف شود. زمان تعادل زمانی است که حفره‌ی آبشستگی به قدری عمیق شود که گردابه‌های درون حفره‌ی آبشستگی توانایی انتقال رسوبات به خارج از حفره را نداشته و انرژی آن‌ها توسط حجم آب درون حفره‌ی آبشستگی مستهلک شود. عمق نظیر زمان تعادل را عمق تعادلی آبشستگی می‌گویند. برای تعیین زمان آزمایش‌ها، آزمایشی به مدت پنج ساعت با دبی ۲۲ لیتر بر ثانیه بدون حضور طوقه‌ها انجام شده و تغییرات عمق آبشستگی در طول زمان ثبت شد. همان‌طور که در شکل (۲) نشان داده شده است آبشستگی در ابتدا دارای سرعت بیشتری بوده و بخش زیادی از آن در ساعت اول اتفاق افتاد، سپس از سرعت آن کاسته شده به طوری که بیش از ۹۰ درصد آبشستگی در پایان ساعت سوم رخ داده بود. محققین مختلف زمان تعادل آبشستگی را از یک روز مثل Shojaei et el (2011) و گاهی تا چندین روز مثل Karimaee-Tabarestani و Zarrati (2012) در نظر گرفته‌اند؛ ولی از آنجا که هدف این تحقیق بررسی تأثیر طوقه بر میزان آبشستگی می‌باشد، لزومی ندارد آزمایش‌ها در شرایط زمان تعادل انجام شود و بنابراین مدت زمان آزمایش‌ها، چهار ساعت در نظر گرفته شد.

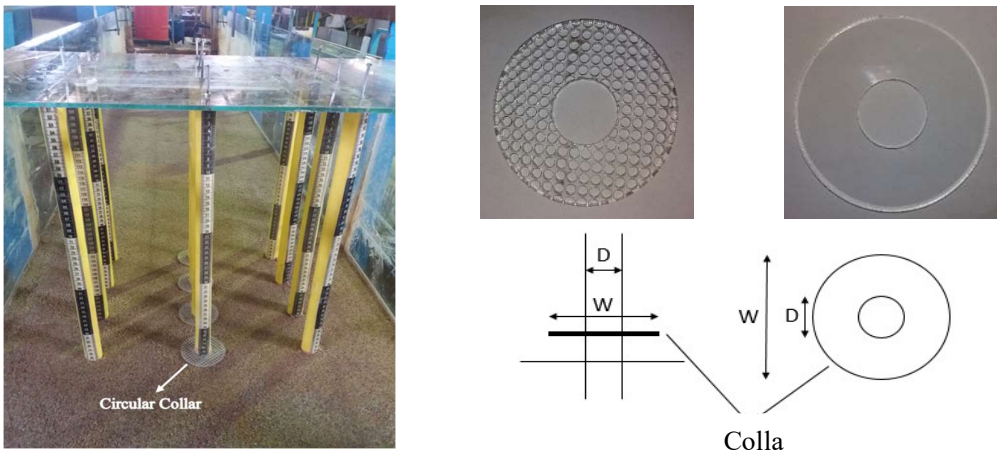


Fig. 1- (a) Laboratory model with the presence of collars: (a) Above: Simple and 50% netted collars; (b) Bottom: Schematic of the placement of the collar on the pier

شکل ۱- (a) مدل آزمایشگاهی با حضور طوقه‌ها. (b) بالا: طوقه‌های ساده و ۵۰ درصد مشبک، پایین: شماتیک قرارگیری طوقه بر روی پایه

جدول ۱- شرایط هیدرولیکی حاکم بر آزمایش‌ها

Table 1- Hydraulic conditions of the experiments

Re	Y (m)	Fr	V/V_C	V_C (m/s)	V (m/s)	Q (l/s)
30000	0/15	0/16	0/77	0/26	0/2	22

DOI: 10.22055/jise.2018.25526.1756

آزمایش بدون حضور طوقه

پیش از شروع آزمایش‌ها ابتدا یک آزمایش بدون حضور طوقه‌ها (آزمایش شاهد) به منظور تعیین حداکثر عمق آبشستگی و بررسی روند آن و هم‌چنین تعیین کارایی طوقه‌ها در کاهش آبشستگی انجام شد. طی این آزمایش مشاهده شد که گردابه‌های نعل اسبی از ابتدا با سرعت زیادی وارد عمل شده و باعث حفر حفره‌ی آبشستگی در اطراف پایه‌ها شدند. با گذشت مدت کمی از آغاز آزمایش گردابه‌های برخاستگی نیز تشکیل شده و با شستن رسوبات اطراف پایه‌ها، آن‌ها را به سمت پایین‌دست انتقال دادند. به طور کلی آبشستگی در ساعت اول با سرعت زیادی انجام شد اما با گذشت زمان از سرعت آن کاسته شده تا جایی که تغییرات عمق آبشستگی عملاً ناچیز شد. توپوگرافی بستر پس از آزمایش فوق در شکل (۳) نشان داده شده است (به منظور نمایش بهتر حفره‌های آبشستگی تنها شکل گروه‌پایه وسط رسم شده است).

آزمایش‌های با حضور طوقه

این آزمایش‌ها به‌منظور بررسی تأثیر طوقه بر کاهش میزان آبشستگی انجام شد. واضح است که تأثیر طوقه در تراز روی بستر بیشتر از ترازهای بالای بستر می‌باشد، اما به‌دلیل اینکه گاهی امکان نصب طوقه روی بستر امکان پذیر نبوده و یا به مرور زمان رسوبات زیر طوقه شسته می‌شوند، لازم است تأثیر طوقه در تراز بالای بستر نیز بررسی شود (Alem, 2012). بنابراین به ازای هر طوقه دو آزمایش در تراز ۰/۵D بالای بستر و تراز روی بستر و در مجموع هشت آزمایش (بدون احتساب آزمایش شاهد) انجام و نتایج با آزمایش شاهد مقایسه شد.

طوقه ساده

طوقه ساده در تراز روی بستر، مانع از برخورد جریان به سطح بستر شد؛ با این حال بخشی از جریان به زیر طوقه نفوذ نموده و آبشستگی در این حالت ۸۱ درصد کاهش یافت. در آزمایش با حضور طوقه در تراز ۰/۵D، گرچه گردابه‌ها همچنان در فضای زیر طوقه عمل نموده و کاهش عمق آبشستگی در پایه اول دیده نشد، اما توسعه‌ی طولی حفره‌ی آبشستگی کمتر از آزمایش شاهد بود. رسوبات شسته شده از اطراف این پایه، در اطراف پایه‌های پشتی به ویژه‌ی پایه‌ی دوم انباشته شده و آبشستگی کمی در این قسمت‌ها مشاهده شد (شکل ۴).

طوقه ۳۰ درصد مشبک

در آزمایش با حضور طوقه در تراز ۰/۵D بالای بستر جریان لایه مرزی اطراف طوقه به میزان بیشتری توسعه یافته و عمق آبشستگی۵۸ درصد کاهش یافت. در این آزمایش توسعه‌ی طولی آبشستگی نیز تا حد زیادی کمتر از آزمایش شاهد بوده و آبشستگی ناچیزی در پایه‌های بعدی مشاهده شد.

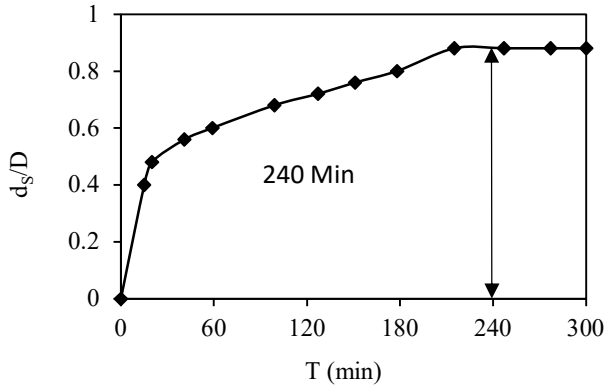


Fig. 2- Time development curve of the scour hole in the absence of collars
شکل ۲- منحنی توسعه زمانی حفره آبشستگی در شرایط بدون حضور طوقه‌ها

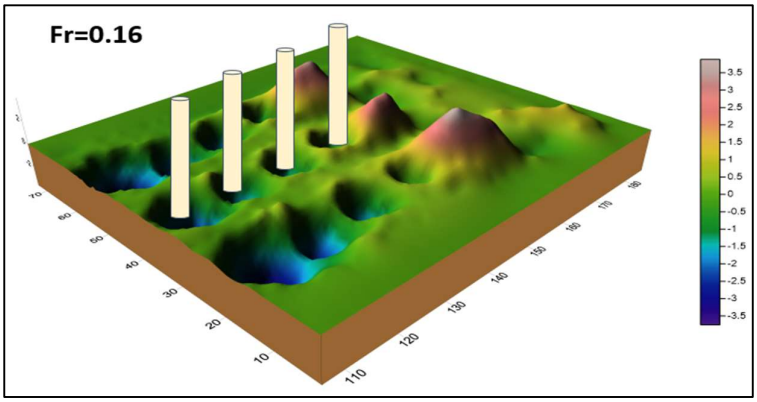


Fig. 3- Bed topography after the control test (axes are in centimeters)
شکل ۳- توپوگرافی بستر پس از آزمایش شاهد (محورها بر حسب سانتی‌متر است)

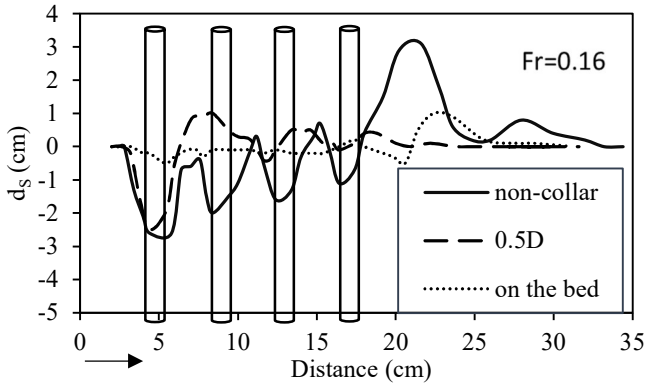


Fig. 4- Longitudinal scour profile of the middle pile group with the presence of simple collars at different levels, compared to the control test
شکل ٤- پروفیل طولی آبشستگی گروه‌پایه وسط با حضور طوقه‌های ساده در ترازهای مختلف و مقایسه‌ی آن با آزمایش شاهد

طوقه در تراز روی بستر توانست به‌طور کامل آبشستگی پایه اول را کنترل نماید؛ با این وجود دو چاله آبشستگی کوچک در اثر عملکرد گردابه‌های برخاستگی در پشت طوقه ایجاد شده که این چاله‌ها در تمام آزمایش‌های با حضور طوقه روی بستر مشاهده شد و حداکثر عمق آبشستگی در تراز روی بستر نیز در این مکان‌ها اتفاق افتاد. توپوگرافی بستر پس از آزمایش‌های فوق در شکل (۵) و پروفیل طولی آبشستگی در این آزمایش‌ها نسبت به حالت شاهد در شکل (۶) نشان داده شده است.

طوقه ۵۰ درصد مشبک

در آزمایش با حضور طوقه در تراز ۰/۵D بالای بستر گردابه‌ها همچنان در زیر طوقه عمل نموده و طوقه نتوانست عمق آبشستگی پایه اول را کاهش دهد. در این حالت نیز توسعه‌ی طولی آبشستگی کمتر از آزمایش شاهد بود. برای پایه‌ی دوم به‌دلیل انباشته شدن رسوبات شسته شده از اطراف پایه اول در اطراف این پایه، به میزان زیادی از وقوع آبشستگی پیشگیری به‌عمل آمد و تنها آبشستگی کمی در پشت پایه رخ داد. در پایه‌های سوم و چهارم نیز آبشستگی کمی مشاهده شد. در تراز روی بستر طوقه ۵۰ درصد مشبک با ممانعت از برخورد جریان به سطح بستر عمق آبشستگی را تا حد زیادی کاهش داد ولی راندمان آن از دیگر طوقه‌ها در این تراز کمتر بود. پروفیل طولی آبشستگی با حضور طوقه ۵۰ درصد مشبک نسبت به آزمایش شاهد در شکل (۷) رسم شده است.

طوقه ۷۰ درصد مشبک

در تراز ۰/۵D طوقه توانست ۱۵ درصد عمق آبشستگی پایه اول را کاهش دهد. هم‌چنین طوقه وسعت حفره‌ی آبشستگی را تا حدودی کاهش داد. تأثیر طوقه بر پایه‌های بعدی به مراتب بیشتر از پایه اول بوده و آبشستگی کمی در اطراف این پایه‌ها مشاهده شد. در تراز روی بستر طوقه تا حد زیادی مانع از نفوذ جریان به زیر آن شده و ۸۵ درصد آبشستگی پایه اول را کاهش داد (شکل ۸ – الف). پروفیل طولی آبشستگی پس از آزمایش‌های فوق در مقایسه با حالت شاهد در شکل (۸ – ب) رسم شده است. درصد کاهش آبشستگی پایه اول در آزمایش با حضور طوقه‌های مختلف در مقایسه با آزمایش شاهد نیز در جدول (۲) آورده شده است.

DOI: 10.22055/jise.2018.25526.1756



(a) **(b)**

Fig. 5- Bed topography after experiment with the presence of 30% netted collars at (a) on the bed (b) 0.5*D* above the bed

شکل ۵- توپوگرافی بستر پس از آزمایش با حضور طوقه‌های ۳۰ درصد مشبک در تراز (a) روی بستر (b) ۰/۵D بالای بستر

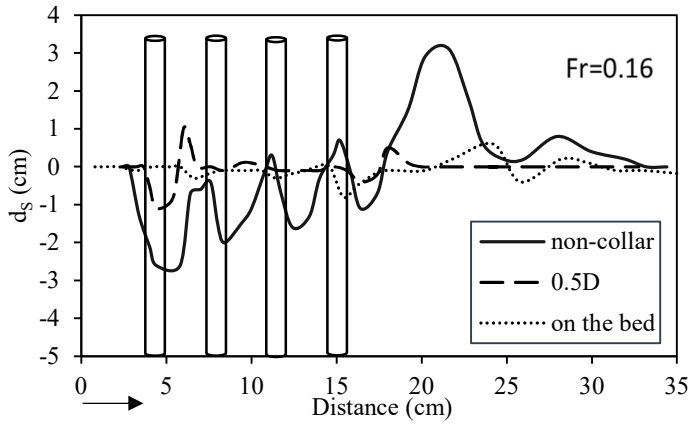


Fig. 6- Longitudinal scour profile of the middle pile group with the presence of 30% netted collars at different levels compared to the control test

شکل ٦- پروفیل طولی آبشستگی گروه‌پایه وسط با حضور طوقه‌های ۳۰ درصد مشبک در ترازهای مختلف و مقایسه‌ی آن با آزمایش شاهد

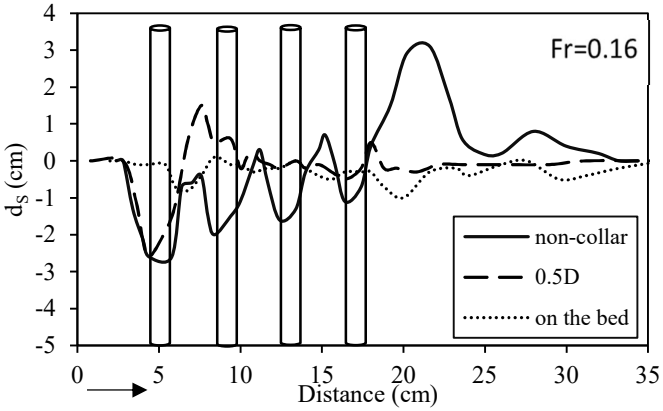
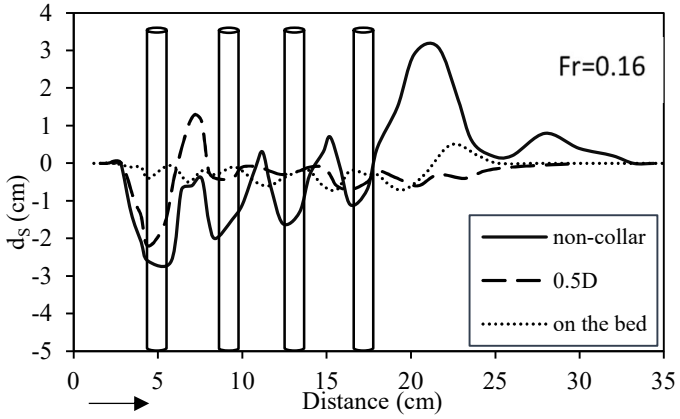


Fig. 7- Longitudinal scour profile of the middle pile group with the presence of 50% netted collars at different levels compared to the control test

شکل ۷- پروفیل طولی آبشستگی گروه‌پایه وسط با حضور طوقه‌های ۵۰ درصد مشبک در ترازهای مختلف و مقایسه‌ی آن با آزمایش شاهد



(a)



(b)

Fig. 8- (a) Longitudinal scour profile of the middle pile group with the presence of 70% netted collars at different levels compared to the control test; (b) bed topography after the experiment with 70% netted collars at the bed level

شکل ۸- (a) پروفیل طولی آبشستگی گروه‌پایه وسط با حضور طوقه‌های ۷۰ درصد مشبک در ترازهای مختلف و مقایسه‌ی آن با آزمایش شاهد (b) توپوگرافی بستر پس از آزمایش با حضور طوقه‌های ۷۰ درصد مشبک در تراز روی بستر

جدول ۲- درصد کاهش عمق آبشستگی پایه اول به ازای ترازهای مختلف کارگذاری طوقه در مقایسه با آزمایش شاهد

Table 2- Percentage reduction in scour depth around the first pier for different collar placement levels compared to the control test

Placement levels	Percent reduction in scouring			
	Percentage of collar opening			
	0	30	50	70
0.5*D* above the bed	4	58	0	15
On the bed	81	100	73	85

تأثیر درصد بازشدگی طوقه بر میزان آبشستگی

تراز ۰/۵D بالای بستر

طوقه ۳۰ درصد مشبک با توسعه‌ی لایه مرزی اطراف توانست ۵۸ درصد عمق آبشستگی اولین پایه را کاهش دهد. کمترین وسعت حفره آبشستگی نیز مربوط به این آزمایش بود؛ این طوقه هم‌چنین آبشستگی پایه‌های بعدی را تا حد زیادی کاهش داد. طوقه ساده و ۵۰ درصد مشبک در این تراز به دلیل عملکرد گردابه‌ها در فضای در زیر طوقه و همچنین عبور جریان از منافذ طوقه ۵۰ درصد مشبک، تأثیر چندانی بر کاهش عمق آبشستگی پایه اول نداشتند؛ اما وسعت حفره آبشستگی را تا حدودی از کاهش دادند. طوقه ۷۰ درصد مشبک نیز توانست ۱۵ درصد عمق آبشستگی را کاهش دهد. به طور کلی تأثیر طوقه بر کاهش آبشستگی پایه‌های پشتی به دلیل گردابه‌های ضعیف‌تر در وجه بالادست آن‌ها و همچنین پوشش قسمت زیادی از فضای بین پایه‌ها توسط طوقه‌ها، بیشتر از تأثیر آن بر پایه‌ی جلویی بود. مقایسه‌ی درصد کاهش آبشستگی پایه‌های گروه‌پایه وسط در آزمایش با حضور طوقه‌های مختلف در تراز ۰/۵D بالای بستر، در شکل (۹) نشان داده شده است.

تراز روی بستر

در تراز روی بستر تمام طوقه‌ها با ممانعت از برخورد جریان به سطح بستر از راندمان بالایی برخوردار بودند. در اثر عملکرد گردابه‌های برخاستگی در دو طرف پایه، دو گودال فرسایشی کوچک در پشت طوقه‌ها ایجاد شد که حداکثر عمق آبشستگی در این نقطه‌ها اتفاق افتاد. به طور کلی طوقه ۳۰ درصد مشبک با کارایی ۱۰۰ درصد بیشترین تأثیر را بر کاهش عمق آبشستگی پایه اول دارا بود. پس از آن طوقه‌های ۷۰ درصد مشبک، ساده و ۵۰ درصد مشبک به ترتیب با ۸۵، ۸۱ و ۷۳ درصد کارایی توانستند آبشستگی را تا حد بسیار زیادی کنترل نمایند. طوقه‌ها برای پایه‌های بعدی نیز از کارایی بالایی برخوردار بودند؛ در این تراز، تنها حضور طوقه تا حد زیادی از برخورد گردابه‌ها به سطح بستر محافظت نموده و بازشدگی طوقه، تأثیر چندان زیادی بر میزان آبشستگی پایه‌های پشتی نداشت. مقایسه‌ی درصد کاهش آبشستگی پایه‌های گروه‌پایه وسط در آزمایش با حضور طوقه‌های مختلف در تراز روی بستر، در شکل (۱۰) رسم شده است.

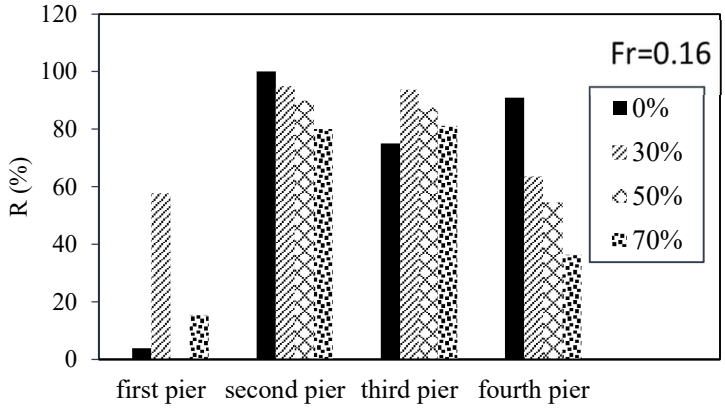


Fig. 9- The percentage reduction in scour depth with the presence of collars with different opening percentages at the 0.5*D* level (the column for the collar that did not reduce scour is not included)

شکل ۹- درصد کاهش آبشستگی با حضور طوقه‌ها با درصدهای بازشدگی مختلف در تراز ۰/۵D (ستون مربوط به طوقه‌ای که آبشستگی را کاهش نداد، رسم نشده است)

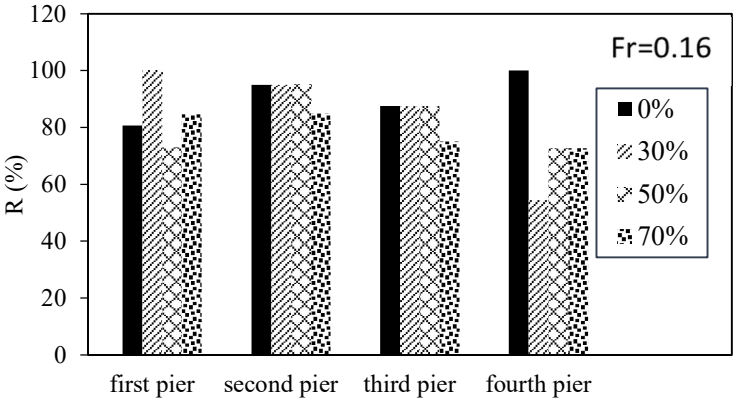


Fig. 10- The percentage reduction in scour with the presence of collars with different opening percentages at the bed level

شکل ۱۰- درصد کاهش آبشستگی با حضور طوقه‌ها با درصدهای بازشدگی مختلف در تراز روی بستر

مقایسه نتایج تحقیق با یافته‌های پیشین

به‌دلیل اینکه مطالعه‌های پیشین در ارتباط با به‌کارگیری طوقه مشبک محدود به تک‌پایه می‌باشد، بنابراین مقایسه نتایج تحقیق با تحقیقات پیشین بر روی گروه‌پایه با طوقه ساده و تک‌پایه با طوقه مشبک انجام شد. Heidarpour et el. (2010) با کارگذاری طوقه ساده روی بستر اطراف گروه‌پایه استوانه‌ای با فاصله‌ی ۳D بین پایه‌ها (D قطر پایه)، آبشستگی پایه اول تا سوم را به‌ترتیب ۰، ۱۹ و ۴۵ درصدکاهش دادند. ایشان مشاهده نمودند که با افزایش فاصله‌ی بین پایه‌ها به ۴D به دلیل کاهش اثر تقویت کنندگی پایه عقبی بر روی پایه جلویی، کارایی کاهش آبشستگی این پایه به هفت درصد افزایش یافت؛ اما برای پایه‌های دوم و سوم به دلیل کاهش اثر محافظت کنندگی پایه جلویی روی آن‌ها آبشستگی این پایه‌ها به‌ترتیب ۱۷ و شش درصد کاهش یافت. در حالی که در این پژوهش آبشستگی پایه‌های اول تا چهارم در حضورطوقه ساده به ترتیب ۸۱، ۹۵، ۸۷ و ۱۰۰ درصد کاهش یافت. Jalili (2013) با بکارگیری طوقه ۳۰ درصد مشبک در تراز ۰/۲۵D بالای بستر اطراف پایه استوانه‌ای در عدد فرود ۰/۱۶، ۵۰ درصد عمق آبشستگی را کاهش داد. Hemmati et el. (2016) نیز با به‌کارگیری طوقه ۳۰ درصد مشبک به اندازه ۳D در ترازهای ۰/۱D، ۰/۵D و D زیر بستر و عدد فرود ۰/۳ توانستند عمق آبشستگی را به‌ترتیب ۸۰، ۶۲ و ۴۰ درصد کاهش دهند. در حالی که در پژوهش حاضر قرارگیری طوقه ۳۰ درصد مشبک در تراز ۰/۵D بالای بستر و روی بستر به‌ترتیب ۵۸ و ۱۰۰ درصد عمق آبشستگی را کاهش داد.

نتیجه‌گیری

هدف از این تحقیق بررسی تأثیر طوقه‌های مشبک بر عمق آبشستگی گروه پایه‌های استوانه‌ای پل می‌باشد. بدین منظور طوقه‌های ۰، ۳۰، ۵۰ و ۷۰ درصد مشبک را در ترازهای ۰/۵D بالای بستر و روی بستر قرار داده و درصد کاهش عمق آبشستگی نسبت به آزمایش بدون طوقه بررسی شد. نتایج نشان داد در تراز روی بستر تمام طوقه‌ها با ممانعت از برخورد جریان به سطح بستر از کارایی بالایی برخوردار بودند؛ در این تراز طوقه ۳۰ درصد مشبک توانست آبشستگی را در نزدیک پایه اول به طور کامل کنترل نماید. در تراز ۰/۵D بالای بستر نیز طوقه ۳۰ درصد مشبک با آشفته نمودن جریان لایه مرزی توانست ۵۸ درصد آبشستگی را کاهش دهد. به طور کلی با کاهش تراز طوقه بر کارایی آن افزوده شد و طوقه ۳۰ درصد مشبک بیشترین تأثیر را بر کاهش عمق آبشستگی دارا بود.

تقدیر و تشکر

از مسئولین آزمایشگاه هیدرولیک دانشگاه شهید چمران اهواز که نهایت همکاری را برای انجام این تحقیق ابراز داشتند، تشکر و قدردانی می‌شود.

تضاد منافع نویسندگان

نویسندگان این مقاله اعلام می‌دارند که هیچ گونه تضاد منافعی در خصوص نگارش و انتشار مطالب و نتایج این پژوهش ندارند.

منابع مالی

حمایت‌های مالی این تحقیق از محل اعتبار پژوهشی شماره پژوهانه SCU.WH.1397.86 صورت گرفته است. بدینوسیله از حمایت معاونت محترم پژوهشی دانشگاه شهید چمران اهواز تقدیر می‌شود.

دسترسی به داده‌ها

همه اطلاعات و نتایج در متن مقاله ارائه شده است.

مشارکت نویسندگان

نویسنده اول: نسرین بهرامی، انجام آزمایش‌ها، نگارش مقاله، تجزیه و تحلیل داده‌ها، رسم نمودارها- سهم مشارکت: ۵۰ درصد
نویسنده دوم: مهدی قمشی، بررسی و تحلیل نتایج، بازنگری و ویرایش مقاله- سهم مشارکت: ۵۰ درصد

References

1- Alem, Z., 2012. *Effect of netted collar on the scour of bridge abutment*. M.S.C. Thesis. Faculty of Water Science Engineering, Shahid Chamran University of Ahvaz. (In Persian).

2- Breusers, H. and Raudkivi, A., 1991. *Scouring. Hydraulic design considerations*. Balkema, Rotterdam, the Netherlands.

3- Chiew, Y. and Melville, B., 1987. Local scour around bridge piers. *Hydraulic Research, 25(1), pp.*15-26. https://doi.org 10.1080/00221688709499285.

4- Hannah, C., 1978. *Scour at Pile Groups*. Research Rep. No. 28-3.

5- Heidarpour, M., Afzalimehr, H and Izadinia, E., 2010. Reduction of local scour around bridge pier groups using collars. *International Journal of Sediment Research, 25(4)*, pp.411-422. https://doi.org/10.1016/S1001-6279(11)60008-5.

6- Hemmati, M., Gholizadeh., N. and Dolatkhah, S., 2016. Experimental Investigation of the Effect of Diameter and Placement Level of Lattice Collars on Scour Reduction around Bridge Pier. *Irrigation Science and Engineering*, *39(4)*, pp.111-122. https://doi.org/10.22055/JISE.2016.12500 (In Persian).

7- Hoffmans, G. and Verheij, H., 1997. *Scour Manual,* vol. 96. CRC Press.

8- Jalili, A., 2013. Effect of using netted collar on bridge piers scouring. M.S.C. Thesis. Faculty of Water Science Engineering, *Shahid Chamran University of Ahvaz*. (In Persian).

9- Karimaee-Tabarestani, M. and Zarrati, A.R., 2012. Effect of collar on time development and extent of scour hole around cylindrical bridge piers. *International Journal of Engineering (IJE)*, 25(1), pp.11-17. https://doi.org/10.5829/idosi.ije.2012.25.01c.02.

10- Khademi, Kh., 2012. Investigation of the effect of longitudinal and lateral space of submerged vanes on local scour in abutment of bridge. P.H.D. Thesis. Faculty of Water Sciences Engineering, *Shahid Chamran University of Ahvaz*. (In Persian).

11- Khozeymehnezhad, H., Ghomshi, M. and Shafai Bajestan, M., 2014. Comparison of Symmetrical and Unsymmetrical Rectangular Collars on Reduction of Local Scour at Bridge Abutment. *Irrigation Sciences and Engineering, 37(2)*, pp.1-12. https://dor.isc.ac/dor/20.1001.1.25885952.1393.37.2.1.1 .(In Persian).

12- Melville, B. and Sutherland, A., 1988. Design method for local scour at bridge piers. *Hydraulic Engineering,* 114(10), pp.1210-1226. https://doi.org/10.1061/(ASCE)0733-9429(1988)114:10(1210).

13- Melville, B., 1992. Local scour at bridge abutments. *Hydraulic Engineering,* 118**,** 615-631. https://doi.org/10.1061/(ASCE)0733-9429(1992)118:4(615).

14- Melville, B. W. and Chiew, Y.-M., 1999. Time scale for local scour at bridge piers. *Hydraulic Engineering,* 125(1)**,** pp.59-65. https://doi.org/10.1061/(ASCE)0733-9429(1999)125:1(59).

15- Oliveto, G. and Hager, W. H., 2002. Temporal evolution of clear-water pier and abutment scour. *Hydraulic Engineering,* 128**,** 811-820. https://doi.org/10.1061/(ASCE)0733-9429(2002)128:9(811).

16- Raudkivi, A. J. and Ettema, R., 1983. Clear-water scour at cylindrical piers. *Hydraulic Engineering*, 109(3), pp.338-350. https://doi.org/10.1061/(ASCE)0733-9429(1983)109:3(338).

17- Shafai Bejestan, M., Khademi, Kh, and Kozeymehnezhad, H., 2015. Submerged vane-attached to the abutment as scour countermeasure. *Ain Shams Engineering Journal* 6(3), pp.775-783. https://doi.org/10.1016/j.asej.2015.02.006.

18- Shahsavari, H., Heidarpour, M. and Mohammadalizadeh, M., 2017. Simultaneous Effect of Collar and Roughness on Reducing and Controlling the Local Scour around Bridge Abutment. *Acta Universitatis Agriculturae et Silviculturae Mendelianae Brunensis,* 65(2)**,** pp.491-499. https://doi.org/10.11118/actaun201765020491.

19- Shojaei, P., Farsadizadeh, D. and Hoseinzadeh Dalir, A., 2011. Effects of Combined Submerged Vanes and Collar on the Scour Reduction around Cylindrical Bridge Piers**.** *Water and Soil Science***.** 15 (57), pp.23-33. https://dor.isc.ac/dor/20.1001.1.24763594.1390.15.57.3.5.

20- Singh, C., Setia, B. and Verma, D., 2001. Collar-sleeve combination as a scour protection device around a circular pier. *Proceedings of the Congress-International Association for Hydraulic Research*, pp. 202-209.

21- Zarrati, A. R., Nazariha, M. and Mashahir, M. B., 2006. Reduction of local scour in the vicinity of bridge pier groups using collars and riprap. *Hydraulic Engineering,* 132(2)**,** pp.154-162. https://doi.org/10.1061/(ASCE)0733-9429(2006)132:2(154).

Shahid Chamran University of Ahvaz

Irrigation Sciences and Engineering (JISE)
Vol. 48, No. 3, Fall 2025, p. 109-123

Research Paper

Journal homepage: https://jise.scu.ac.ir

EXTENDED ABSTRACT

Determining the proposed cropping pattern Major crops using the water, energy and food index (case study: Irrigation and Drainage Network of Varamin Plain)

E. Abiar[1] and M. Mashal[2*]

1- Graduated student of Water Engineering Department, Aburaihan Faculty of Agricultural Technology, University of Tehran, Tehran, Iran.
2- Corresponding Author, Associate Professor of Water Engineering Department, Aburaihan Faculty of Agricultural Technology, University of Tehran, Iran (mmashal@ut.ac.ir).*

ARTICLE INFO

Artlcle history:
Received: 27 July 2024
Revised: 10 November 2024
Accepted: 12 November 2024
Available online: 05 November 2025

Keywords:
Cultivation composition, WEF, productivity, Varamin irrigation and drainage network, Nexus.

TO CITE THIS ARTICLE:

Abiar, E., Mashal, M. 2025. 'Determining the proposed cropping pattern Major crops using the water, energy and food index (case study: Irrigation and Drainage Network of Varamin Plain)', *Irrigation Sciences and Engineering*, 48(3), pp. 109-123. doi: 10.22055/jise.2024.47552.2130

Abstract

With the increase in the world population, access to sufficient food, sufficient water and energy resources has become the most important global challenge and concern in recent decades. Providing sufficient food has caused significant pressure on water and energy resources. Agriculture, as the largest source of food production, is the most important consumer of water and energy, so a balance must be created between consumption and production. In this study, six indicators of water consumption, energy consumption, water mass productivity, energy productivity, water economic productivity, energy economic productivity and finally the Water, Energy, Food (WEF) index were used to determine the proposed cultivation pattern of five important agricultural crops of the Varamin irrigation network in the crop year (2020-2021). The results of data analysis showed that the calculated WEF for wheat, barley, alfalfa, silage corn and canola were 0.28, 0.32, 0.11, 0.87 and 0.33 respectively, with silage corn having the highest and alfalfa having the lowest index. Considering the overall WEF index, a cropping pattern was proposed for the crops of the Varamin irrigation network. Considering the proposed cropping pattern, the cultivated area of alfalfa, wheat and barley decreased and the cultivated area of canola and silage corn increased.

Introduction

With the increase in the world population, access to sufficient food, sufficient water and energy resources has become the most important global challenge and concern in recent decades. Providing sufficient food has caused significant pressure on water and energy resources. Agriculture, as the largest source of food production, is the most important consumer of water and energy, so a balance must be created between consumption and production. In this study, six indicators of water consumption, energy consumption, water mass productivity, energy productivity, water economic productivity, energy economic productivity and finally the Water, Energy, Food (WEF) index were used to determine the proposed cultivation pattern of five important agricultural crops of the Varamin irrigation network in the crop year (2020-2021). The results of data analysis showed that the calculated WEF for wheat, barley, alfalfa, silage corn and canola were 0.28, 0.32, 0.11, 0.87 and 0.33 respectively, with silage corn having the highest and alfalfa having the lowest index. Considering the overall WEF index, a cropping pattern was proposed for the crops of the

Varamin irrigation network. Considering the proposed cropping pattern, the cultivated area of alfalfa, wheat and barley decreased and the cultivated area of canola and silage corn increased.

Methodology

In this research, water consumption- Energy consumption indicator- Water mass productivity-Energy mass productivity- Water economic productivity and Energy economic productivity indicators were used for the mutual influence of resource consumption, productivity, and financial issues in agricultural activities to plan the cropping pattern. The study area is in Varamin City, limited to Peshwa and Pakdasht cities from the northeast, Qarchak city from the northwest, Ray city from the west, Qom province from the south, and Semnan province from the southeast and east. Varamin Plain has always been very popular for various reasons, such as suitable climate, fertile and suitable soil, proximity to the consumption market, and it is considered an important hub for agriculture in Tehran province. The Varamin Plain is located in the northern part of Iran and on the southern slopes of Alborz, which is located about 40 kilometers southeast of Tehran at 51 degrees and 40 minutes east longitude and between 35 degrees and 5 minutes and 35 degrees and 30 minutes north latitude. (Omran Gostar Maharab Consulting Engineers Company, 2014). In this study, the data of water requirement, cultivated area, yield of crops, and average cost of production of one hectare of crops by separating the different stages of cultivation, and selling price of crops from 2019 to 2020 were used. Available data were collected from the Ministry of Agricultural Jihad's system https://www.maj.ir, referring to the experts of the Regional Water Organization and Agricultural Jihad of Varamin City.

Results and Discussion

The main purpose of this study was to determine the proposed cropping pattern using WEF indices. In this research, all indicators of water, energy, and food were combined and calculated to create an integrated WEF nexus index. For this purpose, all the indices used in this study were normalized and converted into dimensionless indices using the Min-Max Normalization method. Then the mentioned indices were calculated and used to evaluate the WEF index. Then the WEF index was calculated for the studied crops in the Varamin irrigation network and its results are shown in Table (1). The values of this index, from the highest to the lowest, respectively, silage corn, canola, barley, wheat, and alfalfa with 0.87, 0.33, 0.32, 0.28, and 0.11. Compared to other studied crops, silage corn obtained the highest Water economic productivity, energy economic productivity, as well as Water mass productivity, and Energy mass productivity. The highest value of the WEF index for silage corn was equal to 0.87. on the other hand, alfalfa has the lowest WEF score due to high economic productivity and good performance per unit of water consumed, but due to high consumption of water and Energy. The results of this research showed that if the proposed cultivation model is implemented in the lands of Varamin irrigation network, the cultivated area of crops such as canola, which has low water consumption, will increase; and the area under cultivation for crops such as alfalfa, which require a lot of water, will decrease. As a result, the annual water consumption will decrease by 3.7%. The findings of this research also showed that if the model is implemented, energy consumption will decrease by 14.7%. Based on the proposed model, the economic efficiency of water will increase by 35% and the economic efficiency of energy will increase by 38.2% .

Table 1- The values of the WEF index and the normalized values of the different indices applied in the WEF nexus index for the agricultural products of the Varamin irrigation network

Indicators	Wheat	Barely	Alfalfa	Silage corn	canola
WC	0.88	1.00	0.00	0.75	0.97
EC	0.51	0.62	0.00	0.49	1.00
EMP	0.06	0.06	0.17	1.00	0.00
WMP	0.09	0.10	0.13	1.00	0.00
EE	0.02	0.03	0.18	1.00	0.00
WE	0.09	0.11	0.16	1.00	0.00
WEF	0.28	0.32	0.11	0.87	0.33

Conclusions

This research was carried out to investigate and to evaluate the Integrated Water, Energy and Food Index (WEFNI), in irrigation networks to increase the productivity and also to determine the proposed cropping pattern using WEFNI. The range of WEF changes in the studied crops was 0.87 (highest score) for silage corn and 0.11 (lowest score) for alfalfa. Alfalfa has the highest amount of water consumption and canola has the lowest amount. Due to the limited water resources, we should go towards the cultivation of crops that have the lowest annual water consumption. Silage corn and canola had the highest and lowest Water economic productivity index. Based on the proposed cropping pattern, the economic water productivity index increases by 35%. The results of this study showed that optimizing the allocation of agricultural land area improves the yield of farm products and leads to greater profitability, one of the most important patterns considered by agricultural officials, which is called sustainable agriculture.

Acknowledgements

It is necessary to express our gratitude to the Regional Agricultural and Water Jihad Organization of Varamin County, as well as to all those who have accompanied us on this path.

Conflict of Interest

The authors declared no potential conflicts of interest concerning the research, authorship, and publication of this article. Confirmation.

Funding

The authors received no financial support for the research, authorship, and publication of this article.

Data Availability Statements

Data Availability Statement: All information and results are presented in the text of the article.

Authors' contribution

First Author: Ershad Abiar, **(**Writing the article and Data analysis and analysis) 50%
Second Author: Mahmoud Mashal, **(**Reviewing the results and approving the content) 50 %

References

1- United Nations, Department of Economic and Social Affairs, Population Division (2015). World Population Prospects: The 2015 Revision, Volume I: Comprehensive Tables (ST/ESA/SER.A/379).

2- Maharab Omran Gostar Consulting Engineers Company, 2014. Report on the review and remediation studies of the irrigation and drainage network of the Varamin Plain.

© 2025 Shahid Chamran Universiry of Ahvaz, Ahvaz, Iran. This article is an open access article distributed under the terms and conditions of the Creative Commons Attribution 4.0 International (CC BY 4.0 license) (http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/).

علوم و مهندسی آبیاری جلد ٤٨، شماره‌ی۳، پاییز ١٤٠٤، مقاله پژوهشی، ص. ۱۲۳-۱۰۹

تعیین الگوی کشت پیشنهادی محصولات عمده زراعی با استفاده از شاخص آب، انرژی و غذا (مطالعه موردی: شبکه آبیاری دشت ورامین)

ارشاد آبیار[۱] و محمود مشعل[۲*]

۱-دانش آموخته کارشناسی ارشد مهندسی آب، دانشکده فناوری کشاورزی ابوریحان، دانشگاه تهران، تهران، ایران.
۲*- نویسنده مسئول، دانشیار گروه مهندسی آب، دانشکده فناوری کشاورزی ابوریحان ، دانشگاه تهران، ایران. (mmashal@ut.ac.ir)

دریافت: ۱۴۰۳/۰۵/۰۶ بازنگری: ۱۴۰۳/۰۸/۲۰ پذیرش: ۱۴۰۳/۰۸/۲۲ انتشار: ۱۴۰۴/۰۸/۱۴

چکیده

با افزایش جمعیت جهانی دسترسی به غذای کافی، آب کافی و منابع انرژی، به مهم‌ترین چالش و نگرانی جهانی در چند دهه أخیر تبدیل شده است. تأمین غذای کافی باعث فشار قابل توجهی بر منابع آب و انرژی شده است. کشاورزی به‌عنوان بزرگترین منبع تولید مواد غذایی مهم‌ترین مصرف‌کننده بخش آب و انرژی است، بنابراین باید تعادل و توازنی بین مصرف و تولید ایجاد شود. در این مطالعه از شش شاخص مصرف آب، مصرف انرژی، بهره‌وری جرمی آب، بهره‌وری انرژی، بهره‌وری اقتصادی آب، بهره‌وری اقتصادی انرژی و در نهایت شاخص آب، انرژی، غذا (WEF) برای تعیین الگوی کشت پیشنهادی پنج محصول مهم زراعی شبکه آبیاری ورامین در سال زراعی (۱۴۰۰-۱۳۹۹) استفاده شد. نتایج حاصل از تجزیه و تحلیل داده‌ها نشان داد که WEF محاسبه شده برای گندم، جو، یونجه، ذرت علوفه‌ای و کلزا به‌ترتیب ۰/۲۸، ۰/۳۲، ۰/۱۱، ۰/۸۷ و ۰/۳۳ بود که، ذرت علوفه‌ای بیشترین و یونجه کمترین میزان این شاخص را داشت. با توجه به شاخص کلی WEF یک الگوی کشت برای محصولات شبکه آبیاری ورامین پیشنهاد شد. با توجه به الگوی کشت پیشنهادی سطح زیر کشت محصولات یونجه، گندم و جو کاهش و سطح زیر کشت کلزا و ذرت علوفه‌ای افزایش یافت.

کلید واژه‌ها: ترکیب کشت، WEF، بهره‌وری، شبکه آبیاری و زهکشی ورامین، همبست.

مقدمه

روند افزایش روزافزون جمعیت و افزایش نیازهای غذایی باعث افزایش تقاضا برای مواد غذایی و محصولات کشاورزی شده است. طبق گزارش FAO، برای ارضای تقاضای رشد جمعیت تا سال ۲۰۵۰، بخش کشاورزی باید تولید خود را ۶۰ درصد افزایش دهد. این افزایش مستمر جمعیت با سایر تغییرات و دگرگونی‌ها ترکیب می‌شود و باعث می‌شود که مردم از روستاها به شهرها مهاجرت کنند، در نتیجه نیاز به غذا، آب و انرژی به‌طور چشم‌گیری افزایش می‌یابد. در حال حاظر نیمی از جمعیت جهان در شهرها زندگی می‌کنند و پیش‌بینی می‌شود تا سال ۲۰۳۰ به ۶۰ درصد برسد (United Nations, 2015). این موضوع فشار و حساسیت قابل توجهی بر سیستم‌های آب، انرژی و مواد غذایی موجود در بسیاری از نقاط جهان ایجاد کرده است (Zhang et al, 2019). غذا، آب و انرژی به هم مرتبط هستند و مدیریت یکی از آن‌ها را نمی‌توان به‌صورت مجزا در نظر گرفت، بلکه باید به‌عنوان بخشی از یک سیستم یکپارچه در نظر گرفته شود (Giampietro et al, 2013). طراحی الگوی کشت محصولات کشاورزی متناسب با نیاز، شرایط اقلیمی و الزامات جغرافیایی منطقه مورد مطالعه، ضمن مدنظر قرار دادن چالش کم آبی، علاوه بر افزایش بهره‌وری منابع پایه (خاک و آب)، می‌تواند در ساماندهی شرایط بازار محصولات کشاورزی نیز نقشی مؤثر ایفا کند. در همین راستا می‌توان گفت الگوی کشت به معنای تعیین نوع گیاه یا محصول مورد کاشت، متناسب با مؤلفه‌های تأثیرگذار در تولید آن محصول است. ازجمله مؤلفه‌های تأثیرگذار می‌توان به شرایط آب و هوایی، فیزیک و شیمیایی خاک، جغرافیا و تنش‌های زیستی و غیرزیستی اشاره کرد. علاوه بر آن موارد دیگری چون عوامل فرهنگی- اجتماعی، مؤلفه‌های اقتصادی، امنیت غذایی، تقاضا و بازار، اشتغال، دانش بوومی و... نیز در تعیین الگوی کشت مناسب منطقه، تعیین‌کننده هستند. هدف از تعیین الگوی کشت می‌تواند به‌کارگیری ظرفیت‌های طبیعی و غیرطبیعی هر منطقه، به نحوی مطلوب در فرآیند تولید محصولات کشاورزی برای ارتقاء عملکرد به شکلی پایدار است (Yousefi et al, 2018). در تحقیقی که توسط Hoseini و Delavar (2020) بر روی شبکه‌های آبیاری حوضه آبریز زاینده‌رود اصفهان انجام شد، با توجه به مصرف آب و انرژی، دو شاخص بهره‌وری آب و بهره‌وری انرژی پیشنهاد شده است. از شاخص ترکیبی همبست آب، غذا و انرژی و مدل ارزیابی و برنامه‌ریزی منابع آب (WEAP)، به‌منظور شبیه‌سازی شرایط تخصیص منابع و مصارف حوضه استفاده کردند و مصارف انرژی و الگوی کشت مورد تجزیه و تحلیل قرار گرفت. از نتایج به‌دست آمده در این تحقیق مشاهده می‌شود که با استفاده از شاخص همبست آب، غذا و انرژی، اولویت سناریوهای مدیریتی

برای هر یک از شبکه‌ها، در مقایسه با کاربرد هر یک از شاخص‌ها به‌طور جداگانه، تغییر کرده است. به‌عنوان نمونه در شبکه نکوآباد از نظر شاخص‌های بهره‌وری نسبی آب، کاهش ۲۰ درصد جریان تحویلی، و انسداد چاه‌ها، به‌عنوان سناریوهای برتر مدیریتی معرفی می‌شود. در حالی که از دیدگاه شاخص بهره‌وری انرژی اولویت سناریوها متمرکز بر انسداد چاه‌ها و مدیریت تقاضا می‌باشد. اما از دیدگاه شاخص ترکیبی و با لحاظ جنبه‌های مختلف مصرف آب، انرژی و بهره‌وری تولید، اولویت‌ها به کاهش ۲۰ و ۴۰ درصدی جریان تحویلی تغییر خواهد کرد. El-Gafy et al (2017) طی پژوهشی روشی برای تصمیم‌گیرندگان برای تجزیه و تحلیل همبست آب، غذا و انرژی سیستم تولید محصول و انجام یک ارزیابی کمی از آن ارائه کرد. از طریق روش پیشنهادی، شاخص‌هایی با در نظر گرفتن مصرف آب و انرژی، بهره‌وری جرمی و بهره‌وری اقتصادی پیشنهاد شد. بر اساس این شاخص‌ها، شاخص همبست آب، غذا و انرژی (WFENI) انجام شد. تجزیه و تحلیل همبست آب، غذا و انرژی ۴۲ محصول مصر در سال ۲۰۱۰ انجام شد. این مطالعه نشان داد که WFENI محاسبه شده در محصولات تابستانی مصر دارای امتیازهایی است که از ۰/۲۱ تا ۰/۷۹ متغیر است. شاخص WEFNI را می‌توان برای استراتژی‌های توسعه یافته برای الگوی کشت بهینه به کار برد که مصرف آب و انرژی را به حداقل می‌رساند و بهره‌وری آن‌ها را به حداکثر می‌رساند. در تحقیق دیگری که توسط Ghorbani et al (2020)، در شبکه‌های آبیاری قزوین انجام شد، از رویکرد دینامیک سیستم‌ها برای بررسی ساختارهای موجود بین منابع آب، انرژی و غذا استفاده و روابط علت و معلولی بین آن‌ها به‌صورت مدل مفهومی ارائه شد. نتایج حاصل از این تحقیق نشان داد که با استفاده از رویکرد پویایی سیستم‌ها، می‌توان مکانیزم‌های مؤثر در همبست آب، غذا و انرژی را از دید تولید محصول و مطلوبیت آن‌ها در سطح شبکه‌های آبیاری شناسایی و آن‌ها را مورد ارزیابی قرار داد. در یک مطالعه El-Gafy et al (2017) برای به‌دست آوردن سطح کشت بهینه محصولات در کشور یونان دو روش همبست و غیر همبست (Non-Nexus) را به‌کار برد. روش‌های همبست و غیرهمبست برای ارائه یک الگوی کشت بهینه که پارامترهای آب، انرژی و اقتصادی را در نظر می‌گیرد، مقایسه شد. بهینه سازی خطی برای مقایسه: ۱) رویکرد همبست با استفاده از یک تابع هدف برای به حداکثر رساندن شاخص همبست آب-غذا-انرژی استفاده شد و ۲) رویکرد غیر همبست با استفاده از سه تابع هدف برای استفاده از آب، مصرف انرژی و بازده خالص کشاورزی. با مقایسه دو روش به این نتیجه رسیدند که نتایج روش اول از آنجا که نگاهی سیستمی دارد، به مراتب بهتر از روش دوم شده است. در یک مطالعه‌ای که توسط Masaeli et al (2022) در حوضه رودخانه زاینده رود در استان اصفهان انجام شد، از ۱۱ شاخص مختلف برای در نظر گرفتن تأثیر متقابل مصرف منابع، بهره‌وری، مسائل اقتصادی و انتشار گازهای گلخانه‌ای به‌عنوان یکی از مهم‌ترین موضوعات در مورد توسعه پایدار کشاورزی اعمال شد. شاخص WEFG پیشنهادی برای بهینه‌سازی الگوی محصول مورد ارزیابی قرار گرفت. نتایج نشان داد که WEFG از ۰/۱۶۲تا ۰/۶۵۸ بود. الگوی کشت بهینه بر اساس WEFG منجر به کاهش ۱۱درصد در مصرف آب و انرژی، حتی با افزایش ۲/۳ درصد در سطح زیرکشت می‌شود. الگوی کشت بهینه بر اساس شاخص WEFG، انتشار گازهای گلخانه‌ای را تا دو درصد کاهش داده است که منجر به مدیریت کشاورزی پایدار می‌شود. بنابراین، شاخص پیوند WEFG ارائه شده می‌تواند یک معیار عملّی برای برنامه‌ریزی و مدیریت پایدار در بخش کشاورزی باشد. در پژوهش دیگر که Saray et al (2022) در شمال غرب ایران انجام دادند همبست آب، انرژی و غذا (WEF Nexus) و انتشار CO_2 برای ارائه پشتیبانی داده برای تصمیم گیرندگانی که استراتژی‌های ملّی را در پاسخ به تغییرات آب و هوایی تدوین می‌کنند، تجزیه و تحلیل کردند. در تجزیه و تحلیل، انرژی ورودی – خرجی در تولید هفت گونه زراعی را با استفاده از شش شاخص، مصرف آب و انرژی، بهره‌وری انبوه و بهره‌وری اقتصادی تعیین کردند. شاخص WEF Nexus که بر اساس این شاخص‌ها محاسبه می‌شود، بیشترین (بهترین) ارزش را برای ذرت سیلو و کمترین را برای سیب زمینی نشان داد. در پژوهشی که Latifzade et al (2010) بر روی شبکه آبیاری عقیلی-گتوند انجام شد، از تلفیق یک مدل بیوفیزیک (برآورد نیاز آبی) و یک مدل اقتصادی (برنامه‌ریزی خطی)، به‌منظور حداکثر نمودن سود، تخمین آب مورد نیاز در دوره‌های زمانی مختلف، بهینه کردن الگوی کشت و افزایش بهره‌وری مصرف آب استفاده شد. نتایج حاصل از این پژوهش نشان داد که الگوهای کشت موجود بهینه نبوده و همچنین با تغییر دادن درصد کشت گیاهان زراعی و افزایش ذخیره آب می‌توان زمین‌های دیم را به زمین فاریاب تبدیل کرد. کشاورزی بیشترین سهم را در مصرف آب دارد، بنابراین با افزایش جمعیت جهان و نیاز بیشتر به غذا، افزایش تقاضا و قیمت آب در آینده، افزایش مصرف انرژی و ارزش گذاری واقعیت قیمت انرژی و اهمیت و ضرورت افزایش بهره‌وری از طریق مدیریت مناسب سه عامل آب، انرژی و غذا به‌صورت هم‌زمان ضرورت انجام این مطالعه را بیان می‌کند. کمبود این منابع باعث به وجود آمدن بی‌ثباتی‌های اجتماعی و سیاسی، درگیری جغرافیای سیاسی و هچنین آسیب‌های جبران ناپذیر محیط‌زیستی شود. بنابراین با سیاست‌های مدیریتی در شبکه‌های آبیاری باید به سمت کشت محصولاتی رفت که تعادل میان بخش‌های مختلف همبست را برقرار سازد.

علیرغم کارهای محدودی که در مورد همبست روی شبکه‌های آبیاری و زهکشی انجام شده است می‌توان به تعیین الگوی کشت با هدف دستیابی به منافع اقتصادی، اجتماعی و حفظ محیط زیست با به حداقل رساندن مصرف آب و انرژی به‌عنوان نوآوری این تحقیق اشاره کرد و این کار در تحقیقات قبلی دیده نمی‌شود. از آنجایی که فلوچارت رویکرد پیشنهادی این مطالعه کلی است، می‌توان آن را به تمام شبکه‌های آبیاری و زهکشی تعمیم داد.

 DOI: 10.22055/jise.2024.47552.2130

مواد و روش‌ها

منطقه مورد مطالعه

شهرستان ورامین با مساحت ۲۴۳۱ کیلومتر مربع و جمعیت ۴۶۸۳۴۹ نفر یکی از شهرستان‌های استان تهران است. دشت ورامین در ۴۰ کیلومتری جنوب شرقی تهران و در حاشیه شمال غربی کویر مرکزی و بین طول جغرافیایی۵۱ درجه و ۳۰ دقیقه تا ۵۱ درجه و ۴۵ دقیقه و عرض جغرافیایی ۳۵ درجه و ۱۰ دقیقه تا ۳۵ درجه و ۳۰ دقیقه واقع شده است. کل تولیدات زراعی و باغی دشت ورامین حدود ۵۰۰ هزار تن در سال است که نقش مهمی در تأمین امنیت غذایی ایران به ویژه استان تهران دارد. داده‌ها از سامانه وزارت جهاد کشاورزی (https://www.maj.ir) گردآوری شد. میانگین بارندگی سالانه دشت ورامین معادل ۱۷۲ میلی‌متر و تبخیر آن معادل ۲۴۳۹ میلی‌متر در سال است (Valivand and Katibeh, 2022). دشت ورامین از دیرباز به‌دلایل مختلفی از جمله آب و هوای مناسب، خاک حاصلخیز و مناسب و نزدیکی به بازار مصرف همواره بسیار مورد توجه بوده و قطب مهمی برای کشاورزی استان تهران به شمار می‌رود. شکل (۱) نقشه موقعیت شهر تهران و منطقه مطالعاتی شهرستان ورامین را نشان می‌دهد. وسعت اراضی خالص تحت آبیاری این شبکه حدود ۵۰۰۰۰ هکتار است که نیاز آبی سالانه آن حدود ۶۰۰ میلیون متر مکعب برآورده شده است. آمارها نشان می‌دهد پس از اجرای آن، این شبکه حدود ۶۰ تا ۶۵ هزار هکتار از اراضی دشت را زیر کشت برده است (Maharab Omran Gostar Consulting Engineers Company, 2014).

بازه زمانی مورد مطالعه و داده‌ها

در این مطالعه از داده‌های نیاز آبی، سطح زیر کشت، عملکرد محصولات، متوسط هزینه تولید یک هکتار محصولات کشاورزی پنج محصول: گندم، جو، یونجه، ذرت علوفه‌ای و کلزا به تفکیک مراحل مختلف کشت واحد و قیمت فروش محصولات در بازه زمانی ۱۳۹۹-۱۴۰۰ استفاده شد. با توجه به اینکه این پنج محصول ۶۵ درصد از اراضی تحت کشت را به خود اختصاص داده‌اند و محصولات مهم استراتژیک غذایی برای انسان و دام هستند و همچنین برای مصارف داخلی دارای اهمیت فراوانی است از دلایل انتخاب محصولات برای مطالعه بوده است. داده‌های موجود از سامانه وزارت جهاد کشاورزی https://www.maj.ir، مراجعه به کارشناسان سازمان آب منطقه‌ای و جهاد کشاورزی شهرستان ورامین جمع‌آوری شد.

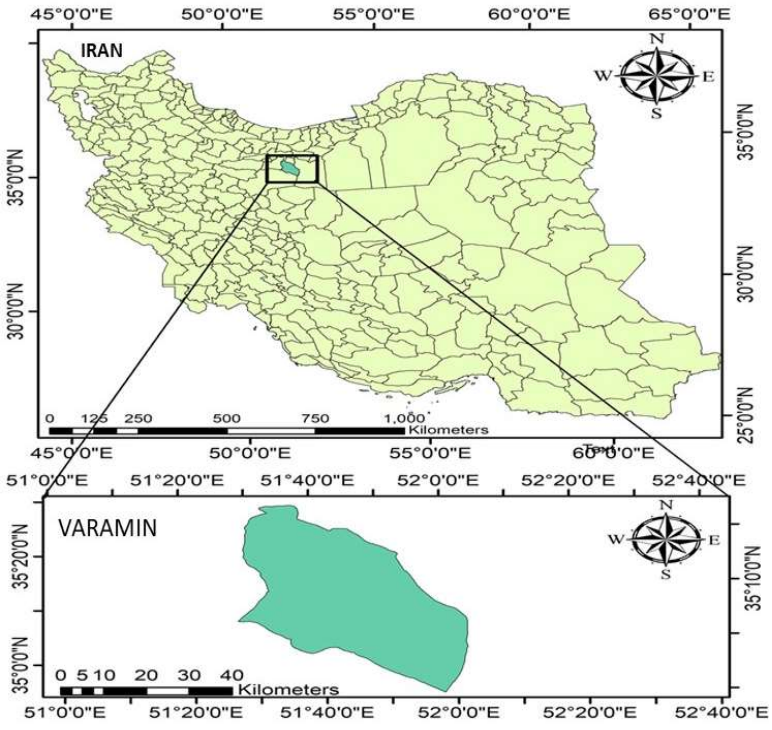


Fig.1- Location map of Tehran province and the studied area of Varamin city.

شکل ۱- نقشه موقعیت استان تهران و منطقه مطالعاتی شهرستان ورامین

شاخص همبست آب، انرژی و غذا

در این مطالعه، از شـــش شـــاخص مختلف برای رابطه تأثیر متقابل مصـرف منابع، بهره‌وری و مسائل اقتصادی در فعالیت‌های کشاورزی برای برنامه‌ریزی الگوی کشت استفاده شد. در شکل (۲) رابطه بین مولفه‌های آب، غذا، انرژی نشان داده شده است.

شاخص مصرف آب (WC)

شاخص مصرف آب $W_{(c.t)}$ مقدار آب مصرفی در هر هکتار از کشت محصول c در زمان t است. در این مطالعه از مجموعه داده (NETWAT) و ســامانه نیاز آبی گیاهان زراعی و باغی کشـــور http://niwr.ir (نیاز آب)، برای محاسبه نیاز آبی گیاهان مختلف بر اســـاس راندمان آبیاری (که در این پژوهش آبیاری مزارع به‌صـورت ســطحی و از راندمان ۰/۵۵) در مطالعه شـبکه آبیاری ورامین استفاده شد.

شاخص مصرف انرژی (Ec.t)

شاخص مصرف انرژی نشان دهنده میزان مصرف انرژی در هر هکتار محصول c در زمان t است. انرژی مورد نیاز مزرعه برای تولیدات زراعی شـامل انرژی مسـتقیم و غیرمسـتقیم اسـت. تولید محصولات زراعی از انرژی سوخت دیزل یا برق برای کار با ماشین آلات و تجهیزات مزرعه و آب به‌طور مسـتقیم و از انرژی مصـرف شده در تولید کودها و مواد شیمیایی، بذر و نیروی کار انسانی مورد استفاده در مزرعه به‌طور غیرمستقیم استفاده می‌کند و در رابطه (۱) نشان داده شد (Zahedi et al, 2015).

$$E_{c\cdot t} = \sum q_h h_{c\cdot t} + q_m m_{c\cdot t} + q_d d_{C\cdot t} + q_f f_{c.t} + q_p p_{c.t} + q_s s_{c.t} + q_w w_{c.t} \quad (۱)$$

که در آن، q_h، q_m، q_d، q_f، q_p، q_s و q_w به‌ترتیب معادل، انرژی نیروی کار انسانی(MJ/h)، ماشین‌آلات (MJ/h)، سوخت دیزل (MJ/L)، کودهای شیمیایی (Chemical fertilizers) (MJ/Kg)، علف‌کش و آفت‌کش‌ها (Pesticides and herbicides) (MJ/Kg)، دانه‌ها (MJ/Kg) و آب آبیاری (MJ/m^3) در هکتار هستند. $h_{c\cdot t}$ ، $m_{C\cdot t}$، $d_{C\cdot t}$، $f_{c.t}$، $p_{c.t}$، $s_{c.t}$ و $w_{c.t}$ به ترتیب معادل، ساعات کار نیروی انسانی (h/ha)، ماشین‌آلات کشاورزی (h/ha)، سوخت فسیلی (L/ha)، کود (Kg/ha)، آفت‌کش‌ها و علف‌کش‌ها (Kg/ha)، بذر (Kg/ha) و آب آبیاری (m^3 /ha) برای کشت محصول c در زمان t است El-Gafy (2017). متوسط معادل انرژی ورودی در تولید انواع محصولات کشاورزی شبکه آبیاری ورامین در جدول (۱) نشان داده شده است. در واقع برای محاسبه مصرف انرژی در هر هکتار، مقادیر ورودی در هم ارز انرژی مربوطه ضرب شد.

شاخص‌های بهره‌وری

شاخص بهره‌وری جرم آب ($W_{pro.t}$)

بهره‌وری جرم آب ($W_{pro.t}$) برای محصول c، در زمان t، با استفاده از رابطه (۲) محاسبه شد:

$$W_{pro.t} = Y_{c.t}/W_{c.t} \quad (۲)$$

که در آن $Y_{c.t}$ عملکرد محصول c در هکتار (Ton/ha) در زمان t و $W_{c.t}$ مصرف آب در هکتار(m3/ha) برای محصول c در زمان t است (El-Gafy et al, 2017).

شاخص بهره‌وری جرمی انرژی (EMP):

شاخص بهره‌وری جرمی انرژی ($E_{pro.t}$) برای محصول c در زمان t از رابطه (۳) محاسبه شد(El-Gafy et al, 2017) .

$$E_{pro.t} = Y_{c.t}/E_{c.t} \quad (۳)$$

که در آن $Y_{c.t}$، عملکرد محصول c در هکتار (ton/ha) در زمان t و $E_{c.t}$، مصرف انرژی در هکتار (MJ/ha) محصول c در زمان t است (El-Gafy et al, 2017).

شاخص‌های بهره‌وری اقتصادی

شاخص بهره‌وری اقتصادی آب (WE):

بهره‌وری اقتصادی آب آبیاری، به ازای هر واحد حجم آب که با علامت اختصاری $W_{EV.t}$ نشان داده می‌شود، در زمان t برای محصول c از رابطه (۴) به‌صورت زیر محاسبه شد.

$$W_{EV.t} = N_{c.t}/w_{c.t} \quad (۴)$$

که در آن $N_{c.t}$ کل درآمد حاصل از فروش محصول است و از حاصل ضرب میزان عملکرد در قیمت هر محصول منهای کل هزینه تولید هر محصول (سود منهای هزینه) برای محصول c در هکتار (تومان/ هکتار) است (Hailemariam et al, 2019). $w_{c.t}$ نیز حجم آب مصرفی در هکتار است. بنابراین شاخص $W_{EV.t}$ بر حسب تومان بر متر مکعب است.

شاخص بهره‌وری اقتصادی انرژی (EE):

بهره‌وری اقتصادی انرژی $E_{EV.t}$ در زمان t برای محصول c از رابطه (۵) محاسبه شد (Hailemariam et al, 2019).

$$E_{EV.t} = N_{c.t}/E_{c.t} \quad (۵)$$

DOI: 10.22055/jise.2024.47552.2130

شاخص آب، انرژی، غذا

در این پژوهش، تمامی شاخص‌های آب، انرژی، غذا برای ایجاد یک شاخص همبست یکپارچه WEF باهم ترکیب شدند و به شرح زیر محاسبه شد، رابطه (۶). برای این منظور تمامی شاخص‌های مورد استفاده در این مطالعه ابتدا باید با استفاده از روش نرمال‌سازی حداکثر–حداقل (Min–Max Normalization) توسط معادله‌های (۷) و (۸) نرمال‌سازی و به شاخص‌های بدون بعد تبدیل شد. سپس شاخص‌های مذکور محاسبه و برای ارزیابی شاخص WEF استفاده شد. سپس الگوی کشت نهایی از ضرب (تناسب)، بین الگوی کشت جاری و شاخص WEF برای محصولات شبکه آبیاری ورامین به‌دست آمد.

$$WEF = \sum_{i=1}^{n} w_i X_i / \sum_{i=1}^{n} w_i \quad (۶)$$

$$X_{i=}(x_i - \mathrm{Min}(x_i))/(\mathrm{Max}(x_i) - \mathrm{Min}(x_i)) \quad (۷)$$

$$X_{i=}(\mathrm{Max}(x_i) - x_i)/(\mathrm{Max}(x_i) - \mathrm{Min}(x_i)) \quad (۸)$$

در این معادله X_i مقدار استاندارد سازی شده i است. $Min(x_i)$ و $Max(x_i)$ حداکثر و حداقل مقدار شاخص i است. w_i هم وزن مربوط به هر یک از مؤلفه‌های همبست است که در اینجا وزن همه مولفه‌ها یکسان در نظر گرفته می‌شود، بنابراین معادله به یک معادله میانگین حسابی تبدیل می‌شود. مقادیر شاخص WEF بین صفر و یک متفاوت است و هرچه این مقدار به یک نزدیک‌تر باشد نشان دهنده وضعیت بهینه شاخص است.

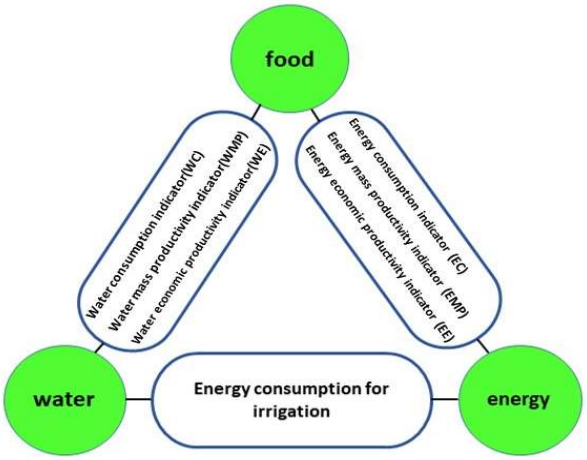


Fig. 2- The relationship between the components of water, food, energy
شکل ۲ - رابطه بین مولفه‌های آب، انرژی و غذا

جدول۱- ردپای انرژی نهاده‌ها در تولید محصولات کشاورزی شبکه آبیاری ورامین

Table 1- Energy footprint of inputs in the production of agricultural in Varamin irrigation network

Input	unit	Energy equivalent (MJ/unit)	References
Human labor	*h*	1.95	(Zahedi et al., 2015)
Machinery	*h*	62.7	(Zahedi et al., 2015)
Diesel fuel	L	50.23	(Zahedi et al., 2015)
Water for irrigation	m3	1.02	(Zahedi et al., 2015)
Chemical fertilizers			
Nitrogen (N)	kg	75.46	(Zahedi et al., 2015)
Phosphate (P2O5)	kg	13.07	(Zahedi et al., 2015)
Potassium (K2O)	kg	11.15	(Zahedi et al., 2015)
Chemicals			
Herbicides	L	238.32	(Zahedi et al., 2015)
Pesticide	L	101.2	(Zahedi et al., 2015)
Fungicide	kg	181.9	(Zahedi et al., 2015)
Seeds			
Wheat	kg	20.1	(Zahedi et al., 2015)
Barely	kg	14.7	(Zahedi et al., 2015)
Alfalfa	kg	10	(Zahedi et al., 2015)
Silage corn	kg	14.7	(Zahedi et al., 2015)
canola	kg	24	(Sadeghi, Moghadam et al. 2020)

نتایج و بحث

ارزیابی شاخص مصرف آب (WC)

شاخص مصرف آب، برای هر یک از محصولات مورد مطالعه محاسبه و در شکل (۳) نشان داده شده است. همان‌طور که در شکل دیده می‌شود ، یونجه بیشترین و جو کمترین مصرف آب (متر مکعب در هکتار) را نسبت به سایر محصولات در شبکه آبیاری ورامین داشته است. از آنجا که اولویت کشت بر اساس شاخص آب با محصولاتی است که کمترین مصرف آب در هکتار را داشته باشند. بنابراین اولویت کشت به‌ترتیب با جو، کلزا، گندم، ذرت علوفه‌ای و یونجه است.

ارزیابی شاخص انرژی

کل انرژی ورودی برای محصولات مورد مطالعه شبکه آبیاری ورامین در این تحقیق محاسبه گردید و در شکل (۴) نشان داده شده است. این نتایج نشان داد که کل انرژی ورودی برای محصول گندم در شبکه ۶۰۹۶۶/۹ مگاژول در هکتار، جو معادل ۵۳۵۰۶/۶۴ مگاژول بر هکتار، یونجه مقدار ۹۶۱۷۸/۶۴ مگاژول در هر هکتار، ذرت علوفه‌ای ۶۲۷۲۰/۳۶ مگاژول بر هکتار و کلزا ۱۹۹۴۴/۸۱ مگاژول در هر هکتار است. یونجه بیشترین و کلزا کمترین مصرف انرژی را در هکتار داشتند. بر اساس این شاخص اولویت کشت با محصولی است که کمترین انرژی مصرفی را دارا باشد، بنابراین به‌ترتیب کلزا، جو، گندم، ذرت علوفه‌ای و یونجه در اولویت کشت قرار گرفتند.

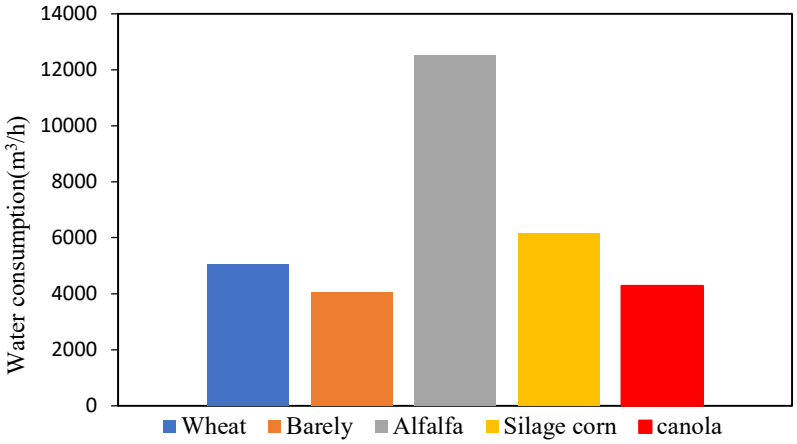


Fig. 3- Water consumption index of agricultural products of Varamin irrigation network

شکل ۳- شاخص مصرف آب محصولات کشاورزی شبکه آبیاری ورامین

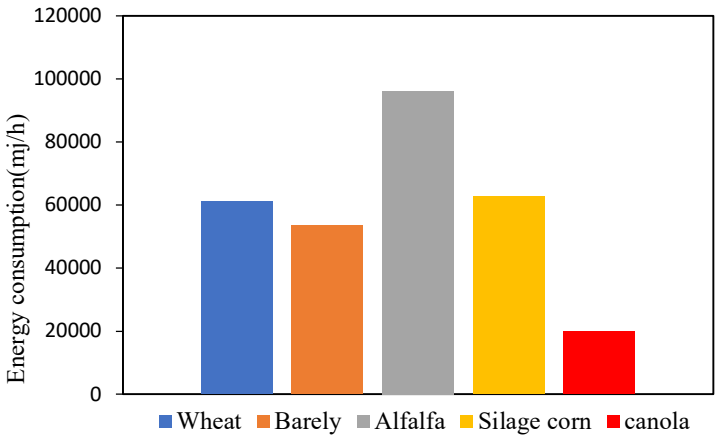


Fig. 4- The amount of energy consumption index of input products of Varamin irrigation network

شکل ٤- مقدار شاخص مصرف انرژی ورودی محصولات زراعی شبکه آبیاری ورامین

DOI: 10.22055/jise.2024.47552.2130

شاخص‌های بهره‌وری

شاخص بهره‌وری جرمی آب

در این پژوهش با توجه اطلاعات سطح برداشت، میزان تولید، عملکرد و نیاز آبی محصولات ذکر شده بهره‌وری هر یک از محصولات محاسبه شد. با توجه به این نتایج ذرت علوفه‌ای با ۵/۲۴ کیلوگرم و یونجه با ۰/۷۹ کیلوگرم محصول تولید شده نسبت به یک متر مکعب آب مصرف شده بیشترین مقدار محصول تولید شده را داشتند. همچنین جو با تولید۰/۶۵کیلوگرم بر متر مکعب، گندم با تولید ۰/۶۰ کیلوگرم بر مترمکعب و کلزا با تولید ۰/۱۴ کیلوگرم بر متر مکعب در جایگاه‌های بعدی قرار گرفتند. طی مطالعه‌ای که توسط Bagheri Khaneghahi et al (2022) در دشت تجن مازندران انجام شد میانگین بهره‌وری آب در روش آبیاری سنتی به‌ترتیب برای گندم، جو، ذرت علوفه‌ای و یونجه، ۰/۷۱، ۰/۷۵، ۵/۷ و ۰/۹۷کیلوگرم بر مترمکعب به‌دست آمد همان‌طور که در شکل (۵) نشان داده شده است، ذرت علوفه‌ای بالاترین میزان بهره‌وری و کلزا کمترین میزان بهره‌وری در بین محصولات زراعی را داشتند. بر اساس این شاخص، اولویت کشت با محصولی است که بیشترین بهره‌وری جرمی آب را داشته باشد. هر چه این شاخص بیشتر باشد نشان دهنده‌ی مصرف صحیح‌تر آب است، هر چند ممکن است که سود اقتصادی بیشتری را به دنبال نداشته باشد. بنابراین با توجه به این شاخص، به‌ترتیب ذرت علوفه‌ای، یونجه، جو، گندم و کلزا در اولویت کشت قرار گرفتند.

شاخص بهره‌وری انرژی

شاخص بهره‌وری انرژی عملکرد محصولات بر مصرف انرژی را نشان می‌دهد. هر چه مقدار عدد این شاخص بزرگ‌تر باشد نشان دهنده بهره‌وری بالاتر انرژی مصرفی می‌باشد. بالاتر بودن مقدار بهره‌وری انرژی نشان دهنده انرژی ورودی کمتر و عملکرد بیشتر محصولات است. بر طبق این نتایج ذرت علوفه ای با ۰/۹۳۲ کیلوگرم/مگاژول بیشترین بهره‌وری انرژی را نسبت به بقیه محصولات داشت. رتبه‌ی دوم را نیز یونجه با ۰/۱۸۷ کیلوگرم بر مگاژول به خود اختصاص داد.

محصولات گندم، جو و کلزا نیز به‌ترتیب با ۰/۰۹۰، ۰/۰۸۹ و۰/۰۵۴ کیلوگرم بر مگاژول دارای کمترین میزان بهره‌وری انرژی بودند. همانطور که در شکل (۶) قابل مشاهده است ذرت علوفه‌ای بیشترین و کلزا کمترین میزان بهره‌وری انرژی را داشتند. بر اساس این شاخص اولویت کشت با محصولی است که بیشترین بهره‌وری انرژی را داشته باشد. بنابراین به ترتیب ذرت علوفه‌ای، یونجه، گندم، جو، و کلزا در اولویت کشت قرار گرفتند.

شاخص‌های بهره‌وری اقتصادی

شاخص بهره‌وری اقتصادی آب

بهره‌وری اقتصادی آب میزان سود خالص را به ازای واحد حجم آب مصرف شده نشان می‌دهد، و هر چه این عدد رقم بالاتری باشد نشان دهنده بهره‌وری اقتصادی بهتری است. در واقع تخصیص آب بایستی به محصولاتی صورت گیرد که سود خالص بیشتری را در ازای مصرف مقدار کمتری آب بدهد. همچنین محصولاتی که مصرف آب بالا و بازده اقتصادی پایین دارند باید از الگوی کشت حذف شوند. در میان محصولات مورد مطالعه این پژوهش، بیشترین بهره‌وری اقتصادی، مربوط به ذرت علوفه‌ای با ۱۷۱۶۹/۳۵ تومان/مترمکعب بود. همچنین بعد از ذرت علوفه‌ای محصولات گندم و یونجه به ترتیب با ۲۰۹۱/۳۲ و ۳۲۶۲/۹۶ تومان/ متر مکعب قرار گرفتند. اما کمترین میزان این شاخص را محصولات جو و کلزا به‌ترتیب با ۲۵۳۰/۱۸ و ۶۵۰/۹۸ تومان/مترمکعب داشتند. همانطور که در شکل (۷) مشاهده می‌شود ذرت علوفه‌ای و کلزا به‌ترتیب بیشترین و کمترین میزان بهره‌وری اقتصادی آب را نسبت به سایر محصولات دیگر داشتند. بر اساس این شاخص اولویت کشت با محصولی است که بیشترین بهره‌وری اقتصادی آب را داشته باشد. بنابراین به‌ترتیب ذرت علوفه‌ای، یونجه، جو، گندم و کلزا در اولویت کشت قرار گرفتند.

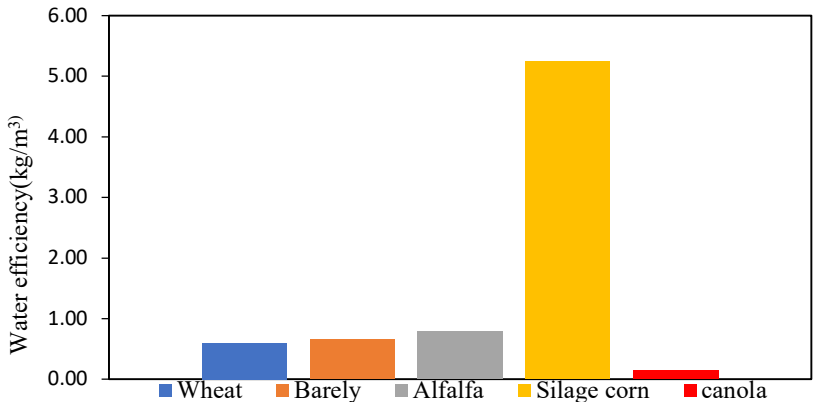


Fig. 5- The amount of water productivity index of Varamin irrigation network products

شکل ۵- مقدار شاخص بهره‌وری آب محصولات زراعی شبکه آبیاری ورامین

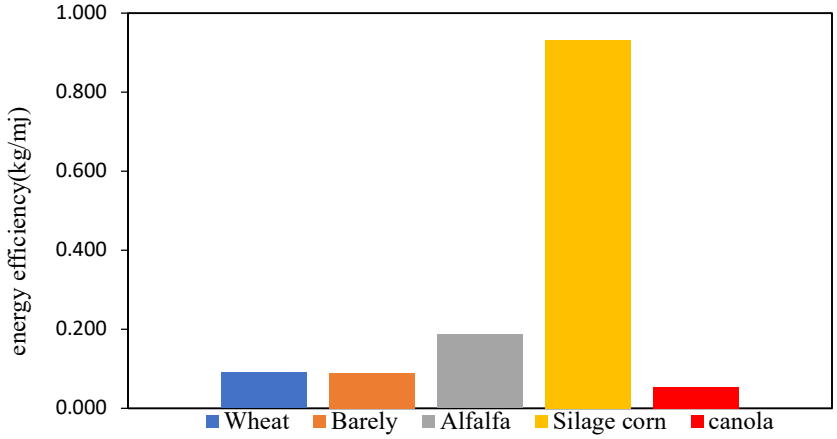


Fig. 6- The amount of energy productivity index of Varamin irrigation network products

شکل ٦- مقدار شاخص بهره‌وری انرژی محصولات زراعی شبکه آبیاری ورامین

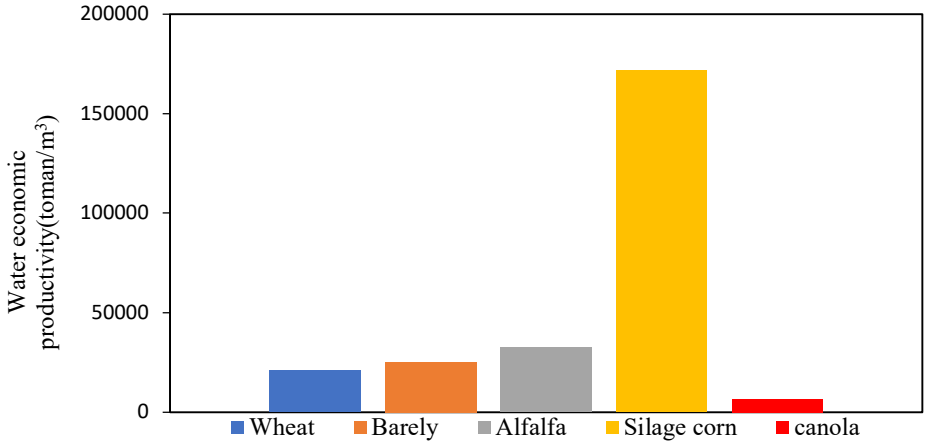


Fig.7- The amount of economic productivity index of water products of Varamin irrigation network

شکل ۷- مقدار شاخص بهره‌وری اقتصادی آب محصولات زراعی شبکه آبیاری ورامین

شاخص بهره‌وری اقتصادی انرژی

این شاخص میزان بهره‌وری اقتصادی انرژی محصولات را بر حسب تومان/مگاژول نشان می‌دهد. هر چه مقدار انرژی مصرفی محصولات کمتر و سود خالص محصولات بیشتر شود مقدار این شاخص نیز بهتر می‌شود. بیشترین و کمترین مقدار این شاخص را به ترتیب ذرت علوفه‌ای و کلزا با ۳۰۵۷/۰۸ و ۲۵۴/۳۰ تومان/مگاژول داشتند. همچنین میزان بهره‌وری اقتصادی انرژی گندم ۳۱۴/۱۸ تومان/مگاژول، یونجه ۷۷۲/۰۰ تومان/مگاژول و جو ۳۴۸/۲۱ تومان/مگاژول بود. مقادیر بهره‌وری اقتصادی انرژی محصولات در شکل (۸) نشان داده شده است و همان‌طور که مشاهده می‌شود بیشترین مقدار مربوط به ذرت علوفه‌ای و کمترین مقدار مربوط به کلزا است. بر اساس این شاخص اولویت کشت با محصولی است که بیشترین بهره‌وری اقتصادی انرژی را داشته باشد. بنابراین به‌ترتیب ذرت علوفه‌ای، یونجه، جو، گندم و کلزا در اولویت کشت قرار گرفتند.

شاخص همبست یکپارچه WEF

پس از محاسبه شاخص‌های محصولات کشاورزی شبکه آبیاری ورامین، نرمال‌سازی این شاخص‌ها به روش حداقل-حداکثر انجام شد. شاخص همبست آب، انرژی، غذا برای محصولات مورد مطالعه در شبکه آبیاری ورامین محاسبه و نتایج آن در جدول (۲) نشان داده شد. مقادیر این شاخص از بیشترین به کمترین به‌ترتیب ذرت علوفه‌ای، کلزا، جو، گندم و یونجه با ۰/۸۷، ۰/۳۳، ۰/۳۲، ۰/۲۸ و ۰/۱۱ به‌دست آمد. ذرت علوفه‌ای نسبت به سایر محصولات مورد مطالعه، بیشترین بهره‌وری اقتصادی آب، بهره‌وری اقتصادی انرژی و همچنین بیشترین بهره‌وری جرمی آب و انرژی را کسب کرد و بیشترین مقدار شاخص WEF برابر ۰/۸۷ شد. یونجه با توجه به اینکه بهره‌وری اقتصادی بالا و نیز عملکرد مناسبی را نسبت به واحد آب مصرف شده داشت اما به‌دلیل مصرف زیاد آب و انرژی، دارای کمترین امتیاز WEF شد.

DOI: 10.22055/jise.2024.47552.2130

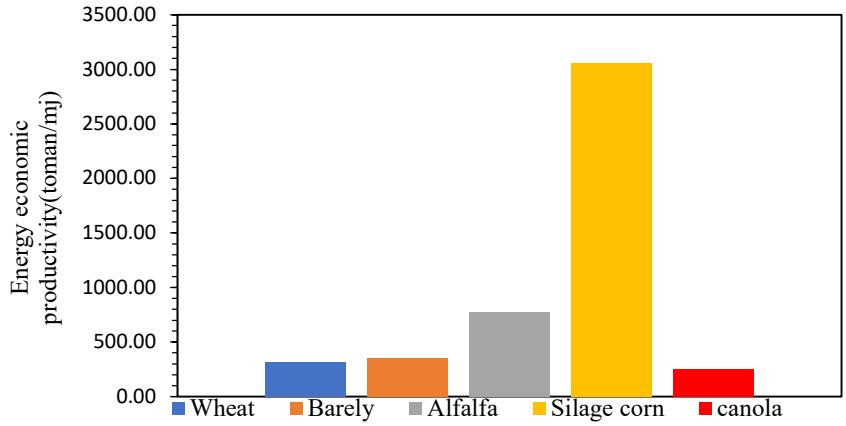


Fig. 8- The amount of energy economic efficiency index of Varamin irrigation network products

شکل ۸- مقدار شاخص بهره‌وری اقتصادی انرژی محصولات زراعی شبکه آبیاری ورامین

جدول ۲- مقادیر شاخص WEF و مقادیر نرمال شده شاخص‌های مختلف اعمال شده در شاخص همبست WEF برای محصولات کشاورزی شبکه آبیاری ورامین

Table 2- The values of the WEF index and the normalized values of the different indices applied in the WEF nexus index for the agricultural products of the Varamin irrigation network

Indicators	Wheat	Barely	Alfalfa	Silage corn	canola
WC	0.88	1.00	0.00	0.75	0.97
EC	0.51	0.62	0.00	0.49	1.00
EMP	0.06	0.06	0.17	1.00	0.00
WMP	0.09	0.10	0.13	1.00	0.00
EE	0.02	0.03	0.18	1.00	0.00
WE	0.09	0.11	0.16	1.00	0.00
WEF	0.28	0.32	0.11	0.87	0.33

جدول ۳- الگوی کشت پیشنهادی بر اساس شاخص آب، انرژی، غذا

Table 3- Proposed cultivation pattern based on water, energy, food index

crops	Current cultivated area (ha)	Cultivated area of the proposed model (ha) According to the WEF index	Percentage change
Wheat	12999	4881	-62.4
Barely	10988	5578	-49.2
Alfalfa	4003	1917	-52.1
Silage corn	4860	15166	+212
canola	444	5752	+1195
total	33294	33294	

الگوی پیشنهادی کشت

الگوی کشت محصولات عمده زراعی بر اساس شاخص یکپارچه WEF پیشنهاد شد و در جدول (۳) مقادیر آنها نشان داده شده است. بر اساس نتایج بدست آمده سطح زیر کشت محصول گندم، از ۱۲۹۹۹ هکتار به ۴۸۸۱ هکتار یعنی به میزان ۶۲/۴ درصد کاهش یافته است. سطح زیر کشت محصول جو از ۱۰۹۸۸ هکتار به ۵۵۷۸ هکتار رسید که میزان۴۹/۲ درصد کاهش را نشان می‌دهد. یونجه محصولی با مصرف زیاد آب و انرژی است و سطح زیر کشت آن با ۵۲/۱ درصد کاهش از ۴۰۰۳ هکتار به ۱۹۱۷ هکتار رسیده است. اما ذرت علوفه‌ای که بالاترین امتیاز شاخص WEF را داشت، با رشد ۲۱۲ درصدی از ۴۸۶۰ هکتار به ۱۵۱۶۶ هکتار افزایش یافته است. اما کلزا با افزایش حدودا ۱۲ برابری (۱۱۹۵ درصدی) بالاترین افزایش سطح زیر کشت را به خود اختصاص داد. کلزا کمترین مصرف آب و انرژی را دارد، بنابراین سطح زیر کشت این محصول در الگوی کشت پیشنهادی از ۴۴۴ هکتار به ۵۷۵۲ هکتار رسیده است.

نتایج حاصل از این پژوهش، نشان می‌دهد که درصورت اجرای الگوی کشت پیشنهادی در اراضی شبکه آبیاری ورامین، محصولاتی مانند کلزا که مصرف آب پایین دارد سطح زیر کشت آن افزایش و محصولاتی مانند یونجه که نیاز آبی بالایی دارند

سطح زیر کشت آن کاهش پیدا کرده که در نتیجه مقدار مصرف سالیانه آب ۳/۷ درصد کاهش خواهد یافت. یافته‌های این پژوهش همچنین نشان داد که در صورت اجرای الگو، مصرف انرژی با کاهش ۱۴/۷ درصد مواجه خواهیم بود. بر اساس الگوی پیشنهادی میزان بهره‌وری اقتصادی آب ۳۵ درصد و بهره‌وری اقتصادی انرژی میزان ۳۸/۲ درصد افزایش خواهند یافت. در پژوهشی که Eslami et al (2020) در شبکه آبیاری و زهکشی سفیدرود انجام دادند، نتایج نشان داد نیاز خالص آبی و آب عرضه شده به شبکه آبیاری و زهکشی سفیدرود در سال ۲۰۱۶ با رویکرد پیوندی به‌ترتیب ۸/۶ و ۸/۷ میلیون متر مکعب بیشتر از حالت بدون رویکرد پیوندی به‌دست آمد. در مطالعه‌ای که در منطقه سرچشمه رودخانه‌های سه (یانگ تسه-زرد-لانتسانگ) چین انجام شد، یک برنامه‌ریزی کسری فازی مبتنی بر ردپای آب (WFFP) برای بهینه‌سازی تخصیص منابع به سمت امنیت غذایی و آب پایدار تحت محدودیت‌های کشاورزی، غذایی، اجتماعی-اقتصادی و منابع طبیعی توسعه یافت. نتایج نشان داد، طرح بهینه سازی شده با محدودیت آب آبیاری موجود، به‌ترتیب موجب افزایش دو درصدی سود اقتصادی و ۳۴ درصدی صرفه جویی در مصرف آب می شود (Chen et al, 2020). تحقیقی که Masaeli et al (2022) برای تعیین الگوی کشت بهینه انجام دادند نشان داد، با افزایش ۲/۳۲ درصدی سطح زیر کشت، شاهد کاهش ۱۱ درصدی مصرف آب و انرژی خواهد بود. پژوهشی که El-Gafy et al (2017) انجام دادند نشان داد، در صورتی که رویکرد پیوندی برای پیشنهاد الگوی کشت بهینه اعمال شود، می‌توان حدود ۸۶ میلیون دلار در سال بازده اقتصادی به‌دست آورد.

نتیجه‌گیری

برای بررسی رابطه بین انرژی، غذا و آب در شبکه‌های آبیاری و همچنین ارزیابی شاخص یکپارچه آب، انرژی و غذا (WEFNI)، برای افزایش بهره‌وری در شبکه‌های آبیاری و همچین تعیین الگوی کشت پیشنهادی با استفاده از شاخص ترکیبی آب، انرژی و غذا انجام شد. در راستای این پژوهش، ابتدا ارتباط و ایجاد بیلان بین اجزاء مرتبط با هر یک از سه مؤلفه آب، انرژی، غذا به عنوان چارچوب اساسی تشکیل دهنده تهیه مدل همبست WEF با استفاده از شش شاخص: مصرف آب، مصرف انرژی، بهره‌وری جرمی آب، بهره‌وری انرژی، بهره‌وری اقتصادی آب، بهره‌وری اقتصادی انرژی مورد بررسی قرار گرفت. مدل WEF توسعه‌یافته به‌عنوان یک مورد آزمایشی برای ارزیابی محصولات شبکه آبیاری ورامین استفاده شد. دامنه تغییرات WEF در محصولات زراعی مورد مطالعه برای ذرت علوفه‌ای ۰/۸۷ (بالاترین امتیاز) و برای یونجه ۰/۱۱ (پایین‌ترین امتیاز) بود. هر چقدر شاخص WEF دارای امتیاز بالاتری باشد، نشان دهنده عملکرد بهتری است. سایر محصولات گندم، جو و کلزا به‌ترتیب دارای امتیاز ۰/۲۸، ۰/۳۲ و ۰/۳۳ بودند. بر اساس شاخص مصرف آب بیشترین مقدار مصرف آب را یونجه و کمترین مقدار مصرف را کلزا دارد، با توجه به محدود بودن منابع آبی، باید به سمت کشت محصولاتی برویم که کمترین مصرف آب سالانه را داشته باشند، بنابراین محصولات کلزا و جو در اولویت کشت قرار گرفتند. ارائه راهکارهای صحیح مدیریتی همچون تخصیص بهینه منابع آبی و برنامه‌ریزی در راستای اصلاح الگوی کشت از طریق سیاست‌های تشویقی، خرید تضمینی محصولات با نیاز آبی کمتر، بیمه محصولات کشاورزی و راه اندازی صنایع تبدیلی محصولات کشاورزی در منطقه یک ضرورت اجتناب ناپذیر است. این موارد بایستی در برنامه‌ریزی‌های کوتاه مدت و میان مدت تصمیم‌گیرندگان بخش آب استان و کشور لحاظ گردد. الگوی کشت پیشنهادی مصرف آب سالانه محصولات در کل سطح کشت را به اندازه ۳/۷ درصد کاهش می‌دهد. بیشترین و کمترین میزان شاخص بهره‌وری اقتصادی آب را به‌ترتیب محصولات ذرت علوفه‌ای و کلزا داشتند. بر اساس الگوی کشت پیشنهادی شاخص بهره‌وری اقتصادی آب به میزان ۳۵ درصد افزایش می‌یابد. نتایج این تحقیق نشان داد که بهینه‌سازی تخصیص سطح اراضی کشاورزی، سودهی تولیدات کشاورزی را بهبود می‌بخشد و به سودآوری بیشتری می‌انجامد که این یکی از مهم‌ترین الگوهای مورد نظر مسئولین کشاورزی است که از آن به عنوان کشاورزی پایدار یاد می‌شود.

تقدیر و تشکر

بدین وسیله لازم است از سازمان جهاد کشاورزی و آب منطقه‌ای شهرستان ورامین و همچنین تمام کسانی که ما را در این مسیر همراهی نموده‌اند، قدردانی به‌عمل آورد.

تضاد منافع نویسندگان

نویسندگان این مقاله اعلام می‌دارند که هیچ گونه تضاد منافعی در خصوص نگارش و انتشار مطالب و نتایج این پژوهش ندارند.

منابع مالی

نویسندگان هیچ گونه حمایت مالی برای تحقیق، تألیف و انتشار این مقاله دریافت نکردند.

دسترسی به داده‌ها

همه اطلاعات و نتایج در متن مقاله ارائه شده است.

مشارکت نویسندگان

نویسنده اول: ارشاد آبیار (نگارش مقاله و تجزیه و تحلیل داده ها) ۵۰ ٪

نویسنده دوم: محمود مشعل (بررسی نتایج و تایید مطلب) ۵۰ ٪

References

1- Bagheri Khaneghahi, M., Mirhashemi, S., & Panahi, M. 2022. Evaluation and analysis of water productivity indices for various crops using traditional and modern irrigation systems (case study: Tajan plain of Mazandaran). *Crop Science Research in Arid Regions*, 4(1), 49-59.. https://doi.org/ 10.22034/csrar.2022.306317.1137.

2- United Nations, Department of Economic and Social Affairs, Population Division (2015). *World Population Prospects*: The 2015 Revision, Volume I: Comprehensive Tables (ST/ESA/SER.A/379).

3- Chen, M., Shang, S., & Li, W. 2020. Integrated modeling approach for sustainable land-water-food nexus management. *Agriculture*, *10*(4), 104. https://doi.org/10.3390/agriculture10040104

4- El-Gafy, I. 2017. Water–food–energy nexus index: analysis of water–energy–food nexus of crop's production system applying the indicators approach. *Applied Water Science*, *7*(6), 2857-2868.https://doi.org/10.1007/s13201-017-0551-3

5- El-Gafy, I., Grigg, N., & Waskom, R. 2017. Water-food-energy: nexus and non-nexus approaches for optimal cropping pattern. *Water Resources Management*, *31*, 4971-4980.https://doi.org/10.1007/s11269-017-1789-0

6- Eslami, Z., Janatrostami, S., Ashrafzadeh, A., & Pourmohamad, Y. 2020. Water, energy, food nexus approach impact on integrated water resources management in sefid-rud irrigation and drainage network. *Water and Soil*, 34(1), 11-25. https://doi.org/10.22067/jsw.v34i1.81897

7- Giampietro, M., Aspinall, R. J., Bukkens, S. G., Benalcazar, J. J. C., Maurin, F. D., Flammini, A., Gomiero, T., Kovacic, Z., Madrid-Lopez, C., & Martin, J. R. 2013. An innovative accounting framework for the food-energy-water nexus: application of the MuSIASEM approach to three case studies.

8- Ghorbani, E., Monem, M. J., & Vaez Tehrani, M. 2020. Development of Water, Energy and Food Nexus Model in Irrigation Networks Based on Water Adequacy and Stability Indicators (Qazvin Irrigation Network Case Study). *Irrigation and Drainage Structures Engineering Research*, 21(80), 61-80. https://doi.org/10.22092/idser.2020.343189.1432

9- Hoseini, S. M., & Delavar, M. 2020. Application and Evaluation of Water, Food and Energy (NEXUS) in Irrigation Networks Management Case Study of Zayandehrud Irrigation Network. *Iranian Journal of Irrigation & Drainage*, 14(1), 275-285. 20.1001.1.20087942.1399.14.1.24.7

10- Hailemariam, W. G., Silalertruksa, T., Gheewala, S. H., & Jakrawatana, N. 2019. Water–energy–food nexus of sugarcane production in Ethiopia. *Environmental Engineering Science*, 36(7), 798-807. DOI:10.1089/ees.2018.0549

11- Masaeli, H., Gohari, A., Hasanzadeh Saray, M., & Torabi Haghighi, A. 2022. Developing a new water–energy–food-greenhouse gases nexus tool for sustainable agricultural landscape management. *Sustainable Development*. https://doi.org/10.1002/sd.2427

12- Maharab Omran Gostar Consulting Engineers Company, 2014. Report on the review and remediation studies of the irrigation and drainage network of the Varamin Plain.

13- Latifzade, S., Mokhtaran, R., Latifzade, L., & Hamzeh, S. 2010. Determination of optimum cropping pattern considering agricultural water management issue in the Aghili-Gotvand irrigation project. Journal: *Journal Of Water Engineering*. 1(1), 53-59.

14- Saray, M. H., Baubekova, A., Gohari, A., Eslamian, S. S., Klove, B., & Haghighi, A. T. 2022. Optimization of Water-Energy-Food Nexus considering CO2 emissions from cropland: A case study in northwest Iran. *Applied Energy*, 307, 118236. https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2021.118236

15- Sadeghi, S.H., Moghadam, E.S., Delavar, M. and Zarghami, M., 2020. Application of water-energy-food nexus approach for designating optimal agricultural management pattern at a watershed scale. *Agricultural Water Management*, *233*, p.106071.https://doi.org/10.1016/j.agwat.2020.106071

16- Valivand, F., Katibeh, H., 2022. Evaluation of Quantitative and Qualitative Management Plans in Varamin Plain Aquifer. *Journal of Water and Wastewater*. 33(4), 36-50. https://doi.org/10.22093/wwj.2022.315051.3197

17- Yousefi, H., Mohammadi, A., Noorollahi, Y., & Sadatinejad, S. J. 2018. Water footprint evaluation of Tehran's crops and garden crops. *Journal of Water and Soil Conservation*, 24(6), 67-85. https://doi.org/10.22069/jwsc.2017.13718.2842

18- Zahedi, M., Mondani, F., & Eshghizadeh, H. R. 2015. Analyzing the energy balances of double-cropped cereals in an arid region. *Energy reports*, 1, 43-49. 10.1016/j.egyr.2014.11.001

19- Zhang, P., Zhang, L., Chang, Y., Xu, M., Hao, Y., Liang, S., Liu, G., Yang, Z. and Wang, C., 2019. Food-energy-water (FEW) nexus for urban sustainability: A comprehensive review. *Resources, Conservation and Recycling*, *142*, pp.215-224. https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2018.11.018

Shahid Chamran University of Ahvaz

Irrigation Sciences and Engineering (JISE)
Vol. 48, No. 3, Fall 2025, p. 125-145

Research Paper

Journal homepage: https://jise.scu.ac.ir

EXTENDED ABSTRACT

Classification and modeling based on soft Computing of Karun River: Gatund and Ahvaz Hydrometric Stations

Gh. Salehpour[1], M. Zayeri[2*] and M. Zeinivand[3]

1- Master in Civil Engineering, Department of Hydraulic Structures, Faculty of Water and Environmental Engineering, Shahid Chamran University of Ahvaz, Ahvaz, Iran..

2- Corresponding Author, Assistant Professor, Department of Hydraulic Structures, Faculty of Water and Environmental Engineering, Shahid Chamran University of Ahvaz, Ahvaz, Iran (m.zayri@scu.ac.ir).*

3- Assistant Professor, Department of Hydraulic Structures, Faculty of Water and Environmental Engineering, Shahid Chamran University of Ahvaz, Ahvaz, Iran.

ARTICLE INFO

Artlcle history:
Received: 20 January 2024
Revised: 29 February 2024
Accepted: 03 March 2024
Available online: 05 November 2025

Keywords:
Principal Component Analysis, Decision Tree, Multiple Variable Regression, Multivariate Representation.

TO CITE THIS ARTICLE:

salehpour, G., Zayeri, M., Zeinivand, M. 2025. 'Classification and modeling based on soft Computing of Karun River: Gatund and Ahvaz Hydrometric Stations', *Irrigation Sciences and Engineering*, 48(3), pp. 125-145. doi: 10.22055/jise.2024.45876.2114

Abstract

Investigating changes in the quality of surface water has always been one of the most important issues for drinking, agriculture and industry, In this research, the water quality of the Karun River which is one of the largest sources of surface water supply in different parts of Khuzestan province, was studied at the Gatund water measuring station located downstream of the Gatund dam and Ahvaz water measuring station. The results indicate that during the years 2008 to 2011 and 2013 to 2015, which experienced lower than average precipitation, reflecting drought conditions, the reduction in river discharge has led to an increase in TDS (Total Dissolved Solids) and EC (Electrical Conductivity) values. According to the Piper diagram, the overall status of water samples taken at the Gotvand station shows a tendency towards non-carbonate hardness after the operation of the Gotvand dam in 2011. The water samples at this station exhibit anionic characteristics in the chloride zone or a mixed zone, and in terms of cations, they are positioned in the sodium-potassium or mixed zone. The Schoeller diagram results demonstrate that the water quality of the Karun River in terms of drinking water standards is acceptable at this station Also, the difference of water quality parameters of Karun River in dry (April to September) and wet (October to March) periods is 20% in Gatund station and 10% in Ahvaz station. The results obtained from the regression analysis of the TDS parameter in the Ahvaz hydrometric station show that machine learning models can be used as a powerful tool in predicting surface water quality , so that the performance of the decision tree model with the coefficient The determination of R2=0.97 and the multivariate regression model with the coefficient of determination R2=0.95 was used in the prediction of this parameter.

Introduction

Rivers stand as invaluable water resources, serving a multitude of crucial functions ranging from providing drinking water, supporting domestic needs, enabling agriculture, facilitating transportation, powering generators, offering recreational opportunities, to even serving as conduits for waste disposal. Throughout history, ancient civilizations thrived and flourished along riverbanks due to the accessibility of fresh water sources, and to this day, numerous developmental activities continue to

hinge on these aquatic lifelines. Within this context, the present study is centered on the Karoun River in Iran, selected as the focal point for a comprehensive evaluation of its water quality. The principal objectives of this endeavor encompass a comprehensive appraisal of the overall water quality and a systematic identification of the variables influencing the river's hydrochemistry. To accomplish these goals, established methodologies such as the Piper, Durov, and Schoeller graphical plots, well-regarded for their ability to portray temporal variations, have been harnessed (Aazami et al., 2018; Allahverdipour et al., 2023). These approaches provide insightful visualizations that are instrumental in discerning the water quality status within the studied area. Moreover, the study harnesses sophisticated multivariate statistical techniques, particularly Principal Component Analysis (PCA), known for its proficiency in dissecting complex datasets. PCA serves as an efficacious tool in dissecting the water samples and revealing the underlying characteristics of hydrochemical attributes (Astel et al., 2006; Babolhakami et al., 2019). By extracting hidden patterns and correlations among variables, PCA not only aids in comprehending the intricate interactions within the river's ecosystem but also facilitates informed decision-making in devising effective remedial measures. In conclusion, rivers endure as indispensable lifelines, intricately woven into the fabric of human existence. The study of the Karoun River in Iran is emblematic of the concerted efforts underway to ensure the continued well-being of our precious water resources.

Methodology

The Karun River, the most abundant and longest river in the Iran, originates from the Zardkouh Bakhtiari mountains and meanders through the central Zagros mountain range, eventually flowing into the Khuzestan plains. The study area, includes two hydrometric stations: Gotvand station downstream of the regulating dam at geographical coordinates "48.45'48°41 East longitude and "67.25'20°31 North latitude, which is situated 140 kilometers from the Gotvand station; and Ahvaz hydrometric station located in the city of Ahvaz at geographical coordinates "67.56'49°48 East longitude and "89.35'15°32 North latitude. The southern slopes of the Zagros mountain range, due to the presence of evaporative formations and the influx of relatively brackish tributaries, such as the Morghab, Shoor Andika, and Shoor Lali branches located upstream of the upper Gotvand dam, naturally contribute to the increased salinity of the Karun River's water. Considering the passage of these rivers through evaporative and brackish formations, including the Gachsaran Formation, they significantly influence the salinity of the water in the Gotvand dam reservoir and contribute to its declining quality. Over 50% of the river's length upstream of the Gotvand hydrometric station flows through the Gachsaran Formation, and the river water is in direct and permanent contact with these evaporative and soluble units.

Results and Discusspn

Temporal variations in TDS (Total Dissolved Solids) and EC (Electrical Conductivity) values of the Karun River are depicted at the Gotvand and Ahvaz hydrometric stations during the wet period (Mehr to Esfand) and the dry period (Farvardin to Shahrivar). The changes in TDS and EC parameters have shown an increasing trend from the water year 1385 onwards, but before and after the construction of the Gotvand reservoir dam, there is no distinct trend evident in both hydrometric stations. Under stable geological and pedological conditions of the watershed areas, with a decrease in river discharge, TDS and EC values increase. Figure (1) showed scree plot resulted from PCA method on ahvaz statition. A scree plot for explained variance and eigenvalues for the ten Principal Components (PCs) from the PCA analysis The highest percentage of water quality variations at the Gotvand station was influenced by two main factors. The first factor, which represents 49.79% of the changes in the Karun River's water quality at this station, includes the accumulation of salts (TDS, EC, SO4, Cl-, and Na+). The input of these parameters into the Karun River could be influenced by the dissolution of evaporite formations of the Gachsaran Formation in the upstream reservoir lake area of this station. The second factor, accounting for 13.83% of the changes in the water quality of the Karun River basin, is responsible. The highest correlation with this factor was found in parameters (pH, HCO3, and Mg2+).

The components of this factor indicate the acidity of surface waters, where the presence of HCO3 could be attributed to water passing through limestone formations or silicate weathering. the highest percentage of water quality variations at the Ahvaz station was influenced by two main factors. The first factor, representing 59% of the changes in the Karun River's water quality at this station, includes the accumulation of salts (TDS, EC, SO4, Cl-, Ca2+, Mg2+, Na+, and K+).

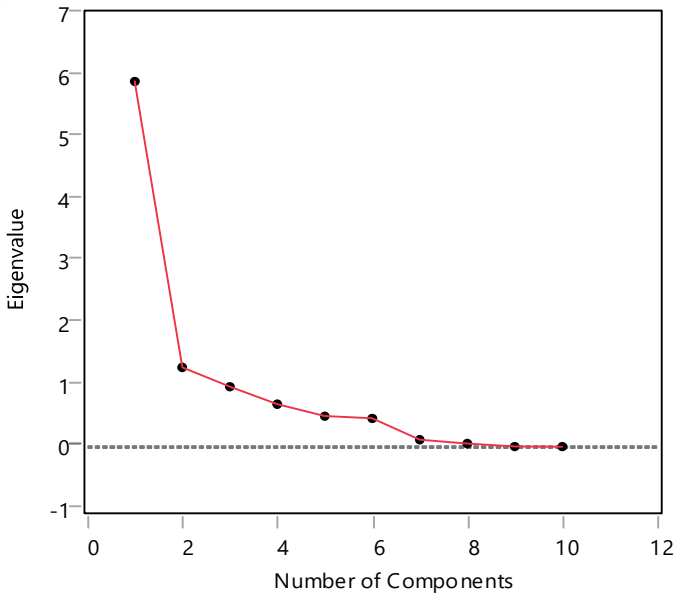


Fig. 1- Scree plot resulted PCA method on ahvaz statition

Conclusions

In this research, quantitative and qualitative components of the Karun River were investigated at the Gotvand hydrometric station downstream of the Gotvand reservoir and the Ahvaz hydrometric station in the city of Ahvaz using statistical methods such as principal component analysis, machine learning methods including decision tree and multiple variable linear regression, as well as graphical methods. The results indicate that during the years 2008 to 2011 and 2013 to 2015, which experienced lower than average precipitation, reflecting drought conditions, the reduction in river discharge has led to an increase in TDS (Total Dissolved Solids) and EC (Electrical Conductivity) values. According to the Piper diagram, the overall status of water samples taken at the Gotvand station shows a tendency towards non-carbonate hardness after the operation of the Gotvand dam in 2011. The water samples at this station exhibit anionic characteristics in the chloride zone or a mixed zone, and in terms of cations, they are positioned in the sodium-potassium or mixed zone. The Schoeller diagram results demonstrate that the water quality of the Karun River in terms of drinking water standards is acceptable at this station.

Acknowledgments

This article has been prepared from the results of the MSc. thesis of the first author and with the support of the university's research unit through the Second author's Grant by which the authors thank and appreciate the university's vice chancellor for research. We are grateful to the Research Council of Shahid Chamran University of Ahvaz for financial support In addition, the spiritual support of the scientific center "Improvement and maintenance of irrigation and drainage networks" is thanked and appreciated.

Conflict of Interest

The authors declared no potential conflicts of interest concerning the research, authorship, and publication of this article. Confirmation

Funding

The financial support of this research has been provided by Grant number SCU.WH1404.43525and we hereby thank the Honorable Vice Chancellor of Research from Shahid chamran university of ahvaz for their support.

Data Availability Statements

Data Availability Statement: All information and results are presented in the text of the article.

Authors' contribution

First author: Ghazaleh Salehpour, Data analysis
Second author: Mohammadreza Zayeri, Review of results
Third author: Zeinivand, Writing the article

References

1- Aazami, J., Moradpour, H., Zamani, A., & Kianimehr, N. 2018. Ecological quality assessment of Kor River in Fars Province using macroinvertebrates indices. *International Journal of Environmental Science Technology*, 17(4), 1–10.

2- Allahverdipour, P., & Sattari, M.T. 2023. Comparing the performance of the multiple linear regression classic method and modern data mining methods in annual rainfall modeling (Case study: Ahvaz city). Water and Soil Management and Modeling, 3(2), 125-142. DOI: 10.22098/mmws.2022.11337.1120

3- Astel, A., Biziuk, M., Przyjazny, A. & Namiesnik, J. 2006. Chemometrics in monitoring spatial and temporal variations in drinking water quality. *Water Research*, 8, 1706-1716

4- Babolhakami, A., & GholamiSefidkouhi, M. 2019. Analyze of Talar River Water Quality using Multivariate Techniques. *Journal of Watershed Management Research*. 9 (18) ,250-259. Doi: 10.29252/jwmr.9.18.250

© 2025 Shahid Chamran Universiry of Ahvaz, Ahvaz, Iran. This article is an open access article distributed under the terms and conditions of the Creative Commons Attribution 4.0 International (CC BY 4.0 license) (http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/).

علوم و مهندسی آبیاری جلد ۴۸، شماره‌ی۳، پاییز ۱۴۰۴، مقاله پژوهشی، ص. ۱۲۵-۱۴۵

کلاس‌بندی و مدل‌سازی مبتنی بر محاسبات نرم کیفیت آب رودخانه کارون: ایستگاه‌های آب‌سنجی گتوند و اهواز

غزاله صالح پور[۱]، محمدرضا زایری[۲*] و مهدی زینی وند[۳]

۱- دانش آموخته کارشناسی ارشد، گروه سازه‌های آبی، دانشکده مهندسی آب و محیط زیست، دانشگاه شهید چمران اهواز، اهواز، ایران

۲*- نویسنده مسئول، استادیار گروه سازه های آبی، دانشکده مهندسی آب و محیط زیست، دانشگاه شهید چمران اهواز، اهواز، ایران (m.zayri@scu.ac.ir)

۳- استادیار گروه سازه های آبی، دانشکده مهندسی آب و محیط زیست، دانشگاه شهید چمران اهواز، اهواز، ایران

دریافت: ۱۴۰۲/۱۰/۳۰ بازنگری: ۱۴۰۲/۱۲/۱۰ پذیرش: ۱۴۰۲/۱۲/۱۳ انتشار: ۱۴۰۴/۰۸/۱۴

چکیده

بررسی تغییرات کیفیت آب‌های سطحی همواره یکی از موضوعات مهم برای استفاده به‌منظور شرب، کشاورزی و صنعت بوده است از این رو آلودگی آب رودخانه‌ها در سال‌های گذشته می‌تواند خطری جدی برای انسان و اکوسیستم‌های طبیعی منظور شود. در این تحقیق به مطالعه کیفیت آب رودخانه کارون که یکی از بزرگترین منبع تأمین آب سطحی بخش‌های مختلف استان خوزستان می‌باشد در ایستگاه آب‌سنجی گتوند واقع در پایین دست سد گتوند و ایستگاه آب‌سنجی اهواز طی سال‌های آبی ۱۳۸۵ تا ۱۳۹۹ پرداخته شد. به‌منظور بررسی کیفیت آب از نمودارهای سری زمانی پایپر، شولر و دوروف استفاده گردید. نتایج کیفی آب رودخانه کارون در نمودار پایپر ایستگاه گتوند نشان می‌دهد نمونه‌های آب دارای تیپ کلروره سدیک است. همچنین اختلاف پارامترهای کیفیت آب رودخانه کارون در دوره‌های خشک (فروردین تا شهریور) و مرطوب (مهر تا اسفند) در ایستگاه گتوند ۲۰ درصدی و در ایستگاه اهواز ۱۰ درصدی می‌باشد. همچنین روش تجزیه و تحلیل مؤلفه اصلی نشان داد که تقریباً در هر دو ایستگاه ۷۰ درصد تغییرات کیفیت آب توسط دو عامل اول اتفاق می‌افتد. در ایستگاه گتوند بیشترین تغییرپذیری در پارامترهای (TDS، Ec، Na^+، Cl- و So_4) در دوره مرطوب رخ داده است. مهم‌ترین پارامتر مؤثر ورودی در پیش‌بینی مقدار TDS در ایستگاه اهواز با استفاده از مدل رگرسیون چند متغیره و درخت تصمیم پارامتر Na+ بوده است. نتایج به‌دست آمده از تحلیل رگرسیونی پارامتر TDS در ایستگاه هیدرومتری اهواز نشان می‌دهد که مدل‌های یادگیری ماشین می‌توانند به‌عنوان یک ابزار توانمند در پیش‌بینی کیفیت آب سطحی در موارد فقدان اندازه گیری این پارامتر مورد استفاده قرار گیرند به نحوی که عملکرد مدل درخت تصمیم با ضریب تعیین R^2=۰/۹۷ و مدل رگرسیون چند متغیره با ضریب تعیین R^2=۰/۹۵ در پیش بینی این پارامتر بوده است.

کلیدواژه‌ها: تحلیل مؤلفه‌های اصلی، درخت تصمیم، رگرسیون چند متغیره ، نمایش چند وجهی.

مقدمه

رودخانه‌ها منابع آب قابل حصول و در دسترس بوده و از دیرباز همواره جوامع انسانی و مراکز صنعتی در مجاورت آن‌ها برپا شده است. در دهه‌های اخیر افزایش جمعیت، گسترش صنایع و تولید انواع آلاینده‌ها در مناطق شهری، صنعتی و کشاورزی، آلودگی رودخانه‌ها را افزایش داده است. ورود مواد مغذی و آلاینده‌های تجزیه‌پذیر بیولوژیکی به رودخانه خصوصاً فاضلاب‌های خانگی و پساب‌های کشاورزی باعث آلودگی این منابع آبی می‌شود. محیط زنده رودخانه را به مخاطره می‌اندازد و مشکلات زیست محیطی متعددی را موجب می‌گردد. از این رو مدیریت کیفیت آب رودخانه‌ها به این دلیل که بیشتر در معرض مستقیم انواع آلاینده‌ها هستند از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است (Gholizadeh and Zibaei, 2020). تا دهه ۱۹۸۰ بیشتر تحقیقات در مورد فعالیت‌های انسانی و ایجاد اختلال در اکوسیستم‌های آب شیرین، براساس ارزیابی عوامل تنش‌زای فیزیکی و شیمیایی کیفیت آب بوده است. اما این رویکرد فقط شرایط را در زمان و مکان نمونه‌برداری در نظر می‌گیرد (Fierro et al. 2017; Aazami et al. 2018). شاخص‌های محیط زیستی ابزار مهمی است که می‌تواند در ارزیابی سلامت اکوسیستم آبی استفاده شود و از این شاخص‌ها می‌توان در تصمیم‌گیری کاربردی استفاده کرد (Pinto et al. 2009; Diaz et al. 2004). روش‌های آماری چند متغیره به‌طور فزاینده‌ای در ارزیابی کیفیت آب، تجزیه و تحلیل محیطی و انتخاب متغیرهای کیفی برای ایجاد طرح‌های پایش کیفیت آب استفاده می‌شود (Astel et al, 2006). به‌طور خلاصه روش‌های آماری چندمتغیره می‌توانند ارتباط بین پارامترهای فیزیک و شیمیایی از قبیل EC، PH و دما و همچنین رابطه بین متغیرها و نمونه‌ها را کشف کنند (Zhang et al, 2020). تاکنون تحقیق‌های مختلفی در زمینه استفاده از روش‌های آماری و یا محاسبات نرم در بررسی کیفیت آب‌های سطحی و زیرزمینی در مناطق مختلف انجام شده است (Haghiabi et al., 2018; Mansour-Bahmani et al., 2021; Nezaratian et al., 2021; Parsaie & Haghiabi, 2017; Qishlaqi et al., 2017).

DOI: 10.22055/jise.2024.45876.2114

Rooki et al (2017) در مطالعه‌ای به بررسی کیفیت آب زیرزمینی آبخوان دشت گناباد خراسان رضوی با استفاده از روش‌های آماری چندمتغیره و هوش مصنوعی پرداختند. در این تحقیق داده‌های هیدروشیمیایی اخذ شده از چاه‌های بهره‌برداری دشت گناباد که در جنوب استان خراسان رضوی واقع شده، طی یک دوره ۵ ساله (از ۸۵ تا ۹۰) مورد مطالعه قرار گرفته است. بررسی نتایج نشان می‌دهد که کیفیت آب در دشت متأثر از دو فاکتور است. فاکتور اول که ترکیب خطی عوامل Ca^{2+}، Mg^{2+}، Na^{+}، So_4^{2-}، TH،Cl^{-} و EC است به‌عنوان فاکتور شوری و سختی آب در دشت شناخته می‌شود. فاکتور دوم ترکیب CO_3،HCo_3 و pH است که بیانگر آلکالینیته آب بوده است. در ادامه مدل‌سازی پارامترهای کیفی EC،TDS و TH آب زیرزمینی با استفاده از پارامترهای شیمیایی یعنی یون‌های اصلی و pH با شبکه‌های عصبی مصنوعی انجام شد. مقایسه نتایج حاصل از پیش‌بینی شبکه عصبی با داده‌های صحرایی نشان‌دهنده قابلیت بالای این روش برای پیش‌بینی کیفیت آب از روی فقط چند کاتیون و آنیون و pH است، بنابراین در صورت کمبود مطالعه در یک منطقه می‌توان از این مدل‌ها برای پیش‌بینی کیفیت آب در نقاط مجهول استفاده کرد. Nurollahi et al. (2018) به بررسی عوامل مؤثر بر کیفیت آب زیرزمینی آبخوان دشت مشگین شهر در استان اردبیل با استفاده از روش‌های آماری چند متغیره ازجمله تحلیل خوشه‌ای و تحلیل عاملی با هدف بررسی منشأ احتمالی برخی فلزات سنگین در آب زیرزمینی پرداختند. نتایج آنالیز چندمتغیره نشان می‌دهد که اغلب فلزات سنگین در آب زیرزمینی از سازندهای آتشفشانی موجود در منطقه نشأت می‌گیرند و شوری و اسیدیته نقش مهمی در آزادسازی آن‌ها به آب زیرزمینی دارد. تحلیل عاملی نشان می‌دهد که فرایندهای زمین‌زاد با مجموع واریانس ۷۹/۹ درصد و عوامل انسان‌زاد با مجموع واریانس ۶/۶ درصد شیمی آب زیرزمینی منطقه را کنترل می‌کنند. Sayadi و Mahmoudlou (2020) در پژوهشی به بررسی و پیش‌بینی پارامترهای کیفی رودخانه گاماسیاب با استفاده از روش چند متغیره و سری‌های زمانی پرداختند. در این تحقیق از میانگین سالانه برخی پارامترهای کیفی مربوط به یک دوره آماری شش ساله در دو ایستگاه پل‌چهر و دوآب استفاده شد. نتایج نشان داد در ایستگاه پل‌چهر، به‌جز پارامتر pH، سایر پارامترهای کیفی دارای روند افزایشی بودند، در حالی‌که در ایستگاه دوآب، تمامی پارامترهای کیفی به‌جز منیزیم و سولفات روند کاهشی داشتند. براساس دیاگرام‌های مثلثی و گیبس به‌ترتیب رخساره غالب آب در هر دو ایستگاه کلیم–منیزیم–بی‌کربنات و عامل اصلی کنترل‌کننده شیمی آب واکنش آب– سنگ بود. Mohammadi et al. (2021) در مطالعه‌ای به ارزیابی هیدروشیمیایی منابع آب دریاچه سدجره با استفاده از روش‌های آماری چندمتغیره و روش‌های هیدروشیمیایی پرداختند. نتایج آنان نشان می‌دهد که تیپ آب و گروه‌بندی نمونه‌ها با استفاده از دیاگرام پایپر دارای تیپ سولفاته – کلسیم می‌باشند. بررسی شاخص‌های اشباع، نسبت‌های یونی، نمودار گیبس و همچنین نتایج حاصل از روش‌های آماری چندمتغیره، انحلال و فرسایش رسوبات حاصل از سازند گچساران را به‌عنوان عوامل اصلی نامطلوب شدن کیفیت آب دریاچه سدجره در بخش جنوب شرقی (خروجی یا دهانه سد) نشان می‌دهد. GhassemiDehnavi et al. (2016) به ارزیابی کیفی و کمی آب‌های سطحی با استفاده از آنالیز آماری در رودخانه ازنا لرستان پرداختند. نتایج آنان نشان می‌دهد که با نمودار پایپر تیپ آب‌های نشان‌دهنده بی‌کربناته کلسیکی هستند. همچنین با اعمال روش تحلیل مؤلفه‌های اصلی تعداد ۱۱ مؤلفه اصلی برای داده‌ها تعیین شد، که سه مؤلفه اول با بیش از ۷۰ درصد تغییرپذیری، جامعه آماری را توجیه می‌کنند که بیشترین میزان همبستگی بین مجموع مواد جامد محلول و کلر مشاهده شد. Gholizadeh و Zibaei (2020) به بررسی هیدروشیمی آب رودخانه چهل‌چای استان گلستان براساس نمودار پایپر، شولر، دورو، ویلکاکس، گیبس پرداختند. نتایج آنان نشان می‌دهد تیپ آب رودخانه به‌طور غالب بی‌کربنات کلسیم بوده است. آب منطقه مورد مطالعه توسط نمودار شولر برای شرب در حد قابل قبول و براساس نمودار ویلکاکس ۸۰ درصد نمونه‌ها در کلاس شور قابل استفاده برای کشاورزی ارزیابی شد. Malekian et al. (2016) در مطالعه‌ای به بررسی تغییرات زمانی و مکانی کیفیت آب زیرزمینی در دشت ورامین پرداختند. توزیع مکانی سه پارامتر سختی کل (TH، TDS و EC) برای تهیه تغییرات نقشه پهنه–بندی کیفیت آب زیرزمینی در یک دوره پنج ساله با استفاده از روش‌های میان‌یابی به کمک ترکیب منطق بولن و فازی مورد بررسی قرار گرفت. نتایج آنان نشان داد که نقشه‌های پهنه‌بندی کیفی آب در نواحی غرب و جنوب غرب این دشت براساس استاندارد آب آشامیدنی ایران، از لحاظ شرب نامطلوب است که بیشترین دلیل آن وجود پهنه‌های رسی نمکی با سولفات سدیم در این مناطق و ضخامت کم آبخوان در این قسمت می‌باشد. Kazemzadeh و Malekian (2016) به تجزیه و تحلیل پارامترهای کیفیت آب سطحی با استفاده از روش‌های آماری چندمتغیره بر حوزهٔ آبخیز آجی چای طی دورهٔ آماری ۱۳۶۰–۱۳۸۶ با استفاده از سه روش تحلیل خوشه‌ای (CA)، تحلیل تشخیص (DA) و تحلیل مؤلفه‌های اصلی (PCA) پرداختند. نتایج آنان نشان می‌دهد که کیفیت آب سطحی ایستگاه‌های قرار گرفته در خوشهٔ همگن یک بهتر از دو خوشهٔ همگن دیگر بوده است. همچنین تحلیل تشخیص نشان داد که مهم‌ترین پارامترهای تأثیرگذار بر کیفیت آب منطقهٔ مطالعاتی، پارامترهای HCO_3-، SAR، Na^{+}، SO_4 و Ca را شامل می‌گردد. Babolhakami و GholamiSefidkouhi (2019) در مطالعه‌ای به تجزیه و تحلیل کیفیت آب رودخانه تالار با استفاده از روش‌های چندمتغیره طی سال‌های ۲۰۱۴–۲۰۱۱ پرداختند. نتایج حاصل از تجزیه و تحلیل خوشه‌ای، ایستگاه‌ها را از نظر کیفیت آب به سه گروه تقسیم نمود. گروه اول شامل ایستگاه‌های پالندرودبار, کریکلا و تجون, گروه دوم شامل ایستگاه‌های شیرگاه و کیاکلا و گروه سوم شامل ایستگاه پل سفید بود. همچنین نتایج نشان داد

جریان پساب‌های صنعتی، خانگی، بیمارستان و کشاورزی از علل عمده نامناسب شدن کیفیت رودخانه تالار می‌باشد. از آنجاکه رودخانه کارون سهم عمده‌ای در تأمین آب موردنیاز بخش‌های مختلف استان خوزستان دارد، شناخت کیفیت آب آن به‌دلیل تغییرات احتمالی بخاطر ورود آلاینده‌های متعدد در مسیر آن ضروری است. بر این اساس، هدف اصلی این تحقیق ارائه چارچوب مناسبی برای پاسخ به وجود ارتباط میان پارامترهای فیزیکی و شیمیایی حد فاصل پایین دست سد گتوند و شهر اهواز بود. به‌منظور تحلیل کیفی با بهره‌گیری از روش‌های گرافیکی از قبیل نمودارهای پایپر، دوروف و شولر از پارامترهای کلسیم (Ca^{2+})، منیزیم (Mg^{2+})، پتاسیم (k^{+})، سدیم (Na^{+})، بی‌کربنات ($HC0_3$)، سولفات (SO_4)، کلراید (Cl^{-})، هدایت الکتریکی (Ec)، مجموعهٔ مواد جامد محلول در آب (TDS)، اسیدینه (PH) و دما استفاده شد. همچنین مطابق تحقیقات گذشته، در بیشتر مواقع از مدل رگرسیون ساده برای مدل‌سازی استفاده شده است. در این تحقیق با استفاده از روش آنالیز مؤلفه‌های اصلی (PCA) مهم‌ترین مؤلفه‌های تأثیرگذار بر مقدار TDS رودخانه کارون در شهر اهواز تعیین و پیش‌بینی این پارامتر با استفاده از مدل رگرسیون چندمتغیره و مدل درخت تصمیم مورد بررسی قرار گرفت.

مواد و روش‌ها

منطقهٔ مورد مطالعه

رودخانه کارون، پرآب‌ترین و طولانی‌ترین رودخانه‌ی کشور می‌باشد که از زردکوه بختیاری سرچشمه گرفته و با مسیری طولانی سلسله جبال زاگرس مرکزی را به دشت‌های خوزستان سرازیر می‌شود. منطقهٔ مورد مطالعه مطابق شکل (۱)، شامل دو ایستگاه هیدرومتری گتوند در پایین دست سد تنظیمی در موقعیت جغرافیای "۴۹°۴۸'۵۶/۶۷ طول شرقی و "۳۲°۱۵'۳۵/۸۹ عرض شمالی و ایستگاه هیدرومتری اهواز در شهر اهواز به فاصله ۱۴۰ کیلومتری از ایستگاه گتوند در موقعیت جغرافیای "۴۱°۴۸'۴۵/۴۸ طول شرقی و "۲۰°۳۱'۲۵/۶۷ عرض شمالی می‌باشد. دامنه‌های جنوبی رشته کوه زاگرس به‌علت وجود سازندهای تبخیری و همچنین اضافه شدن شاخه‌های نسبتاً شور پرآب با کیفیت نامناسب ازجمله شاخه‌های مرغاب، شور اندیکا و شور لالی که در بالادست سد گتوند علیا قرار دارند به‌صورت طبیعی باعث افزایش شوری آب رودخانه کارون می‌گردند و باتوجه به عبور این رودها از سازندهای تبخیری و شور ازجمله سازند گچساران، تأثیر بسیار عمده‌ای را روی شوری آب مخزن سد گتوند و افت کیفیت آن خواهند داشت. بیش از ۵۰ درصد طول مسیر رودخانه در بالادست ایستگاه هیدرومتری گتوند در بستری از سازند گچساران جریان دارد و آب رودخانه در تماس مستقیم و دائمی با این واحدهای تبخیری و قابل انحلال می‌باشد. از این‌رو برای تحلیل داده‌های کمی و کیفی جریان رودخانه کارون ابتدا کل داده‌های منابع آب از سازمان آب و برق استان خوزستان بین سال‌های آبی ۱۳۸۵ تا ۱۳۹۹ اخذ گردید. شاخص‌های آماری پارامترهای کیفی آب برداشت شده از ایستگاه‌های موجود مورد مطالعه ازجمله کلسیم (Ca^{2+})، منیزیم (Mg^{2+})، پتاسیم (k^{+})، سدیم (Na^{+})، بی کربنات ($Hc0_3$)، سولفات (SO_4)، کلراید (Cl^{-})، هدایت الکتریکی (Ec)، مجموعهٔ مواد جامد محلول در آب (TDS)، اسیدینه (PH) و دما در دو ایستگاه مورد مطالعه در جداول (۱) و (۲) نشان داده شده است.

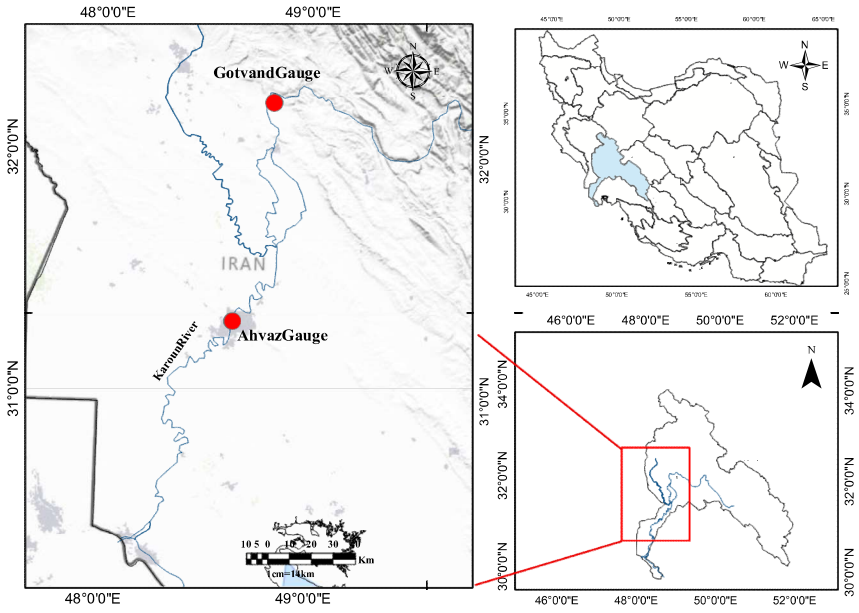


Fig. 1- Location of the gauge stations of the Gotvand and Ahvaz on the Karun river

شکل ۱- موقعیت ایستگاه‌های آب سنجی گتوند و اهواز در مسیر رودخانه کارون

DOI: 10.22055/jise.2024.45876.2114

جدول ۱- خصوصیات آماری نتایج مؤلفه‌های کیفی در ایستگاه آبسنجی گتوند

Table 1- Statistical characteristics of the results of water qualitative components in the gotvand station

parameter	K	Na	Mg	Ca	Cl	HCO3	So4	pH	EC	TDS	Temp
	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L		$\mu mho/cm$	mg/L	°C
mean	0.05	6.47	1.63	4.52	6.67	2.8	3.06	7.76	1254.9	789.52	19
standard deviation	0.02	3.59	0.82	1.23	3.53	0.33	1.47	0.25	437.11	272.79	2.91
minimum	0.01	1.77	0.02	1.58	1.71	1.5	0.03	7	520	15.42	5.4
maximum	0.15	21.44	6.18	8.64	19.79	3.92	10.3	8.3	2700	1730	28.4

جدول ۲ - خصوصیات آماری نتایج مؤلفه‌های کیفی در ایستگاه آبسنجی اهواز

Table 2- Statistical characteristics of the results of water qualitative components in the ahvaz station

parameter	K	Na	Mg	Ca	Cl	HCO_3	SO_4	pH	EC	TDS	Temp
	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L		$\mu mho/cm$	mg/L	°C
mean	0.08	11.72	3.8	6.65	11.14	3.34	7.51	7.65	2159.74	1376.95	21.9
standard deviation	0.04	4.04	1.12	1.76	3.99	0.48	2.39	0.29	553.6	351.19	4.72
minimum	0.01	2.58	1.26	2.6	3.13	0.64	1.6	6.7	660	422	11
maximum	0.21	23.8	6.5	15.6	24.5	4.39	15.51	8.3	3570	2271	31

رگرسیون خطی چند متغیره (MLR)

رگرسیون یکی از روش آماری است که از رابطهٔ بین دو یا چند متغیر از میان داده‌های مشاهداتی در جهت پیش‌بینی متغیرهای دیگر استفاده می‌کند. تاکنون مطالعه‌های بسیاری پیرامون پیش‌بینی پارامترهای کیفی آب رودخانه با استفاده از این مدل صورت پذیرفته شده است (Basu & Lokesh, 2014; Ewaid et al., 2018; Kadam et al., 2019; Nasir et al., 2011; Ouma et al., 2020; Zare Abyaneh, 2014). به‌طور کلی دو نوع رگرسیون خطی وجود دارد، رگرسیون خطی ساده و رگرسیون خطی چندمتغیره . در این روش‌ها فرض می‌شود که متغیرهای کمی به‌صورت خطی با یکدیگر مرتبط هستند (Nolan et al., 2015) معادلهٔ رگرسیون خطی چندمتغیره که در این مطالعه استفاده شده، در رابطهٔ (۱) نشان داده شده است.

$$P = a + bX_1 + cX_2 + dX_3 + \cdots \quad (۱)$$

در معادلهٔ رگرسیون خطی چندمتغیره، یک متغیر باید تخمین زده شود که به‌عنوان متغیر هدف (متغیر وابسته) که در رابطه (۱) با P نمایش داده شده است، درنظر گرفته می‌شود. متغیرهایی پیش‌بینی‌کننده یا متغیر مستقل با X_1، X_2، X3 و ... در نظر گرفته می‌شوند. ضرایب رگرسیون (a, b, c, d, …) بر مقدار متغیر وابسته تأثیر دارند که با روش‌های مختلف ازجمله حداقل کردن مجموع مربعات خطا محاسبه می‌شوند.

روش تحلیل مؤلفه‌های اصلی (PCA)

تحلیل مؤلفه‌های اصلی (PCA) یک روش پرکاربرد در علم آمار است که غالباً برای بررسی گروهی از متغیرهای همبسته می‌تواند مجموعهٔ بزرگی از متغیرها را به مجموعه‌ای کوچکتر کاهش دهد که قابلیت تفسیر و تحلیل بهتری داشته باشد. (Cheraghi et al., 2019) این روش به خصوص زمانی که ابعاد و همچنین ترکیب ساختار داده‌ها مشخص نباشد، مفید است. در این روش متغیرهای مستقل در یک فضای چندبعدی همبسته به یک مجموعه از مؤلفه‌های غیرهمبسته تفکیک می‌شوند که هریک از آن‌ها ترکیب

خطی از متغیرهای اصلی هستند لذا مزیت اصلی کاربرد این روش از بین بردن هم‌خطی در مدل‌ها به واسطه تعداد زیاد متغیرهای مؤثر در مدل است. برای ساده‌سازی و درک رابطه پیچیده بین پارامترهای کیفیت آب رودخانه با بهره‌مندی از این روش تحقیقات فراوانی صورت پذیرفته شده است (Fan et al., 2010; Kamal Jyoti Maji & Ramjee Chaudhary, 2019; Nasir et al., 2011; Ouyang, 2005; Petersen et al., 2001). مؤلفه‌های غیرهمبسته به‌دست آمده در این روش مؤلفه‌های اصلی نامیده می‌شوند که از بردارهای ویژه ماتریس کوواریانس متغیرهای اصلی به‌دست می‌آیند (Jolliffe and Cadima, 2016). تعداد مؤلفه‌های استخراج شده معمولاً با دو یا سه مؤلفهٔ اول، مقدار قابل توجهی از پراکندگی داده‌ها را نشان می‌دهد. بنابراین، انتخاب دو یا سه مؤلفهٔ اول برای ادامه کار کفایت می‌کند. اما در برخی از موارد لازم است از معیارهای دیگری برای یافتن تعداد مؤلفه‌های لازم بهره برد. این معیارها عبارتند از: آزمون اسکری، معیار مقدار ویژه ماتریس همبستگی و معیار بیشترین واریانس (Allahverdipour and Sattari, 2023).

روش درخت تصمیم (DT)

شناسایی محدوده‌های همگن و ارائه روابط ساده خطی برای هریک از این محدوده‌ها باعث افزایش دقت مدل می‌شود. بر این اساس برای حل مسائل پیچیده بهتر است که آن مسئله را به تعدادی مسئله کوچکتر و ساده‌تر تقسیم و در ادامه جواب‌ها را با هم ترکیب نمود. این ایده تعریف ابتدایی برای مدل‌های مبتنی بر کلاس‌بندی و خوشه‌بندی است. الگوریتم M5 نیز فضای پیچیده مسئله مورد بررسی را به تعدادی دسته تقسیم کرده و سعی می‌کند فضای هر زیردسته را به‌صورت ساده با استفاده از روابط ساده مدل‌سازی نماید. مدل درختی M5 یا الگوریتم M5 اولین بار توسط Quinlan (1992) به دنیای محاسبات مهندسی معرفی شد. بعدها این الگوریتم توسط Wang و Witten (1996) اصلاح شد و بهبود یافت. الگوریتم M5 مجموعه از روابط خطی را برای کلاس‌بندی فضای مسئله توسعه می‌دهد. مهم‌ترین مزیت این الگوریتم نسبت به سایر الگوریتم‌های دیگر را در قابلیت تفسیرپذیری مناسب‌تر از نظر ارتباط بین پارامترهای مؤثر دانست. الگوریتم M5 دسته‌بندی فضای مسئله را براساس خصوصیات یک متغیر انجام می‌دهد. بدین صورت که یک فضای مسئله را براساس خصوصیات یک متغیر به دوسته تقسیم می‌کند و سپس بعد از بررسی هر زیردسته می‌تواند آن زیردسته را به دو زیردسته دیگر تقسیم کند و بدین صورت می‌تواند تمام فضای مسئله را به زیر فضاهایی که تحلیل آن‌ها بسیار ساده است تقسیم کند. در این الگوریتم از پارامتر انحراف معیار مقادیر متغیر هدف به‌عنوان اندازه‌گیری خطا در هر گره و برای ایجاد زیرشاخه در آن گره استفاده می‌کند. الگوریتم M5 با توسعه شاخه تشکیل یک درخت داده که به درخت تصمیم معروف است. قابل ذکر است که این درخت، وارونه بوده به‌طوری‌که ریشه آن در بالا و شاخه‌های آن رو به پایین است. به‌عبارت دیگر، توسعه این درخت وارونه و از بالا رو به پایین است. این الگوریتم برخلاف مدل‌های دیگر الگوریتم‌های خطی مانند CART بعد از تقسیم فضای مسئله مورد بررسی به زیر دامنه‌ها، بجای ارائه یک عدد برای زیردسته یک رابطه ریاضی خطی چندمتغیره ارائه می‌دهد. از دیگر مزایای این الگوریتم نسبت به الگوریتم CART تولید فضای تقسیم شده کوچک‌تر، توسعه مدل قابل فهم‌تر و دقت بهتر این الگوریم اشاره نمود. همان‌طور که گفته شد در این الگوریتم از پارامتر انحراف معیار مقادیر متغیر هدف به‌عنوان معیار اندازه‌گیری خطا در هر گره برای ایجاد شاخه در آن گره استفاده می‌شود. بدین صورت که متغیری که موجب بیشترین کاهش انحراف معیار می‌شود به‌عنوان پارامتر مبنا برای ایجاد شاخه درنظر گرفته می‌شود. کاهش انحراف استاندارد (SDR)، تابع خطا در الگوریتم M5 بوده و به‌صورت رابطه (۲) به‌کار می‌رود.

$$SDR = sd(t) - \sum \frac{|T_i|}{|T|} \times sd(T_i) \qquad (۲)$$

در رابطه فوق T شامل نمونه‌هایی است که به گره مورد نظر رسیده‌اند Ti ها تعداد داده‌هایی هستند که از تقسیم کردن درگره مورد نظر براساس صفت انتخاب شده به‌دست آمده‌اند. Sd نیز معرف انحراف معیار است. الگوریتم M5 تمام سناریوهای ممکن را برای ایجاد شاخه براساس صفت خاص را بررسی کرده و در نهایت گزینه‌ای را انتخاب می‌کند که بتواند نسبت به سایر سناریوها تابع خطا را بیشتر کند. پس از تکمیل درخت، برای نمونه‌های موجود در هر زیرشاخه گره داخلی، یک مدل رگرسیون خطی چندمتغیره برازش داده می‌شود. شکل (۲) نحوه تقسیم فضای مسئله به اجزای کوچک‌تر و کاربرد مدل‌های خطی را برای هرکدام از زیر دامنه‌ها با توجه به ساختار درختی نشان می‌دهد.

DOI: 10.22055/jise.2024.45876.2114

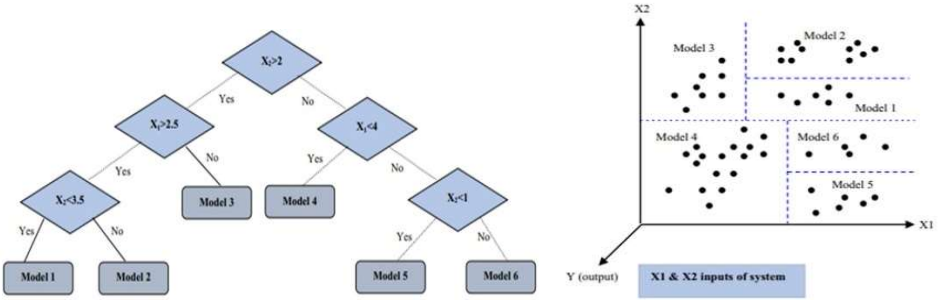


Fig. 2- Examples of the M5 algorithm a) Dividing the space of input parameters (X1×X2) into 6 areas and b) Expression of criteria for dividing the space of input parameters in the form of a tree

شکل ۲- نمونه هایی از الگوریتم M5 الف) تقسیم فضای پارامترهای ورودی (X1×X2) به ٦ ناحیه

ب) بیان معیار تقسیم فضای پارامترهای ورودی به‌صورت درختی

در طی ساخت مدل درختی توسط الگوریتم M5 فرایند جداسازی در گره‌های تقسیم ممکن است بارها تکرار شده و درنتیجه درخت بسیار بزرگی ایجاد شود. در این حالت دقت مدل برای داده‌های آموزشی با افزایش شاخه‌های درخت افزایش می‌یابد که این موضوع سبب می‌شود که مدل ایجاد شده روی‌داده‌های آموزشی نتایج مطلوبی ارائه دهد و ممکن است تعمیم مدل برای نمونه‌های مستقل آزمایشی دقت خوبی را نداشته باشد. در این حالت مدل بیش برازش شده است. برای غلبه بر این مسئله از روش هرس کردن ساختار درخت استفاده می‌شود. بعضی مواقع هرس کردن برخی از شاخه‌های ضعیف‌تر باعث بهبود قدرت پیش‌بینی مدل می‌شود. روش هرس کردن از تخمین خطای مورد انتظار که در هر گره برای هر داده آموزشی به‌دست می‌آید، استفاده می‌کند. در ابتدا قدرمطلق تفاضل بین مقادیر پیش‌بینی‌شده توسط مدل و مقادیر واقعی برای هرکدام از داده‌های آموزشی که به گره مربوطه می‌رسند، میانگین گرفته می‌شود. به‌دلیل اینکه این درخت‌ها برای این مجموعه از داده‌ها ساخته شده‌اند، متوسط خطای مورد انتظار را برای موارد جدید دست پایین پیش‌بینی خواهند کرد. برای جبران این موضوع، مقادیر خروجی بیانگر تعداد داده‌های آموزشی است، که به گره n ضرب می‌شوند که در آن (n+v)/(n-v) در تعداد پارامترهای مدل است. بنابراین این ضرب انجام می‌شود تا از دسته v موردنظر رسیده‌اند و پایین شدن مقدار خطا که ناشی از محاسبه آن براساس نمونه‌های آموزشی است، برای داده‌های جدید پرهیز شود. اگر خطای تخمین زده شده در منشأ کمتر باشد برگ و گره می‌تواند هرس شود. بعد از عملیات هرس کردن یکسری شکستگی (ناپیوستگی) بین مدل‌های خطی مجاور در برگ‌های درخت هرس شده، ایجاد می‌شود که این امر سبب از بین رفتن یکپارچگی سیستم می‌شود، به‌خصوص برای برخی از مدل‌ها که با استفاده از داده‌های آموزشی کمی ساخته شده‌اند. در فرآیند هموارسازی، هدف هموار کردن این نقاط شکستگی است. بنابراین مقدار تخمین زده شده، در هریک از برگ‌ها، مسیری بازگشتی را از برگ، به ریشه طی کرده و با ترکیب مدل به‌دست آمده در آن برگ با مدل‌های موجود در مسیر ریشه تا برگ مربوطه، مدل جدیدی به‌دست می‌آید در هر گره، این مقدار با مقدار پیشگویی شده توسط مدل خطی در آن گره با استفاده از رابطه (۳) ترکیب می‌شود.

$$P' = \frac{np+kq}{n+k} \qquad (۳)$$

مقدار P، مقدار پیش‌بینی‌شده‌ای است که به گره بالاتر انتقال داده‌شده است. 'P، در رابطه فوق مقدار پیش‌بینی مدل است که از پایین به این گره انتقال داده شده است. k، ثابت هموارسازی تعداد نمونه‌های آموزشی است که به گره رسیده‌اند و n، گره مربوطه است که به‌صورت پیش‌فرض برابر ۱۵ است. آزمایش‌های انجام‌شده توسط Wang و Witten (1996) نشان داده است که هموارسازی به میزان زیادی دقت پیش‌بینی‌ها را بهبود می‌بخشد (Najafzadeh and Mahmoudi, 2015). لازم به ذکر است که تمامی تجزیه و تحلیل‌های آماری این پژوهش در محیط آماری و برنامه‌نویسی پایتون و نمودارهای کیفی آب توسط نرم‌افزار AqQA رسم گردیدند (AQUACHEM, 2013).

معیارهای ارزیابی عملکرد مدل‌ها

به‌منظور ارزیابی دقت و میزان عملکرد مدل‌های بررسی شده در این پژوهش و مقایسه آنها با پارامتر TDS مشاهداتی از شاخص‌های ضریب تبیین (R^2)، جذر میانگین مربعات خطاها (RMSE) استفاده شد (Motiee et al., 2020). رابطه‌های (۴) و (۵) معیارهای آماری فوق را نشان می‌دهند:

$$R^2 = \frac{[\sum_{i=1}^{N}(O_i - \bar{O}_i)(P_i - \bar{P}_i)]^2}{\sum_{i=1}^{N}(O_i - \bar{O}_i)^2 \sum_{i=1}^{N}(P_i - \bar{P}_i)^2} \qquad (۴)$$

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^{N}(O_i - P_i)^2}{N}} \qquad (۵)$$

در رابطه‌های فوق O_i مقادیر مشاهداتی (واقعی)، P_i مقادیر پیش‌بینی شده، $\bar{O}_i$ میانگین مقادیر مشاهداتی، $\bar{P}$ میانگین مقادیر پیش‌بینی شده و N تعداد مشاهدات هستند. لازم به ذکر است مقادیر R^2 بیشتر و مقادیر RMSE کمتر، نشان‌دهندهٔ دقت بیشتر و عملکرد بهتر مدل هستند.

نتایج و بحث

نمودار سری زمانی

در شکل‌های (۳) و (۴) تغییرات زمانی مقادیر TDS و EC رودخانه کارون در ایستگاهای آب‌سنجی گتوند و اهواز در دوره مرطوب (مهر تا اسفند) و دوره خشک (فروردین تا شهریور) نشان داده شده است. تغییرات پارامترهای TDS و EC از سال آبی ۱۳۸۵ به‌صورت افزایشی بوده ولی قبل و بعد از ساخت سد مخزنی گتوند در هر دو ایستگاه آب‌سنجی روند مشخصی را نشان نمی‌دهد. در شرایط ثابت زمین‌شناسی و خاک‌شناسی حوضه‌های آبریز با کاهش آورد رودخانه مقادیر TDS و EC افزایش می‌یابد که این روند همان‌گونه که نشان داده شده است در طی سال‌های ۱۳۸۷ تا ۱۳۹۰ همچنین سال‌های ۱۳۹۲ تا ۱۳۹۴ که میزان ریزش‌های جوی کمتر از میانگین بوده که مؤید شرایط خشکسالی است، سبب افزایش مقادیر TDS و EC شده است و همچنین در وقوع شرایط سیلابی (رنگ قرمز) سبب کاهش این مقادیر شده است. همچنین در ایستگاه گتوند اختلاف ۲۰ درصدی پارامترهای کیفیت آب رودخانه کارون در دوره‌های خشک و مرطوب نشان داده شده است که این مقدار در ایستگاه اهواز اختلاف ۱۰ درصدی را نشان می‌دهد. مقایسه مقدار هدایت الکتریکی آب (EC) از محل سد تنظیمی گتوند تا اهواز رشد دو برابری را نشان می‌دهد که این افت کیفیت آب در ایستگاه اهواز می‌تواند بر اثر عواملی چون افزایش سطح تماس آب مخزن سد گتوند با لایه‌های انحلال‌پذیر نمک خصوصاً در توده گچساران و یا ورود آب برگشتی از زمین‌های کشاورز به‌ویژه نیشکر به رودخانه کارون، رودخانه شوردشت بزرگ، پساب حاصل از حوضچه‌های پرورش ماهی در حاشیه گرگر و پساب صنعتی مانند صنایعی نظیر نیروگاه‌های حرارتی تولید برق رامین و زرگان و پساب شهری باشد.

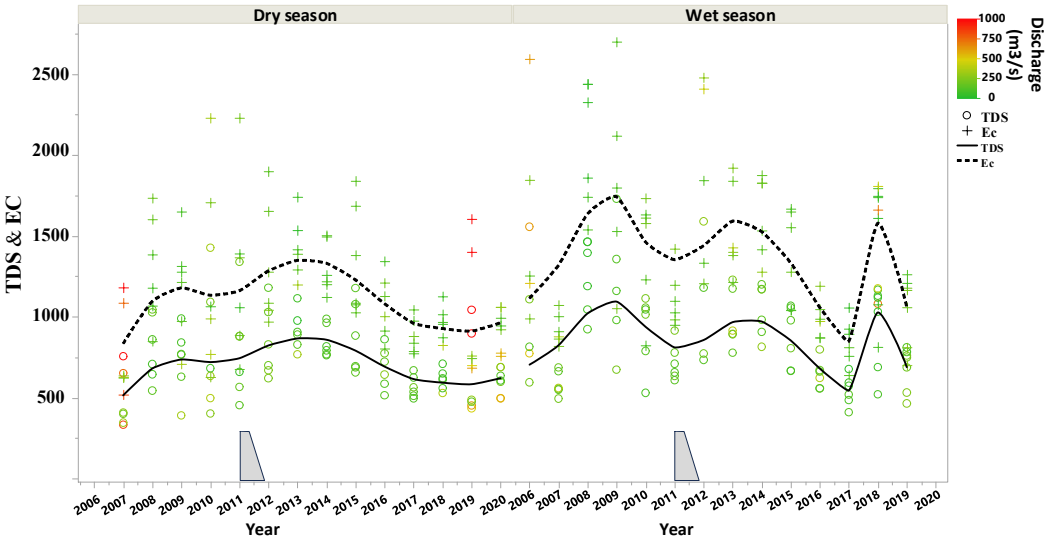


Fig. 3- Time changes of TDS and EC of Karun River at Gotvand station in wet and dry periods

شکل ۳- تغییرات زمانی TDS و EC رودخانه کارون در محل ایستگاه گتوند در دوره مرطوب و دوره خشک

DOI: 10.22055/jise.2024.45876.2114

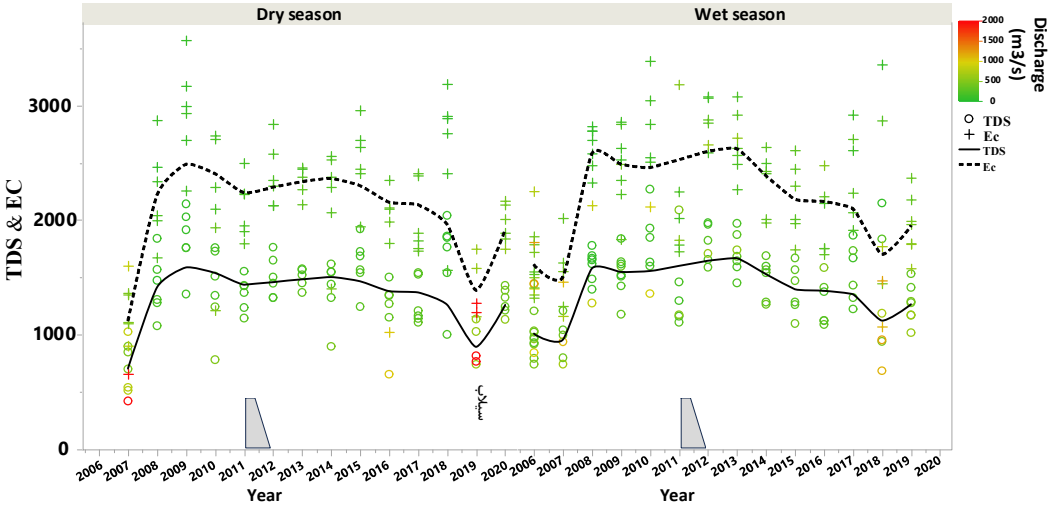


Fig. 4- Time changes of TDS and EC of Karun River at Ahvaz station in wet and dry periods
شکل ٤- تغییرات زمانی TDS و EC رودخانه کارون در محل ایستگاه اهواز در دوره مرطوب و دوره خشک

بررسی هیدروشیمیایی کیفیت آب ایستگاه هیدرومتری گتوند

به‌منظور بررسی کیفیت آب رودخانه کارون، از روش‌های گرافیکی از قبیل نمودارهای پایپر (Piper diagram)، دوروف (Durove diagram) و شولر (Schoeller diagram) استفاده شد. نمودار هیدروشیمیایی پایپر یکی از روش‌های تشخیص سریع و آسان نوع کلی آب و دسته‌بندی آن است که در این مطالعه استفاده شد. نمودار پایپر از دو قسمت مثلثی و یک بخش لوزی‌شکل تشکیل شده است. نسبت هر کاتیون به کل کاتیون‌ها و نسبت هر آنیون به کل آنیون‌ها، برای هرنمونه برحسب درصد محاسبه شده و به‌ترتیب در مثلث‌های مربوط به کاتیون‌ها و آنیون‌ها رسم می‌شوند (An et al., 2024; Palaniselvan et al., 2024). نمودار دوروف خیلی شبیه به نمودار پایپر است اما کاتیون‌ها و آنیون‌ها در دو طرف یک مربع رسم می‌شوند (Das, 2023; Liu et al., 2023). نمودار شولر برای تعیین کیفیت آب شرب به‌کار می‌رود. در این نمودار، پارامترهای کیفی به‌صورت مجزا، به‌صورت میله‌ای و در مقیاس لگاریتمی نشان داده شده‌اند (Anuja et al., 2023). از اتصال مقادیر مربوط به هر نمونه آب، خطی شکسته ایجاد می‌شود که از روی آن می‌توان کیفیت آب را برای شرب تعیین کرد (Kord, 2020). در شکل (۵) دیاگرام پایپر برای نمونه‌های آب برای ایستگاه گتوند در سال‌های پیش از احداث سد گتوند و پس از آن آمده است. با توجه به نمودارهای یادشده می‌توان گفت که وضعیت کلی نمونه‌های آب برداشت شده در ایستگاه گتوند تیپ کلروره سدیک که پس از بهره‌برداری از سد گتوند در سال ۱۳۹۰ تمایل به سختی دایم (غیرکربناته) دارد. نمونه‌های آب در این ایستگاه از لحاظ آنیونی در زون کلردار یا مخلوط و به لحاظ کاتیونی سدیم- پتاسیم یا مخلوط قرار داشته‌اند. در شکل (۶) از دیاگرام دوروف که اساس آن درصد مقادیر کاتیون‌ها و آنیون‌ها عمده‌ی آب است مشاهده می‌شود، با گذشت زمان از احداث سد مخزنی گتوند نمونه‌های آب روی روند مربوط به انحلال یا آمیختگی قرار دارند بنابراین ترکیب آب رودخانه کارون در این ایستگاه بیشتر توسط فرآیندهای انحلال کانی‌ها یا واکنش بین آب و سنگ متأثر از انحلال سازند گچساران در منطقه می‌باشد. نمودار شولر در شکل (۷) ترسیم شده است. ارزیابی نمودار شولر نشان داد که خطوط ارتباطی غلظت یون‌ها ناحیه Ca-Mg موازی نیستند که نشان می‌دهد آب از منابع نسبتاً متفاوتی نشأت گرفته است. به‌طور کلی، نتایج نمودار شولر نشان داد وضعیت کیفی آب رودخانه کارون از نظر شرب در ایستگاه گتوند قابل قبول است.

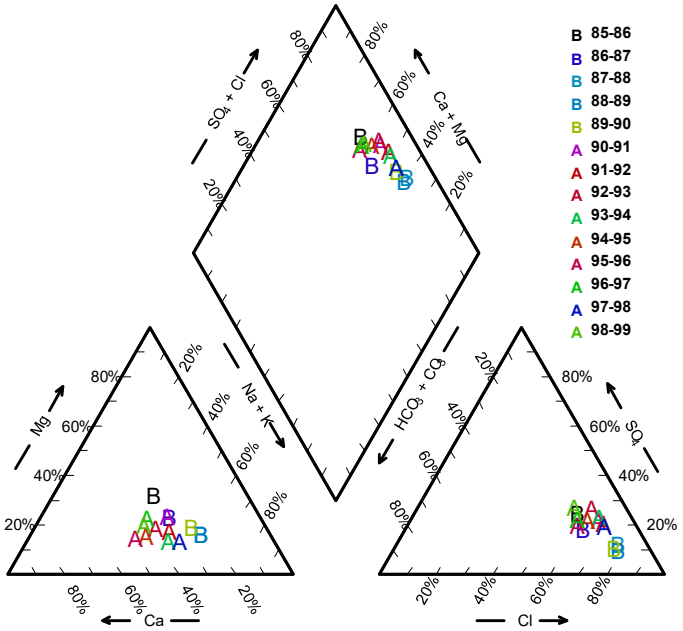


Fig. 5- Piper diagram related to the water quality parameters of the Karun River at the Gotvand gauge station between the years before and after the construction of the Gotvand reservoir dam.

شکل ۵-نمودار پایپر مربوط به پارمترهای کیفیت آب رودخانه کارون در ایستگاه هیدرومتری گتوند بین سال‌های قبل و بعد از احداث سد مخزنی گتوند

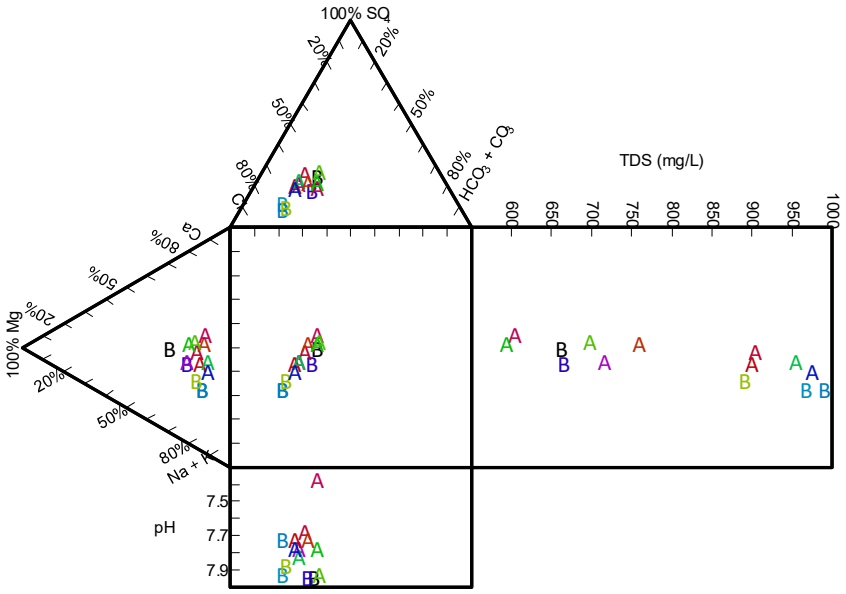


Fig. 6- Durove diagram related to the water quality parameters of the Karun River at the Gotvand gauge station between the years before and after the construction of the Gotvand reservoir dam.

شکل ٦- نمودار دروف مربوط به پارمترهای کیفیت آب رودخانه کارون در ایستگاه هیدرومتری گتوند بین سال‌های قبل و بعد از احداث سد مخزنی گتوند

DOI: 10.22055/jise.2024.45876.2114

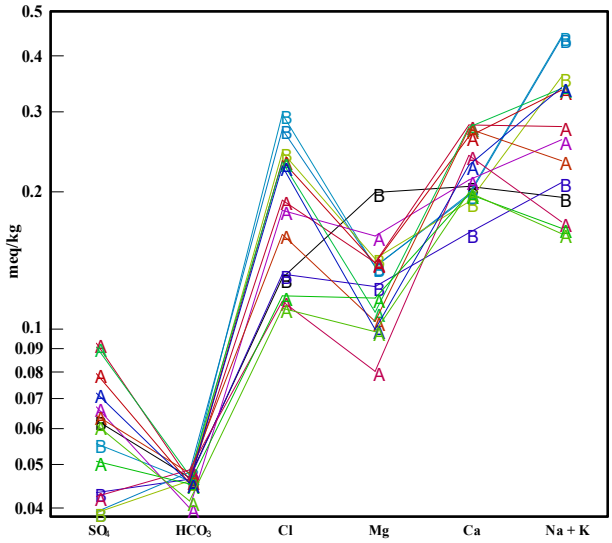


Fig. 7- Schoeller diagram related to the water quality parameters of the Karun River at the Gotvand gauge station between the years before and after the construction of the Gotvand reservoir dam.
شکل ۷- نمودار شولر مربوط به پارامترهای کیفیت آب رودخانه کارون در ایستگاه هیدرومتری گتوند بین سال‌های قبل و بعد از احداث سد مخزنی گتوند

تحلیل مؤلفه‌های اصلی

همان‌گونه که بیان شد روش تحلیل مؤلفه‌های اصلی برای کاهش تعداد متغیرها از ترکیب خطی متغیرهای مشابه استفاده می‌نماید که بیشترین تغییرپذیری را دارند و به‌عنوان راهکاری مناسب برای کاهش تعداد ورودی‌ها محسوب گردد (Mohammadi et al., 2021). با توجه به جدول (۳ الف) بیشترین درصد تغییرات کیفیت آب ایستگاه گتوند توسط دو مؤلفه اصلی اتفاق افتاد، عامل اول که ۴۹/۷۹ درصد از تغییرات کیفیت آب رودخانه کارون در این ایستگاه را نشان می‌دهد شامل تجمع املاح (TDS، EC، So_4، Cl^- و Na^+) است. به‌وجودآورنده این پارامترها در رودخانه کارون می‌تواند تحت تأثیر از انحلال رخنمون‌های تبخیری سازند گچساران در محدوده ی دریاچه سد در بالادست این ایستگاه باشد. عامل دوم ۱۳/۸۳ درصد از تغییرات کیفیت آب حوضه رودخانه کارون را سبب می‌شود. بیشترین همبستگی با این مؤلفه را پارامترهای (pH، HCO_3 و Mg^{2+}) داشته‌اند. اجزای این مؤلفه نشان‌دهنده اسیدیته آب‌های سطحی می‌باشند که قالب بودن HCO_3 می‌تواند ناشی از عبور آب از سازندهای آهکی و یا هوازدگی سیلیکات‌ها باشد. با توجه به جدول (۳ ب) بیشترین درصد تغییرات کیفیت آب ایستگاه اهواز توسط دو مؤلفه اصلی اتفاق افتاد، عامل اول که ۵۹ درصد از تغییرات کیفیت آب رودخانه کارون در این ایستگاه را نشان می‌دهد شامل تجمع املاح (TDS، EC، So_4، Cl^-، Ca^{2+}، Mg^{2+}، Na^+ و K^+) است. مؤلفه‌های این عامل نشان‌دهنده یون‌ها و مواد معلق در رودخانه کارون می‌باشد که می‌تواند تحت تأثیر تداخل آب زهکش کشاورزی با آب رودخانه در بالادست این ایستگاه قلمداد گردد. عامل دوم ۱۲/۹۴ درصد از تغییرات کیفیت آب در این ایستگاه را موجب می‌شود. بیشترین همبستگی با این مؤلفه را پارامترهای (pH، HCO_3 و K^+) داشته‌اند. اجزای این مؤلفه نشان‌دهنده اسیدیته آب می‌باشند که تغییرات pH یکی از عوامل مهم در فرآیندهای شیمیایی است که موجب رسوب گذاری و انحلال کربنات کلسیم (HCO_3) می‌شود.

در شکل (۸) نمایش موقعیت متغیرها کیفی آب رودخانه کارون به‌ترتیب در ایستگاه‌های گتوند و اهواز نسبت به مؤلفه‌های اصلی در روش PCA نشان داده شده است. این نمایش چندوجهی که به نمودار بای پلات معروف است روش بسیار مناسبی در این تحقیق برای بررسی الگوی فصلی بین پارامترهای کیفی آب رودخانه کارون می‌باشد. همان‌گونه که مشاهده می‌شود در ایستگاه گتوند بیشترین تغییرپذیری در پارامترهای (TDS، Ec، Na^+، Cl^- و So_4) در فصول پاییز و زمستان رخ داده است و با توجه به اینکه هدایت الکتریکی (Ec) معرف قدرت یونییک محلول برای انتقال جریان الکتریکی است و میزان هدایت الکتریکی به عناصر محلول در آب بستگی دارد درنتیجه با افزایش عناصر محلول در آب رودخانه مقدار هدایت الکتریکی افزایش یافته است. همچنین اسیدیته آب (pH) در بهار و تابستان بیشترین تغییرپذیری و افزایش را داشته است. در ایستگاه اهواز پارامترهای (TDS، Ec، Na^+، Cl^- و So_4) در فصل زمستان و بهار بیشترین تغییرپذیری را داشته و میزان اسیدیته آب (pH) در تابستان و پاییز در این ایستگاه افزایش محسوسی مشاهده می‌شود.

جدول ۳- نتایج ایجاد کننده بیشترین واریانس برمبنای روش PCA .: الف- ایستگاه گتوند و ب- ایستگاه اهواز

Table 3- The results of the most variance based on the PCA: a) Gotvand station and b) Ahvaz station

a) Gotvand station

variable	principal component	
	second	first
TDS	0.05	0.41
Ec	0.03	0.44
pH	0.51	-0.08
So4	0.12	0.33
HCO_3	-0.55	0.01
Cl-	0.03	0.42
Ca^{2+}	-0.36	0.29
Mg^{2+}	0.52	0.14
Na^{+}	0.03	0.42
K^{+}	-0.12	0.25
Percentage of variance	13.83	49.79

b) Ahvaz station

variable	principal component	
	second	first
TDS	0.12	0.4
Ec	0.09	0.40
pH	0.73	-0.08
So4	0.20	0.34
HCO_3	-0.52	0.12
Cl-	0.03	0.38
Ca^{2+}	-0.03	0.31
Mg^{2+}	0.1	0.27
Na^{+}	0.07	0.39
K^{+}	-0.32	0.27
Percentage of variance	12.49	59.00

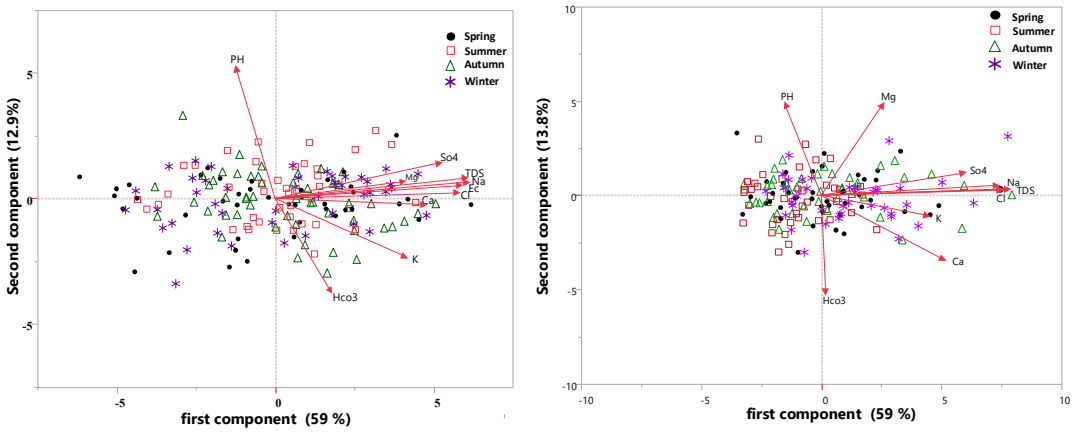


Fig. 8- Biplot of the quality parameters of the Karun River at the Gotvand (a) and the Ahvaz gauge station (b) in different seasons

شکل ۸- نمودار بای پلات پارامترهای کیفی رودخانه کارون در ایستگاه هیدرومتری گتوند (الف) و ایستگاه هیدرومتری اهواز (ب) در فصول مختلف سال

تحلیل رگرسیون پارامتر TDS در ایستگاه هیدرومتری اهواز

به‌منظور بررسی پارامترهای مؤثر بر مؤلفه TDS آب رودخانه کارون در ایستگاه اهواز از دو روش رگرسیون خطی چندمتغیره (Multiple Linear Regression) و روش درخت تصمیم (Decision Tree) استفاده شد. همان‌گونه که بیان شد، الگوریتم درخت تصمیم فضای مسئله را به چندین دسته کلاس‌بندی کرده و به هرکدام از دسته‌ها یک رابطه خطی (یک و یا چندمتغیره) برازش

DOI: 10.22055/jise.2024.45876.2114

می‌دهد. مهمترین مزیت این الگوریتم نسبت به سایر الگوریتم‌های دیگر را در قابلیت تفسیرپذیری مناسب‌تر از نظر ارتباط بین پارامترهای مؤثر دانست. به‌منظور صحت‌سنجی مدل‌های نامبرده شده لازم است که ابتدا داده‌های جمع‌آوری شده به دو دسته آموزش و آزمایش تقسیم‌بندی شوند. قابل ذکر است که تعداد داده‌های جمع‌آوری شده در ایستگاه آب‌سنجی اهواز برابر ۱۹۰ است که در این تحقیق ۸۰ درصد داده‌ها به آموزش و ۲۰ درصد مابقی به آزمایش تخصیص داده شد. معادله (۶) رابطه رگرسیونی پارامتر TDS با سایر مؤلفه‌های کیفی برداشت شده را نشان می‌دهد. با توجه به شکل (۹) شاخص‌های آماری $R^2 = 0.94, RMSE =$ 86.8 و در مرحله آزمایش عبارت از $R^2 = 0.95, RMSE =$ 80.19 است.

$$TDS = -113.49 + 29.75 \times PH + 10.44 \times SO_4 + 4.77 \times HCO_3 + 18.18 \times Cl + 49.77 \times Ca + 41.83 \times Mg + 45.13 \times Na - 670.31 \times K \quad (۶)$$

در ادامه عملکرد مدل درخت تصمیم (DT) برای تخمین پارامتر TDS بررسی شد. با توجه به شکل (۱۰) شاخص‌های آماری مدل درخت تصمیم توسعه داده شده در مرحله آموزش عبارت از $R^2 = 0.96, RMSE = 71.3$ و در مرحله آزمایش عبارت از $R^2 = 0.97, RMSE = 69.4$ است. در این شکل نتایج مدل درخت تصمیم در مراحل آموزش و آزمایش در مقابل مقادیر مشاهداتی ترسیم شده است. همچنین در شکل (۱۱) ساختار درخت تصمیم در برآورد میزان TDS نشان داده شده است.

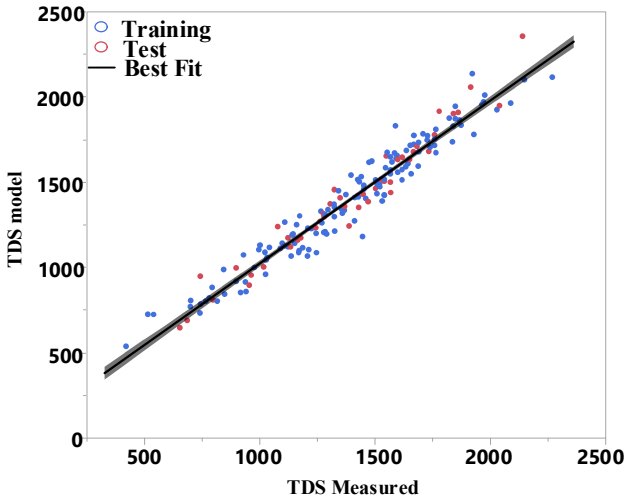


Fig. 9- The results of the developed MLR model in the training and testing stage
شکل ۹- نتایج مدل MLR در مرحله آموزش و آزمایش در پیش بینی پارامتر TDS

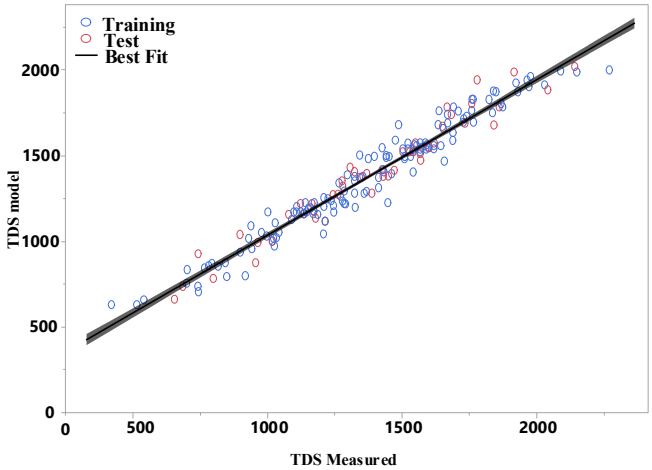


Fig. 10- Results of the developed DT model in the training and testing stage
شکل ۱۰- نتایج مدل DT در مرحله آموزش و آزمایش در پیش بینی پارامتر TDS

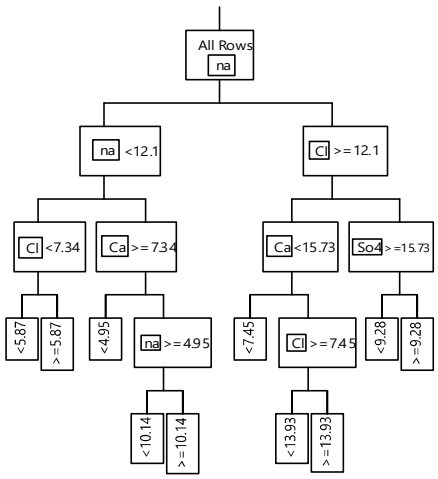


Fig. 11- Structure of tree in the developed to estimate the TDS
شکل ۱۱- ساختار درخت تصمیم توسعه داده شده جهت تخمین TDS

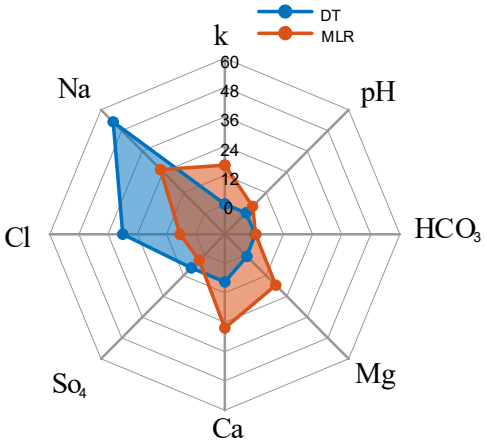


Fig. 12-The impact of different input components to the MLR and DT models in predicting the TDS
شکل ۱۲- میزان تاثیر مؤلفه‌های مختلف ورودی به مدل MLR (مساحت قرمز رنگ) و مدل DT (مساحت آبی رنگ) در پیش بینی TDS

در شکل (۱۲) سهم پارامترهای مؤثر ورودی در فرایند توسعه مدل‌های MLR (ناحیه قرمز رنگ) و DT (ناحیه آبی رنگ) در پیش‌بینی میزان TDS نشان داده شده است. همان‌گونه که مشاهده می‌شود در روش MLR بیشترین مؤلفه‌های تأثیرگذار ورودی به مدل پارامتر Na^+ با ۲۶ درصد و پارامتر Ca با ۲۵ درصد بوده است و در روش DT بیشترین مؤلفه‌های تأثیرگذار پارامتر Na^+ با مقدار ۵۳ درصد و پارامتر Cl با ۳۰ درصد در مقدار پیش‌بینی TDS بوده است.

نتیجه‌گیری

در این پژوهش، با استفاده از روش‌های آماری نظیر تحلیل مؤلفه‌های اصلی و روش‌های یادگیری ماشین نظیر درخت تصمیم و رگرسیون چندمتغیره خطی و همچنین روش‌های گرافیکی به بررسی مؤلفه‌های کمی و کیفی رودخانه کارون در ایستگاه هیدرومتری گتوند در پایین دست سد مخزنی گتوند و ایستگاه هیدرومتری اهواز در شهر اهواز طی سال‌های آبی ۱۳۸۵ تا ۱۳۹۹ پرداخته شد. نتایج حاصل از نمودار سری زمانی نشان می‌دهد با کاهش آورد رودخانه در طی سال‌های ۱۳۸۷ تا ۱۳۹۰ همچنین سال‌های ۱۳۹۲ تا ۱۳۹۴ که موید شرایط خشکسالی است، سبب افزایش مقادیر TDS و EC شده است. با توجه به نمودار پایپر می‌توان بیان داشت که وضعیت کلی نمونه‌های آب برداشت شده در ایستگاه گتوند تیپ کلروره سدیک که پس از بهره‌برداری از سد گتوند در سال ۱۳۹۰ تمایل به سختی دایم (غیر کربناته) دارد.

DOI: 10.22055/jise.2024.45876.2114

نمونه‌های آب در این ایستگاه از لحاظ آنیونی در زون کلردار یا مخلوط و به لحاظ کاتیونی سدیم- پتاسیم یا مخلوط قرار داشته‌اند. نتایج نمودار شولر نشان داد وضعیت کیفی آب رودخانه کارون از نظر شرب در این ایستگاه قابل قبول است. بیشترین درصد تغییرات کیفیت آب ایستگاه گتوند توسط دو مؤلفه اصلی اتفاق افتاد، عامل اول که ۴۹/۷۹ درصد از تغییرات کیفیت آب رودخانه کارون در این ایستگاه را نشان می‌دهد شامل تجمع املاح (TDS، EC، So^4، Cl^- و Na^+) است. به‌وجودآورنده این پارامترها در رودخانه کارون می‌تواند تحت تأثیر از انحلال رخنمون‌های تبخیری سازند گچساران در محدوده‌ی دریاچه سد در بالادست این ایستگاه باشد. بیشترین درصد تغییرات کیفیت آب ایستگاه اهواز توسط دو مؤلفه اصلی اتفاق افتاد، عامل اول که ۵۹ درصد از تغییرات کیفیت آب رودخانه کارون در این ایستگاه را نشان می‌دهد شامل تجمع املاح (TDS، EC، So_4، Cl^-، Ca^{2+}، Mg^{2+}، Na^+ و K^+) است. مؤلفه‌های این عامل نشان‌دهنده یون‌ها و مواد معلق در رودخانه کارون می‌باشد که می‌تواند تحت تأثیر تداخل آب زهکش کشاورزی با آب رودخانه در بالادست این ایستگاه قلمداد گردد. نتایج به‌دست آمده از تحلیل رگرسیونی پارامتر TDS در ایستگاه هیدرومتری اهواز نشان می‌دهد که عملکرد مدل عملکرد مدل درخت تصمیم در پیش‌بینی این پارامتر از مدل رگرسیون چندمتغیره با شاخص‌های در مرحله آزمایش $R^2 = 0.97, RMSE = 69.4$ دقیق‌تر بوده است همچنین در این روش بیشترین مؤلفه‌های تأثیرگذار در پیش‌بینی پارامتر TDS، پارامتر Na^+ با مقدار ۵۳ درصد و پارامتر Cl با ۳۰ درصد بوده است.

تشکر و قدردانی

این مقاله از رساله پایان نامه نویسنده اول و با حمایت واحد پژوهشی دانشگاه از طریق پژوهانه نویسنده دوم تهیه شده که بدینوسیله نویسندگان از معاونت پژوهشی دانشگاه شهید چمران اهواز تشکر و قدردانی میکنند. از شورای پژوهشی دانشگاه شهید چمران اهواز به خاطر حمایت مالی کمال تشکر و قدردانی را داریم. ضمناً از حمایت‌های معنوی مرکز علمی "بهسازی و نگهداری شبکه‌های آبیاری و زهکشی" تشکر و قدردانی می‌شود.

تضاد منافع نویسندگان

نویسندگان این مقاله اعلام می‌دارند که هیچ گونه تضاد منافعی در خصوص نگارش و انتشار مطالب و نتایج این پژوهش ندارند.

منابع مالی

حمایت‌های مالی این تحقیق از محل اعتبار پژوهشی شماره پژوهانه SCU.WH1404.43525 صورت گرفته است.

دسترسی به داده‌ها

همه اطلاعات و نتایج در متن مقاله ارائه شده است.

مشارکت نویسندگان

نویسنده اول: غزاله صالح‌پور، تجزیه و تحلیل داده‌ها.
نویسنده دوم: محمدرضا زایری، بررسی نتایج، نگارش مقاله.
نویسنده سوم: مهدی زینی وند، بررسی مقاله.

References

1- Aazami, J., Moradpour, H., Zamani, A., & Kianimehr, N. 2018. Ecological quality assessment of Kor River in Fars Province using macroinvertebrates indices. *International Journal of Environmental Science Technology*, 17(4), 1–10. DOI: https://doi.org/10.1007/s13762-018-2107-y

2- An, R., Liu, J., Gao, Z., Li, C., & Peng, Y. 2024. Hydrochemical Characterization, Controlling Factors and Water Quality of Surface Water in Shandong Province, North China. *Journal of Earth Science*, 35(1), 155–166. DOI: https://doi.org/10.1007/s12583-021-1441-z

3- Allahverdipour, P., & Sattari, M.T. 2023. Comparing the performance of the multiple linear regression classic method and modern data mining methods in annual rainfall modeling (Case study: Ahvaz city). *Water and Soil Management and Modeling*, 3(2), 125-142. DOI: 10.22098/mmws.2022.11337.1120

4- Anuja, S. A., Kavitha, P., Hency, P. M., Jothi, C. H., & Rose, R. J. 2023. Comparative study of water quality between upstream and downstream of Thamirabarani River using multivariate statistical tools. *Scientific Research and Essays* 18(3), pp. 33–44. DOI: https://doi.org/10.5897/SRE2023.6774

5- Ashrafi, S. M., & Mahmoudi, M. 2019. Developing a semi-distributed decision support system for great Karun water resources system. *Journal of Applied Research in Water and Wastewater*, 6(1), 16–24. https://doi.org/10.22126/arww.2019.1042

6- Astel, A., Biziuk, M., Przyjazny, A. & Namiesnik, J. 2006. Chemometrics in monitoring spatial and temporal variations in drinking water quality. *Water Research*, 8, 1706-1716.

7- AQUACHEM. 2013. Schlumberger Limited. Available at http://www.swstechnology.com. Accessed 09/07/2013.

8- Babolhakami, A., & GholamiSefidkouhi, M. 2019. Analyze of Talar River Water Quality using Multivariate Techniques. *Journal of Watershed Management Research*. 9 (18) ,250-259. Doi: 10.29252/jwmr.9.18.250

9- Basu, S., & Lokesh, K. S. 2014. Application of multiple linear regression and manova to evaluate health impacts due to changing river water quality. *Applied Mathematics*, 2014. https://www.scirp.org/html/2-7401995_44066.htm

10- Cheraghi, Z., Sarikhani, R., Farahpour, M., & Ghasemi, A. 2019. Evaluation and Statistical Analysis of Groundwater Quality Parameters and Index for Drinking in Khorramabad Region. *Water Resources Engineering*, 11(39), 1-14.

11- Das, A. 2023. Anthropogenic Effects on Surface Water Quality Assessment in Baitarani River Basin, Odisha Using GIS and MCDM Techniques. *Engineering Research Transcripts*, 5, 37–64. DOI: https://doi.org/10.55084/grinrey/ERT/978-81-964105-3-7_4

12- Diaz, R., Olan, M., & Valente, R. 2004. Review of approaches for classifying benthic habitats and evaluating habitat quality. *Journal of Environmental Management* 73: 165-181.

13- Ewaid, S. H., Abed, S. A., & Kadhum, S. A. 2018. Predicting the Tigris River water quality within Baghdad, Iraq by using water quality index and regression analysis. *Environmental Technology & Innovation*, 11, 390–398.

14- Fan, X., Cui, B., Zhao, H., Zhang, Z., & Zhang, H. 2010. Assessment of river water quality in Pearl River Delta using multivariate statistical techniques. *Procedia Environmental Sciences*, 2, 1220–1234.

15- Fierro, P., Valdovinos, C., Vargas-Chacoff, L., Bertrán, C., & Arismendi, I. 2017. Macroinvertebrates and Fishes as Bioindicators of Stream Water Pollution. InTech, 23-38, DOI: 10.5772/65084

16- GhassemiDehnavi, A., Sarikhani R., Hosseini H., Ahmadnejad Z. & Ebrahimi B. 2016. Qualitative and quantitative evaluation of surface water using statistical analysis in Azna River, Lorestan. *J. Environ. Water Eng.*, 2(4), 306 –321.

17- Gholizadeh, M., & Zibaei, M. 2020. Hydrochemical assessment of Chehelchai river water, Golestan province for drinking and agricultural purposes. *Iranian Journal of Health and Environment*., 13 (2), 283-298. (In Persian).

18- Haghiabi, A. H., Nasrolahi, A. H., & Parsaie, A. 2018. Water quality prediction using machine learning methods. *Water Quality Research Journal*, 53(1), 3–13. https://doi.org/10.2166/wqrj.2018.025

19- Jolliffe, I.T., & Cadima, J. 2016. Principal component analysis: A review and recent developments. Philosophical Transactions of the Royal Society A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences, 374(2065), 20150202

20- Kadam, A. K., Wagh, V. M., Muley, A. A., Umrikar, B. N., & Sankhua, R. N. 2019. Prediction of water quality index using artificial neural network and multiple linear regression modelling approach in Shivganga River basin, India. *Modeling Earth Systems and Environment*, 5(3), 951–962. https://doi.org/10.1007/s40808-019-00581-3

21- Kamal Jyoti Maji & Ramjee Chaudhary. 2019. Principal Component Analysis for Water Quality Assessment of the Ganga River in Uttar Pradesh, India. *Water Resources*, 46(5), 789–806. https://doi.org/10.1134/S0097807819050129

22- Kazemzadeh, M., & Malekian, A. 2016. Analysis of surface water quality parameters using multivariate statistical methods. *Pasture and watershed scientific-research journal*, 70(2), 465-478. [In Persian]

DOI: 10.22055/jise.2024.45876.2114

23- Kheradmand, M., Moghaddam, M. A., Zahiri, A., & Ghorbani, K. 2023. Determining of stage-discharge relationship for meandering compound channels using M5 decision tree model. International *Journal of Civil and Environmental Engineering*, 17(7), 284-288.

24- Kord, M. 2020. Development of Hydrogeochem software for investigation of hydrogeochemical properties and water quality. *Hydrogeology*, 5(2), 88-98. (In Persian)

25- Liu, J., Gao, Z., Feng, J., & Wang, M. 2023. Identification of the hydrochemical features, genesis, water quality and potential health hazards of groundwater in Dawen River Basin, North China. *Ecological Indicators*, 149, 110175.

26- Mahmoodlu, M., & Sayadi, M. 2020. Determining effective factors controlling chemical parameters of Gamasyab and Ghareh-Sou Rivers (Case study: Kermanshah Province). *Irrigation and Water Engineering*, 10(4), 96-114. doi: 10.22125/iwe.2020.110071

27- Malekian, A., Rozandi, Y., KhaileghiSigaroudi, S., & Farrokhzadeh, B. 2016. Examining temporal and spatial changes of underground water quality using the combined approach of Boolean logic, fuzzy logic and geostatistics (case study: Varamin plain). *Agricultural Applied Research*, 29(1), 126-135. [In Persian]

28- Mansour-Bahmani, A., Haghiabi, A. H., Shamsi, Z., & Parsaie, A. 2021. Predictive modeling the discharge of urban wastewater using artificial intelligent models (case study: Kerman city). *Modeling Earth Systems and Environment*, 7(3), 1917–1925. https://doi.org/10.1007/s40808-020-00900-z

29- Mohammadi, H., Kalantari, N., Anbari, A., & Pahlevanizade, S. 2021. Hydrochemical assessment of the Jareh Dam water resources; using multivariate statistical techniques and hydrochemical methods. *Advanced Applied Geology*, 10(4), 620-633. Doi: 10.22055/aag.2020.29692.1993

30- Motiee, H., McBean, E., Motiee, A. R., & Majdzadeh Tabatabaei, M. R. 2020. Assessment of climate change under CMIP5-RCP scenarios on downstream rivers glaciers – Sardabrud River of Alam-Kuh glacier, *Iran. International Journal of River Basin Management*, 18(1), 39–47. https://doi.org/10.1080/15715124.2019.1653311

31- Najafzadeh, M. and Mahmoudi-Rad, M., 2015. Estimation of the Maximum Scour Depth at Bridge Pier under Effects of Debris Accumulations using NF-GMDH Model and Evolutionary Algorithms. *Environment and Water Engineering*, 5(3), pp.213-225.

32- Nasir, M. F. M., Samsudin, M. S., Mohamad, I., Awaluddin, M. R. A., Mansor, M. A., Juahir, H., & Ramli, N. 2011. River water quality modeling using combined principle component analysis (PCA) and multiple linear regressions (MLR): A case study at Klang River, Malaysia. *World Applied Sciences Journal*, *14*, 73–82.

33- Nezaratian, H., Zahiri, J., Peykani, M. F., Haghiabi, A., & Parsaie, A. 2021. A genetic algorithm-based support vector machine to estimate the transverse mixing coefficient in streams. *Water Quality Research Journal*, *56*(3), 127–142. https://doi.org/10.2166/wqrj.2021.003

34- Nolan, B.T., Fienen, M.N., & Lorenz, D.L. 2015. A statistical learning framework for groundwater nitrate models of the Central Valley, California, USA. *Journal of Hydrology*, 531, 902-911

35- Nurollahi, S., AsghariMoghadam, A., Fijani, E., & Barzegar, R. 2018. Investigating the factors affecting the quality of underground water in Mashginshahr plain (Ardebil province) with an emphasis on the possible origin of some heavy metals. *Scientific Quarterly of Earth Sciences*, 29(114), 143-152 . [In Persian]

36- Ouma, Y. O., Okuku, C. O., & Njau, E. N. 2020. Use of artificial neural networks and multiple linear regression model for the prediction of dissolved oxygen in rivers: Case study of hydrographic basin of River Nyando, Kenya. *Complexity*, *2020*, 1–23.

37- Ouyang, Y. 2005. Evaluation of river water quality monitoring stations by principal component analysis. *Water Research*, *39*(12), 2621–2635.

38- Palaniselvan, G., Govindhan, P., Jayganesh, D., Kumar, M. D., & Chandraseelan, R. E. 2024. Water quality assessment: A case study in the Tuticorin district of Tamil Nadu in South India. *Urban Water Journal*, 1–13. https://doi.org/10.1080/1573062X.2024.2312525

39- Parsaie, A., & Haghiabi, A. H. 2017. Computational Modeling of Pollution Transmission in Rivers. *Applied Water Science*, 7(3), 1213–1222. https://doi.org/10.1007/s13201-015-0319-6.

40- Petersen, W., Bertino, L., Callies, U., & Zorita, E. 2001. Process identification by principal component analysis of river water-quality data. *Ecological Modelling*, 138(1–3), 193–213.

41- Pinto, R., Patrício, J., Baeta, A., Fath, B. D., Neto, J. M., & Marques, J. C. 2009. Review and evaluation of estuarine biotic indices to assess benthic condition. *Ecological indicators*, 9(1), 1-25.

42- Rooki, R., Ariafar, A., & AdeliNasab, J. 2017. Investigating the quality of underground water in the Gonabad plain of Khorasan Razavi aquifer using multivariate statistical methods. *Journal of Mineral Resources Engineering*, 2(1), 49-61. https://doi.org/10.30479/jmre.2017.1068

43- Qishlaqi, A., Kordian, S., & Parsaie, A. 2017. Hydrochemical evaluation of river water quality—A case study. *Applied Water Science*, 7(5), 2337–2342. https://doi.org/10.1007/s13201-016-0409-0

44- Quinlan, J.R., 1992, November. Learning with continuous classes. In *5th Australian joint conference on artificial intelligence* (Vol. 92, pp. 343-348).

45- Wang, Y. and Witten, I.H., 1996. Induction of model trees for predicting continuous classes.

46- Zare Abyaneh, H. 2014. Evaluation of multivariate linear regression and artificial neural networks in prediction of water quality parameters. Journal of Environmental Health Science and Engineering, 12(1), 40. *https://doi.org/10.1186/2052-336X-12-40*

47- Zhang H, Li H, Yu H, Cheng S 2020 Water quality assessment and pollution source apportionment using multi-statistic and APCSMLR modeling techniques in Min River Basin, China. Environmental Science and Pollution Research 27:1–14. https:// *doi.org/10.1007/s11356-020-10219-*

In The Name of God

Irrigation Sciences and Engineering

(Scientific)

Vol. 48 (3) **Fall 2025**

Board of Editors

AkhondAli, A. M.	**Professor**	**Faculty of Water and Environmental Engineering, Shahid Chamran University of Ahvaz, Ahvaz, Iran**
Ghomeshi, M	**Professor**	**Faculty of Water and Environmental Engineering, Shahid Chamran University of Ahvaz, Ahvaz, Iran**
Heydarpour, M.	**Professor**	**Faculty of Agriculture, Isfahan University of Technology**
Kashefipour, S. M.	**Professor**	**Faculty of Water and Environmental Engineering, Shahid Chamran University of Ahvaz, Ahvaz, Iran**
Liaghat, A. M.	**Professor**	**Faculty of Agriculture, University of Tehran**
Hosseinzadeh Dalir, A.	**Professor**	**Professor, Water Engineering Department, Faculty of Agriculture, University of Tabriz, Iran.**
Naseri, A. A.	**Professor**	**Faculty of Water and Environmental Engineering, Shahid Chamran University of Ahvaz, Ahvaz, Iran**
Zand Parsa, Sh.	**Professor**	**Faculty of Agriculture, Shiraz University of Technology**
Pagliara, Stefano.	**Professor**	**Department of Civil Engineering, University of Pisa,Italy**
Sai Hin, L.	**Associate Professor**	**Department Of Civil Engineering, Faculty of Engineering, University of Malaya, Maliysia**
Ahmadian, R.	**Professor**	**Department of Civil Engineering, School of Engineering, Cardiff University, UK**
Ritzema, H.	**Associate Professor**	**Water Resources Management Group, Environmental Sciences Group, Wageningen University & Research, Netherland**

Published by: Shahid Chamran University of Ahvaz, Faculty of Water Sciences Engineering, Ahvaz, Iran.
Director: BoromandNasab, S.
Editor-in-Chief: Kashefipour, S.M.
Editorial Manager: Yazdani, N
Type Setting: Yazdani, N.

E–mail: JISE.Water@Scu.ac.ir
JISE.Water@yahoo.com

Publication license of the Ministry of Culture and Islamic Guidance No. 10362/124 on 29/12/1998 and license of the Journal Review Office of the Ministry of Science, Research and Technology No. 11/3/1264 on 21/10/2009 for the Journal of Irrigation Sciences and Engineering.

Journal of
Irrigation Sciences and Engineering(JISE)
(Scientific)
ISSN 2588-5952
Vol. 48 (3)
Fall 2025

Iranian Hydraulic Association
Shahid Chamran University of Ahvaz
Faculty of Water Sciences Engineering

Contents

Title	Authors	Page
Estimation of sodium absorption ratio (SAR) and electrical conductivity (EC) using hybrid models of support vector regression and random forest-case study of Qatur river, west of Iran	M. Sharafi, J. Behmanesh, V. Rezaverdinejad and S. Samadianfard	**1**
The effect of a submerged jet on the characteristics of an asymmetric hydraulic jump in a corrugated bed	F. Davari-Dehkordi, J. Ahadiyan, S.M.Sajjadi, A. Scorzini and M. Di Bacco	**21**
Investigation DEA (Data Envelopment Analysis) Window application in the management processes of agricultural water consumptions (case study: Khozestan province)	D. Modhej and A. Dahimavi	**41**
Investigation the effect of aspect ratio of shallow reservoirs on distribution of suspended sediment concentration	M. Afrashteh and B. Lashkar-Ara	**55**
Suspended sediment load estimation using Support Vector Machine-Simulated Annealing algorithm and improved computational methods	H. Nozari, F. Chodani, M. Kalantari and A. Mehrabani Bashar	**75**
Effect of Netted Collar on Local Scouring around the Bridge Cylindrical Pile Groups	N. Bahrami and M. Ghomeshi	**95**
Determining the proposed cropping pattern Major crops using the water, energy and food index (case study: Irrigation and Drainage Network of Varamin Plain)	E. Abiar and M. Mashal	**109**
Classification and modeling based on soft Computing of Karun River: Gatund and Ahvaz Hydrometric Stations	Gh. Salehpour, M. Zayeri and M. Zeinivand	**125**